

**METODOLOGÍA PARA DETERMINAR DENSIDAD DE
MICROFRACTURAS EN ROCAS CUYA MATRIZ PRESENTA BAJA
ANISOTROPIA, A PARTIR DE PARÁMETROS ANISOTROPOS:
APLICACIÓN A LA FORMACIÓN MIRADOR DEL CAMPO CUPIAGUA,
PIEDEMONTES LLANEROS**

**JENNY PAOLA RUEDA MARTINEZ
HERNAN DARIO MADERO PINZON**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍA FÍSICOQUÍMICAS
ESCUELA DE GEOLOGÍA
BUCARAMANGA**

2006

**METODOLOGÍA PARA DETERMINAR DENSIDAD DE
MICROFRACTURAS EN ROCAS CUYA MATRIZ PRESENTA BAJA
ANISOTROPIA, A PARTIR DE PARÁMETROS ANISOTROPOS:
APLICACIÓN A LA FORMACIÓN MIRADOR DEL CAMPO CUPIAGUA,
PIEDEMONTES LLANEROS**

**JENNY PAOLA RUEDA MARTINEZ
HERNAN DARIO MADERO PINZON**

**Proyecto de grado presentado como requisito parcial
para optar al título de Geólogos**

Director:

German Yuri Ojeda; Ph. D.

Codirector (es):

Alberto Ortiz; M.Sc.

Carlos A. Piedrahita; Ph.D.

Néstor F. Saavedra; M.Sc.

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍA FÍSICOQUÍMICAS
ESCUELA DE GEOLOGÍA
BUCARAMANGA**

2006

DEDICATORIA

*"A Dios y a La virgen María,
A mis padres 'Heriberto y Adelaida',
A mis hermanos 'Hebert y Carolina',
A 'Hernan'".*

JENNY PAOLA

DEDICATORIA

"A Dios,

A mis padres Eduardo y Esperanza',

A mis hermanos Maicol y Carolina',

A mi hija Stephany,

A mis amigos,

A mis abuelos Hernando y Amelia

Y por supuesto a Jenny Paola''.

HERNAN DARIO

“A Yesid Javier Gómez Landazabal”
Nuestro Amigo De Siempre

AGRADECIMIENTOS

A la escuela de Geología, encargada de nuestra formación como profesionales y por la calidad humana brindada.

Al Instituto Colombiano del Petróleo, ECOPETROL - ICP, por permitir el desarrollo de este trabajo.

Al Grupo de Investigación Estabilidad de Pozo, por la oportunidad que nos dio de hacer parte de este y crecer en el ámbito de la investigación.

A German Y. Ojeda Ph. D. y Marco I. Álvarez, Ph.D. por la confianza y colaboración en el desarrollo del proyecto.

A Carlos Piedrahita Ph.D., Alberto Ortíz, M.Sc. y Néstor Fernando Saavedra, M.Sc. codirectores del proyecto por sus conocimientos y sugerencias durante el desarrollo de este libro.

A Hernando Altamar, Karen Pachano, Herly por sus aportes y asesoría en el entendimiento de la anisotropía.

Al personal del laboratorio de Mecánica de Rocas ICP, Tecnología Operacional ICP, De Rocas UIS, Laboratorio De Química UIS, por la colaboración técnica en el desarrollo de los experimentos.

A nuestros amigos.

TITULO: METODOLOGÍA PARA DETERMINAR DENSIDAD DE MICROFRACTURAS EN ROCAS CUYA MATRIZ PRESENTA BAJA ANISOTROPIA, A PARTIR DE PARÁMETROS ANISOTROPOS: APLICACIÓN A LA FORMACIÓN MIRADOR DEL CAMPO CUIAGUA, PIEDEMONTE LLANERO[▪].

**AUTORES: JENNY PAOLA RUEDA MARTINEZ^{▪▪}
HERNAN DARIO MADERO PINZON^{▪▪}**

Palabras claves: Anisotropía, densidad de microfracturas, parámetros anisótropos, simulación de microfracturas, ondas acústicas.

RESUMEN

La anisotropía es una propiedad de las rocas la cual es generada por diversos factores. Comprender cuáles son estos factores requiere un análisis extenso. Para contribuir en dicho análisis, en esta investigación se estudió la densidad de microfracturas suponiendo que las microfracturas son generadoras de anisotropía en las rocas. Para evaluar el impacto de las microfracturas en la anisotropía se elaboraron modelos sintéticos de rocas con microfracturas simuladas, variando la densidad de microfracturas (inclusiones). Dicha anisotropía se obtuvo a partir de mediciones acústicas, estableciendo cómo influye la densidad espacial de las microfracturas en las velocidades de las ondas longitudinales o de compresión P y de corte o cizalla S.

A partir de los resultados obtenidos fue posible establecer una relación cuantitativa entre la densidad de microfracturas y la anisotropía de las ondas S ultrasónicas cuando se propagan a través de un medio fracturado de composición sintética, aportando evidencia de laboratorio con respecto a (1) el papel de las microfracturas como generadoras de anisotropía; (2) la relación directa entre la anisotropía de la onda S desde una densidad de microfracturas de 0% al 4.96% y para valores mayores del 4.96% la anisotropía presenta una disminución; y (3) la variación relativa de la anisotropía de las ondas P y ondas S.

Una vez se obtuvo este comportamiento se procedió a aplicar la metodología en 9 muestras de corazones de roca de la Formación Mirador, donde fue posible relacionar en 6 de estas muestras la densidad de microfracturas obtenida a partir de la anisotropía con la intensidad de fracturamiento obtenida a partir de análisis visual en corazones (YNF-ICP).

[▪] PROYECTO DE GRADO

^{▪▪} FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOQUIMICAS; ESCUELA DE GEOLOGÍA.

TITLE: METHODOLOGY FOR DETERMINE DENSITY OF MICROFRACTURE IN ROCKS WHOSE BACKGROUND PRESENTS LOW ANISOTROPY, AS OF ANISOTROPICS PARAMETERS: AN APLICACION TO FORMATION MIRADOR OF THE CUPIAGUA FIELD; PIEDEMONTE LLANERO[▪].

**AUTHORS: JENNY PAOLA RUEDA MARTINEZ^{▪▪}
HERNAN DARIO MADERO PINZON^{▪▪}**

Keywords: Anisotropy, density microfracture, parameters anisotropic, simulation of microfracture, waves acoustic.

ABSTRACT

The anisotropy is a property of the rocks which is generated by diverse factors. To understand which these factors it is required an extensive analysis. To contribute in this analysis, in this investigation it was studied the microfractures density supposing that the microfractures is generating of anisotropy in the rocks. To evaluate the impact of the microfractures in the anisotropy synthetic models of rocks they were elaborated with microfractures simulated, varying the microfractures density (inclusions). This anisotropy was obtained as to acoustic mensurations, found how it influences the space density of the microfractures in the speeds of the longitudinal waves or of compression P and of court or shears S.

As of the obtained results it was possible to establish a quantitative relationship between the microfractures density and the anisotropy of the waves ultrasonic S when they spread through a medium fractured of synthetic composition, contributing laboratory evidence with respect to (1) the paper of the microfractures like generating of anisotropy; (2) the direct relationship between the anisotropy of the wave S and the density of microfractures of 0% to 4.96% and for values bigger than 4.96% the anisotropy presents a decrease; and (3) the relative variation of the anisotropy of the waves P and waves S.

Once this behavior was obtained it proceeded to apply the methodology in 9 samples of hearts of rock of the Formation Mirador, where it was possible to relate in 6 of these samples the density of microfractures obtained as of the anisotropy with the intensity of fracture obtained as of visual analysis in hearts (YNF-ICP).

[▪] PROJECT DEGREE

^{▪▪} FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOQUIMICAS; ESCUELA DE GEOLOGÍA.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Desarrollar una metodología para determinar la densidad de microfracturas en rocas cuya matriz presenta baja anisotropía, a partir de parámetros anisótropos.

OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Identificar los factores que generan anisotropía en las rocas.
- Encontrar y analizar la relación entre los parámetros de anisotropía y los parámetros de fracturas.
- Realizar modelos sintéticos de rocas “con inclusiones simulando microfracturas” manipulando la densidad de microfracturas para observar la variación de los parámetros anisótropos mediante mediciones acústicas.
- Aplicar la metodología sobre la Formación Mirador en un pozo del campo Cupiagua

JUSTIFICACIÓN

La importancia de la determinación de la densidad de microfracturas en las rocas esta dada por varios factores. Cuando se realiza el modelamiento de yacimientos naturalmente fracturados se buscan datos que ayuden a representar las condiciones originales a las que se encuentran las rocas en el yacimiento, el valor de la densidad de microfracturas disminuye la incertidumbre en los reservorios, por lo que estos datos afectan directamente la representatividad que los modelos tienen sobre la realidad, esto implica que las proyecciones económicas que se tengan sean las adecuadas y no se presenten perdidas. Con el valor de la densidad de microfracturas se establecen trenes de permeabilidad, zonas de acumulación de hidrocarburos, así como volúmenes porosos. La densidad de microfracturas además es fundamental en la realización de estrategias para evitar daños a la Formación así como perdidas de fluidos, a partir de este parámetro se determinan zonas de riesgo de perdidas de fluido hacia la Formación, lo cual implica que se tenga el peso de lodo adecuado en zonas fracturadas. El parámetro de densidad de microfracturas es importante ya que con esto se evalúa el riesgo de exploración y es posible optimizar el tratamiento para la extracción de hidrocarburos.

Actualmente los datos de densidad de microfracturas en las rocas, se estiman a partir de análisis petrográficos, este método convencional requiere altos costos y tiempo. La metodología propuesta en esta investigación disminuye esos inconvenientes.

El desarrollo de este proyecto esta enmarcado dentro del Convenio 002 de la Unidad de Investigación del Instituto Colombiano del Petróleo y el Grupo de Estabilidad de pozo (Wellbore Stability) de la Universidad Industrial de Santander, dentro del programa de investigaciones en

Yacimientos Naturalmente Fracturados (YNF) para los campos del
Piedemonte Llanero Colombiano.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	1
1. GENERALIDADES DE LA ANISOTROPIA.....	3
1.2 ANISOTROPÍA	4
1.2.1 Heterogeneidad	4
1.2.2 Factores Que Generan Anisotropía	5
2. ONDAS EN MEDIOS ELÁSTICOS.....	7
2.1 LAS ONDAS P Ó PRIMARIAS	7
2.2 LAS ONDAS S Ó SECUNDARIAS	8
3. SIMETRÍA DE LOS MEDIOS ELÁSTICOS	9
3.1 MEDIO EFECTIVO	9
3.2 ISOTROPÍA TRANSVERSAL O HEXAGONAL	13
3.3 DETERMINACIÓN CUANTITATIVA DE LA ANISOTROPÍA EN MEDIOS TRANSVERSALMENTE ISÓTROPOS	15
3.4 ONDAS ACÚSTICAS EN MEDIOS TRANSVERSALMENTE ISÓTROPOS	16
4. ESCALA DE LAS FRACTURAS	18
4.1 ANISOTROPÍA EN FUNCIÓN DE LA ESCALA.....	19
4.2 MODELOS DE FRACTURAS	22
4.2.1 Modelo De Grietas En Forma Elipsoidal (<i>Penny Shaped</i>) Teoría De Hudson, 1980.	22
5. METODOLOGÍA	24
5.1 PROCEDIMIENTO PARA LA ELABORACIÓN DE NÚCLEOS SINTÉTICOS CON MICROFRACTURAS SIMULADAS	25
5.1.1 Preparación de la arena	25
5.1.2 Fabricación De Núcleos	27
5.2 SIMULACIÓN DE MICROFRACTURAS.....	28
5.2 Simulación de Microfracturas secas.....	30
5.2.1 Disolución De Las Láminas De Aluminio	30
5.3 MEDICIONES ACÚSTICAS	32
5.3.1 Equipo De Mediciones Acústicas En El Laboratorio	34
5.3.1.3.1 Propiedades.....	36
5.3.1.3.2 Materiales Piezoeléctricos	36
5.3.1.3.3 Características De los Cristales Piezoeléctricos	37
5.4 MONTAJE DE PIEZOELÉCTRICOS EN ROCAS	37
5.5 DISPOSITIVO PARA AHORRO DE CRISTALES.....	38
5.6 POLARIZACIÓN DE LA ONDA S (SHEAR WAVE SPLITTING).....	42

6. RESULTADOS.....	45
6.1 APLICABILIDAD DE LA CURVA DE LA ANISOTROPÍA DE LA ONDA S.....	53
6.2 RESULTADOS OBTENIDOS DE LOS PLUGS SINTÉTICOS DESPUÉS DE DISOLVER LAS LÁMINAS.....	54
7. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA EN ROCAS DE LA FORMACIÓN MIRADOR DEL CAMPO CUPIAGUA (PIEDEMONTES LLANERO).....	57
7.1 LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA.....	57
7.2 FORMACIÓN MIRADOR.....	59
7.2.1 Generalidades Formación Mirador.....	59
7.2.2 Análisis Petrológico.....	61
7.3 APLICACIÓN DE LA METODOLOGIA EN ROCAS DE LA FORMACIÓN MIRADOR.....	61
7.4 RESULTADOS OBTENIDOS UTILIZANDO MUESTRAS DE LA FORMACION MIRADOR.....	63
8. CONCLUSIONES	75
9. RECOMENDACIONES	77
REFERENCIAS.....	78

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Representación gráfica de los materiales isotropos.....	3
Figura 2. Representación gráfica de los materiales anisotropos.....	4
Figura 7. Representación del comportamiento de la onda P.....	8
Figura 8. Representación del comportamiento de la onda S.....	8
Figura 9. Esquema del modelo de medio efectivo, conformado por una matriz (<i>background</i>) con inclusiones.....	10
Figura 10. Representación de un medio con isotropía transversal con eje de simetría vertical, esquema de medios estratificados.....	13
Figura 11. Representación de los medios de interés para reservorios fracturados. HTI, Medio con eje de simetría horizontal.....	14
Figura 12. Medio transversalmente isotropo con eje de simetría horizontal HTI, se presenta un plano isotropo y un plano del eje de simetría.....	14
Figura 13. Representación de la propagación de las ondas en un medio elástico con fracturas verticales y paralelas.....	17
Figura. 15 Frecuencias de ondas utilizadas para el análisis de las fracturas en las rocas.....	19
Figura 16. Comportamiento de un frente de onda con respecto a la longitud de onda en medios con diferentes velocidades. Deformación del frente de onda.....	19
Figura 17. Comportamiento de un frente de onda con respecto a la longitud de onda en medios con diferentes velocidades. El frente de onda se promedia debido a que la longitud de onda es mayor que el espacio entre fracturas.....	20
Figura 18 Comportamiento de un frente de onda con respecto a la longitud de onda en medios con diferentes velocidades. Frentes de ondas deformados. En esta figura la longitud de onda es menor que el espacio y las dimensiones de las fracturas.....	21
Figura 19. Comportamiento de un frente de onda con respecto a la longitud de onda en medios con diferentes velocidades. El frente de onda se promedia debido a que la longitud de onda es mayor que el espacio entre fracturas y las dimensiones de las fracturas.....	21
Figura 20. Representación del modelo de Hudson.....	23
Figura 21. Arena Húmeda antes del secado.....	25
Figura. 22. Horno para secado.....	25
Figura 23. Arena después de extraerla del secado.....	25
Figura 24. Agitador. Herramienta para realizar el tamizado.....	25
Figura 25. Herramienta para realizar el tamizado, arena utilizada para realizar los núcleos sintéticos de tamaño de grano de 0.21 a 0.149 mm.	26
Figura 26. Fabricación de modelos sintéticos de rocas con inclusiones de láminas de Aluminio simulando microfracturas.....	27
Figura 27 Microfracturas simuladas con láminas circulares de Aluminio, de 6 mm de diámetro, y 0.07mm de espesor.....	28
Figura 28. Fotografía de los <i>plugs</i> sintéticos fabricados.....	29
Figura 29. Lamina de Aluminio en una solución de acido clorhídrico 4N. Se observa la reacción de la lámina de Aluminio.....	31
Figura 30. Núcleo sintético con láminas de aluminio incluidas. Corte realizado después de sumergirla en una concentración de HCl 6N durante 120 horas.....	32

Figura 31. Montaje de los cristales sobre la roca. Para determinar anisotropía en modelos HTI.....	33
Figura 32 Equipo de mediciones acústicas.....	34
Figura 33 Comportamiento de los cristales piezoeléctricos.....	35
Figura 34 Montaje de los cristales fijados directamente a la roca.....	38
Figura 35 Placas para realizar medidas longitudinales.....	39
Figura 36. Soporte para <i>Plugs</i>	39
Figura 37. Placas para realizar medidas diametrales.....	40
Figura 38. Fotografía de una onda S en el osciloscopio obtenida con el dispositivo de ahorro de cristales.....	40
Figura 39. Montaje de un cilindro de aluminio en el dispositivo ahorrador de cristales.....	41
Figura 40. Ondas S polarizadas. En la figura se observa un medio fracturado con direcciones de fracturas preferenciales.....	43
Figura 41A. En la izquierda se observa un medio con fracturas orientadas. El cuadro situado en la parte central del medio fracturado representa la polarización de la onda.....	43
Figura 41B. Comportamiento de la propagación de ondas S en un medio con microfracturas orientadas en una dirección preferencial.....	44
Figura 42. Relación de la Anisotropía de la onda S promediada Vs la densidad de microfracturas.....	49
Figura 43. Relación de la Anisotropía de la onda P promediada Vs la densidad de microfracturas.....	49
Figura 44. Variación de la relación de anisotropía de ondas P y S (δ) (promediada en cinco mediciones cada una) Vs la densidad de microfracturas.....	50
Figura 45. Relación de la Anisotropía de la onda S promediada Vs la densidad de microfracturas. Se observa una tendencia directamente proporcional entre la Anisotropía de la Onda S y la densidad de microfracturas.....	51
Figura 46. Relación de la diferencia de tiempos promediados de las ondas S polarizadas paralelas S1a y perpendiculares S1b a las microfracturas.....	52
Figura 47. Relación de velocidades promediadas S1b (onda S polarizada perpendicular a las microfracturas) y S1a (ondas polarizadas paralela a las microfracturas).....	53
Figura 48. Esquema de la clasificación del grado de fracturamiento de las rocas, según Crampin, (1994).....	53
Figura 49. Gráfica de Anisotropía de la onda S Vs densidad de microfracturas (láminas disueltas).....	57
Figura 50. Señal obtenida de los <i>plugs</i> sintéticos después de disolver la inclusiones (láminas de aluminio) con ácido clorhídrico.....	56
Figura 51. Localización Geográfica del Piedemonte Llanero Colombiano.....	58
Figura 52. Ubicación del Campo Cupiagua.....	58
Figura 53. Columna Estratigráfica Generalizada Del Piedemonte Llanero. Tomado de Evaluación Integrada de Yacimientos del Campo Cupiagua.....	60
Figura 54. En esta fotografía se observan ocho de los nueve <i>plugs</i> empleados en la validación de la metodología.....	62
Figura 55. Curva del comportamiento del tiempo de propagación de la onda S polarizada cada 30° haciendo un barrido de 0° a 180° profundidad 14090,5'63	63

Figura 56. Curva del comportamiento del tiempo de propagación de la onda S polarizada cada 30° haciendo un barrido de 0° a 90° 12610,58'.....	64
Figura 57. Curva del comportamiento del tiempo de propagación de la onda S polarizada cada 30° haciendo un barrido de 0° a 90° 12501,54'.....	65
Figura 58. Curva del comportamiento del tiempo de propagación de la onda S polarizada cada 30° haciendo un barrido de 0° a 90° profundidad 12654,67'.....	66
Figura 59. Curva del comportamiento del tiempo de propagación de la onda S polarizada cada 30° haciendo un barrido de 0° a 90°. Como se observa en la tabla 11 la dirección de mayor anisotropía se presenta a los 0° y 90° profundidad 12654,83'.....	67
Figura 60. Curva del comportamiento del tiempo de propagación de la onda S polarizada cada 30° haciendo un barrido de 0° a 180° profundidad 12655,04'.....	68
Figura 61. Curva del comportamiento del tiempo de propagación de la onda S polarizada cada 30° haciendo un barrido de 0° a 90° profundidad 12843,25'.....	69
Figura 62. Curva del comportamiento del tiempo de propagación de la onda S polarizada cada 30° haciendo un barrido de 0° a 90° profundidad 12843,42'.....	70
Figura 63. Curva del comportamiento del tiempo de propagación de la onda S polarizada cada 30° haciendo un barrido de 0° a 90° profundidad 13867,58`.....	71

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Tipos de simetría en los Medios Elásticos.....	12
Tabla 2. Datos de los plugs elaborados.....	29
Tabla 3. Datos obtenidos con el dispositivo sobre un cilindro de aluminio.....	41
Tabla 4. Datos promediados de los plugs sintéticos con láminas de Aluminio como inclusiones.....	46
Tabla 5. Datos promediados de los plugs sintéticos con láminas disueltas.....	54
Tabla 6. Descripción de los plugs empleados para la determinación de densidad de microfracturas a partir de parámetros anisótropos.....	62
Tabla 7. Tiempos de propagación de la onda S1 polarizada a diferentes ángulos en el plug de profundidad 14090,5'.....	63
Tabla 8. Tiempos de propagación de la onda S1 polarizada a diferentes ángulos; plug de profundidad 12610,58'.....	64
Tabla 9. Tiempos de propagación de la onda S1 polarizada a diferentes ángulos; plug de profundidad 12501,54'.....	65
Tabla 10. Tiempos de propagación de la onda S1 polarizada a diferentes ángulos; plug de profundidad 12654,67'.....	66
Tabla 11. Tiempos de propagación de la onda S1 polarizada a diferentes ángulos; plug de profundidad 12654,83'.....	67
Tabla 12. Tiempos de propagación de la onda S1 polarizada a diferentes ángulos; plug de profundidad 12655,04'.....	68
Tabla 13. Tiempos de propagación de la onda S1 polarizada a diferentes ángulos; plug de profundidad 12843,25'.....	69
Tabla 14. Tiempos de propagación de la onda S1 polarizada a diferentes ángulos; plug de profundidad 12843,42'.....	70
Tabla 15. Tiempos de propagación de la onda S1 polarizada a diferentes ángulos; plug de profundidad 13867,58'.....	71
Tabla 16. Densidad de microfracturas de los plugs de la Formación Mirador, a partir de la anisotropía de la onda S (γ), comparados con la intensidad de fracturamiento (dato obtenido de.....)	72
Tabla 17. Densidad de microfracturas de los plugs de la Formación Mirador, a partir de la diferencia de los tiempos de propagación (S1b-S1a), comparados con la intensidad de fracturamiento.....	74

INTRODUCCIÓN

En el presente trabajo se busca obtener información de la anisotropía de las rocas que componen un yacimiento. La anisotropía es una propiedad física de las rocas que explica la variabilidad de las propiedades mecánicas de un medio según la dirección en la cual se analicen. El propósito de esta investigación es medir la anisotropía de las velocidades de las ondas acústicas a medida que se propagan en un medio rocoso.

Una de las necesidades que se presenta en la industria del petróleo es reconocer la orientación y densidad de las fracturas en los yacimientos. Varios autores han considerado que la anisotropía de las ondas sísmicas es el resultado de fracturas en el subsuelo, pero la anisotropía no es sólo un fenómeno debido a fracturas sino también es producida por variaciones de esfuerzos o permeabilidades, las cuales pueden ocurrir a diferentes escalas (Thomsen 2002).

De acuerdo con lo anterior, se planteó trabajar con ondas producidas en el laboratorio. El trabajo en laboratorio permite manipular las condiciones de los experimentos y hace posible obtener información a partir de parámetros controlados. Por lo tanto el objetivo que se propuso fue determinar la densidad de microfracturas apoyados en la suposición de que dichas microfracturas producen anisotropía en las rocas. La ejecución de este trabajo evidenció la necesidad de desarrollar una metodología propia. La metodología desarrollada consistió en determinar la anisotropía producida por microfracturas en núcleos sintéticos en los cuales se manipularon los parámetros de microfracturas. Dicha anisotropía se obtuvo a partir de mediciones acústicas, estableciendo cómo influye la densidad espacial de las microfracturas en las velocidades de las ondas longitudinales o de compresión P y de corte o cizalla S.

En este estudio fue posible establecer una relación cuantitativa entre la densidad de microfracturas y la anisotropía de las ondas ultrasónicas cuando se propagan a través de un medio fracturado de composición sintética (mezcla de arena más epóxico). Una vez se obtuvo esta relación se procedió a aplicar la metodología en muestras de corazones de roca de la Formación Mirador. Los resultados de este estudio aportan evidencia de laboratorio con respecto a (1) el papel de las fracturas como generadores de anisotropía; (2) las discontinuidades en la función que relaciona la anisotropía con la densidad de microfracturas; y (3) la variación relativa de la anisotropía de las ondas P y ondas S.

