



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y
ARQUITECTURA
UNIDAD TICOMÁN
CIENCIAS DE LA TIERRA

**“APLICACIÓN DE UN MODELO PETROFÍSICO EN
FORMACIONES ARENO-ARCILLOSAS PARA
SIMULAR PROPIEDADES FÍSICAS.”**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO GEOFÍSICO

PRESENTA
FABIÁN DE LA CRUZ PÉREZ

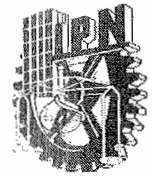


ASESOR DE TESIS
M. C. AMBROSIO AQUINO LÓPEZ

MÉXICO, D. F., 28 DE JUNIO DEL 2013.



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA
UNIDAD TICOMAN



"2013 Año de la Lealtad Institucional y Centenario del Ejército Mexicano"
 "80 Aniversario de la Escuela Superior de Ingeniería Textil"
 "65 Aniversario de la Escuela Superior de Ingeniería Química e Industrias Extractivas"
 "50 Aniversario del Centro Nacional de Cálculo"
 "50 Aniversario del CECyT 7 Cuauhtémoc"

México, D. F., a 20 de mayo de 2013

No. de Oficio: E.P. y T.117.2013

ASUNTO: SE COMUNICA TEMA DE TESIS PROFESIONAL

C. FABIÁN DE LA CRUZ PÉREZ
PASANTE DE LA CARRERA DE
INGENIERÍA GEOFÍSICA
P R E S E N T E

A continuación comunico a usted, el tema y contenido que deberá desarrollar en su tesis profesional, indicándole que tiene un año a partir de esta fecha, para elaborarla.

“APLICACIÓN DE UN MODELO PETROFÍSICO EN FORMACIONES ARENO-ARCILLOSAS PARA SIMULAR PROPIEDADES FÍSICAS”

CONTENIDO

- RESUMEN
- ABSTRACT
- OBJETIVO
- INTRODUCCION
- I. CONCEPTOS BÁSICOS EN EL ANÁLISIS DE FORMACIONES ARENO-ARCILLOSAS
- II. MODELOS DE FORMACIONES ARENO-ARCILLOSAS Y TÉCNICAS DE SIMULACIÓN
- III. ANÁLISIS DE DATOS DE NÚCLEOS
- IV. APLICACIÓN DEL MODELO PROPUESTO PARA ARENAS ARCILLOSAS
- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES
- BIBLIOGRAFÍA

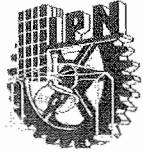
Atentamente
 “LA TÉCNICA AL SERVICIO DE LA PATRIA”

M. en C. EDUARDO PÉREZ FLORES
SUBDIRECTOR ACADÉMICO

EPF*mdv.



UNIDAD TICOMAN
SUBDIRECCIÓN ACADÉMICA



"2013 Año de la Lealtad Institucional y Centenario del Ejército Mexicano"
"80 Aniversario de la Escuela Superior de Ingeniería Textil"
"65 Aniversario de la Escuela Superior de Ingeniería Química e Industrias Extractivas"
"50 Aniversario del Centro Nacional de Cálculo"
"50 Aniversario del CECyT 7 Cuauhtémoc"

México, D. F., a 13 de junio de 2013.

M. en C. EDUARDO PÉREZ FLORES
SUBDIRECTOR ACADÉMICO
P R E S E N T E

Por este conducto, hacemos constar que el Tema de Tesis Profesional por la opción de **Tesis Individual**, presentada por el pasante de la carrera de **Ingeniería Geofísica C. FABIÁN DE LA CRUZ PÉREZ**, fue revisado y aprobado por los suscritos considerándolo ampliamente desarrollado, por lo tanto esa Subdirección a su cargo, puede señalar fecha para realizar el Examen Oral.

TITULARES

M. en C. AMBROSIO AQUINO LÓPEZ

DR. ENRIQUE COCONI MORALES

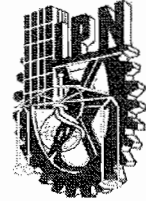
M. en C. DANIEL DORANTES HUERTA

ING. EFRÉN MURILLO CRUZ

M. en C. FRANCISCO RUBÉN ROCHA DE LA VEGA



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
UNIDAD TICOMAN



"2013 Año de la Lealtad Institucional y Centenario del Ejército Mexicano"
"80 Aniversario de la Escuela Superior de Ingeniería Textil"
"65 Aniversario de la Escuela Superior de Ingeniería Química e Industrias Extractivas"
"50 Aniversario del Centro Nacional de Cálculo"
"50 Aniversario del CECyT 7 Cuauhtémoc"

México, D. F., a 25 de abril de 2013.

No. de Oficio: E. P. y T.108.2013.

ASUNTO: SE SOLICITA TEMA
DE TESIS Y ASESORÍA.

M. en C. AMBROSIO AQUINO LÓPEZ
P R E S E N T E.

En atención a la solicitud del C. **FABIAN DE LA CRUZ PÉREZ**, pasante de la Carrera de **Ingeniería Geofísica** y en base al Reglamento de Titulación Profesional del I. P. N., Capítulo II, Artículo 5, Fracción II y el Artículo 7 Inciso I, se le informa que ha sido seleccionado para asesorar la tesis del pasante mencionado. Por lo que solicito a usted se sirva proponer dentro de un plazo de 30 días calendario, el tema de tesis y contenido a desarrollar por el interesado.

Seguro de contar con su participación, lo saludo cordialmente.

A t e n t a m e n t e

"LA TÉCNICA AL SERVICIO DE LA PATRIA"


M. en C. **EDUARDO PÉREZ FLORES**
SUBDIRECTOR ACADÉMICO



C.c.p.- Ing. Gabriela de los Santos Cano.- Jefa del Departamento de Innovación Educativa
c.c.p.- Interesado
Expediente
EPF*mdv

UNIDAD TICOMAN
SUBDIRECCIÓN ACADÉMICA

DEDICATORIA

A mi madre, Elvira Pérez Alamilla que con gran esfuerzo, amor y dedicación ha hecho de mí una mejor persona, inculcándome valores y enseñándome día a día lo que es luchar por lo que más quieres. A ella quien ha sido mi motivación y mi ejemplo de vida. Te amo mucho Mamá.

A mis hermanas, Heidi y Jehovany, porque son mis ejemplos a seguir, por su apoyo y consejos para poder llegar a lo que soy y sobre todo por ser mis segundas madres.

A mis sobrinos, Karla Estefania, Fabián Ricardo y Pedro Emilio que son mi motivación y me han dado amor y felicidad.

A ti amor, Itzetl Ortiz Avila, por tu apoyo, amor y comprensión, por escucharme y aconsejarme en las buenas y en las malas y por ser parte importante para llevar a cabo este trabajo.

A los que hoy no están en vida pero sí en mi corazón, mi abuela Canuta (QEPD), mis tíos Adolfo (QEPD) y Carlos (QEPD) y mi primo José (QEPD).

AGRADECIMIENTOS

Antes que nada me gustaría agradecer sinceramente a mi asesor de Tesis, M. en C. Ambrosio Aquino López, quien es una persona que se ha ganado mi admiración, por su esfuerzo y dedicación, sus conocimientos, sus orientaciones, su manera de trabajar, su paciencia y su motivación que fueron fundamentales para mi formación como profesional.

A mi Alma Mater el Instituto Politécnico Nacional y a mi casa de estudios la ESIA Ticomán por haberme permitido realizar mis estudios profesionales en tan prestigiosa Universidad y en donde tuve la oportunidad de conocer maestros, amigos y compañeros que me compartieron conocimientos y experiencias que hicieron de mi mejorar como persona y estudiante.

Al Instituto Mexicano del Petróleo por haberme aceptado en el programa de Becas de Estancia para tesis de licenciatura y darme la oportunidad de aportar mis conocimientos en la institución de desarrollo tecnológico en el ámbito petrolero con más prestigio en México.

A mis sinodales y maestros, Dr. Enrique Coconi, M. en C. Daniel Dorantes, M. en C. Rubén Rocha y Ing. Efrén Murillo, por sus críticas constructivas y sus conocimientos compartidos en clases.

A mis familiares, mi mamá, mis hermanas, mis tíos Concepción, Asunción, Freddy, Leticia, José del C. y Enrique, y a mis primos, Alfredo, Lupita, Diego, Conchita, Nayeli y Gisell, por su apoyo tanto económico como moral y por estar siempre conmigo en las buenas y en las malas.

INDICE

RESUMEN	ix
ABSTRACT.....	x
OBJETIVO	xi
INTRODUCCIÓN	xii
CAPÍTULO 1. CONCEPTOS BÁSICOS EN EL ANÁLISIS DE FORMACIONES ARENO-ARCILLOSAS.....	1
1.1 Formaciones clásticas.....	1
1.1.1 Arenas limpias.....	4
1.1.2 Arenas con diferentes distribuciones de arcilla.....	5
1.2 Propiedades Efectivas.....	9
1.2.1 Resistividad.....	10
1.2.2 Velocidades Elásticas.....	11
1.3 Propiedades petrofísicas.....	13
1.3.1 Porosidad.....	14
1.3.2 Volumen de arcilla.....	16
CAPÍTULO 2. MODELOS DE FORMACIONES ARENO-ARCILLOSAS Y TÉCNICAS DE SIMULACIÓN.....	18
2.1 Técnicas convencionales de propiedades físicas.....	18
2.1.1 Técnicas de resistividad.....	18
2.1.2 Técnicas de velocidad.....	22
2.2 Límites de Hashin-Shtrikman.....	26
2.3 Métodos de medio efectivo.....	29
2.4 Descripción del modelo propuesto y técnicas de simulación para cada nivel.....	32
CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE DATOS DE NÚCLEOS.....	35
3.1 Métodos utilizados en la medición de las propiedades.....	35

3.2 Evaluación del conjunto de muestras.....	39
CAPITULO 4. APLICACIÓN DEL MODELO PROPUESTO PARA ARENAS	
ARCILLOSAS.....	48
4.1 Simulación de los niveles de homogenización e inversión conjunta.....	48
4.2 Resultados de la inversión y justificación.....	49
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	54
BIBLIOGRAFÍA	55

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1. Grado de Redondez de acuerdo a la esfericidad de la roca, modificado de Powers, 1982.</i>	<i>3</i>
<i>Figura 2. Selección de materiales clásticos (areniscas) modificado de Compton, 1962.</i>	<i>3</i>
<i>Figura 3. Distribuciones de arcilla en las arenas modificado de Asquith, 1990.</i>	<i>5</i>
<i>Figura 4. Arcilla Dispersa del tipo Pore Filling modificado de Neasham, 1977.</i>	<i>6</i>
<i>Figura 5. Arcilla Dispersa del tipo Pore Lining modificado de Neasham, 1977.</i>	<i>6</i>
<i>Figura 6. Arcilla Dispersa del tipo Pore Bridging modificado de Neasham, 1977....</i>	<i>6</i>
<i>Figura 7. Gráfica de datos de tiempos de tránsito de Onda P y S para distintos tipos de roca de Pickett, 1963. Las líneas se basan en la razón V_p/V_s.</i>	<i>13</i>
<i>Figura 8. Resultado del experimento de Archie en el que relaciona la resistividad de la roca con la saturación de agua modificado de Torres-Verdin, 2001.....</i>	<i>20</i>
<i>Figura 9. Gráfica de las ecuaciones de Han et al, 1986 con los datos utilizados en este trabajo.....</i>	<i>25</i>
<i>Figura 10. Gráfica de las ecuaciones de Tosaya y Nur ,1982 con los datos utilizados en este trabajo.....</i>	<i>25</i>
<i>Figura 11. Gráfica de las ecuaciones de Castagna, 1985 con los datos utilizados en este trabajo.....</i>	<i>26</i>
<i>Figura 12. Límites de Hashin Shtrikman para la conductividad de dos elementos (Agua y cuarzo).</i>	<i>29</i>
<i>Figura 13. Esquema de la representación de un modelo real por medio de un modelo equivalente.</i>	<i>30</i>

<i>Figura 14. Aproximación de Medio Efectivo descrito con un medio que contiene 2 elementos, los cuales se mezclan y son introducidos en un medio efectivo como inclusiones hasta llegar a obtener un modelo equivalente.</i>	<i>32</i>
<i>Figura 15. Modelo de arenas arcillosas propuesto para la metodología del presente trabajo.</i>	<i>33</i>
<i>Figura 16. Diagrama esquemático de la ley de Boyle en un porosímetro de Helio modificado de Peter y Keiser, 1992.....</i>	<i>36</i>
<i>Figura 17. Esquema de la Ley de Bragg la cual es el principio de la difracción de rayos X modificado de http://servicios.fis.puc.cl/rayosx/teoria.html.</i>	<i>37</i>
<i>Figura 18. Esquema de la configuración óptica de un difractómetro de rayos X tomada de http://servicios.fis.puc.cl/rayosx/teoria.html.</i>	<i>38</i>
<i>Figura 19. Esquema de un sistema ultrasónico pulse echo tomado de http://www.virtualengg.com/ultrasonic.html.</i>	<i>39</i>
<i>Figura 20. Grafico cruzado de porosidad contra la velocidad de onda P.</i>	<i>41</i>
<i>Figura 21. Grafico cruzado de porosidad contra velocidad de onda S.</i>	<i>41</i>
<i>Figura 22. Grafico cruzado de porosidad contra resistividad.....</i>	<i>42</i>
<i>Figura 23. Grafica del efecto de la arcilla en la conductividad a altas y bajas salinidades.</i>	<i>43</i>
<i>Figura 24. Determinación de la velocidad de onda P del cuarzo.....</i>	<i>46</i>
<i>Figura 25. Determinación de la velocidad de onda S del cuarzo.....</i>	<i>46</i>
<i>Figura 26. Errores de los resultados de la inversión comparados con los datos medidos.....</i>	<i>49</i>

<i>Figura 27. Comparación de las velocidades de onda P simuladas con las medidas.</i>	50
<i>Figura 28. Comparación de la velocidad de onda S simulada con la medida.</i>	50
<i>Figura 29. Comparación de las resistividades simuladas con las medidas.</i>	51
<i>Figura 30. Comparación de las resistividades simuladas con las medidas.</i>	51

LISTA DE TABLAS

<i>Tabla 1. Tabla de Udden-Wentworth (modificado por Teruggi, 1982) que presenta la clasificación de los sedimentos y las rocas clásticas de acuerdo al tamaño de los granos.</i>	2
<i>Tabla 2. Porosidades de las rocas clásticas tomado de notas del curso de Petrofísica de Glover, 2001.</i>	15
<i>Tabla 3. Datos de Han et al, 2011 delimitados por el contenido de arcilla (>5%) y minerales de la matriz diferentes al cuarzo (<10%).</i>	44
<i>Tabla 4. Parámetros de modelo de las componentes de la roca.</i>	45
<i>Tabla 5. Concentraciones de arcilla laminar y dispersa en cada una de las muestras.</i>	52

RESUMEN

El contenido de arcilla en las arenas afecta las propiedades físicas como la resistividad eléctrica y las velocidades elásticas, también las propiedades petrofísicas como la porosidad, es por ello que se han desarrollado técnicas para analizar este tipo de formaciones pero no todas toman en cuenta la localización de la arcilla: arcilla dispersa que se encuentra en el poro, arcilla laminar que sustituye granos de cuarzo y arcilla laminar que se presenta como laminación. En el presente trabajo se plantea un modelo petrofísico para arenas arcillosas que consta de tres niveles de homogenización: Nivel poro que contiene agua y arcilla dispersa, Nivel arena que contiene poros y granos de cuarzo; y Nivel intercalación de arcilla laminar y arena. El método de simulación utilizado es el EMA (Effective Medium Approximation) que considera la mezcla de los elementos que conforman la roca sin necesidad de un host, permitiendo la simulación conjunta de propiedades físicas. Posteriormente se realiza la inversión por medio de una función de costo (cuadrado de la diferencia de lo medido y lo simulado) para obtener las propiedades efectivas de la roca y las concentraciones de arcilla dispersa y laminar. La metodología propuesta se prueba con datos de núcleos de Han et al, 2011 que son muestras de formaciones areno arcillosas recolectadas del Reino Unido y China, teniendo un error en los datos simulados menor al 15 % validando el modelo propuesto.,

ABSTRACT

The clay content in the sands affects the physical properties such as electrical resistivity and elastic velocities, also petrophysical properties such as porosity, for that reason has developed techniques to analyze the clastic formations, but not all take into account the distribution of clay: dispersed clay which is located in the pore, structural clay that replaces grains of quartz and laminar clay that presents as lamination. In the present thesis, we propose a petrophysical model for shaly sands consisting of three homogenization levels: Pore level containing water and dispersed clay, sand level containing pores and grains of quartz and intercalation level of laminar clay and sand. The simulation method used is EMA (Effective Medium Approximation) which considers the mixture of the elements of the rock without requiring a host allowing joint simulation of physical properties. Then we realized the inversion through of a cost function (square of the difference of measured and simulated) for getting the effective properties of the rock and concentrations of dispersed and laminar clay. The proposed methodology is tested with core data from Han et al, 2011 which are shaly sands formations samples collected from UK and China, with an error of the simulated data less than 15% validating the proposed model.

OBJETIVO

Aplicar un modelo petrofísico que permita simular diferentes propiedades físicas y por medio de inversión, obtener propiedades efectivas y los tipos de distribución de arcilla que ayuden a entender el comportamiento petrofísico de las formaciones areno-arcillosas, de esta manera tener una herramienta de interpretación no convencional de registros de pozo y de núcleos. La validación de la simulación numérica se realiza con información de datos de núcleos.

INTRODUCCIÓN

El papel de las formaciones clásticas en la industria petrolera es relevante ya que el 37 % de la producción total de hidrocarburos proviene de este tipo de rocas, pero es importante mencionar que el reto es cada vez más complejo debido a componentes como la arcilla y las sales en el agua de formación, por ello es necesario tener interpretaciones de registros geofísicos y análisis petrofísicos confiables de los yacimientos no convencionales como lo son: yacimientos de lutitas gasíferas, yacimientos de baja resistividad debido a intercalaciones de arena y lutita y yacimientos de baja resistividad debido a salinidades altas en el agua de la formación.

Las primeras técnicas para evaluación de formaciones para resistividad y velocidades elásticas parten de los trabajos de Archie, 1942 y Wyllie, 1956 respectivamente; sin embargo estas técnicas no consideran la presencia de arcilla por lo que se han realizado modificaciones de estas ecuaciones que permiten tomar en cuenta el efecto de esta componente (Waxman-Smits, 1968 y Raymer-Hunt-Gardner, 1980 respectivamente).

