

**CARACTERIZACIÓN DE LA INTENSIDAD DE FRACTURAMIENTO
EN INTERVALOS CORAZONADOS DE LAS FORMACIONES
BARCO Y GUADALUPE EN EL PIEDEMONTE DE LOS LLANOS
ORIENTALES, COLOMBIA**

EDWAR HERNANDO HERRERA OTERO

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOQUIMICAS
ESCUELA DE GEOLOGIA
BUCARAMANGA**

2005

**CARACTERIZACIÓN DE LA INTENSIDAD DE FRACTURAMIENTO
EN INTERVALOS CORAZONADOS DE LAS FORMACIONES
BARCO Y GUADALUPE EN EL PIEDEMONTE DE LOS LLANOS
ORIENTALES, COLOMBIA**

EDWAR HERNANDO HERRERA OTERO

**Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar el título de
Geólogo.**

Director

CARLOS ALBERTO RIOS

Geólogo Msc.

Codirector

ALBERTO ORTIZ FERNADEZ

Geólogo Msc.

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOQUIMICAS
ESCUELA DE GEOLOGIA
BUCARAMANGA**

2005

DEDICATORIA

A *Dios* por haberme brindado la fortaleza para salir adelante junto con mi familia y conseguir esta primera meta en mi vida.

A mi madre *Esperanza* quien con su esfuerzo y dedicación logro encaminarme por el camino del éxito profesional.

A mi gran amor mi esposa *Mabel* quien con su amor y cariño me apoyo durante todo este tiempo.

A la inspiración de mi vida, mi hija *Claudia Marcela* quien es la razón por la cual vivo y por la cual miro siempre el mañana con gran optimismo y dedicación.

A mi tío *Hernando* quien fue la persona encarga de abrirme los ojos ante un mundo lleno de profesionalismo y conocimiento.

A los abuelos más queridos *Jesús* y *Leo* quienes me brindaron su cariño y con quienes he compartido verdaderos ratos alegres.

A toda mi familia por estar siempre a mi lado brindándome su calor de hogar y a todos mis amigos que de una u otra manera se convirtieron en apoyo permanente durante esta etapa de mi vida.

Edwar Herrera Otero

AGRADECIMIENTOS

El autor expresa sus agradecimientos a:

Al geólogo Msc Alberto Ortiz Fernández por su supervisión y guía en el desarrollo de este proyecto; sus aportes producto de su conocimiento y experiencia ayudaron a que este trabajo llegara a buen termino.

Al geólogo Msc. Carlos Alberto Ríos por su supervisión a lo largo del desarrollo de este trabajo. Su visión de aplicación del conocimiento geológico en temas complejos sirvió a que este proyecto tenga un buen alcance en la industria.

Al ingeniero Msc. Nicolás Santos Santos, quien me dio la oportunidad de realizar el proyecto bajo el marco global del convenio llevado por la universidad.

Al geólogo Edgar Ramiro Pineda quien compartió de manera sincera su amplio conocimiento en sedimentología.

Al Grupo de Modelamiento de Hidrocarburos y al ICP por haberme brindado la oportunidad de realizar este proyecto bajo el marco de los convenios firmados entre estas dos entidades.

A Edwin Pineda, Oscar Carrillo, Oscar Arenas, Sergio Nuncira, Herley Trujillo, Ahamelth Hernández y Cesar Pineda con quienes compartí momentos muy valiosos y quienes me apoyaron y colaboraron durante la realización del proyecto.

CONTENIDO

OBJETIVOS	18
1 GENERALIDADES DEL PIEDEMONTE LLANERO.....	19
1.1 LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA	19
1.2 GEOLOGÍA GENERAL.....	20
1.3 ESTRUCTURA DEL CAMPO DE ESTUDIO	21
1.4 ESTRATIGRAFÍA REGIONAL.....	24
1.4.1 Estratigrafía y Ambiente de depósito de la formación Guadalupe	26
1.4.2 Estratigrafía y Ambiente de depósito de la formación Barco	27
1.4.3 Estratigrafía y Ambiente de depósito de la formación Los Cuervos	27
1.4.4 Estratigrafía y Ambiente de depósito de la formación Mirador.....	28
2 FUNDAMENTACIÓN TEORICA	29
2.1 DESCRIPCIÓN SEDIMENTOLÓGICA	29
2.2 FACIES Y AMBIENTES DE DEPOSITACIÓN.....	31
2.3 ASPECTOS DE LA CARACTERIZACIÓN DE LOS YACIMIENTOS NATURALMENTE FRACTURADOS	34
2.3.1 Génesis de las Fracturas.	35
2.3.2. Tipo de fracturas según su naturaleza.....	37
2.3.3 Morfología de las Fracturas.....	38
3 METODOLOGÍA.....	41
3.1 Descripción de Corazones	41
3.1.1 Descripción sedimentológica de los corazones pertenecientes a las formaciones Barco y Guadalupe.	41
3.1.2 Descripción de la disposición, tipo y características más importantes de las macrofracturas presentes en los corazones pertenecientes a las formaciones Barco y Guadalupe.	43
3.2 ANÁLISIS PETROGRÁFICO Y MICROFLUORESCENCIA.....	51
3.3 ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	52
4 RESULTADOS	54
4.1 DESCRIPCIÓN SEDIMENTOLOGICA	54
4.1.1. Formación Guadalupe	54
4.1.2. Formación Barco	63

4.2	DETERMINACIÓN DE LA DISPOSICIÓN, TIPO Y CARACTERÍSTICAS MÁS IMPORTANTES DE LAS FRACTURAS ENCONTRADAS EN LOS NÚCLEOS ANALIZADOS.....	65
4.2.1.	Caracterización de las fracturas para la formación Guadalupe.....	66
4.2.2.	Caracterización de las fracturas para la formación Barco.	69
4.3	CARACTERIZACIÓN DE LA INTENSIDAD DE FRACTURAMIENTO VS FACIES ENCONTRADAS EN LOS NÚCLEOS.	73
4.3.1	Intensidad de fracturamiento vs Facies en la Formación Guadalupe.....	74
4.3.2	Caracterización de la intensidad de fracturamiento vs facies. Formación Barco.....	79
4.4	ANÁLISIS PETROGRÁFICO	84
4.4.1	Análisis petrográfico sección 1 (Formación Barco).	84
4.4.2	Análisis petrográfico sección 2 (Formación Barco).	87
4.4.3	Análisis petrográfico sección 3 (Formación Guadalupe).....	89
4.5	ANÁLISIS DE MICROFLUORESCENCIA	91
4.5.1	Análisis de microfluorescencia, sección 1 formación Barco.	91
4.5.2	Análisis de microfluorescencia sección 2, formación Barco.	96
4.5.3	Análisis de microfluorescencia sección 3. Formación Guadalupe.	98
5	CONCLUSIONES.....	103
6	RECOMENDACIONES.....	105
	BIBLIOGRAFIA.....	107

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de localización del Piedemonte Llanero (MARTINEZ, 2003).....	19
Figura 2. Ubicación del Campo de estudio. (BP, Well Review, 2001).....	20
Figura 3. Ubicación del campo desur y campos adyacentes. (MARTINEZ, 2003)	22
Figura 4. Sección estructural esquemática representando los diferentes estilos estructurales del Piedemonte Llanero. (MARTINEZ, 2003)	23
Figura 5. Columna Estratigráfica Generalizada del Piedemonte Llanero. (ECOPETROL-ICP, 2001).	26
Figura 6. Diagrama triangular para la clasificación textural, particularmente tamaño de grano, de las rocas siliciclásticas o terrígenas, tomado de Folk 1974.....	29
Figura 7. Forma de las partículas con base en el concepto de esfericidad o la uniformidad de los ejes mayor, intermedio y menor. Perpendiculares entre sí. Modificado de Friedman 1987.	30
Figura 8. Imágenes de calibrado de las partículas Pettijhon, en Boggs, Jr. 1987.	31
Figura 9. Tipos fábrica presente en los sedimentos y en las rocas sedimentarias.....	31
Figura 10. Diagrama en el cual se ilustran el conjunto de estructuras y estructuras sedimentarias relacionadas a cada ambiente de depositación, en la plataforma marina, (Modificado de HG Reading).	33
Figura 11. Diagrama sinóptico ilustrando un conjunto de ichnofacies marinas recurrente en un juego de gradientes ambientales. (Modificado por Frey y Pemberton, 1985).	34
Figura 12. A la izquierda la representación grafica de la cizalladura; a la derecha la representación de los esfuerzos sobre la muestra. (Tomado de Gildardo Osorio 2004).	35
Figura 13. A la izquierda la representación grafica de direccion de fractura; a la derecha la representación de los esfuerzos sobre la muestra. (Tomado de Gildardo Osorio 2004)	36
Figura 14. A la izquierda la representación grafica de direccion de fractura de tensión; a la derecha la representación de los esfuerzos sobre la muestra. (Tomado de Gildardo Osorio 2004)	37
Figura 15 Formato de descripción sedimentológica de los intervalos corazonados.	42
Figura 16. Formato de descripción de fracturas.....	44
Figura 17. Fotografía de núcleos, identificación de los diferentes tipos de fracturas.	46
Figura 18 Clasificación de los tipos de fracturas en núcleos (basado en Kulander, 1990)	47
Figura 19 Analogía fallas vs. Fracturas teniendo en cuenta el movimiento relativo de los bloques de techo y piso. Tomado de gmph.	49
Figura 20. Sistema de referencia donde se indica cómo se tomó el norte con respecto al corte del núcleo	51
Figura 21 Diagrama de roseta generado mediante Georient.....	53
Figura 22. Cuarzoarenita con alto grado de impregnación de hidrocarburos y con relictos de estratificación cruzada.(Facies Abre).....	55

Figura 23 Arcillolita-Limolita con láminas de carzoarenita de grano muy fino. (Facies Fl)	56
Figura 24. Cuarzoarenita de grano muy fina con madrigueras y biturbación no diferenciada. (Facies Ab).	57
Figura 25. Conglomerado Arenoso de composición Oligomítica con clastos arcillolíticos. (Facies Cmo).	58
Figura 26. Arcillolita-Limolita con relictos de laminacion y bioturbación no diferenciada. (Facies Fbri).	59
Figura 27. Bloque diagrama del ambiente de depositación del intervalo corazonado de la Formación Guadalupe. Modificado de Langhorne B., and Christopher G. (2003).	60
Figura 28. Columna estratigráfica para el intervalo corazonado de la formación Guadalupe en el pozo I.	62
Figura 29. Bloque diagrama del ambiente de depositación para la formación Barco.	65
Figura 30. Porcentajes de tipo de fracturas en la formación Guadalupe.	66
Figura 31. Tipos de esfuerzos que generan las fracturas en el intervalo corazonado de la formación Guadalupe.	67
Figura 32. Distribución del tipo de Apertura para las fracturas caracterizadas en la Fm Guadalupe. Pozo I.	68
Figura 33. Distribución de los tipos de perfil de las fracturas en la formación Guadalupe.	68
Figura 34. Distribución de los tipos de morfología de las paredes de las fracturas de la formación Guadalupe.	69
Figura 35. Distribución de los porcentajes de los diferentes tipos de fracturas en la formación Barco.	70
Figura 36. Distribución de los diferentes tipos de esfuerzos para la formación barco.	71
Figura 37. Distribución de la variación de la apertura en las fracturas de la formación barco.	71
Figura 38. Distribución de los tipos de perfil de las fracturas en la formación Barco. Pozo H 11.	72
Figura 39. Distribución de los tipos de morfología de las paredes de las fracturas de la formación Barco.	73
Figura 40. Variación de los diferentes tipos de facies de la formación Guadalupe.	75
Figura 41. Ocurrencia de fracturas en profundidad. Formación Guadalupe.	76
Figura 42. Intensidad de fracturamiento vs facies en profundidad.	77
Figura 43. Intensidad de fracturamiento vs facies, formación Guadalupe.	78
Figura 44. Variación de los diferentes tipos de facies de la formación Barco.	79
Figura 45. Ocurrencia de fracturas en profundidad. Formación Barco.	80
Figura 46. Intensidad de fracturamiento vs facies en profundiad. Formacion Barco	82
Figura 47. Intensidad de fracturamiento vs facies, formación Barco.	83
Figura 48. Fotografía de la sección 1. Se observa la porosidad primaria y secundaria en la roca en PPL, aumento 8X.	85
Figura 49. (der) textura de la roca en XPL, aumento 8X ; (Izq) Porosidad primaria de la roca en PPL, aumento 8X.	86
Figura 50. Fotografía en el cual se ilustra la porosidad primaria de la roca, así como fenómenos de sobrecrecimiento sobre granos detríticos de cuarzo, indicados por flechas, aumento 20X, en PPL.	87

Figura 51, (Izq) fragmentos de cuarzo policristalino en XPL, aumento 8X; (Der) solución por presión y contactos suturados entre granos de cuarzo, indicados por flechas, en XPL, aumento 8X.	88
Figura 52. (a) y (b) morfologías de las estructuras de los pellets fosfáticos en PPL, aumento 8X y 20X, respectivamente, (c) y (d) colofana a lo largo del contacto entre granos de cuarzo, aumento 8X y 20X, respectivamente.....	90
Figura 53. Fotografía de zona de acumulación de material fino arrancado de las paredes de las fracturas.	92
Figura 54. Mosaico de fotografías donde se ilustran las Microfracturas presentes de color rojo. Y las dos líneas blancas corresponden a los dos scanelines tomados a lo largo de la sección 1.....	93
Figura 55. Apertura de las fracturas en micras. Scaneline Subhorizontal de la sección 1...	94
Figura 56. Intensidad de fracturamiento presenta en la sección 1	95
Figura 57. Apertura de las fracturas en micras. Scaneline Subvertical de la sección 1.....	95
Figura 58. Diagrama rosa para las fracturas presentes en la sección 1.....	96
Figura 59. Apertura en micras de las fracturas en la seccion 2. Formación barco.....	97
Figura 60. Diagrama de rosetas para las fracturas presentes en la sección, formación Barco.	97
Figura 61. Fotografía de pelles fosfáticos con alto fracturamiento. Objetivo 10X.....	98
Figura 62. Scaneline inclinado cortando de manera perpendicular las fracturas presentes en la sección 3.....	99
Figura 63. Apertura en micras de las fracturas presentes en la sección 3.....	100
Figura 64. Diagrama rosa para las fracturas presentes en la sección 3, formación Guadalupe.	100
Figura 65. Intensidad de fracturamiento vs. facies presentes en las secciones delgadas...	102

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Nomenclatura utilizada en la descripción de las fracturas.....	45
Tabla 2. Nomenclatura y colores utilizados en la caracterización de fracturas.	46
Tabla 3. Valores de intensidad de fracturamiento en profundidad para las facies de la formación Guadalupe.....	77
Tabla 4. Espesor total de cada facie y su índice de fracturamiento para la formación Guadalupe.	78
Tabla 5. Intensidad de fracturamiento vs facies en profundidad. Formación Barco.....	81
Tabla 6. Espesor total de cada facie y su índice de fracturamiento para la formación Barco.	83

LISTA DE ANEXOS

Anexo 1. Columna estratigráfica detallada de los intervalos corazonados de las formaciones Barco y Guadalupe para el pozo I.

Anexo 2. Póster de Microfracturamiento de las secciones preparadas para el presente estudio.

RESUMEN

TITULO: CARACTERIZACIÓN DE LA INTENSIDAD DE FRACTURAMIENTO EN INTERVALOS CORAZONADOS DE LAS FORMACIONES BARCO Y GUADALUPE EN EL PIEDEMONTE DE LOS LLANOS ORIENTALES, COLOMBIA

AUTOR: EDWAR HERNANDO HERRERA OTERO

PALABRAS CLAVES: Sedimentológico, Estratigráfico, Terciario, Microfluorescencia, Microfracturas, Macrofracturas, Shoreface, Intensidad de Fracturamiento, Facies.

DESCRIPCION

El presente trabajo tiene como objetivo fundamental caracterizar la intensidad de fracturamiento a partir de un estudio sedimentológico y estratigráfico de las formaciones Guadalupe y Barco pertenecientes al periodo Cretácico superior, Paleógeno inferior respectivamente, en el Pozo 1 de un campo ubicado en el departamento de Casanare, considerada un área tectónicamente compleja. Para ello se realizó el análisis macroscópico de 314 pies de núcleo, esto por considerarse una herramienta directa de estudio de fracturas. Adicional a ello se realizó el análisis petrográfico y de microfluorescencia de tres secciones delgadas, esto con la finalidad de determinar la presencia de microfracturas, caracterizar los cementos presentes que modifican y destruyen la porosidad de la roca y la calidad general de las fracturas.

El análisis sedimentológico y estratigráfico de los corazones permitió identificar varios intervalos arenosos depositados en ambientes transicional a marino somero para la Formación Guadalupe, con depósitos de areniscas de "shoreface" y de lodolitas de plataforma somera, y continental y de planicie costera para la Formación Barco, con depósitos de canales, depósitos de areniscas progradantes en llanuras costeras o estuarios y/o depósitos de lodolitas de llanura costera y/o bahías.

El análisis petrográfico permitió caracterizar las fracturas en base a su grado de apertura, cantidad de cemento autigénico y tipo de perfil. Se observaron fracturas totalmente abiertas y con medidas de apertura variables, con alto grado de microfracturamiento en los granos de cuarzo a medida que se reducían los valores en la apertura. Se pudo determinar que la ocurrencia de las fracturas depende principalmente de las características de la roca y del grado de esfuerzo. Las direcciones aparentes que presentaron las microfracturas en las secciones de las formaciones de estudio, concuerdan muy bien con las direcciones aparentes observadas en la descripción de las fracturas macro presentes en los intervalos corazonados para estas dos formaciones, lo que permite afirmar que se puede realizar un escalamiento de lo micro a lo macro pretendiendo encontrar una relación entre las dos escalas.

ABSTRACT

TITLE: CHARACTERIZATION OF THE FRACTURING'S INTENSITY IN CORED INTERVALS OF THE BARCO AND GUADALUPE FORMATIONS IN THE FOOT HILL OF THE ORIENTAL PLAINS, COLOMBIA

AUTHOR: EDWAR HERNANDO HERRERA OTERO

KEYWORDS: Sedimentologic, Stratigraphic, Tertiary, Microfluorescence, Microfractures, Macrofractures, Shoreface, Fracture Intensity, Facies.

DESCRIPTION

The present work has as fundamental objective to characterize the fracturing intensity starting from a sedimentologic and stratigraphic study of the Barco and Guadalupe formations belonging to the cycle Inferior Terciary in the Well 1 of a field located in the department of Casanare, considered tectonically as a complex area. For it one carries out the macroscopic analysis of 314 feet of nucleus, to be considered a direct tool of study of fractures together with a petrographic analysis on thin sections through the conventional petrography and microfluorescence, this with the purpose of determining the microfractures presence, to characterize the present cements that modify and destroy the porosity of the rock and the general quality of the fractures.

The sedimentologic and stratigraphic analysis of the cores allowed to identify several sandy intervals deposited in transitional ambients to shallow marine for the Guadalupe Formation, with deposits of gritty of "shoreface" and of lodolites of shallow platform, and continental and of coastal plain for the Barco Formation, with deposits of channels, deposits progradant arenaceous deposits in coastal plains or estuaries and/or deposits of lodolites of coastal plain and/or bays.

The petrographic analysis allowed to characterize the fractures based on its opening grade, quantity of autigenic cement and profile type. Completely open fractures were observed and with variable opening measures, with high microfracturing grade in the quartz grains as they decreased the values in the opening. It could determine that the occurrence of the fractures depends mainly on the characteristics of the rock and of the grade of effort. The apparent addresses that presented the microfractures in the sections of the study formations agree very well with the apparent addresses observed in the description of the present macro fractures in the cored intervals for these two formations, what allows to affirm that it can be carried out a scaling from the micro to the macro seeking to find a relationship among the two scales.

INTRODUCCION

En el estudio de yacimientos altamente heterogéneos como lo son los ***Yacimientos Naturalmente Fracturados*** (YNF) es de vital importancia conocer los rasgos faciales de las rocas que conforman las diferentes formaciones en profundidad a partir de su estudio estratigráfico y sedimentológico, siendo el análisis de los corazones una manera directa y precisa de obtener información con relación a las propiedades físicas y químicas de las rocas. En la industria del petróleo es común encontrar en los diferentes pozos muestras del subsuelo representadas en los corazones, los cuales generalmente forman parte de los intervalos de mayor interés de las entidades que en el momento se encuentran explorando los diferentes campos petrolíferos.

La caracterización de fracturas en yacimientos de hidrocarburos es un asunto de creciente interés en la industria del petróleo debido a su alto impacto económico. La determinación de parámetros tales como distribución, dirección, intensidad y contenido de las fracturas en un yacimiento es de gran importancia en la optimización de la producción en campos existentes. En el presente trabajo se aplica una metodología para la caracterización de la intensidad de fracturamiento a partir del análisis de corazones, obteniendo información sobre la orientación aparente de las fracturas y del tipo de esfuerzo que generó dichas fracturas, así como sobre parámetros tales como la longitud, la morfología de la pared, la apertura y el perfil de las fracturas presentes.

En la industria del petróleo toda esta información es integrada para visualizar regiones de interés en cuanto al flujo y migración de fluidos en los diferentes tipos de rocas presentes en el subsuelo. Con ello se pueden identificar zonas con mayor fracturamiento, donde el aporte de fluidos no solo es de la matriz de la roca sino también de las fracturas, así como zonas de posible flujo. En casos puntuales para algunos campos es posible llegar a realizar el modelo estático de fracturas

así como el modelo dinámico, para poder comprender el comportamiento de los hidrocarburos en los campos petrolíferos y realizar una predicción de su producción.

En el Pozo 1 del campo petrolero localizado en el piedemonte llanero, no se cuenta con la descripción de los diferentes tipos de facies presentes en los pies corazonados pertenecientes a las formaciones Barco y Guadalupe. Por esta razón, es necesario llevar a cabo la interpretación sedimentológica y estratigráfica de dicho intervalo, obteniendo de esta manera la interpretación de las diferentes facies presentes en las dos formaciones en mención.

Este campo petrolero ha sido afectado por eventos tectónicos que generan el fracturamiento de las rocas presentes en el subsuelo. Esto incide directamente no solo en la migración sino también en la producción de hidrocarburos en las facies reservorios de las formaciones Barco y Guadalupe. Por lo tanto, se hace explícitamente prioritaria la identificación clara de las fracturas o familias de fracturas que están afectando dichas facies. El estudio estratigráfico y sedimentológico detallado conjugado con el análisis estructural, con base en la orientación aparente y ocurrencia de las fracturas sobre las facies presentes en las formaciones arriba mencionadas, permite llegar a obtener una información integrada con la cual es posible establecer los diferentes tipos de facies presentes en los intervalos corazonados e identificar los tipos de fracturas que están afectando dichos intervalos, visualizando con claridad la intensidad de fracturamiento sobre los diferentes tipos de facies en profundidad y a su vez obtener información sobre la orientación arbitraria de las diferentes familias de fracturas.

Este trabajo esta encaminado a fortalecer y apoyar la investigación realizada por el Grupo de Modelamiento de Procesos Hidrocarburos en el tema de los yacimientos naturalmente fracturados, a partir de la caracterización de los materiales geológicos que conforman las formaciones productoras de

hidrocarburos y formaciones adyacentes, siendo fundamental para la optimización de la recuperación de hidrocarburos. Para tal fin, el Instituto Colombiano del Petróleo (ICP) cuenta con la tecnología para desarrollar investigación y prestar servicios en este campo, lo cual permite el desarrollo de investigación y tecnología específica para la industria petrolera, a fin de solucionar problemas del proceso de explotación que abarca desde la exploración, evaluación de yacimientos, perforación y terminación de pozos, hasta la producción y explotación avanzada. El ICP cuenta con capacidad instalada para la generación de información que sirve para alimentar diferentes modelos que permiten resolver diversos problemas como los asociados con estabilidad de pozos, avenamiento, fracturamiento hidráulico, compactación y subsidencia, entre otros, dentro de los procesos de la explotación del petróleo. De esta manera se lleva a cabo el modelamiento para simular y predecir el comportamiento de las formaciones, con el fin de interpretar y comprender los mecanismos de flujo-deformación, redistribución de esfuerzos y sus efectos en la producción de los yacimientos.

El proyecto se realiza bajo el marco del convenio 329 realizado por ICP – COLCIENCIAS – UIS, con el nombre de *“IMPACTO DEL MODELAMIENTO GEOLÓGICO Y SU RELACIÓN CON PARÁMETROS DE INGENIERÍA EN LA CARACTERIZACIÓN DE YACIMIENTOS ALTAMENTE HETEROGÉNEOS”*.

Este tipo de estudios contribuye al conocimiento del comportamiento de los hidrocarburos que circulan a través de las rocas reservorio en profundidad y a tener un mejor criterio a la hora de realizar estudios de caracterización de yacimientos altamente heterogéneos como lo son los YNF.

El objetivo general del presente estudio fue evaluar la relación de las facies sello y productoras de las formaciones Barco y Guadalupe con la intensidad de fracturamiento presente en ellas, para lo cual se plantearon los siguientes objetivos específicos: llevar a cabo el estudio sedimentológico y estratigráfico de las formaciones Barco y Guadalupe; realizar el análisis petrográfico de las facies encontradas en las dos formaciones a estudiar en este trabajo; determinar la

disposición, el tipo y las características más importantes de las macrofracturas presentes en los núcleos de perforación; determinar la disposición, el tipo y las características más importantes de las microfracturas encontradas en la secciones de los intervalos de mayor interés.

OBJETIVOS

General

- EVALUAR LA RELACIÓN DE LAS FACIES SELLO Y PRODUCTORAS DE LAS FORMACIONES BARCO Y GUADALUPE CON LA INTENSIDAD DE FRACTURAMIENTO PRESENTE EN ELLAS.

Específicos

- Obtener la descripción sedimentológica y estratigráfica de las formaciones Barco y Guadalupe.
- Realizar la descripción petrográfica de las facies encontradas en las dos formaciones
- Determinar la disposición, tipo y características más importantes de las macrofracturas.
- Determinar la disposición, tipo y características mas importantes de las microfracturas y realizar el escalamiento con las fracturas macro.

1 GENERALIDADES DEL PIEDEMONTE LLANERO. CAMPO DE ESTUDIO

1.1 LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA

El Piedemonte Llanero esta localizado en las estribaciones orientales de la Cordillera Oriental de Colombia, en la zona de cabalgamiento frontal entre las planicies poco deformadas de los Llanos Orientales y las montañas de alto relieve de la cordillera, (figura 1).

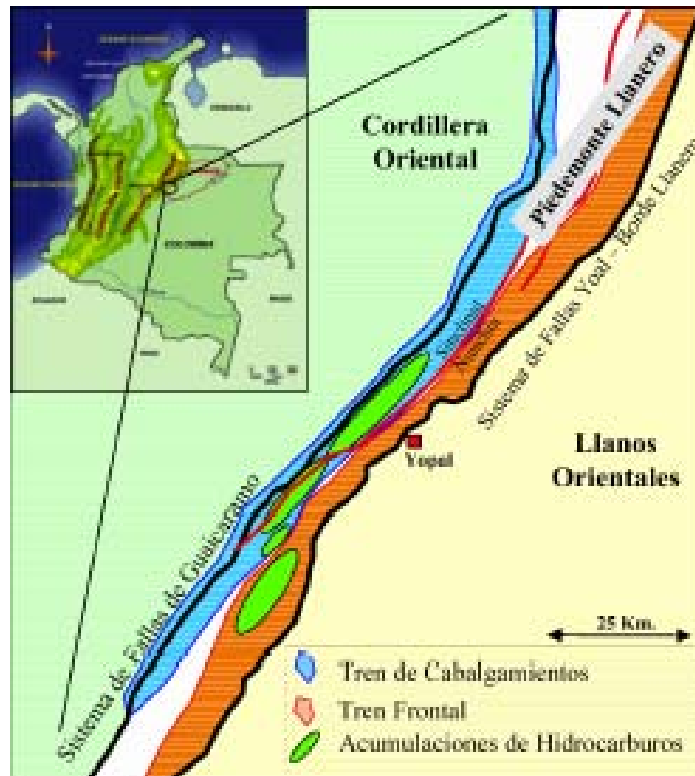


Figura 1. Mapa de localización del Piedemonte Llanero (MARTINEZ, 2003)

Esta estructura se orienta en dirección SO - NE y se extiende unos 100 kilómetros al norte y sur del pueblo de Yopal. La cuenca del piedemonte de los llanos orientales ha sido explorada desde 1988 por compañías petroleras del estado y

compañías multinacionales. La actividad exploratoria de este ambiente complejo ha derivado en el descubrimiento de varios campos con una gran variedad de fluidos (gas condensado muy pobre a petróleo volátil) en cuarzo arenitas muy apretadas.