1. GENERALIDADES DE LA ANISOTROPIA

Para tener un mayor entendimiento de los aspectos que se tuvieron en cuenta en esta investigación, a continuación se explican algunos conceptos fundamentales.

1.1 ISOTROPÍA

Los materiales son “isótropos” cuando sus propiedades físicas se mantienen constantes a través de ellos sin cambiar su magnitud, independientemente del ángulo u orientación en el cual se estén midiendo. Como se observa en la Figura 1, los ejes x, y, y z representan las propiedades del cubo, de manera que si se tiene una cantidad de esferas dentro del cubo estas van a tener la misma forma y no varían las propiedades del material.

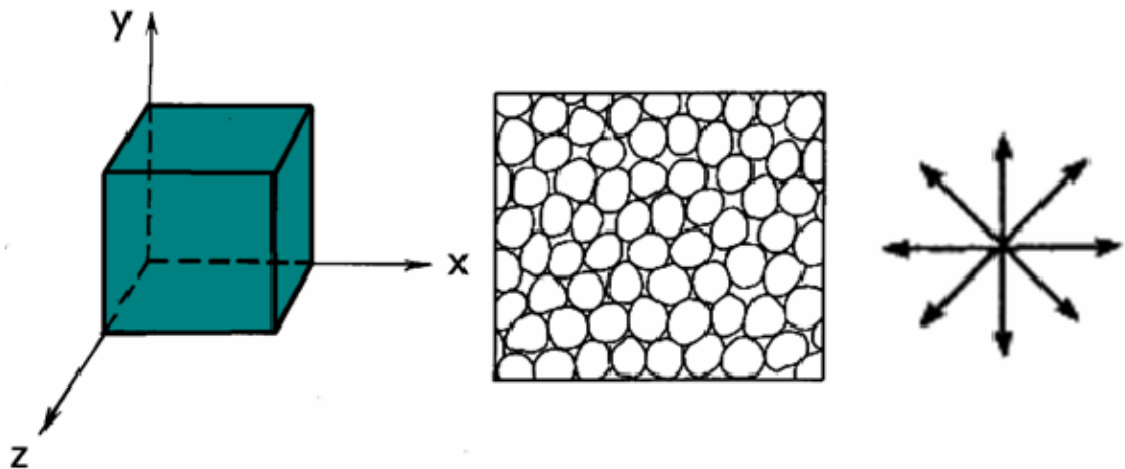


Figura 1. Representación gráfica de los materiales isótropos. Las propiedades físicas del medio son las mismas independientemente de la dirección.

Los modelos isótropos son comúnmente usados para la determinación de las propiedades mecánicas de las rocas. Esta suposición de isotropía se asume para un fácil entendimiento y para disminuir la complejidad en los cálculos. Sin embargo, la mayoría de elementos que componen la corteza

terrestre no presentan estas propiedades, sino que por el contrario son “anisótropos”.

1.2 ANISOTROPÍA

A diferencia de los materiales isótropos, en materiales *anisótropos* las propiedades físicas varían de acuerdo con la orientación en la cual se realizan las medidas. Como se observa en la Figura 2, las esferas tienden a alinearse en cierta dirección de manera que si se estuviera midiendo su permeabilidad, el flujo tendría una dirección preferencialmente horizontal.

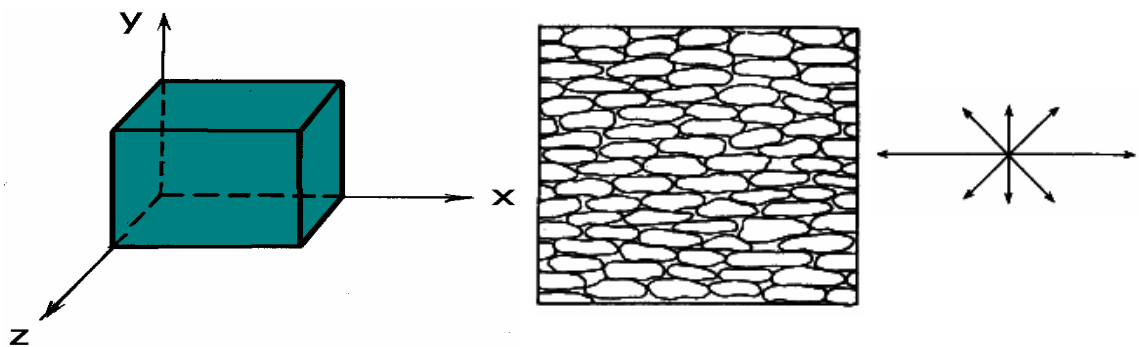


Figura 2. Representación gráfica de los materiales anisótropos. Las propiedades físicas del medio cambian de acuerdo con la dirección analizada.

1.2.1 Heterogeneidad

Heterogeneidad se define como la dependencia de las propiedades físicas de las rocas de acuerdo con la posición. La heterogeneidad tiene un cierto orden, una fábrica y una textura.

Según Thomsen (2002) *“Es la heterogeneidad ordenada, a pequeña escala, la que aparece como anisotropía a una escala mayor”*

¿Cuál es la diferencia entre “gran escala” y “pequeña escala”?, estos son únicamente términos comparativos, siendo el estándar de comparación la longitud de onda de medición. Siempre que las longitudes de onda sean

grandes comparadas con la escala de las heterogeneidades ordenadas, obedecen las leyes de propagación de ondas anisótropas.

1.2.2 Factores Que Generan Anisotropía

Entre los factores que generan anisotropía en las rocas se encuentra la estratificación (Figura 3), debido a que cada estrato tiene unas propiedades físicas diferentes al que le suprayace, por lo tanto cada estrato puede considerarse individualmente isótropo pero el grupo de estratos presentará anisotropía.

Hay factores geológicos adicionales que pueden generar anisotropía en las rocas. Por ejemplo las fracturas, especialmente cuando son paralelas, generan anisotropía, debido a que estas hacen que las propiedades del medio no se comporten homogéneamente en diferentes direcciones (Figura 4). Así mismo, el contenido de arcilla puede generar anisotropía en las rocas por su estructura laminar (Figura 5). En la Figura 6 se puede observar foliación en una roca metamórfica, la cual usualmente se produce por condiciones de alta presión y temperatura, que hacen que los minerales se orienten en una dirección preferencial, por lo cual generan anisotropía en la roca.



Figura 3. Estratificación de las rocas. Formación Une alternancia de lutitas negras y areniscas, vía Bogotá Villavicencio.



Figura 4. Fracturas paralelas en las rocas

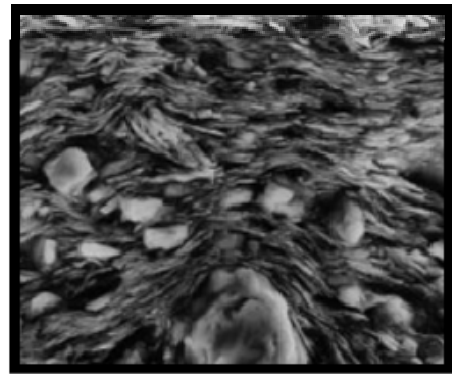
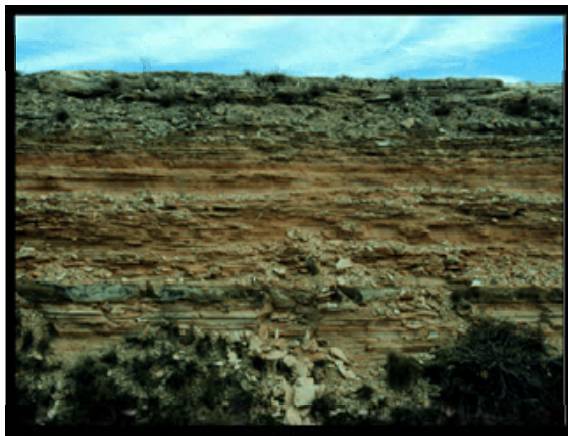


Figura 5. Contenido de minerales laminares de las rocas, ejemplo shale



Figura 6. Foliación de las rocas metamórficas. Fotografía sección delgada esquistos Formación Silgará.

2. ONDAS EN MEDIOS ELÁSTICOS

El comportamiento de la proagación de las velocidades acústicas en medios porosos es un tema de interés por su importancia en la industria del petróleo. Una onda acústica se puede definir como la propagación de una perturbación en un medio elástico. Cuando una roca es sometida a cualquier tipo de esfuerzo esta sufre una deformación temporal. Dado que las rocas se comportan elásticamente, los estudios de propagación de ondas en medios rocosos han demostrado que el esfuerzo aplicado sobre ellas causa una perturbación (deformación), la cual se propaga a lo largo de toda la roca comportándose como una onda acústica con cierta velocidad.

Basados en este comportamiento elástico de las ondas en las rocas, se han realizado investigaciones en el área de la geomecánica (Galviz y Valera), que han permitido establecer relaciones entre el comportamiento elástico de las rocas y las velocidades sónicas del medio poroso. Las ondas que se propagan en medios elásticos, son principalmente de dos tipos: ondas P (primarias) y ondas S (secundarias).

2.1 LAS ONDAS P Ó PRIMARIAS

También llamadas compresivas, son ondas que se propagan por compresión y tensión. El movimiento de las partículas de roca por las ondas P consiste en una alternancia de contracciones y distensiones, es decir, se acercan y alejan entre sí moviéndose en la dirección de propagación de la onda (Figura 7). Son, por tanto, ondas sonoras y pueden viajar a través de sólidos y líquidos. La condición para que una onda pueda propagarse en un medio es que el medio se comporte elásticamente. Tanto los sólidos como los líquidos son incompresibles ante un esfuerzo instantáneo, aunque admiten una cierta compresión de tipo elástico, es decir, recuperable. La velocidad de propagación (V_p)

depende de la densidad de la roca. La velocidad es mayor, en general, cuanto mayor es la densidad de las rocas.

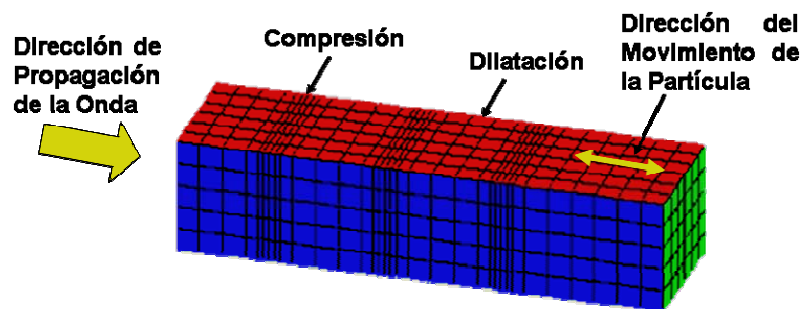


Figura 7. Representación del comportamiento de la onda P.

2.2 LAS ONDAS S Ó SECUNDARIAS

También llamadas de cizalla ó transversales, se propagan por movimientos perpendiculares a su dirección de propagación, siendo en eso semejantes a las de la luz. Aquí las partículas son desplazadas lateralmente, sufriendo un cizallamiento con respecto a las adyacentes (Figura 8). Esto es algo que los líquidos pueden soportar, por lo que la deformación en ellos es permanente, es decir, no hay recuperación ni transmisión y, consecuentemente, las ondas no se propagan. Las ondas S sólo se transmiten en los sólidos.

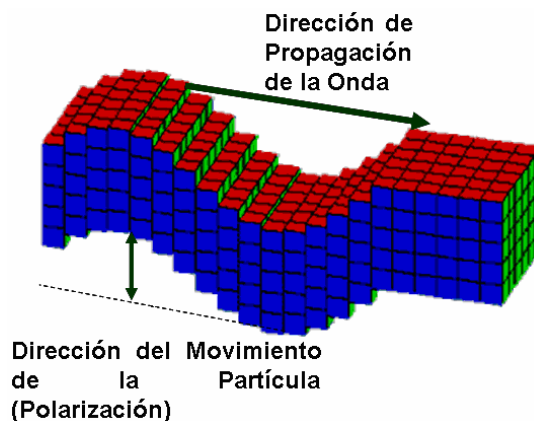


Figura 8. Representación del comportamiento de la onda S

3. SIMETRÍA DE LOS MEDIOS ELÁSTICOS

El punto de partida para entender la anisotropía en las velocidades de ondas, son las ecuaciones de Navier (ecuaciones de Newton para un sistema continuo; Ecuación 1). Estas ecuaciones se relacionan inicialmente para ondas sísmicas pero también se aplica para ondas ultrasónicas. Por medio de ellas, se describe el movimiento relativo de los puntos del medio, provocado por los esfuerzos internos y las fuerzas de volumen aplicadas a dicho medio (Caicedo 2002, en Pachano et al 2005)

Debido a que las ecuaciones de Navier contienen demasiadas incógnitas, es necesario complementarlas con las “*ecuaciones constitutivas*” que corresponden a un conjunto de relaciones empíricas entre los esfuerzos y las deformaciones.

Ecuaciones de Navier en forma tensorial:

$$\frac{1}{\rho} \partial_i (\sigma_{ij}) - F_j = \partial_i^2 u_j \quad (1)$$

Donde:

ρ : Densidad

σ_{ij} : tensor de esfuerzos

F_j : campo de fuerzas

u_j : desplazamientos

3.1 MEDIO EFECTIVO

Cualquier modelo que estudie las propiedades elásticas de un medio compuesto, se considera teoría del medio efectivo (Wang y Nur 1992, en Pachano, 2005; Figura 9).

Al tener medios efectivos, es posible expresar la ley de Hooke en función de las propiedades elásticas de la matriz y la densidad de grietas o fracturas, medida en número de grietas por unidad de volumen (Fjaer, et. Al, 1996 en Pachano et al., 2005; Ecuaciones 3 y 4).

$$\sigma_{ij} = (c_{ijkl})_{efectivo} \varepsilon_{ij} \quad (3)$$

$$(c_{ijkl})_{efectivo} = c_{ijkl} (1 - Q_{ijkl} \zeta) \quad \text{Principio de superposición} \quad (4)$$

Siendo:

$Cijkl$: tensor de coeficientes elásticos de la matriz o background (módulo elástico).

$Qijkl$: factor que depende de la forma y contenido de las grietas o fracturas.

ζ : densidad de fracturas.

Debido a que el tensor de coeficientes elásticos $Cijkl$ es de cuarto orden (81 elementos independientes), es necesario introducir la notación de Voigt, para reducirlo a una matriz de 6 x 6 (36 componentes). La notación de Voigt, consiste en establecer relaciones y reducir el número de subíndices de la siguiente forma (Ecuaciones 5a y 5b):

$$11 \rightarrow 1; 22 \rightarrow 2; 33 \rightarrow 3 \quad (5a)$$

$$23 = 32 \rightarrow 4; 13 = 31 \rightarrow 5; 12 = 21 \rightarrow 6; (5b)$$

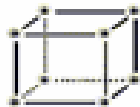

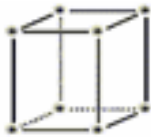
Reemplazando los índices de las expresiones (5a) y (5b) en la ecuación (2), se obtiene la ley de Hooke, en notación matricial:


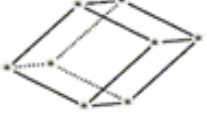
$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & c_{14} & c_{15} & c_{16} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} & c_{24} & c_{25} & c_{26} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} & c_{34} & c_{35} & c_{36} \\ c_{41} & c_{42} & c_{43} & c_{44} & c_{45} & c_{46} \\ c_{51} & c_{52} & c_{53} & c_{54} & c_{55} & c_{56} \\ c_{61} & c_{62} & c_{63} & c_{64} & c_{65} & c_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{bmatrix} \quad (6)$$

La matriz de 6 x 6 representa las constantes elásticas (Pachano et al 2005) (Ecuación 6), las cuales definen el comportamiento del medio continuo. Si este medio continuo es simétrico ante determinadas transformaciones de coordenadas, es posible expresar estos coeficientes de acuerdo con sus simetrías, y a su vez, reducir el número de constantes elásticas independientes.

En la Tabla 1 se muestran el tipo de simetría que puede tener un sólido y el número de constantes elásticas necesarias para describir su comportamiento elástico. Entre menos complejo sea el tipo de simetría, menos constantes se necesitan para caracterizar las rocas.

Tabla 1. Tipos de simetría en los Medios Elásticos. Modificado de Chichinina .(2005)

SIMETRÍA EN MEDIOS ELÁSTICOS		
TIPO DE SIMETRÍA	CONSTANTES ELÁSTICAS INDEPENDIENTES	EJEMPLOS DE CASOS GEOFÍSICOS QUE CONTIENEN ESTE TIPO DE SIMETRÍA
<p>CÚBICA</p> 	3	Muy pocos casos geofísicos, ejemplo, cristal de Halita
<p>HEXAGONAL</p> 	5	Esquistos, secuencias de capas delgadas, o sistemas de fracturas paralelas y verticales
<p>ORTORROMBICA</p> 	9	Esquistos, secuencias de capas delgadas horizontales afectadas por un sistema de fracturas paralelas y verticales

<p>MONOCLÍNICA</p> 	13	Material afectado por dos familias no ortogonales de fracturas paralelas
<p>TRICLÍNICA</p> 	21	Medios con múltiples sistemas de fracturas

Esta investigación se enfocó exclusivamente en la simetría hexagonal, la cual muestra como casos geofísicos sistemas de fracturas verticales y paralelas.

3.2 ISOTROPÍA TRANSVERSAL O HEXAGONAL

Este tipo de simetría también es llamado anisotropía azimutal (Gupta 2000 en Thomsen 2002) y es el tipo más simple de simetría real porque tiene un solo eje de simetría de rotación (aquí 2 de los 3 ejes son equivalentes entre sí, y diferentes del tercero)¹. En el caso más común, el eje de simetría es vertical (Fig. 10), así que puede ser llamado isotropía transversal vertical ó “VTI”. La isotropía a la que se hace referencia está limitada al plano horizontal (Transversal). Este es el caso, de las rocas que presentan estratificación.

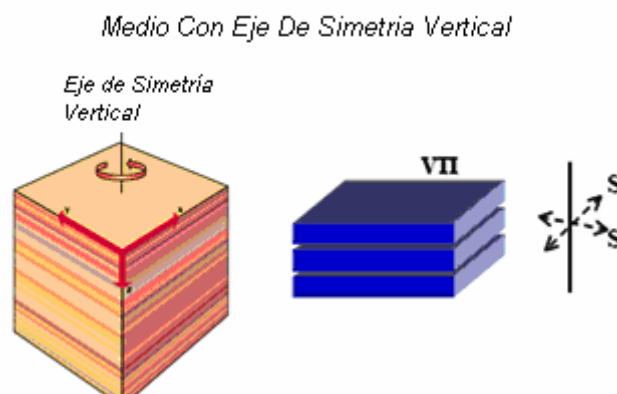


Figura 10. Representación de un medio con isotropía transversal con eje de simetría vertical, esquema de medios estratificados. Modificado de Rex Brian et al 2003.

El otro tipo de isotropía transversal es el que tiene un eje de simetría horizontal, (Fig. 11), o HTI, aquí el plano isótropo es el vertical, un ejemplo de esta es donde las rocas tienen fracturas verticales alineadas.

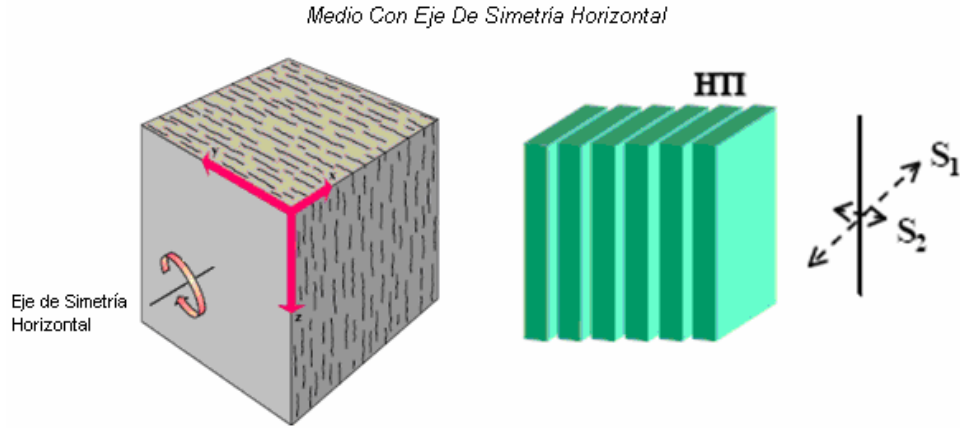


Fig. 11. Representación de los medios de interés para reservorios fracturados. HTI, Medio con eje de simetría horizontal. Modificado de Rex Brian et al 2003.

Obsérvese que el modelo de simetría consta de un plano de eje de simetría (el plano x_1, x_3) y un plano isótropo (Fig. 12). En medios HTI las propiedades elásticas son las mismas en cualquier dirección perpendicular al eje (eje de simetría), pero son diferentes paralelas al eje. Además la velocidad es más baja cuando se mide paralela al eje de simetría y más alta cuando se mide perpendicular al eje de simetría.

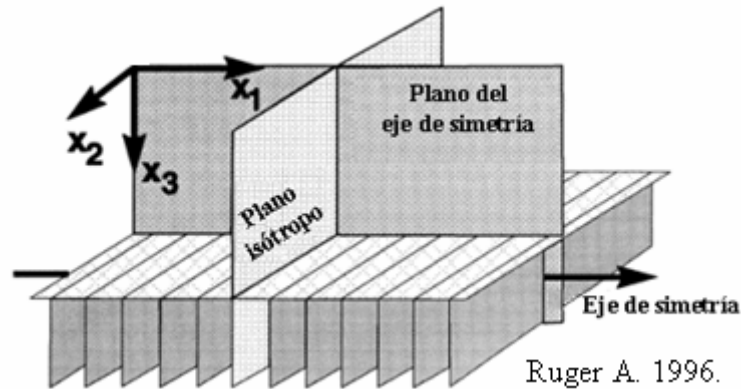


Figura 12. Medio transversalmente isótropo con eje de simetría horizontal HTI, se presenta un plano isótropo y un plano del eje de simetría, las propiedades medidas paralelas al eje de simetría son bajas comparadas con las medidas perpendiculares a dicho eje.⁶

3.3 DETERMINACIÓN CUANTITATIVA DE LA ANISOTROPÍA EN MEDIOS TRANSVERSALMENTE ISÓTROPOS

Este tipo de simetría está caracterizada por cinco constantes elásticas independientes (Thomsen 2002; Ecuación 7).

$$C_{HTI} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{13} & c_{13} & & & \\ c_{13} & c_{33} & (c_{33} - 2c_{44}) & & & \\ c_{13} & (c_{33} - 2c_{44}) & c_{33} & & & \\ & & & c_{44} & & \\ & & & & c_{55} & \\ & & & & & c_{55} \end{bmatrix} \quad (7)$$

Estas constantes elásticas (Ecuaciones 8 a 13) se determinan a partir de la densidad de la roca (ρ) y las velocidades de propagación de las ondas medidas en diferentes direcciones; ver metodología (capítulo 5.).

$$C_{11} = \rho V_{P1}^2 \quad (8)$$

$$c_{66} = \rho V_{s1a}^2 \quad (9)$$

$$C_{33} = \rho V_{P2}^2 \quad (10)$$

$$C_{44} = \rho V_{s1b}^2 \quad (11)$$

$$C_{13} = -C_{44} + \sqrt{4\rho^2 V_{P45}^4 - 2\rho V_{P45}^2 (C_{11} + C_{33} + 2C_{44}) + (C_{11} + C_{44})(C_{33} + C_{44})} \quad (12)$$

$$c_{66} = \frac{c_{11} - c_{12}}{2} \quad (13)$$

Con estas constantes se mide el grado de anisotropía de las rocas con las ecuaciones de Thomsen⁷ 14, 15 y 16.

$$\varepsilon = \frac{c_{11} - c_{33}}{2c_{33}} \quad (14)$$

$$\gamma = \frac{c_{66} - c_{44}}{2c_{44}} \quad (15)$$

$$\delta = \frac{(c_{13} + c_{44})^2 - (c_{33} - c_{44})^2}{2c_{33}(c_{33} - c_{44})} \quad (16)$$

Donde

ε : Anisotropía de la onda P (Dependencia de la velocidad de la onda P respecto a la dirección de propagación)

γ : Anisotropía de la onda S (Dependencia de la velocidad de la onda S respecto a la dirección de propagación)

δ : Relación de la anisotropía de la onda P y S

3.4 ONDAS ACÚSTICAS EN MEDIOS TRANSVERSALMENTE ISÓTROPAS

Como ya se observó sobre el comportamiento de las ondas primarias (P) y secundarias (S) en medios elásticos, es necesario considerar este comportamiento en medios transversalmente isótropos (tipo de simetría de rocas con fracturas paralelas y verticales).