Debido a la complejidad de la interpretación de formaciones areno-arcillosas se han desarrollado técnicas alternativas de evaluación de formaciones como la inversión conjunta de diferentes propiedades y modelos volumétricos. Estos tipos de evaluaciones permiten encontrar los tipos de distribuciones de arcilla en las rocas clásticas ya que cada uno tiene diferentes efectos en el comportamiento de las propiedades físicas medidas.

En este trabajo se utilizaron datos de muestras de arenas arcillosas (Han, 2011) recolectados del Reino Unido y China, los cuales cuentan con datos de resistividad eléctrica, velocidades elásticas, porosidad y mineralogía. En el análisis de estos datos se calcularon los parámetros de inversión de la matriz y de fluido por medio de gráficas cruzadas de Velocidad elástica y Resistividad contra la porosidad. Posteriormente, se realizó la simulación por medio de un modelo petrofísico volumétrico compuesto por tres niveles de homogenización, el primer

nivel se conforma por agua y arcilla dispersa, el segundo nivel se conforma por granos de arena y poros y el tercer nivel está formado por intercalaciones de arena y arcilla laminar. Por último se estimaron las propiedades efectivas y se compararon con los datos medidos en los núcleos para calcular los volúmenes de los tipos de distribuciones de arcilla y así comprender el efecto de cada una de estas en las propiedades físicas y petrofísicas de la roca.

CAPÍTULO 1. CONCEPTOS BÁSICOS EN EL ANÁLISIS DE FORMACIONES ARENO-ARCILLOSAS.

Con el fin de estudiar las propiedades del subsuelo se aplican métodos indirectos por medio de campos naturales y artificiales que pueden ser en superficie o dentro de un pozo con los cuales se miden propiedades físicas y a partir de éstos, se estiman propiedades petrofísicas de las formaciones, y se correlacionan con la geología regional del campo de estudio y con las muestras tomadas en la perforación, para tener una evaluación de formación confiable.

En particular, este trabajo está enfocado en el estudio de arenas arcillosas, por lo que se tuvieron que tener muy claros los conceptos de formaciones clásticas, su proceso de formación y sus características, los cuales nos ayudaron a entender el comportamiento de la roca y a realizar el modelo petrofísico, ya que en gran medida éstas dependen el comportamiento de sus propiedades físicas y petrofísicas.

1.1 Formaciones clásticas.

Las formaciones clásticas son un conjunto de rocas sedimentarias formadas por fragmentos de rocas y minerales preexistentes debido al intemperismo, que son transportados hasta el lugar de depósito en forma de partículas sólidas por diversos agentes: agua, hielo, viento y acción de la gravedad; que posteriormente se compacta por el peso de los materiales suprayacentes reduciendo el espacio poroso y eliminando parte del agua contenida, dejando minerales acarreados que forman nuevos minerales que permiten la cementación de la roca (Duque Escobar, 2003).

Las componentes de una roca clástica son:

- **Clastos:** Son los fragmentos de rocas o minerales preexistentes (origen detrítico).
- **Poros:** Son los espacios intersticiales entre los clastos.

- Matriz: Está formada por fragmentos de granos finos que se pueden ajustar a los clastos (origen detrítico).
- Cemento: Es un material resultado de procesos de precipitación a partir de las soluciones acuosas que circulan e interaccionan con las rocas.

Las rocas clásticas son clasificadas principalmente por tamaño de grano, en la Tabla 1 se presenta con detalle la clasificación de sedimentos.

	CLASTO	SEDIMENTO	mm	SEDIMENTITA ó ROCA SEDIMENTARIA	
PSEFITA	Bloque	Aglomerado <i>Aglomerado (Grava de bloques)</i>		Aglomerado <i>Aglomerado (Conglomerado de bloques)</i>	
	Guijón	Grava	256	Conglomerado o brecha	
	Guijarro		128		<i>Grueso</i>
	Guija		64		<i>Mediano</i>
8			<i>Fino</i>		
PSAMITA	Grano	Arena	4	Arenisca	
			2		<i>Muy gruesa</i>
			1		<i>Gruesa</i>
			0,5		<i>Mediana</i>
			0,25		<i>Fina</i>
			0,125		<i>Muy fina</i>
PELITA	Partícula	Limo	0,062	Limolita	
			0,031		<i>Grueso</i>
			0,016		<i>Mediano</i>
			0,008		<i>Fino</i>
			0,004		<i>Muy fino</i>
			0,002		<i>Gruesa</i>
		Arcilla	Arcilla	0,002	<i>Mediana</i>
				0,001	<i>Fina</i>
				0,0006	<i>Muy fina</i>

Tabla 1. Tabla de Udden-Wentworth (modificado por Teruggi, 1982) que presenta la clasificación de los sedimentos y las rocas clásticas de acuerdo al tamaño de los granos.

Los rasgos característicos más importantes a observar para describir las rocas sedimentarias son:

- Esfericidad: En realidad se refiere a la forma de los clastos, siendo la forma ideal comparable a una esfera. Para describir esta propiedad se utiliza tres ejes ortogonales denominados a, b, c siendo a el mayor, b intermedio y c el

menor y según la longitud que presenten se diferencian las siguientes formas (Fig. 1)

- Redondez: Tiene que ver con el grado de angulosidad de las aristas y vértices de un clasto, independientemente de su forma. Esta es una propiedad muy importante pues está relacionada con el transporte, el mayor o menor desgaste indicará mayor o menor transporte (Fig. 1).



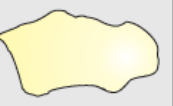









Bien redondeado	Redondeado	Subredondeado	Subangular	Angular	Muy angular	
						Baja Esfericidad
						Alta Esfericidad

Figura 1. Grado de Redondez de acuerdo a la esfericidad de la roca, modificado de Powers, 1982.

- Selección: Se refiere al grado de variación del tamaño de las partículas y está relacionado con las características del medio de transporte y con la distancia, por ejemplo los depósitos eólicos son bien seleccionados en general, los glaciares debido a su competencia elevada pueden transportar hasta bloques de cientos de metros, por lo que la selección es baja (Fig. 2).

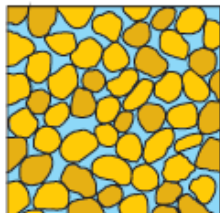
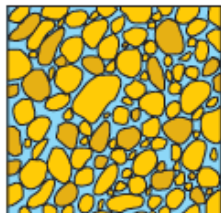
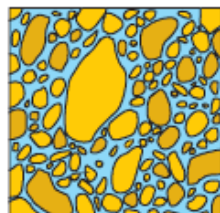
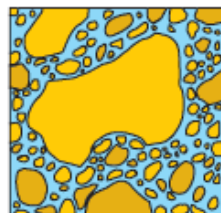
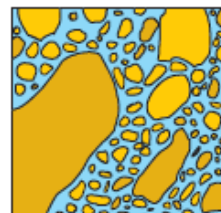
SELECCIÓN				
				
Muy bien seleccionado	Bien seleccionado	Moderadamente seleccionado	Pobremente seleccionado	Muy pobremente seleccionado

Figura 2. Selección de materiales clásticos (areniscas) modificado de Compton, 1962.

- **Fábrica y empaquetamiento:** La fábrica es la propiedad que se relaciona con la orientación o la falta de los elementos que componen la roca, por ejemplo los ejes mayores de los clastos, las valvas fósiles y minerales de hábito laminar. El empaquetamiento en cambio se relaciona con el grado de contacto que presentan los clastos entre sí. De esto dependerá la relación entre volúmenes ocupados por clastos y por espacios vacíos o rellenos por matriz y cemento.

1.1.1 Arenas limpias.

Las arenas, por su proceso de formación son potencialmente productoras de hidrocarburo, es por ello que, hay que tener el conocimiento sobre las características de este tipo de rocas ya que es la base de formaciones complejas como las arenas arcillosas.

Los yacimientos de areniscas representan el 37% dentro de la producción de hidrocarburo en rocas sedimentarias (Halliburton, 2001), estos yacimientos generalmente son creados por la acumulación de grandes cantidades de sedimentos clásticos. Las areniscas limpias son rocas sedimentarias clásticas compuestas de partículas de tamaño de arena, unidos por un cemento constituido de elementos comúnmente de sílice, óxido de hierro, o carbonato de calcio. Las partículas de arena por lo general son de cuarzo, contiene alrededor del 85-90% de cuarzo y su término para la roca es arenisca (Link, 1982).

Las arenas limpias son una formación libre de contenido de arcilla o con un contenido de arcilla muy bajo <1%, por lo cual se considera solo de granos de cuarzo y poros que contienen agua e hidrocarburo como es el caso de las arenas Fontainebleau, que son analizadas para hacer pruebas y posteriormente diseñar modelos petrofísicos. El análisis de estas formaciones es importante debido a que se pueden estimar propiedades micromecánicas (como la forma de poro) que pueden ser usadas cuando hay presencia de arcilla.

1.1.2 Arenas con diferentes distribuciones de arcilla.

Las arenas raramente son limpias porque a veces contienen otros minerales diferentes del cuarzo, tales como minerales arcillosos, los cuales afectan la calidad del yacimiento así como sus propiedades físicas. Estos minerales arcillosos se pueden encontrar sustituyendo granos de cuarzo como arcilla estructural, en el espacio poroso como arcilla dispersa y en intercalaciones como arcilla laminar (Fig. 3). La distribución de arcilla depende de las condiciones de depósito, de la compactación, bioturbación (Actividad orgánica que perturba las formaciones) y diagénesis (Sams y Andrea, 2001).

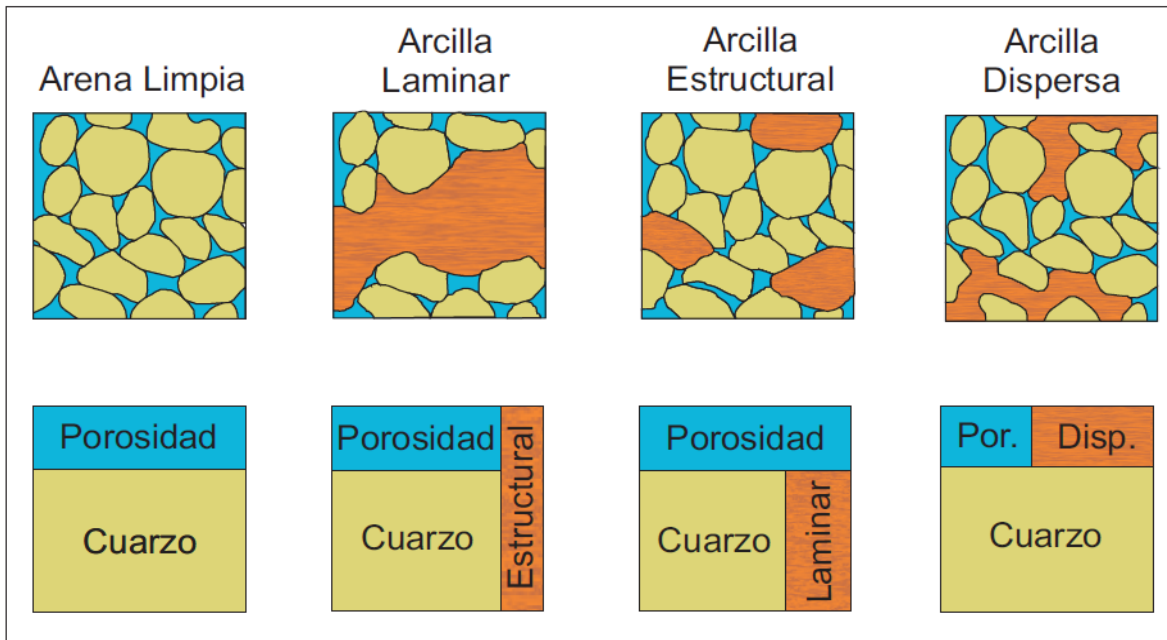


Figura 3. Distribuciones de arcilla en las arenas modificado de Asquith, 1990.

Arcilla dispersa. Esta se encuentra en el espacio poroso, y suple parte del fluido que se encuentra ahí. Esta tiene un amplio efecto en el flujo y en la saturación de fluidos sin tener mucho efecto en la porosidad total de la roca. Cabe mencionar que hay tres formas de arcilla dispersa en los yacimientos de arenas (Neasham, 1977):

- Pore Filling. En el cual la arcilla se encuentra en la parte intersticial.

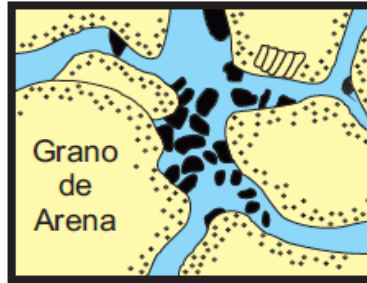


Figura 4. Arcilla Dispersa del tipo Pore Filling modificado de Neasham, 1977.

- Pore Lining. Las arcillas se adjuntan a las paredes de los poros y forman un revestimiento continuo de minerales muy delgados y finos.

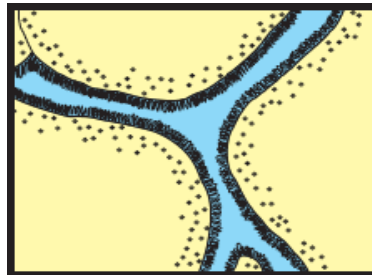


Figura 5. Arcilla Dispersa del tipo Pore Lining modificado de Neasham, 1977.

- Pore Bridging. Son similares a los poros revestidos por arcillas, solo que estos se extienden hacia dentro del poro o garganta de poro y crea un efecto de puente.

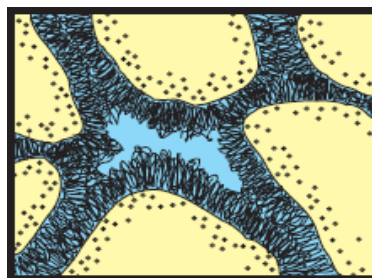


Figura 6. Arcilla Dispersa del tipo Pore Bridging modificado de Neasham, 1977.

Las arenas que contienen arcillas dispersas se depositan en un régimen de flujo único, y las arcillas dispersas se forman posteriormente dentro de la arena como resultado de la autigénesis (Alteración de un mineral para formar un nuevo

mineral, que puede o no puede actuar como un cemento) o, a través de bioturbación post-deposicional, o diagénesis. También las arcillas pueden desarrollarse como resultado de la precipitación o por alteración de minerales de silicatos preexistentes.

Las arcillas dispersas pueden aumentar la saturación total de agua, reduciendo significativamente la resistividad, la porosidad y la permeabilidad de la arena. Por lo tanto, cuando el contenido de arcilla dispersa excede aproximadamente 40% de la porosidad de una arena, puede afectar gravemente a la producción del yacimiento. El contenido de arcilla que se encuentra dentro del espacio poroso, puede ser perjudicial o en ciertos casos benéficos para la producción de hidrocarburo, ya que si encontramos gran cantidad de arcilla dispersa esta hace que el espacio poroso efectivo se reduzca, y por tanto haya una permeabilidad demasiado baja; en cambio, si encontramos contenido de arcilla dispersa muy bajo, esto puede ayudarnos debido a que las arcillas tienen ciertas propiedades físicas que hacen que las partículas se hidraten y permita al hidrocarburo que fluya más libremente.

Arcilla estructural. En una arena con este tipo de distribución de arcilla, por lo regular los granos de arcilla se encuentran distribuidos junto con los de la arena. Por lo cual esto no afecta de manera considerable las propiedades como la porosidad y permeabilidad. Las arcillas estructurales consisten en nódulos o fragmentos de arcillas litificadas que han sido mezcladas con granos de arena para formar parte de la matriz de la arenisca. En comparación con las arcillas dispersas, los cuales su tamaño de grano es tan pequeño que ocupan los vacíos entre los granos, las arcillas estructurales tienen un tamaño granular que es tan grande como los granos de arena, por ello las arcillas estructurales ocupan parte de la matriz.

La formación de las arcillas estructurales se produce de tres modos:

- Como fragmentos de lutitas que se han depositado simultáneamente con los granos de arena de tamaño comparable.

- Como nódulos que sustituyen a los granos seleccionados a través de la diagénesis (como cuando feldespato se transforma en arcilla).
- Como nódulos introducidos a través de la bioturbación.

Las arenas que contienen arcillas estructurales se depositan bajo un régimen de flujo único, los fragmentos de arcilla se depositan simultáneamente junto con los granos de arena. Debido a su tamaño, las arcillas estructurales actúan como granos en la matriz, y por lo tanto no alteran las propiedades del yacimiento a través de la obstrucción de espacios intersticiales entre los granos. Éstas no ocurren comúnmente en cantidades que afecten a la calidad del yacimiento. Sin embargo, cuando se evalúan los yacimientos que contienen arcillas estructurales, la estimación debe tener en cuenta la forma en que la arcilla afectará el comportamiento de las curvas del registro, en lugar de solo considerar la respuesta del registro como una arena homogénea. Según Visser, 1988, la arcilla laminar y estructural producen respuestas similares de registro.

Arcilla laminar. Al hablar de arcilla laminar nos referimos a estratos de arcilla con varias pulgadas de espesor, intercaladas unas con otras con estratos de areniscas. La arena total y los intervalos de arcilla laminada reflejan múltiples ciclos de depositación bajo un régimen de flujo dual caracterizada por fluctuaciones en los niveles de energía. Este régimen requiere mayor energía para la depositación de granos de arena que se requieren para los componentes más ligeros de arcillas.

Los yacimientos que contienen lutitas laminadas alternan las capas de arenas y capas delgadas de lutitas y arcillas que tienen cero porosidades efectivas por lo que se genera un medio anisótropo. Estas laminaciones de lutitas no afectan la resistividad, porosidad y permeabilidad de las arenas que rodean ellas mismas, y una fracción de lutita de hasta 60% puede ser tolerada en el yacimiento. Pero una problemática en las herramientas de registros es la resolución vertical ya que no permite diferenciar entre las arenas y las lutita. Por lo que varias herramientas de registros promedian sus lecturas sobre tales intercalaciones (Asquith, 1990)

Aunque las intercalaciones de lutita son generalmente más delgadas que las capas de arena adyacentes, los constituyentes de arcilla contribuyen a un cambio desproporcionado de la resistividad y la porosidad por los espesores. Las propiedades petrofísicas y de yacimiento entre cada capa puede variar debido a cambios en las proporciones de arcillas dentro de cada laminación. Sin embargo, Asquith en 1990 encontró que debido a su origen detrítico, las laminaciones de arcilla y arenas normalmente tienen las mismas arcillas y contenido de agua adyacentes como capas de lutita gruesa. Esta similitud conduce a la suposición de que las resistividades de la arcilla laminar serán similares a los de las lutitas gruesas adyacentes. Por ello, es seguro usar ecuaciones de análisis de registro que requieren resistividades de arcilla, y en tales ecuaciones, la resistividad de la lutita se utiliza para representarla en las arenas arcillosas.