El campo de estudio está ubicado en el sector oriental del Departamento de Casanare y límites con Boyacá, en la parte sur del tren del denominado Piedemonte Llanero Colombiano, (*figura 2*).

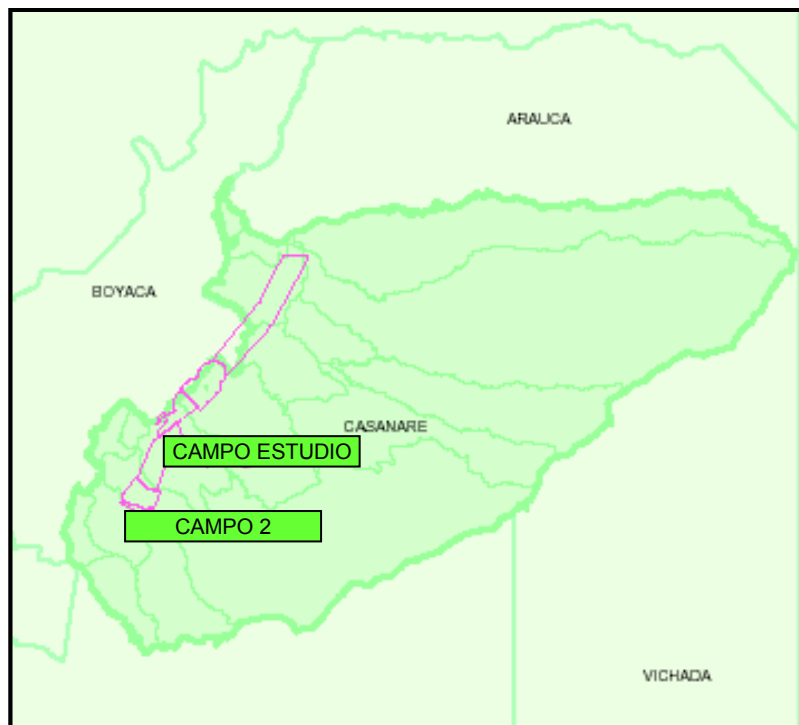


Figura 2. Ubicación del Campo de estudio. (BP, Well Review, 2001)

1.2 GEOLOGÍA GENERAL

La provincia compuesta por el Piedemonte de los Llanos Orientales esta limitada hacia el Oeste por el sistema de fallas de Guaicaramo y al Este por el sistema de fallas de Yopal – Borde Llanero. La principal estructura aflorante a lo largo de esta

franja central es el sinclinal de Nunchia que involucra rocas desde el oligoceno al reciente (formaciones Carbonera a Guayabo-Corneta).

En el bloque colgante de la falla de Guaicaramo afloran rocas desde el Cretáceo medio al Terciario. A nivel del subsuelo se destacan dos zonas principales de deformación como son el tren de estructuras frontales y el tren de estructuras en cabalgamientos, con características estructurales particulares, (*Ver figura 1*).

1.3 ESTRUCTURA DEL CAMPO DE ESTUDIO

En la cuenca del Piedemonte Llanero la complejidad estructural aumenta a medida que nos movemos de sur a norte.

La variación del estilo estructural a lo largo del Piedemonte central es en gran medida reflejo de la presencia de múltiples despegues y de la configuración del Basamento cristalino subyacente. La posición de estos despegues cambia de oeste a este ascendiendo estratigráficamente a medida que la deformación avanza, al igual que variando en la dirección de rumbo suroeste a noreste atravesando zonas de transferencia lateral. Para las estructuras en el bloque colgante del sistema Guaicaramo, el despegue se presenta en la formación Fόμεque, luego asciende a la formación Gacheta en la zona triangular de cabalgamientos y posteriormente la deformación se transfiere a niveles superiores en los miembros inferiores del grupo Carbonera para finalizar en el Carbonera superior y la formación León. Esta variación en la posición del despegue conlleva a la formación de estructuras tipo “duplex” o estacadas las cuales contienen diferente estratigrafía dependiendo de la posición del despegue inferior y superior y de su posición relativa en la cuenca. Por lo tanto a medida que el despegue asciende las estructuras involucran rocas cada vez más jóvenes lo que causa que en algunos sectores se encuentren zonas de apilados de hasta tres o cuatro laminas estructurales repitiendo las misma estratigrafía. Hacia el oeste y más

profundo se encuentra un sistema que contiene rocas del Cretáceo Medio y al este y más somero la estructuración es dentro del Grupo Carbonera.

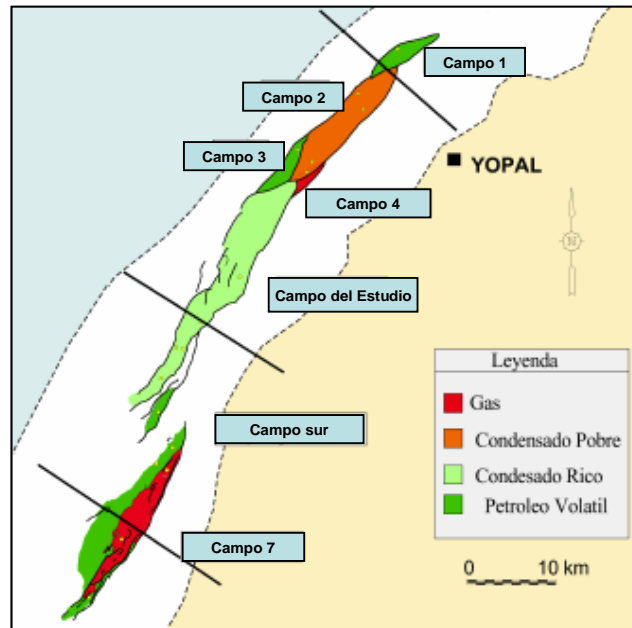


Figura 3. Ubicación del campo desur y campos adyacentes. (MARTINEZ, 2003)

En el mapa de la *figura 3* se muestran los diferentes campos presentes en la cuenca, y en cada uno de ellos se pasa un corte con dirección NW-SE, cada uno de estos cortes se puede ver en la *figura 4* en la cual se observa la variación estructural de las zonas, siendo Piedemonte la más norte y Campo 7 la más sur.

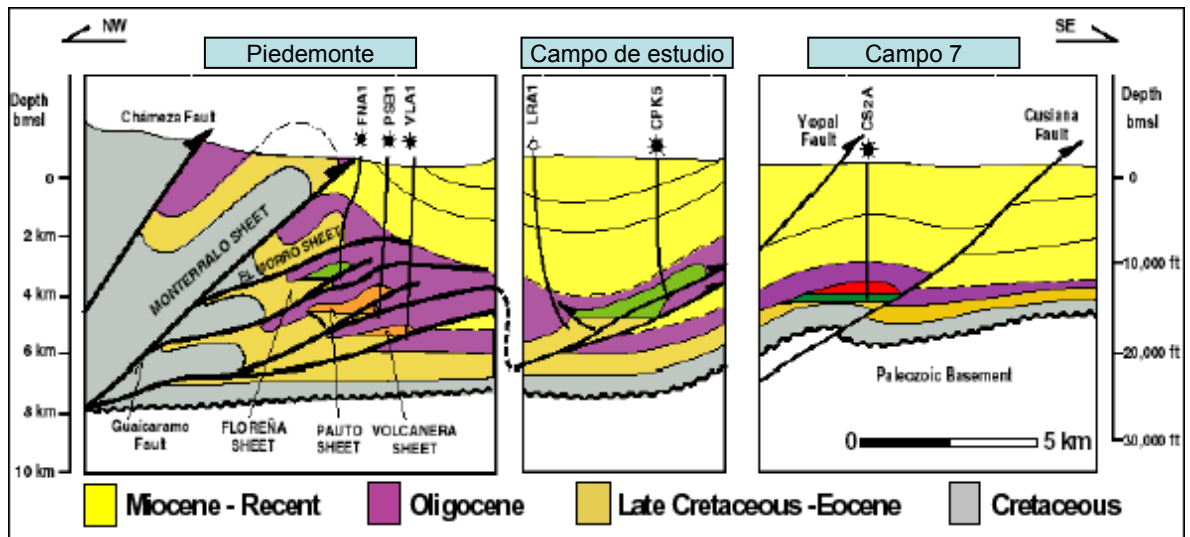


Figura 4. Sección estructural esquemática representando los diferentes estilos estructurales del Piedemonte Llanero. (MARTINEZ, 2003)

Ya ubicados en el zona del campo de estudio se puede ver, que en este sector y hacia el Este, la falla más sobresaliente es Yopal, esta falla tiene al menos un desplazamiento de 5 kilómetros de vergencia oriental y se interpreta como "en secuencia" con las fallas inversas que conforman las estructuras del campo. Este sistema de fallas que lucen como de escama delgada parecen tener su raíz más profunda en la falla de Guaicaramo que en este sector involucra rocas del pre-rift y se podría interpretar como de escama gruesa.

La geometría general del campo corresponde a un anticlinal asimétrico que se clasifica como un fault propagation fold. (ECOPETROL – ICP, 2001).

La estructura es menos compleja hacia el norte del campo, esta estructura está asociada al bloque levantado de un sistema de fallas de cabalgamiento denominadas informalmente falla Core y falla Frontal. Estas fallas tienen vergencia SE con despegue dentro de los niveles arcillosos de la Formación Gacheta. La profundidad del despegue de estas fallas es menor hacia el norte, generando así una rampa lateral a partir de esta posición, el limbo frontal de esta estructura anticlinal es invertido, la porción invertida se limita hacia el techo por la falla Core y hacia la base por la falla Frontal. El eje axial de la estructura es 45° en azimut,

similar a las estructuras interpretadas en superficie, con lo cual se infiere que son estructuras de edades similares. A lo largo del eje tiene una extensión aproximada de 30 kilómetros y un ancho entre 3 y 7 kilómetros. El límite occidental de la estructura lo constituye un retrocabalgamiento asociado probablemente a una falla más profunda que la Falla Frontal y que hacia el sur se convierte en el campo Sur.

La estructura tiene un flanco trasero poco inclinado y elongado limitado es su parte más oeste por un retrocabalgamiento. En la parte norte de la trampa este retrocabalgamiento se interpreta como resultado cinemático de la falla frontal. En la parte más norte del campo, la estructura del campo esta conformada por dos altos estructurales asociados a los bloques levantados de la falla Frontal (core fault) y del retrocabalgamiento separados por una estructura sinclinal, como rasgos secundarios se tiene una serie de pequeños retrocabalgamientos con dirección similar al cabalgamiento principal.

1.4 ESTRATIGRAFÍA REGIONAL

La estratigrafía del área involucra rocas del Paleozoico, Cretáceo y Terciario con presencia de múltiples discordancias regionales, en la *figura 5* se presenta la columna estratigráfica generalizada para el área de estudio. Las rocas más antiguas perforadas en el área son las arcillolitas del Ordovícico sobre las cuales yace de manera discordante la secuencia Cretácea, iniciada con las formaciones Fόμεque y Une (Albiano – Aptiano - Cenomaniano), seguida de la formación Gachetá (Turoniano-Conaciano-Santoniano) y el Grupo Guadalupe (Campaniano - Maastrichtiano). La secuencia Terciaria esta dada por las formaciones Barco y Los Cuervos (Paleoceno), Mirador (Eoceno), el Grupo Carbonera y formación León (Oligoceno-Mioceno), la formación Guayabo (Mioceno-Pleistoceno) y los depósitos mas recientes de la formación Corneta.

El entendimiento de las secuencias estratigráficas y sus efectos sobre la deformación y el estilo estructural y de los mecanismos que gobiernan su

deformación (“mechanical stratigraphy”) han ayudado al mejor entendimiento de la estructuración del Piedemonte Llanero. La presencia de una secuencia cíclica conformada por intercalaciones de formaciones predominantemente arenosas y formaciones arcillosas hace que la estratigrafía se deforme siguiendo algunos patrones básicos que se evidencian a lo largo de la cuenca. Los despegues principales de las fallas se presentan en las formaciones principalmente arcillosas como son las arcillolitas del Ordovícico, la formación Gachetá, los miembros arcillosos de la formación Carbonera y la formación León.

Las principales acumulaciones de hidrocarburos en el área se encuentran en los yacimientos arenosos de la formación Guadalupe y las formaciones Barco y Mirador. Las areniscas de estas formaciones tienen su aporte al este en el Escudo de la Guyana y por consiguiente son ricas en cuarzo.

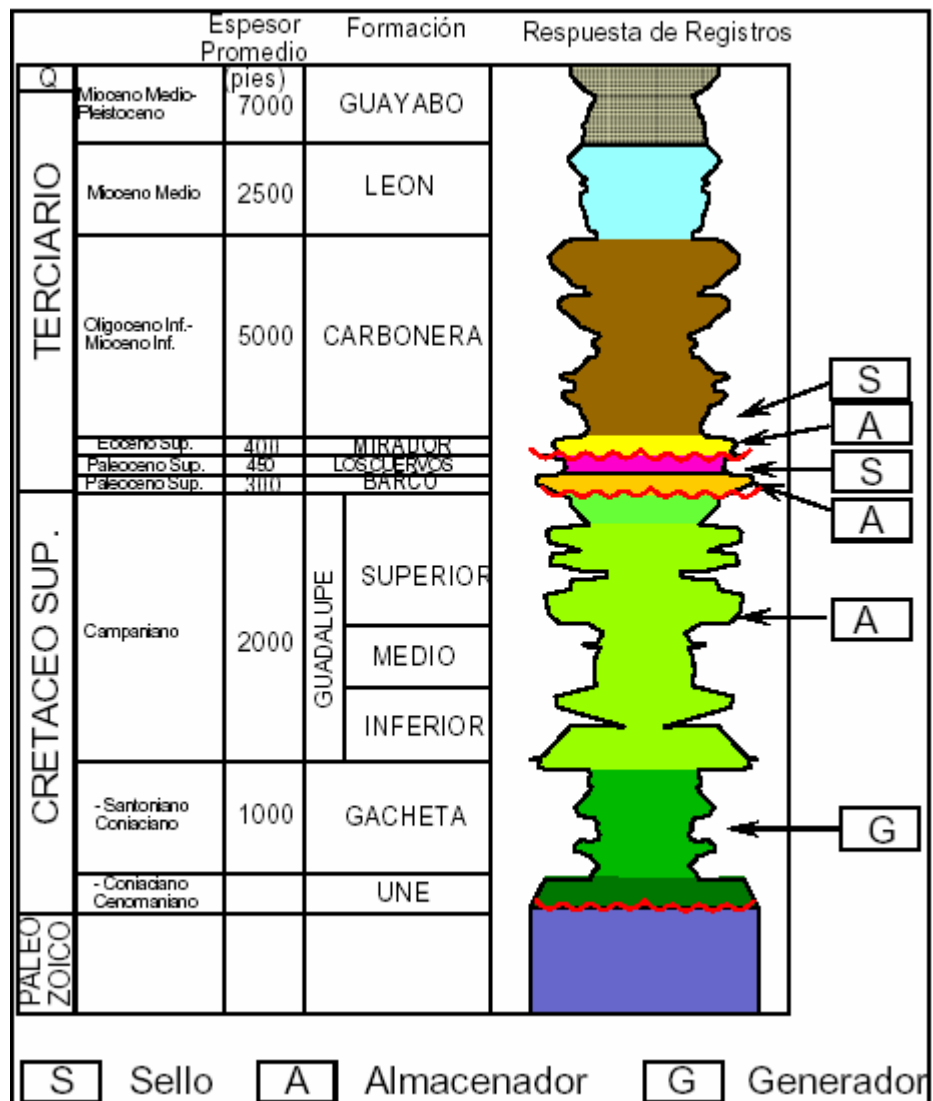


Figura 5. Columna Estratigráfica Generalizada del Piedemonte Llanero. (ECOPETROL-ICP, 2001).

1.4.1 Estratigrafía y Ambiente de depósito de la formación Guadalupe. Con base en la información de corazones y de registros de pozo de los campos del piedemonte llanero, se observa que el intervalo correspondiente a la formación Guadalupe en el campo de estudio es muy similar en ambiente de depositación y evolución estratigráfica al intervalo correspondiente a esta formación en los campos adyacentes, esto refleja una continuidad lateral de las facies presentes en la formación. Se interpreta un ambiente transicional a marino somero; en el intervalo inferior predominan los depósitos de canales estuarinos y rellenos de

estuarios y el intervalo superior presenta depósitos de areniscas de shoreface y de lodolitas de plataforma somera. (ECOPETROL – ICP, 2001), esta compuesta en su mayoría por cuarzoarenitas inmaduras de grano fino intercaladas con lodolitas silíceas. En cuanto a la edad, Fajardo, et al. (2000) propone una edad de depositación para la Formación Guadalupe de Campaniano. Para ello recopila la información bioestratigráfica suministrada por Muñoz (1993) quien sugiere un rango de edades del Campaniano- Maastrichtiano Temprano.

1.4.2 Estratigrafía y Ambiente de depósito de la formación Barco. La formación Barco esta compuesta principalmente por Cuarzo arenitas de grano medio o conglomerático de color blanco, presenta algunos niveles de cuarzoarenitas Conglomerática y pequeños lentes de arcillolitas-limolitas carbonosas.

A partir de la información de corazones existente en el campo se interpreta un ambiente de depositación fluvial y de llanura costera para la Formación Barco; se identifican depósitos arenosos de canales, depósitos arenosos de cuerpos progradantes en llanuras costeras o estuarios y lodolitas de llanura costera o bahía.

1.4.3 Estratigrafía y Ambiente de depósito de la formación Los Cuervos.

La formación los cuervos esta compuesta en su mayoría por lodolitas y arcillolitas de color gris. Esta formación realiza el papel de roca sello debido a su composición de materiales finos y poco permeables en su gran mayoría.

Fajardo et al. (2000), proponen una edad de depositación para la Formación los Cuervos de Paleoceno tardío, para ello recopilan la información bioestratigráfica suministrada por Muñoz (1983) quien le asigna una de Paleoceno.

Para esta formación se interpreta un ambiente de depositación de marismas y pantanos para el sector suroccidental de la zona, a su vez se interpretan ambientes de depositación de llanuras costeras para el sector nor - occidental.

En el sector central son interpretados ambientes fluviales y paludales; a su vez se interpretan ambientes de planicies de inundación para el sector de piedemonte.

1.4.4 Estratigrafía y Ambiente de depósito de la formación Mirador. Con base en información de corazones se divide la Formación Mirador en un intervalo Inferior y Otro Superior. El Mirador inferior se depositó en un ambiente continental donde se identifican depósitos de canales, complejos de Crevasse Splay o rellenos de lagos y lodolitas de llanura de inundación. El Mirador Superior se depositó en un ambiente estuarino o de bahías y se reconocen depósitos de canales estuarinos, bay-head deltas, areniscas de rellenos de estuarios o bahías y lodolitas de bahías.

En el Mirador inferior se definieron tres ciclos estratigráficos denominados de base a tope M1, M2 y M3. En el Mirador superior se definieron cuatro ciclos estratigráficos denominados M4, M5, M6 y M7.

2 FUNDAMENTACIÓN TEORICA

2.1 DESCRIPCIÓN SEDIMENTOLÓGICA

En la descripción macroscópica de las características sedimentológicas de una roca determinada, se tienen en cuenta una serie de aspectos tales como la composición mineralógica, la estructura y la textura de la roca.

Las muestras macroscópicas como lo son los núcleos de perforación, se clasifican utilizando los conceptos de descripción textural, estructural y composicional propuestos por Cruz Guevara, L. E. Caballero, V. M, en la guía de descripción de rocas sedimentarias, quienes a su vez se basan en la teoría de descripción propuesta por Folk 1974 y Friedman 1978. Para la descripción textural de la roca se utilizo el grafico de la *figura 6*.

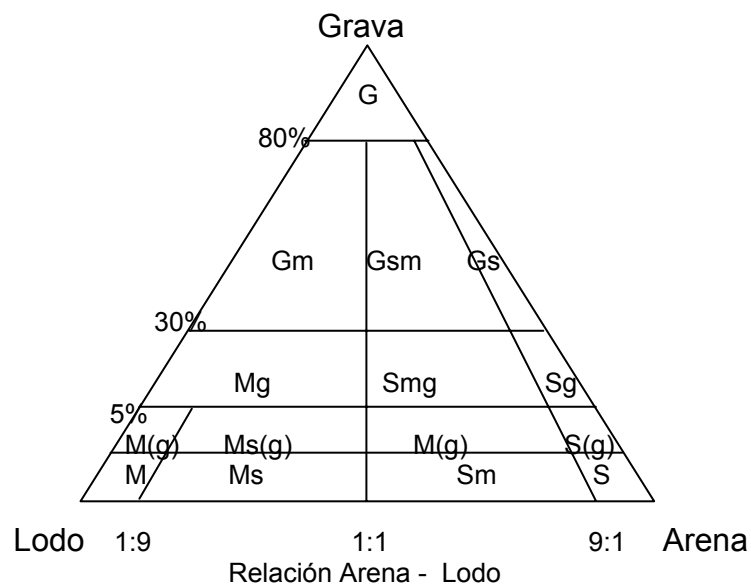


Figura 6. Diagrama triangular para la clasificación textural, particularmente tamaño de grano, de las rocas siliciclásticas o terrígenas, tomado de Folk 1974

También se analiza la forma de los granos y la relación entre ellos, este es un factor muy importante en la descripción de rocas sedimentarias ya que el nos da una idea de la historia de depositación de la roca. Los granos poseen formas particulares que reflejan tanto el origen de la partícula, como los procesos de erosión, transporte depositación y retrabajamiento ocurridos antes o durante su depositación final. En la determinación de la forma de la partícula se utilizan dos criterios la *Esfericidad* y la *Redondez*, (Figura7).

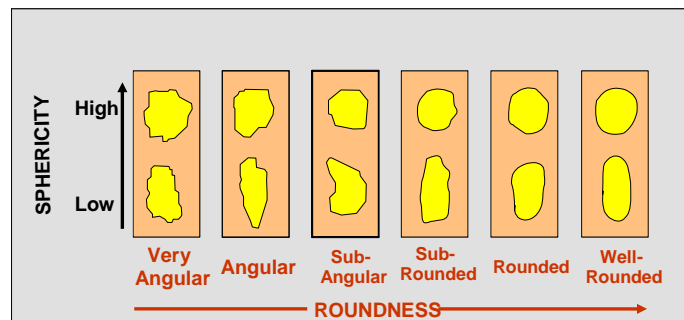


Figura 7. Forma de las partículas con base en el concepto de esfericidad o la uniformidad de los ejes mayor, intermedio y menor. Perpendiculares entre sí. Modificado de Friedman 1987.

En la descripción de las rocas sedimentarias también se hace necesario la descripción del calibrado de la roca. La selección o calibrado es la medida de la uniformidad o de variación en los tamaños de las partículas en una roca sedimentaria o en un sedimento. El calibrado es reflejo directo de la energía de un medio y de su capacidad para seleccionar los tamaños de las partículas que transporta y que deposita. El calibrado (selección = sorting) se puede determinar para las fracciones arena y grava, para hacerlo se utilizan las imágenes de calibrado de Pettijhon. En la *figura 8* se observa la clasificación del calibrado para las rocas sedimentarias.

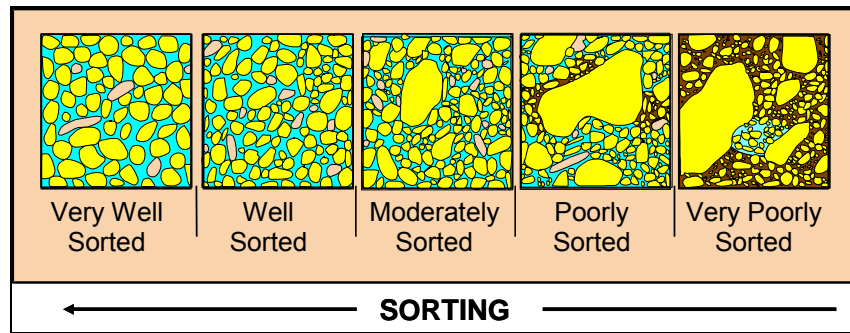


Figura 8. Imágenes de calibrado de las partículas Pettijhon, en Boggs, Jr. 1987.

En la descripción de las rocas sedimentarias también es necesario analizar la fábrica de la roca, entendiendo como fábrica la relación espacial entre la matriz y los granos en una roca sedimentaria, en la fábrica interviene el concepto de armazón, matriz y cemento.

El armazón de la roca son los materiales que soportan la roca, generalmente son los de mayor tamaño o las más abundantes. El armazón determina si la roca presenta fábrica (a) grano soportada, ya sea, arena soportada, gravo soportada o arena gravo soportada (b) lodo soportada, o (c) intermedia, o si presente fragmentos esqueletales (d) biosoportada. (Figura 9).

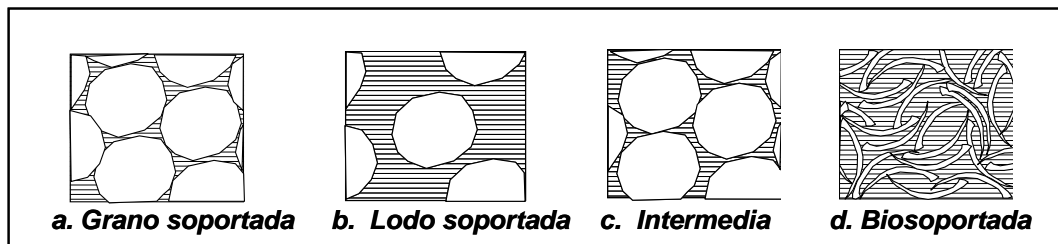


Figura 9. Tipos fábrica presente en los sedimentos y en las rocas sedimentarias

2.2 FACIES Y AMBIENTES DE DEPOSITACIÓN

Las facies sedimentarias, se pueden definir como el conjunto de sedimentos que pueden ser definidos y separados por otros por su geometría, litología y estructura sedimentaria y fósiles asociados.

El concepto de facies ha sido utilizado en muchos sentidos diferentes, tanto en un sentido descriptivo como en un sentido interpretativo. Así por ejemplo las ichnofacies y litofacies constituyen ejemplos de facies descriptivas, ya que tiene que ver con aspectos concretos de los cuerpos sedimentarios como su composición, su estructura interna, su granulometría, etc. En el sentido interpretativo se pueden mencionar las facies turbidíticas o facies deltaicas en las cuales se le asigna a cada uno de estos dos cuerpos un mecanismo de formación. Para el estudio de las facies, se debe considerar un principio básico del análisis en el cual los parámetros de las facies antiguas, de origen desconocido, pueden compararse con las de los depósitos actuales, de los que si se conoce el medio sedimentario actuante y los procesos que las originan. También es necesario tener presente que una facies individual puede tener poco valor para realizar una interpretación de un medio sedimentario específico.

Por lo tanto, cuando aparece una secuencia vertical continua de Facies relacionadas genéticamente y cuando se reconocen los límites, se puede establecer que, las facies que se encuentran en una sucesión vertical continua se formaron en medios adyacentes lateralmente y que las facies que están en contacto normal, en la vertical, deben proceder de medios adyacentes lateralmente.

Este principio es el fundamento del análisis de facies, sin embargo, la aplicación de este principio solamente es correcto en la medida que se aplique a sucesiones sin rupturas importantes y que la comparación con los medios actuales es la base de la interpretación de las facies antiguas. Es fundamental tener presente además que los medios sedimentarios no se distribuyen de forma homogénea en su sentido horizontal y que las zonas de sedimentación, activa o no, pueden variar rápidamente. En consecuencia, el concepto, a veces generalizado de que los sedimentos se depositan unos sobre otros en estratos relativamente homogéneos y de gran extensión lateral es casi siempre una ficción.

Finalmente y en la práctica, al analizar un determinado cuerpo sedimentario se debe de tratar su evolución geodinámica con las características geodinámicas y

volcánicas, cuando corresponda y su evolución posterior, considerando la diagénesis y la evolución de la materia orgánica. Generalmente esto se hace en una secuencia que en primer lugar describe las facies, ya sea en el terreno o bien a partir de muestras obtenidas en Cores.