En la Figura 13 se muestran tres tipos de ondas. En la Figura 13A se observa la onda compresional o primaria (P), la cual viaja más rápido debido a que el movimiento de las partículas es paralelo a la dirección de propagación de la onda. De acuerdo con el modelo de la Figura 13D, la velocidad de propagación de una onda P en la dirección perpendicular a las fracturas será mayor que en la dirección paralela a ellas.

En la Figura 13B y 13C se observan dos ondas de cizalla o de corte, llamadas ondas Secundarias (S), en las que el movimiento de la partícula es perpendicular a la dirección de propagación de la onda. Como se observa en la Figura 13, si se tiene un cubo con fracturas verticales, y una

onda se transmite desde la parte superior del cubo, la onda S se polariza en dos ondas: una onda horizontal (Fig. 13B) la cual es relativamente lenta debido a que viaja en forma perpendicular a las fracturas, y una onda vertical, la cual es relativamente rápida, debido a que viaja paralelamente a las fracturas (Fig. 13C.).

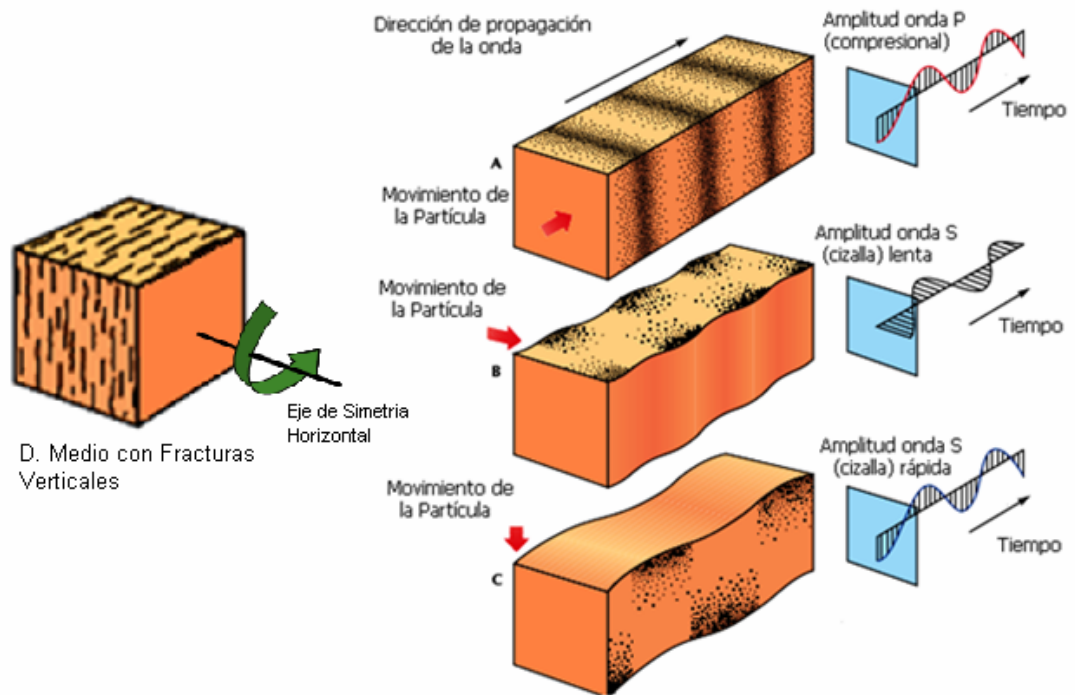


Figura 13. Representación de la propagación de las ondas en un medio elástico con fracturas verticales y paralelas; Tomado de Armstrong Phil et al 2004.

4. ESCALA DE LAS FRACTURAS

El objetivo inicial de este trabajo fue desarrollar una metodología para determinar el grado de microfracturamiento de las rocas. Como se observa en la Figura 14, las fracturas pueden ser leídas con diferentes herramientas y a diferentes escalas. Por ejemplo, la sísmica obtiene información de fracturas que pueden abarcar varios kilómetros de longitud, mientras que en un afloramiento se pueden medir fracturas de unos pocos metros o centímetros de longitud (macrofracturas) que se pueden observar a simple vista. Adicionalmente, en los registros sínicos de pozos como el UBI, el cual es un registro ultrasónico de imagen, se leen fracturas que tienen unos pocos centímetros de longitud y en núcleos o corazones de pozos se pueden observar fracturas de centímetros a milímetros de longitud y de las secciones delgadas las cuales se analizan al microscopio se encuentran fracturas de mm de longitud (microfracturas).

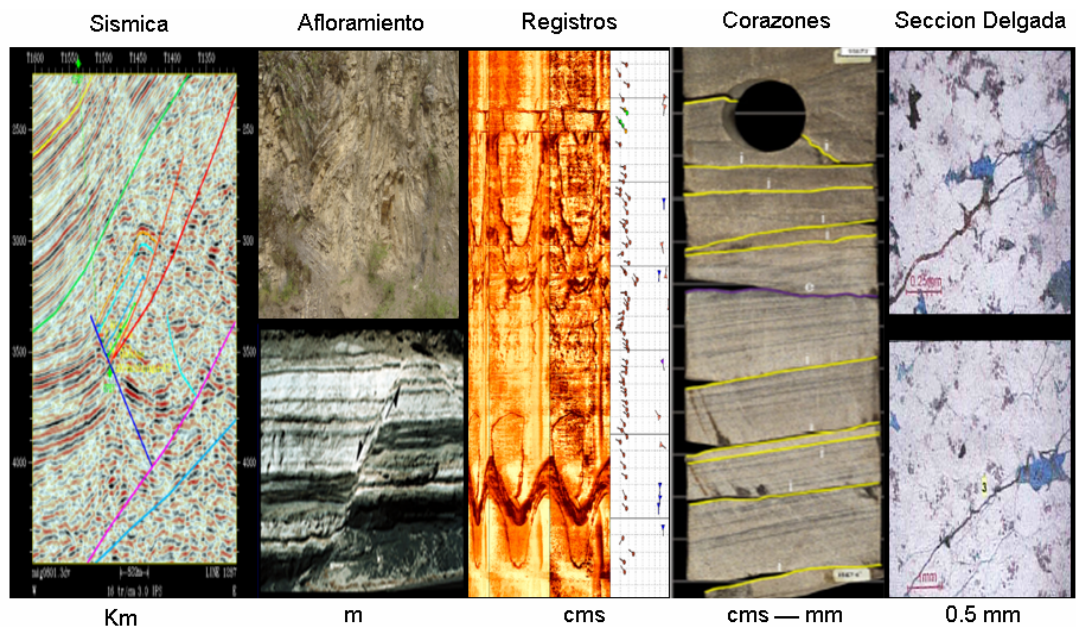


Figura 14. Escala De Las Fracturas En Las Rocas.

En resumen, las fracturas pueden tener tamaños que van desde unas pocas micras hasta varios kilómetros, y pueden ser detectadas por diversas técnicas según su tamaño (Figura 15).

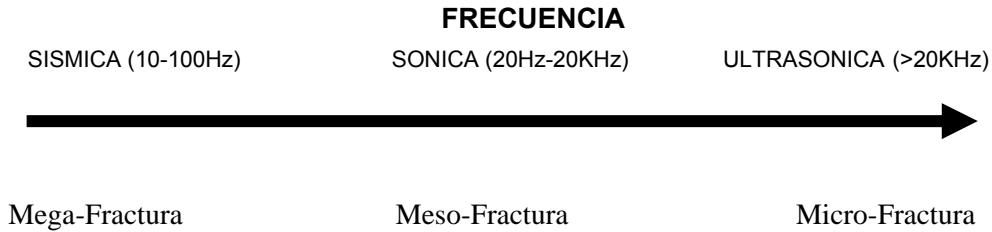


Figura. 15 Frecuencias de ondas utilizadas para el análisis de las fracturas en las rocas.

4.1 ANISOTROPÍA EN FUNCIÓN DE LA ESCALA

En la Figura 16 una onda que proviene de la izquierda impacta horizontalmente contra un medio fracturado verticalmente con el perfil de velocidad mostrado. Donde el espacio entre fracturas es comparable con la longitud de onda, la onda viaja más o menos independiente a través del medio y los receptores de la derecha registrarán los arribos en dos diferentes tiempos. A lo largo del límite de las fracturas el frente de onda se curva de manera que une los dos arribos.

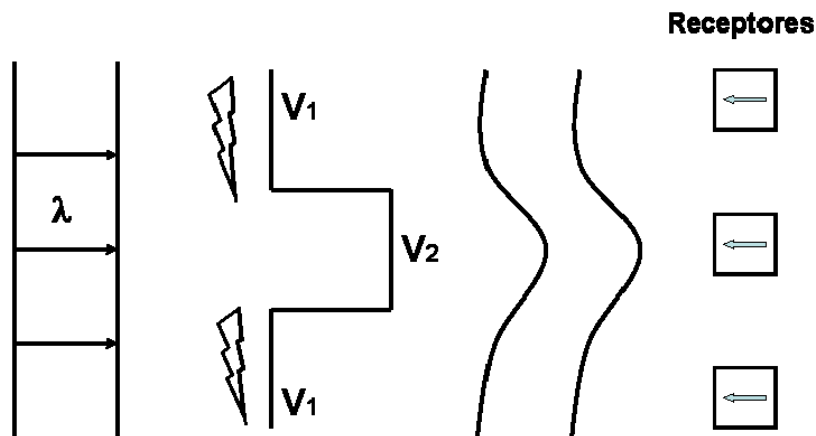


Figura. 16. Comportamiento de un frente de onda con respecto a la longitud de onda en medios con diferentes velocidades. Deformación del frente de onda debido a que la longitud de onda es menor que el espacio entre fracturas y las dimensiones de las fracturas. Modificado de Thomsen (2002).

En la Figura 17 una onda se impacta horizontalmente desde la izquierda contra un medio intensamente fracturado, con el perfil de velocidad mostrado. Allí, el espacio entre fracturas es mucho menor que la longitud de onda, por lo que la onda deforma muchas fracturas al mismo tiempo promediando las variaciones. La onda surge en el otro lado como una única onda con una velocidad intermedia V_1 y V_2 .

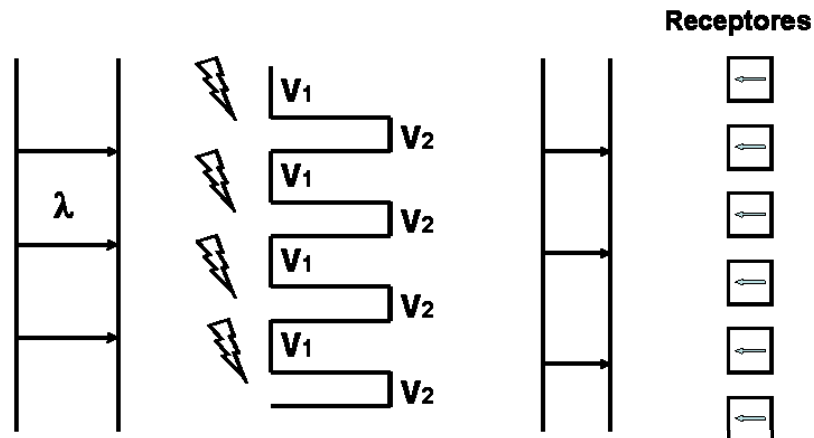


Figura. 17. Comportamiento de un frente de onda con respecto a la longitud de onda en medios con diferentes velocidades. El frente de onda se promedia debido a que la longitud de onda es mayor que el espacio entre fracturas y que las dimensiones de las fracturas. Modificado de Thomsen 2002.

Ahora, si se analizan cuidadosamente las figuras, no se verá indicación alguna de la escala. Esto quiere decir que la onda es la misma en ambas figuras, con medios diferentemente fracturados. Pero, ya que no se mostró una escala y se supone que las fracturas están igualmente espaciadas en ambas figuras entonces la longitud de onda será menor en el primer caso y mayor en el segundo caso.

La Figura 18 muestra esta situación claramente. Se observa la misma situación a escala, pero esta vez con la misma ampliación, es decir la longitud entre fracturas permanece con la misma longitud que la figura 17 pero en esta ocasión la longitud de onda es menor y como se observa el frente de onda es deformado al atravesar el medio.

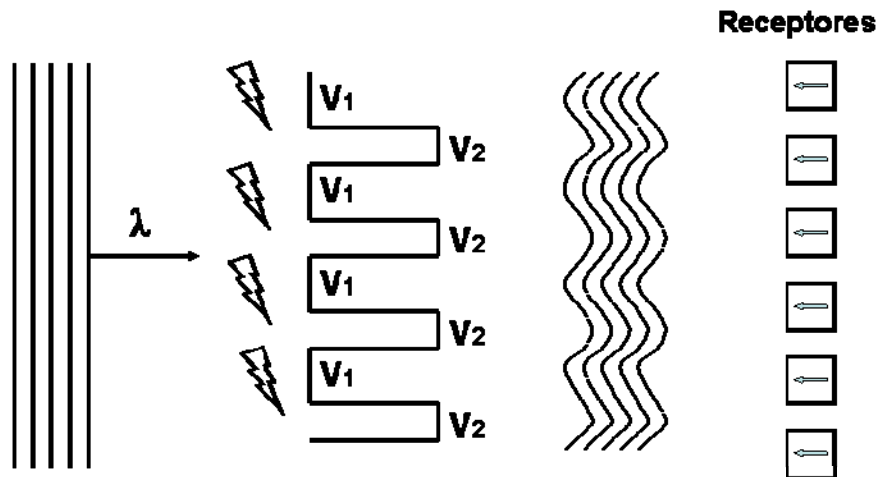


Figura. 18 Comportamiento de un frente de onda con respecto a la longitud de onda en medios con diferentes velocidades. Frentes de ondas deformados. En esta figura la longitud de onda es menor que el espacio y las dimensiones de las fracturas. Modificado de Thomsen (2002).

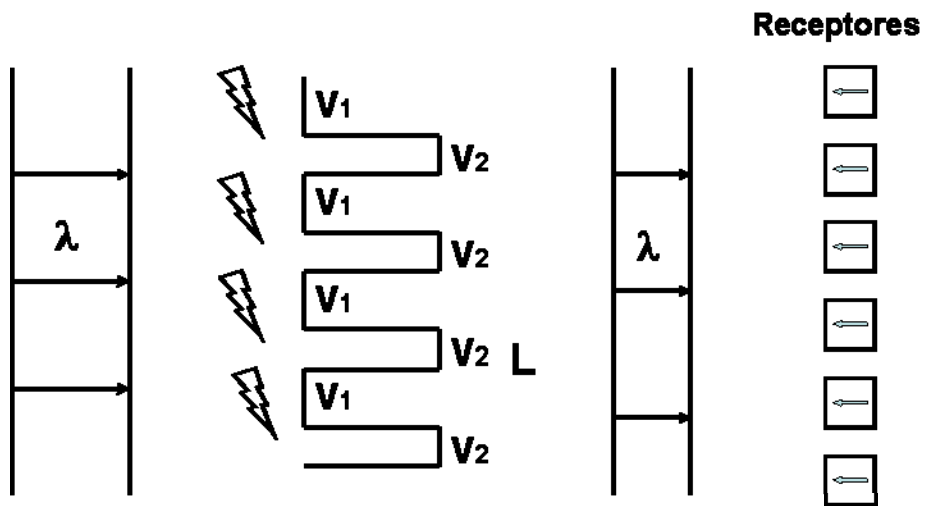


Figura. 19. Comportamiento de un frente de onda con respecto a la longitud de onda en medios con diferentes velocidades. El frente de onda se promedia debido a que la longitud de onda es mayor que el espacio entre fracturas y las dimensiones de las fracturas. Modificado de Thomsen (2002).

De hecho, lo que determina el comportamiento de una onda en un medio fracturado no es el espaciamiento de las fracturas L , ni la longitud de onda λ , sino la proporción λ/L . Para valores pequeños de λ/L , las ondas actúan como en la Figura 18, mientras que para valores grandes de λ/L , actúan

como en la Figura 19, y finalmente para valores intermedios de λ/L las ondas actúan de forma intermedia.

De acuerdo con lo planteado anteriormente, y debido a que las longitudes de onda con las que se trabaja en laboratorio son menores a 2 centímetros de longitud, en esta investigación se estudiaron fracturas menores a 2 cm de longitud y de aperturas menores a 1mm. En este estudio, a las fracturas que cumplen estos requisitos de longitud y apertura se les denominan “microfracturas”.

4.2 MODELOS DE FRACTURAS

Existen diferentes teorías con las cuales se describe el efecto de las fracturas sobre la propagación de ondas. Estas teorías se encuentran divididas principalmente en dos tipos: el primero es conocido como teoría de grietas (planteada principalmente por Hudson, 1980) el cual considera la distribución de grietas pequeñas, desconectadas, paralelas y posiblemente subparalelas, las cuales tienen forma de monedas; mientras que el segundo tipo se conoce como teoría de fracturas (planteado por Schoenberg, 1983) el cual trata las fracturas como un sistema de planos paralelos infinitos.

En el estudio de estas teorías es indispensable entender los fundamentos, suposiciones y simplificaciones en cada una de ellas, para poder derivar información a partir de ellas. En este trabajo se utilizó la teoría propuesta por Hudson (1980), por ser la que mejor se ajusta a la descripción de los modelos físicos y además, por permitir la representación de la estructura de un yacimiento (Pachano et al. 2005).

4.2.1 Modelo De Grietas En Forma Elipsoidal (*Penny Shaped*) Teoría De Hudson, 1980.

Suposiciones:

- Las grietas son elipsoides con una pequeña relación de aspecto.

- No existe interconexión entre las grietas.
- El espaciamento entre las grietas es mucho más pequeño que la longitud de onda.

En la Figura 20 se presentan en forma gráfica las suposiciones de la teoría de Hudson:

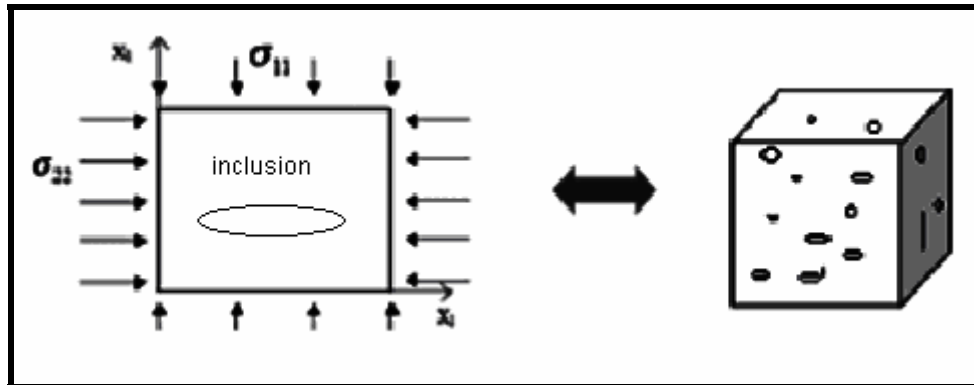


Figura 20. Representación del modelo de Hudson, Tomado de Pachano et al 2005).

Hudson (1981) determinó la densidad de microfracturas (grietas, inclusiones) como se muestra en la Ecuación 17.

$$\varepsilon = \frac{nr^3}{v} \quad (17)$$

Donde

ε : Densidad de microfracturas (inclusiones)

n : Número de inclusiones

r : Radio de la inclusión

v : Volumen del cilindro o matriz donde se encuentran dichas inclusiones.

Entonces este modelo de grietas planteado por Hudson y la relación entre la longitud de onda, el tamaño y espaciamento entre fracturas, se utilizó como base para realizar nuestra metodología, comentada a continuación.

5. METODOLOGÍA

Para entender el efecto de las microfracturas en la isotropía de las ondas acústicas, este trabajo desarrolló una metodología experimental de laboratorio. De acuerdo con el objetivo planteado para este estudio, el cual es desarrollar una metodología para determinar la densidad de microfracturas a partir de parámetros anisótropos, fue necesario obtener una relación entre dichos parámetros y la densidad de microfracturas. Para evaluar el impacto de las microfracturas en la anisotropía se elaboraron modelos sintéticos para poder manipular en ellos los parámetros de microfracturas. A estos modelos sintéticos se les hicieron inclusiones simulando microfracturas las cuales tuvieron densidad variable en cada modelo. Además, cada modelo cumplió con las suposiciones del modelo HTI (modelo transversalmente isótropo) donde la matriz de roca debe ser isótropa y homogénea y la anisotropía solo es entonces causada por fracturas, paralelas y verticales.

Posteriormente a la fabricación de los modelos sintéticos, los cuales tuvieron el tamaño de un *plug* de perforación (3.8 cm de diámetro y 7 cm de longitud), apropiado para realizar experimentos en laboratorio, se midieron los tiempos de propagación de las ondas P y S a lo largo de varias direcciones azimutales, para finalmente determinar la anisotropía de la roca teniendo en cuenta el porcentaje de densidad del microfracturamiento.

5.1 PROCEDIMIENTO PARA LA ELABORACIÓN DE NÚCLEOS SINTÉTICOS CON MICROFRACTURAS SIMULADAS

5.1.1 Preparación de la arena

Para llevar a cabo la preparación de la arena se tuvieron en cuenta las siguientes etapas: **1. Secado** **2. Tamizado** **3. Lavado**

La arena con la cual se trabajó debió ser previamente preparada, es decir, para el proceso de tamizado (separación de la arena según su tamaño de grano) la arena debió estar seca. Para secarla se tomó la arena húmeda (Figura 21) y se llevó a un horno a 120°C (Figura 22). Una vez la arena se secó (Figura 23) se llevó al agitador para realizar allí el tamizado (Figura 24).



Figura 21. Arena húmeda antes del secado



Figura 22. Horno para secado a 120°C.



Figura 23. Arena después de extraerla del secado



Figura 24. Agitador. Herramienta para realizar el tamizado

El tamizado fue llevado a cabo en el laboratorio de Rocas de la Escuela de Geología-UIS, y consistió en tomar aproximadamente 20 Kg de arena, la cual se seleccionó según su tamaño de grano (Figura 25). Para este caso se utilizaron tamices o mallas números 18 (tamaño más grueso), 35, 45, 70, 100, 120, y PAN (tamaño más fino), por tanto en el agitador debieron ser ubicadas desde las mallas que retienen el mayor tamaño hasta las que retienen los menores tamaños.

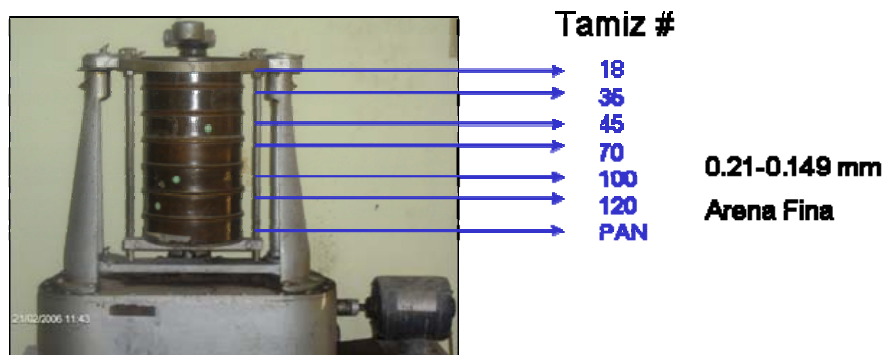


Fig. 25. Herramienta para realizar el tamizado, arena utilizada para realizar los núcleos sintéticos de tamaño de grano de 0.21 a 0.149 mm.

Para fabricar los núcleos sintéticos se utilizó la arena retenida por el tamiz 100 y que pasa por el tamiz 70, es decir, aquellos granos de tamaños de 210 a 149 μm ó de 0.21 a 0.149 mm.

Una vez se realizó el tamizado se procedió a lavar la arena, esta vez se realizó el lavado primero con agua normal, posteriormente se lavó con hipoclorito de sodio con el fin de que la arena quedara más limpia y libre de carbonato de calcio. El lavado con ácido se realizó para asegurar que al disolver las láminas de aluminio, las cuales simulaban las microfracturas, no se disolviera accidentalmente la matriz de roca. Después de lavada la arena se dejó secar antes de fabricar los núcleos.

5.1.2 Fabricación De Núcleos

La fabricación de estos *plugs* sintéticos se realizó en el Laboratorio de Tecnología Operacional (TOP) del Instituto Colombiano del Petróleo, el cual tiene la patente de este procedimiento. El procedimiento es así:

1. Pesar 110 gr. de arena
2. Pesar 11 gr. de resina y 5.5 gr. de endurecedor
3. Llevar la mezcla de arena, resina y endurecedor a una manga de caucho e incluir las láminas de aluminio las cuales simulan microfracturas.
4. Dejar en un horno a 100°C la manga y dejarla secar durante 24 horas
5. Sacar el núcleo de la manga de caucho.