1.2 Propiedades Efectivas.

Las propiedades físicas de las rocas y minerales se han estudiado desde hace años con el fin de explorar el subsuelo en la búsqueda de hidrocarburos, las cuales se analizan en conjunto para obtener, mediante ecuaciones empíricas y modelos petrofísicos, propiedades petrofísicas y determinación de litología que permitan hacer una evaluación del yacimiento.

Las velocidades elásticas y la resistividad eléctrica son propiedades que, por lo regular, se toman en muestras de núcleos y registros geofísicos. Las velocidades elásticas nos permiten conocer el grado de compactación y rigidez de la roca con las cuales podemos determinar litología; y la resistividad eléctrica nos permite hacer una evaluación del tipo de fluido.

Las rocas debido a factores mecánicos y químicos contienen heterogeneidades como fracturas, cavidades o inclusiones que pueden ser considerados como microheterogeneidades, si son a nivel microscópico, con los cuales se definen las propiedades efectivas, ya que las herramientas de medición de registros y núcleos no ven éstas debido a su resolución vertical y lo que se tiene es un efecto de capas en la medición (Gueguén, 1994).

1.2.1 Resistividad.

La prospección eléctrica es uno de los métodos más utilizados en la industria petrolera, tanto en registro geofísicos como en pruebas de núcleos. Es por ello que revisaremos los conceptos de resistividad eléctrica de manera física.

La resistividad eléctrica ρ y su inverso la conductividad eléctrica σ son propiedades eléctricas de los materiales la cual se caracteriza por el transporte de cargas eléctricas. Definido de otra forma, es la dificultad o facilidad que presenta un material al paso de la corriente eléctrica.

Cuando un campo eléctrico estático \vec{E} es aplicado, una densidad de corriente \vec{J} es establecido debido al desplazamiento de partículas cargadas como electrones y/o iones. Este fenómeno es descrito en la ecuación de Maxwell cuando un material es isótropo como:

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} = \frac{1}{\rho} \vec{E} \quad \text{Ec. 1}$$

Donde \vec{J} es la densidad de corriente, σ es la conductividad eléctrica, \vec{E} es el campo eléctrico aplicado y ρ es la resistividad eléctrica.

Cuando un material es anisótropo la ec. 1 se define como:

$$J_i = \sigma_{ij} E_j \quad \text{Ec. 2}$$

Donde i, j representan las componentes X y Y de un vector.

En una roca la propagación de la corriente eléctrica es por los fluidos contenidos en ella, ya que los minerales se comportan como aislantes. Pero la resistividad eléctrica de las rocas está influenciada por los siguientes factores:

- La resistividad de los minerales que forman los granos de la roca.
- La resistividad de los líquidos y gases que contienen los poros.

- La porosidad de la roca
- La textura de la roca, y la forma y distribución de sus poros.
- Los procesos que ocurren en el contacto de los líquidos de los poros y los granos.

1.2.2 Velocidades Elásticas.

Los registros sísmicos tienen un papel importante en la comprensión de la física de rocas ya que se pueden determinar litología y porosidad, con base en las relaciones entre las velocidades de propagación de ondas sísmicas y propiedades elásticas de la roca.

Las velocidades de las ondas elásticas son determinadas por el tiempo que tardan en pasar el medio en el cual se propagan y son afectadas por las condiciones geológicas. Las ondas sísmicas pueden subdividirse en dos tipos de ondas en base a la dirección de la propagación de la onda sísmica respecto a la dirección que las partículas toman al ser desplazados durante la propagación. Para las ondas compresionales, las partículas en el medio se mueven paralelo a la dirección de propagación. Para las ondas de corte, las partículas del medio se mueven perpendicularmente a la dirección de propagación. Dentro de un medio, las ondas de compresión se propagan más rápido que las ondas de corte, por esta razón, las ondas de compresión se refieren generalmente como ondas primarias u ondas P y las ondas de corte también se conocen como ondas secundarias, u ondas S. Las magnitudes de las velocidades V_p y V_s dependen de las características litológicas de las rocas ya que afectan los parámetros elásticos y densidad de las rocas de las cuales dependen las mismas.

Las velocidades de propagación para una roca isotrópica, homogénea y elástica son calculadas con las siguientes ecuaciones:

$$V_p = \sqrt{\frac{K + \frac{4}{3}\mu}{\rho}} \quad \text{Ec. 3}$$

$$V_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad \text{Ec. 4}$$

Las cuales relacionan las velocidades de compresión (V_p) y de corte (V_s) con el módulo de compresibilidad K , el parámetro de Lamé μ , y la densidad ρ .

A continuación se describen los factores que afectan las velocidades elásticas:

- Mineralogía

La mineralogía afecta las velocidades de las rocas de dos formas, la principal es a través de los módulos elásticos de la matriz de la roca y la segunda es porque controla la cementación y la estructura del poro de la roca (Winkler, 1995). Pickett en 1963 encontró una correlación entre la mineralogía y la razón entre V_p y V_s mostrado en la figura 7.

- Porosidad

Los datos acústicos son frecuentemente usados para estimar la porosidad, especialmente en arenas limpias y saturadas de agua. Esta estimación está basada en la ecuación empírica de Wyllie et al. que mostraron que hay una correlación lineal entre la velocidad y la porosidad. La ecuación propuesta es:

$$\frac{1}{V_p} = \frac{\phi}{V_f} + \frac{1 - \phi}{V_m} \quad \text{Ec. 5}$$

Donde V_p es la velocidad de onda P, V_f es la velocidad del fluido en el poro y V_m es la velocidad de la matriz.

El efecto de la forma de poro es significativo debido a que la porosidad puede variar de poros elipsoidales a poros esféricos, es por ello que se han realizado diversos modelos con distintas distribuciones de forma de poro, ya que afectan a las velocidades de onda P y S.

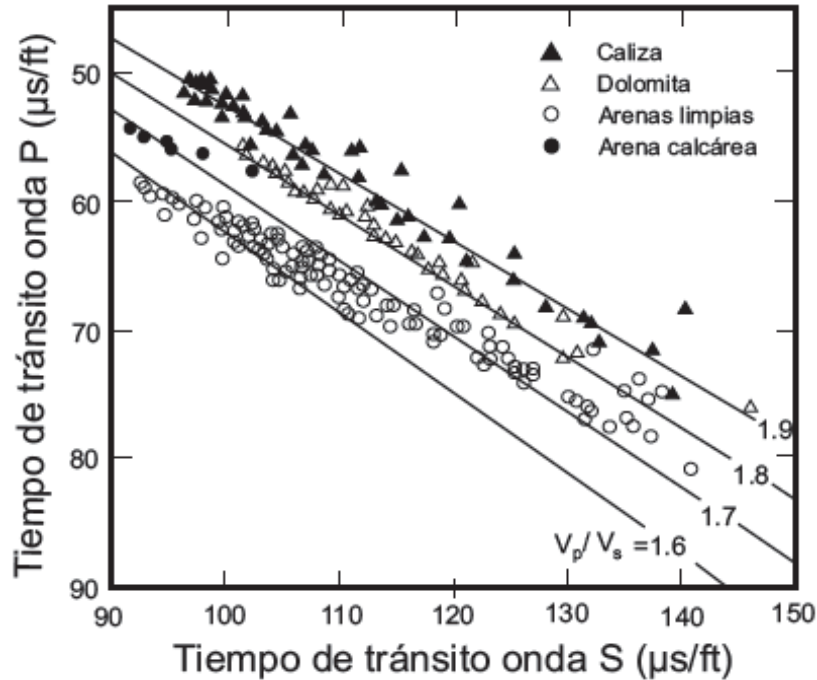


Figura 7. Gráfica de datos de tiempos de tránsito de Onda P y S para distintos tipos de roca de Pickett, 1963. Las líneas se basan en la razón V_p/V_s .

1.3 Propiedades petrofísicas.

Debido a la complejidad de las formaciones areno-arcillosas que contienen hidrocarburos, se tienen que mejorar los conocimientos sobre los mecanismos físicos y geológicos que afectan a éstas buscando nuevas técnicas y métodos que ayuden a estimar las propiedades petrofísicas de las rocas. La estimación y medición de propiedades petrofísicas de muestras de núcleo y de registros geofísicos son importantes en la industria petrolera ya que nos permiten caracterizar el yacimiento.

Una interpretación petrofísica está basada en la aplicación de un método adecuado, dependiendo del tipo de formación y empleando ecuaciones que relacionan las características de la formación. Las propiedades petrofísicas que se tomaron para realizar este trabajo fueron la porosidad y el volumen de arcilla.

1.3.1 Porosidad.

La porosidad se define como una medida de la capacidad de las rocas del yacimiento para contener líquidos. Los fluidos almacenados en los espacios porosos de las rocas del yacimiento pueden ser gas, petróleo y agua. Por consiguiente, los datos de porosidad se utilizan cualitativa y cuantitativamente para evaluar y calcular el volumen potencial de hidrocarburos contenidos en un yacimiento. Los datos de porosidad se obtienen a partir de mediciones directas en muestras de núcleo y / o indirectamente a partir de los registros de pozos. En la mayoría de los casos, los datos de porosidad de los núcleos se utilizan para validar o calibrar los datos de porosidad a partir de registros de pozos. También se utilizan en la caracterización de yacimientos para la clasificación de facies litológicas, y la asignación de las permeabilidades utilizando métodos de transformación de porosidad-permeabilidad.

La porosidad de las rocas se calcula como la fracción entre el volumen de los espacios porosos y el volumen total de la roca. La porosidad total es calculada por medio de la siguiente relación:

$$\phi = \frac{\text{Volumen de poros}}{\text{Volumen total}} = \frac{\text{Volumen total} - \text{Volumen de la matriz}}{\text{Volumen total}} \quad \text{Ec. 6}$$

También se han definido otros tipos de porosidad como:

- Porosidad efectiva. La relación entre el volumen de poros conectados y el volumen total de la roca.
- Porosidad primaria. La porosidad de la roca resultante de la depositación original de la roca (pre-diagénesis)

La porosidad primaria de los sedimentos clásticos depende de tres parámetros de microestructura: Tamaño del grano, arreglo de los granos y su distribución de granos. Por ejemplo, los sedimentos con una reducida distribución de tamaños de partículas, tal como las arenas bien seleccionadas, tienen una porosidad primaria

en el rango de 0.40-0.45. En comparación, la porosidad de un arreglo aleatorio de esferas de tamaño uniforme es de 0.40.

También hay procesos secundarios a la depositación que controlan la porosidad como la compactación, deformación plástica, fracturas, disolución, reprecipitación, etc. Debido a estos factores, las rocas clásticas tienen diferentes rangos de porosidad, los cuales se muestran en la tabla 2.

LITOLOGIA	RANGO DE POROSIDAD (%)
Arenas no consolidados	35-45
Areniscas "Yacimiento"	15-35
Areniscas compactas	5-15
Lutitas	0-45
Arcillas	0-45

Tabla 2. Porosidades de las rocas clásticas tomado de notas del curso de Petrofísica de Glover, 2001.

La porosidad se estima de diferentes formas, en registros geofísicos la más utilizada es la herramienta de Neutrón, el principio de medición está basado en el contenido de hidrógeno que contienen las formaciones en los poros, también se calcula por modelos volumétricos con registros de densidad y sónico; y en análisis de núcleos hay varios métodos de medición los cuales serán descritos a continuación:

- **Medición Directa.** Se determina el volumen total de la roca y volumen de sólidos. Con este método se calcula la porosidad total, su limitante es que el volumen de sólidos solo puede ser medido si la roca está totalmente disgregada, y por ello, no puede ser usado en estudios petrofísicos adicionales. La porosidad calculada con este método es la más parecida a las porosidades derivadas del registro de densidad.
- **Método de Imbibición.** Se sumerge el núcleo en un fluido fresco por un largo tiempo para que el fluido entre en todo el espacio poroso que está

conectado (imbibición). La muestra es pesada antes y después de la imbibición, la diferencia de peso es ρV_p , donde ρ es la densidad del fluido y V_p es el volumen de poros. Una medición de desplazamiento volumétrico en la roca saturada nos da el volumen total de la roca, por lo que la porosidad es igual a $\phi = \frac{V_p}{V}$. Este método da valores de porosidad conectada.

- Inyección de Mercurio. Se sumerge la muestra en mercurio a presiones de laboratorio ya que de este modo puede entrar en los poros. La medición de la cantidad de mercurio que está dentro de la roca nos provee el volumen de poros directamente. Con el volumen total de la roca y el volumen de poros estimado se calcula la porosidad total, e incluso también se puede medir la porosidad conectada.
- Expansión de gas. La metodología es similar a la de mercurio pero con un fluido compresible (Porosímetro de helio).
- Métodos de densidad. Se mide la densidad de la roca y la densidad promedio de los granos.
- Método óptico. Se somete la muestra a observación mediante un microscopio óptico. Se hace conteos de los espacios porosos y también se pueden determinar los tipos de poros y la microestructura de la roca.

1.3.2 Volumen de arcilla.

El volumen de arcilla se presenta en las arenas que contienen en su composición mineralógica granos, láminas o intercalaciones de arcillas, las cuales afectan propiedades físicas de la formación. Esta propiedad petrofísica se puede calcular por varios métodos en registros geofísicos (Rayos Gamma, Potencial Espontaneo, Resistividad, etc.) y en análisis de núcleos mediante la difracción de rayos X y se hace el conteo de los minerales arcillosos.

Las arcillas son componentes comunes de las rocas sedimentarias, por lo regular, aluminosilicatos y los minerales más comunes son: Montmorillonita, Illita, Clorita o Caolinita. Los tamaños de las partículas de arcillas son muy pequeños, por este motivo, las arcillas pueden captar de manera muy efectiva grandes cantidades de agua, las cuales no fluyen. En cuanto a la lutita laminar puede tener una porosidad alta y permeabilidad baja, lo cual nos indicaría que no es de interés, pero con las nuevas tecnologías y estudios se ha comprobado la existencia de Shale Oil y Shale Gas.

En este capítulo describimos conceptos importantes que son la base de la metodología la cual se describe en el capítulo 2. Uno de los conceptos es la composición de las formaciones clásticas que incluye la arena limpia y la arena con sus distribuciones de arcilla (Dispersa, estructural y laminar) las cuales ayudaron a proponer el modelo petrofísico. Otros conceptos relevantes fueron las propiedades físicas efectivas de las rocas las cuales son afectadas por la microestructura de la roca y nos permiten estimar propiedades petrofísicas de manera empírica.

CAPÍTULO 2. MODELOS DE FORMACIONES ARENO-ARCILLOSAS Y TÉCNICAS DE SIMULACIÓN.

En el capítulo anterior se revisaron conceptos físicos, petrofísicos y geológicos, los cuales son la base para entender las técnicas petrofísicas que se presentan en este capítulo, de velocidades elásticas y resistividad, las cuales van desde ecuaciones empíricas hasta modelos más robustos como lo son los modelos de medio efectivo (EMA) que permiten la simulación conjunta de diferentes propiedades. Los límites de Hashin-Shtrikman también se analizan porque son valores extremos de las propiedades estudiadas y si los resultados de las técnicas petrofísicas aplicadas caen dentro de éstos, se valida la metodología. Posteriormente se describe el modelo propuesto y las técnicas de simulación para el desarrollo de este proyecto, el cual consta de 3 niveles de homogenización: nivel de poro, nivel de arena y nivel de intercalaciones de arena-lutita, debido a que los datos de núcleo que usamos para validar el trabajo están conformados por rocas clásticas.

2.1 Técnicas convencionales de propiedades físicas.

Con el inicio de los registros geofísicos de pozos se desarrollaron las técnicas de interpretación de datos, los cuales permiten inferir propiedades petrofísicas, tales como saturación de hidrocarburos, porosidad, permeabilidad y la litología de la roca. La mayoría de las técnicas convencionales de interpretación son empíricas ya que algunos parámetros petrofísicos no son medidos por lo que se hicieron experimentos con propiedades físicas que se pueden medir como la resistividad, velocidad, densidad, contenido de hidrogeno, etc. En este capítulo se muestran las técnicas convencionales y modelos por medio de resistividad y velocidades elásticas para la evaluación de propiedades en formaciones clásticas.

2.1.1 Técnicas de resistividad.

La resistividad es una propiedad física que se utiliza para estimar el contenido del fluido y provee valiosa información para la caracterización de un yacimiento. Esta

propiedad se ha estimado por medio de sondeos eléctricos verticales y registros eléctricos de pozos. Existen distintas metodologías que han tratado de caracterizar la roca en función de la resistividad tomando en cuenta diversos factores que afectan la medición (Archie, Worthington, Waxman-Smits, etc).

Archie publicó en 1942 un trabajo sobre la conducción eléctrica en las arenas limpias, en el cual muestra que la resistividad de la roca saturada con agua es proporcional a la resistividad del agua. El experimento consistió en la realización de mediciones de resistividad en muestras saturadas con agua de varias formaciones de arenas las cuales tenían un rango de porosidad del 10% al 40%. La salinidad de la solución que llenó los poros variaba de 20000 a 100000 miligramos de NaCl por litro. La siguiente relación fue encontrada:

$$R_o = FR_w \quad \text{Ec. 7}$$

Donde R_o es la resistividad de la roca saturada de agua, R_w es la resistividad del agua y F es el factor de formación.

Posteriormente se graficó el factor de formación F con la porosidad, encontrando una relación empírica.

$$F = \frac{1}{\phi^m} \quad \text{Ec. 8}$$

$$R_o = \frac{R_w}{\phi^m} \quad \text{Ec. 9}$$

Donde ϕ es la porosidad de la arena y m es la pendiente de la línea que representa la relación y se le conoce como exponente de cementación. Archie encontró valores de m de 1.8 a 2 para arenas consolidadas y alrededor de 1.3 para arenas no consolidadas.

Hasta la ecuación anterior solo se ha considerado que la roca está completamente saturada por un elemento no resistivo (Agua). Por lo que Archie hizo experimentos para calcular la saturación del agua que es una propiedad petrofísica de interés económico ya que por medio de ésta se puede obtener la saturación del hidrocarburo. Para ello, realizó otro experimento, el cual consistió en la medición

de resistividades de arenas con diferentes saturaciones de agua. Por medio de gráficos cruzados de Saturación de agua contra la resistividad de la roca (Fig. 8), se encontró la siguiente relación para saturaciones de agua debajo de 0.15 o 0.20:

$$S_w = \left(\frac{R_o}{R_t} \right)^{\frac{1}{n}} \quad \text{Ec. 10}$$

Donde R es la resistividad de la arena parcialmente saturada de agua y el exponente de saturación, n , empíricamente derivado y cercano a 2. El valor de n depende del tipo de fluido en el poro y es diferente en presencia de gas en comparación del aceite.