Toda la información de tipo de litofacies e ichnofacies y ubicación espacial, se encuentra registrada en una gran cantidad de modelos, los cuales idealizan las condiciones de depositación y el tipo de roca que se genera en cada uno de los ambientes de depositación, en la *figura 10* se muestra un modelo en el cual se plasma la información de las estructuras y texturas que conforman las diferentes facies y cada una de ellas se relacionan con un ambiente característico de depositación.

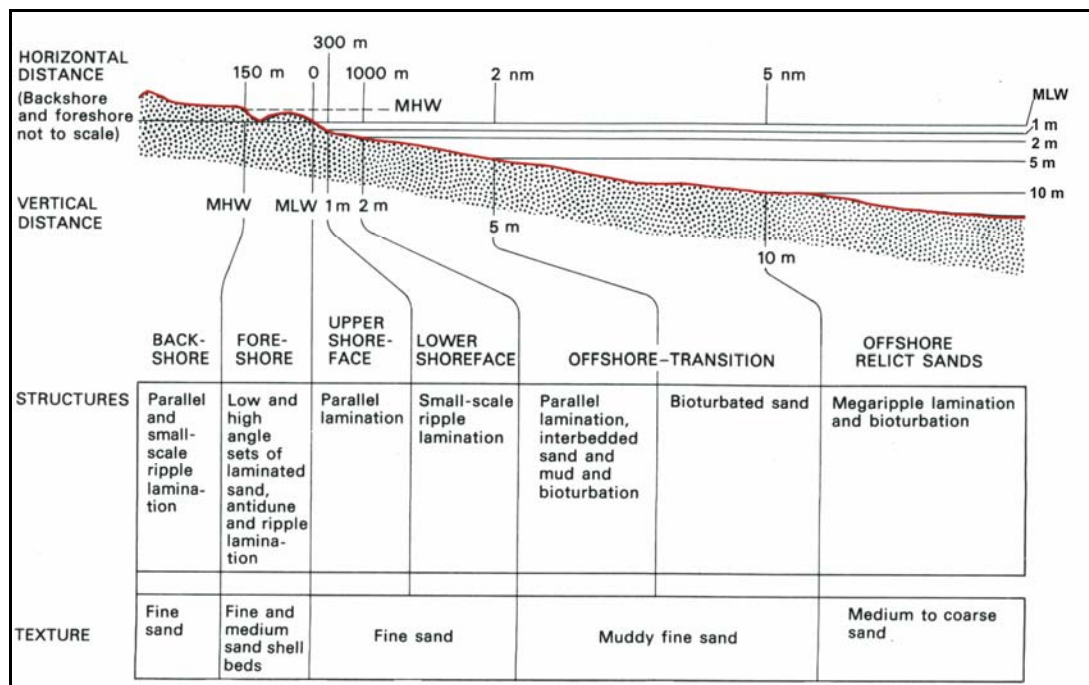


Figura 10. Diagrama en el cual se ilustran el conjunto de estructuras y estructuras sedimentarias relacionadas a cada ambiente de depositación, en la plataforma marina, (Modificado de HG Reading).

También es posible ubicar espacialmente el ambiente de depositación de una determinada roca analizando el contenido de ichnofosiles presente en ella.

En la figura 11 se observa un modelo en el cual se relacionan los dominios de cada ichnofacies con la ubicación espacial de los ambientes de depositación característicos.

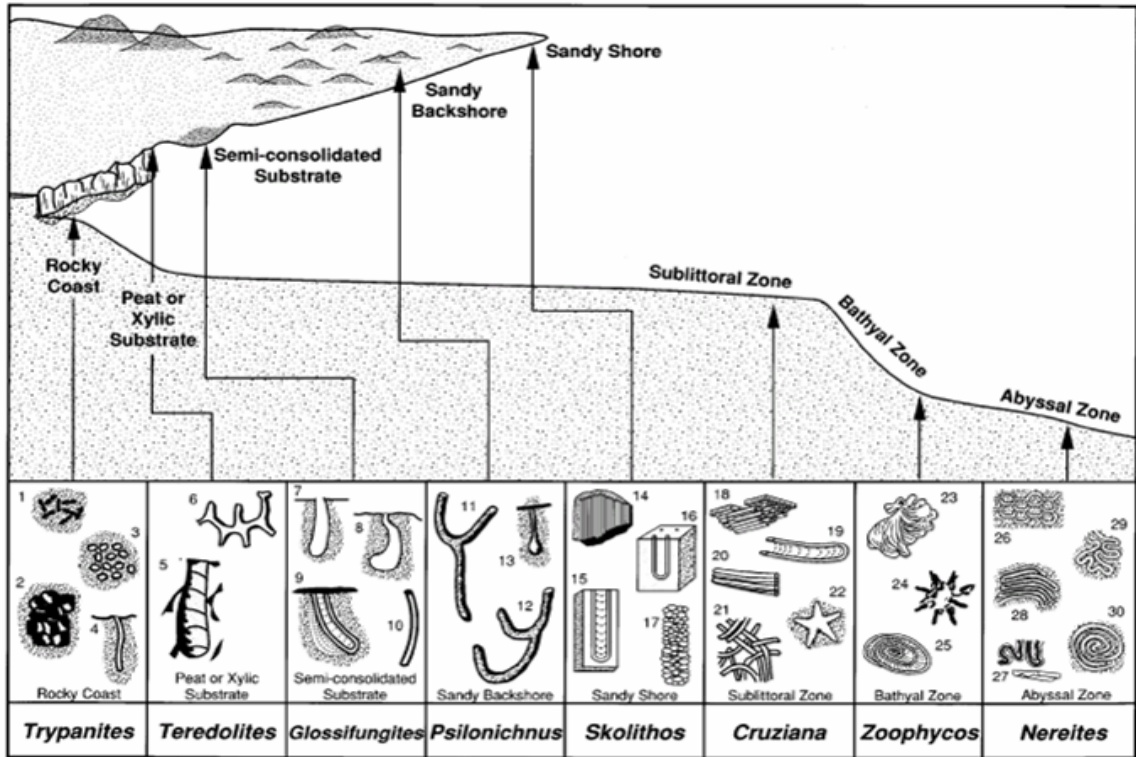


Figura 11. Diagrama sinóptico ilustrando un conjunto de ichnofacies marinas recurrente en un juego de gradientes ambientales. (Modificado por Frey y Pemberton, 1985).

2.3 ASPECTOS DE LA CARACTERIZACIÓN DE LOS YACIMIENTOS NATURALMENTE FRACTURADOS

Las fracturas se definen como son superficies planas de discontinuidad, en donde la roca ha perdido cohesión y los procesos de deformación y alteración de la misma pueden ser ocupadas por fluidos.

Un yacimiento naturalmente fracturado es una ocurrencia macroscópica de discontinuidades planares en la roca debido a la deformación o a la diagénesis física. Si se refiere a una fractura frágil, esta estuvo probablemente abierta al inicio, pero pudo haber sido alterada o mineralizada posteriormente. Si se trata de

fracturas más dúctiles, estas debieron existir como unas bandas de alta deformación en la roca. Como resultado, los reservorios naturalmente fracturados pueden tener efectos positivos o negativos en el flujo de fluidos dentro de la roca.

La definición de un reservorio fracturado es muy amplia debido a que un sistema de fracturas naturales puede tener una variedad de efectos sobre el reservorio y el recobro. Por consiguiente estos efectos deben de ser predecidos antes de que sean evidenciados en los datos de producción. Un reservorio fracturado es aquel que presenta fracturas naturales, o está predestinado a tenerlas (Nelson 2001).

2.3.1 Génesis de las Fracturas. Tres tipos de fracturas son identificados para tres direcciones principales de stress. Toda fractura de tipo natural y frágil en la roca debe conformar uno de estos tres tipos básicos de fracturas: cizalla, extensión y fracturas de tensión (Nelson 2001).

- **Fracturas de cizalla.** Estas fracturas tienen un sentido de desplazamiento paralelo al plano de fractura. Ellas forman un ángulo agudo para la dirección del máximo esfuerzo principal compresivo σ_1 y un ángulo obtuso en dirección del mínimo esfuerzo compresivo σ_3 dentro de la muestra de roca. En la figura...se puede observar la dirección del esfuerzo de cizalladura y a su vez la dirección que tomaran las fracturas de cizalla.

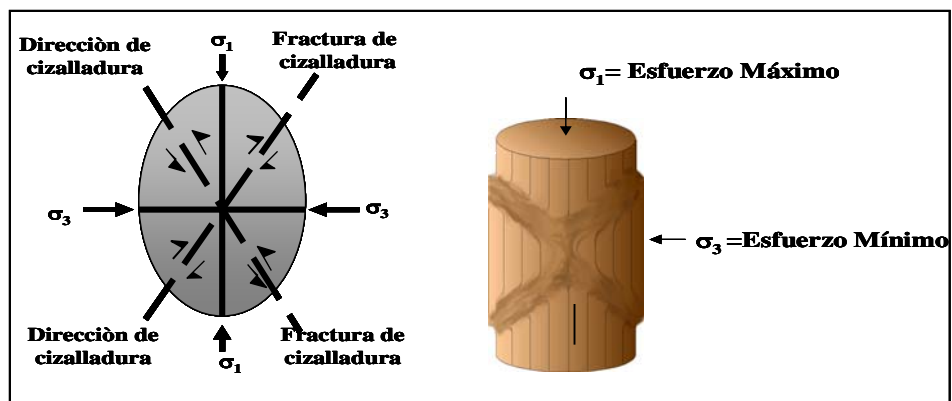


Figura 12. A la izquierda la representación gráfica de la cizalladura; a la derecha la representación de los esfuerzos sobre la muestra. (Tomado de Gildardo Osorio 2004).

▪ **Fracturas de Extensión.** Las fracturas de extensión tienen un sentido de desplazamiento perpendicular al plano de la fractura. El plano de estas fracturas es paralelo a la dirección de los esfuerzos Máximo e Intermedio. Estas fracturas se originan cuando los tres esfuerzos principales son compresivos.

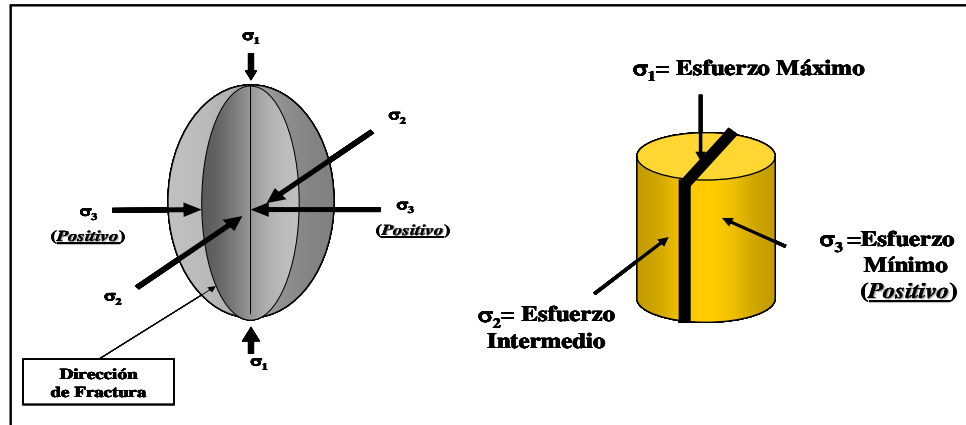


Figura 13. A la izquierda la representación grafica de direccion de fractura; a la derecha la representación de los esfuerzos sobre la muestra. (Tomado de Gildardo Osorio 2004)

▪ **Fracturas de Tensión.** Estas fracturas también tienen un sentido de desplazamiento perpendicular y alejado del plano de fractura. La dirección del plano de estas fracturas, al igual que las de extensión, es paralela a la dirección de los esfuerzos Máximo e Intermedio. Estas fracturas son semejantes a las fracturas de extensión. Sin embargo, para formar una fractura de tensión, al menos uno de los esfuerzos debe ser negativo. Para formar una fractura de extensión, todos los tres esfuerzos principales deben ser positivos (compresivos). Las fracturas de tensión solo ocurren cerca a la superficie, mientras que las fracturas de extensión pueden ocurrir en condiciones de mayor profundidad.

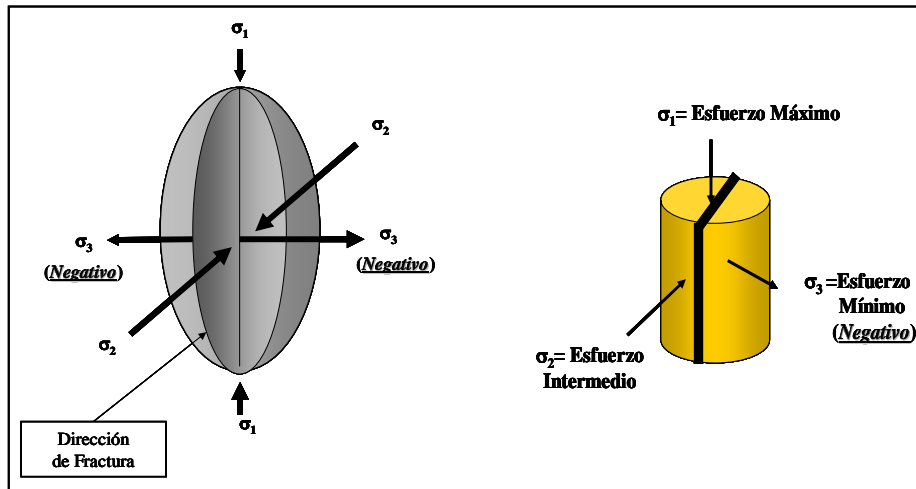


Figura 14. A la izquierda la representación grafica de direccion de fractura de tensión; a la derecha la representación de los esfuerzos sobre la muestra. (Tomado de Gildardo Osorio 2004)

2.3.2. Tipo de fracturas según su naturaleza. Las fracturas pueden ser clasificadas según la naturaleza de las mismas, en esta clasificación se tiene en cuenta la naturaleza del evento que ocasiona el fracturamiento. Esto debido a que las fracturas pueden ser ocasionadas por eventos naturales presentes en el yacimiento o por agentes externos que no hacen parte del set de esfuerzos naturales.

▪ **Fracturas Naturales.** Se definen como discontinuidades o rompimientos en una roca causada por esfuerzos que exceden la resistencia de la misma por mecanismos naturales.

En las fracturas naturales se observan superficies pulidas y de *slickensides*, Características generales de las fracturas naturales:

- Superficies pulidas y de *slickensides*.
- Desplazamiento de los estratos a lo largo de la fractura sin pérdida de cohesión
- En la pared de la fractura se observan estructuras que no tienen relación con la geometría del núcleo.

- El relleno mineral parcial o total sobre la superficie de la fractura (calcita, cuarzo recristalizado, etc.) puede ser también un indicador de fractura natural.
- **Fracturas inducidas.** Este tipo de fracturas, se desarrollan durante la perforación, la toma o la manipulación del núcleo.

Características generales de las fracturas Inducidas:

- Orientación preferencial en el núcleo (perpendiculares a la longitud del núcleo)
 - Incrementa la densidad de fracturas hacia el centro del núcleo.
 - Curvamiento abrupto hacia las paredes del núcleo
 - La superficie de la fractura se relaciona geoméricamente con el núcleo. (aspecto concéntrico en la superficie).
 - En el caso de los esfuerzos inducidos, las estrías se presentan en la superficie de la fractura guardan cierta simetría o patrón regular que no se presenta en las naturales.
- **Fractura Natural – Inducida.** Las fracturas natural-inducida se observan como una fracturas “incompletas” las cuales no atraviesan completamente el núcleo sino que es un plano de debilidad que ya existía como tal pero que por esfuerzos inducidos terminó por manifestarse parcialmente. (*Figura 18*).

▪ **Estilolitos.** Los estilolitos son definitivamente un tipo especial de fractura natural, ya que involucra no solo procesos físicos sino también químicos, siendo el resultado de procesos de disolución por presión. (*Figura 18*). Se reconocen fácilmente por su aspecto laminado, usualmente de color negro y por una ondulación que en ocasiones adopta un aspecto crenulado.

2.3.3 Morfología de las Fracturas. Un factor importante que determina la porosidad de fractura y la permeabilidad es la morfología de los planos de fractura. Esta morfología puede ser observada en los núcleos y afloramientos e inferirse de

algunos registros de pozo. Hay cuatro tipos básicos de morfología para los planos de fracturas naturales.

- **Fracturas Abiertas.** Como su nombre lo indica, no poseen material diagenético rellenando el espacio entre las paredes de la fractura. El ancho de la fractura es muy pequeño, probablemente del tamaño de un poro, pero incrementa significativamente la permeabilidad en la dirección paralela a la fractura, pero por otro lado tiene un efecto despreciable en la permeabilidad en el sentido perpendicular a la fractura. El flujo de fluidos en las fracturas abiertas está evidenciado en los afloramientos por un tinte de oxidación o por un bandeamiento paralelo a las fracturas.

- **Fracturas Deformadas.** Las fracturas deformadas se originan en una zona de cizalla dúctil, donde inicialmente se presentan como abiertas y posteriormente se alteraron físicamente por el movimiento tectónico de la cizalla.

Aquí se incluyen fracturas estriadas y alisadas. Las estrías son formadas por acumulaciones de material finalmente desgastado resultante de la granulación o movimientos de deslizamiento. Las fracturas alisadas son el resultado del deslizamiento friccional a lo largo de una fractura o un plano de falla. Estas superficies estriadas o pulidas pueden incrementar la permeabilidad en dirección paralela a la fractura pero disminuir drásticamente la permeabilidad perpendicularmente a ésta.

- **Fracturas Mineralizadas.** Estas fracturas han sido cementadas u “obstruidas” por mineralizaciones diagenéticas secundarias. A menudo todo este material secundario cementante es cuarzo, carbonato o ambos. Los minerales pueden cementar de manera completa o parcial. Este efecto en la permeabilidad depende completamente del relleno y de la historia diagenética del material. Usualmente las fracturas cementadas son barreras permeables, pero la cementación incompleta

de la fractura puede formar un poro ó una porosidad intergranular que genera un incremento en el valor de la permeabilidad del reservorio.

▪ **Fracturas vugulares.** Las fracturas vulgares no son morfológicamente una fractura verdadera, ellas son una matriz de alteración alrededor de una fractura. Las fracturas vugulares se forman cuando los fluidos penetran en las rocas de baja permeabilidad a lo largo de los planos de fractura. Si los fluidos están en desequilibrio con la matriz de la roca, la disolución puede ocurrir. Estas fracturas pueden proporcionar porosidades y permeabilidades significativas debido a su forma relativamente redondeada.

3 METODOLOGÍA

Se han escogido para trabajar en este proyecto los corazones correspondientes a las formaciones Barco y Guadalupe pertenecientes al pozo I. El número de pies disponibles en este pozo para la formación Guadalupe es de 61 ft, estos equivalen al 27 % de los 225 ft de espesor total de la formación para este pozo y para la formación Barco es de 255 ft que equivalen a un 55,5% de los 456 ft de espesor total de esta formación en el pozo. El número de pies corazonados y analizados para las dos formaciones es de 315 sobre los cuales se realizó la descripción sedimentológica y la caracterización de las fracturas presentes.

La metodología empleada en el presente trabajo se puede esquematizar de la siguiente manera:

3.1 Descripción de Corazones

La descripción de las propiedades sedimentológicas, estratigráficas y de fracturamiento presentes en los corazones se realizó de manera detallada levantando la información pie a pie. Esta información se plasmó en una escala de 1: 10. En la descripción de corazones se plasmó la totalidad de la información presente en los núcleos de perforación, esta información consta de información sedimentológica y estratigráfica de las facies establecidas para los núcleos e información detallada de las fracturas encontradas en los mismos.

3.1.1 Descripción sedimentológica de los corazones pertenecientes a las formaciones Barco y Guadalupe. En esta descripción se tuvo en cuenta la litología, tamaño de grano de las partículas que conforman la roca y la presencia de estructuras sedimentarias físicas y orgánicas. Con toda esta información se identificó el tipo de facies a la cual pertenecía la roca y el posible ambiente de depositación.

Esta información fue consignada en un formato previamente diseñado, en la cual se trato de unificar conceptos, terminología y nomenclatura empleada.

La descripción sedimentológica de los intervalos corazonados para las dos formaciones de estudio se realizo pie a pie y fue consignada en la tabla de descripción a una escala de 1:10.

En la *figura 15* se observa el formato utilizado para llevar los datos de la descripción sedimentológica de los núcleos.

3.1.2 Descripción de la disposición, tipo y características más importantes de las macrofracturas presentes en los corazones pertenecientes a las formaciones Barco y Guadalupe. En esta parte del estudio se tuvo en cuenta la disposición, tipo y características generales de las diferentes fracturas, esto con el fin de clasificarlas y darles un grado de importancia a la hora de hacer la relación de dichas fracturas con el flujo de fluidos y con el carácter naturalmente fracturado del yacimiento.

Para la descripción de las fracturas macro se ha elaborado previamente una metodología y dentro de ella un formato en común a llevar. Dentro de esta metodología se clasificaron las diferentes fracturas teniendo en cuenta su carácter, tipo y características más importantes, para ello se realizo la unificación previa de la nomenclatura a utilizar. Las fracturas fueron analizadas directamente sobre los corazones y se dibujaron sobre un papel transparente colocado encima de las fotografías de los núcleos. Se unificaron los colores, la nomenclatura y numeración dada a las fracturas.

En la *figura 16* se muestra el formato de descripción de fracturas utilizada en el estudio. En las *tablas 1 y 2* se menciona la nomenclatura dada para la descripción y en la *figura 17* se observa la manera como se representaron las fracturas sobre las fotografías de cada intervalo corazonado.

Pozo:		Formacion:					Analizó:					Escala: 1:10				
Prof:(ft)	Fract	Tipo de Fract	Nº de Fract	Intensidad de Fract	Tipo de esfuerzo	Apertura y relleno	Long	Apertura en mm	Perfil de la Fract	Morf de la Pared	Aptitud de la Fract	zona	Facie	Petrof	Impreg	Observaciones

Figura 16. Formato de descripción de fracturas

Tipo de fractura	1. Natural
	2. Inducida
	3. Natural – Inducida
	4. Estilolito
Tipo de esfuerzo	1. Tensión
	2. Compresión
	3. Cizalla
Apertura y relleno	1. Abierta
	2. Cerrada
	3. Rellena
	4. Parcialmente rellena
	5. Puentes Cristalinos
Medida de longitud	1. Mayor a 50 cm
	2. Entre 25 cm y 50 cm
	3. Entre 10 cm y 25 cm
	4. Entre 5 cm y 10 cm
	5. Inferior a 5 cm
Medida de apertura	1. Mayor a 10 mm
	2. Entre 5 mm y 10 mm
	3. Entre 4 mm y 5 mm
	4. Entre 3 mm y 4 mm
	5. Entre 2 mm y 3 mm
	6. Entre 1 mm y 2 mm
	7. Inferior a 1 mm
	8. No observable
Perfil de la fractura	1. Recto
	2. Sinuoso
	3. Dentado
Morfología de la pared	1. Uniforme
	2. Rugosa
	3. Estriada
	4. No observable

Tabla 1. Nomenclatura utilizada en la descripción de las fracturas.

NOMENCLATURA		
Tensión	Azul	t
Compresión	Rojo	c
Cizalla	Verde	CZ
Estilolito	Morado	e
Inducida	Amarillo	i
Naturalmente Inducida	Marron	in

Tabla 2. Nomenclatura y colores utilizados en la caracterización de fracturas.

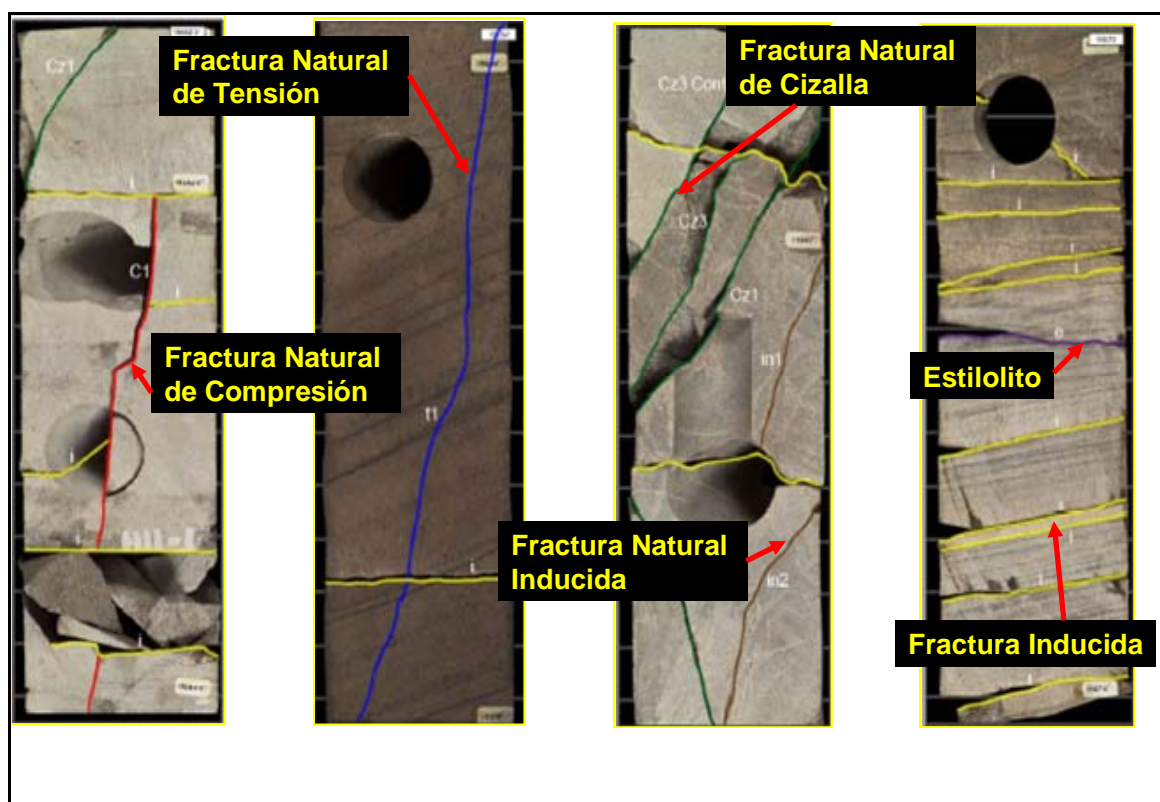


Figura 17. Fotografía de núcleos, identificación de los diferentes tipos de fracturas.

Los parámetros que se escogieron para caracterizar las fracturas fueron recopilados de las diferentes fuentes bibliográficas, y ellos a su vez se pueden definir de la siguiente manera:

- **Profundidad:** Este parámetro hace referencia a la profundidad en pies del núcleo descrito. En la *figura 16* se encuentran 4 divisiones (filas) las cuales representan un pie del núcleo. Escala aproximada del formato 1:10.

- **Fractura:** En este parámetro se determinaron principalmente 4 clases de fracturas (*Figura 18*) diferenciables entre si de acuerdo a su génesis: Natural, Inducida, Natural-inducida y Estilolitos. Para diferenciar cada una de ellas se debe observar muy bien la superficie del plano de la fractura y el perfil de la misma ya que cada una presenta rasgos muy particulares especialmente en la formación de estrías de fricción y escalones generados tanto naturalmente como por esfuerzos inducidos a la hora de la perforación.