Fig. 26. Fabricación de modelos sintéticos de rocas con inclusiones de láminas de Aluminio simulando microfracturas

5.2 SIMULACIÓN DE MICROFRACTURAS

Las microfracturas que se quieren simular son vacías, por lo tanto deben disolverse las láminas de aluminio, asegurando que estas quedan enteramente desocupadas. Las microfracturas son simuladas con pequeñas láminas de aluminio de forma circular de 6mm de diámetro y 0.07 mm de espesor (Figura 27). A medida que se fabricaron los núcleos se colocaron las láminas de aluminio, de forma paralela y vertical, una con respecto a otra. Una vez se litificó la roca sintética, se procedió a disolver las láminas de aluminio.

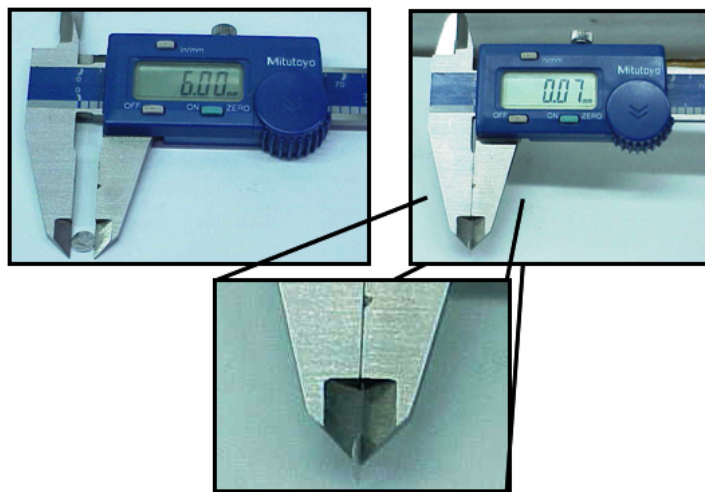


Fig. 27 Microfracturas simuladas con láminas circulares de Aluminio, de 6 mm de diámetro, y 0.07mm de espesor.

El número de *plugs* sintéticos fabricados fue de 35. Treinta de estos (Figura 28) se realizaron variando el número de inclusiones, iniciando en un *plug* con cero inclusiones aumentándolas de cinco en cinco, hasta llegar a 130 inclusiones, lo que corresponde al 5.38% de densidad de microfracturas y luego de 20 en 20 hasta llegar a 250 microfracturas equivalentes a 10.55% en la densidad de microfracturas (Tabla 2). Los restantes 5 *plugs* se utilizaron para realizar la verificación de resultados. Además se realizaron *plugs* de prueba para hacer experimentos de disolución de las láminas de aluminio.



Figura. 28. Fotografía de los *plugs* sintéticos fabricados.

Tabla 2. Datos de los *plugs* elaborados. La densidad de microfracturas (inclusiones) esta dada según Hudson (1981).

# de microfracturas	Densidad de microfracturas	Long. (m)	Diam. (m)
0	0,00	0,0561	0,0381
5	0,21	0,0558	0,0381
10	0,42	0,0563	0,0381
15	0,63	0,0560	0,0381
20	0,86	0,0552	0,0381
25	1,06	0,0559	0,0381
30	1,27	0,0561	0,0381
35	1,49	0,0556	0,0381
40	1,69	0,0561	0,0381
45	1,91	0,0557	0,0381
50	2,11	0,0561	0,0381
60	2,54	0,0560	0,0381
65	2,75	0,0559	0,0381
70	2,96	0,0560	0,0381
75	3,17	0,0561	0,0381
80	3,37	0,0562	0,0381
85	3,59	0,0560	0,0381
95	4,00	0,0563	0,0381
100	4,12	0,0575	0,0381
105	4,43	0,0561	0,0381
115	4,86	0,0560	0,0381

# de microfracturas	Densidad de microfracturas	Long. (m)	Diam. (m)
120	4,96	0,0573	0,0381
125	5,03	0,0589	0,0381
130	5,48	0,0561	0,0381
150	6,25	0,0569	0,0381
170	7,81	0,0516	0,0381
190	7,87	0,0572	0,0381
210	8,92	0,0558	0,0381
230	9,92	0,0549	0,0381
250	10,55	0,0561	0,0381

5.2 Simulación de Microfracturas secas

Las microfracturas además también se simularon como microfracturas vacías, para lo cual debieron disolverse las láminas de aluminio, asegurando que estas quedaran vacías.

Para disolver las láminas de aluminio se determinó que se debía usar ácido clorhídrico. Esto se concluyó a partir de un procedimiento experimental preliminar. Para evitar que se afectara la matriz al disolver las láminas, antes de la fabricación del núcleo se lavó la arena con hipoclorito de sodio, más comúnmente llamado “ácido muriático”, con el fin de que la arena quedara libre de carbonato de calcio.

5.2.1 Disolución De Las Láminas De Aluminio

Para determinar qué reactivos atacaban o disolvían el aluminio, se hizo una revisión bibliográfica, encontrándose que este reaccionaba con el ácido clorhídrico. Debido a los efectos nocivos del ácido Clorhídrico, para realizar los experimentos fue necesario usar la cámara de extracción en el laboratorio de la Escuela de Química en la Universidad Industrial de Santander.

El experimento consistió en tomar una muestra de ácido clorhídrico concentrado al 37% y preparar la concentración adecuada para que se disolviera completamente la lámina en la matriz de roca. Para lograr esto se procedió así:

1. Se sumergió una lámina de Aluminio de 6 mm de diámetro y 0.07 mm de espesor, en una concentración de ácido clorhídrico 1N, y se observó que la lámina no se disolvió.
2. Posteriormente se aumentó la concentración de la solución a 4N y en este caso la lámina reaccionó de manera que al cabo de 5 minutos se había disuelto completamente (Figura 29).

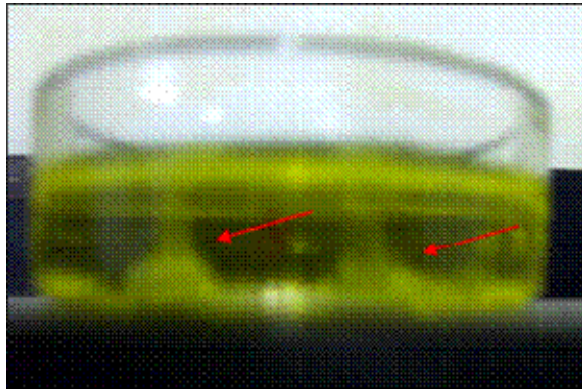


Figura. 29. Lamina de Aluminio en una solución de ácido clorhídrico 4N. Se observa la reacción de la lámina de Aluminio.

3. Después se introdujo una roca sintética, a la cual se le habían incluido láminas de aluminio, en ácido clorhídrico 4 N durante 16 horas. Para determinar si en efecto se habían disuelto completamente las láminas, se realizó un corte a la muestra y se observó que el ácido clorhídrico sólo disolvió las láminas más superficiales, ya que en la parte interna del núcleo las láminas no se disolvieron.

4. Se sumergió la roca durante 96 horas en la concentración 4N, ya que se interpretó que posiblemente el problema se debía a que no había percolado completamente la solución en la roca. De nuevo se realizó un

corte para determinar si se habían disuelto completamente las láminas, pero aún se observaban algunas no disueltas.

5. La concentración de ácido clorhídrico se aumentó a 6N. Antes de sumergir la roca en dicha solución se sumergió una sola lámina de aluminio para observar su reacción a esta concentración de ácido, y se observó que la reacción comenzó a los 15 segundos y terminó a los 165 segundos con la disolución total de la lámina. Después se sumergió la roca artificial y se dejó 120 horas. Luego de sacar la muestra se cortó y se observó que las láminas se habían disuelto completamente, conservando el espacio vacío de estas. Además la matriz no se afectó por el ácido, logrando entonces los objetivos de esta prueba (Figura 30)

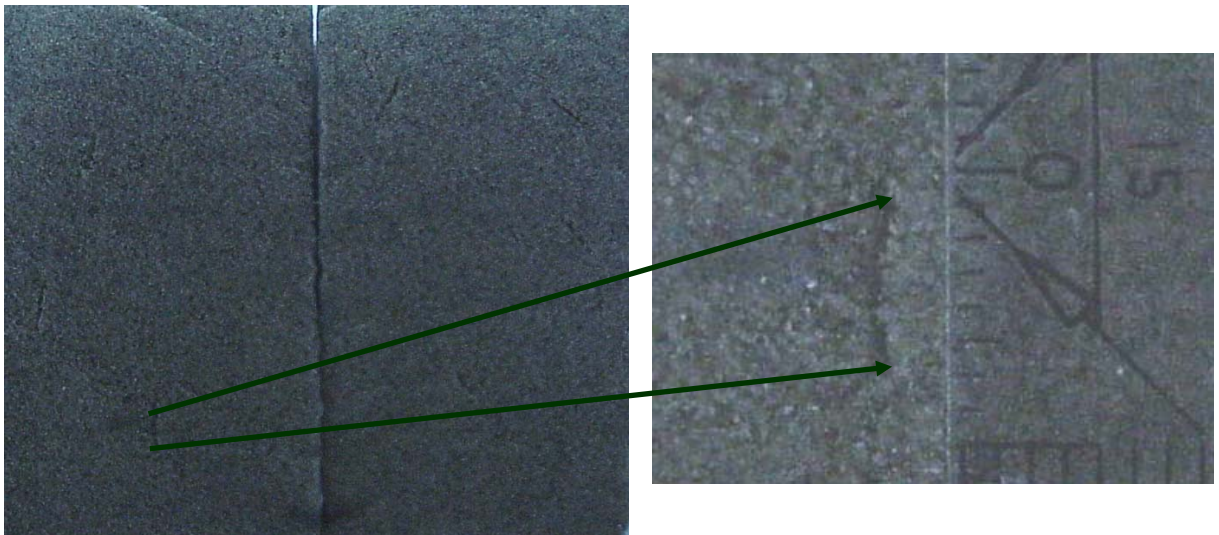


Figura. 30. Núcleo sintético con láminas de aluminio incluidas. Corte realizado después de sumergirla en una concentración de HCl 6N durante 120 horas. Se observa que las láminas se disolvieron completamente.

5.3 MEDICIONES ACÚSTICAS

La metodología que se utilizó consistió en (1) medir los tiempos de propagación de las ondas a través de los núcleos sintéticos; (2) determinar la velocidad de propagación; y (3) hallar las constantes de rigidez para determinar la anisotropía. Para este propósito se ubicaron cristales piezoeléctricos en tres orientaciones: paralelos, perpendiculares

y a 45° de las microfracturas (Figura 31). Estos cristales piezoeléctricos transforman un pulso eléctrico en una onda P. La Figura 32 muestra el montaje experimental, el cual consistió de un pulsador y un osciloscopio, de manera que sobre la superficie de la roca sintética se adhirieron cristales piezoeléctricos que actuaron como emisores y receptores de ondas. En el pulsador se ubicó una terminal y en el osciloscopio otra, de manera que al osciloscopio llegó la señal correspondiente a las ondas P y S. La señal medida fue el tiempo de viaje, el cual se transformó en velocidad. Estas mediciones se realizaron en el Laboratorio de Mecánica de Rocas del Instituto Colombiano del Petróleo.

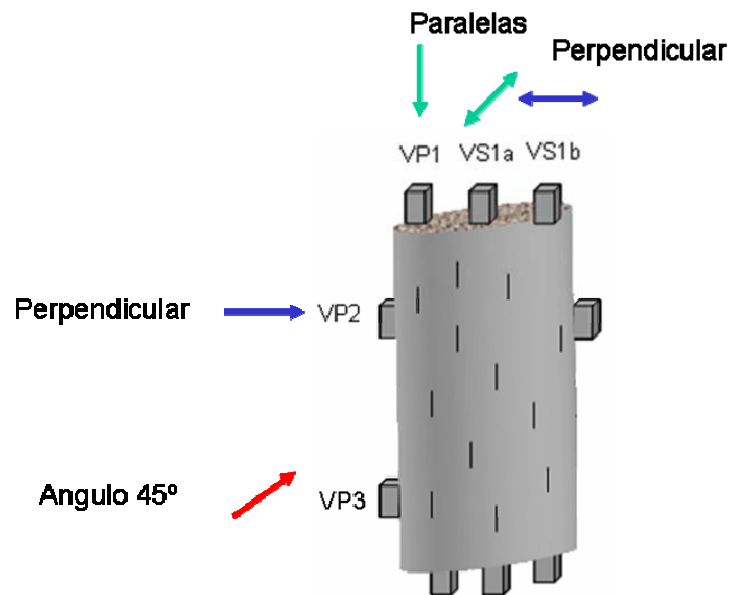


Figura 31. Montaje de los cristales sobre la roca. Para determinar anisotropía en modelos HTI, se debe medir ondas P y S paralelas y perpendiculares a las microfracturas y ondas P a 45° de las microfracturas.

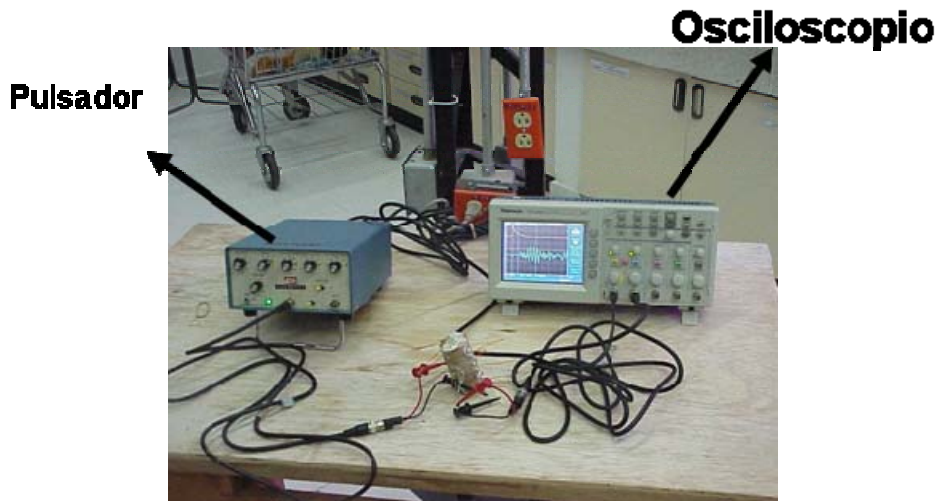


Figura. 32. Equipo de mediciones acústicas. El equipo consta de un pulsador, un osciloscopio y la muestra preparada. Se observan las conexiones de la muestra al pulsador y al osciloscopio, y la señal del osciloscopio.

5.3.1 Equipo De Mediciones Acústicas En El Laboratorio

A continuación se encontrará una breve descripción del equipo utilizado en el montaje experimental para obtener mediciones acústicas en el laboratorio:

5.3.1.1 Pulsador

El pulsador empleado fue de marca SOFRANEL modelo 5055 PR, el cual es un generador de pulsos. Este es un generador de señales que tiene capacidad de entregar 50 V a una carga de 50Ω . Su ancho de pulso es variable ($1 - 10 \mu\text{s}$), y ofrece repeticiones de 20 a 100 rep/s. Además presenta un pulso de disparo para sincronizar con el osciloscopio (Galviz y Valera 2004).

5.3.1.2 Unidad De Despliegue Y Cronometraje

El osciloscopio utilizado es de marca TEKTRONIX TDS 2024 de cuatro canales. Este tipo de aparato permite mostrar las señales del transmisor y del receptor simultáneamente, con controles individuales. Este equipo

tiene respuesta en frecuencia plana y es activado por el generador de pulsos.(Galviz y Valera 2004)

Además se usaron cronómetros, que permitieron determinar los periodos de operación, por lo cual debieron ser muy precisos. Se requirió uno para el intervalo de medida y otro para evaluar el retraso en las señales.

5.3.1.3 Cristales Piezoeléctricos

Para comprender la metodología aplicada, la cual está basada en mediciones acústicas a escala de laboratorio, se mencionan algunas generalidades de los dispositivos empleados como receptores y emisores de estas ondas.

La palabra “piezo” se deriva de la palabra Griega: $\pi\epsilon\zeta\omega$ que significa estrechar o apretar. En 1880 Jacques y Pierre Curie descubrieron que al aplicar presión a un cristal de cuarzo se generaban cargas eléctricas en éste. Ellos llamaron a este fenómeno “el efecto piezoeléctrico”. Más tarde, los Curie verificaron que un campo eléctrico aplicado al cristal proporcionaba una deformación al material. Este efecto era referido como “efecto piezo inverso”. Los materiales piezoeléctricos, por lo tanto, pueden ser utilizados para convertir energía eléctrica en energía mecánica y viceversa, como se observa en la Figura 33.

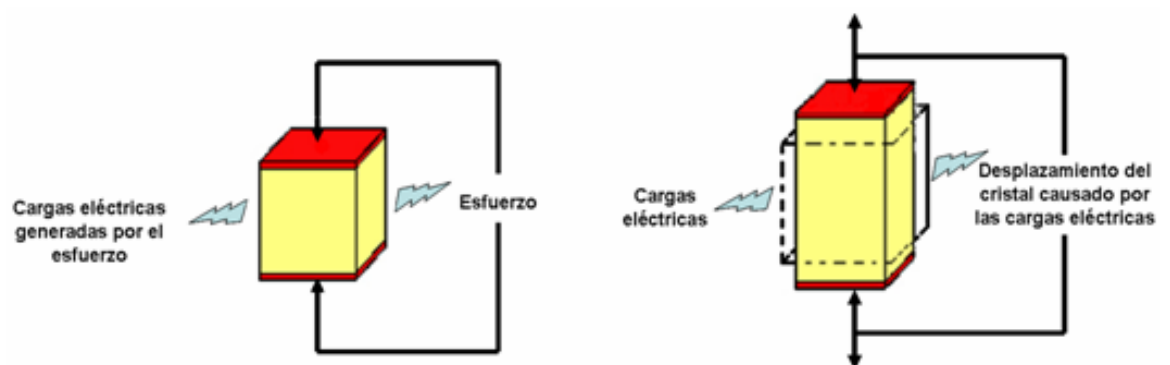


Figura 33. Comportamiento de los cristales piezoeléctricos.

5.3.1.3.1 Propiedades

Ya que el efecto piezoeléctrico exhibido por materiales naturales tales como el cuarzo, la turmalina, la sal de Rochelle, etc., es muy pequeño, se han desarrollado materiales con propiedades mejoradas, por ejemplo los materiales cerámicos ferroeléctricos policristalinos, como el BaTiO₃ y el Zirconato Titanato de Plomo (PZT). Los cristales piezoeléctricos que se utilizaron en el desarrollo de esta investigación fueron proporcionados por el Laboratorio de Mecánica de Rocas del ICP y fueron del tipo PZT.

Los cerámicos PZT, disponibles en muchas variaciones, son los materiales más usados hoy día para aplicaciones como actuadores o sensores. La estructura cristalina del PZT es cúbica centrada en las caras (isótropo) antes de la polarización. Después de la polarización exhiben simetría tetragonal (estructura anisótropa) por debajo de la temperatura de Curie (alrededor de 150°C), que es aquella en la cual el material cambia de piezoeléctrico a no piezoeléctrico. A esta temperatura los cerámicos PZT pierden las propiedades piezoeléctricas.

5.3.1.3.2 Materiales Piezoeléctricos

Los materiales piezoeléctricos se pueden clasificar en naturales y sintéticos. Dentro de los naturales encontramos los cristales de cuarzo y turmalina y dentro de los sintéticos se encuentran la sal de Rochelle, el titanato de Bario y algunos componentes cerámicos como PZT (titanatos —circonatos de plomo-), metaniobato de plomo, el fluoruro de polivinilideno (PVF₂ o PVDF), trifluoroetileno TrFE P (VDF/TRFE), el nylon y la polyurea).

La diferencia de potencial aplicada a estos materiales depende del espesor del cristal y es de hasta 10 kV. Al desaparecer el campo eléctrico, los cristales de la cerámica no se pueden desordenar debido a las tensiones mecánicas acumuladas. Las cerámicas piezoeléctricas cuentan con una gran estabilidad térmica, magnética y física. Su principal

desventaja es la sensibilidad térmica de sus parámetros en ambientes donde la temperatura se acerca a la temperatura de Curie.

5.3.1.3.3 Características De los Cristales Piezoeléctricos

Dentro de las principales características de los cristales piezoeléctricos se encuentran:

1. Clase de cristal. Con la elección de cada clase de cristal se puede variar el poder resolutivo y la sensibilidad de los transductores, los cuales transforman ondas eléctricas en ondas acústicas.

2. Diámetro del cristal. Entre mayor sea el diámetro del cristal se obtiene una mayor profundidad de penetración. Así mismo, se obtiene una mayor longitud en un campo cercano (es la distancia en la que la propagación de la onda no es interrumpida) y una menor divergencia.

3. Frecuencia. Con la elección de una mayor frecuencia se obtiene mayor posibilidad para la identificación de discontinuidades pequeñas, mayor longitud de campo cercano, mayor poder resolutivo, menor profundidad de penetración y mínima divergencia.

5.4 MONTAJE DE PIEZOELÉCTRICOS EN ROCAS

En este estudio los cristales piezoeléctricos se fijaron a la roca a estudiar con epóxico de plata (Figura 34). La configuración utilizada en el desarrollo de la metodología se muestra en la Figura 31, donde se usaron dos pares de cristales S y un par P, dispuestos sobre las caras planas del cilindro, y tres cristales P ubicados en las paredes del cilindro de manera que un par quedó enfrentado horizontalmente y otro a 45°.

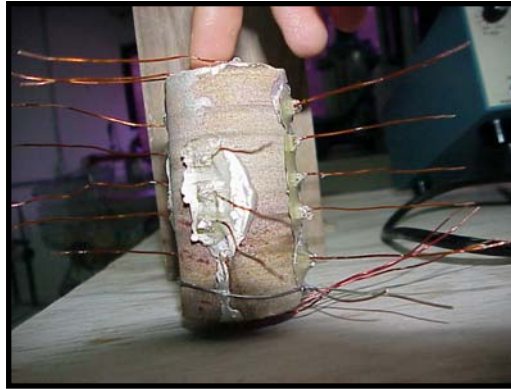


Figura 34. Montaje de los cristales pegados directamente a la roca con epóxico de plata.

Los cristales PZT se cortaron antes de realizar el montaje en el laboratorio, ya que estos se adquirieron en el mercado con dimensiones más grandes que las requeridas. La forma de los cristales es inicialmente circular con un diámetro de 2cm y un área de 3.14 cm^2 . Después de realizar el corte finalmente el área de cada cristal es de aproximadamente 25 mm^2 , obteniendo entonces 10 cristales a partir del cristal inicial. La frecuencia de oscilación de los cristales está directamente relacionada con el área de estos, la cual fue de aproximadamente 80 a 100 KHz para los cristales S y de 50 a 60 KHz para cristales P después del corte.

De acuerdo con lo anterior, con un cristal S y uno P se pueden realizar dos montajes al igual que una sobre (3g) de epóxico de plata.

Debido al costo de los cristales, que es alrededor de 64 dólares cada uno, y al costo del epóxico de plata que es de 16 dólares, se trabajó en la implementación de un dispositivo para el ahorro de cristales, ya que el promedio de pruebas que se realizaron implicó un número elevado de cristales y epóxico de plata lo cual pudo haber limitado la aplicación de la metodología. Este dispositivo se describe a continuación.

5.5 DISPOSITIVO PARA AHORRO DE CRISTALES

Como se mencionó anteriormente, se diseñó un dispositivo para optimizar el uso de los cristales. Basados en el funcionamiento de los piezoeléctricos se dispuso de una placa de acero sobre la cual se

ubicaron los cristales pegándolos con epóxico de plata. Esta placa se adaptó de tal manera que su acople a la roca fuese lo mas ajustada posible ya que de esto depende que la calidad de la onda sea óptima. Debido a que el montaje de los cristales sobre la roca tiene las disposiciones observadas en la Figura 31, se tomaron dos pares de placas para realizar las medidas longitudinales (Figura 35), es decir a lo largo del *plug*, ubicando las platinas sobre las partes planas del cilindro (Figura 36).

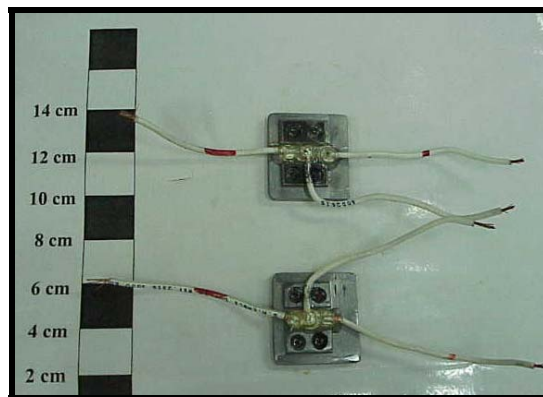


Figura 35. Placas para realizar medidas longitudinales. Se observan 3 cristales, 1 P y 2 S polarizados a 90° entre ellos.