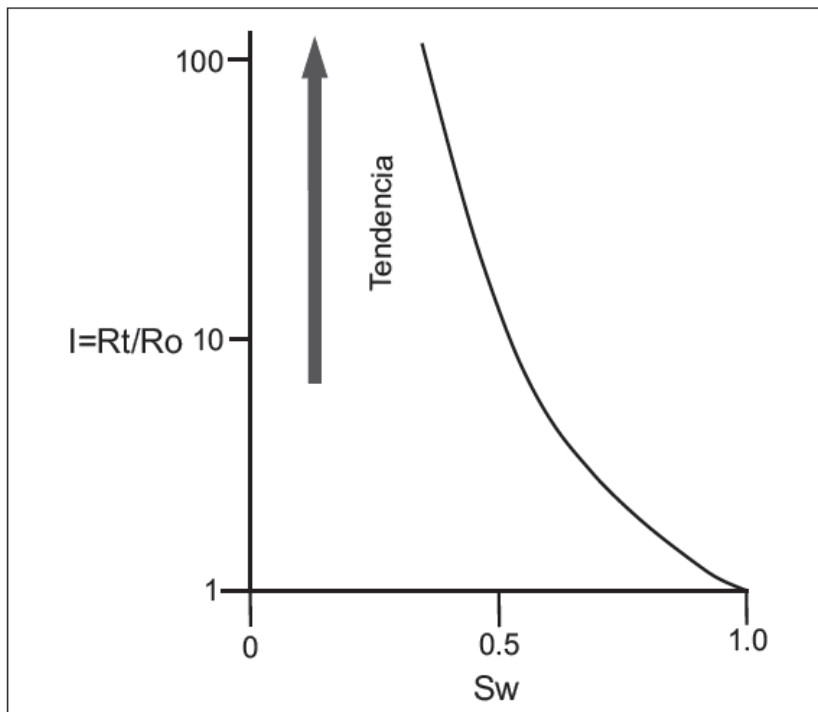


Figura 8. Resultado del experimento de Archie en el que relaciona la resistividad de la roca con la saturación de agua modificado de Torres-Verdin, 2001.

La limitante de los experimentos de Archie es que solo considera un sistema de dos fases, un elemento resistivo y uno conductor, por lo que no funciona correctamente para formaciones complejas como las arenas arcillosas con distintos tipos de distribución de arcilla. Por ello, se han hecho diferentes consideraciones sobre como caracterizar la resistividad eléctrica de las arenas arcillosas como una combinación de propiedades de la roca y de los fluidos.

Worthington, 1985 encontró más de 30 ecuaciones empíricas de saturación para arenas arcillosas en la literatura. La mayoría de estas ecuaciones han sido modificaciones de la ecuación de Archie tomando en cuenta la presencia de los minerales arcillosos.

Patnode y Wyllie, 1950 asumieron que la resistividad de la arcilla es independiente de la resistividad del agua en el espacio poroso. Ellos consideraron que estas dos fuentes de conducción eléctrica actúan como un sistema de dos resistores paralelos independientes y modificaron la ecuación de Archie para incluir la contribución de resistividad debido a la arcilla,

$$\frac{1}{R_o} = \frac{aR_w}{\phi^m} + \frac{1}{R_{sh}} \quad \text{Ec. 11}$$

Donde R_{sh} es la contribución de la resistividad de la arcilla.

Winsaur y McCardell, 1953 también usaron un resistor en paralelo y asumieron que el factor de formación es aplicado a la resistividad del agua y al de la arcilla,

$$\frac{1}{R_o} = \frac{1}{F} \left(\frac{1}{R_w} + \frac{1}{R_{sh}} \right) \quad \text{Ec. 12}$$

Donde F es el factor de formación es independiente de la resistividad de la arcilla.

Waxman y Smits, 1968 relacionaron la resistividad de la arcilla con la cantidad de cationes intercambiables asociado con la superficie de la arcilla. La cantidad de cationes intercambiables se mide en laboratorio como la capacidad de intercambio catiónico.

$$\frac{1}{R_o} = \frac{1}{F} \left(\frac{1}{R_w} + \frac{Q_v}{B} \right) \quad \text{Ec. 13}$$

Donde Q_v es la capacidad de intercambio catiónico de las arenas arcillosas por unidad de volumen de poros y B es la resistencia equivalente a los intercambios catiónicos asociados a los minerales arcillosos.

El modelo de Waxman y Smits ha sido usado ampliamente en la evaluación de formaciones y también otros autores se han basado en sus suposiciones.

Clavier et al., 1977 modificaron el trabajo de Waxman y Smits ya que notaron que la doble capa en el cual la resistividad de la superficie de la arcilla ocurre tiene un volumen significativo. Ellos propusieron su modelo de “Doble agua” para tomar en cuenta el volumen de doble capa de las arcillas.

$$R_b = R_{sh} \times \phi_t^2 \quad \text{Ec. 14}$$

$$R_o = \frac{R_b \times R_w}{[(R_w \times V_{cl}) + (R_b \times (1 - V_{cl}))]} \times \phi_t^2 \quad \text{Ec. 15}$$

Donde R_b es la resistividad del agua ligada a las arcillas, R_{sh} es la resistividad de la lutita adyacente, ϕ_t es la porosidad total y V_{cl} es el volumen de arcilla.

En todos los trabajos descritos anteriormente, la llave de las suposiciones es que el agua en los poros y los minerales arcillosos presentes actúan como resistores paralelos.

2.1.2 Técnicas de velocidad.

Como se mencionó en el capítulo anterior, las velocidades elásticas son propiedades físicas que son usadas para evaluar porosidad, litología, densidad y compresibilidad de poros en las formaciones. Las técnicas que se presentan a continuación son para determinar la porosidad, en base a modelos volumétricos y técnicas empíricas.

La ecuación del tiempo promedio de Wyllie, 1956 es basado en un modelo que considera capas de sólidos y líquidos de forma volumétrica y es usado para estimar la porosidad a partir de la velocidad de onda compresional (V_p) en aplicaciones petrofísicas. Esta ecuación es expresada en términos de la velocidad del fluido (V_f) y la velocidad de la matriz (V_{ma}), o en términos del tiempo de tránsito que es el inverso de la velocidad.

$$\frac{1}{V_p} = \frac{\phi}{V_f} + \frac{1 - \phi}{V_{ma}} \quad \text{Ec. 16}$$

$$\Delta t = \phi \Delta t_f + (1 - \phi) \Delta t_{ma} \quad \text{Ec. 17}$$

En la relación de tiempo promedio se asume que las rocas sedimentarias se conforman de mineralogía homogénea y fluido saturado a alta presión efectiva. Además los tiempos de tránsito en la fase sólida y líquida sólo se justifican cuando la longitud de onda es pequeña en comparación con el tamaño de poro y tamaño de grano. Una limitante del modelo de Wyllie, es el grado de compactación, porque si tenemos bajos niveles de compactación, los resultados pueden ser erróneos (Asquith and Krygowski, 2004) teniendo una sobreestimación de la porosidad; en estos casos se recurre a una corrección por compactación, si el tiempo de tránsito de la capa vecina es mayor a $100\mu s \text{ ft}^{-1}$,

$$\phi = \frac{\Delta t - \Delta t_{ma}}{\Delta t_f - \Delta t_{ma}} \times \frac{1}{B_{cp}} \quad \text{Ec. 18}$$

Donde B_{cp} es el factor de corrección por compactación.

Raymer et al, 1980 llevaron a cabo un algoritmo empírico como alternativa a la ecuación de tiempo promedio, la cual es usada para diferentes rangos de porosidades y su forma general es no lineal. El algoritmo es el siguiente:

$$V_p = (1 - \phi)^2 V_{ma} + \phi V_{fl}, \quad \phi < 37\% \quad \text{Ec. 19}$$

$$\frac{1}{\rho V^2} = \frac{\phi}{\rho_{fl} V_{fl}^2} + \frac{1 - \phi}{\rho_0 V_0^2}, \quad \phi > 47\% \quad \text{Ec. 20}$$

Estas relaciones tienen resultados confiables en porosidades de bajas a medias en arenas consolidadas y en porosidades altas en arenas cementadas.

Como el modelo de Wyllie solo considera una mineralogía homogénea se han hecho correcciones y otras metodologías empíricas para mineralogía compleja, tal como arenas arcillosas. Han et al, 1986 realizaron regresiones lineales empíricas

que relacionan la velocidad con la porosidad y el contenido de arcilla, en un conjunto de muestras de arenas arcillosas. Ellos obtuvieron los siguientes resultados.

$$\begin{aligned} V_P &= 5.59 - 6.93 \cdot \emptyset - 2.18 \cdot C \\ V_S &= 3.52 - 4.91 \cdot \emptyset - 1.89 \cdot C \end{aligned} \quad \text{Ec. 21}$$

Donde las velocidades son en $\frac{Km}{s}$, la porosidad \emptyset y el contenido de arcilla C son fracciones.

Tosaya y Nur, 1982 también determinaron las velocidades tomando en cuenta los mismos parámetros y sus resultados fueron los siguientes:

$$\begin{aligned} V_P &= 5.8 - 8.6 \cdot \emptyset - 2.4 \cdot C \\ V_S &= 3.7 - 6.3 \cdot \emptyset - 2.1 \cdot C \end{aligned} \quad \text{Ec. 22}$$

Castagna et al, 1985 determinaron regresiones empíricas en la formación Frio. Para arenas arcillosas ellos encontraron:

$$\begin{aligned} V_P &= 5.81 - 9.42 \cdot \emptyset - 2.21 \cdot C \\ V_S &= 3.89 - 7.07 \cdot \emptyset - 2.04 \cdot C \end{aligned} \quad \text{Ec. 23}$$

La limitante de estas relaciones empíricas es que las muestras de arenas arcillosas a evaluar deben tener condiciones similares a las que fueron determinadas cada una de las ecuaciones.

En las figuras 9-11 se observa que las ecuaciones empíricas para arenas arcillosas 22 y 23, no caracterizan a los datos de Han et al, 2011 y que las ecuaciones de Han et al, 1986 son las que presentan un ajuste con un error considerable.

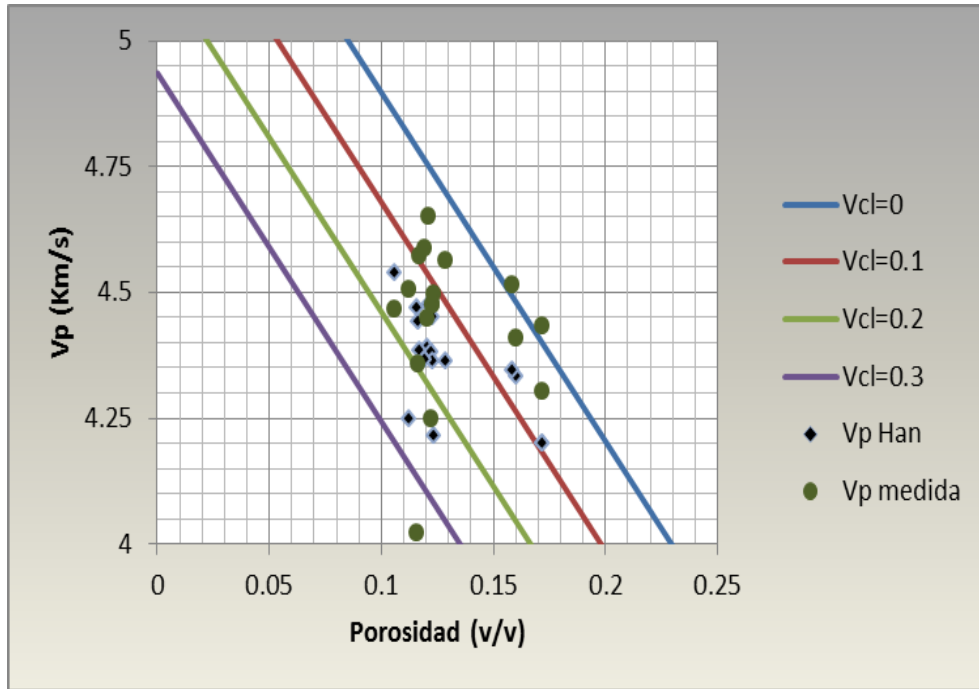


Figura 9. Gráfica de las ecuaciones de Han et al, 1986 con los datos utilizados en este trabajo.

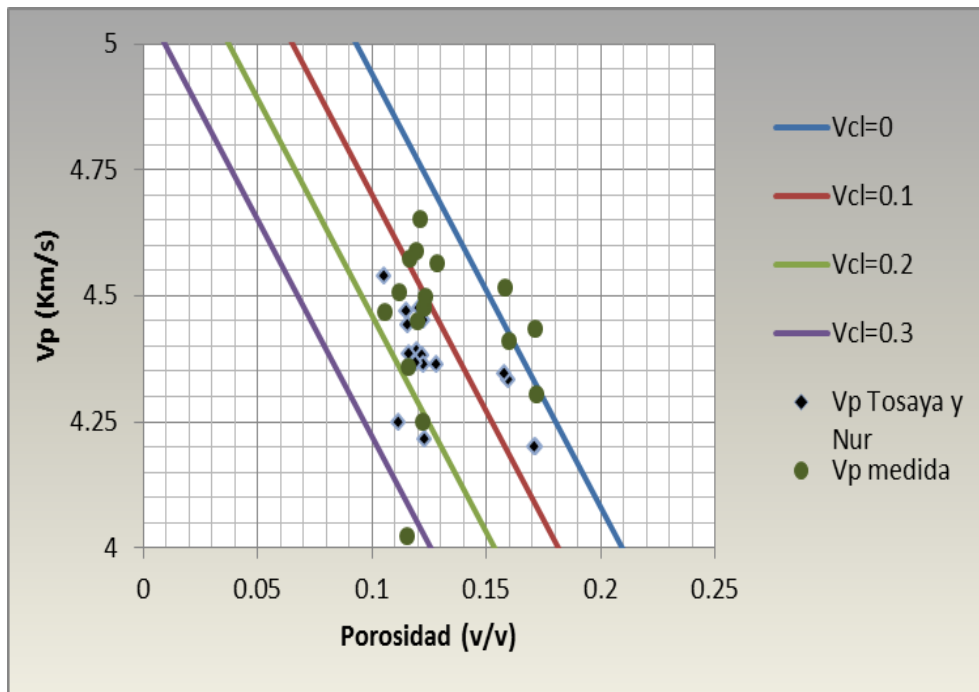


Figura 10. Gráfica de las ecuaciones de Tosaya y Nur ,1982 con los datos utilizados en este trabajo.

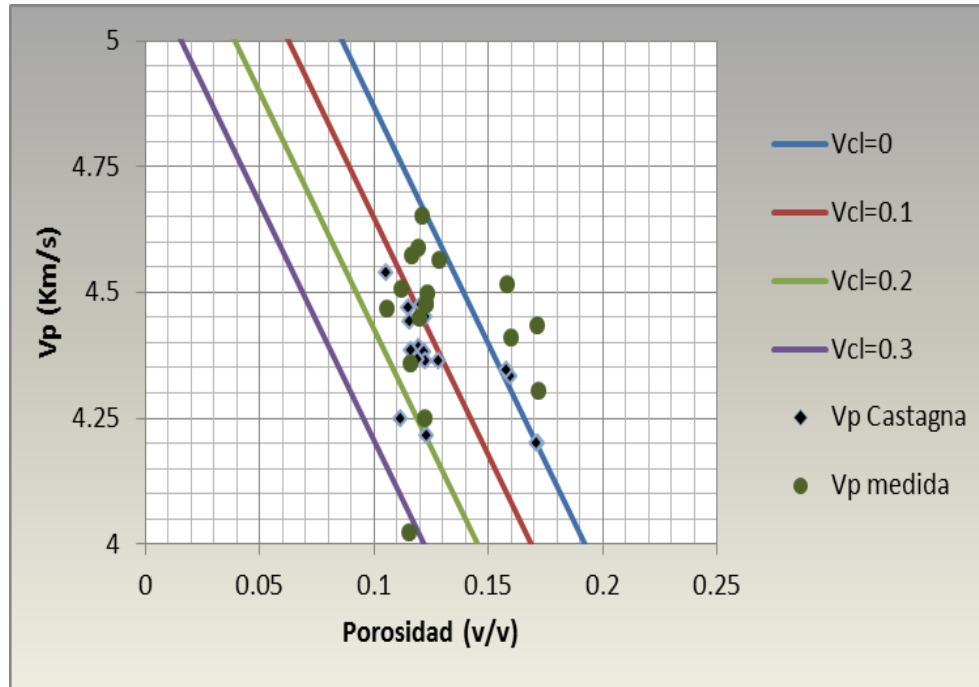


Figura 11. Gráfica de las ecuaciones de Castagna, 1985 con los datos utilizados en este trabajo.

2.2 Límites de Hashin-Shtrikman.

Para conocer la microestructura de la roca no se cuenta con información suficiente por lo que se recurre a encontrar un límite superior e inferior calculado por las propiedades efectivas aceptables. Entre más información se tenga el intervalo debe ser más estrecho (Concentración y propiedades físicas de los elementos de la roca) y se colapsa en el valor exacto si se tienen los detalles geométricos de la roca. Si el medio es de dos fases y la concentración de elementos son conocidos, este intervalo se delimita por los límites de Wiener y si el medio es macroscópicamente isótropo se utilizan los límites de Hashin-Shtrikman.

Los límites de Hashin-Shtrikman están basados en un modelo microestructural compuesto por un conjunto de esferas, en el cual se tienen dos medios con esferas de radio R_1 con propiedades M_1 que a su vez contienen esferas internas de radio R_2 con propiedades M_2 . Cada una de estas esferas compuestas tienen una propiedad efectiva M^* equivalente a una esfera homogénea de radio R_1 . Un

medio que no contenga espacios vacíos puede ser formado con estas esferas donde $R_2/R_1 = constante$, para lograr esto debe existir una distribución en los tamaños de las esferas que se extiende a lo infinitesimal $R_1 \rightarrow 0$, de esta manera se tiene un medio homogéneo.

Este modelo se aplica tanto para resistividades eléctricas como para velocidades elásticas. Las ecuaciones de los límites de Hashin-Shtrikman (Mavko, 1998) para los módulos de compresibilidad κ y de corte μ son los siguientes:

$$K^{HS\pm} = K_1 + \frac{v_2}{(K_2 - K_1)^{-1} + v_1(K_1 + \frac{4}{3}\mu_1)^{-1}} \quad \text{Ec. 24}$$

$$\mu^{HS\pm} = \mu_1 + \frac{v_2}{(\mu_2 - \mu_1)^{-1} + \frac{2v_1(K_1 + 2\mu_1)}{5\mu_1(K_1 + \frac{4}{3}\mu_1)}} \quad \text{Ec. 25}$$

Donde K_1, K_2 son los módulos de compresibilidad de cada fase, μ_1, μ_2 son los módulos de corte y v_1, v_2 las fracciones de volumen.