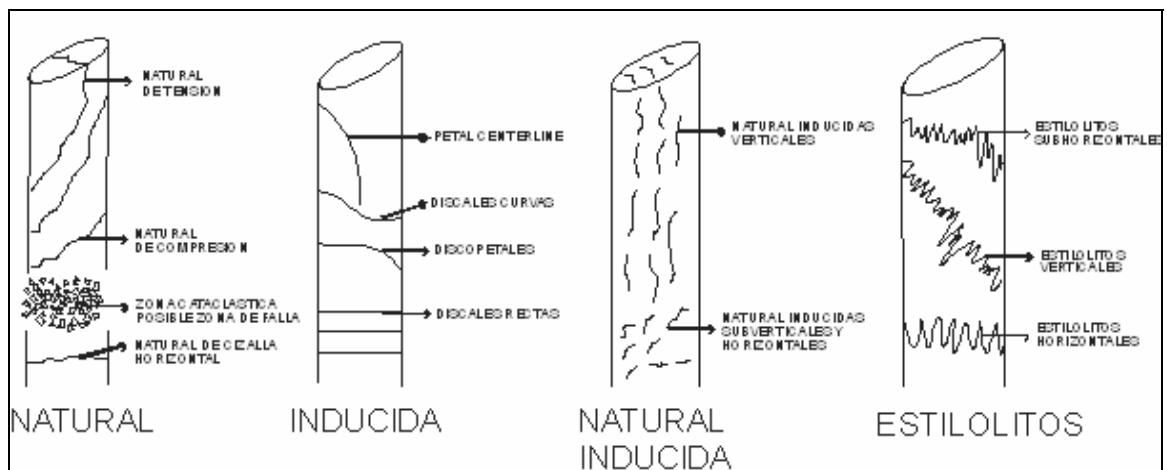


Figura 18 Clasificación de los tipos de fracturas en núcleos (basado en Kulander, 1990)

- **Tipo de fractura:** Aquí se identifica el tipo de fractura de acuerdo a su diagénesis. Las fracturas formadas netamente por efectos mecánicos son las Fracturas Naturales (1), las fracturas formadas por el proceso de corazonamiento son las Fracturas Inducidas (2), las fracturas que por efectos de corazonamiento intensifican el fracturamiento que presentaba la roca antes de éste son las Fracturas Naturalmente Inducidas (3) y las fracturas formadas por efectos mecánicos con una componente química son los Estilolitos (4).

- **Número de Fracturas:** En esta celda se puntualiza el número de fracturas en un pie de núcleo descrito. Se tienen en cuenta todos los tipos de fracturas encontradas en el pie de núcleo.

- **Tipo de esfuerzo:** Aquí se identifica el tipo de esfuerzo que generó la fractura de acuerdo a la observación en el núcleo. Esta discriminación es exclusiva para las fracturas naturales asignándole un identificador de acuerdo al tipo de esfuerzo, así: Tensión (1), Compresión (2) y Cizalla (3). Este parámetro tiene en cuenta la generación de fracturas naturales a partir del esfuerzo aplicado a la roca ya sea de tipo regional o local.

Los movimientos de tensión y compresión se observan básicamente en el núcleo como desplazamientos del techo en la dirección del buzamiento (hacia abajo o hacia arriba respectivamente) y esto se evidencia tanto por las estrías naturales de fricción y la dirección de los escalones (Kulander 1990), (Figura 19).

El movimiento de cizalla por su parte tiene tres casos: uno, cuando el desplazamiento del techo es en la dirección del rumbo (cizalla pura, identificación: 3); Dos, cuando el desplazamiento del techo es en la dirección del rumbo y además sube (cizalla + compresión, identificación: 3:2) y tres, cuando el desplazamiento del techo es en la dirección del rumbo y además baja (cizalla + tensión, identificación: 3:1) (Figura 19)

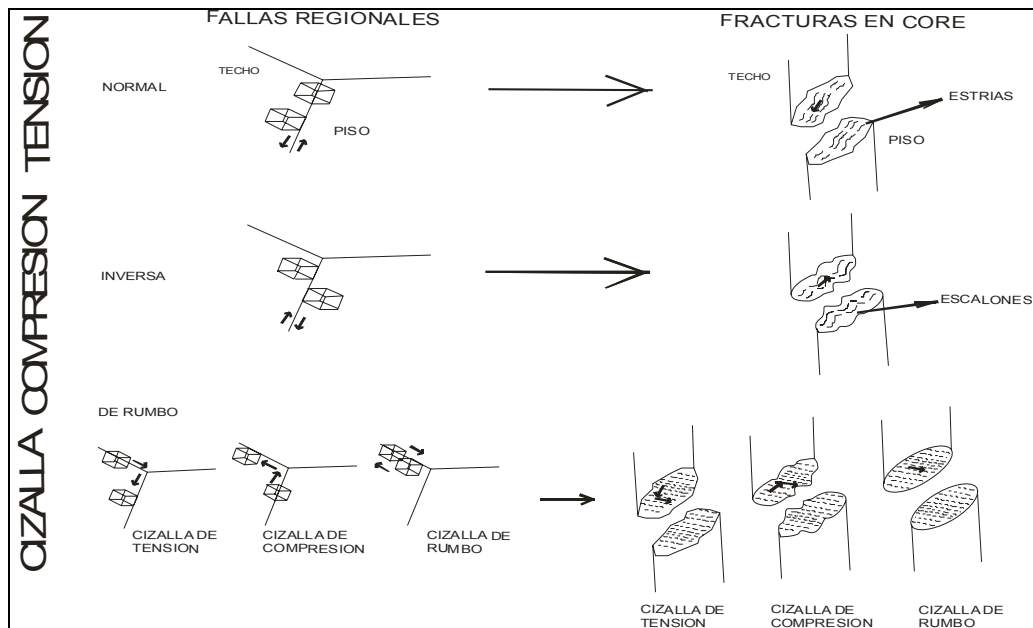


Figura 19 Analogía fallas vs. Fracturas teniendo en cuenta el movimiento relativo de los bloques de techo y piso. Tomado de gmph.

A la hora de determinar el esfuerzo es primordial tener un sistema de orientación aparente como referencia en el núcleo, para así relacionar cada uno de los esfuerzos asignados a las fracturas (Figura 20).

- **Apertura y relleno:** Aquí se identifica como es el espacio existente entre las caras de la fractura. Se puntualiza si es Abierta (1), Cerrada (2), Rellena (3), Parcialmente Rellena (4), Parcialmente abierta (5) y Puente Cristalino (6). En el ítem 4 de esta celda sólo se puntualiza si la fractura esta parcialmente rellena independiente del tipo de relleno. El tipo de relleno se caracteriza y describe en la casilla de Observaciones. En el ítem 6 de esta celda sólo se indica si existe Puente Cristalino. Este puente se caracteriza en la casilla de observaciones donde se describe el tipo de puente (mineral).

- **Longitud:** En esta casilla se asigna la medida de longitud de la fractura que se observa en el núcleo. Esta medida se da en centímetros y se identifica de la siguiente manera: fracturas mayores a 50 cm (1), fracturas entre 50 y 25 cm (2),

fracturas entre 25 y 10 cm (3), fracturas entre 10 y 5 cm (4) y fracturas menores de 5 cm (5).

- **Medida de apertura:** En esta casilla se designa la medida de apertura para las fracturas, tomada en milímetros con el objetivo de ser más exactos en la medición.

Estos parámetros son muy importantes cuando se trabaja con clusters de fracturas, ya que usando las teorías fractales se sabe que el comportamiento de la “materia tanto a nivel micro como macro, en muchos casos responde de igual manera a la acción física y a su vez la magnitud de respuesta es directamente proporcional a su tamaño”

- **Perfil de la fractura:** En esta casilla se caracteriza la forma del perfil de la fractura asignándoles los siguientes identificadores: Recto (1), Sinuoso (2) y Dentado (3).

- **Morfología de la pared:** En esta casilla se caracteriza la superficie de los planos de las fracturas. Y se determinan de acuerdo a los siguientes identificadores: Uniforme (1), Rugosa (2), Estriada (3) y No Observable (4).

Los perfiles y morfologías de las fracturas son importantes ya que ellas determinan el comportamiento de los fluidos en referencia a la velocidad de flujo y capacidad de transporte dentro del yacimiento.

- **Aptitud de la fractura:** Es muy importante darle una orientación a las fracturas presentes en el núcleo. Para ello, las fracturas se orientan respecto a un eje ortogonal al plano de corte del núcleo determinando el Rumbo aparente y Buzamiento de las fracturas (*Figura 20*). Siendo la aptitud, la dirección del plano de fractura respecto al norte geográfico con una inclinación respecto a un plano horizontal. Esta medida está dada en azimuth. Importante tener presente que esta

medida de aptitud de las fracturas en los núcleos es relativa. Posteriormente será corregida de acuerdo a la orientación determinada con el Paleomagnetismo u otro metodo alterno para orientación de fracturas.

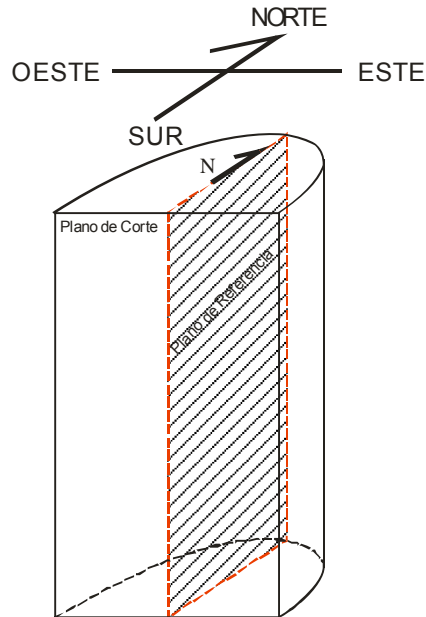


Figura 20. Sistema de referencia donde se indica cómo se tomó el norte con respecto al corte del núcleo

- **Zona:** La zona corresponde a los ciclos estratigráficos denominados por ECOPETROL, en el cual se encuentra el núcleo.
- **Facies:** Esta casilla se indica la facies en la cual se encuentra la fractura.
- **Impregnación:** En esta casilla se determina si existe o no impregnación de crudo en las paredes de la fractura. 1: Mala, 2: Moderada, 3: Buena.
- **Observaciones:** En esta casilla se designan las características más importantes que no aplican en ninguna de las celdas anteriormente descritas o para ampliar las características de algunas de las celdas.

3.2 ANÁLISIS PETROGRÁFICO Y MICROFLUORESCENCIA.

Se realizó una selección previa de los intervalos de mayor interés en los cuales se tomaron muestras que fueron enviadas al laboratorio con el fin de realizar las secciones delgadas para el análisis petrográfico y el análisis de microfracturamiento utilizando microfluorescencia. Estos estudios fueron llevados a cabo con el fin de establecer las características sedimentológicas como litología, estructuras sedimentarias orgánicas e inorgánicas, cementación, relación de matriz-armazón, relación inter granular, porosidad aparente. En las placas también se analizó la disposición, el tipo y las características más importantes de las microfracturas presentes en ellas.

3.3 ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

Al tener la información correspondiente a la descripción sedimentológica, tipo de facies y ambientes de depositación correspondiente a los intervalos de las formaciones en estudio, junto con la información de la disposición, tipo y características de las fracturas encontradas en los núcleos, así como la información de las características de las microfracturas analizadas mediante petrografía; se llevó a cabo la interpretación de dicha información realizando la evaluación de la relación del tipo de facies encontradas en las formaciones con la intensidad de fracturamiento presente en los intervalos estudiados.

Se realizó el tratamiento estadístico de los datos obtenidos de interpretación facial y de fracturamiento. Con el análisis estadístico de estos datos se realiza la tabulación y las diferentes gráficas que indican las tendencias de cada intervalo corazonado para las formaciones de estudio.

Se generaron las columnas estratigráficas para cada formación, donde se anexó la información del tipo de facies, ciclos y ambientes de depositación, información de la intensidad de fracturamiento así como la orientación de las diferentes familias de fracturas encontradas en el estudio.

Para generar las rosetas de los diferentes tipos de esfuerzos en cada intervalo corazonado se utilizo el software *Georient*, el cual esta diseñado para generar diagramas rosas que ilustren la orientación preferencial de las diferentes familias de fracturas. En la *figura 21* se observa un diagrama rosa generado mediante el software *Georient*.

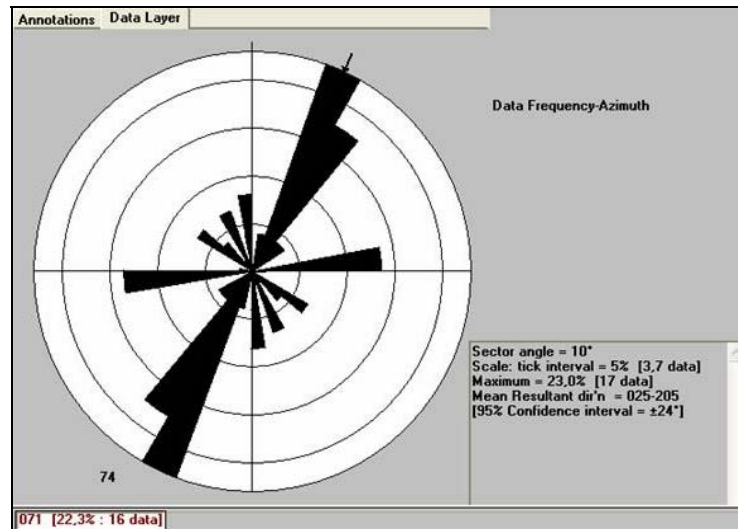


Figura 21 Diagrama de roseta generado mediante *Georient*.

Para poder ingresar los datos al software se realizo la conversión de los mismos, a valores azimutales mediante la regla de la mano derecha, ya que los datos de aptitud de las fracturas se consignaron en el formato de descripción con valores de rumbo y buzamiento, y el software los recibe en valores de azimut y buzamiento, por ello se tubo que hacer la conversión. Es necesario precisar que la orientación que se le otorgaba a cada fractura estaba fijada con respecto a la cara del corte del corazón, es decir la cara del corte en el núcleo se tomo como referencia. Esto hace que la orientación hallada para cada fractura no sea la real ya que estos corazones podrían estar girados ya sea por acción de la perforación o en la manipulación del mismo durante la preservación. En la *figura 20* se observa la manara como se tomo la orientación aparente de las fracturas con respecto al corte del núcleo.

4 RESULTADOS

4.1 DESCRIPCIÓN SEDIMENTOLOGICA

4.1.1. Formación Guadalupe. El intervalo corazonado para la formación Guadalupe en el pozo trabajado, esta compuesto en su gran mayoría por cuarzoarenitas de grano fino a medio con pequeñas intercalaciones de cuarzoarenitas conglomeraticas y lentes de Arcillolita-Limolita. Hacia la base de los 61 ft descritos se encuentra una sucesión de cuarzoarenitas de tamaño medio con granos moderadamente seleccionados, subangulares y baja esfericidad lo que favorece a la impregnación por hidrocarburos, además presenta un intervalo totalmente fracturado y con un alto grado de impregnación. También es notoria la presencia de estilolitos y preestilolitos compuestos por materia orgánica. Se observa un bajo grado de bioturbacion no diferenciada. La roca a su vez presenta pequeños intervalos en los cuales se observan granos de composición fosfatica, aparentemente pelles. Hacia el centro del intervalo corazonado predominan las cuarzoarenitas de grano fino con un curva granulométrica agradacional, granos mal seleccionados y con buena esfericidad, estas cuarzoarenitas presentan intercalaciones con arcillolitas limonitas bioturbadas y laminadas.

Hacia el tope del intervalo corazonado el tamaño de las cuarzoarenitas aumenta hasta tamaños de arena media a gruesa y se observa un pequeño intervalo de un conglomerado arenoso de composición oligomíctica. (Ver anexo 1).

Con toda la información de la descripción sedimentológica detallada se pudo identificar claramente los tipos de facies que estarían conformando las rocas del intervalo corazonado para la formación Guadalupe.

Las diferentes facies encontradas para la formación Guadalupe son las siguientes:

Abre (Cuarzoarenita con relictos de estratificación cruzada); esta facies se encuentra distribuida a lo largo de todo el intervalo corazonado para la formación. En ella se observan huellas de una estratificación cruzada preexistente, en algunos casos se observan relictos de estratificación cruzada en arteza y en otro estratificación cruzada planar. En las zonas donde está presente esta facies el grado de impregnación por hidrocarburos es elevado. La bioturbación que presenta esta facies es en la mayoría de los casos no identificada debido a la poca conservación de las estructuras biogénicas presentes en la roca. (Ver figura 22)



Figura 22. Cuarzoarenita con alto grado de impregnación de hidrocarburos y con relictos de estratificación cruzada.(Facies Abre)

FI (Arcillolita-Limolita laminada), esta facies esta compuesta por una serie de material arcilloso en su gran mayoría siliceo en un 95% y minerales micaseos en menor cantidad, la materia orgánica se encuentre en muy bajo porcentaje. En esta facies la laminación predominante es de tipo flaser y lenticular, estas pequeñas laminas están compuestas en su totalidad por material siliceo de color claro, de tamaño arena muy fina a fina. En esta facies no se observa ningún tipo de estructura sedimentaria que indique una bioturbacion aparente, las estructuras

sedimentarias orgánicas son nulas. El porcentaje de ocurrencia de esta facies en el intervalo corazonado para la formación Guadalupe es muy bajo, de aproximadamente un 4 %. (Ver figura 23).



Figura 23 Arcillolita-Limolita con láminas de cuarzoarenita de grano muy fino. (Facies F1)

Ab (Cuarzoarenita bioturbada), en esta facies no se observa ningún tipo de estratificación, se presenta como una roca homogénea y con pequeñas estructuras producidas por bioturbación. Los espesores de dicha facies son mucho mayores considerados con los de las demás facies presentes en el intervalo analizado. Esta es la facies que más se presenta a lo largo de todo el intervalo y tiene un porcentaje de ocurrencia de aproximadamente 78%. (Ver figura 24)

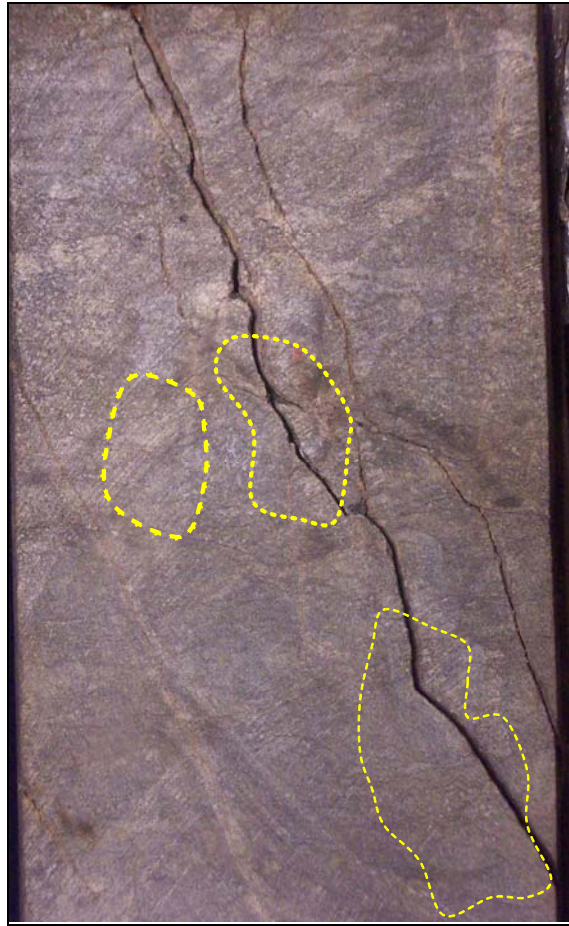


Figura 24. Cuarzoarenita de grano muy fina con madrigueras y biturbación no diferenciada. (Facies Ab).

Cmo (Conglomerado Oligomítico), esta facies es la que se presenta en menor proporción en el intervalo corazonado, un 2% aproximadamente. Ella se presenta en un pequeño espesor de un pie aproximadamente y ubicado hacia el tope del intervalo. Los clastos que se encuentran presentes en esta facies son de composición arcillolítica de color oscuros, alargados y angulares. (Ver Figura 25).



Figura 25. Conglomerado Arenoso de composición Oligomítica con clastos arcillolíticos. (Facies Cmo).

Fbrl (Arcillolita-Limolita bioturbada con relictos de laminación), esta facies esta compuesta por material arcillolítico, en su gran mayoría la composición es sílicea, presenta laminación de tipo flaser, las laminas están compuestas por material cuarzoso y de tamaño de arena muy fina de color claro. En esta facies se observa un alto grado de biturbación, en su gran mayoría no diferenciada y en un porcentaje mas bajo biturbación de tipo ophiomorpha y talasinoides. (Ver figura 26)



Figura 26. Arcillolita-Limolita con relictos de laminacion y bioturbación no diferenciada. (Facies Fbrl).

Con la caracterización de las diferentes facies y la información de las estructuras sedimentarias tanto físicas como orgánicas, se da una ubicación espacial al posible ambiente en el cual se depositaron los materiales que hoy forman parte de las rocas de la formación Guadalupe. Por el tipo de facies presente en el intervalo corazonado y la sucesión de facies en la vertical se asume que el ambiente de depositación del intervalo analizado para la formación Guadalupe corresponde a un Shoreface. Este ambiente esta dominado en su parte superior por el nivel base de oleaje bajo y en su parte inferior por el nivel base ondulatorio en condiciones climáticas normales. Este dominio del nivel de ondulación en condiciones climáticas normales hace que las estructuras que presenten las rocas formadas en este ambiente sean estratificaciones cruzadas en artesa y poca estratificación cruzada planar, a su vez me selecciona el tamaño de grano en tamaños de arana

fin a media baja, esto es lo que estamos observando en las facies encontradas en la formación Guadalupe.

Con todo esto se generó el bloque diagrama par el ambiente de depositación de la formación Guadalupe.

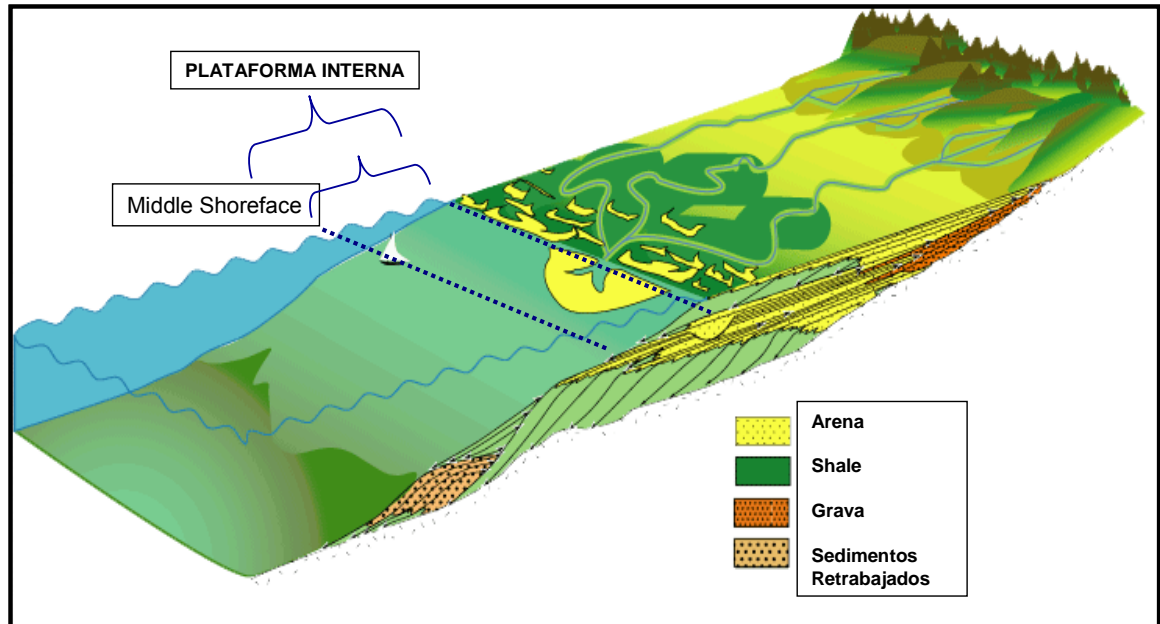


Figura 27. Bloque diagrama del ambiente de depositación del intervalo corazonado de la Formación Guadalupe. Modificado de Langhorne B., and Christopher G. (2003).

El ambiente de depositación para el intervalo corazonado de la formación Guadalupe se ubica dentro de una plataforma marina somera o plataforma interna, con mas claridad se puede ubicar dentro de un Middle Shoreface, debido a la estratificación cruzada planar y al tamaño de las arenas en su gran mayoría de tamaño medio, las estructuras de icnofosiles también nos dan una idea para ubicar la formación dentro de dicho ambiente ya que es en este tipo de ambiente se presentan con frecuencia estructuras pertenecientes a las ignofacies de los Skolithos tales como la Ophiomorpha y los Thalassinoides.

Otro criterio que se tomo en cuenta para la ubicar la formación en dicho ambiente fue la observación de las formación que suprayacen a la formación Guadalupe en este sector, al observar la formación Barco encontramos que el ambiente de

deposición se acerca mas hacia el continente y presenta llanuras de inundación así como rellenos de canales estuarinos, y en la formación Mirador ubicada sobre Barco encontramos un ambiente aun mas continental con canales fluviales y depósitos de tipo crevasse splasse,(según Fajardo, A 2001), con ello podemos apreciar que nos movemos de un ambiente Marino Somero como lo es el de Guadalupe a un ambiente mas litoral como el de Barco y terminamos sobre un ambiente continental como se aprecia en la Formación Mirador.

Toda esta información se represento en una columna estratigráfica generalizada para el intervalo corazonado de la formación Guadalupe, ver *figura 28*. Con la información sedimentológica y estratigráfica se realizo la caracterización facial y con ello se genera la columna estratigráfica para el respectivo intervalo corazonado. (*Ver anexo 1*).



Figura 28. Columna estratigráfica para el intervalo corazonado de la formación Guadalupe en el pozo I

4.1.2. Formación Barco. La formación Barco corresponde a un conjunto de cuarzoarenitas de grano medio a grueso, con pequeñas intercalaciones de arcillolitas-limolitas y con arcillolitas carbonosas.

En la parte más inferior del intervalo analizado se encuentran unas cuarzoarenitas bien cementadas por sílice muy apretadas y con bajo nivel de biturbación, la biturbación observada no es diferenciada, además en esta parte del intervalo la roca se encuentra muy fracturada.

También encontramos un grupo de cuarzoarenitas conglomeráticas de color marrón claro, con estratificación cruzada planar. Los clastos son cuarzosos y de tamaños guija, mal seleccionados y subangulares. La roca se encuentra con un alto grado de impregnación de hidrocarburos.

En la parte más central del intervalo corazonado se encuentra un grupo de cuarzoarenitas de color blanco de tamaño de grano medio mal seleccionada y muy cementada por sílice, estas cuarzoarenitas están intercaladas con un grupo de arcillositas limonitas carbonosas con bajo espesor un pie aproximadamente.

Hacia la parte superior del intervalo corazonado para la formación Barco se ubica un nivel de cuarzoarenitas de grano medio a grueso, con mal selección y con granos subangulares y poco esféricos. Este intervalo presenta un alto grado de fracturamiento inducido de tipo disked. El grado de impregnación de hidrocarburos disminuye con respecto al intervalo inferior. La roca se observa muy apretada y masiva en algunas zonas y en otras se observa poco compactada. El tamaño de grano se mantiene homogéneo a lo largo de todo el intervalo presentado una curva granulométrica agradacional. (Ver anexo 1).

Con toda la información sedimentaria y estratigráfica obtenida de los corazones pertenecientes a la formación Barco se pudo definir el tipo de facies presentes en los intervalos corazonados para dicha formación. En esta formación se presentan algunas de las facies observadas en Guadalupe y aparecen otras que no fueron observadas en los corazones de la formación Guadalupe.

Las facies que fueron caracterizadas para la formación Barco son las siguientes:

(Abri) cuarzoarenita bioturbada con relictos de laminación; esta facies presenta pequeñas laminas de materia siliceo de tamaño fino y colores oscuros, el color general de la roca que conforma esta facies es gris claro y se observa un grado bajo de biturbación no diferenciada en su gran mayoría.

(Fc) arcillolita-limolita carbonosa; esta facies presenta una bajo ocurrencia en el intervalo corazonado, esta compuesta en su gran mayoría por material carbonoso y su color oscuro. El contenido de materia organica es elevado y la facie presenta una gran fisilidad.

(Acep) cuarzoarenita conglomerática con estratificación cruzada con pebbles; esta facie presenta asia su base una gran cantidad de estratificación cruzada acompañada por el ordenamiento de pebbles en los planos de estratificación.

(Ab) cuarzoarenita bioturbada; esta facies presenta características similares que las de la misma facies encontrada en la formación Guadalupe, pero ella se encuentra mas apretada y muy cementada por sílice, los estructuras de biturbación son claramente observables pero el tipo de biturbación no puede ser definido debido a la poca conservación de las estructuras.

(Fb) arcillolita-limolita bioturbada; se trata de una serie de arcillolitas-limolitas con un alto contenido de bioturbación no diferencia, con pequeñas laminas de material siliceo de grano muy fino a fino de colores claros.