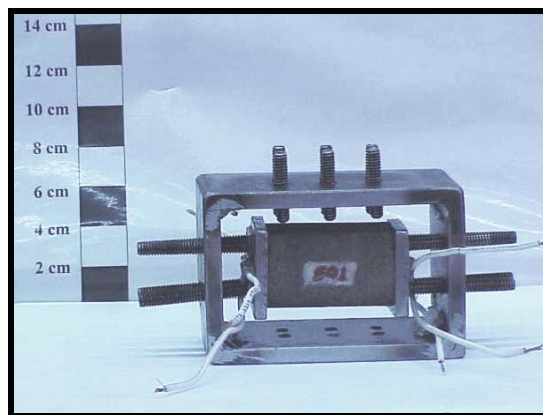


Figura. 36. Soporte para *Plugs*. La estructura metálica externa sirve para fijar las placas con los cristales a la roca.

En este sentido se miden el tiempo de propagación de las ondas S y P. El otro par se usó para las medidas diametrales, que en este caso solo corresponden a la onda P. Estas placas tienen una forma tal que en su parte interna son paralelas a la curvatura del cilindro (Figura 37).

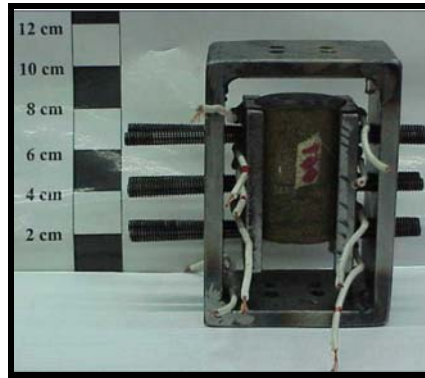


Figura 37. Placas para realizar medidas diametrales. Para el montaje HTI solo se midió la Onda P.

Este mecanismo consta de una estructura metálica la cual soporta el *plug* y las platinas y sirve para presionar las platinas contra el *plug* con ayuda de tornillos para conseguir un mejor acople. Además, para mejorar aun más el acople se aplicó grasa de baja viscosidad o de vacío a las placas o a la roca (Figuras 36 y 37). La señal que se logró con este dispositivo fue óptima, es decir, la amplitud de la señal ocupó más del 60% de la pantalla del osciloscopio y la señal de ruido fue mínima, con lo cual se pudo identificar el arribo de la onda sin mayor dificultad (Figura 38).

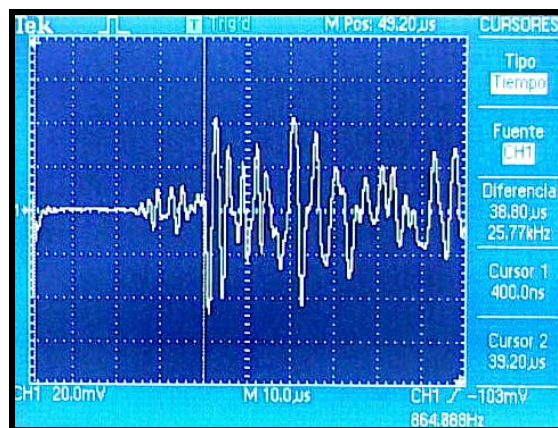


Figura 38. Fotografía de una onda S en el osciloscopio obtenida con el dispositivo de ahorro de cristales.

Para realizar las mediciones acústicas y determinar si la señal obtenida era la correcta, se usó como patrón el aluminio (Figura 39), ya que la velocidad de la onda P en el aluminio es bien conocida (6420 m/s). Esta medida se tomó diametralmente y dado que el diámetro del cilindro es de

0.0381m, el tiempo de propagación de la onda P esperado es de $6\mu\text{s}$. Similarmente, se sabe que la velocidad de la onda S en el aluminio es de 3040 m/s. Esta medida se realizó de la misma manera a la de la onda P, por lo cual el tiempo esperado es de $12.5\ \mu\text{s}$. Los datos medidos, comparados con los esperados, dan idea de la precisión del montaje (Tabla 3).

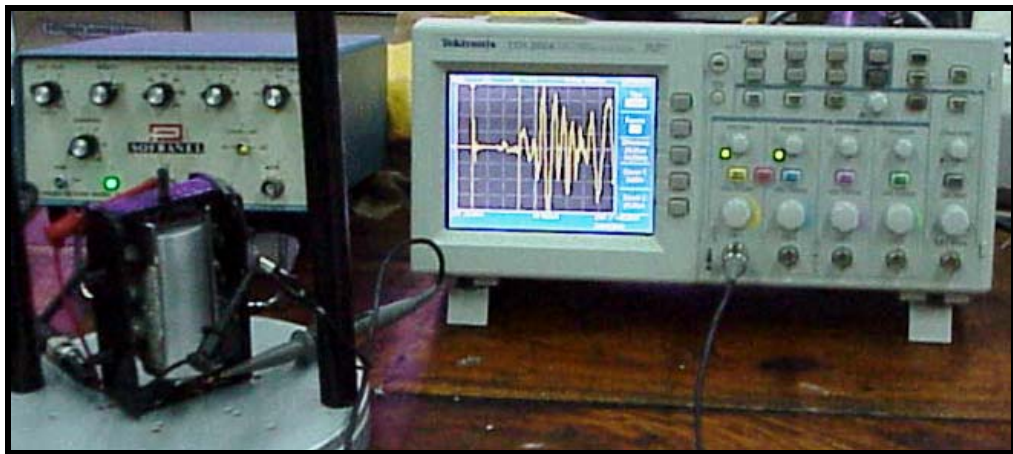


Figura 39. Montaje de un cilindro de aluminio en el dispositivo ahorrador de cristales.

Tabla 3. Datos obtenidos con el dispositivo sobre un cilindro de aluminio.

	Datos Reportados	Datos de Laboratorio
Diámetro (m)	0.038	0.038
Tiempo Longitudinal (s)	$6\text{E-}6$	$6.00\text{E-}6$
Velocidad Longitudinal (m/s)	6420	6333.33
Tiempo Transversal (s)	$12.5\ \text{E-}6$	$13.5\text{E-}6$
Velocidad Transversal (m/s)	3040	2814

Después de verificar que la señal conseguida es óptima se procedió a implementarla con los núcleos sintéticos, y posteriormente con los *plugs* de la Formación Mirador. Con el fin de obtener repetibilidad en los resultados se tomaron alrededor de cinco datos en cada posición de las microfracturas con respecto al cristal por cada *plug*.

Teniendo en cuenta que se conocía la dirección preferencial de orientación de las microfrazas (inclusiones) en las muestras sintéticas, se pudieron ubicar los cristales para medir el tiempo de propagación de las ondas en función de las direcciones de interés con respecto a las microfrazas. Es importante anotar que en muestras reales no se conoce si las microfrazas presentan una dirección preferencial ni cual es esa dirección. Por lo anterior, se debe implementar en la metodología una forma de identificar la orientación de las microfrazas en muestras reales.

5.6 POLARIZACIÓN DE LA ONDA S (SHEAR WAVE SPLITTING)

El comportamiento de la onda S ha sido ampliamente estudiado por algunos autores expertos en este tema como Crampin, Ass'ad, Shoenberg, Rathore. En estos estudios se demostró que la onda S es afectada por orientación de esfuerzos, fracturas orientadas, y estratificación. De manera que si se polariza la onda S y esta incide en diferentes ángulos con respecto a los factores que generan anisotropía es posible que la velocidad de la onda se afecte (Figura 40). De esta manera, si se hace un barrido de la onda S polarizada rotándola con respecto al medio fracturado es posible determinar la dirección en la que se encuentran orientadas las fracturas.

Teniendo en cuenta este comportamiento se realiza un barrido en las caras planas del cilindro. En la representación gráfica de la Figura 41 se conoce la dirección de vibración del cristal. Para un ángulo de 0° entre la orientación media de las fracturas y el ángulo de incidencia de la onda S polarizada el tiempo de propagación de la onda es mínimo, debido a que la onda viaja con mayor velocidad en la dirección paralela a las microfrazas. A un ángulo de 90° , el tiempo de propagación es máximo porque la velocidad de la onda se reduce por viajar perpendicularmente a las microfrazas.

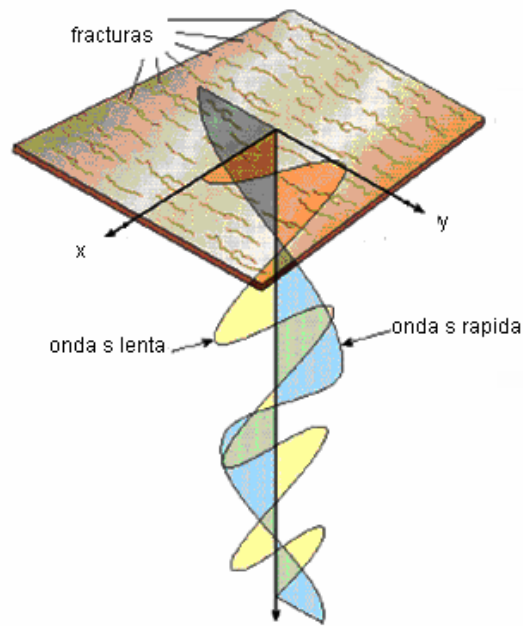


Figura 40. Ondas S polarizadas. En la figura se observa un medio fracturado con direcciones de fracturas preferenciales. Las ondas polarizadas en dirección de las fracturas se propagan con una velocidad mayor. Contrariamente, la onda polarizada en dirección perpendicular a las microfracturas es más lenta. (Becerrea et. al. 2005).

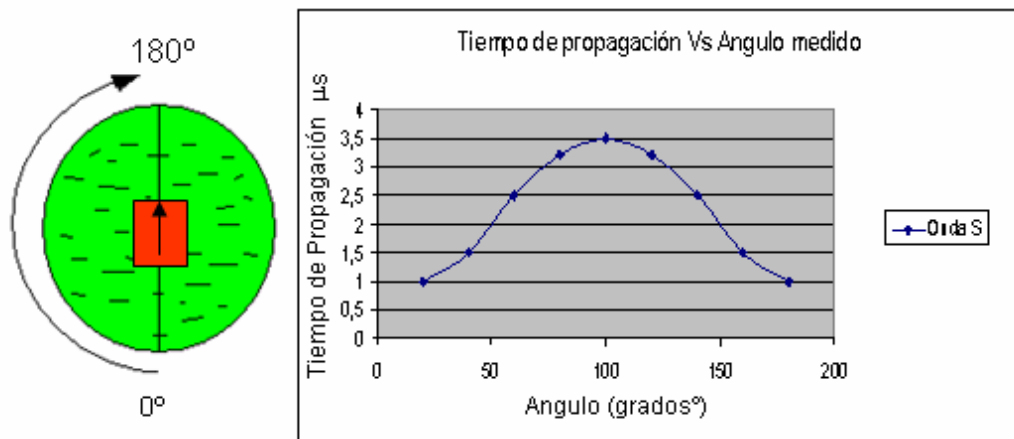


Figura 41A. En la izquierda se observa un medio con fracturas orientadas. El cuadro situado en la parte central del medio fracturado representa la polarización de la onda. Si se realiza un barrido girando el medio fracturado 180° con respecto a la polarización de la onda, las velocidades disminuirán a medida que se acercan a la dirección perpendicular a las fracturas. En la derecha, una gráfica representando los tiempos de arribo de la onda S polarizada para ángulos de incidencia de 0 a 180°.

Angulo de Polarización	Tiempo Propagación(μ s)
0	36,8
30	38,8
60	39,6
90	40,4
120	38,8
150	38
180	36,8

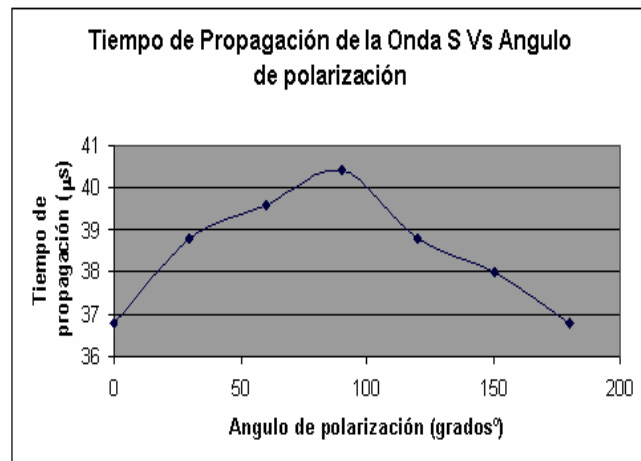


Figura 41B. Comportamiento de la propagación de ondas S en un medio con microfracturas orientadas en una dirección preferencial. Cero grados indica la propagación de las ondas paralelas a las microfracturas. Noventa grados indica la propagación de las ondas perpendicular a las microfracturas.

El caso que se muestra en la Figura 41A es el comportamiento teórico de la propagación de las ondas. Para corroborar si este comportamiento se presentó durante la experimentación, se tomó un *plug* sintético con un 2.96% de densidad de microfracturas conociendo ya su orientación preferencial y se llevó a cabo la medición azimutal de la velocidad de propagación de ondas S polarizadas. El comportamiento de la propagación de las ondas S teórica (Figura 41A) y experimentalmente (Figura 41B) son similares en forma, pues en ambos casos las ondas S se propagan más rápido cuando viajan paralelas a las microfracturas y cuando se propagan perpendicular a ellas presenta el tiempo mayor. De acuerdo con este resultado obtenido del *plug* sintético la metodología de polarización de la onda S funcionó adecuadamente para determinar la orientación de las microfracturas.

6. RESULTADOS

Una vez se definió e implementó la metodología para la determinación de la densidad de microfracturas a partir de parámetros anisótropos, se calcularon los datos de anisotropía de la onda S, P, y la relación SP, γ , ε y δ respectivamente en los *plug* sintéticos antes de disolver las láminas de Aluminio. Además, se calculó la relación de velocidades S1 y S2 rápida y lenta respectivamente y la diferencia de tiempos entre estas ondas (Tabla 4).

En las Figuras 42 a 47 se muestran estas relaciones gráficamente, así como la desviación estándar de los datos. El comportamiento de la onda S (Figura 42) muestra una tendencia lineal clara, donde hay una relación directamente proporcional entre la densidad de microfracturas y la anisotropía de la onda S. Este comportamiento se mantiene hasta un porcentaje de densidad de microfracturas del 4.96%, y en los valores de mayor porcentaje de densidad de microfracturas esta relación cambia, disminuyendo considerablemente la anisotropía. Por el contrario, un análisis de las gráficas obtenidas de las relaciones entre los parámetros anisótropos ε (Figura 43) y δ (Figura 44) con la densidad de microfracturas, no se observan tendencias evidentes que permitan confirmar el comportamiento esperado de aumento en la anisotropía a medida que se aumenta el porcentaje de densidad de microfracturas. Por lo tanto, no es adecuado apoyarse en las relaciones de estos parámetros para la determinación de la densidad de microfracturas, ya que estos muestran variaciones relativamente altas y los cálculos que se puedan hacer a partir de ellos estarían desviados.

Tabla 4. Datos promediados de los plugs sintéticos con láminas de Aluminio como inclusiones.

# de Microfract.	Densidad de microfract.	Long. (m)	Diam. (m)	Densidad (Kg/m3)	tS1b (μs)	tS1a (μs)	VS1b (m/s)	VS1a (m/s)	C33 (Pa)	C11 (Pa)	C66 (Pa)	C44 (Pa)	C12 (Pa)	C13 (Pa)	ε	δ	γ
0	0,00	0,0561	0,0381	1664,42	37,00 ±0,73	36,40 ±0,78	1515,36	1541,82	10457,4E+6	12245,7E+6	3958,1E+6	3823,2E+6	4329,5E+6	10173,7E+6	0,086	1,095	0,018 ±0,013
5	0,21	0,0558	0,0381	1713,85	36,00 ±0,83	34,40 ±0,42	1549,12	1623,83	11671,2E+6	13340,8E+6	4519,5E+6	4114,4E+6	4301,7E+6	8275,4E+6	0,072	0,547	0,050 ±0,015
10	0,42	0,0563	0,0381	1817,81	36,50 ±0,23	34,50 ±0,19	1542,51	1634,29	11424,1E+6	14264,9E+6	4855,3E+6	4325,3E+6	4554,3E+6	8320,8E+6	0,124	0,676	0,061 ±0,011
15	0,63	0,0560	0,0381	1642,57	35,50 ±0,28	33,30 ±0,28	1577,51	1681,74	9802,5E+6	11250,9E+6	4645,8E+6	4087,7E+6	1959,3E+6	5440,7E+6	0,075	0,521	0,068 ±0,001
20	0,86	0,0552	0,0381	1780,46	37,70 ±0,20	35,10 ±0,69	1464,22	1573,05	12704,8E+6	14518,5E+6	4406,9E+6	3817,3E+6	5704,7E+6	10473,8E+6	0,072	0,556	0,077 ±0,017
25	1,06	0,0559	0,0381	1683,16	36,90 ±0,10	34,10 ±0,10	1514,91	1639,30	12465,8E+6	13148,9E+6	4523,2E+6	3862,8E+6	4102,6E+6	9608,0E+6	0,027	0,501	0,085 ±0,001
30	1,27	0,0561	0,0381	1818,35	38,00 ±0,70	34,70 ±0,10	1478,65	1616,71	10472,7E+6	14379,4E+6	4752,7E+6	3976,7E+6	4874,0E+6	9743,0E+6	0,189	1,102	0,098 ±0,022
35	1,49	0,0556	0,0381	1670,62	40,40 ±0,46	36,40 ±0,12	1374,98	1525,81	8949,8E+6	11065,3E+6	3889,4E+6	3158,7E+6	3286,5E+6	7914,7E+6	0,119	0,866	0,116 ±0,016
40	1,69	0,0561	0,0381	1692,97	39,00 ±0,83	34,40 ±0,61	1440,38	1629,87	10651,6E+6	12807,6E+6	4498,2E+6	3513,5E+6	3811,2E+6	8366,4E+6	0,102	0,598	0,141 ±0,045

# de Microfract.	Densidad de microfract.	Long. (m)	Diam. (m)	Densidad (Kg/m3)	tS1b (μs)	tS1a (μs)	VS1b (m/s)	VS1a (m/s)	C33 (Pa)	C11 (Pa)	C66 (Pa)	C44 (Pa)	C12 (Pa)	C13 (Pa)	ε	δ	γ
45	1,91	0,0557	0,0381	1702,90	39,10 ±0,10	34,30 ±0,10	1424,30	1623,62	9656,0E+6	11319,7E+6	4489,1E+6	3454,5E+6	2341,6E+6	7064,5E+6	0,086	0,603	0,150 ±0,001
60	2,54	0,0560	0,0381	1848,55	37,10 ±0,10	32,00 ±0,14	1509,16	1749,70	10754,2E+6	14487,5E+6	5659,3E+6	4210,2E+6	3168,8E+6	76,12E+8	0,174	0,691	0,172 ±0,006
65	2,75	0,0559	0,0381	1661,87	38,40 ±0,50	32,50 ±0,17	1457,48	1718,84	8547,3E+6	12126,8E+6	4910,0E+6	3530,8E+6	2306,8E+6	6679,4E+6	0,209	0,922	0,196 ±0,021
70	2,96	0,0560	0,0381	1735,77	38,50 ±0,60	32,40 ±0,53	1455,16	1729,05	10353,6E+6	13153,6E+6	5190,3E+6	3676,4E+6	2773,0E+6	7822,4E+6	0,135	0,634	0,206 ±0,026
75	3,17	0,0561	0,0381	1672,42	40,20 ±0,19	32,90 ±0,21	1396,29	1704,01	10087,1E+6	11372,6E+6	4856,3E+6	3260,6E+6	1660,0E+6	8279,6E+6	0,073	0,659	0,245 ±0,011
80	3,37	0,0562	0,0381	1679,47	40,60 ±0,41	33,00 ±0,20	1385,80	1702,77	8559,9E+6	11365,4E+6	4869,7E+6	3225,6E+6	1626,0E+6	6672,4E+6	0,166	0,767	0,255 ±0,011
85	3,59	0,0560	0,0381	1734,99	40,60 ±0,46	3,26 ±0,46	1381,30	1720,70	8796,7E+6	11674,3E+6	5137,6E+6	3310,6E+6	1399,0E+6	6271,2E+6	0,165	0,640	0,276 ±0,004
95	4,00	0,0563	0,0381	1717,78	38,90 ±0,43	30,70 ±0,89	1445,70	1834,75	9760,6E+6	14764,8E+6	5786,2E+6	3590,6E+6	3192,4E+6	8935,6E+6	0,304	1,196	0,305 ±0,035
100	4,12	0,0575	0,0381	1669,68	40,70 ±0,10	31,90 ±0,10	1411,79	1801,25	7158,9E+6	11815,6E+6	5417,3E+6	3327,9E+6	0981,0E+6	8052,6E+6	0,325	2,094	0,314 ±0,001
105	4,43	0,0561	0,0381	1660,14	40,20 ±0,21	30,60 ±0,12	1397,05	1835,68	11621,7E+6	13066,7E+6	5594,2E+6	3240,5E+6	1878,2E+6	9489,9E+6	0,062	0,471	0,363 ±0,013

# de Microfract.	Densidad de microfract.	Long. (m)	Diam. (m)	Densidad (Kg/m ³)	tS1b (μs)	tS1a (μs)	VS1b (m/s)	VS1a (m/s)	C33 (Pa)	C11 (Pa)	C66 (Pa)	C44 (Pa)	C12 (Pa)	C13 (Pa)	ε	δ	γ
115	4,86	0,0560	0,0381	1803,58	40,80 ±0,21	30,60 ±0,12	1373,68	1832,08	11952,6E+6	14723,1E+6	6053,8E+6	3403,4E+6	2615,5E+6	10226,3E+6	0,116	0,551	0,389 ±0,002
120	4,96	0,0573	0,0381	1686,83	46,20 ±0,21	34,40 ±0,23	1238,29	1662,68	10598,3E+6	13821,7E+6	4663,4E+6	2586,5E+6	4494,9E+6	10007,3E+6	0,152	0,556	0,402 ±0,016
125	5,03	0,0589	0,0381	1668,01	39,70 ±0,21	34,60 ±0,12	1483,40	1703,68	8199,8E+6	13370,7E+6	4841,5E+6	3670,5E+6	3687,8E+6	5610,8E+6	0,351	1,034	0,160 ±0,004
130	5,48	0,0561	0,0381	1832,22	37,00 ±0,21	35,60 ±0,23	1515,67	1575,25	7214,8E+6	14431,4E+6	4546,6E+6	4209,1E+6	5338,1E+6	5356,4E+6	0,500	1,901	0,040 ±0,006
150	6,25	0,0569	0,0381	1660,01	38,30 ±0,21	36,30 ±0,12	1484,86	1566,67	10253,7E+6	13422,0E+6	4074,4E+6	3660,0E+6	5273,2E+6	7729,9E+6	0,155	0,639	0,057 ±0,001
170	7,81	0,0516	0,0381	1854,91	33,60 ±0,21	31,50 ±0,69	1533,65	1638,00	5563,2E+6	15931,7E+6	4978,4E+6	4363,0E+6	5974,8E+6	6307,1E+6	0,932	8,426	0,070 ±0,023
190	7,87	0,0572	0,0381	1687,49	37,50 ±0,21	35,80 ±0,23	1524,38	1598,18	7167,7E+6	14162,6E+6	4310,3E+6	3921,6E+6	5542,0E+6	2568,1E+6	0,594	0,738	0,050 ±0,007
210	8,92	0,0558	0,0381	1702,98	35,80 ±0,21	35,40 ±0,50	1556,66	1574,44	10431,0E+6	14991,7E+6	4222,0E+6	4126,7E+6	6547,7E+6	10301,7E+6	0,245	1,911	0,012 ±0,012
230	9,92	0,0549	0,0381	1711,75	35,50 ±0,21	35,10 ±0,10	1546,48	1564,10	10484,6E+6	14030,8E+6	4187,6E+6	4093,8E+6	5655,5E+6	7800,2E+6	0,195	0,821	0,011 ±0,001
250	10,55	0,0561	0,0381	1677,32	35,10 ±0,10	33,10 ±0,10	1598,29	1694,86	10538,5E+6	15592,2E+6	4818,2E+6	4284,8E+6	5955,7E+6	6926,1E+6	0,240	0,657	0,062 ±0,001

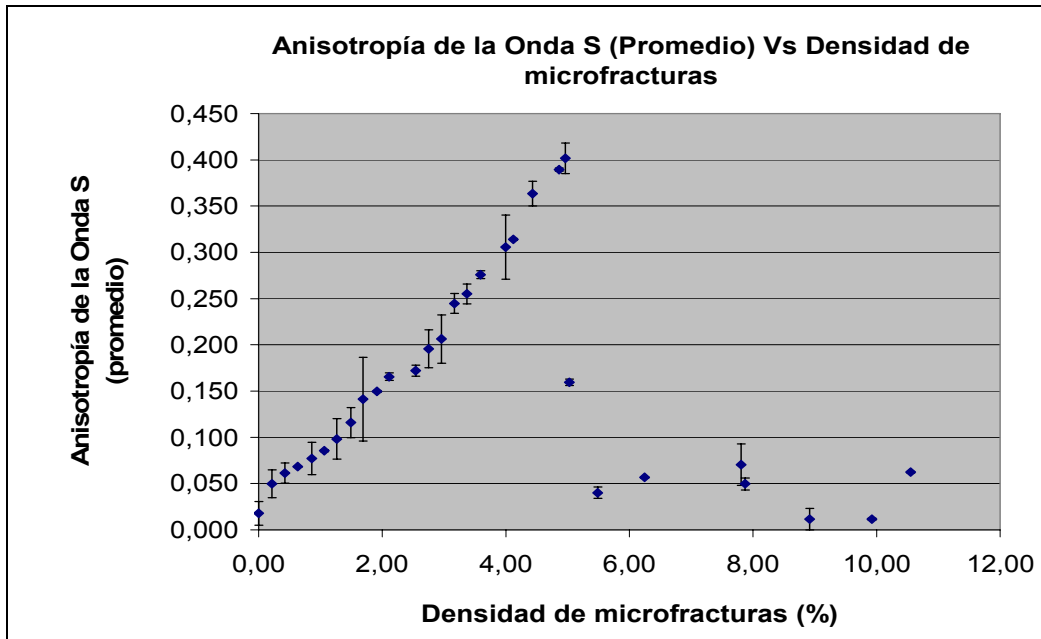


Figura 42. Relación de la Anisotropía de la onda S promediada Vs la densidad de microfracturas. Se observa un aumento de anisotropía a medida que aumenta la densidad de microfracturas, llegando a un máximo cuando la densidad es de 4.96%. En valores de densidad de microfracturas mayor que 4.96% la anisotropía disminuye.