Las ecuaciones dan el límite superior cuando el material más rígido es el 1 y el límite inferior cuando el material más suave es el 1. Para una roca porosa, el elemento 1 es la parte sólida o matriz y el elemento 2 es la parte porosa, por lo que las ecuaciones resultantes son:

$$K^{HS}Upper = K_{ma} + \frac{\phi}{(K_{fl} - K_{ma})^{-1} + (1 - \phi)(K_{ma} + \frac{4}{3}\mu_{ma})^{-1}} \quad \text{Ec. 26}$$

$$\mu^{HS}Upper = \mu_{ma} + \frac{\phi}{(\mu_{fl} - \mu_{ma})^{-1} + \frac{2\phi(K_{ma} + 2\mu_{ma})}{5\mu_{ma}(K_{ma} + \frac{4}{3}\mu_{ma})}} \quad \text{Ec. 27}$$

$$K^{HS}Lower = K_{fl} + \frac{(1 - \phi)}{(K_{ma} - K_{fl})^{-1} + (\phi)(K_{fl})^{-1}} \quad \text{Ec. 28}$$

$$\mu^{HS} Lower = 0 \quad \text{Ec. 29}$$

Los límites de Hashin-Shtrikman para la conductividad eléctrica (σ) de una roca con un medio poroso isótropo se describen de la misma forma, la cual es expresada en la siguiente ecuación:

$$\sigma^* = \sigma_1 + \frac{v_2}{\frac{1}{\sigma_2 - \sigma_1} + \frac{v_1}{3\sigma_1}} \quad \text{Ec. 30}$$

Para el caso de una roca porosa, con conductividad del agua σ_w y la conductividad de la matriz σ_{ma} , se obtienen las siguientes ecuaciones:

$$\sigma^{HS} Upper \leq \sigma_{eff} \leq \sigma^{HS} Lower$$

Con:

$$\sigma^{HS} Inferior = \sigma_{ma} \left[1 + \frac{3\Phi\delta\sigma}{3\sigma_{ma} + (1 - \Phi)\delta\sigma} \right] \quad \text{Ec. 31}$$

$$\sigma^{HS} Superior = \sigma_w \left[1 - \frac{3(1 - \Phi)\delta\sigma}{3\sigma_w - \Phi\delta\sigma} \right] \quad \text{Ec. 32}$$

Donde Φ es la porosidad y $\delta\sigma = \sigma_w - \sigma_{ma}$.

La conductividad del agua σ_w es un valor muy grande por lo que el límite superior si se puede obtener, caso contrario con el límite superior ya que el cuarzo (matriz) es un elemento no conductor por lo que su límite superior es 0. Para obtener mejores resultados se utiliza la razón de las conductividades de los elementos (Fig. 12).

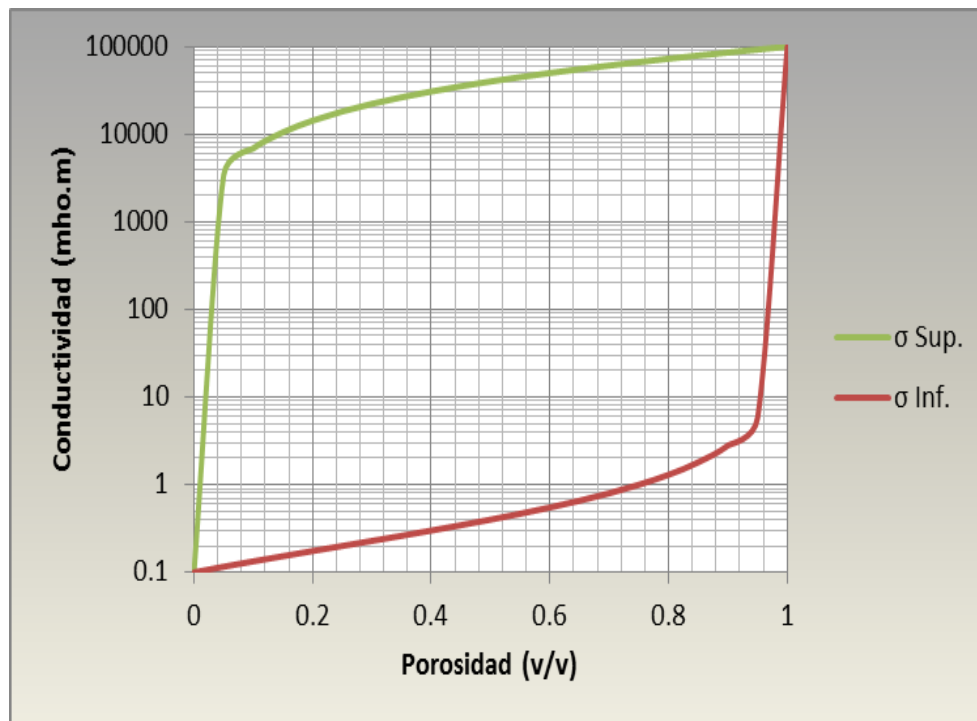


Figura 12. Límites de Hashin Shtrikman para la conductividad de dos elementos (Agua y cuarzo).

2.3 Métodos de medio efectivo.

Los métodos de medio efectivo son técnicas utilizadas en física de rocas para describir las propiedades macroscópicas de una roca basada en las propiedades físicas en conjunto, la concentración de los elementos que la componen y los detalles geométricos de los elementos. Como se mencionó en la sección anterior, los detalles geométricos son esenciales para dar una estimación precisa de las propiedades de las rocas, si no se cuenta con tal información, los modelos de medio efectivo dan resultados aceptables si se encuentran dentro de los límites de Hashin-Shtrikman.

Varios investigadores han trabajado con estos modelos para arenas arcillosas, entre ellos, Gelius y Wang, 2010 que propusieron un esquema de medio efectivo para la conductividad eléctrica que potencialmente tiene en cuenta el efecto de los parámetros importantes, como la distribución de grano forma, la alineación de grano, la arcillosidad, la salinidad, la saturación, la temperatura y el esfuerzo.

Carcione et al., 2007 utilizaron una serie de modelos de medio efectivo tanto para la conductividad eléctrica y las velocidades elásticas y las relaciones entre ellos. También combinaron estos modelos para obtener las relaciones de cross-propiedades entre la conductividad eléctrica y la velocidad sísmica de las rocas. Carrara et al., 1994, propusieron un modelo electro-sísmico asumiendo que todas las fases (matriz, arcilla, agua y aire) en la roca son contiguas, es decir, en paralelo para el caso de la conductividad eléctrica y en serie con respecto a la propagación de ondas elásticas, para el propósito de evaluar la porosidad y la saturación.

La idea de los modelos de medio efectivo, es partir con un material homogéneo (inicial), en el cual se van agregando sucesivamente cantidades pequeñas de los componentes de la roca obteniendo diferentes valores de las propiedades efectivas con cada inclusión, hasta que se representa de manera equivalente el modelo de la roca (Figura 13).

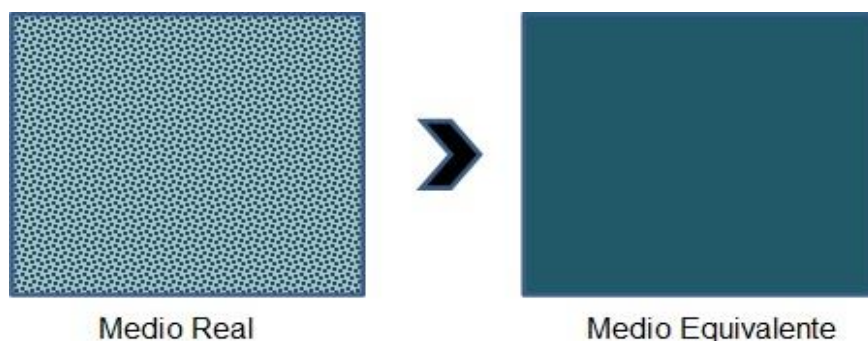


Figura 13. Esquema de la representación de un modelo real por medio de un modelo equivalente.

Hay varios métodos de medio efectivo, en este trabajo se utilizó el denominado EMA (Effective Medium Approximation), el cual consiste en hacer mezclas de los componentes de la roca de manera proporcional las cuales son introducidas (inclusiones) en un medio homogéneo que tiene las propiedades del medio efectivo, por lo cual las interacciones entre los componentes se presentan desde la primera inclusión y las propiedades van cambiando hasta llegar a la última inclusión (Fig. 14).

Las ecuaciones generales de EMA para las propiedades elásticas de un medio compuesto por N constituyentes utilizadas para la simulación son: (Kazatchenko et al, 2004)

$$\sum_{i=1}^N C_i (K^{(i)} - K^*) P^{(i)} = 0 \quad \text{Ec. 33}$$

$$\sum_{i=1}^N C_i (\mu^{(i)} - \mu^*) Q^{(i)} = 0 \quad \text{Ec. 34}$$

$$\sum_{i=1}^N C_i (\sigma^{(i)} - \sigma^*) R^{(i)} = 0 \quad \text{Ec. 35}$$

Donde K^* y $K^{(i)}$ son los módulos de compresibilidad del medio efectivo y del i-ésimo componente respectivamente, μ^* y $\mu^{(i)}$ son los módulos de cizallamiento del medio efectivo y del i-ésimo componente respectivamente, de igual manera para la conductividad eléctrica σ^* y $\sigma^{(i)}$.

$$P_i = \frac{1}{3} T_{jju}^{(i)} \quad \text{Ec. 36}$$

$$Q_i = \frac{1}{5} (T_{jjl}^{(i)} - P_i) \quad \text{Ec. 37}$$

C_i es la concentración volumétrica del i-ésimo componente ($\sum C_i = 1$) y $T^{(i)}$ es el tensor de W, 1966 que relaciona el tensor de deformaciones dentro de un elemento individual de la i-ésima componente con el campo de deformación uniforme lejos de él. $R^{(i)} = D_{kk}^{(i)}/3$, en un medio isotrópico, y del tensor $D^{(i)}$ es analógica de tensor de Wu para el campo electromagnético.

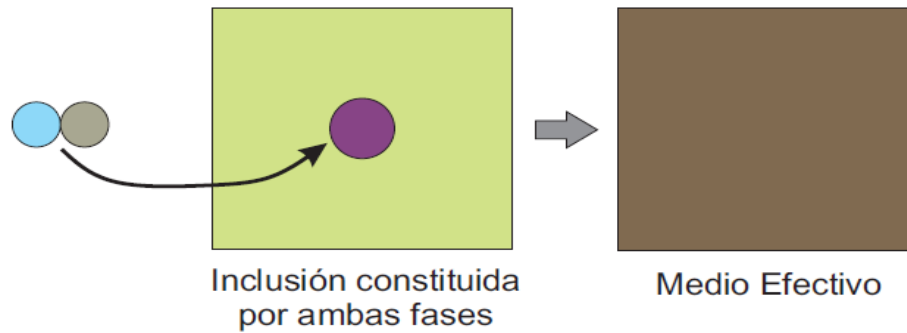


Figura 14. Aproximación de Medio Efectivo descrito con un medio que contiene 2 elementos, los cuales se mezclan y son introducidos en un medio efectivo como inclusiones hasta llegar a obtener un modelo equivalente.

2.4 Descripción del modelo propuesto y técnicas de simulación para cada nivel.

En este trabajo se planteó un modelo petrofísico para arenas arcillosas que permita simular las propiedades eléctricas y elásticas partiendo de una metodología para la estimación de propiedades conjuntamente.

El modelo petrofísico propuesto está compuesto por tres niveles de homogenización (Figura 15):

- Nivel de poro: Éste puede contener agua, hidrocarburo y arcilla dispersa (En nuestro caso solo contienen agua y arcilla dispersa).
- Nivel de arena limpia: Contiene poros y granos de cuarzo.
- Nivel de intercalaciones arena-lutita. Contiene capas de arcilla laminar y arena.

Cada nivel de homogenización considera que los elementos poseen valores bien definidos de propiedades físicas (parámetros de modelo) y tienen formas geométricas bien determinadas.

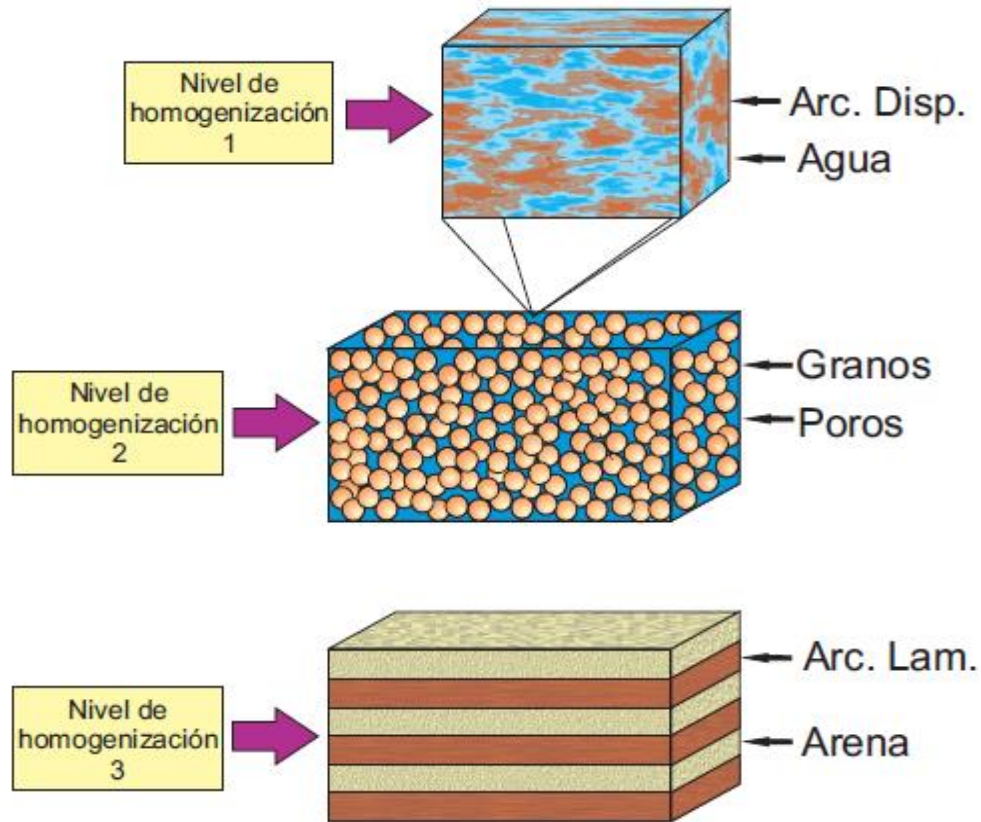


Figura 15. Modelo de arenas arcillosas propuesto para la metodología del presente trabajo.

En este trabajo las propiedades efectivas del modelo petrofísico que se plantea son calculadas en el nivel poro y nivel arena por medio de EMA porque nos permite simular varias propiedades físicas al mismo tiempo siendo un método autoconsistente a diferencia de las técnicas convencionales para velocidad y resistividad que provienen de experimentos empíricos que no caracterizan físicamente a la roca de la misma forma aunque éstas dan resultados favorables para determinar algunas propiedades del yacimiento; y a nivel de intercalaciones fue calculado de manera volumétrica ya que son capas de arenas y lutitas.

Estimar las propiedades petrofísicas y entender las variaciones de las propiedades físicas en las rocas es complejo, aunque se han utilizado técnicas empíricas y de medio efectivo que tienen resultados confiables que se validan con los límites de Hashin-Shtrikman. El modelo propuesto en este capítulo al basarse en un método autoconsistente permite la simulación conjunta de dos o más propiedades físicas

además de estimar las concentraciones de las distribuciones de arcilla. En el modelo se requieren los parámetros de cada uno de los elementos que componen la roca por lo que hay que definirlos, ya sea por valores de tablas o por gráficos cruzados, también es necesario realizar una interpretación básica de las propiedades de las muestras por medio de gráficos cruzados para correlacionarlos con los resultados de la metodología propuesta.

CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE DATOS DE NÚCLEOS.

En el capítulo anterior describimos las técnicas y los métodos utilizados en la interpretación de registros geofísicos y de núcleos, en este capítulo analizaremos los datos de núcleos utilizados en el trabajo, las técnicas de medición utilizadas, un análisis petrofísico por medio de gráficos cruzados y se realizará la estimación de parámetros físicos de inversión para el desarrollo de la metodología.

Se conoce como núcleo a una muestra rocosa de un yacimiento, que es tomada de un pozo a una profundidad específica, por medio de métodos especiales de extracción, preservando su estructura geológica y sus características físico-químicas de la mejor forma posible. El análisis de núcleos es una parte importante en la evaluación de formaciones, ya que es la medición directa de las propiedades físicas y petrofísicas del subsuelo y provee bases para la calibración de otras herramientas. Pero es importante mencionar que no se le pueden tomar muestras a todos los pozos porque tal operación es costosa; sin embargo, se deben tomar en cuenta la extracción de éstas aunque sean mínimas. Entre las pruebas convencionales que se realizan a los núcleos se tienen las mediciones de las de velocidades elásticas, resistividad eléctrica, porosidad, saturación de fluidos, permeabilidad, densidad, etc. Todas estas pruebas se realizan bajo condiciones atmosféricas.

3.1 Métodos utilizados en la medición de las propiedades.

Los datos utilizados en este trabajo fueron tomados de Han et al, 2011, los cuales se refieren a muestras tomadas del Reino Unido y de China. Todas las muestras son de formas cilíndricas con 5cm de diámetro cortados con una longitud de 2 cm. Las muestras fueron secadas por 3 días en un horno a 40°C para minimizar el daño a algunos minerales arcillosos (Las arcillas son conocidas por ser dañadas a temperaturas por encima de 60°C). Luego fueron transferidas a unos recipientes vacíos para mantenerlos secos hasta que estos fueran requeridos.

Las propiedades físicas y petrofísicas que se midieron en los núcleos fueron los siguientes con sus respectivas técnicas de medición.