(Abre) cuarzoarenita bioturbada con relictos de estratificación cruzada. En esta facies se evidencia claramente la estratificación cruzada en artesa, también se definen las estructuras de bioturbación en su gran mayoría.

Con la información obtenida de la descripción facial y el contenido de ihnofosiles se pudo ubicar el ambiente de depositación para la formación barco. En esta formación se interpreta un ambiente continental y de planicie costera (*Figura 51*); se identifican depósitos de canales asociados a las facies de cuarzoarenitas conglomeraticas con estratificación cruzada con pebbles características de fondo de canal, depósitos de areniscas progradantes en llanuras costeras o estuarios, asociadas a las facies de cuarzoarenitas bioturbadas y cuarzoarenitas con relictos

de estratificación cruzada y/o depósitos de lodolitas de llanura costera y/o bahías, estos últimos asociados a las facies de arcillolitas limonitas carbonosas.

Mirando con detenimiento la sucesión facial en la vertical, se puede observar que se tienen depósitos característicos de canales estuarinos, crevasse splay, bahía, rellenos de bahía y depósitos de marismas.

En la figura 29 se muestra el bloque diagrama de deposición planteado para el intervalo corazonado de la formación Barco en el pozo de estudio.

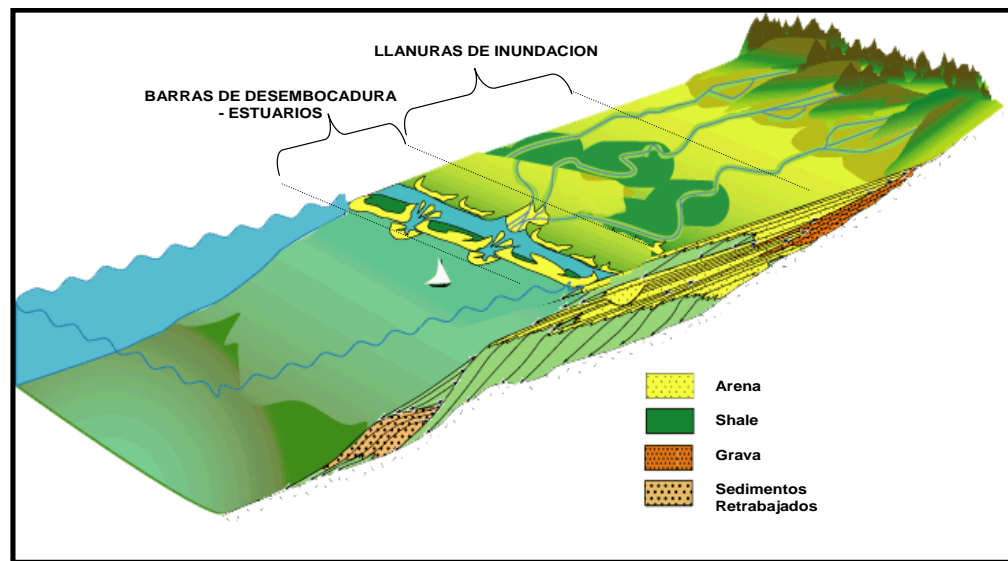


Figura 29. Bloque diagrama del ambiente de deposición para la formación Barco.

Con toda la información generada en la descripción facial, estratigráfica y de caracterización de fracturamiento, se generó la columna estratigráfica generalizada para la formación Barco, en dicha columna se anexan los tipos de facies, ambientes de deposición, información de fracturamiento y observaciones principales de los diferentes intervalos corazonados para esta formación. (Ver anexo 1).

4.2 DETERMINACIÓN DE LA DISPOSICIÓN, TIPO Y CARACTERÍSTICAS MÁS IMPORTANTES DE LAS FRACTURAS ENCONTRADAS EN LOS NÚCLEOS ANALIZADOS.

Para los 317 corazonados pertenecientes a las formaciones barco y Guadalupe en el pozo I fueron caracterizadas un total de 1344 fracturas, donde están incluidos todos los tipos de fracturas, desde las naturales hasta las inducidas. Al analizar estos resultados se lleva a cabo la integración de la totalidad de los datos generados en la caracterización de las fracturas en cada intervalo de núcleo disponible. En este análisis solo se tuvieron en cuenta las fracturas naturales, ya que ellas son la que realmente importan a la hora de analizar el posible flujo de los fluidos.

De las 1344 fracturas 1024 fueron caracterizadas para la formación barco y 320 para la formación Guadalupe. Así mismo, se observó que a nivel de formaciones el comportamiento es diferente y las fracturas también están influenciadas por el tipo de litología.

4.2.1. Caracterización de las fracturas para la formación Guadalupe. En los 61 ft corazonados descritos para la formación Guadalupe fueron caracterizadas 320 fracturas totales. De estas 320 fracturas solo el 15 % corresponde a fracturas naturales, (Ver figura 30).

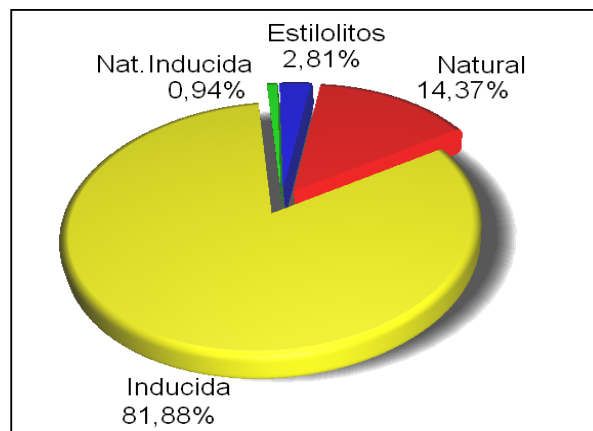


Figura 30. Porcentajes de tipo de fracturas en la formación Guadalupe.

Cuando se tiene en cuenta el tipo de esfuerzo, se observa que las fracturas generadas por esfuerzos de tipo compresivo predominan de manera significativa sobre este intervalo. Los esfuerzos compresivos están representados por el 91 %

del total de esfuerzos, quedando de esta manera en un segundo plano y sin casi representatividad los esfuerzos de tensión y cizalla respectivamente.

En la *figura 31* se puede ver la distribución de los porcentajes de los diferentes tipos de esfuerzos que generan fracturas en el intervalo corazonado de la formación Guadalupe.

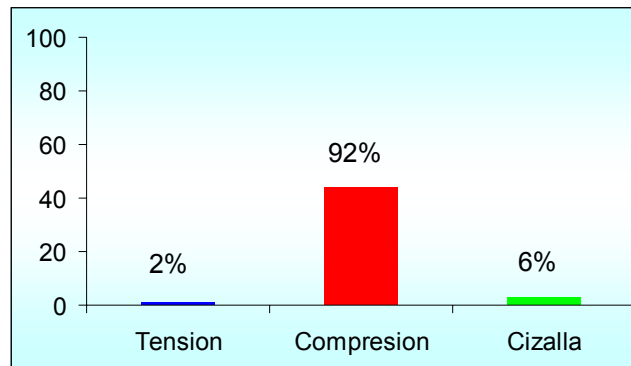


Figura 31. Tipos de esfuerzos que generan las fracturas en el intervalo corazonado de la formación Guadalupe.

Al tener claramente definidas las fracturas naturales se realiza el análisis estadístico de los parámetros que influyen directamente sobre el flujo de los fluidos. Entre dichos parámetros podemos ubicar la Apertura, perfil de la fractura y morfología de la pared.

▪ **Apertura.** Se caracterizaron 46 fracturas naturales, de las cuales las fracturas abiertas representan el 78%, y parcialmente abiertas el 22%, presentando excelentes condiciones para el flujo y acumulación de hidrocarburos, y comportándose como indicador de la existencia de canales de flujo. En la *figura 32* se puede observar la representación de la distribución de la variación del parámetro apertura en las fracturas de la Formación Guadalupe.

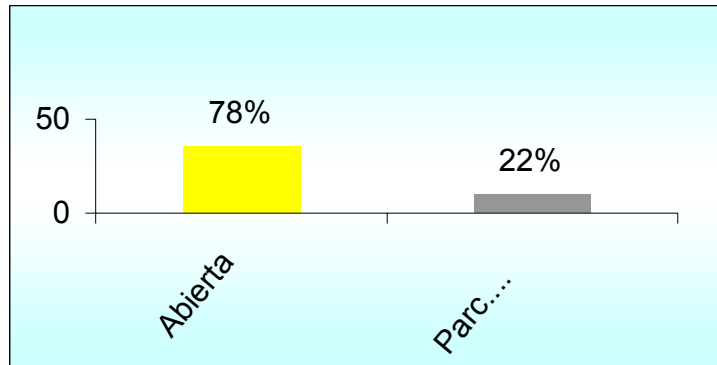


Figura 32. Distribución del tipo de Apertura para las fracturas caracterizadas en la Fm Guadalupe. Pozo I

▪ **Perfil de la Fractura.** Dentro de las fracturas naturales caracterizadas en este intervalo se lograron distinguir las diferentes fracturas con perfiles sinuosos y dentados dentro de las cuales las fracturas con perfil sinuoso representan el 87%, con perfil dentado el 13%, las fracturas con perfiles rectos se encuentran ausentes. Estos resultados nos dan una primera información sobre la tortuosidad del flujo de los fluidos, al haber ausencia de perfiles rectos y un alto porcentaje de perfiles sinuosos se puede deducir con claridad que la tortuosidad en este intervalo específico tendrá un carácter elevado, aumentando la resistencia que presentan los materiales al libre flujo de los hidrocarburos. La *figura 33* ilustra en porcentajes la presencia de los tipos de perfil de las fracturas de la formación Guadalupe.

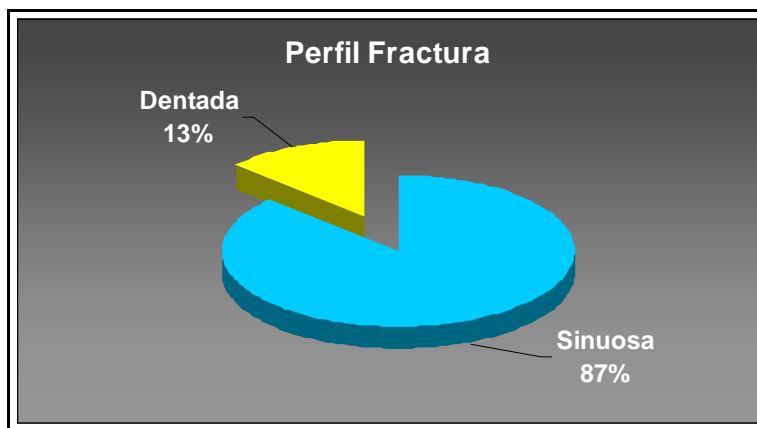


Figura 33. Distribución de los tipos de perfil de las fracturas en la formación Guadalupe.

▪ **Morfología de la pared.** De las 46 fracturas naturales caracterizadas en total para el intervalo corazonado de la formación Guadalupe, se obtuvo que las fracturas con pared rugosa representan el 54% y las fracturas con pared estriada el 22%. A pesar que hay un número significativo de fracturas en la cual la pared no es observable, las características de calidad para un buen flujo de fluido, se ven disminuidas por la tortuosidad que generan las fracturas con pared rugosa y estriada, que son las que prevalecen y aumentan a medida que se profundiza en las formaciones. La *Figura 34* representa la distribución porcentual del tipo de pared en la Formación Guadalupe.

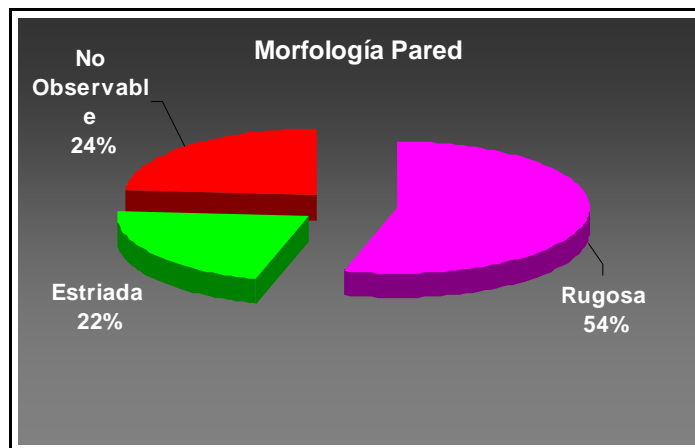


Figura 34. Distribución de los tipos de morfología de las paredes de las fracturas de la formación Guadalupe.

4.2.2. Caracterización de las fracturas para la formación Barco. En el intervalo corazonado perteneciente a la formación Barco fueron caracterizadas un total de 1019 fracturas, de las cuales solo el 9 % corresponde a fracturas naturales. Se observó de la misma manera que el porcentaje de fracturas inducidas no varía de manera significativa con respecto al número de fracturas inducidas encontradas en la formación Guadalupe.

En la *figura 35* se puede ver la variación en los porcentajes de los diferentes tipos de fracturas. Las fracturas naturales se encuentran en un menor grado de

ocurrencia con respecto a las fracturas inducidas y en un grado similar con respecto a los estilolitos y fracturas naturalmente inducidas.

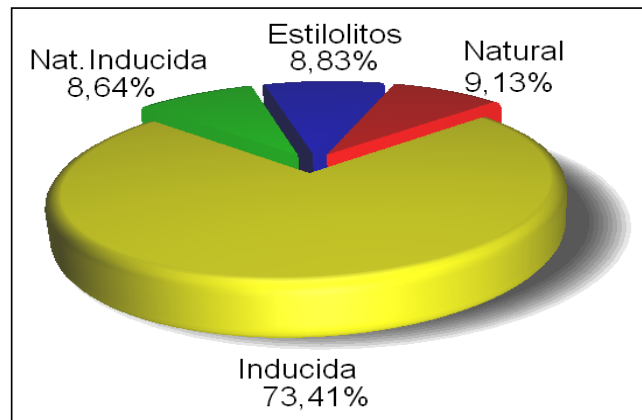


Figura 35. Distribución de los porcentajes de los diferentes tipos de fracturas en la formación Barco.

Al analizar el tipo de esfuerzo que predomina sobre la formación Barco se puede observar que las fracturas originadas por esfuerzos de tipo compresivo son las que predominan en este intervalo, las fracturas producidas por esfuerzos de tensión y esfuerzos de cizalla se encuentran en un 22 % y 19% respectivamente.

Los esfuerzos compresivos se ven reducidos en porcentaje respecto al porcentaje hallado para la formación Guadalupe donde estos esfuerzos son casi la totalidad de los mismos. Las fracturas producidas por esfuerzos de tensión y cizalla aumentan en este intervalo con relación al intervalo de la formación Guadalupe donde estos esfuerzos estaban en un muy bajo porcentaje. Esto da la idea de que a mayor profundidad predominan los esfuerzos de compresión y a medida que se disminuye la profundidad en el subsuelo, empiezan a aparecer los esfuerzos de tensión y posteriormente los esfuerzos de cizalla.

En la figura 36 se puede observar la variación de los diferentes tipos de esfuerzos presentes en el intervalo corazonado para la formación Barco.

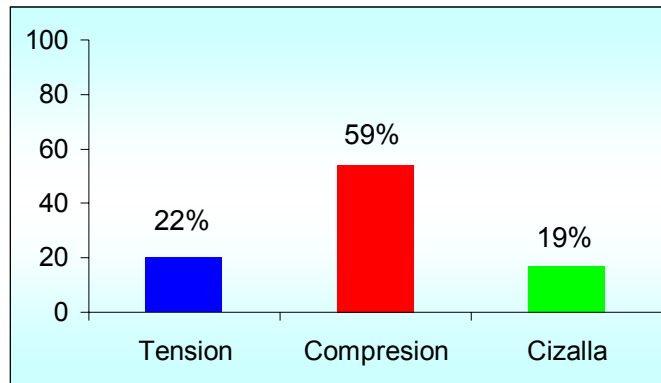


Figura 36. Distribución de los diferentes tipos de esfuerzos para la formación Barco.

Posteriormente se analizaron los diferentes atributos que influyen directamente sobre el flujo de los fluidos. Estos atributos son los mismos que se analizaron para el intervalo correspondiente a la formación Guadalupe. Los atributos están representados en la apertura, el perfil de la fractura y la morfología de la pared.

▪ **Apertura.** Dentro del total de las fracturas descritas en esta formación se caracterizaron 91 fracturas naturales, encontrándose que las fracturas abiertas representan el 80%, parcialmente abiertas 16% y parcialmente rellenas 1% lo cual indica hay una excelente condición para la acumulación y migración de hidrocarburos, también indica la existencia de canales de flujo. En la figura 37 se representa la distribución de la variación del parámetro apertura en las fracturas de la Formación Barco.

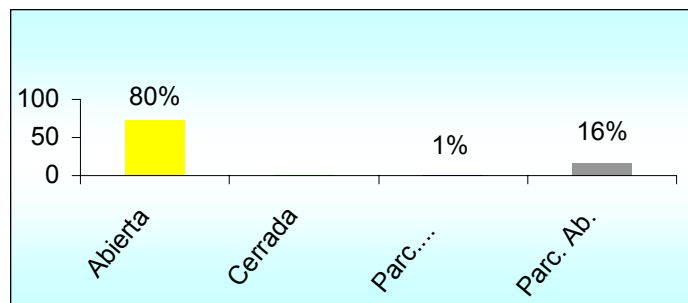


Figura 37. Distribución de la variación de la apertura en las fracturas de la formación Barco.

▪ **Perfil de la Fractura.** Se caracterizaron 91 fracturas naturales, encontrándose que las fracturas con perfil sinuoso representan el 92%, perfil dentado 5% y perfil recto 3%, esta información nos está indicando que la sinuosidad en el perfil de la fractura incrementa respecto a la formación Guadalupe, y aparecen fracturas con perfiles rectos, en estas fracturas con perfiles rectos el flujo de los fluidos no será tan tortuoso como en las fracturas con perfiles sinuosos y dentados. La *figura 38* ilustra el comportamiento del tipo de perfil en las fracturas de la formación Barco.

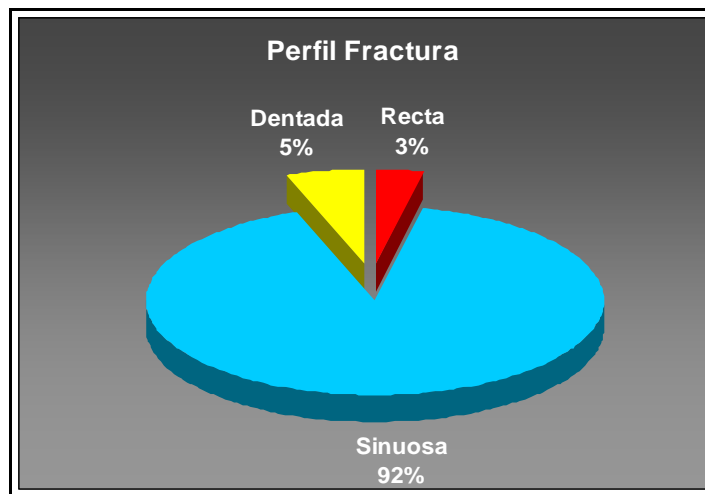


Figura 38. Distribución de los tipos de perfil de las fracturas en la formación Barco. Pozo H 11.

▪ **Morfología de la pared.** Dentro de las fracturas naturales caracterizadas para el intervalo corazonado de la formación Barco se encontró, que las fracturas con pared rugosa representan el 48%, con pared estriada el 24% y uniforme el 1%, y se tiene un 27% que no se puede observar. Esta información nos indica que las condiciones de flujo con respecto a la formación Guadalupe no varían en gran proporción debido a que los porcentajes de paredes estriadas y rugosas se mantienen casi en la misma proporción en las dos formaciones. En la formación Barco aparecen fracturas con paredes uniformes, pero su porcentaje es muy bajo comparado con las fracturas de paredes estriadas y rugosas. La *Figura 39* ilustra el comportamiento del tipo de pared en las fracturas de la Formación Barco.

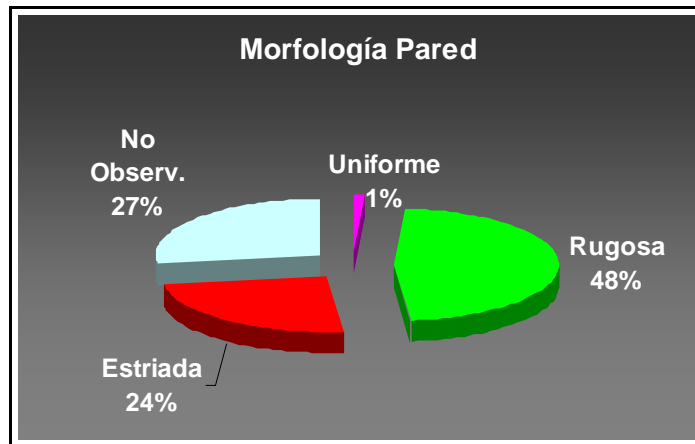


Figura 39. Distribución de los tipos de morfología de las paredes de las fracturas de la formación Barco.

4.3 CARACTERIZACIÓN DE LA INTENSIDAD DE FRACTURAMIENTO VS FACIES ENCONTRADAS EN LOS NÚCLEOS.

En la descripción de la relación de las facies con la intensidad de fracturamiento presente en ellas, es indispensable tener definidas las diferentes facies encontradas en los intervalos corazonados para cada formación. Además de tener claramente identificadas dichas facies es fundamental tener identificado el espesor de cada facies en profundidad y el porcentaje de ocurrencia de dichas facies en cada una de las formaciones estudiadas.

La intensidad de fracturamiento (**IF**), fue calculada para cada una de las facies encontradas en las formaciones Barco y Guadalupe, definida como el número de fracturas sobre el espesor de cada facies. Se observó que en las facies que presentaban un bajo espesor, los valores de intensidad de fracturamiento se elevaban de manera anómala y no mostraban la real ocurrencia de fracturas en dicha facies. Para evitar esta desviación en los resultados fue necesario normalizar el valor de la intensidad de fracturamiento, lo cual consistió en ponderar el valor de **IF** con el espesor de la formación, esto nos daba como resultado un valor de intensidad de fracturamiento normalizado (***IF**), el cual muestra de manera real la ocurrencia de las fracturas en las diferentes facies. Ver ecuaciones 1,2 y 3.

$$IF = \frac{N^{\circ}deFracturas}{Espesor} \quad (1)$$

$$IF^* = IF \times \frac{H(\%)}{100} \quad (2)$$

$$H(\%) = \frac{EspesordeFacies \times 100}{EspesorTotal} \quad (3)$$

4.3.1 Intensidad de fracturamiento vs Facies en la Formación Guadalupe.

Para la formación Guadalupe fueron descritos un total de 61 ft. Estos 61 ft equivalen a un 27 % del espesor de esta formación para el pozo I.

En los 61 ft descritos fueron caracterizados 5 tipos diferentes de facies. Las facies encontradas fueron: **Abre** (Cuarzoarenita Bioturbada con relictos de estratificación cruzada), **FI** (Arcillolita-Limolita laminada), **Ab** (Cuarzoarenita Bioturbada), **Cmo** (Conglomerado Oligomígtico), **Fbri** (Arcillolita-Limolita Bioturbada con relictos de Laminación).

De estas facies encontradas, las que tienen un mayor porcentaje de ocurrencia son las conformadas por cuarzo arenitas ya sean bioturbadas, con estratificación o laminadas. En la *figura 40* se puede apreciar la variación de la ocurrencia de los diferentes tipos de facies presentes en la formación Guadalupe.

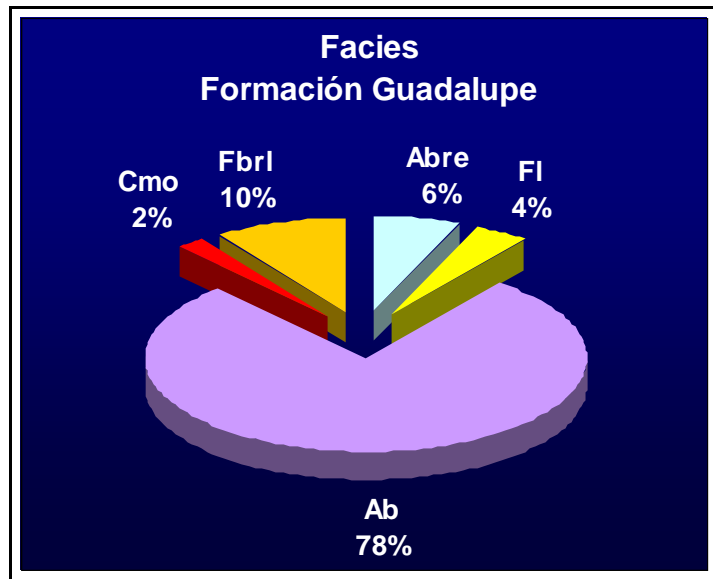


Figura 40. Variación de los diferentes tipos de facies de la formación Guadalupe.

Al analizar la ocurrencia de las fracturas en los intervalos a diferentes profundidades, se pueden observar los diferentes intervalos en los cuales aumenta la ocurrencia de las fracturas y por lo tanto el índice de fracturamiento de las facies que se encuentran a dichas profundidades. En la figura 41 se puede ver los diferentes picos que indican intervalos en los cuales la ocurrencia de fracturas es mayor, con ello se puede identificar los intervalos en profundidad que están siendo afectados por un número mayor de fracturas. A su vez se puede ver ciertos intervalos en los cuales los picos se disparan de manera desproporcionada, estos intervalos corresponden a zonas cataclásticas o zonas de falla.

Los intervalos en los cuales los picos presentan valores elevados se convierten en zonas de interés en cuanto a flujo de fluidos, tanto como zonas de mayor producción debido al aporte de fluidos provenientes de las fracturas como zonas de posible migración.

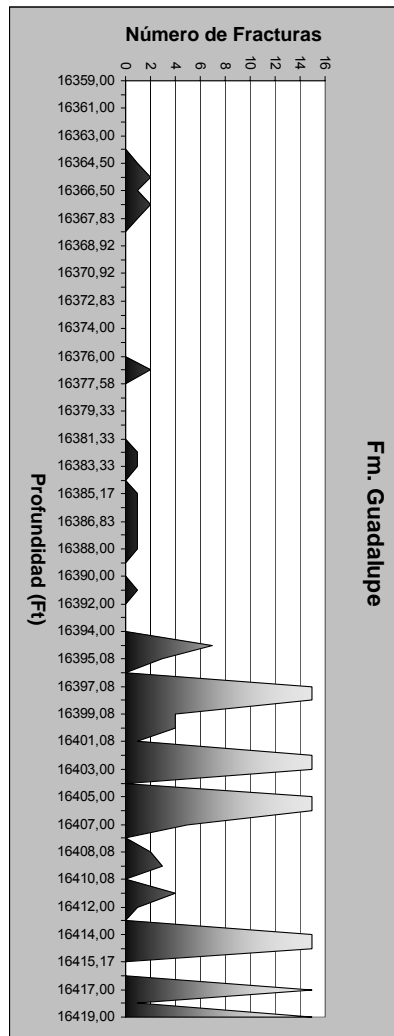


Figura 41. Ocurrencia de fracturas en profundidad. Formación Guadalupe.

En el análisis del fracturamiento presente en la formación Guadalupe se identificaron los valores de intensidad de fracturamiento para las diferentes facies ubicadas en profundidad a lo largo del pozo. En la *tabla 3* se observan las diferentes profundidades a las cuales se encuentra cada intervalo de facies y a la vez los espesores de las mismas, sumado a ello se puede ver los tipos de fracturas encontradas en cada intervalo, la intensidad de fracturamiento (**IF**) y la intensidad de fracturamiento normalizada para evitar desviaciones en los intervalos de bajo espesor (***IF**).

Tope	Facies	H	Naturales	Inducidas	Nat-Ind	Estilolitos	IF	* IF
16359	Abre	2,16666667	0	3	0	0	0	0
16362	FI	2	0	14	0	1	0	0
16364	Ab	3,83333333	6	2	3	1	1,56521739	0,114832536
16367,8333	Cmo	1,08333333	0	1	0	0	0	0
16371,9167	Ab	12	7	107	0	5	0,58333333	0,133971292
16387,8333	Abre	1,16666667	0	3	0	1		0
16389	Ab	2	0	15	0	0		0
16391	Fbri	5,08333333	11	9	0	1	2,16393443	0,210526316
16396,0833	Ab	22,91666667	22	108	0	0	0,96	0,421052632

Tabla 3. Valores de intensidad de fracturamiento en profundidad para las facies de la formación Guadalupe.