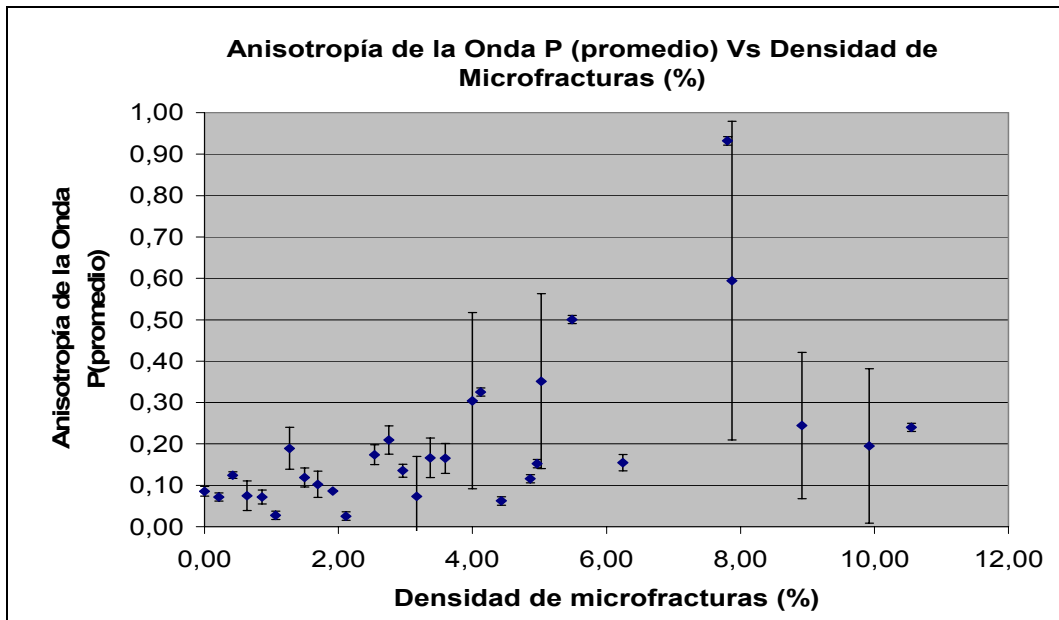


Figura 43. Relación de la Anisotropía de la onda P promediada Vs la densidad de microfracturas. Se observa una tendencia de aumento en la anisotropía a medida que aumenta la densidad de microfracturas, pero a diferencia de la Figura 42 esta muestra fluctuaciones muy grandes.

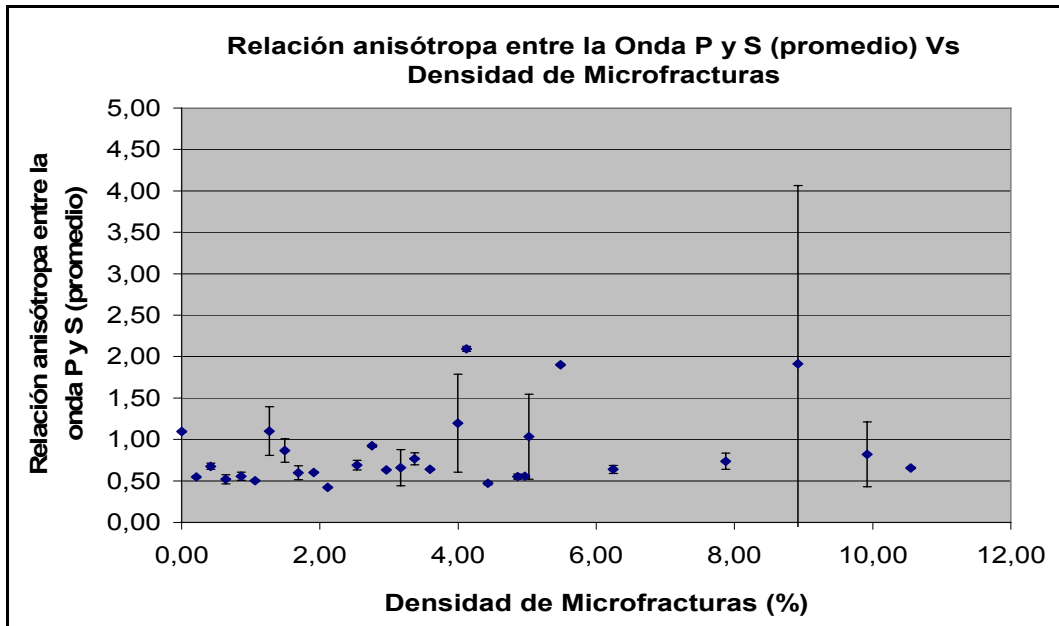


Figura 44. Variación de la relación de anisotropía de ondas P y S (δ) (promediada en cinco mediciones cada una) Vs la densidad de microfracturas. Aunque teóricamente se debería observar claramente un aumento de δ a medida que aumenta la densidad, en estos experimentos solo se observó una ligera tendencia de aumento.

En la Figura 45 se presenta la relación de la Anisotropía de la onda S promediada Vs la densidad de microfracturas. Se observa una tendencia directamente proporcional entre la Anisotropía de la Onda S y la densidad de microfracturas, aumentando linealmente la anisotropía a medida que aumenta la densidad de microfracturas. A partir de esta tendencia lineal se realizó una regresión lineal obteniendo la ecuación de la recta con la cual se determinará la densidad de microfracturas a partir de parámetros anisótropos en los núcleos reales.

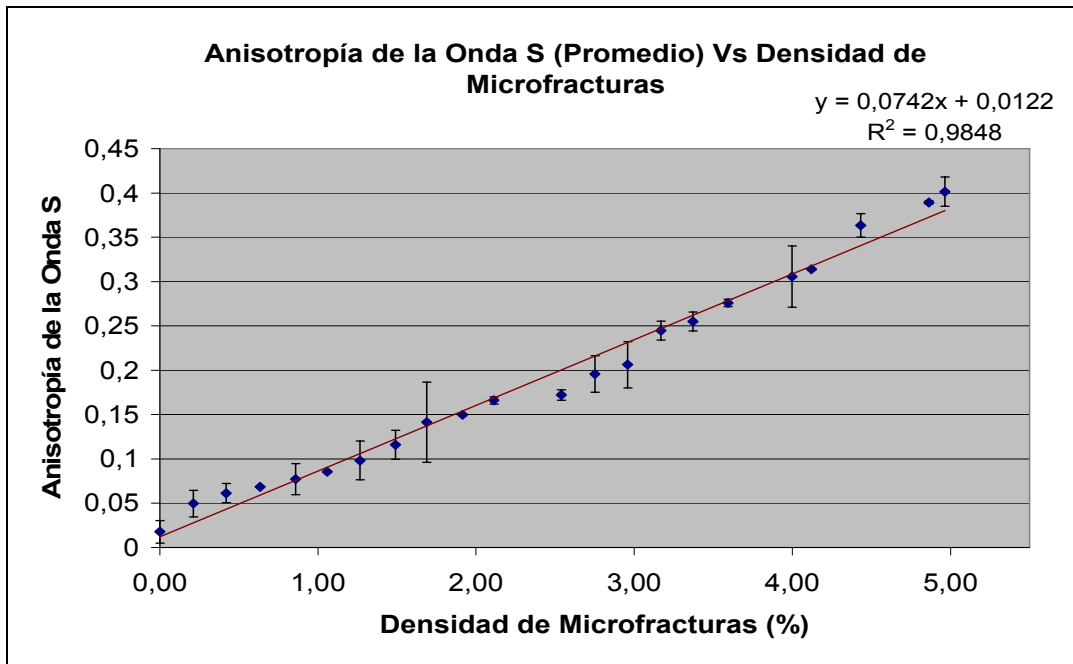


Figura 45. Relación de la Anisotropía de la onda S promediada Vs la densidad de microfracturas. Se observa una tendencia directamente proporcional entre la Anisotropía de la Onda S y la densidad de microfracturas, aumentando linealmente la anisotropía a medida que aumenta la densidad de microfracturas.

Además de las curvas de los parámetros anisótropos vs. la densidad de microfracturas se halló la relación entre las diferencia de tiempos de la onda S1a y S1b con la densidad de microfracturas (Figura 46). En esta Figura se observa una relación lineal positiva, con un coeficiente de correlación R2 de 0.98, indicando que esta relación es estadísticamente significativa.

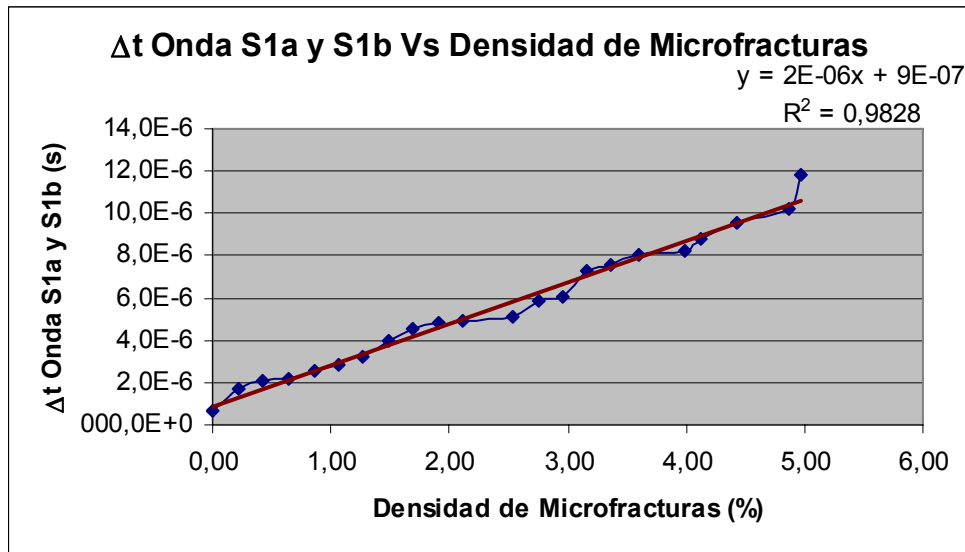


Figura 46. Relación de la diferencia de tiempos promediados de las ondas S polarizadas paralelas S1a y perpendiculares S1b a las microfisuras.

En la Figura 47 se analizó la curva obtenida a partir de la relación de velocidades S1a y S1b con la densidad de microfisuras. Se observa una disminución de esta relación a medida que aumenta la densidad de microfisuras hasta 4.96%. Por encima de este valor, esta relación aumenta rápidamente y después permanece constante. Assad' d et, al, (1992), realizaron un experimento similar llegando hasta un porcentaje de densidad de microfisuras del 10%, observando también una tendencia de aumento de anisotropía de la onda S hasta una densidad de microfisuramiento del 7%, y por encima de este valor una disminución de la anisotropía, sugiriendo que cuando se supera un valor crítico de densidad de fisuras (inclusiones) estas se interconectan entre sí, de manera que las dimensiones de las inclusiones dejan de ser menores que la longitud de onda, rompiéndose así las condiciones de anisotropía en función de la escala. Una hipótesis alterna es que cuando el medio fisurado alcanza un valor crítico de densidad de microfisuras (inclusiones) este se hace espacialmente más homogéneo y su comportamiento tiende a ser menos anisótropo.

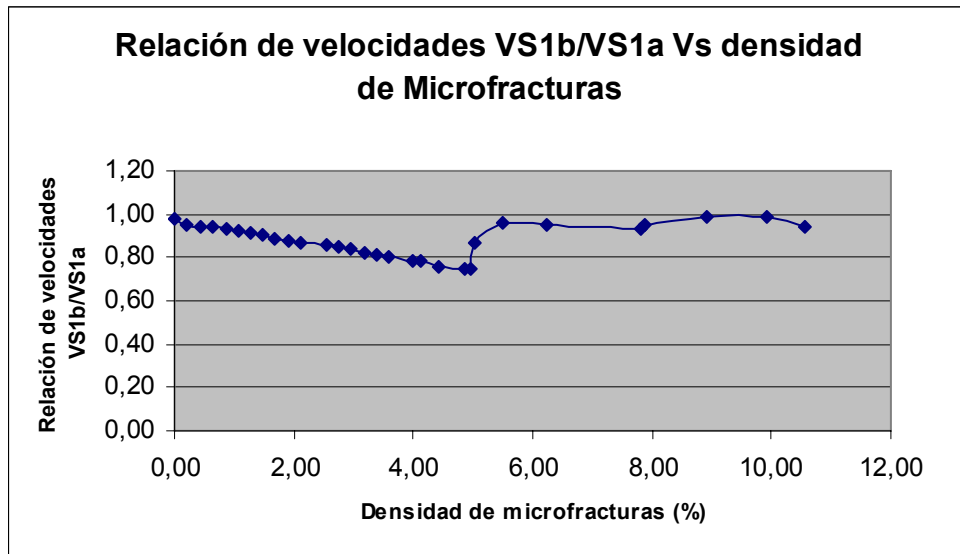


Figura 47. Relación de velocidades promediadas S1b (onda S polarizada perpendicular a las microfracturas) y S1a (ondas polarizadas paralela a las microfracturas).

6.1 APLICABILIDAD DE LA CURVA DE LA ANISOTROPÍA DE LA ONDA S

Según Crampin (1994), las rocas se pueden clasificar según su grado de fracturamiento (Figura 48). La escala de Crampin (1994) varía entre un valor mínimo de fracturamiento de 1.5% ($\epsilon=0.015$) y un máximo de 4.5% ($\epsilon=0.045$). Crampin (1994) además sugirió que hay un valor de densidad de fracturas que corresponde al “fracturamiento crítico” de la roca. Como se observa en la Figura 48 el fracturamiento crítico se alcanza en 4.5%.

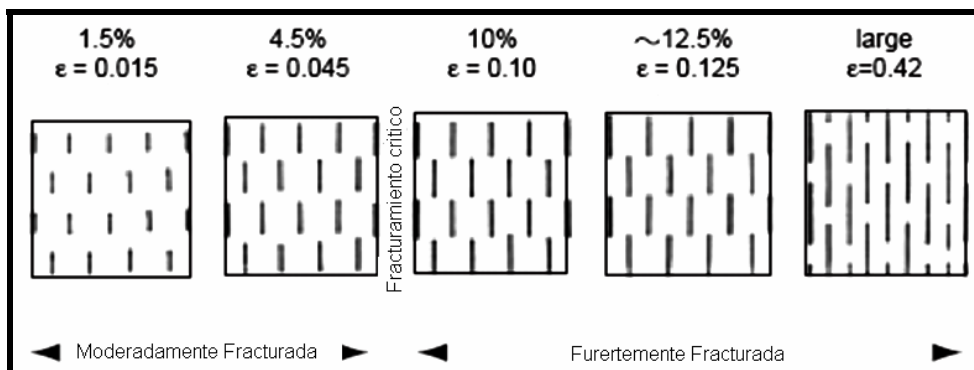


Figura 48. Esquema de la clasificación del grado de fracturamiento de las rocas, según Crampin, (1994)

De acuerdo con la clasificación que planteó Crampin (1994) para el fracturamiento de las rocas, la curva obtenida de la relación entre la anisotropía de la onda S (γ) y la densidad de microfracturas tiene aplicabilidad en rocas cuyo grado de fracturamiento sea inferior al fracturamiento crítico, es decir, en un rango de rocas intactas a moderadamente fracturadas.

6.2 RESULTADOS OBTENIDOS DE LOS *PLUGS* SINTÉTICOS DESPUÉS DE DISOLVER LAS LÁMINAS

Después de realizar las medidas sobre los modelos sin haber disuelto las láminas de Aluminio se tomaron 9 de los 30 *plugs* elaborados para realizar el procedimiento de disolver las láminas. Posterior a esto se procedió a realizar las respectivas medidas acústicas para determinar la anisotropía en estos *plugs* (Tabla 5). Con estos datos se graficó una curva de la anisotropía de la onda S Vs la densidad de microfracturas (láminas disueltas), (Figura 49).

Tabla 5. Datos promediados de los *plugs* sintéticos con láminas disueltas

Número de Microfracturas	Densidad de Microfracturas (%)	tS1b (μ s)	tS1a (μ s)	Anisotropía S (γ)
5	0,21	65,70 $\pm 0,55$	37,30 $\pm 0,55$	1,138 $\pm 0,036$
15	0,63	76,50 $\pm 3,91$	47,70 $\pm 3,56$	0,798 $\pm 0,176$
30	1,27	38,62 $\pm 1,56$	30,42 $\pm 0,27$	0,307 $\pm 0,062$
40	1,69	41,34 $\pm 2,34$	38,46 $\pm 2,01$	0,079 $\pm 0,040$
50	2,11	39,10 $\pm 1,02$	34,94 $\pm 1,04$	0,128 $\pm 0,040$
95	4,00	35,50 $\pm 1,62$	32,42 $\pm 0,33$	0,101 $\pm 0,059$
105	4,43	36,14 $\pm 3,62$	31,98 $\pm 0,52$	0,141 $\pm 0,111$
115	4,86	41,29 $\pm 0,67$	33,10 $\pm 1,02$	0,279 $\pm 0,057$
120	4,96	49,70 $\pm 6,13$	36,86 $\pm 2,59$	0,430 $\pm 0,241$

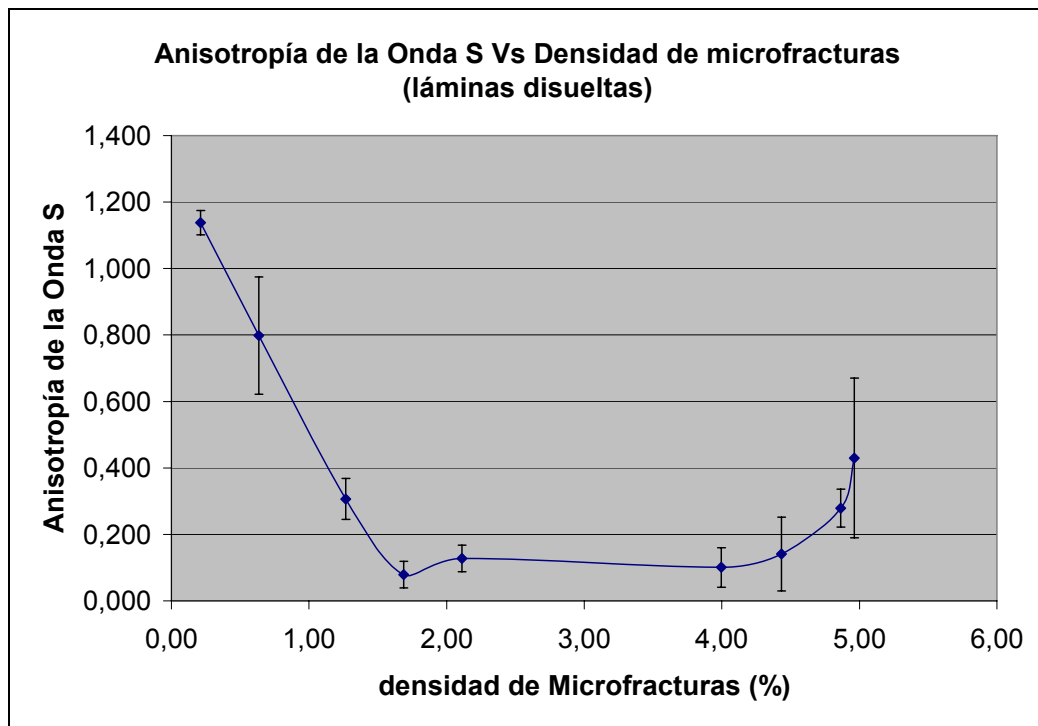


Figura 49. Gráfica de Anisotropía de la onda S Vs densidad de microfracturas (láminas disueltas).

De la gráfica se puede apreciar que el *plug* con menos porcentaje de densidad de microfracturas muestra una alta anisotropía de onda S, la cual disminuye de manera proporcional hasta una densidad de 1,69%, permaneciendo casi constante hasta el 4%, y posteriormente empieza a aumentar.

Este comportamiento no se pudo explicar, ya que se esperaba que esta curva presentara un comportamiento lineal, similar al mostrado en la Figura 42, en la cual la anisotropía de la onda S aumenta a medida que aumenta la densidad de microfracturas. Posiblemente este efecto surgió por una reacción entre el ácido clorhídrico y el epóxico usado para cementar las partículas de los *plugs* sintéticos durante la disolución de las láminas de aluminio. Es importante resaltar que a nivel macroscópico las muestras sintéticas no presentaron ruptura o disgregación, por lo que se supone que el cambio debió ocurrir a nivel de la estructura interna del

epóxico empleado para consolidar la muestra. Adicionalmente, se observó que la fortaleza de la onda recibida era mucho menor que la de la onda recibida durante los experimentos con inclusiones (Figura 50). Esta observación indica que a diferencia de las inclusiones, las microfrazas vacías producen una atenuación significativa en la señal. Similarmente, estas microcavidades podrían también tener efectos de dispersión y difracción de ondas, generando una respuesta errática. Otro factor que nos indica que los resultados de la Figura 49 no son confiables es la alta desviación estándar, la cual indica una variabilidad de los resultados mucho mayor que en las medidas de los *plugs* con inclusiones. De acuerdo con este análisis, no es apropiado emplear los datos en la Figura 49 para la determinación de la densidad de microfrazas.

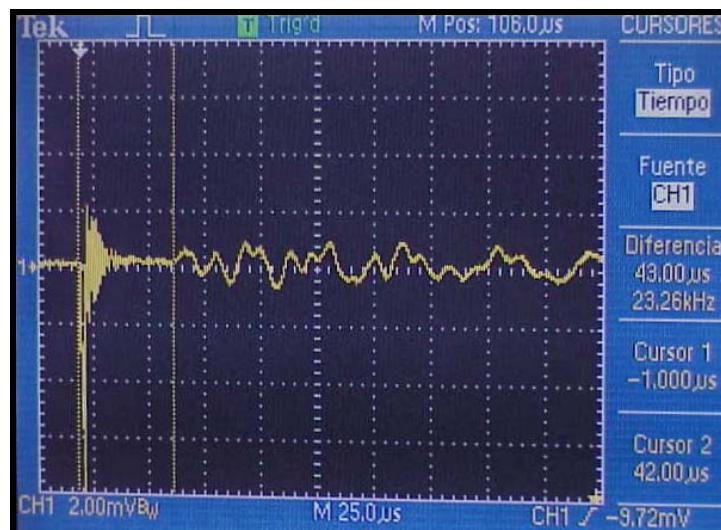


Figura 50. Señal obtenida de los *plugs* sintéticos después de disolver las inclusiones (láminas de aluminio) con ácido clorhídrico.

De acuerdo con lo anterior, para aplicar la metodología para la determinación de la densidad de microfrazas a partir de parámetros anisótropos se trabajó sólo con la curva obtenida de la relación entre la anisotropía de la onda S y la densidad de microfrazas de los *plugs* con inclusiones, considerando que las rocas a las cuales se puede aplicar no deben exceder su fracturamiento crítico.

7. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA EN ROCAS DE LA FORMACIÓN MIRADOR DEL CAMPO CUPIAGUA (PIEDEMONTES LLANEROS)

7.1 LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA

La Cuenca de los Llanos se encuentra limitada al occidente por la cordillera Oriental y al oriente por el escudo de Guayana. Se extiende hasta Venezuela y está separada de la cuenca de Barinas por el Arco de Santa Bárbara. Hacia el Sur está separada de la del Putumayo por el Arco de la Macarena-Guaviare. La Cuenca de los Llanos posiblemente hizo parte del sistema de cuencas Andinas que a finales del Cretáceo se extendía desde Venezuela hasta el Perú (Linares et, al 2002).

El Piedemonte Llanero está localizado en las estribaciones orientales de la Cordillera Oriental de Colombia. La actividad exploratoria ha conducido al descubrimiento de varios campos con una gran variedad de fluidos (gas condensado muy pobre a petróleo volátil) en cuarzoarenitas muy apretadas. El estilo estructural de este cinturón plegado de cabalgamiento varía a lo largo del tren desde estructuras frontales simples a un imbricado de hasta cuatro escamas apiladas en una zona triangular. Se orienta en dirección SO-NE y se extiende unos 100 kilómetros al norte y sur del pueblo de Yopal. Esta provincia está limitada hacia el Oeste por el sistema de fallas de Guaicaramo y al Este por el sistema de fallas de Yopal – Borde Llanero (Figura 50).

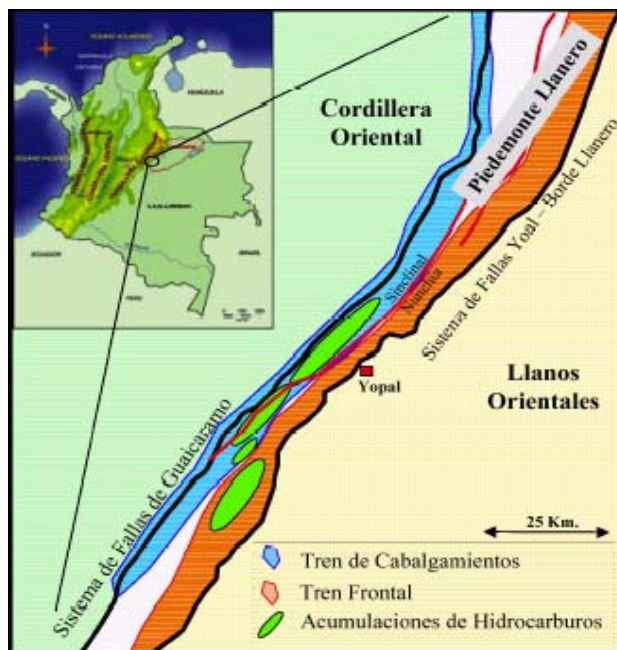


Figura 51. Localización Geográfica del Piedemonte Llanero Colombiano. Tomado de Martínez (2003).

El campo Cupiagua fue descubierto en 1993 y está ubicado en el sector oriental del Departamento de Casanare, en la parte sur del tren del denominado Piedemonte Llanero Colombiano (Figura 52).

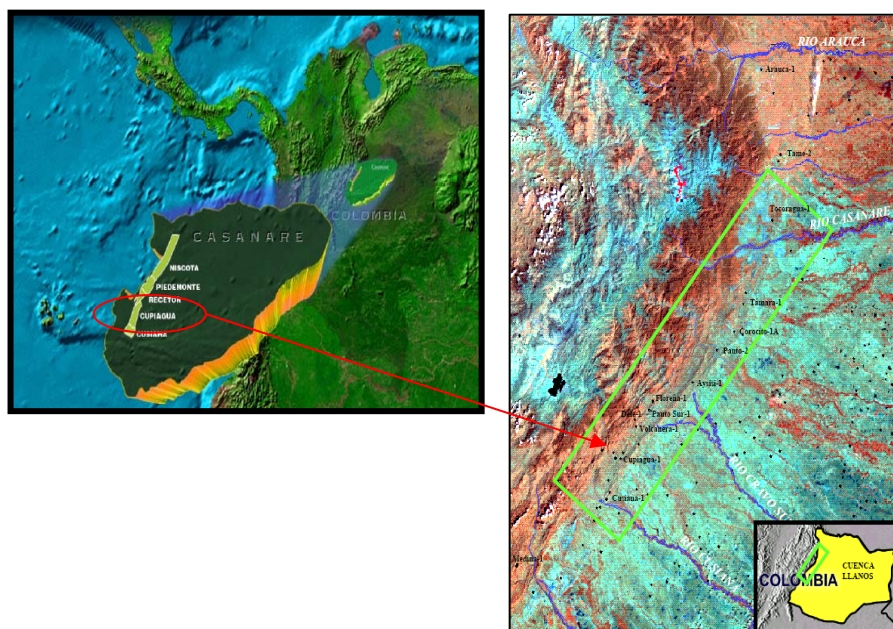


Figura 52. Ubicación del Campo Cupiagua. Tomado de BP (2001) y Rojas (2002).

7.2 FORMACIÓN MIRADOR

La Formación Mirador es de gran importancia en la explotación de petróleo en el Piedemonte Llanero ya que es la principal roca almacenadora de hidrocarburos en la Cuenca de los Llanos. Varios yacimientos importantes que producen crudo de la Formación Mirador, incluyendo el campo Cupiagua, se consideran “Yacimientos Naturalmente Fracturados”, por lo cual es de fundamental importancia determinar la presencia, tipo, densidad, orientación y geometría de las fracturas en estos campos.

Por su composición, estructura y evolución tectónica, la Formación Mirador puede presentar un ajuste al modelo sobre el cual se basó este trabajo: una roca de matriz homogénea que contenga microfracturas verticales en una dirección preferencial, es decir, con simetría hexagonal.

7.2.1 Generalidades Formación Mirador

La Formación Mirador, ubicada en la cuenca de los Llanos orientales, descansa discordantemente sobre la Formación Los Cuervos y en la parte superior está en contacto concordante con la Formación Carbonera (Figura 53).

Su límite basal coincide con una de las principales discordancias regionales de la cuenca, que corresponde a un segmento faltante de secuencia, mientras que el contacto superior con la Formación Carbonera es concordante en la mayor parte de los Llanos excepto en el campo Caño Limón (ECOPETROL).

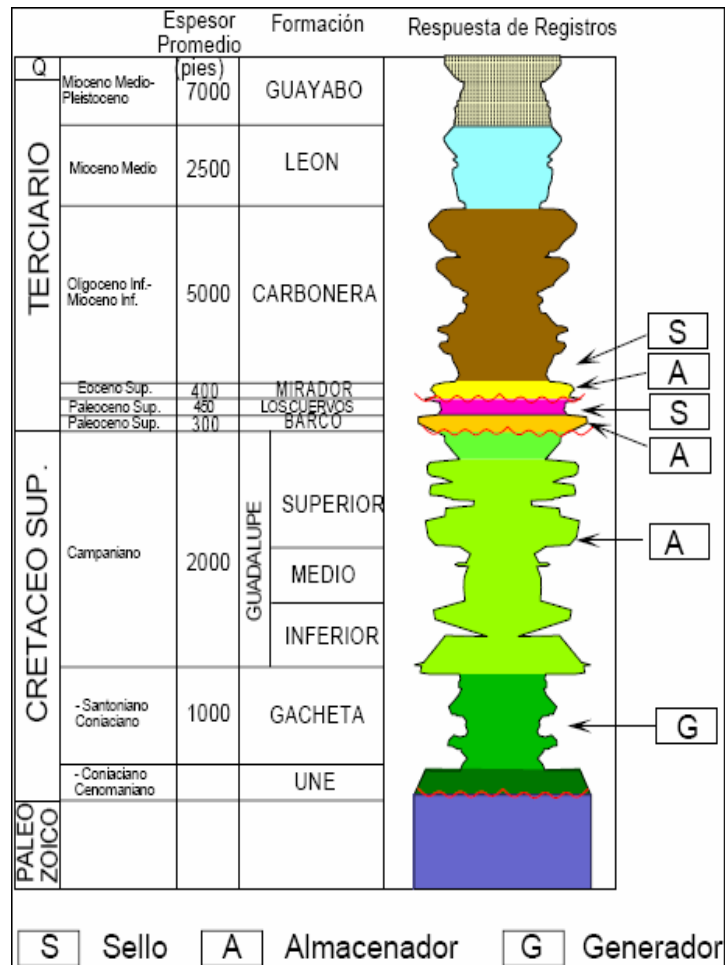


Figura 53. Columna Estratigráfica Generalizada Del Piedemonte Llanero. Tomado de Evaluación Integrada de Yacimientos del Campo Cupiagua, Ecopetrol ICP 2001

7.2.1.1 Litología

Su litología comprende un conjunto de areniscas masivas con diferentes granulometrías, generalmente granodecrescentes de base a techo compuesta por cuarzo, algunas veces feldespato, materia orgánica leñosa y glauconita hacia la parte superior de la secuencia (Ortiz, 2005).

7.2.1.2 Ambiente De Deposición Y Estratigrafía De La Formación Mirador

Con base en información de corazones interpretada por Posada et al., (2001) la Formación Mirador se divide en un intervalo Inferior y uno Superior. El “Mirador inferior” se depositó en un ambiente continental donde se identifican depósitos de canales, rellenos de lagos y lodolitas de

llanura de inundación. En el “Mirador Superior”, el cual se depositó en un ambiente estuarino o de bahías, se reconocen depósitos de canales estuarinos, deltas, areniscas de rellenos de estuarios o bahías y lodolitas de bahías (Posada et al., 2001).

7.2.2 Análisis Petrológico

En la identificación de procesos de fracturamiento obtenida mediante el análisis petrológico realizado por parte del grupo de Impacto Geomecánico y Yacimientos Naturalmente Fracturados del ICP se determinaron tres eventos de fracturamiento, el primero de ellos producto de compresión, creando fracturas de borde de grano. Ellas generalmente se encuentran cerradas o afectadas por sílice sobrecrecida. El segundo evento fue producido por tensión, donde las fracturas generadas fueron parcialmente ocupadas por puentes de sílice. Finalmente, un tercer evento ocurrió en etapas simultáneas o posteriores al plegamiento producido por la orogenia Andina.

7.3 APLICACIÓN DE LA METODOLOGIA EN ROCAS DE LA FORMACIÓN MIRADOR

Después de obtener la curva para la anisotropía de la onda S con los modelos sintéticos se procedió a tomar mediciones sobre los núcleos de la Formación Mirador. Estos núcleos fueron proporcionados por la Litoteca Nacional y el Laboratorio de Mecánica de Rocas del Instituto Colombiano del Petróleo. En total se contó con nueve *plugs* de la Formación Mirador (Figura 54). En la Tabla 6 se presenta la información básica de estos *plugs*. Esta información fue recopilada a partir de columnas estratigráficas y de datos de corazones analizados por el proyecto de “Impacto Geomecánico y Yacimientos Naturalmente Fracturados del ICP” (Ortiz 2005).



Figura 54. En esta fotografía se observan ocho de los nueve *plugs* empleados en la validación de la metodología.

Tabla 6. Descripción de los *plugs* empleados para la determinación de densidad de microfracturas a partir de parámetros anisótropos.

<i>Plugs</i>	Profundidad	Litología	Texturas y estructuras	Intensidad de fracturas	Descripción
1	12654'67"	Arenisca, Arena Fina	Estratificación cruzada en artesa a gran escala	0.6	Cuarzoarenitas de color gris oliva, de granos subredondeados, buena selección, con láminas de mayor tamaño de grano que llegan hasta muy grueso.
2	12654'83"				
3	12655'04"				
4	12501.54'-12501.92'	Arenisca, Arena gruesa	Laminación ondulosa discontinua	0.4	Cuarzoarenita, granos subangulares, moderada selección y cementación silícea, intensa bioturbación. Laminillas negras discontinuas orientadas en diversas direcciones, algunas de estas forman parte del linig de las madrigueras.
5	12610'58"	Arenisca-arena Gruesa	Relictos de estratificación cruzada en artesa a gran escala, estilolitos.	0.3	Cuarzoarenita, granos subangulares, moderada selección y cementación silícea, se encuentra estratificación cruzada.
6	12843'25'	Arenisca-Arena Gruesa	Estratificación cruzada con pebbles	0.6	Cuarzoarenita conglomerática con granos subangulares, moderada selección y cementación silícea, foresets de granos medio y grueso. Estratificación cruzada en artesa con pebbles en los foresets
7	12843'42"				
8	13867.58'	Arenisca lodosa-Arena muy fina a fina	Bioturbación no diferenciada, ophiomorpha	1.7	Cuarzoarenita lodosa, gris claro, granos subangulare, matriz lodosa (10%), baja a moderada cementación silícea.
9	14090.50'-14090.83'	Arenisca-Arena muy fina a fina	Estratificación cruzada en artesa a pequeña y gran escala	0.0	Cuazoarenita gris amarillento, granos subangulares, moderada a buena selección, matriz arcillosa (5%), esporádicos guijos muy finos de cuarzo subredondeados.

7.4 RESULTADOS OBTENIDOS UTILIZANDO MUESTRAS DE LA FORMACION MIRADOR

Como se mencionó en la metodología se utilizó la polarización de la onda S para determinar la orientación de las fracturas y para calcular la anisotropía de acuerdo con esta orientación. Por lo tanto se procedió a medir los tiempos de propagación longitudinales sobre cada uno de los *plugs* rotándolos y tomando los valores más altos y más bajos. Los resultados que se obtuvieron de este procedimiento se muestran en las Tablas 7 a 14 y en las Figuras 55 a 63.

Tabla 7. Tiempos de propagación de la onda S1 polarizada a diferentes ángulos en el plug de profundidad 14090,5';

14090,5'	
Ángulo de Polarización	Promedio t-S1 (μ s)
0	39,67 \pm 0,702
30	39,47 \pm 0,833
60	38,93 \pm 1,007
90	41,73 \pm 1,514
120	38,00 \pm 1,007
150	39,47 \pm 0,611
180	39,40 \pm 0,529

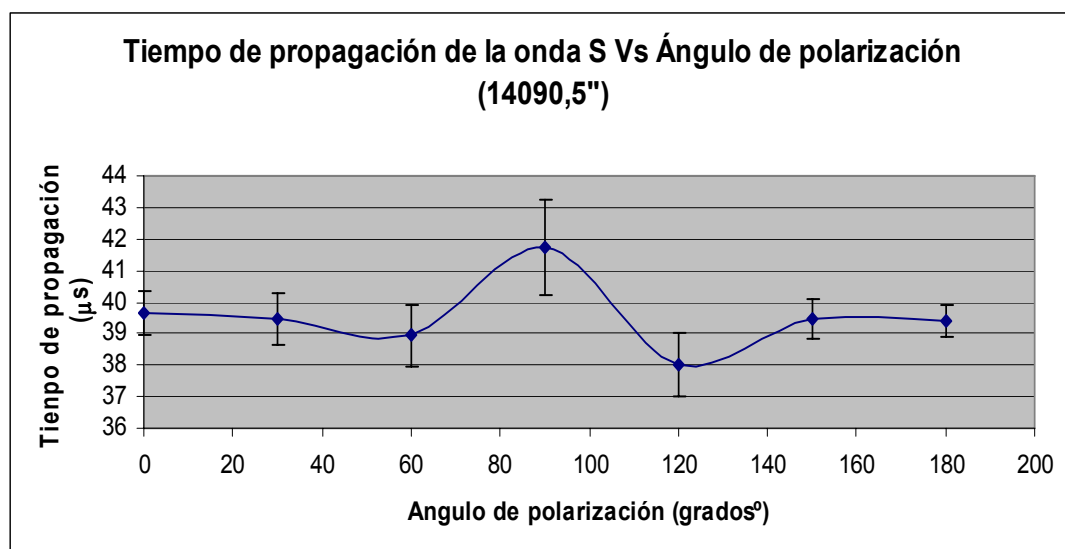


Figura 55. Curva del comportamiento del tiempo de propagación de la onda S polarizada cada 30° haciendo un barrido de 0° a 180°. Como se observa en la Tabla 7 la dirección de mayor anisotropía se presenta a los 90° y 180° (mayor diferencia de tiempos, perpendiculares entre sí).

Tabla 8. Tiempos de propagación de la onda S1 polarizada a diferentes ángulos; plug de profundidad 12610,58'

12610,58'	
Angulo de Polarización	Promedio t-S1 (μs)
0	21,73 \pm 1,220
12.8	21,20 \pm 0,461
25.6	20,40 \pm 0,692
38.4	22,67 \pm 0,230
51.2	22,40 \pm 1,420
64	24,27 \pm 0,461
76.8	23,67 \pm 0,611
90	25,07 \pm 0,461

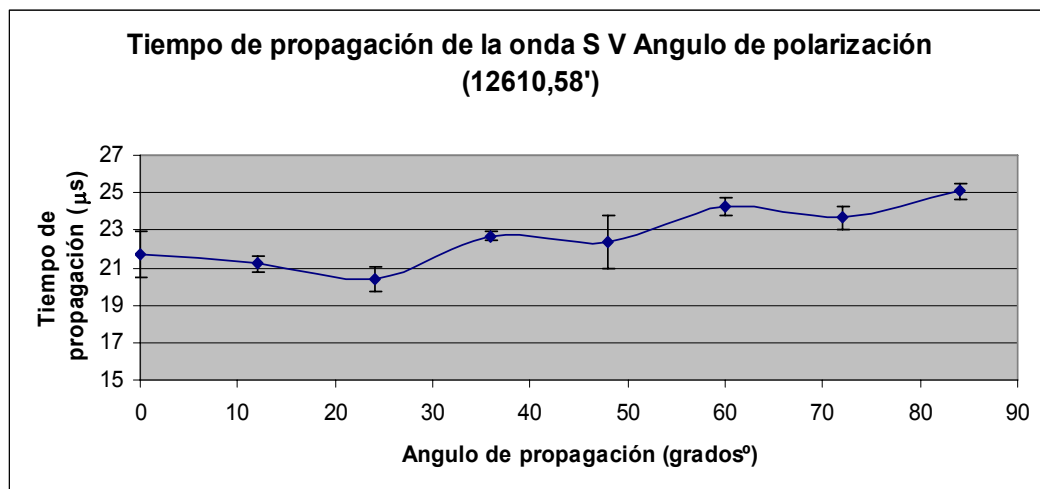


Figura 56. Curva del comportamiento del tiempo de propagación de la onda S polarizada cada 30° haciendo un barrido de 0° a 90°. Como se observa en la Tabla 8 la dirección de mayor anisotropía se presenta a los 0° y 90° (mayor diferencia de tiempos, perpendiculares entre sí).

Tabla 9. Tiempos de propagación de la onda S1 polarizada a diferentes ángulos; plug de profundidad 12501,54';

12501,54'	
Angulo de Polarización	Promedio t-S1(μ s)
0	38 \pm 0.6
12.8	37 \pm 0.4
25.6	36 \pm 0.4
38.4	37 \pm 0.6
51.2	37,6 \pm 0.4
64	39 \pm 0.6
76.8	41,2 \pm 0.6
90	43 \pm 0.6

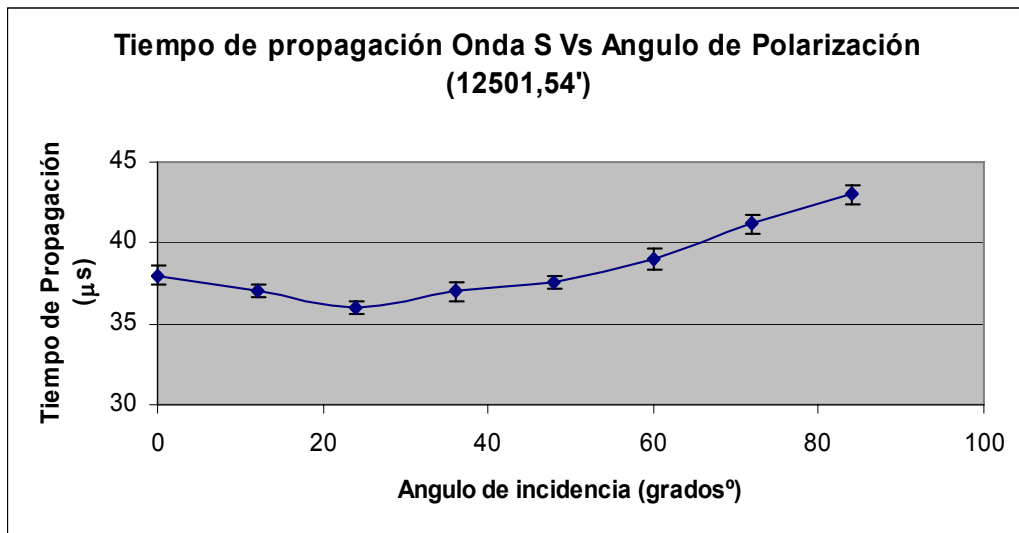


Figura 57. Curva del comportamiento del tiempo de propagación de la onda S polarizada cada 30° haciendo un barrido de 0° a 90°. Como se observa en la tabla 9 la dirección de mayor anisotropía se presenta a los 0° y 90° (mayor diferencia de tiempos, perpendiculares entre sí).

Tabla 10. Tiempos de propagación de la onda S1 polarizada a diferentes ángulos; plug de profundidad 12654,67';

12654,67'	
Angulo de Polarización	Promedio t-S1
0	33 ± 0,503
20	28 ± 1,060
40	29 ± 1,060
60	29 ± 0,611
80	28 ± 0,832
100	29 ± 0,503
120	30 ± 1,290
140	33 ± 1,290
160	34 ± 1,290
180	34 ± 0,503

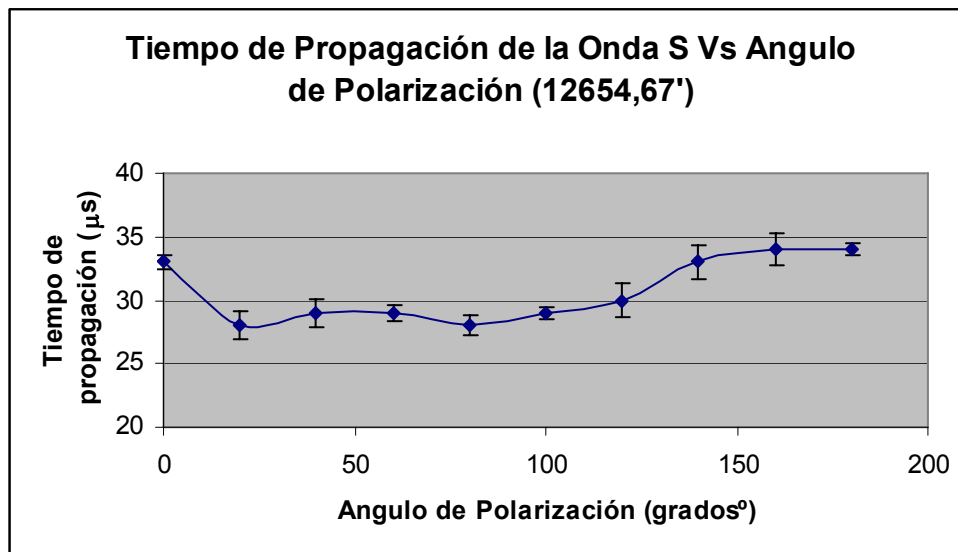


Figura 58. Curva del comportamiento del tiempo de propagación de la onda S polarizada cada 30° haciendo un barrido de 0° a 90°. Como se observa en la tabla 10 la dirección de mayor anisotropía se presenta a los 0° y 90° (mayor diferencia de tiempos, perpendiculares entre sí).

Tabla 11. Tiempos de propagación de la onda S1 polarizada a diferentes ángulos; plug de profundidad 12654,83':

12654,83'	
Angulo de Polarización	Promedio t-S1(μ s)
0	$26 \pm 0,916$
18	$23 \pm 0,461$
36	$20 \pm 0,529$
54	$21 \pm 0,503$
72	$21 \pm 0,305$
90	$20 \pm 0,692$

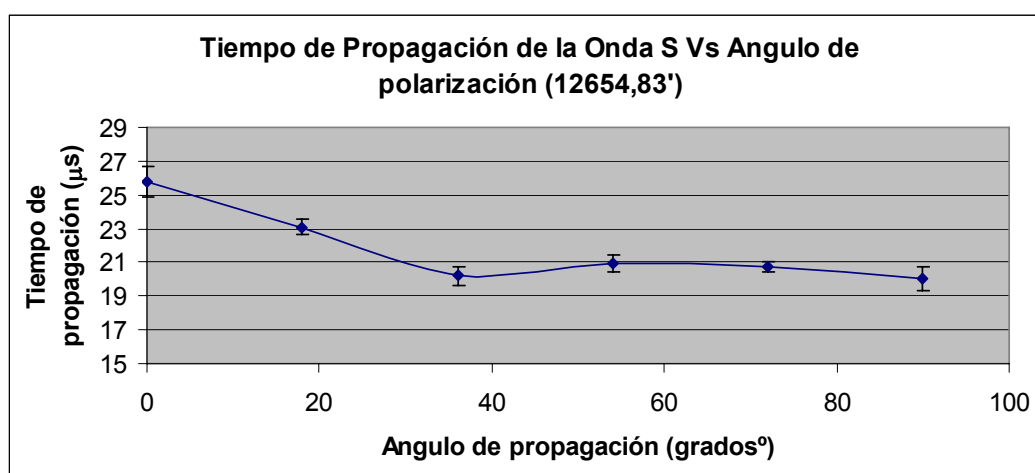


Figura 59. Curva del comportamiento del tiempo de propagación de la onda S polarizada cada 30° haciendo un barrido de 0° a 90°. Como se observa en la tabla 11 la dirección de mayor anisotropía se presenta a los 0° y 90° (mayor diferencia de tiempos, perpendiculares entre sí).