- La porosidad fue medida en cada una de las muestras secas a condiciones de laboratorio usando un porosímetro de helio con una precisión de $\pm 0.1\%$. Este método se basa en la ley de Boyle, el helio es usado para saturar la muestra porque es inerte, por lo que no es absorbido fácilmente por las superficies minerales, y debido a su pequeño tamaño molecular rápidamente entra en el sistema microporoso. En laboratorio, el núcleo es colocado en un aparato que consiste de unas paredes de caucho flexible dentro de un soporte de núcleo. Se aplica presión afuera de las paredes de caucho para asentarlo contra la muestra. El helio que se encuentra en una celda de referencia a una presión conocida es expandida dentro el espacio poroso. La presión de equilibrio resultante en el sistema es supervisado y el volumen poroso es calculado a partir de la ley de Boyle (Fig. 16):

$$P_1 V_r = P_2 (V_r + V_L + V_p) \quad \text{Ec. 38}$$

Donde P_1 es la presión inicial en la celda de referencia, P_2 es la presión final del sistema, V_r es el volumen de la celda de referencia, V_L es el volumen del tubo conectado y V_p es el volumen de poros.

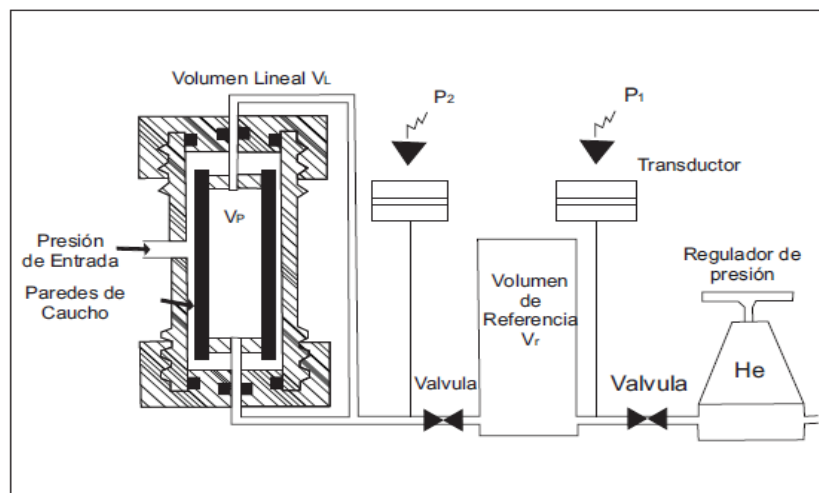


Figura 16. Diagrama esquemático de la ley de Boyle en un porosímetro de Helio modificado de Peter y Keiser, 1992.

- La mineralogía fue medida usando la técnica de difracción de rayos X y microscopia de escaneo electrónico, la cual permitió el cálculo de contenido de arcilla volumétrico y proporciones de otros minerales con una precisión de $\pm 5\%$. La difracción de rayos x es un método de análisis estructural que permite identificar minerales por medio de su red cristalina. El método consiste en hacer incidir un haz monocromático de rayos X sobre una mezcla de sustancias cristalinas que provoca la difracción de rayos X, con un ángulo que es dependiente de la estructura cristalina de la sustancia (Ley de Bragg). El instrumento científico empleado en las determinaciones de las estructuras cristalinas consta de tres partes:
 - a) Un foco emisor de la radiación.
 - b) Un portamuestras que recibe la radiación.
 - c) Un detector angular de la radiación difractada.

La señal detectada es recogida y procesada mediante un ordenador. El resultado es un espectro continuo en el que se muestran diferentes picos de alturas variables. Cada uno de los picos es la respuesta a la difracción de rayos X de un plano de la red cristalina del mineral que constituye la muestra.

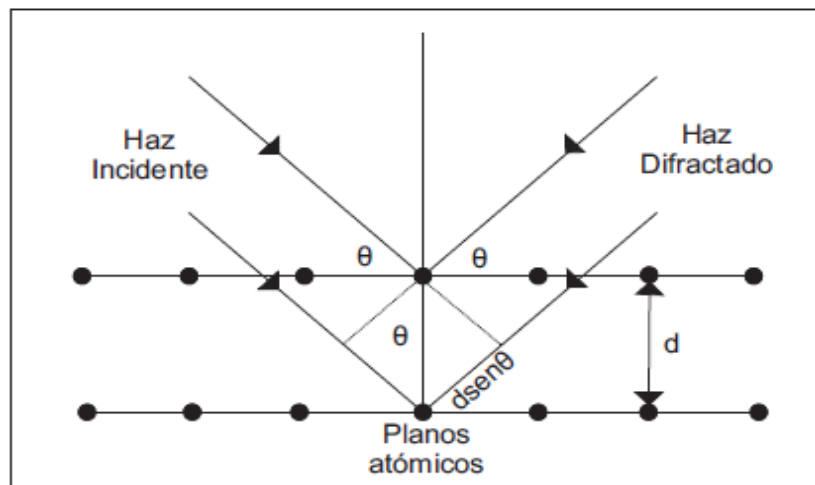


Figura 17. Esquema de la Ley de Bragg la cual es el principio de la difracción de rayos X modificado de <http://servicios.fis.puc.cl/rayosx/teoria.html>.

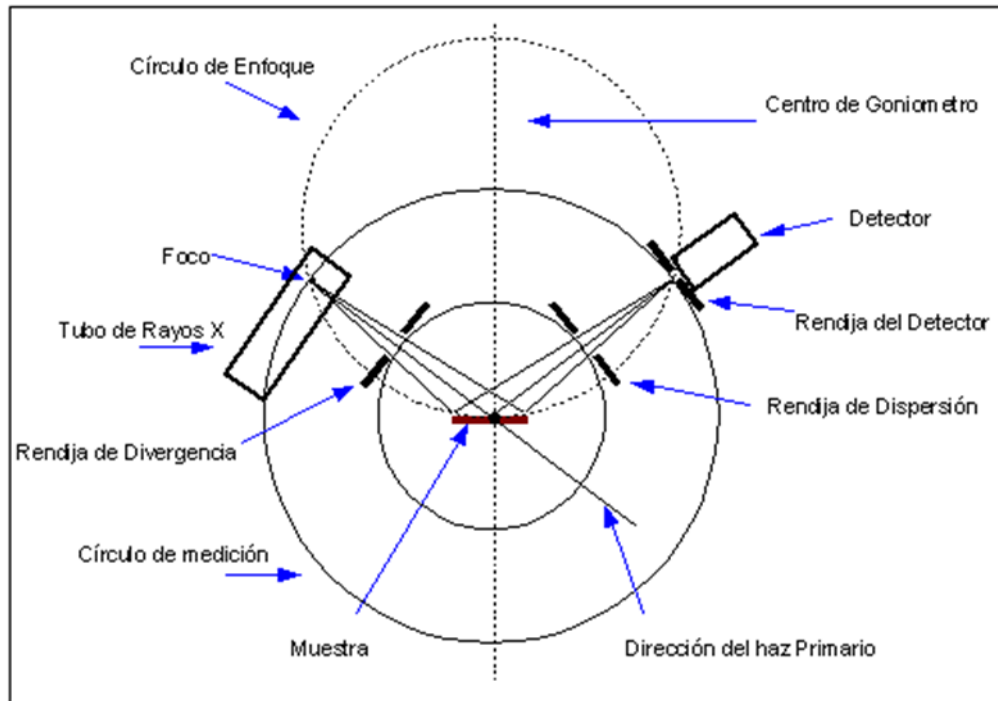


Figura 18. Esquema de la configuración óptica de un difractómetro de rayos X tomada de <http://servicios.fis.puc.cl/rayosx/teoria.html>.

- Las velocidades elásticas fueron medidas por un sistema ultrasónico pulse-echo usando un pulso de frecuencia de 1.0 MHz con una precisión de $\pm 0.3\%$. El sistema ultrasónico pulse-echo consiste en la emisión de pulsos ultrasónicos de corta duración a una frecuencia definida. Para ello, un transductor electromagnético es empleado para generar un pequeño pulso de ondas acústicas que se propagan dentro de la muestra que está siendo inspeccionada. La excitación superficial produce ondas P y ondas S que viajan dentro de la placa y ondas superficiales que se alejan del punto de impacto. Las ondas P y ondas S son reflejadas por la diferencia de impedancias acústicas, al retornar las ondas reflejadas a la superficie producen desplazamientos que son medidos por un transmisor receptor. La señal recibida por el receptor es manifestada por un osciloscopio, siendo medido electrónicamente el tiempo de viaje de ida y vuelta del pulso.

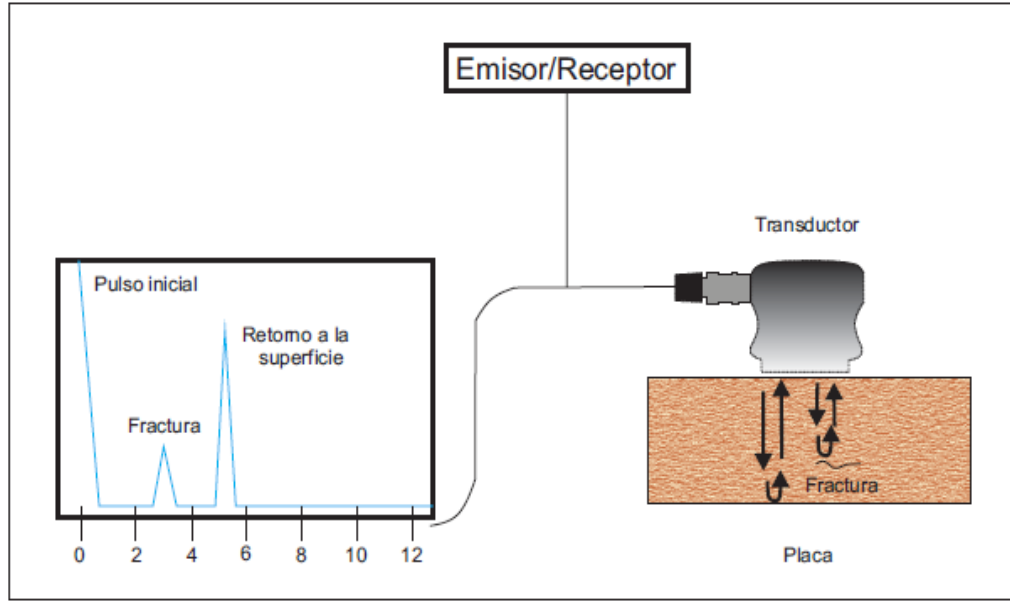


Figura 19. Esquema de un sistema ultrasónico pulse echo tomado de <http://www.virtualengg.com/ultrasonic.html>.

- La resistividad eléctrica fue medida usando un sistema de medición de resistividad circunferencial dentro de un sistema ultrasónico modificado que permite la medición de la resistividad a altas presiones. La precisión fue del $\pm 2\%$. Esta técnica se basa en el trabajo de Ellis, 2008, en el que una corriente eléctrica constante AC de 1 mA es aplicado a un par de electrodos opuestos mientras que el voltaje es medido en el par de electrodos adyacentes. Los electrodos de la corriente inicial y de voltaje son luego rotados en una secuencia a través de los 12 electrodos circunferenciales. La resistencia final fue calculada con el promedio de las resistencias de los electrodos y calibrando por factores geométricos para obtener la resistividad eléctrica asumiendo muestras homogéneas.

3.2 Evaluación del conjunto de muestras.

Han et al, 2011 estudiaron 63 núcleos, que se delimitaron a 17, de acuerdo al contenido de arcilla (Mayores al 5%) y a los minerales de la matriz diferentes al cuarzo (Menores al 10%), para poder representarlas con el modelo propuesto. (Tabla 3).

Hacer una interpretación básica en muestras de núcleos de diferentes lugares es algo complejo ya que cada campo tiene diferentes condiciones de depositación y la fuente de sedimentación no es la misma. Sin embargo, es necesario tener una perspectiva inicial para tratar de explicar los comportamientos de las propiedades físicas. Para esto, construimos gráficos cruzados de las propiedades físicas y petrofísicas de interés que son las velocidades elásticas, la resistividad eléctrica, la porosidad y el volumen de arcilla.

Graficamos contra la porosidad porque es una propiedad que afecta las velocidades elásticas y la resistividad eléctrica de las rocas (Archie, 1942; Han *et al.*, 1986). Si la porosidad aumenta se reducen las velocidades de onda P y de onda S (Figuras 20 y 21) ya que ésta se propaga más lento en rocas porosas y la resistividad decrece si la roca está saturada con fluidos iónicos.

Otro parámetro importante en la evaluación petrofísica, es la concentración de arcilla porque tiene un gran impacto en las propiedades elásticas y eléctricas. Pero sus efectos son diferentes dependiendo del tipo de distribución de arcilla. Las arcillas situadas entre los límites de grano en areniscas tienden a suavizar los contactos de grano, lo que lleva a una fuerte disminución en las velocidades tanto compresional y de ondas de corte (Han *et al.*, 1986;. Sams y Andrea, 2001).

El efecto de la arcilla en la resistividad eléctrica puede funcionar de dos maneras: por una parte el exceso de los iones transportados por minerales de arcilla proporcionan trayectorias conductoras adicionales (doble capa eléctrica), además que la conductividad del electrolito de poro conduce a una disminución de la resistividad eléctrica, y por otra parte los minerales de arcilla en los poros bloquean la conectividad de los fluidos de los poros, lo que a su vez puede aumentar la resistividad.

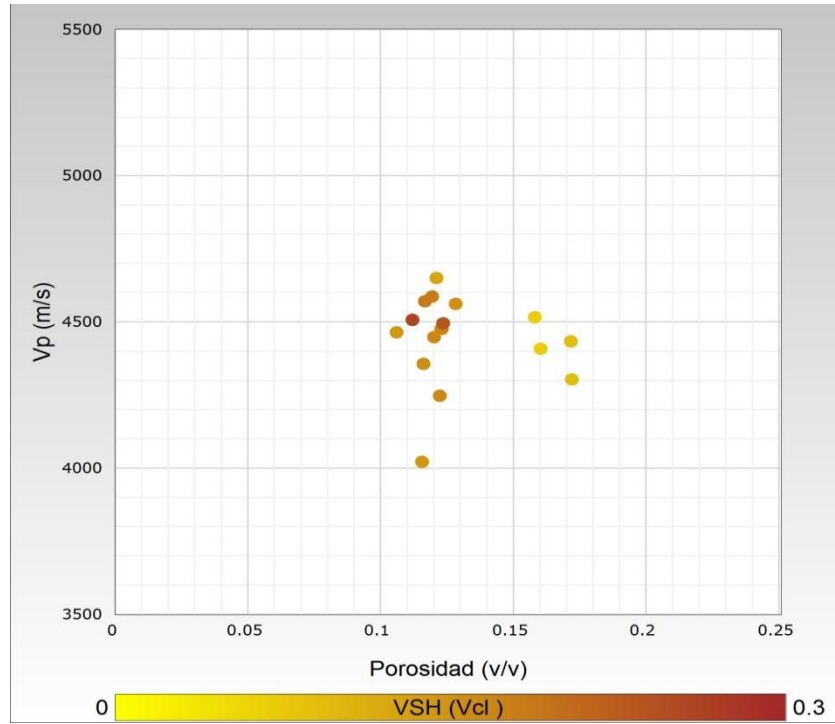


Figura 20. Grafico cruzado de porosidad contra la velocidad de onda P.

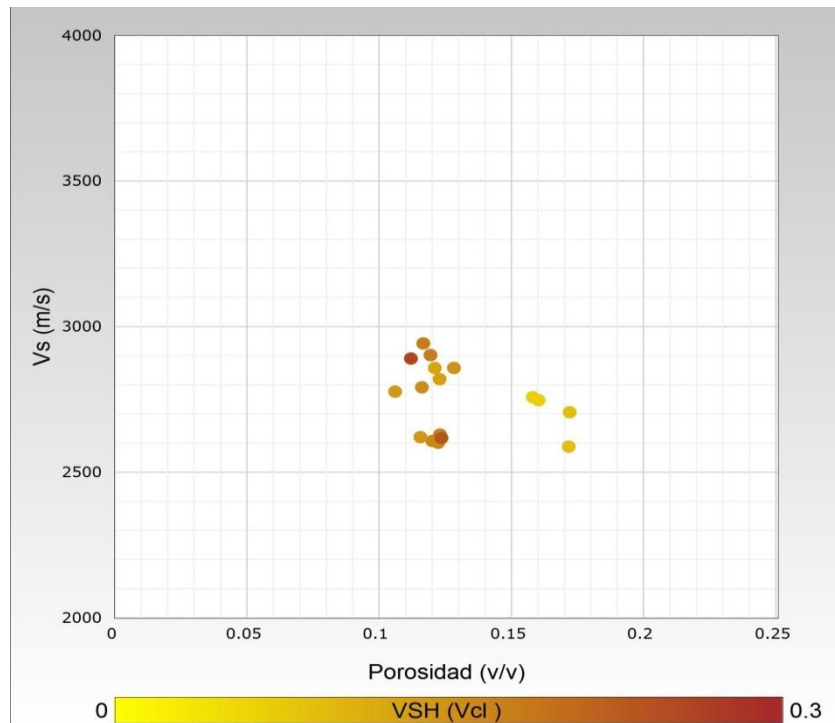


Figura 21. Grafico cruzado de porosidad contra velocidad de onda S.

En las gráficas de velocidad se pueden observar dos grupos de datos, uno que presenta porosidades entre 0.10-0.13 y otro entre 0.15-0.18. Se puede decir que las rocas del grupo 1 presentan alta compactación con formas esféricas de poro y con concentración de arcilla mayor al 10% y el grupo 2 presenta alta compactación pero con formas elipsoidales de poro y concentración de arcilla menor al 10%. Se observa que las velocidades reflejan el contenido de minerales arcillosos ya que los valores de la velocidad de onda P son bajas comparado con el valor estándar para las arenas que es de 4.68 km/s. Dicha reducción de las velocidades pueden deberse al contenido de arcilla laminar ya que al ser un material suave y que se encuentra en capas contribuye a disminuir la velocidad. Aunque también puede deberse a la arcilla dispersa, aunque contribuye poco a los módulos elásticos de las rocas, aumenta ligeramente la densidad y por lo tanto provoca una reducción en las velocidades de onda P y S.