Con los valores de esta tabla es posible generar un grafico en el cual se pueda diferenciar claramente cada facies en profundidad y que a su vez indique el índice de fracturamiento normalizado, esto para identificar la facies que presenta el mayor índice de fracturamiento. En la figura 42 Se pueden observar todos estos parámetros, las facies en profundidad, el espesor de cada una de las facies y su respectivo valor de intensidad de fracturamiento.

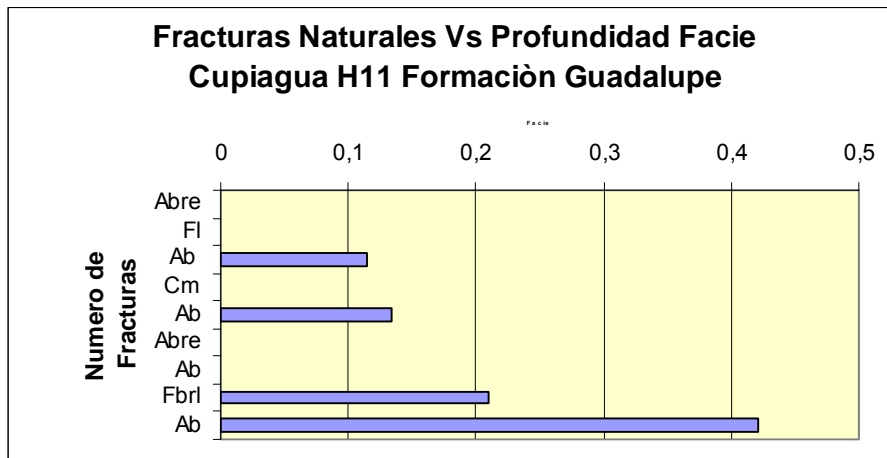


Figura 42. Intensidad de fracturamiento vs facies en profundidad.

Para tener identificadas las facies que contiene el mayor índice de fracturamiento se suman todos los espesores correspondientes a cada facies y se grafican estos

espesores totales contra el índice de fracturamiento para todo el espesor de cada facies en el intervalo corazonado.

Para la formación Guadalupe la facies que se encuentra con el mayor índice de fracturamiento es la facies compuesta por Cuarzoarenitas Bioturbadas **Ab**, (ver figura 43). Las cuarzoarenitas con relictos de estratificación y el conglomerado no se encuentran fracturadas. Otra facies que aparece con un alto índice de fracturamiento es la Arcillolita-Limolita Bioturbada con relictos de laminación Fbri , pero estas facies no tienen importancia a la hora de analizar la acumulación y el flujo de fluidos a través de estas formaciones reservorio.

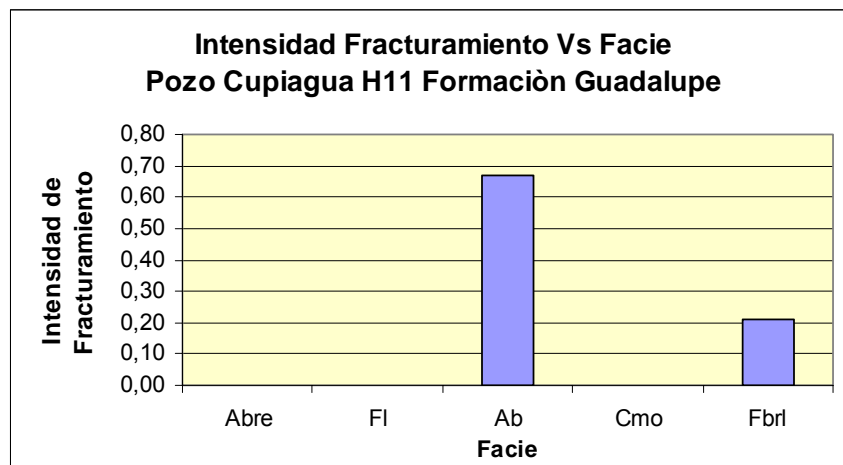


Figura 43. Intensidad de fracturamiento vs facies, formación Guadalupe.

En la tabla 4 se puede observar el valor de los espesores totales de cada facies en el intervalo corazonado para la formación Guadalupe, también se muestra cada tipo de fractura encontrado en los espesores y su respectivo índice de fracturamiento.

Facie	H	Naturales	Inducidas	Nat-Ind	Estilolitos	IF	IF*
Abre	3,33	0	6	0	1	0,00	0,00
FI	2,00	0	14	0	1	0,00	0,00
Ab	40,75	35	232	3	6	0,86	0,67
Cmo	1,08	0	1	0	0	0,00	0,00
Fbri	5,08	11	9	0	1	2,16	0,21

Tabla 4. Espesor total de cada facie y su indice de fracturamiento para la formación Guadalupe.

4.3.2 Caracterización de la intensidad de fracturamiento vs facies. Formación Barco. Para la formación Barco fueron descritos un total de 253 ft. Estos 253 ft equivalen a un 55,5 % del espesor de esta formación para el pozo I.

En los 253 ft descritos fueron caracterizados 6 tipos diferentes de facies. Las facies encontradas fueron: **Abre** (Cuarzoarenita Bioturbada con relictos de estratificación cruzada), **Fb** (Arcillolita-Limolita Bioturbada), **Ab** (Cuarzoarenita Bioturbada), **Acep** (Cuarzoarenita Conglomeratica con estratificación cruzada con Pebbles), **Fc** (Arcillolita-Limolita Carbonosa), **Abri** (Cuarzoarenita Bioturbada con relictos de Laminación).

Las facies que se encuentran con mayor ocurrencia en el intervalo corazonado para la formación Barco son las cuarzoarenitas Bioturbadas y las cuarzoarenitas bioturbadas con relictos de estratificación cruzada. Las Arcillolita-Limolitas se encuentran en muy baja proporción con respecto a las otras facies. (Ver figura 44).

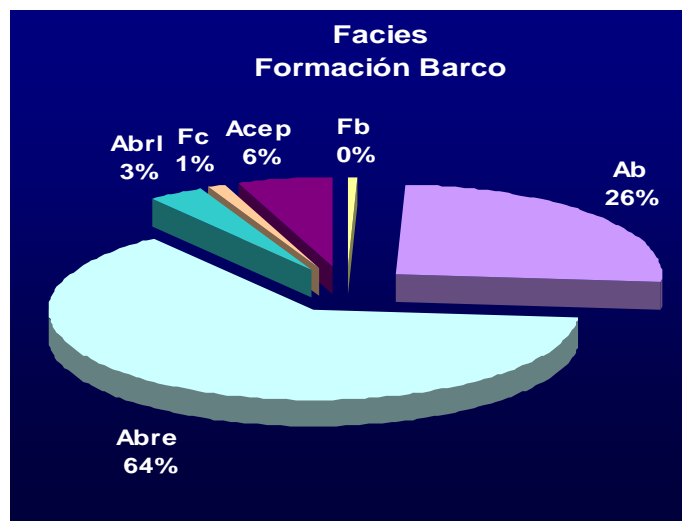


Figura 44. Variación de los diferentes tipos de facies de la formación Barco.

Al analizar la ocurrencia de las fracturas en los intervalos a diferentes profundidades como se hizo para la formación Guadalupe, se puede observar claramente los diferentes picos en los cuales aumenta la ocurrencia de las fracturas y por lo tanto el índice de fracturamiento de las facies que se encuentran

a dichas profundidades. En la *figura 45* se pueden ver los diferentes picos que indican intervalos en los cuales la ocurrencia de fracturas es mayor. Se observa que a partir de una profundidad de 15790 ft los picos que representan mayor ocurrencia de fracturas disminuyen y se presentan muy aislados, indicando que el intervalo de la formación se encuentra menor fracturado hacia su base. También se observan profundidades en las cuales los picos se disparan de manera anómala, estos puntos en la grafica están indicando zonas cataclásticas o zonas de falla. En estos intervalos el fracturamiento es muy alto y en general presentan un aspecto caótico.

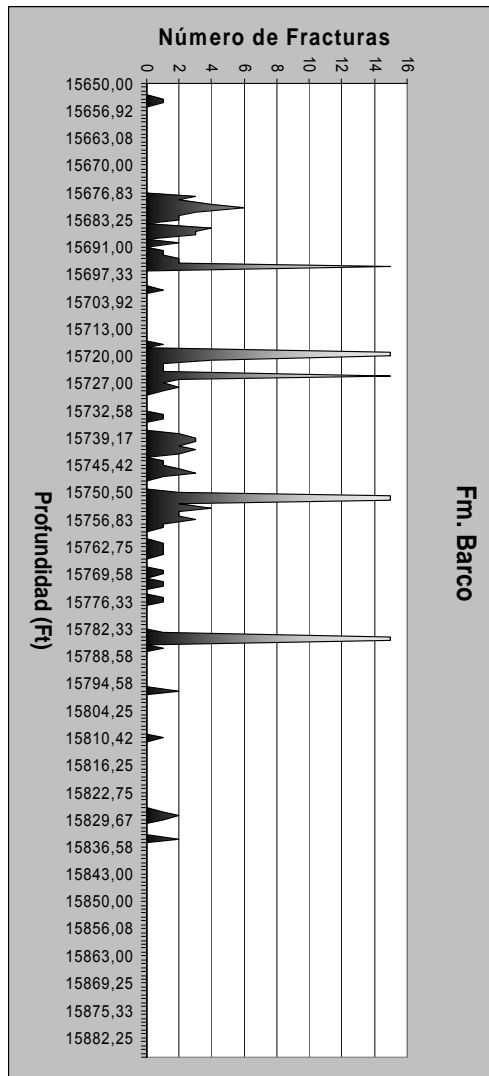


Figura 45. Ocurrencia de fracturas en profundidad. Formación Barco.

En la *tabla 5* se muestran los intervalos de las diferentes facies presentes en la formación Barco con su respectiva ubicación en profundidad y los diferentes tipos de fracturas que están afectando cada intervalo. También se puede observar los diferentes valores de intensidad de fracturamiento para cada intervalo de las facies.

Tope	Facies	H	Naturales	Inducidas	Nat-Ind	Estilolitos	IF	* IF
15650	Ab	8,75	1	13	0	0	0,11428571	0,004578405
15661,0833	Abre	8	0	21	0	2	0	0
15674	Ab	42	31	236	29	28	0,73809524	0,141930561
15716	Abri	3	2	6	0	9	0,66666667	0,00915681
15719	Abre	17,33333333	12	9	47	18	0,69230769	0,054940862
15738,1667	Fc	1	3	0	0	0	3	0,013735216
15739,1667	Abre	36,75	32	30	6	20	0,8707483	0,146508966
15783,0833	Abri	3,91666667	2	26	0	1	0,5106383	0,00915681
15787	Fb	1	1	2	0	2	1	0,004578405
15788	Acep	12,75	2	7	0	3	0,15686275	0,00915681
15800,75	Abre	5,5	0	16	0	0	0	0
15806,25	Fc	1,75	0	1	0	1	0	0
15808	Abre	44,08333333	5	123	6	4	0,11342155	0,022892026
15853,0833	Ab	4	0	53	0	0	0	0
15857,0833	Abre	27,4166667	0	207	0	7	0	0
15902	Ab	2,16666667	0	0	0	0	0	0

Tabla 5. Intensidad de fracturamiento vs facies en profundidad. Formación Barco.

Al igual que en la formación Guadalupe, con los valores de esta tabla se genera un grafico en el cual se puede diferenciar claramente cada facies en profundidad indicando el índice de fracturamiento normalizado y el espesor correspondiente de cada intervalo.

(Ver grafico 46), en el es posible apreciar la intensidad de fracturamiento para cada intervalo de facies ubicado en profundidad a lo largo del pozo.

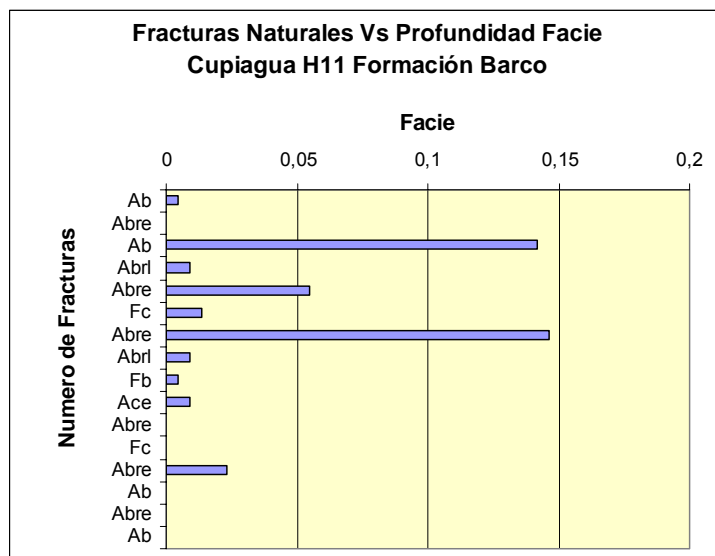


Figura 46. Intensidad de fracturamiento vs facies en profundidad. Formación Barco

Si se suma el espesor total de las facies y se caracterizan las fracturas presentes en cada espesor y a su vez se calcula la intensidad de fracturamiento normalizada, se puede tener claramente definida la facies que presenta un mayor índice de fracturamiento a lo largo de todo el espesor corazonado para la formación Barco en este pozo.

En la *tabla 6* se puede ver el espesor total de cada una de las facies identificadas en la formación Barco y la intensidad de fracturamiento para cada una de ellas.

Se puede ver con claridad que la facies que presenta mayor ocurrencia a lo largo del intervalo de la formación Barco es la que presenta también mayor índice de fracturamiento, esta facies es la Abre, compuesta por Cuarzoarenitas Bioturbadas con Relictos de Estratificación Cruzada, (ver *tabla 6*).

Facie	H	Naturales	Inducidas	Nat-Ind	Estilolitos	IF	IF*
Fb	1,00	1	2	0	2	1,00	0,00
Ab	56,92	32	302	29	28	0,56	0,15
Abre	139,08	49	406	59	51	0,35	0,22
Abri	6,92	4	32	0	10	0,58	0,02
Fc	2,75	3	1	0	1	1,09	0,01
Acep	12,75	2	7	0	3	0,16	0,01

Tabla 6. Espesor total de cada facie y su indice de fracturamiento para la formación Barco.

Las facies con mayor índice de fracturamiento se pueden observar en la figura 47, en ella se muestra el índice de fracturamiento que presenta cada facie sumando su espesor total dentro del intervalo corazonado para la formación. En la formación Barco la facie que presenta el mayor índice de fracturamiento es la facie Abre, seguida por la facie Ab y por último las facies Abri y Acep con un índice de fracturamiento mucho menor. Las facies Fb y Fc también presentan un pequeño índice de fracturamiento pero ellas no tienen gran importancia dentro de este estudio, ya que ellas no tienen trascendencia en el análisis de la acumulación y migración de fluidos.

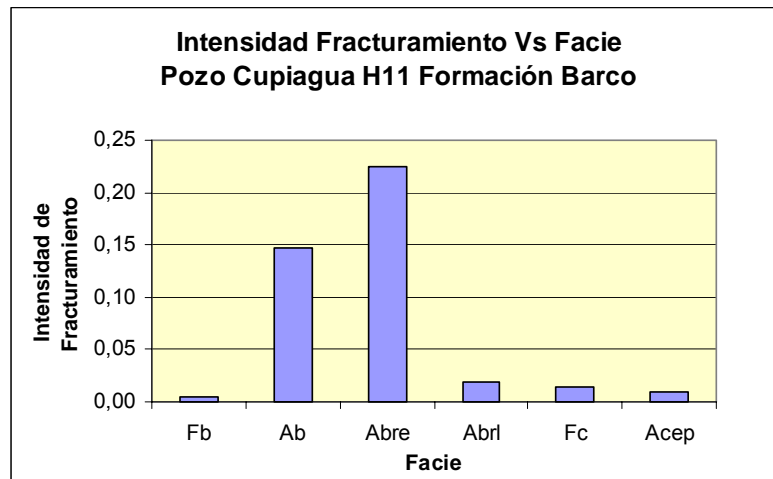


Figura 47. Intensidad de fracturamiento vs facies, formación Barco.

4.4 ANÁLISIS PETROGRÁFICO

Para el estudio se trabajaron tres secciones delgadas ubicadas dentro de los intervalos superior e inferior de las formaciones Barco y Guadalupe respectivamente, y el propósito es contribuir en la reconstrucción de la historia deposicional y diagenética de estas formaciones. Esta historia diagenética y deposicional es un aparte puntual solo para los sitios donde se ubican las tres secciones delgadas. Petrográficamente, las rocas analizadas corresponden a cuarzoarenitas, con inmadurez textural, con ausencia de matriz y cemento, y con contactos tangenciales entre los granos, de la Formación Barco, y areniscas fosfáticas de la Formación Guadalupe. Las rocas siliciclásticas, diagenéticamente fueron afectadas por compactación, sobrecrecimiento de cuarzo, alteración de feldespatos, micas, fragmentos de roca, entre otros, aunque no se observó recristalización de arcillas, lo cual puede perjudicar enormemente la porosidad y permeabilidad de la roca, aunque, el lavado de la matriz, la disolución del cemento y la alteración de algunos minerales pudieron haber favorecido a estas propiedades petrofísicas. Las rocas fosfáticas presentan evidencias de cementación fosfática, lo cual disminuye la porosidad y permeabilidad de la roca. A continuación se describen los rasgos petrográficos observados en las secciones delgadas analizadas:

4.4.1 Análisis petrográfico sección 1 (Formación Barco). Se trata de una roca homogénea, manteniendo su estructura y composición igual a lo largo de toda la placa, no se observa ningún tipo de laminación, estratificación o zonación. Las partículas que componen la roca se encuentran distribuidas al azar a lo largo de la sección y no presentan ningún tipo de imbricación.

La roca presenta un grado moderado de calibrado y se encuentra granosoportada, la matriz se encuentra ausente en la roca y el cemento no es claramente evidenciable.

El grado de porosidad en la roca es considerable, en un 12 % aproximadamente, de la cual la porosidad primaria corresponde al 8% y la porosidad secundaria aportada por las fracturas presentes en la muestra corresponde al 4%. La porosidad se esta viendo beneficiada por el fracturamiento presente en la muestra. (Ver figura 48).

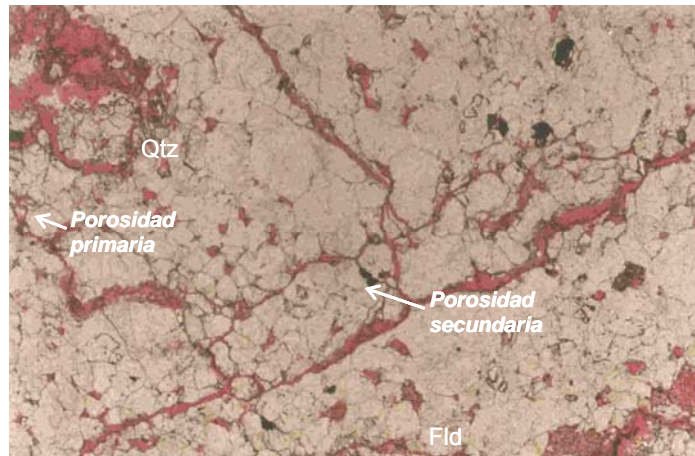


Figura 48. Fotografía de la sección 1. Se observa la porosidad primaria y secundaria en la roca en PPL, aumento 8X.

Las partículas de la muestra varían en tamaños de arena media en 30% y partículas de tamaño arena gruesa en un 5% un alto porcentaje de partículas de tamaño arena fina aproximadamente un 75% del total de las partículas que conforman la muestra.

La roca está compuesta casi exclusivamente de cuarzo (97%), con un bajo porcentaje de feldespato (2%) y minerales accesorios (1%) representados por moscovita y circón, y se clasifica como cuarzo arenita de grano fino a medio con un calibrado moderado y granos de tamaño arena media alargados y subangulares y granos de tamaño de arena fina con buena esfericidad y subangulares. La roca en general presenta una inmadurez textural con ausencia de matriz y cemento, y con contactos tangenciales entre los granos. (Ver figura 49).

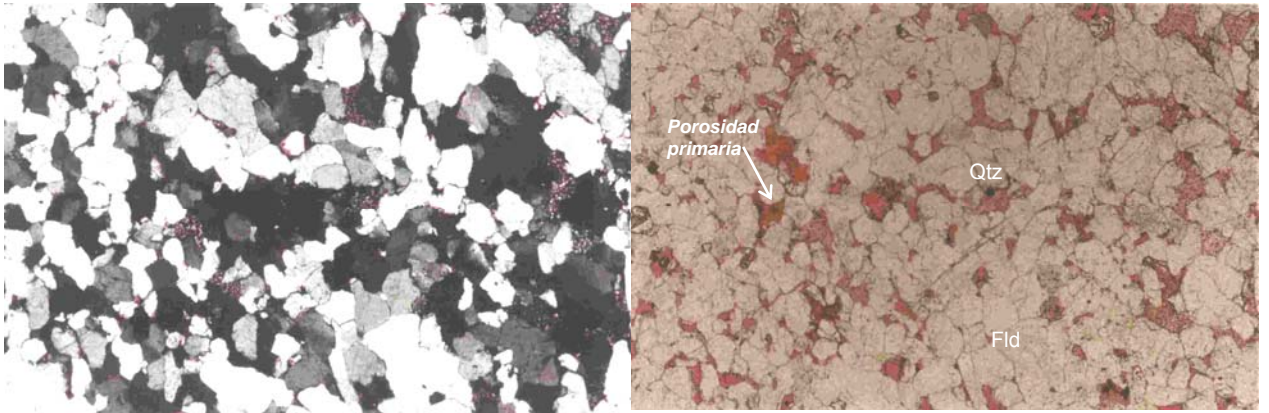


Figura 49. (der) textura de la roca en XPL, aumento 8X ; (Izq) Porosidad primaria de la roca en PPL, aumento 8X.

Los granos de cuarzo se encuentran en su gran mayoría fracturados, los de mayor tamaño son alargados y subangulares y los de menor tamaño son subangulares con buena esfericidad. Los feldespatos se encuentran alterados y con un aspecto moteado, presentan un grado de teñido de color rosado claro debido al epócico de color rojo fluorescente con que fueron impregnadas las muestras, estos granos se distinguen de la porosidad ya que su color rosado no es tan marcado como el que muestra la porosidad intergranular que presenta la roca. Los minerales accesorios como moscovita y circón se encuentran diseminados en la roca.

La cementación en la roca está ausente, lo cual conduce a un aumento en su porosidad. No obstante, en algunos sectores la roca está bien cementada por cuarzo (autigénico) secundario en forma de sobrecrecimientos sobre los granos detríticos de cuarzo, (ver figura 50). Donde los sobrecrecimientos están bien desarrollados, la forma general de los granos ha cambiado de granos redondeados a granos subhedrales de contorno hexagonal.

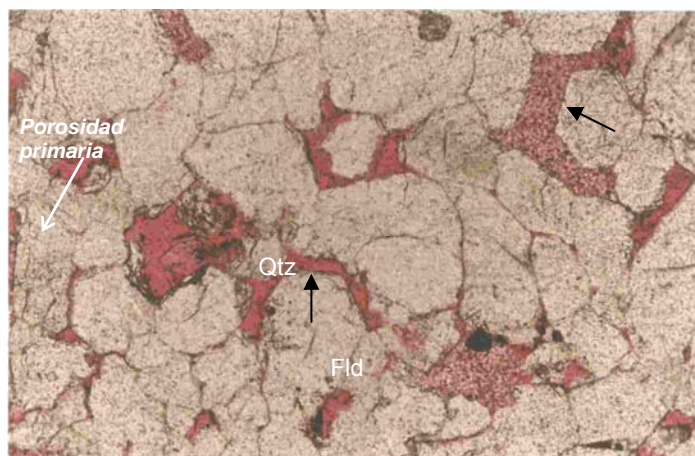


Figura 50. Fotografía en la cual se ilustra la porosidad primaria de la roca, así como fenómenos de sobrecrecimiento sobre granos detríticos de cuarzo, indicados por flechas, aumento 20X, en PPL.

4.4.2 Análisis petrográfico sección 2 (Formación Barco).

Roca con condiciones de textura, estructura y composición Homogéneas. Sin ningún tipo de laminación o variación composicional a lo largo de la placa. Las partículas que conforman la roca se encuentran distribuidas al azar y de una manera homogénea a lo largo de toda la muestra y no presentan tipo alguno de imbricación.

La roca presenta un calibrado moderado y se encuentra granosoportada. La muestra presenta una pequeña proporción de matriz compuesta por arena de grano muy fino y de composición silíceo. La roca presenta una porosidad del 12 % aproximadamente, esta porosidad solo pertenece a porosidad primaria ya que en la muestra no se observan fracturas claramente definidas que aporten a esta porosidad. Las partículas se presentan en tamaño de arena gruesa en un 80%, un 15 % de tamaño arena media y un 5 % de partículas de tamaño gránulos.

Se observan granos de cuarzo en un 96 % de la composición de la roca y un 3 % de composición de feldespatos. Los granos de cuarzo se encuentran con baja esfericidad y subangulares y alargados en un 70% y se observa una proporción de granos de cuarzo que tienen buena esfericidad y subangulares pero de menor tamaño que los alargados estos conforman un 30% aproximadamente del total de granos de cuarzo presentes en la sección. Se observa un contacto tangencial entre los granos de cuarzo. Los feldespatos se encuentran alterados y presentan

un aspecto moteado y un color rosado claro. Estos están distribuidos homogéneamente en la roca y forman contactos netos y bien definidos con los granos de cuarzo. Los fragmentos de roca en la muestra alcanzan el 1%, estando compuestos por cuarzoarenita de grano muy fino, cuyos granos de cuarzo se alcanzan a identificar claramente, siendo subangulares y presentando buena esfericidad.

En algunos sectores se observan granos subredondeados de gran tamaño se caracterizan por presentar cristales de cuarzo en diferentes orientaciones, definiendo así agregados de cuarzo policristalino (Figura 51 Izq), en los cuales los límites entre cristales de cuarzo son suturados (Figura 51 Der). Este tipo de agregados son característicos de una fuente metamórfica.

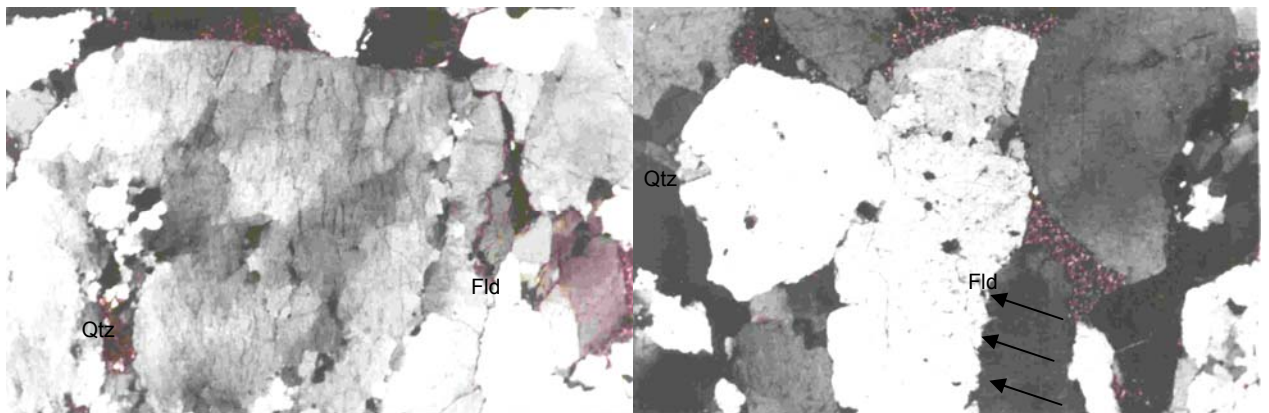


Figura 51, (Izq) fragmentos de cuarzo policristalino en XPL, aumento 8X; (Der) solución por presión y contactos suturados entre granos de cuarzo, indicados por flechas, en XPL, aumento 8X.

La roca está compuesta por cuarzo (94%), con un bajo porcentaje de feldespato (5%) y fragmentos de roca (1%), y se clasifica como cuarzo arenita de grano de grano grueso a muy grueso con un mal calibrado y granos subangulares y alargados. Texturalmente, la roca es inmadura y con contactos tangenciales y claramente definidos entre los gránulos, con un alto grado de porosidad primaria aproximadamente de un 12%, y con una pequeña fracción de matriz, de grano fino y composición silicea.