Tabla 12. Tiempos de propagación de la onda S1 polarizada a diferentes ángulos; plug de profundidad 12655,04';

12655,04'	
Angulo de Polarización	Promedio t-S1(μ s)
0	$38 \pm 0,611$
30	$31 \pm 0,416$
60	$30 \pm 1,440$
90	$32 \pm 0,000$
120	$32 \pm 0,400$
150	$31 \pm 0,000$
180	$35 \pm 0,230$

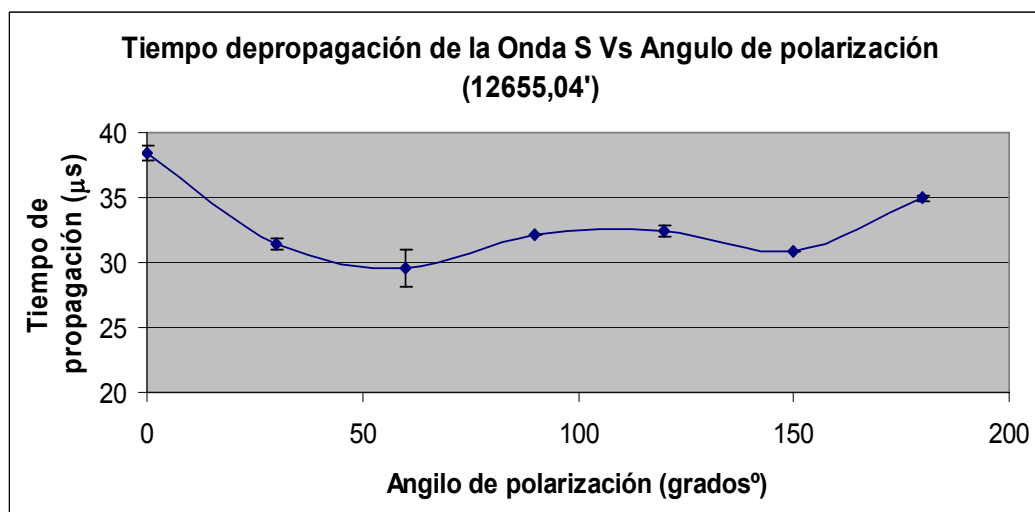


Figura 60. Curva del comportamiento del tiempo de propagación de la onda S polarizada cada 30° haciendo un barrido de 0° a 180°. Como se observa en la tabla 12 la dirección de mayor anisotropía se presenta a los 0° y 90° (mayor diferencia de tiempos, perpendiculares entre sí).

Tabla 13. Tiempos de propagación de la onda S1 polarizada a diferentes ángulos; plug de profundidad 12843,25’;

12843,25'	
Angulo de Polarización	Promedio t-S1(μ s)
0	24 \pm 0,715
18	20 \pm 1,430
36	23 \pm 0,200
54	23 \pm 1,250
72	24 \pm 0,715
90	25 \pm 1,060
108	25 \pm 1,060
126	25 \pm 0,230
144	26 \pm 0,000
162	26 \pm 1,390
180	23 \pm 1,290

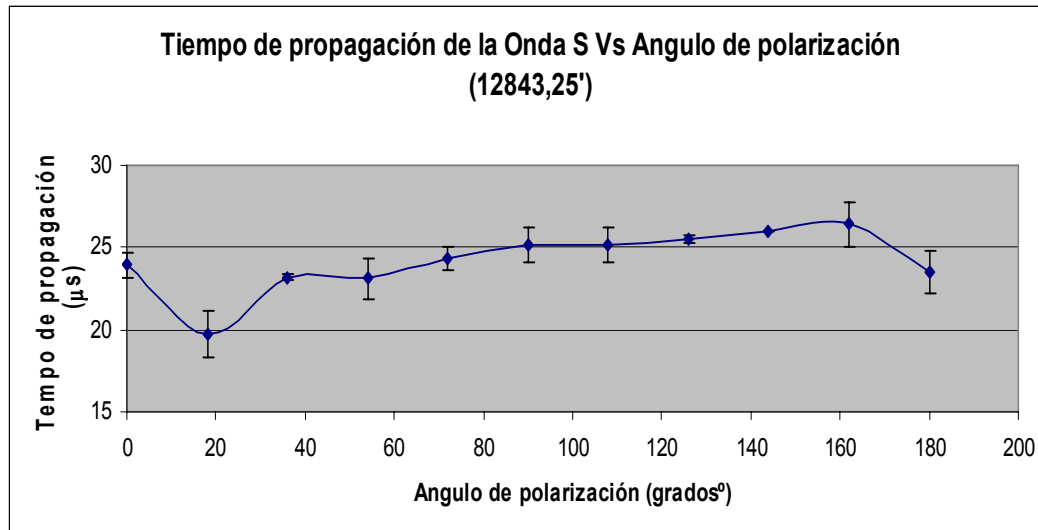


Figura 61. Curva del comportamiento del tiempo de propagación de la onda S polarizada cada 30° haciendo un barrido de 0° a 90°. Como se observa en la tabla 13 la dirección de mayor anisotropía se presenta a los 18° y 108° (mayor diferencia de tiempos, perpendiculares entre sí).

Tabla 14. Tiempos de propagación de la onda S1 polarizada a diferentes ángulos; plug de profundidad 12843,42’;

12843,42'	
Angulo de Polarización	Promedio t-S1(μ s)
0	17 \pm 1.390
18	21 \pm 0.611
36	21 \pm 1.620
54	21 \pm 1.010
72	21 \pm 0.832
90	25 \pm 0.000

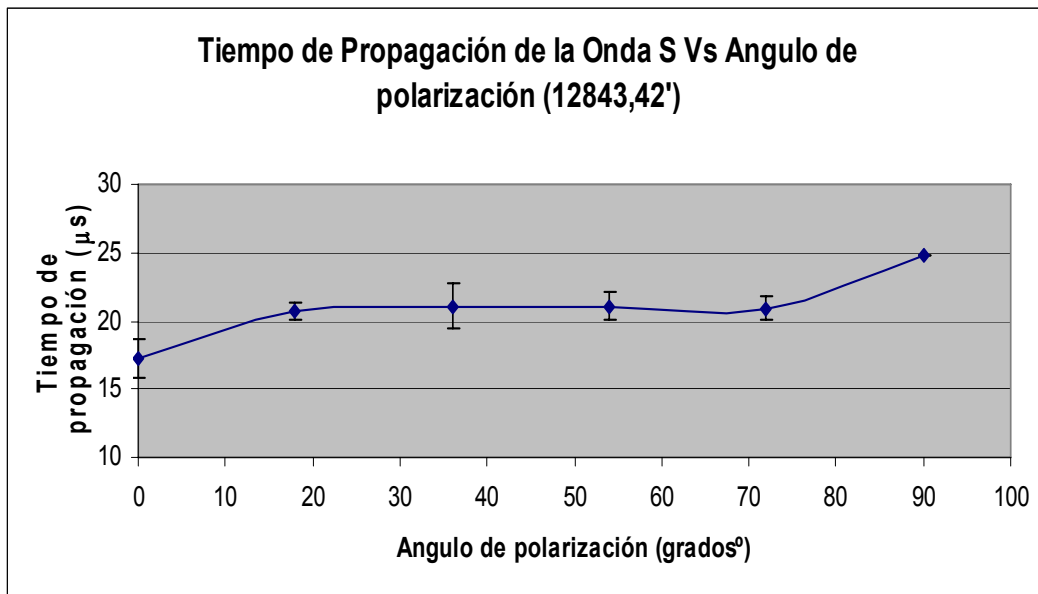


Figura 62. Curva del comportamiento del tiempo de propagación de la onda S polarizada cada 30° haciendo un barrido de 0° a 90°. Como se observa en la Tabla 14 la dirección de mayor anisotropía se presenta a los 0° y 90° (mayor diferencia de tiempos, perpendiculares entre sí).

Tabla 15. Tiempos de propagación de la onda S1 polarizada a diferentes ángulos; plug de profundidad 13867,58';

13867,58'	
Angulo de Polarización	Promedio t-S1(μ s)
0	23 \pm 0.316
12	24 \pm 0.141
24	23 \pm 0.303
36	38 \pm 1.5
48	32 \pm 0.328
60	28 \pm 1.11
72	27 \pm 1.230
84	26 \pm 0.692
96	24 \pm 0.115
108	23 \pm 0.115
120	27 \pm 1.060
132	24 \pm 0.808
144	27 \pm 0.692
156	26 \pm 0.230
168	25 \pm 0.611

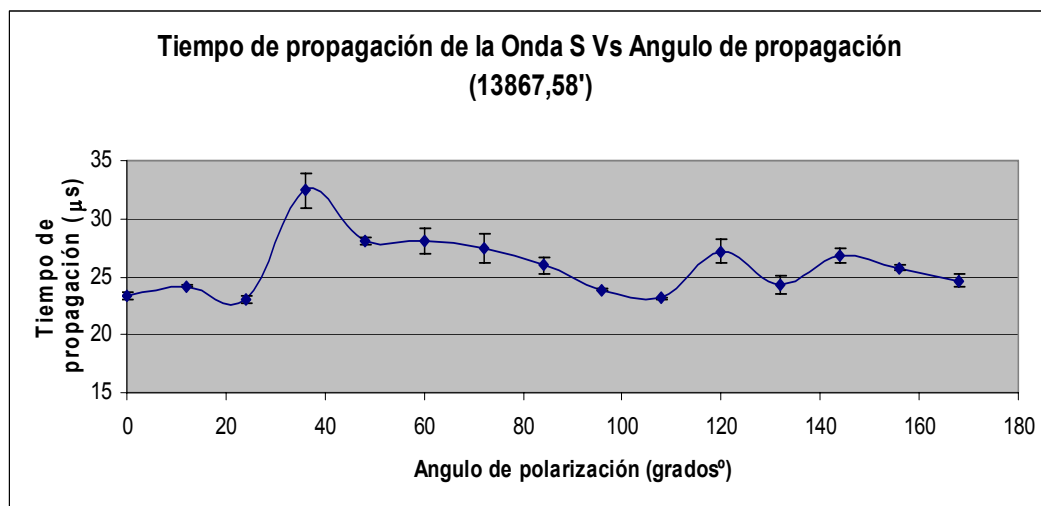


Figura 63. Curva del comportamiento del tiempo de propagación de la onda S polarizada cada 30° haciendo un barrido de 0° a 90°. Como se observa en la Tabla 15 la dirección de mayor anisotropía se presenta a los 0° y 90° (mayor diferencia de tiempos, perpendiculares entre sí).

Luego de encontrar la dirección de mayor anisotropía se procedió a calcular la anisotropía de la onda S. Los datos de anisotropía obtenidos se extrapolaron a la curva generada de la relación de la anisotropía S y la densidad de microfracturas a partir de los *plugs* sintéticos, obteniendo las densidades de microfracturas que se muestran en la Tabla 16. Estas densidades se compararon con un estimativo de “intensidad de fractura”, determinado visualmente por Yacimientos Naturalmente Fracturados ICP, 2005, a partir de la descripción de corazones y está definida como el número de fracturas por pie.

Tabla 16. Densidad de microfracturas de los *plugs* de la Formación Mirador, a partir de la anisotropía de la onda S (γ), comparados con la intensidad de fracturamiento (dato obtenido de (ORTIZ, 2006). Los datos sombreados indican concordancia entre la anisotropía y la intensidad de fracturamiento.

Profundidad <i>plug</i> (pies)	Anisotropía de la onda S (γ)	Densidad De Microfracturas a partir de γ (%)	Intensidad de fracturamiento
14090.50 Buca 2	0,06 ± 0,002	0,71	0
12610.58 Buca 1	0,18 ± 0,006	2,32	0,3
12501.54 Buca 1	0,23 ± 0,016	2,91	0,4
12843.25 Buca 1	0,29 ± 0,016	4,28	0,6
12654.83 Buca 3	0,38 ± 0,004	4,21	0,6
13867.58 Buca 2	0,43 ± 0,011	5,65	1,7
12654.67 Buca 3	0,21 ± 0,010	2,72	0,6
12655.04 Buca 3	0,23 ± 0,009	2,94	0,6
12843.42 Buca 1	0,63 ± 0,018	8,33	0,6

De acuerdo con los resultados de la densidad de microfracturas a partir de la anisotropía de la onda S comparada con la intensidad de fracturamiento se observó una relación en algunos de los datos presentados (datos sombreados, Tabla 16). De acuerdo con el dato de intensidad de fracturamiento con el cual se comparó la metodología de este trabajo, se determinaron intervalos de densidad de microfracturamiento. De los nueve datos de densidad de microfracturas obtenidas, seis de ellos tienen una tendencia, es decir, donde se presentan los valores más bajos de intensidad de fracturamiento están los valores de densidad de microfracturas menores. A medida que aumenta

la intensidad de fracturamiento también aumenta la densidad de microfracturamiento. Tal es el caso del primer dato (profundidad 14090.50') el cual mostró la menor densidad de microfracturas (0.71%) y corresponde con la intensidad de fracturamiento cero. El siguiente dato corresponde a la densidad de microfractura de 2.32% y a una intensidad de fracturamiento de 0.3. El tercer dato correspondiente al *plug* de profundidad 12501.54' tiene una intensidad de fracturamiento de 0.4 y la densidad de microfracturamiento calculada fue de 2.91%. Para una intensidad de fracturamiento de 0.6 la densidad de microfracturas calculada varió entre 4.28% y 4.21%. Para el máximo de intensidad de fracturamiento, la cual fue de 1.7, la densidad de fracturas fue de 5.65%.

En los datos restantes (valores no sombreados de la Tabla 16) no se presenta esta relación, ya que la intensidad de fracturamiento es de 0.6 y la densidad de microfracturas osciló entre el 2.72% y el 2.94%. Además, en el *plug* de profundidad 12843.42 se presentó el máximo valor de densidad de microfracturas 8.33%, valor que está fuera del rango de la metodología de este trabajo.

La densidad de microfracturas también se determinó a partir de la curva generada entre la relación de la diferencia de tiempos (S1b-S1a) vs. la densidad de microfracturas. En los resultados de las medidas sobre los *plugs* sintéticos se mostró una curva la cual relaciona la densidad de microfracturas con la diferencia de tiempo (Figura 47). En la Tabla 17 se muestran los resultados obtenidos de la densidad de microfracturas a partir de esta relación en los *plugs* de la formación Mirador. Al igual que en la determinación de la densidad de microfracturas a partir del parámetro anisótropo γ , se comparó dicho dato con la información de intensidad de fracturamiento, de manera que se tomaron intervalos de densidad de microfracturamiento. A diferencia de los datos a partir de γ , con los Δt , siete de los nueve datos presentan una tendencia aceptable, donde los valores de menor valor de intensidad de fracturamiento

coinciden con los datos mas bajos de densidad de microfracturamiento. En este caso, donde la intensidad de fracturamiento es cero, la densidad de microfracturamiento es del 0.45%. En el *plug* 12610.58' la densidad de microfracturas es del 1.22%. En cuatro *plugs* donde la intensidad de fracturamiento es de 0.6, la densidad de microfracturas coincidió para todos en el intervalo de 2.3% a 2.68%. Para el valor de máxima intensidad de fracturamiento, la cual es 1.7, la densidad hallada es del 3.6%. Con la curva de diferencia de tiempos, dos de los núcleos no coinciden según la tendencia mostrada en los demás.

Tabla 17. Densidad de microfracturas de los plugs de la Formación Mirador, a partir de la diferencia de los tiempos de propagación (S1b-S1a), comparados con la intensidad de fracturamiento (dato obtenido de ORTIZ; 2005).

Profundidad plug (pies)	Δt Onda S1-S2 (μs)	Densidad De Microfracturas (%) a partir de Δt Onda S1-S2	Intensidad de fracturamiento
14090.50 Buca 2	$1,8E \pm 0,002$	0,45	0
12610.58 Buca 1	$3,3 \pm 0,006$	1,22	0,3
12843.25 Buca 1	$5,5 \pm 0.006$	2,30	0,6
12654.67 Buca 3	$5,2 \pm 0.115$	2,15	0,6
12654.83 Buca 3	$5,8 \pm 0.115$	2,45	0,6
12655.04 Buca 3	$6,3 \pm 0.002$	2,68	0,6
13867.58 Buca 2	$8,1 \pm 0.115$	3,60	1,7
12501.54 Buca 1	$7,0 \pm 0.230$	3,05	0,4
12843.42 Buca 1	$7,6 \pm 0.115$	3,35	0,6

8. CONCLUSIONES

La metodología empleada con los *plugs* sintéticos demuestra que la anisotropía esta relacionada directamente con la densidad de microfracturas paralelas y verticales y es posible determinar una relación entre estas dos. El comportamiento obtenido es que a medida que se aumenta la densidad de microfracturas (inclusiones) aumenta la anisotropía de la onda S.

Esta metodología presenta algunas limitaciones, la anisotropía de la roca debe ser causada por microfracturas con una orientación preferencial, donde este microfracturamiento no supere el 5%, es decir que la roca no alcance su comportamiento crítico (expuesto en los trabajos de Crampin), además las dimensiones de las muestras de *plugs* son de aproximadamente 3.8 cm de diámetro por 7 cm de longitud.

La metodología no tuvo éxito con los *plugs* a los cuales se les disolvieron las láminas de aluminio, posiblemente porque las rocas se dañaron, aunque macroscópicamente no se observó si pudo afectarse la estructura del epóxico, por esta razón las curvas obtenidas en estos ensayos no se utilizaron.

De las nueve muestras analizadas aplicando el método de anisotropía de la onda S seis muestras se pueden relacionar con la intensidad de fracturamiento (estimación visual); del análisis con la diferencia de tiempos de la onda S siete se relacionan con la intensidad de fracturamiento, de acuerdo a esto es necesario realizar un mayor número de pruebas para tener más datos y así obtener un resultado seguro.

El comportamiento de la curva de anisotropía con el método de polarización de la onda S en los *plugs* de la formación Mirador no es como el hipotético, esto puede presentarse debido a que las

microfracturas posiblemente no sean el único factor que esté generando anisotropía y pueden estar influyendo factores diagenéticos, cementación diferencial, tipo de cemento, mal sorteado, disposición y forma de los granos, laminación, contenido fósil, contenido de arcilla, venas rellenas, recristalización, microfracturas orientadas en diferentes direcciones, presencia de Stylolitos entre otros.

9. RECOMENDACIONES

Para validar la metodología es necesario realizar más pruebas, especialmente sobre la Formación Mirador y de esta manera se pueda minimizar la incertidumbre de los resultados.

Se deben realizar núcleos de roca sintéticos en donde se manipule los parámetros de fractura variando el tamaño, la forma y la orientación de esta para comprender de una mejor manera los fenómenos que ocurren en estos medios.

Después de aplicar la metodología a las muestras reales y determinar la densidad de microfracturas, realizar al plug un número considerable de secciones delgadas de manera que se abarque un volumen representativo de datos, comparando dichos datos con el obtenido de la anisotropía.

Realizar las pruebas acústicas en pruebas dinámicas aplicando esfuerzos a la roca.

Estudiar las teorías físico-matemáticas de los métodos, revisar Hudson, Crampin y Thomsen.

Jugar con valores de densidad de inclusiones (Zn, Fe, Cerámicos, entre otros).

REFERENCIAS

1. Leon Thomsen, Entendimiento de la Anisotropía Sísmica en Exploración y Explotación, Boletín AMGE, Volumen 41 N° 4, Diciembre 2002.
2. Valera L. Luz C. y Galvis C. Jorge L. Diseño De Un Pulsador Para La Medición De Velocidades Acústicas En Medios Porosos Y Obtención De Propiedades Dinámicas, Informe de Avance N°1 Grupo de Estabilidad de Pozos, 21 de Agosto de 2004
3. K. Pachano. H. Altamar. M. Duarte. C. Piedrahita. T. Salinas. Z. Calderón. Propagación de Ondas en Medios Efectivos - Mediciones en Modelos a Escala, Asociación Colombiana De Ingenieros De Petróleos (ACIPET), Octubre 2005.
4. Chichinina Tatiana, Conferencia, Asistencia técnica en la aplicación de propagación de ondas en medios anisótropos y en la detección de fracturas; Instituto Colombiano del Petróleo de ECOPETROL S.A, 12-16 de septiembre 2005
5. Brian Rex, Bill Goodway, Cathy Martin, Gordon Uswak, The Impact of Azimuthal Anisotropy on Seismic AVO and Petrophysical Response in a Fractured Wabamun Gas Reservoir, 2003
6. Ruger, A., 1996, Variations of P-wave reflectivity with offset and azimuth in anisotropic media: *Geophysics* 63, 935-947
7. Thomsen, L., 1986, Weak elastic anisotropy: *Geophysics* 51, 1954-1966
8. Phil Armstrong, Dick Ireson, Hill Chmela, Kevin Dodds, et al, The Promise of Elastic Anisotropy, *Oilfield Review*, Octubre 1994.
9. Hudson, J. A.: "Overall properties of a cracked solid", *Math. Proc. Camb. Phil. Soc.*, 88, 371-384, 1980.
10. Michael Schonberg and Colin M. Sayers. Seismic anisotropy of fractured rock. *Geophysics* Vol. 6 N° 1, Enero-Febrero, 1995, Pag 204-211.
11. María Teresa Cortés M. / Pablo Ortiz H.; Corrosión; Hipótesis / Apuntes Científicos Uniandinos No. 4 / Dic. 2004,

12. Cúpich Rodríguez Miguel, Elizondo Garza Fernando J., Actuadores Piezoeléctricos, Ingenierías, Enero-Marzo 2000, Vol. III, No.6
13. Piezoelectric Flexure Elements, <http://www.sensortech.ca/flexure.html>, Sensor Technology Ltd., Canada, 1999.
14. PZT & Piezo Actuator, <http://www.physikinstrumente.com/produkte.html>, PI, Alemania, 1999.
15. Stuart Camprin, Shear-Wave Splitting in a Critical Crust: The Next Step, University of Edinburgh, Department of Geology and Geophysics, Grant Institute, West Mains Road, Revue de l'institut Francais Du Petrole, Vol. 53, N°5, Septiembre-Octobre 1998.
16. Jamal M. Ass'ad, Robert H. Tatham, and John A. McDonald, A Physical Model Study of Microcracks-induced anisotropy, Geophysics Vol 57, N°12, Diciembre 1992, P. 1562-1570.
17. Jaswant Singh Rathore, Erling Fjaer, Rune Martin Holt, and Lasse Renlie, Experimental versus Theoretical Acoustic Anisotropy in Controlled Cracked Synthetics, Mini-Workshop, Continental Shelf and Petroleum Technology Research Institute (IKU), Norway.
18. Marta Elena Becerra R. Maria Theresa Parra. Xavier Goddyn, DSI & DUAL OBMI * Interpretation Report, Schlumberger, August 2005
19. Roberto Linares P. Claudia Posada. Modelamiento estructura en zonas complejas del piedemonte, Instituto Colombiano Del Petróleo División De Exploración Área Geología Estructural, 2002.
20. Martínez J. A., Modelamiento Estructural 3D y Aplicaciones en la Exploración y Explotación de Hidrocarburos en el Cinturón de Cabalgamiento del Piedemonte Llanero, Cordillera Oriental, Colombia. VIII Simposio Bolivariano - Exploración Petrolera en las Cuencas Subandinas. Año 2003
21. Rojas L. E. Interpretación Estructural Piedemonte Central Cuenca de los Llanos Orientales, ECOPETROL, Mayo de 2002.
22. Claudia R. Posada S. Roberto Linares. Andres Fajardo. Rafael Quintero. Raul Osorio. Evaluación Integrada de Yacimientos del Campo Cupiagua ECOPETROL ICP, 2001.

23. Gary Mavko, Tapan Mukerji y Jack Dvorkin, The Rocks Physics Handbook, Tools for seismic analisis in porous media. Cambridge University Press, 2003,