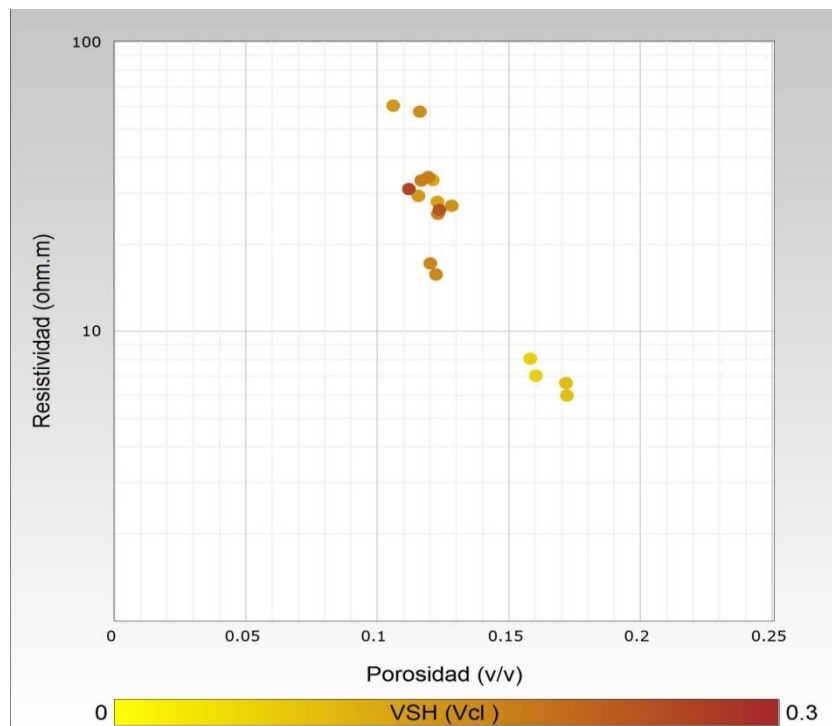


Figura 22. Grafico cruzado de porosidad contra resistividad.

En la figura 22, se observan los dos grupos con las mismas características descritas anteriormente. Se observa que la resistividad disminuye con el aumento de la porosidad. Si consideramos que hay arcilla dispersa, los materiales arcillosos tienden a reducir el tamaño del poro y la porosidad total, lo que conduce a un incremento en la resistividad eléctrica superando el efecto de la arcilla laminar y las condiciones de alta salinidad (35g/l) en el fluido que tienden a reducir la resistividad eléctrica. Esto explica porque las muestras más arcillosas tienen resistividades altas para una velocidad dada (Grupo 1) y porque las arenas más limpias tienen resistividades más bajas (Grupo 2) para la misma velocidad.

En la figura 23, observamos que en una arena limpia hay una relación lineal entre la conductividad de la roca 100% saturada con agua con la conductividad del agua pero con presencia de arcilla hay un incremento y variación de acuerdo a la salinidad: a alta salinidad no observamos el efecto de la arcilla ya que el efecto de la sal es más relevante y a baja salinidad observamos una decaimiento de la conductividad la cual está controlada por la presencia de arcilla.

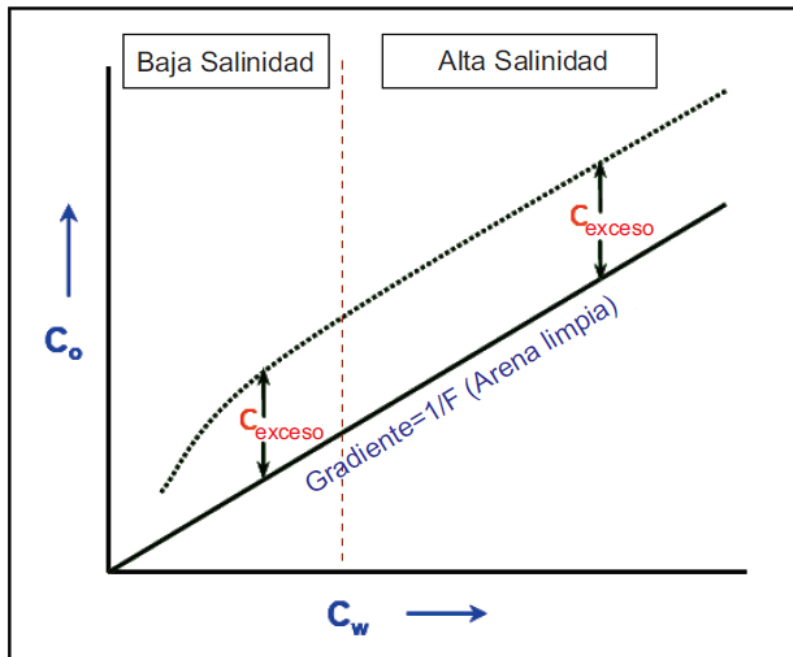


Figura 23. Grafica del efecto de la arcilla en la conductividad a altas y bajas salinidades.

Muestra	Por. (%)	Vp (Km/s)	Vs (Km/s)	ρ (Ohm.m)	Arcilla (%)				Cuarzo (%)	Felds. (%)		Otros minerales (%)
					ILL	KAO	SME	CLO		K-felds	P-felds	
W165.6	17.2	4.303	2.706	6.02	0	9.13	0	0	71.68	0	0	1.99
W165.6H	17.18	4.433	2.588	6.64	0	9.14	0	0	71.71	0	0	1.97
W166.0	16.03	4.408	2.747	7.03	0	6.74	0	0	74.17	0.78	0	2.27
W166.0H	15.82	4.516	2.758	8.05	0	6.76	0	0	74.37	0.79	0	2.26
W160.15H	12.02	4.449	2.607	17.22	4.77	11.98	0	0	64.23	1.3	3.93	1.77
W160.15	12.23	4.248	2.601	15.73	4.72	11.87	0	0	63.64	1.29	3.89	2.36
SX1	11.57	4.022	2.621	29.4	0	14.64	0	0	73.56	0	0	0.23
SX2	10.6	4.465	2.777	60.41	0	14.5	0	0	73.2	0	0	1.7
SX3	11.68	4.571	2.943	33.24	0	18.14	0	0	70.18	0	0	0
SX4	12.28	4.476	2.82	28.02	0	13.21	0	0	74.34	0	0	0.17
SX5	12.3	4.476	2.63	25.54	0	17.14	0	0	70.56	0	0	0
SX6	11.21	4.507	2.891	31.03	0	25.95	0	0	62.83	0	0	0
SX7	12.37	4.496	2.618	26.28	0	23.71	0	0	63.93	0	0	0
SX8	12.11	4.65	2.858	33.35	0	12.63	0	0	75.01	0	0	0.25
SX9	12.84	4.562	2.859	27.21	0	15.41	0	0	71.74	0	0	0.02
SX10	11.62	4.357	2.792	57.44	0	15.72	0	0	71.37	0	0	1.28
SX11	11.95	4.587	2.902	34.18	0	18.1	0	0	69.96	0	0	0

Tabla 3. Datos de Han et al, 2011 delimitados por el contenido de arcilla (>5%) y minerales de la matriz diferentes al cuarzo (<10%).

3.3 Estimación de parámetros de inversión.

En el capítulo anterior se mencionó que para llevar a cabo la estimación de las propiedades efectivas se requiere de parámetros de modelo que son los valores de propiedades físicas que caracterizan cada uno de los componentes de la roca. Las componentes de la roca basado en el modelo propuesto son: agua, arcilla (ya sea laminar o dispersa) y cuarzo. El hidrocarburo no se tomó en cuenta porque las muestras fueron secadas y posteriormente saturadas con agua, pero se indica en el modelo porque se puede aplicar para muestras con contenido de hidrocarburo.

Los parámetros de modelo pueden ser tomados de tablas de valores estándar (Schön, 2011) o estimados por medio de gráficos cruzados. En este trabajo se utilizaron las dos alternativas. Para calcular las velocidades del cuarzo se ocuparon las gráficas mostradas en la sección anterior, trazando una línea de tendencia que represente a la mayoría de las muestras y se tomaron los valores de velocidad a la porosidad 0%. Las velocidades del fluido fueron tomadas de tablas ya que conocemos que en el poro solo hay agua, en caso de que contenga hidrocarburo se procede a leer el valor a porosidad 100 %. Para la velocidad de la arcilla se ocuparon los valores de tablas de caolinita ya que es el mineral arcilloso que más contienen las muestras. La resistividad del cuarzo se consideró un valor muy grande porque es un material no conductor y la resistividad del agua se tomó el valor experimental de laboratorio. Para la velocidad y resistividad de la arcilla se ocuparon los valores de tablas para caolinita ya que es el mineral arcilloso que más contienen las muestras. En la tabla 4 que se presenta a continuación se muestran los parámetros de modelo utilizados.

Elemento	Vp (Km/s)	Vs (Km/s)	ρ (Ohm.m)
Agua	1.61	0.001	0.21
Arcilla	1.43	0.929	2
Cuarzo	4.74	3.247	1000000

Tabla 4. Parámetros de modelo de las componentes de la roca.

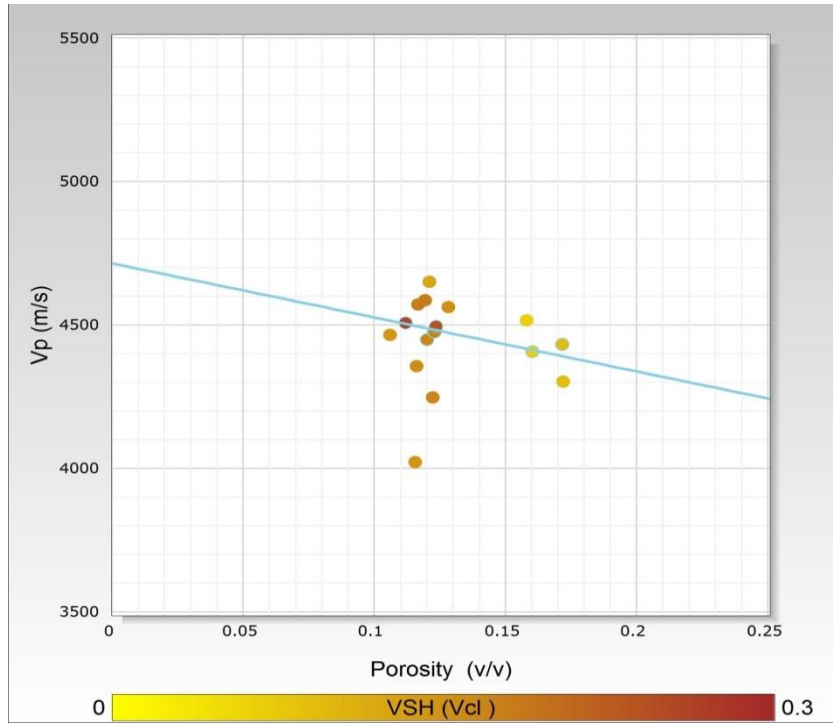


Figura 24. Determinación de la velocidad de onda P del cuarzo.

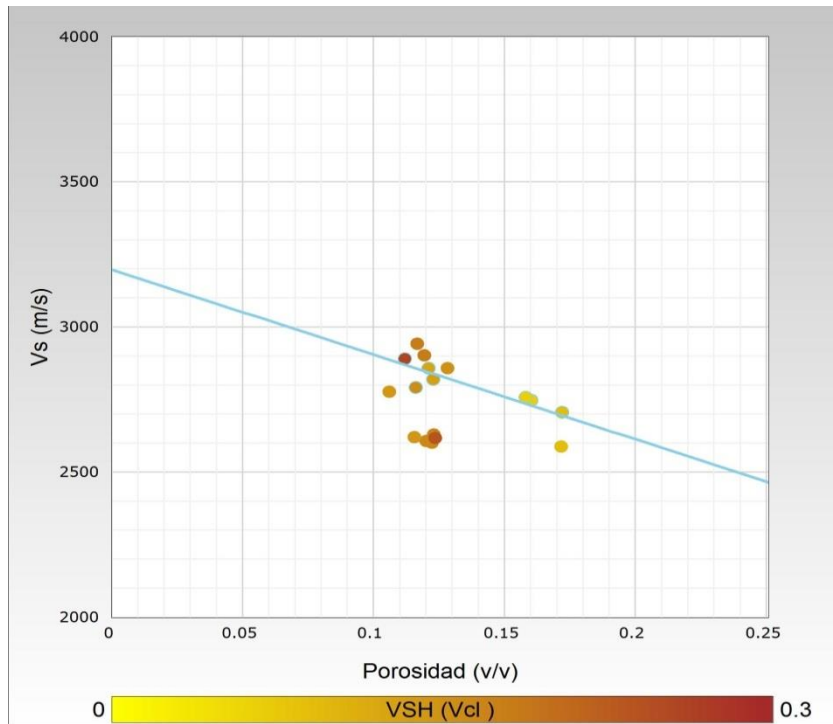


Figura 25. Determinación de la velocidad de onda S del cuarzo.

Comprender las propiedades físicas y petrofísicas es importante porque el efecto de las distribuciones de arcilla es diferente en las propiedades físicas. Es por ello que en este capítulo se analizan gráficos cruzados de porosidad contra las propiedades físicas y caracterizando el tipo de distribución de arcilla, además de que por esta técnica de interpretación se pueden definir algunos parámetros de modelo para llevar a cabo la simulación, los otros parámetros de modelo se pueden usar de tablas. En el próximo capítulo se muestran los resultados de la inversión de los datos simulados y se correlaciona con la interpretación obtenida en este capítulo.

CAPITULO 4. APLICACIÓN DEL MODELO PROPUESTO PARA ARENAS ARCILLOSAS.

En el capítulo anterior se describieron los métodos de medición de propiedades en núcleos y se analizaron por medio de gráficos cruzados las propiedades físicas y petrofísicas. También se determinaron los parámetros de modelo de cada uno de los elementos que conforman la roca.

En este capítulo se simulan las propiedades físicas efectivas usando el modelo propuesto por medio de un programa desarrollado por el IMP, posteriormente se aplica inversión conjunta por medio de la minimización de una función de costo. Se le llama inversión conjunta a la integración de datos geofísicos por medio de un modelo único, en nuestro caso utilizamos velocidades elásticas y resistividad eléctrica.

4.1 Simulación de los niveles de homogenización e inversión conjunta.

La simulación del modelo propuesto para arenas arcillosas se realizó con un programa que está basado en el método EMA en el cual se definen los parámetros de modelo (Tabla 4) y la concentración de poros y de arcilla que delimitan este proceso obteniendo como resultado propiedades efectivas (Vp^* , Vs^* y Rt^*).

El siguiente paso, es la inversión, que consiste en minimizar una función de costo para obtener las propiedades efectivas de los núcleos con sus volúmenes de arcilla dispersa y laminar. La función de costo aplicada es la siguiente:

$$F(Arc_D, Arc_L) = W_{Vp} \left(\frac{Vp - Vp^*}{Vp} \right)^2 + W_{Vs} \left(\frac{Vs - Vs^*}{Vs} \right)^2 + W_{Rt} \left(\frac{\ln Rt - \ln Rt^*}{\ln Rt} \right)^2 \quad \text{Ec. 39}$$

Donde Arc_D es la concentración de arcilla dispersa y Arc_L la concentración de arcilla laminar. W_{Vp} , W_{Vs} y W_{Rt} son pesos que se le dan a cada una de las propiedades considerando el inverso de

la diferencia entre el valor máximo y mínimo de las muestras. V_p , V_s y R_t son las propiedades medidas en laboratorio y V_p^* , V_s^* y R_t^* son las propiedades efectivas simuladas.

4.2 Resultados de la inversión y justificación.

De la inversión se obtuvieron las propiedades efectivas de las rocas (Fig. 27-29) y las concentraciones de arcilla dispersa y laminar (Tabla 5) los cuales se comparan con las propiedades medidas por Han et al, 2011.

Los datos de las propiedades efectivas tienen un rango de error relativo de 0.02-15.22 %, lo cual significa que la metodología propuesta caracteriza a las formaciones areno arcillosas. Una ventaja de esta metodología es que permite obtener diferentes propiedades físicas a través de un modelo petrofísico único.

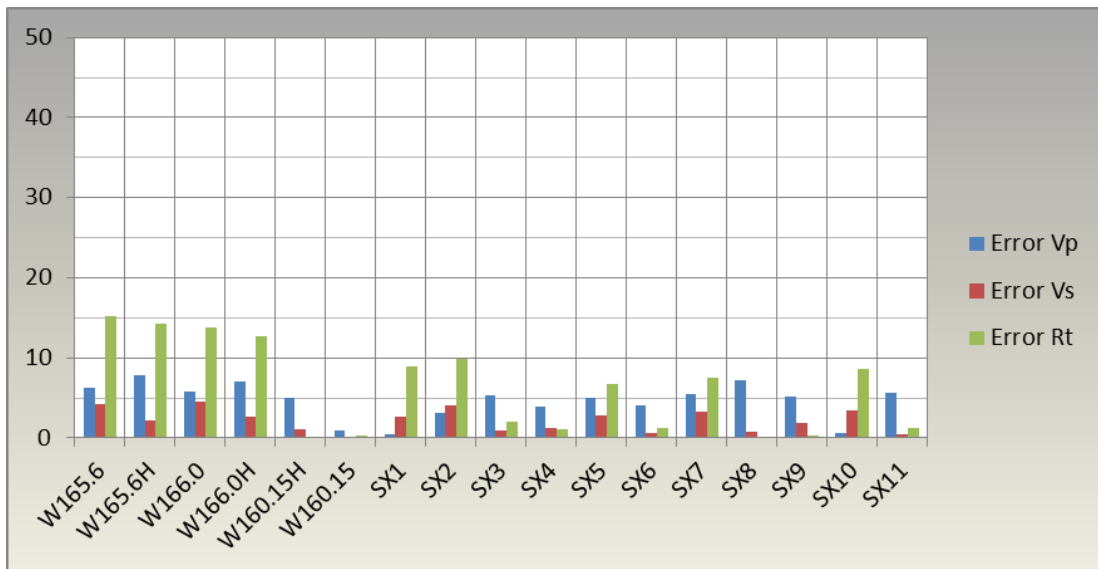


Figura 26. Errores de los resultados de la inversión comparados con los datos medidos.

En la figura 26 se observa que las velocidades de ondas P tienen un error relativo menor al 10 %, las velocidades de onda S menor al 5 % y la resistividad eléctrica menores al 16%. El error de la resistividad pese a que es la propiedad que presenta mayor error es aceptable ya que es una propiedad que se comporta de manera logarítmica por la amplia variación de sus mediciones.

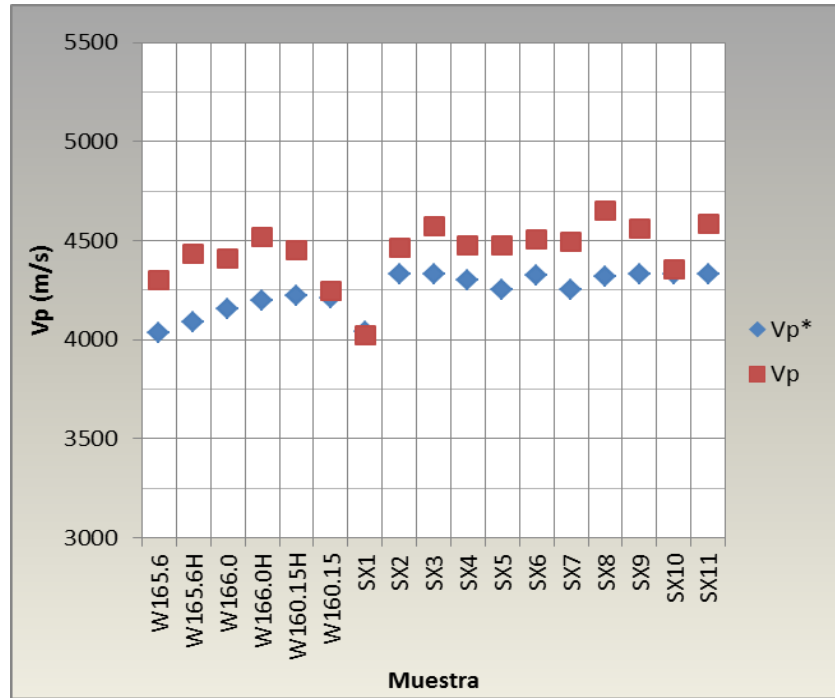


Figura 27. Comparación de las velocidades de onda P simuladas con las medidas.