La cementación en la roca está ausente, lo cual conduce a un aumento en su porosidad. Otros fenómenos observados en las rocas podrían corresponder a solución por presión, la cual donde es más intensa, mostrará contactos suturados entre granos de cuarzo. Este fenómeno igualmente producirá contactos irregulares y ondulados.

4.4.3 Análisis petrográfico sección 3 (Formación Guadalupe). La muestra presenta un apariencia homogénea, manteniendo las mismas características composicionales y estructurales a lo largo de toda la placa. La roca está compuesta por cuarzo (85%), con un bajo porcentaje de feldespato (5%) y fosfato autigénico (10%).

El feldespato aparece en la roca con una apariencia moteada y tomando una coloración de rosado claro debido a la impregnación de la muestra con resina rojo fluorescente, estos feldespatos aparecen a lo largo de los contactos de los cristales de cuarzo. Los fosfatos al igual que los feldespatos aparecen ocupando los espacios a lo largo de los contactos entre los granos de cuarzo de tamaño arena muy gruesa. La muestra puede clasificarse como una cuarzoarenita fosfática de grano medio a grueso con un mal calibrado y granos subangulares y alargados, granosoportada y con presencia de una matriz de grano fino de composición silicea en un 60 % y composición fosfática en un 40%. La roca presenta una inmadurez textural claramente definida.

La roca contiene fosfato autigénico en forma de carbonato fluorapatito criptocristalino conocido como “colofana”, la cual ocurre como pellets (*Figura 52 a,b*) en forma de nódulos de color amarillento a pardorrojizo oscuro y carácter isotrópico. En algunos sectores este fosfato también ocurre como masas de grano muy fino entre los granos de cuarzo (*Figura 52 c,d*), tomando una coloración rojiza más oscura que la que exhiben los feldespatos. Los pellets se presentan generalmente fracturados.

Una mezcla de granos de cuarzo subangulares a subredondeados y pellets fosfáticos redondeados pueden indicar un origen complejo para este tipo de roca.

Los pellets pueden interpretarse como detritos o haberse formado diagenéticamente. La cantidad de sílice estaría relacionado principalmente a la presencia de minerales alogénicos (cuarzo detrítico). El cemento está formado por granos fosfáticos de grano fino de colofana y quizás sílice.

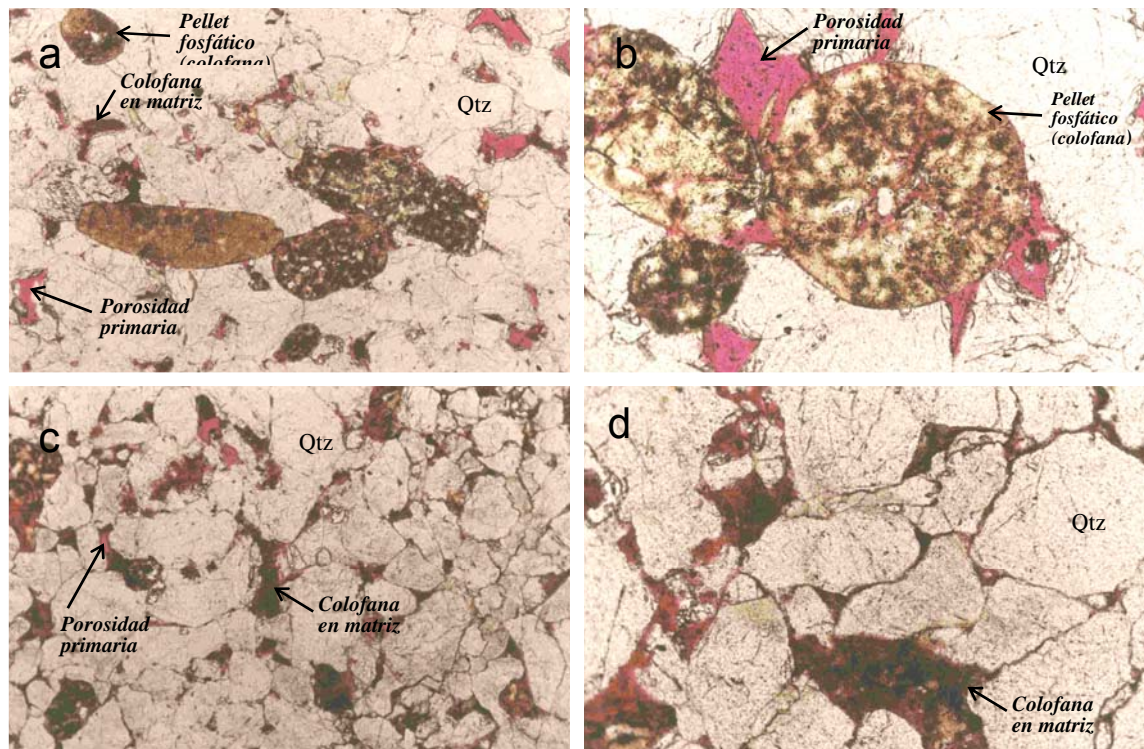


Figura 52. (a) y (b) morfologías de las estructuras de los pellets fosfáticos en PPL, aumento 8X y 20X, respectivamente, (c) y (d) colofana a lo largo del contacto entre granos de cuarzo, aumento 8X y 20X, respectivamente.

La ocurrencia de colofana de origen alogénico se asocia a fragmentos de conchas y pellets clásticos orgánicos, y en algunos casos con granos detríticos, mientras que la de origen autigénico ocurre como reemplazamientos de arcillas (illita y clorita rica en Fe) y óxidos de hierro, como sobrecrecimientos y bordes de granos de cuarzo detrítico, y también como precipitados y/o reemplazamientos de conchas fósiles, probablemente arcillas, y otros sitios de nucleación. En algunos estudios el análisis de valores de porosidad en corazones comparados con la

ocurrencia de colofana muestra correlaciones muy altas y estrechas entre la abundancia de colofana autigénica con la mayor porosidad de la roca. La presencia de colofana autigénica así parece inhibir los sobrecrecimientos sintaxiales de cuarzo de la misma manera que las arcillas autigénicas, preservando, al menos en parte, la porosidad de la roca.

4.5 ANÁLISIS DE MICROFLUORESCENCIA

Este análisis se realizó sobre las mismas muestras trabajadas en el estudio petrográfico. En el análisis de microfluorescencia se pudo observar fracturamiento que no es aparente bajo la luz polarizada en la petrografía convencional.

4.5.1 Análisis de microfluorescencia, sección 1 formación Barco. En esta sección se pudo apreciar que un porcentaje significativo de partículas de tamaños menores son arrancadas de las paredes de las fracturas que tienen abertura considerable y son depositadas en zonas donde se acumulan, formando pequeños aglomerados de partículas muy pequeñas a finas. Estos aglomerados de partículas finas actúan como tapones que obstaculizan el libre flujo de los hidrocarburos a través de las fracturas. Este tipo de fenómeno hace que aumente aun más la tortuosidad del flujo, ya que los fluidos que migran a través de las fracturas se enfrentan a zonas en las cuales las fracturas se encuentran taponadas y deben buscar nuevas rutas de migración. (*Ver figura 53*).

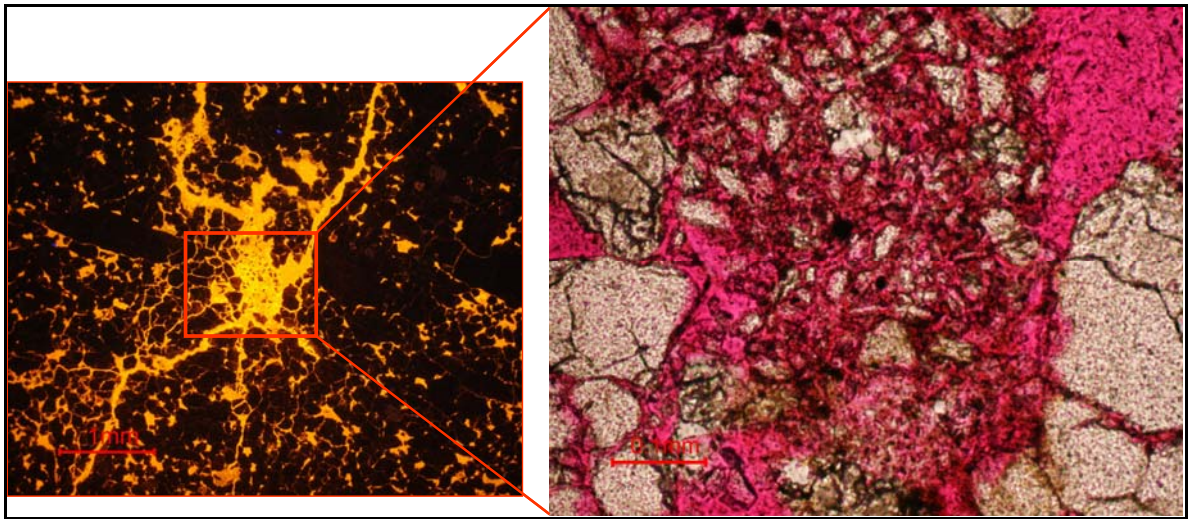


Figura 53. Fotografía de zona de acumulación de material fino arrancado de las paredes de las fracturas.

En la muestra se observó un alto porcentaje de porosidad secundaria favorecido por microfisuras con una abertura considerable con perfiles sinuosos. La presencia de dichas microfisuras con aberturas mayores, favorece al flujo de los hidrocarburos pero a su vez dichas microfisuras presentan perfiles sinuosos que aumentan la tortuosidad del flujo. También existen zonas como la anteriormente mencionada, donde se acumulan partículas de grano más fino arrancadas de las paredes de las fisuras, estas zonas se convierten en un problema para la libre interconexión de la porosidad de la matriz de la roca por medio de las fisuras.

Sobre esta sección se realizaron dos scanlines, los dos perpendiculares a las direcciones preferenciales de las dos familias de microfisuras observadas en la muestra. (Ver figura 54).

Mediante estos scanlines se obtuvo una idea de la intensidad de fracturamiento de la muestra, y se analizó cada una de las familias de microfisuras presentes en la muestra. Los parámetros que se midieron en las fisuras cruzadas por el scanline fueron: la orientación aparente, la abertura de las fisuras (*medida en micras, 1micra=0,001mm*), el perfil de las fisuras y por último se calculó una

intensidad de fracturamiento para la sección de acuerdo al número de fracturas que eran cruzadas por la línea del scanline.

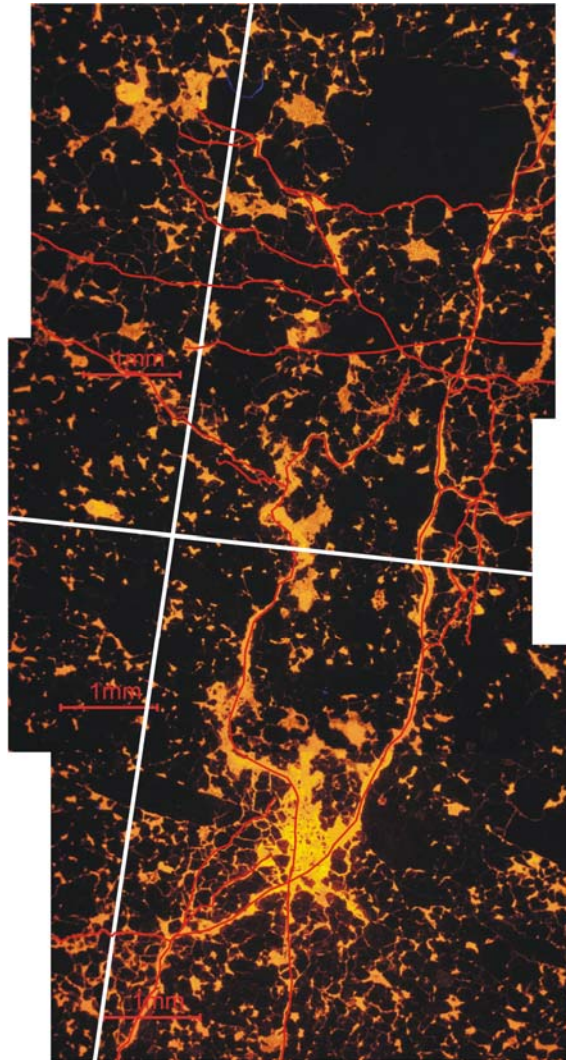


Figura 54. Mosaico de fotografías donde se ilustran las Microfracturas presentes de color rojo. Y las dos líneas blancas corresponden a los dos scanlines tomados a lo largo de la sección 1

En la *Figura 54* se observan las fracturas coloreadas de rojo, se evidencian claramente dos familias de fracturas con orientaciones preferenciales. Las dos líneas blancas corresponden a cada uno de los scanline realizados sobre la placa, ellos trazados perpendicularmente a cada una de las direcciones preferenciales de las dos familias de fracturas identificadas. Debe aclararse que la orientación de las microfracturas al igual que con las macrofracturas observadas

en los núcleos, es una orientación aparente ya que el core se encontraba girado y las secciones fueron orientadas siguiendo como eje de referencia el plano de corte del core.

Del scanline subhorizontal se pudo identificar que las fracturas pertenecientes a esta familia, tienen una apertura en micras considerable, siendo esta la mayor apertura de fracturas encontrada en las secciones analizadas. (Ver figura 55).

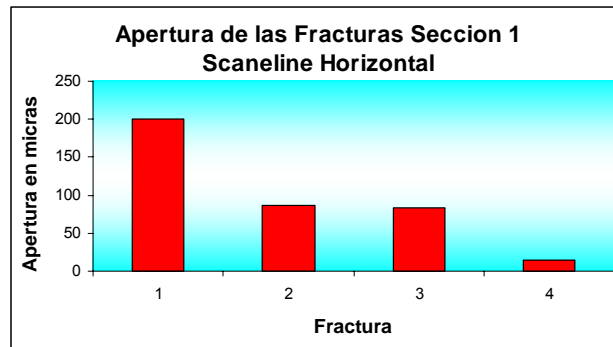


Figura 55. Apertura de las fracturas en micras. Scanline Subhorizontal de la sección 1.

En la sección encontramos fracturas con espesores hasta de 200 micras, estas fracturas son claves en el flujo de los hidrocarburos. Todas estas fracturas se encontraban abiertas y sin ningún tipo de relleno, a su vez presentaban perfiles sinuosos en su totalidad, factor que aumenta la tortuosidad del flujo.

En el scanline subvertical se observó una mayor ocurrencia de fracturas pero la distancia de este aumenta considerablemente con respecto al scanline subhorizontal, esto hace que la intensidad de fracturamiento presente en el primer scanline se mantenga superior, (ver figura 56).

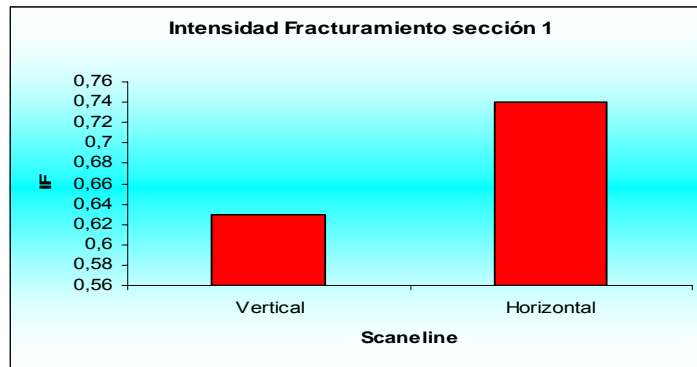


Figura 56. Intensidad de fracturamiento presenta en la sección 1

Las fracturas que fueron atravesadas en el scanline subvertical presentaron una menor apertura con respecto a las fracturas atravesadas por el primer scanline. En la figura 57 se observa el valor de la apertura para las fracturas atravesadas por el scanline subvertical.

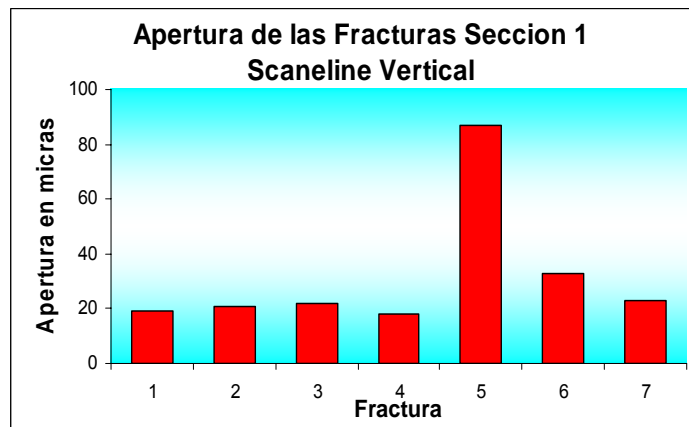


Figura 57. Apertura de las fracturas en micras. Scanline Subvertical de la sección 1.

Al igual que las microfracturas anteriores estas fracturas se encuentran en su totalidad abiertas y no presentan ningún tipo de puentes cristalinos ni relleno, el perfil de estas microfracturas sigue siendo sinuoso lo cual sigue aumentando la tortuosidad del flujo de los fluidos a lo largo de la roca.

Cuando miramos las dos familias de fracturas presentes en la muestra observamos que se presentan de manera casi ortogonal. Figura 58.

Orientación Aparente Microfracturas Sección 1

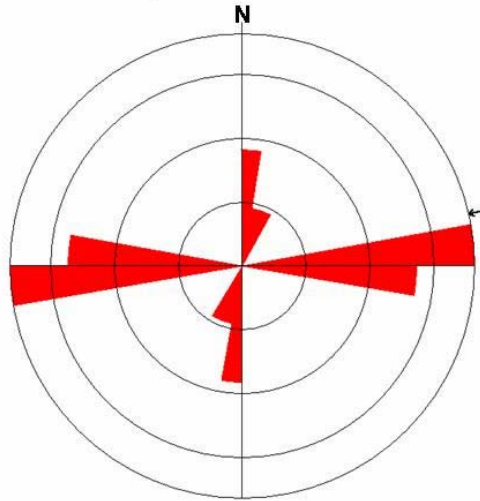


Figura 58. Diagrama rosa para las fracturas presentes en la sección 1.

Vemos que existe una familia con una dirección preferencial N 5 E en el cual se ubican el menor numero de fracturas pero que a su vez son la de mayor apertura y por consiguiente con no menos importancia que las fracturas pertenecientes a la familia con dirección preferencial E-W que presenta el mayor numero de fracturas pero con aperturas mucho menores.

Se observa que la orientación aparente de las microfracturas presentes en esta sección, es muy semejante a la orientación que presentan las macrofracturas observadas en los corazones de esta formación, esto comprueba que la dirección de esfuerzos queda plasmada tanto en las fracturas de gran escala como en las microfracturas.

4.5.2 Análisis de microfluorescencia sección 2, formación Barco. En esta sección no es muy claro el fracturamiento, se realizó un scaneline, subvertical en el cual se observa la diferencia entre las fracturas inducidas y las fracturas naturales que llevan un patrón definido, esto se ve de manera muy aleatoria a lo largo de la muestra y no se presentan fracturas con una buena continuidad.

En esta sección se observa que las fracturas tienen un bajo valor de abertura, mas sin embargo todas las fracturas aparecen abiertas y sin ningún tipo de relleno y con perfiles sinuosos. Ver figura 59.

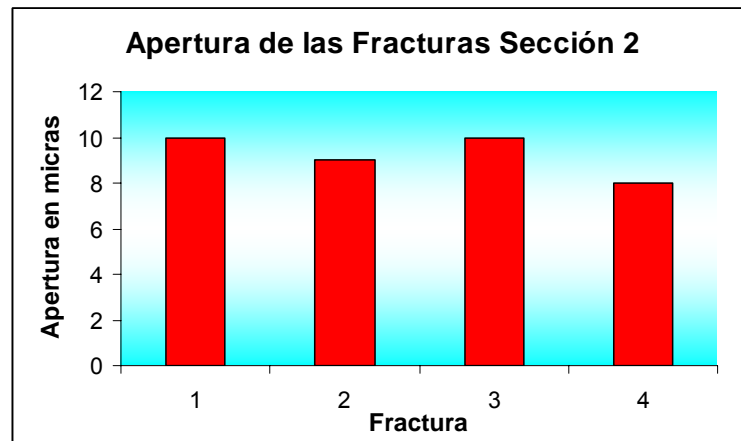


Figura 59. Apertura en micras de las fracturas en la sección 2. Formación barco.

Las pocas fracturas que se observan en esta sección no tienen una buena continuidad desfavoreciendo la interconexión entre ellas. Se observa que las fracturas tienen una dirección preferencial E-W. (Ver figura 60).

Orientación Aparente Microfracturas Sección 2

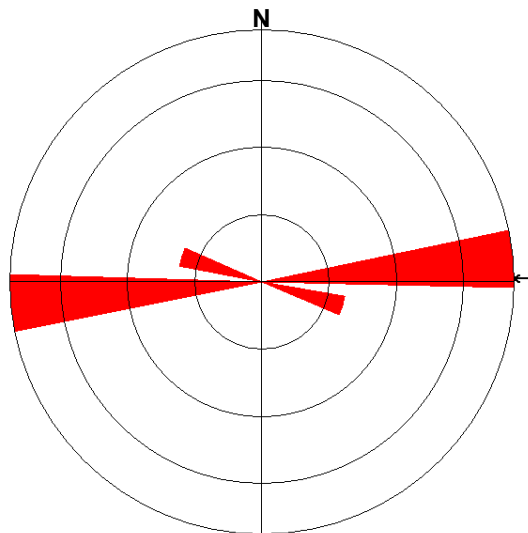


Figura 60. Diagrama de rosetas para las fracturas presentes en la sección, formación Barco.

4.5.3 Analisis de microfluorescencia sección 3. Formación Guadalupe. En esta sección se pudo observar el alto fracturamiento presente en las partículas de composición fosfática. Estas partículas aparecen en forma de pelles fosfáticos y sobre ellos se observa un claro fracturamiento natural, se asume como natural y no inducido ya que es fácil visualizar que las fracturas que afectan estos granos son de tipo intergranular y avanzan a lo largo de la sección, (*ver figura 61*).

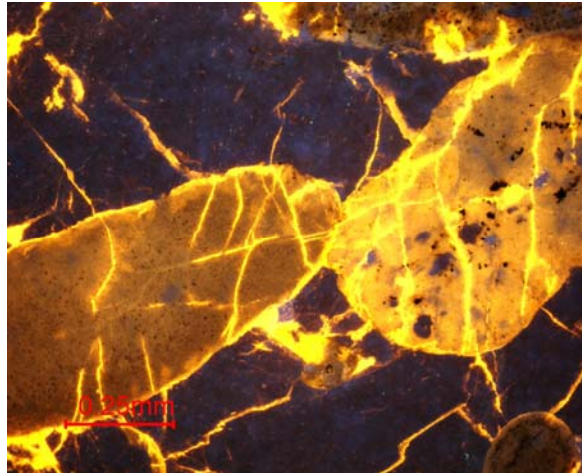


Figura 61. Fotografía de pelles fosfáticos con alto fracturamiento. Objetivo 10X

En la *figura 61* se observa, como los pelles fosfáticos presentes en la muestra se encuentran mutuamente fracturados e interconectados por las fracturas que los están afectando.

En la sección se observó la presencia de solo una familia de fracturas. Estas fracturas se presentan con mayor ocurrencia que en la sección 1, pero no tienen la misma continuidad que las fracturas de la sección de barco. Estas fracturas son más cortas y se encuentran siguiendo una ruta claramente marcada en la sección, como haciendo parte de una zona de desgarre en la visión macro. La porosidad de la roca se ve bastante favorecida con el fracturamiento que aporta una porosidad secundaria a la roca de gran proporción. Sobre esta sección se realizó un scanline inclinado con una dirección aproximada de N 65 E con el fin de atravesar de una manera casi perpendicular las fracturas presentes en la sección. (*Ver figura 60*).

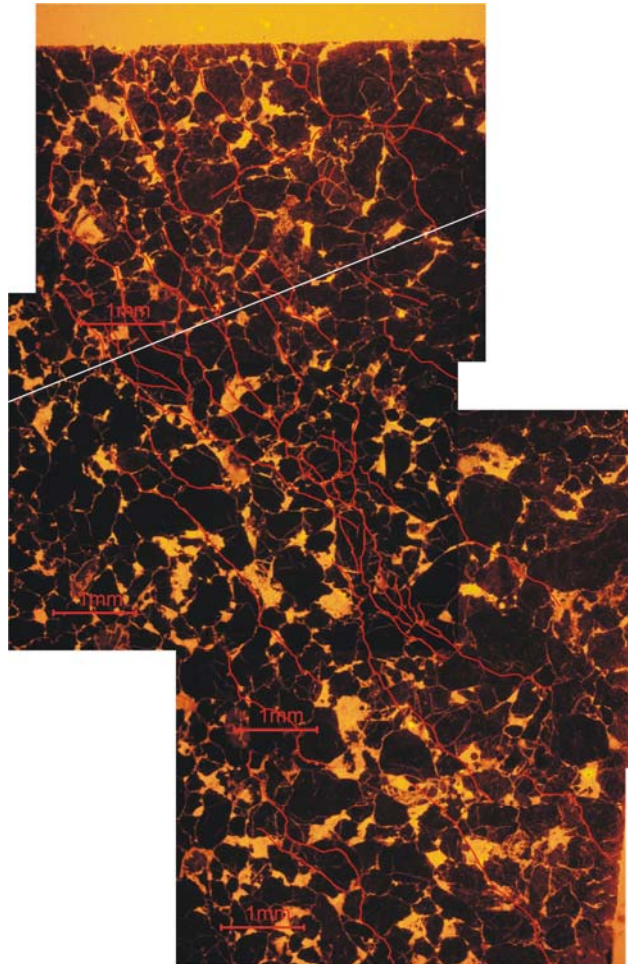


Figura 62. Scaneline inclinado cortando de manera perpendicular las fracturas presentes en la sección 3.

Se observa que el número de fracturas se ve en aumento pero la apertura disminuye de manera considerable. Las fracturas presentan un bajo valor de apertura, la mayoría de las fracturas no superen las 15 micras de apertura, aunque ellas se encuentran en su totalidad abiertas y sin la presencia de ningún tipo de relleno la tortuosidad del fluido se ve claramente aumentada por la baja apertura de las fracturas, a su vez predominan los perfiles sinuosos en las microfracturas esto contribuye aun mas a aumentar la tortuosidad del flujo de los hidrocarburos a lo largo de la roca. (Ver figura 63).

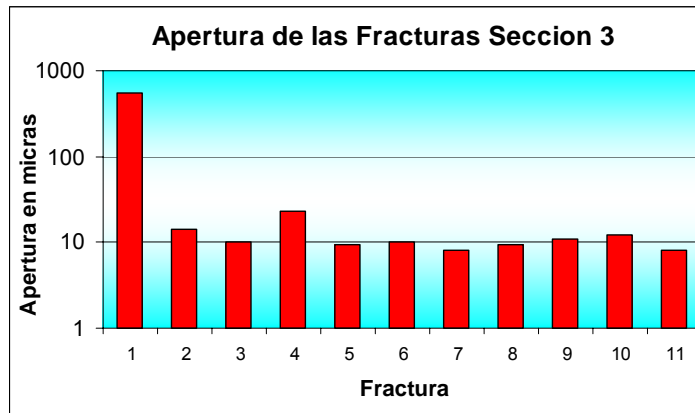


Figura 63. Apertura en micras de las fracturas presentes en la sección 3.

La dirección aparente que presentan las fracturas en la sección 3 es de N35W.

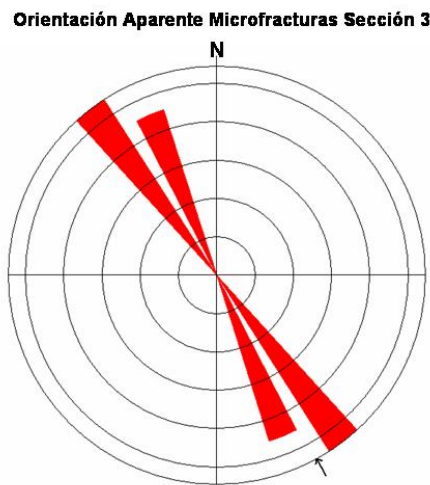


Figura 64. Diagrama rosa para las fracturas presentes en la sección 3, formación Guadalupe.