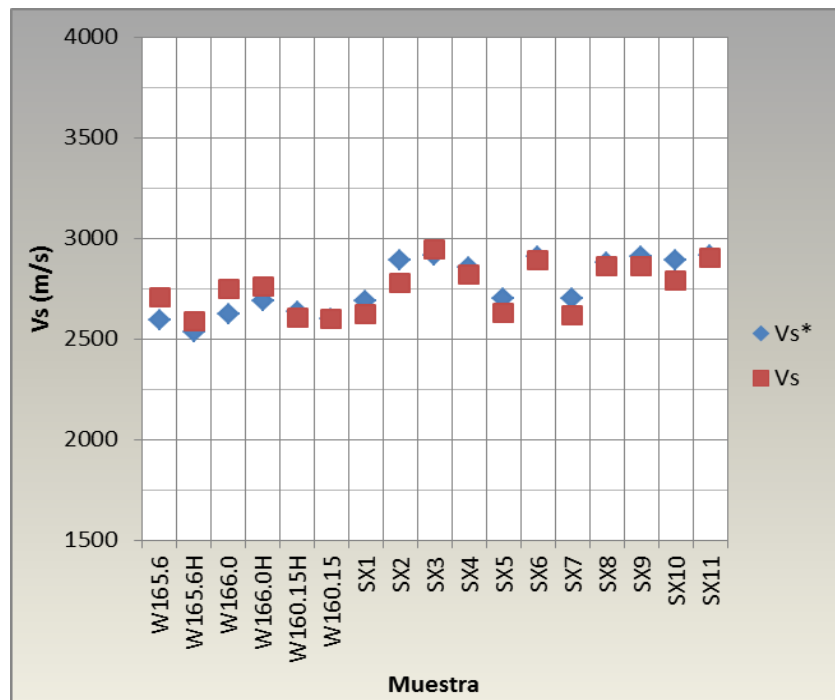


Figura 28. Comparación de la velocidad de onda S simulada con la medida.

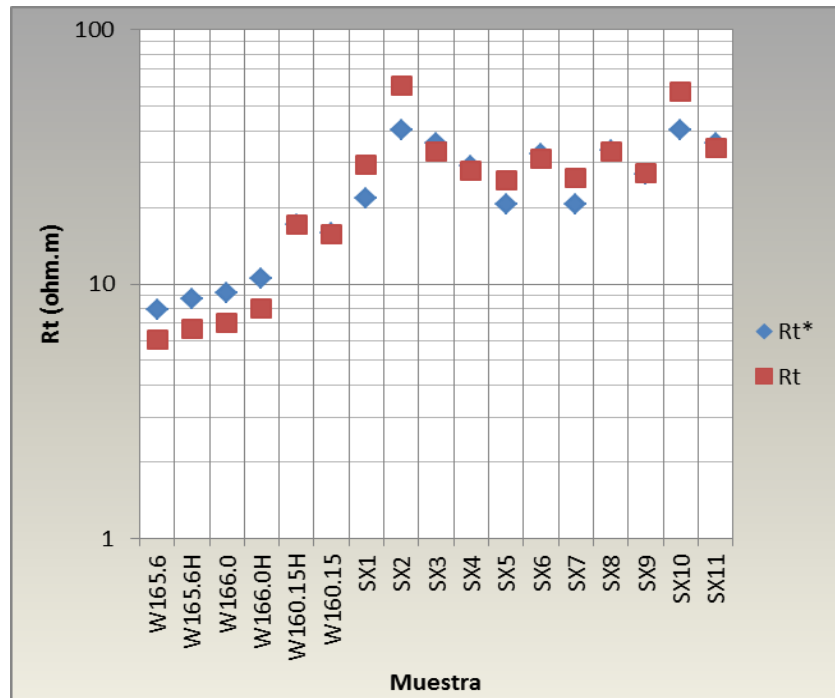


Figura 29. Comparación de las resistividades simuladas con las medidas.

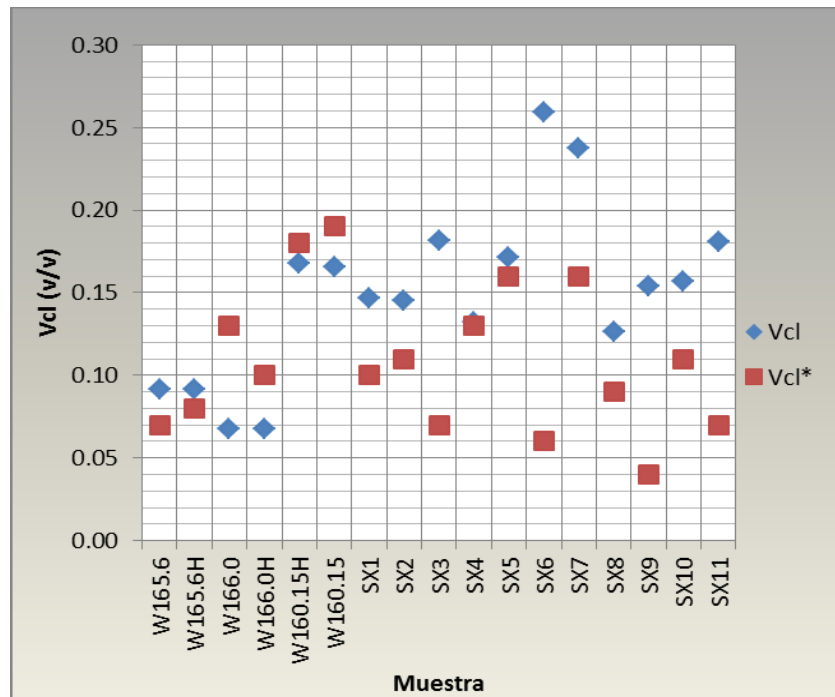


Figura 30. Comparación de las resistividades simuladas con las medidas.

Muestras	Vclm	Vcldisp	Vcllam
W165.6	0.091	0	0.07
W165.6H	0.091	0	0.08
W166.0	0.067	0	0.13
W166.0H	0.068	0	0.1
W160.15H	0.168	0.1	0.08
W160.15	0.166	0.1	0.09
SX1	0.146	0.1	0
SX2	0.145	0.1	0.01
SX3	0.181	0.07	0
SX4	0.132	0.1	0.03
SX5	0.171	0.1	0.06
SX6	0.260	0.06	0
SX7	0.237	0.1	0.06
SX8	0.126	0.08	0.01
SX9	0.154	0.04	0
SX10	0.157	0.1	0.01
SX11	0.181	0.07	0

Tabla 5. Concentraciones de arcilla laminar y dispersa en cada una de las muestras.

Se observa en las gráficas de V_p , V_s y R_t que solo las muestras W160.15, SX1 y SX10 son las muestras que menor error presentan pero sin embargo las demás muestras presentan un error que es considerable debido a que son técnicas muy distintas las de medición y la de estimación. El volumen de arcilla estimado presenta errores muy altos en la mayoría de las muestras lo cual puede deberse a que no se consideró la arcilla estructural en el modelo propuesto, pero es importante mencionar que el fin de los modelos por medio efectivo no es reproducir las propiedades medidas sino obtener propiedades petrofísicas y físicas a partir de un modelo que sea consistente, es decir, que nos permita estimar las propiedades en sus casos extremos.

Como se mencionó anteriormente, los resultados de la inversión presentan un buen ajuste de acuerdo al error, lo que significa que el modelo propuesto caracteriza a la mayoría de las muestras y las anomalías que se presentan pueden deberse a varios factores como:

- EMA es un método de aproximación que dará resultados confiables siempre y cuando se definan bien los parámetros de modelo. En nuestro caso puede ser que los parámetros de modelo no hayan sido los ideales para caracterizar todas las muestras.
- El modelo propuesto no considera heterogeneidades, es decir, si hay minerales diferentes al cuarzo como matriz puede afectar las estimaciones. En las muestras se encontró por medio de difracción de rayos X que efectivamente hay minerales como Feldespatos y otros minerales.
- En el modelo no se consideró la arcilla estructural por lo que se puede estar sobreestimando el contenido de arcilla laminar, aunque éstas pueden tener la misma respuesta en las mediciones tienen efectos diferentes como la anisotropía y los contactos suaves entre la arcilla estructural y el cuarzo.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

Se simularon propiedades físicas de manera conjunta por medio de un modelo petrofísico basado en el método EMA, con el cual se estimó la concentración de arcilla laminar y dispersa así como las propiedades efectivas de las rocas. Se propuso esta metodología ya que las técnicas convencionales para arenas arcillosas no consideran los efectos de la arcilla dispersa y laminar que provocan cambios significantes en las propiedades.

El modelo consta de tres niveles de homogenización: Nivel poro, Nivel Arena y Nivel intercalaciones de Arena-Lutita. En cada uno de ellos se definieron sus propiedades físicas y se delimitaron de acuerdo a la concentración de poro y arcilla que presenta el conjunto de datos. Nuestra metodología fue probada con datos de núcleos de Han et al, 2011 y se utilizó el método de inversión por medio de la minimización de una función de costo. Los resultados obtenidos presentaron un rango de error del 0.02% al 16% por lo que se consideran confiables ya que nuestro método es de aproximación y no de medición los cuales se pueden ver afectados por factores ambientales o errores en las mediciones). Cabe mencionar que también que la metodología propuesta puede ser aplicada en registros geofísicos ya que se pueden obtener registros sintéticos en zonas donde la herramientas no hayan medido o en zonas donde se presenten anomalías.

Para mejorar el modelo propuesto se recomienda incluir en el modelo a la arcilla estructural, la cual se encuentra sustituyendo a algunos granos de cuarzo aunque en registros suele parecerse al efecto de la arcilla laminar hay que considerarla porque en términos de producción es muy importante diferenciarlas.

La simulación conjunta de propiedades físicas es una técnica con la cual se puede caracterizar a las rocas a través de un modelo consistente que nos permite estimar propiedades efectivas y petrofísicas, la cual es recomendable implementarlas en las universidades porque es una alternativa viable en el análisis de las formaciones arcillosas las cuales son el reto con el que nuestro país se enfrenta hoy en día.

BIBLIOGRAFÍA

Aquino-López, A., Mousatov, A. and Markov, M., 2011, Model for sand formations for joint simulation of elastic moduli and electrical conductivity, journal of geophysics and engineering.

Archie, G., 1942, The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics, Transactions AIME.

Asquith, G.B., 1990, Log evaluation of shaly sandstones-a practical guide, AAPG: Continuing Education Course Note.

Asquith, G. and Krygowski, D., 2004, Basic Well Log Analysis, AAPG: Methods in Exploration.

Berg, C., 1995, A simple effective-medium model for water saturation in porous rocks, Geophysics.

Berge, P., Bonner P., and Berryman, J., 1995, Ultrasonic velocity-porosity relationships for sandstone analogs made from fused glass beads, Geophysics.

Blasco, A., Edo M., Fernandez, J., Gimeno, D., Plana, F. y Villalba, J., 1992, Aplicación de técnicas geológicas al estudio de materiales arqueológicos, Cuaternario y Geomorfología.

Carcione J.M, Ursin B. and Nordskog J.I, 2007, Cross-property relations between electrical conductivity and the seismic velocity of rocks, Geophysics 72.

Carrara E., Mazzacca A., Pece R., Roberti N. and Vanorio T, 1999, Evaluation of porosity and saturation degree by laboratory joint measurements of velocity and resistivity: A model improvement, Pure and Applied Geophysics 154.

Castagna, J., Batzle, M. and Eastwood, R., 1985, Relationships between compressional-wave and shear-wave velocities in clastic silicate rocks, Geophysics.

Clavier, C., Coates, G. and Dumanoir, J., 1984, *Theoretical and experimental bases for the dual-water model for interpretation of shaly sands*, *SPE Journal*.

Duque-Escobar, G., 2003, *Manual de Geología para ingenieros*, *Universidad Nacional de Colombia*.

Ellis M.H. 2008. *Joint seismic and electrical measurements of gas hydrates in continental margin sediments*. PhD thesis, *University of Southampton*.

Glover, P. 2001. *Formation Evaluation MSc. Courses Notes*. *Université Laval*.

Gomez, C., Dvorkin, J. and Vanorio, T., 2010, *Laboratory measurements of porosity, permeability, resistivity and velocity on Fontainebleau sandstones*, *Geophysics*.

Guéguen, Y. and Palciauskas, V., 1994, *Introduction to the physics of rocks*, *Princeton University Press*.

Guyod, H. and Wichman, P., 1972, *Theoretical notes on the resistivity of shaly sands*, *SPWLA 13th Annual Logging Symposium*.

Halliburton, 2001. *Basic petroleum geology and log analysis*. *Halliburton*.

Han, D., 1986, *Effects of porosity and clay content on acoustic properties of sandstones and unconsolidated sediments*, *PhD thesis of Stanford University*.

Han, T., Best, A., MacGregor, L. M., Sothcott, J. and Minshull, T., 2011, *Joint elastic-electrical effective medium models of reservoir sandstones*, *Geophysical prospecting*.

Kanaun, S. and Levin, V., 2008, *Self-consistent methods for composites*, *Springer*.

Kazatchenko, E., Markov, M. and Mousatov, A., 2004, *Joint modeling of acoustic velocities and electrical conductivity from unified microstructure of rocks*, *J. Geophys. Res.*

Link, P., 1982, *Basic Petroleum Geology*, *OGCI Publications*.

Marion, D., 1990, Acoustical, mechanical and transport properties of sediments and granular materials, PhD thesis. Stanford University.

Mavko, G., Mukerji, T. and Dvorkin, J., 1998, The rock physics handbook: tools for seismic analysis in porous media, Cambridge University Press.

Markov, K., 1999, Elementary micromechanics of heterogeneous media, University of Sofia.

Melgarejo, J., Proenza, J., Galí, S. y Llovet, X., 2010, Técnicas de caracterización mineral y su aplicación en exploración y explotación minera, Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana

Neasham, T., 1977, The morphology of dispersed clay in sandstone reservoirs and its effects on sandstones shaliness, pore space and fluid flow properties, SPE paper 6858.

Nicholas J., 2001, The impact-echo method: an overview, American Society of Civil Engineers.

Patnode, G. and Wyllie, M., 1950, The presence of conductive solids in reservoir rocks as a factor in electric log interpretation, Trans, A.I.M.E.

Peter, M. and Keyser, D., 1992, Porosity: Laboratory measurements, AAPG Special volumes.

Poupon, A., Loy, M. and Tixier, M., 1954, A contribution to electrical log interpretation in shaly sands, Journal of Petroleum Technology.

Powers, M., 1982, Comparison charts for estimating roundness and sphericity, AGI Data Sheets, American Geological Institute.

Pickett, G., 1963, Acoustic character logs and their applications in formation evaluation, Journal of Petroleum Technology.

Raymer, L., Hunt, E. and Gardner, J., 1980, An improved sonic transit time-to-porosity transform, SPWLA 21th Annual Logging Symposium, paper P.

Sams, M. and Andrea, M., 2001, *The effect of clay distribution on the elastic properties of sandstones*, *Geophysical Prospecting*, 49, 128-150

Schlumberger, 1987, *Log interpretation principles/applications*, Schlumberger well services Inc.

Schön, J., 2011, *Handbook of petroleum exploration and production: Physical properties of rocks*, Elsevier.

Tarbuck, E. and Lutgens, F., 1991, *Earth Sciences*, Macmillan Publishing Company.

Teruggi, M., 1982, *Diccionario sedimentológico, Vol. 1, Rocas elásticas y piroclásticas*, Ediciones Científicas Argentinas Librart (ECAL).

Thomas, E. and Stieber, S., 1975, *The distribution of shale in sandstones and its effect upon porosity*, SPWLA 16th Annual Logging Symposium.

Torres-Verdin, C, 2001, *Lecture presentation of electrical properties of porous rocks*, Petroleum of Geosystems Engineering Department at University of Texas at Austin.

Tosaya, C., and Nur, A., 1982, *Effects of diagenesis and clays on compressional velocities in rocks*, *Geophysical Research Letters*, 9.

Visser, R., Baur, K., and von Baaren, J., 1988, *Effective porosity estimation in the presence of dispersed clay*, SPWLA.

Waxman, M., and Smits, L., 1968, *Electrical conduction in oil-bearing sands*, *Society of Petroleum Engineers Journal*. 8.

Wang, Z. and Gelius, L., 2010, *Electric and elastic properties of rock samples: A unified measurement approach*, *Petroleum Geoscience* 16.

Winkler, K. and Murphy W., 1995, *Acoustic velocity and attenuation in porous rocks*, American Geophysical Union.

Winsauer, W. and McCardell, W., 1953, Ionic double layer conductivity in reservoir in rocks, Trans., A.I.M.E.

Worthington, P., 2001, The influence of formation anisotropy upon resistivity-porosity relationships, Petrophysics of SPWLA

Wyllie, M. R. J, Gregory, A. R., Gardner, I. W, 1956, Elastic wave velocities in heterogeneous and porous media. Geophysics. 21.

Xu, S. and White, R., 1995, Pore-elasticity of clastic rocks: a unified model, SPWLA 36th Annual Logging Symposium, paper V.

Referencias de internet

The role of clays and shales in low resistivity log response, Recuperado en Enero de 2013, de http://www.ihrdc.com/els/ipims-demo/t26/offline_IPIMS_s23560/resources/data/G4105.htm

Barredo, S., Rocas sedimentarias, Recuperado en Diciembre de 2012, de <http://introgeo.gl.fcen.uba.ar/Introduccion/Tprocasyestrucsedim/TProcyestrucsedim.ent.PDF>

Nelson, S., Sedimentary Rocks, Recuperado en Diciembre de 2012, de <http://www.tulane.edu/~sanelson/eens1110/sedrx.htm>

DRXP en la práctica, Recuperado en Junio de 2013, de <http://drxp.info/brevisima-introduccion-a-la-drxp/>

Difracción de Bragg, Recuperado en Junio de 2013, de <http://servicios.fis.puc.cl/rayosx/teoria.html>