Se evidencia la dirección preferencial de las fracturas presentes en la sección, N 35 W, esta es la dirección que presenta la familia de fracturas a lo largo de la sección, estas microfracturas no son extensas como tal pero se encuentran interconectadas unas con otras atravesando las partículas y presentándose de manera intergranular. En la sección también se observan un sinnúmero de fracturas en los granos pero que como tal no tienen continuidad, este tipo de fracturas no pueden ser tomadas en cuenta a la hora de realizar un estudio de

intensidad de fracturamiento, debido a que ellas pueden haber sido heredadas por las partículas en momentos anteriores de la depositación y podrían estar indicando eventos reformativos mas antiguos que los de interés para el estudio del campo y que hoy en día están afectando las rocas de las formaciones presentes en el subsuelo, y que a su vez generan un impacto en la producción de los hidrocarburos.

La dirección aparente encontrada para las microfracturas coincide con la dirección encontrada para las macrofracturas encontradas en los núcleos. Esta dirección de N 30 W mostrada por las microfracturas es la misma que la mostrada por las fracturas de compresión en los corazones, esta fracturas de compresión son la gran mayoría de las fracturas macro descritas, esto esta evidenciando una vez mas que las direcciones de los esfuerzos principales de fracturamiento quedan registradas en las fracturas macro y también en las microfracturas, y por ende se puede hacer una comparación directa entre las dos escalas obteniendo una buena coherencia.

Por ultimo, se pudo observar al final que la intensidad de fracturamiento en la seccion 2 es mayor que en las otras secciones, pero a su vez la apertura de las fracturas es muy baja, ademas la continuidad de estas fracturas a lo largo de la seccion es muy baja casi nula, las fracturas se disipan en un recorrido muy corto.

La roca de la seccion 1 pertenece a la facies Abre (Cuarzoarenita Bioturbada con relictos de estratificación),esta es una de las facies que a nivel macro presenta un alto grado de fracturamiento, esta roca es la que presenta las mejores condiciones en cuanto al flujo de los hidrocarburos ya que presenta un alto grado de fracturamiento y a su vez las fracturas están totalmente abiertas sin ningún tipo de relleno y la distancia entre las paredes de las fracturas es considerable favoreciendo la interconexión de los fluidos atrapados en la matriz.

La roca de la sección 2 pertenece a la facies Acep (cuarzoarenita conglomerática con estratificación cruzada con pebbles). Y la roca de la sección 3 pertenece a la facies Ab (Cuarzoarenita bioturbada), esta facie es la de mayor ocurrencia en la formación Guadalupe y presenta a nivel macro una intensidad de fracturamiento significativa en los intervalos corazonados.

Con esto se puede ver que la relación de la intensidad se comporta de la misma manera a escala de microfrazuras y a escala de las fracturas macro presentes en los corazones.

En la *figura 65* se muestra la relación de la intensidad de fracturamiento versus la facies a la cual pertenece cada sección delgada.

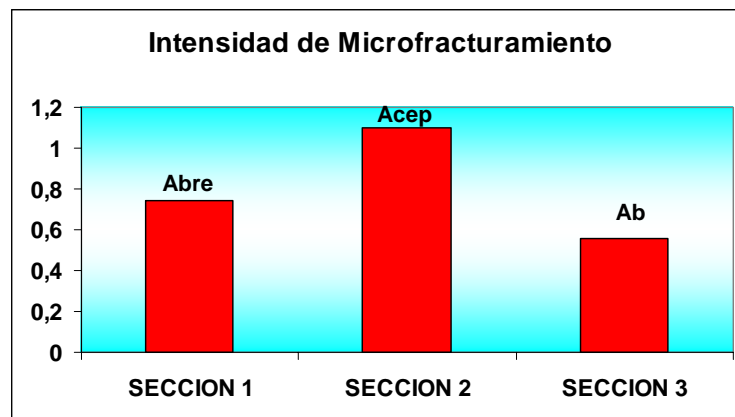


Figura 65. Intensidad de fracturamiento vs. facies presentes en las secciones delgadas.

En el anexo 2 se muestran los diferentes scanline trazados sobre los mosaicos de fotografías tomadas para cada una de las secciones. En él se hace referencia a la intensidad de fracturamiento presente en cada una de las placas y la abertura en micras para cada una de las fracturas presentes en las tres placas analizadas.

5 CONCLUSIONES

- A partir de la integración de los parámetros estudiados se confirmó el predominio de fracturas naturales asociadas a tectonismo en las formaciones Barco y Guadalupe, aunque también se presentan fracturas inducidas, naturales inducidas y estilolitos.
- Las facies que presentan un mayor índice de fracturamiento son las compuestas por cuarzoarenitas Bioturbadas y cuarzoarenitas con estratificación cruzada, evidenciando que las rocas compuestas por este tipo de facies presentan una mayor fragilidad a los esfuerzos y las rocas compuestas por facies de arcillolitas y de grano fino presentan una mayor ductilidad a los esfuerzos que actúan sobre ellas.
- Las fracturas generadas por esfuerzos de tipo compresivo predominan con relación a aquellas generadas por esfuerzos de cizalla y de tensión, aunque este predominio disminuye a menor profundidad.
- Dentro de las fracturas naturales observadas, las fracturas abiertas representan el 78-80%, parcialmente abiertas el 16-22%, y parcialmente rellenas 1%, presentando excelentes condiciones para el flujo y acumulación de hidrocarburos, y comportándose como indicador de la existencia de canales de flujo.
- La ocurrencia de fracturas en el intervalo corazonado para la formación Guadalupe aumenta hacia la base del mismo, predominando los esfuerzos compresivos y presentándose las fracturas en su mayoría abiertas o parcialmente abiertas, características que conviertan a dicho intervalo en una zona de gran interés en cuanto a almacenamiento de hidrocarburo así como al señalamiento de este sector como una zona clara de flujo.
- En el intervalo corazonado para la formación Barco se evidenció que hacia el centro de dicho intervalo la ocurrencia de fracturas se ve en aumento, presentándose fracturas producidas por esfuerzos compresivos en mayoría, pero

con un porcentaje considerable de fracturas producidas por esfuerzos de tensión y cizalla respectivamente.

- El comportamiento observado en las microfracturas presentes en las secciones de las dos formaciones es muy similar al comportamiento presentado por las macrofracturas encontradas en los corazones de las formaciones estudiadas, esto nos permite afirmar que se puede realizar una comparación entre las dos escalas pretendiendo encontrar una relación clara para los dos tipos de fracturas, microfracturas y macrofracturas.

6 RECOMENDACIONES

En este trabajo se utilizó la información correspondiente a solo un pozo del campo de estudio, se recomienda aumentar el número de pozos analizados con el fin de obtener un control preciso sobre el tipo de fracturamiento presente en cada formación.

Se recomienda abarcar la totalidad de las formaciones presentes en los pozos en las cuales se tenga disponible corazones, esto con el fin de mirar la variación del fracturamiento a lo largo de las diferentes facies presentes en las formaciones.

En el estudio se utilizó solo la información de los núcleos para la caracterización de las facies sedimentarias y los ambientes de depositación, se recomienda tomar muestras de afloramientos cercanos a los campos con el propósito de tener un mayor control de la continuidad lateral de las facies y con ello tener un mejor criterio a la hora de definir los ambientes de depósito para las formaciones estudiadas.

La orientación dada para las macrofracturas y microfracturas es una orientación aparente, ya que los corazones pueden estar girados de su posición original en profundidad, para obtener la orientación real de las diferentes familias de fracturas presentes en los pozos se recomienda la orientación de los corazones utilizando técnicas como el paleomagnetismo u orientar las fracturas utilizando registros de imágenes.

Es posible caracterizar la intensidad de fracturamiento en los pozos donde no haya información de corazones, para ello se recomienda utilizar los registros convencionales y registros de imágenes con el fin de obtener información de la intensidad de fracturamiento en dichas zonas y caracterizar el tipo de fracturas,

esto utilizando métodos indirectos. En el estudio de las fracturas se pudo comprobar que la intensidad de fracturamiento y la orientación de las fracturas, se mantienen similares a escala de microfracturas y de macrofracturas, se recomienda extender los estudios de fracturamiento a escalas micro, es decir profundizar en el análisis de secciones delgadas previamente preparadas para este tipo de estudio, ello con el fin de realizar escalamientos y predicción de ocurrencia de macrofracturas.

BIBLIOGRAFIA

- Kulander, B. et. al. (1990). Fractured Core Analysis. Methods in Exploration Series. AAPG Bulletin Special, No. 8. USA.
- Roger, W. (1984). Facies Models, Second Edition. Geoscience Canada.
- Pemberton, S. Ichnological Concepts and Selected Core studies. Volume 1. Department of Geology, University of Alberta.
- Cooper et. al. (1995). Basin Development and tectonic history of the Llano Basin, Eastern Cordillera, and Middle Magdalena Valley, Colombia. AAPG Bulletin No. 79. USA.
- TABOADA, Alfredo; RIVERA, Luis; FUENZALIDA, Andrés; CISTERNAS, Armando (2000); Geodynamics of the northern Andes: Subductions and intracontinental deformation (Colombia). Tectonics, Vol. 19, No. 5, P. 787-813.
- AGUILERA, Roberto (2002). Naturally Fractured Reservoir . Servipetrol Ltd.
- NELSON, R. (1985) Geologic Análisis of Naturally Fractured Reservoirs Contributions in Petroleum Geology and Engineering, Vol.1. Gulf Publishing Co. Houston, Texas.
- LAUBACH, S.E. (2002) Practical Approaches to Identifying sealed and open fractures. AAPG Bulletin, 29 pages, 15 figures.

- LAUBACH, S.E. (2003). Advanced Technology for predicting the fluid flow Attributes of Naturally Fractured Reservoirs from Quantitative Geologic Data and Modeling. National Energy Technology Laboratory. Tulsa, Oklahoma. USA.
- ECOPETROL; 2001. Modelo Integrado Campo Cupiagua. Informe Final.
- Sarmiento, L. (2001). Mesozoic Rifting and Cenozoic Basin Inversion History of the Eastern Cordillera, Colombian Andes. Informe ECOPETROL. Bogotá-Colombia.
- GEOCONSULT; 2004. Consultaría para el Desarrollo de Proyectos que Contribuyan a Reducir el Riesgo Exploratorio en el Piedemonte Llanero para el Instituto Colombiano del Petróleo, Piedecuesta, Santander.
- ECOPETROL; 2001. Modelo Integrado Campo Cupiagua. Informe Final
- Charles, P.A., Bathellier, E., Tan, C. Understanding the present day in situ state of stress in the Cusiana field – Colombia. SPE paper 47208. 1998
- Jolly, R., Wei, L., Pine R. Stress-sensitive fracture-flow modeling in fracture reservoirs. SPE paper 59042. 2000
- Fox, R. Faulting and fracturing in core from Cusiana and Cupiagua fields, Llanos Foothills, Colombia. BP Internal report. March 1994.
- Martínez, J., 2001. 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 Petrolero en las Cuencas Subandinas, pag. 106 – 117.

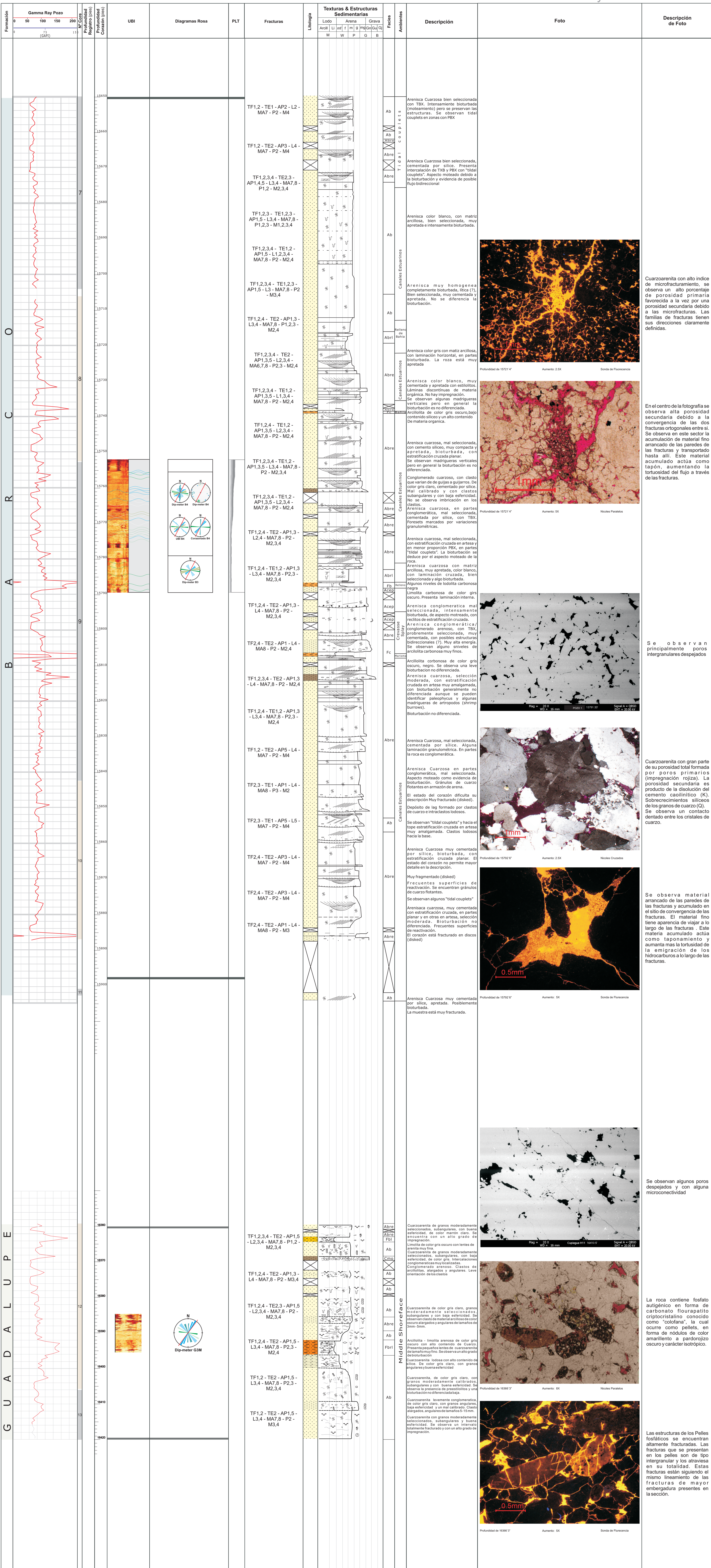
- Osorio, JF. Cusiana y Cupiagua – Proyecto de trazadores de gas. BP Internal document. 2002
- Rawnsley, K., et al. Cupiagua Fracture Characterization Project. BP UTG. Internal report. August 2000.
- RDR – Leeds University. Faulting and fluid flow in the Cupiagua field, Report 9924. BP internal report. 1999
- GMI – Geomechanical International Inc. Wellbore stability and stress in the Cusiana, Cupiagua and Piedemonte Fields, Colombia. BP Internal report. April 1998.
- Torres, M. Determinación de esfuerzos In Situ en la cordillera Oriental de Colombia. Thesis Maestría Geotecnia – Universidad Nacional de Colombia. Nov 2001.

ANEXOS

Pozo: Pozo 1
 Cuenca: Piedemonte Llanos - Casanare
 Formación: Barco y Guadalupe

ANEXO 1

Analizó: Edwar Herrera Otero
 Profundidad: 15650' a 16420'
 Escala: 1:100
 Fecha: Mayo 2005



CONVENCIONES

ESTRUCTURAS SEDIMENTARIAS FISICAS

- Estratificación**
 - Estratificación planar
 - Estratificación planar de alto régimen
 - Cruzada en artesa a pequeña escala
 - Cruzada en artesa amalgamada
 - Cruzada en artesa a gran escala
 - Cruzada en artesa con pebbles
 - Cruzada en artesa en conglomerados
 - Relictos de artesa
 - Relictos de estratificación
 - Estratificación Cruzada
- Laminación**
 - Plana paralela
 - Plana discontinua
 - Wavy Lamination
 - Ondulosa
 - Ondulosa discontinua
 - Flaser
 - Lenticular
 - Irregular
- Otras**
 - Deformación penocentemporanea
 - Laminación convoluta
 - Intraclastos
 - Ondulosa
 - Lag deposit
 - Wave ripple

INDICE DE BIOTURBACION

- No cuantificado
- Muy ligeramente bioturbado
- Ligeramente bioturbado
- Moderadamente bioturbado
- Altamente bioturbado
- Completamente bioturbado

ROSETAS DIPMETER

- FRACTURAS RELACIONADAS CON PLIEGUES
- FRACTURAS DE CIZALLA EXTENSIONAL (Fce)
- FRACTURAS DE TENSION (Ft)
- ZONAS DE FALLA TIPO EXTENSIONAL (Zfe)
- FRACTURAS RELACIONADAS CON FALLAS
- FRACTURAS DE CIZALLA TIPO REDEL (FR)
- FRACTURAS SATÉLITE (Ff)
- FRACTURAS DE REACTIVACION (Fr)
- FRACTURAS DE TENSION (Ft)
- FRACTURAS DE TENSION (Ft)
- FRACTURAS DE TENSION (Ft)

ACCESORIOS

- Nódulos
- Caliche
- Integración
- Colitas
- Pirita
- Peleles
- Estiolitos
- Restos Fósilicos no diferenciados
- Grietas de desecación
- Calcos de carga
- Fragmentos laminares de material leñoso
- Materia carbonosa
- Preslitolito

ESTRUCTURAS SEDIMENTARIAS BIOGENICAS

- Ichnológicas**
 - Teichichnus
 - Ophiomorpha
 - Glossifingites
 - Planolites
 - Zoopheucus
 - Diplocraterion
 - Madrigueras de cangrejo
 - Madrigueras no diferenciadas
 - Paleophycus
 - Arenicolites
 - Skolithos
 - Bergeria
 - Thalassinoides
 - Paleosolenites
 - Macronichnus
 - Anchonicnus
- Fósiles**
 - Esqueletos de Equinodermos
 - Espinas de peces
 - Vertebrae de peces
 - Fragmentos leñosos
 - Bivalvos
 - Fragmentos de conchas
 - Vertebrae de peces
 - Chondrites
 - Rhizocorallium
 - Conichnus
 - Asterosoma
 - Helminthopsis
 - Rosselia
 - Terebellina
 - Bioturbación no diferenciada

FRAGMENTACION

- Tipos de Fractura (TF)
- Tipos de Esfuerzo (TE)
- Apertura y Relleno (AP)
- Medida Longitud (L)
- Medida de Apertura (MA)
- Perfil de la Fractura (PF)
- Morfología (M)

DESCRIPCION DE LA NOMENCLATURA DE FRACTURAS

TF1 - TE2 - AP1 - LS - MA2 - P1 - M2
 (TF1) Tipo de Fractura Natural, (TE2) Tipo de Esfuerzo de Compresión, (AP1) Apertura y Relleno Abierta, (LS) Longitud Inferior a 5 cm., (MA2) Medida de Apertura entre 5.01 a 10 mm., (P1) Perfil de la Fractura Recto, (M2) Morfología Rugosa.

LITOLÓGICAS

- Arenisca
- Arenisca lodosa
- Arenisca conglomerática
- Arenisca calcárea
- Conglomerado
- Limolita arenosa
- Limolita arcillosa
- Limolita limosa
- Arcillolita
- Lodolita calcárea
- Lodolita conglomerática
- Conglomerado
- Arcillolita calcárea
- Limolita
- Limolita calcárea
- Shale calcáreo
- Shale

FACIES

- Fb Arcillolita-Limolita bioturbada no diferenciada
- Fbri Arcillolita-Limolita bioturbada con relictos de laminación
- Fi Arcillolita-Limolita laminada
- Fci Arcillolita-Limolita carbonosa
- Fm Arcillolita-Limolita moteada
- Aac Cuazozarenita con oolitos
- Acsp Cuazozarenita con deformación penocentemporanea
- Ab Cuazozarenita bioturbada
- Abri Cuazozarenita bioturbada con relictos de laminación
- Ae Cuazozarenita laminada
- Aep Cuazozarenita con deformación penocentemporanea
- Aci Cuazozarenita con estratificación plana
- Acp Cuazozarenita con estratificación cruzada
- Cmo Cuazozarenita con clastos imbricados
- Cmg Conglomerado algolítico
- Cep Conglomerado arenoso con estratificación cruzada con pebbles

CONVENCIONES ESTRATIGRAFICAS

- Hemiciclo de caída del nivel base (Disminución de A/S)
- Hemiciclo de subida del nivel base (Aumento de A/S)

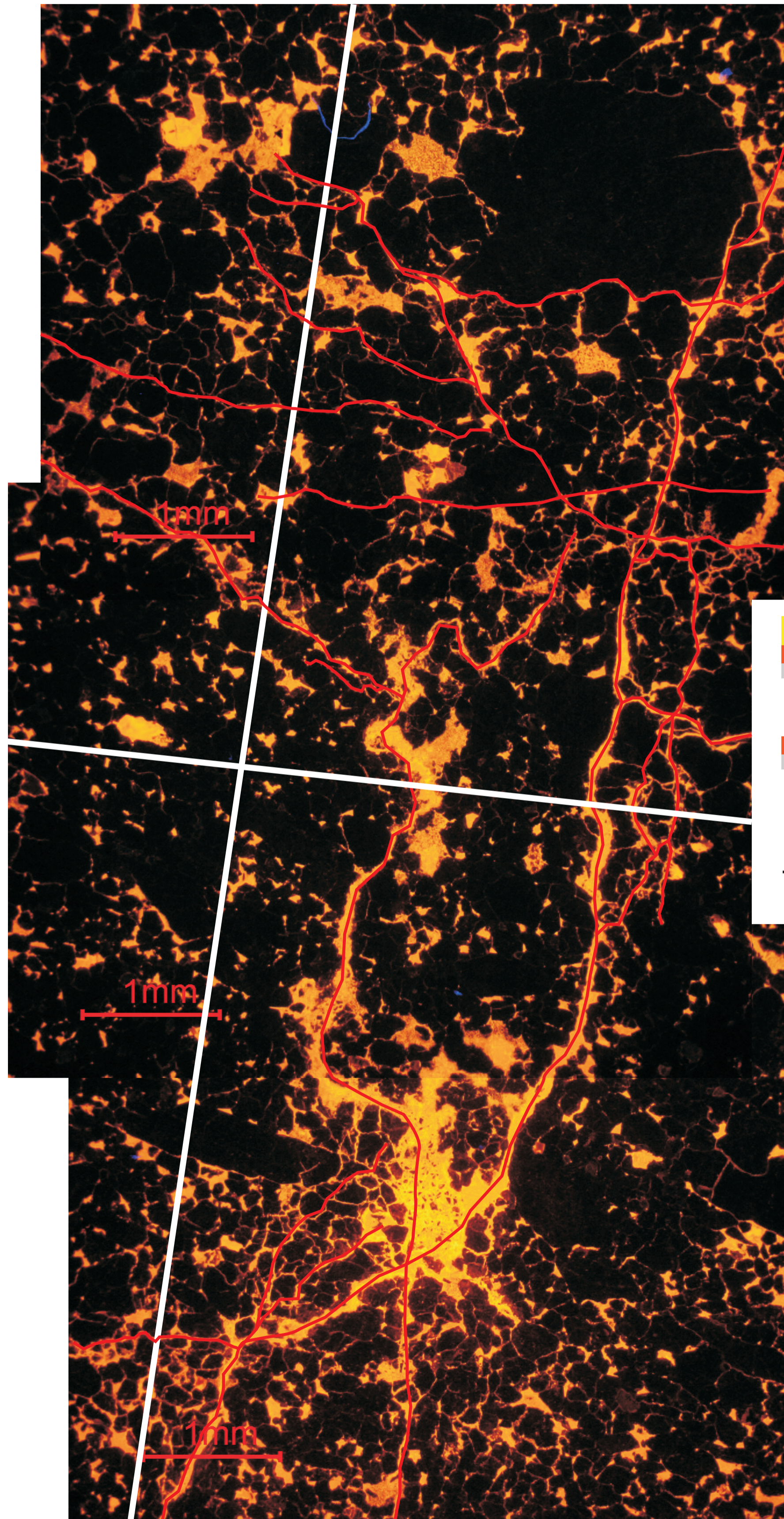
CONTACTOS

- Superficie de inconformidad
- Superficie de socavamiento (Scour)
- Neto
- Inferido
- Fallado

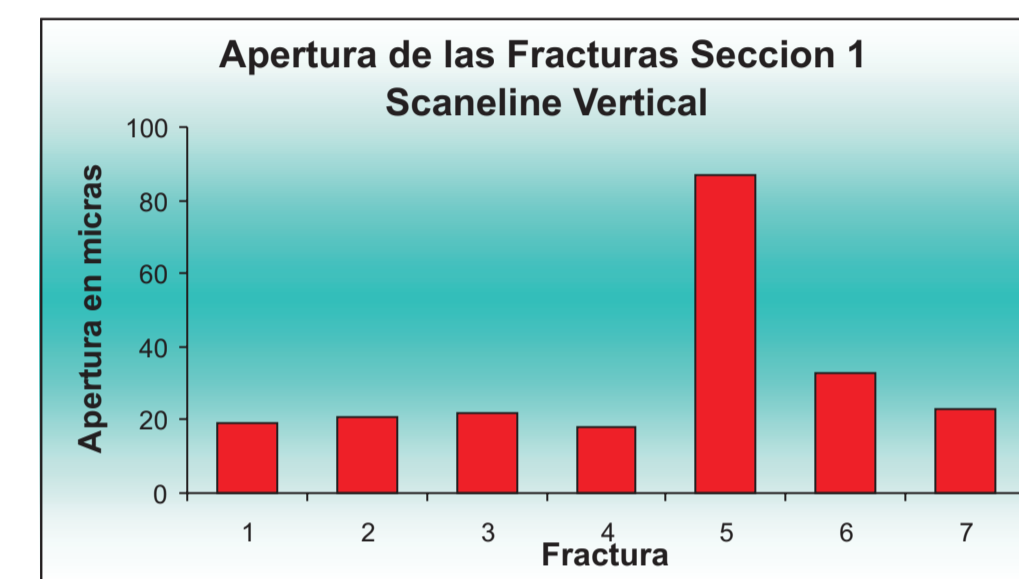
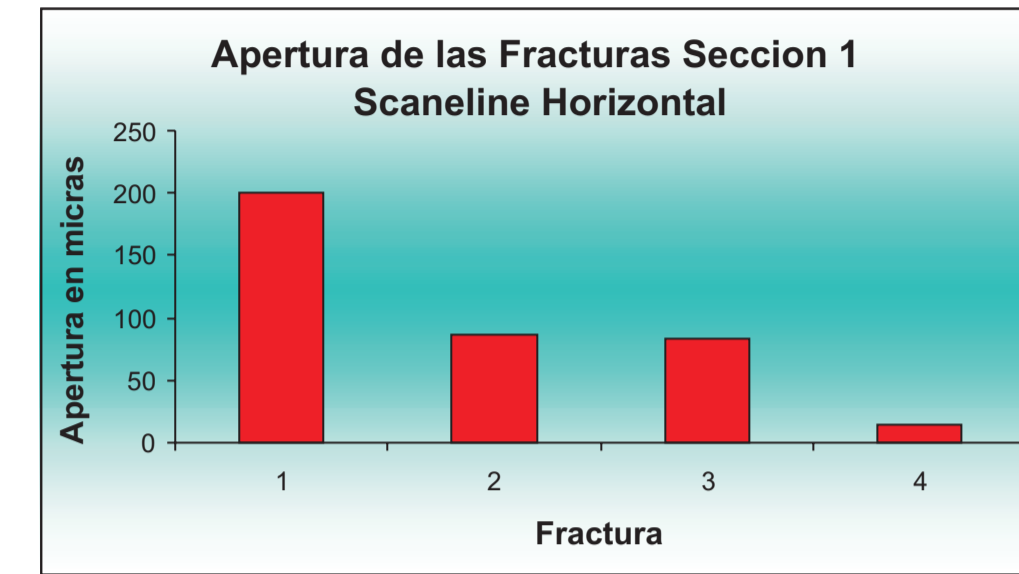
Analizo: Edwar Herrera Otero
Proyecto: YNF
Fecha: Julio 2005
Fitografías: Alberto Ortiz

Analisis de Seccion Delgada
Microfluorescencia
ANEXO 2

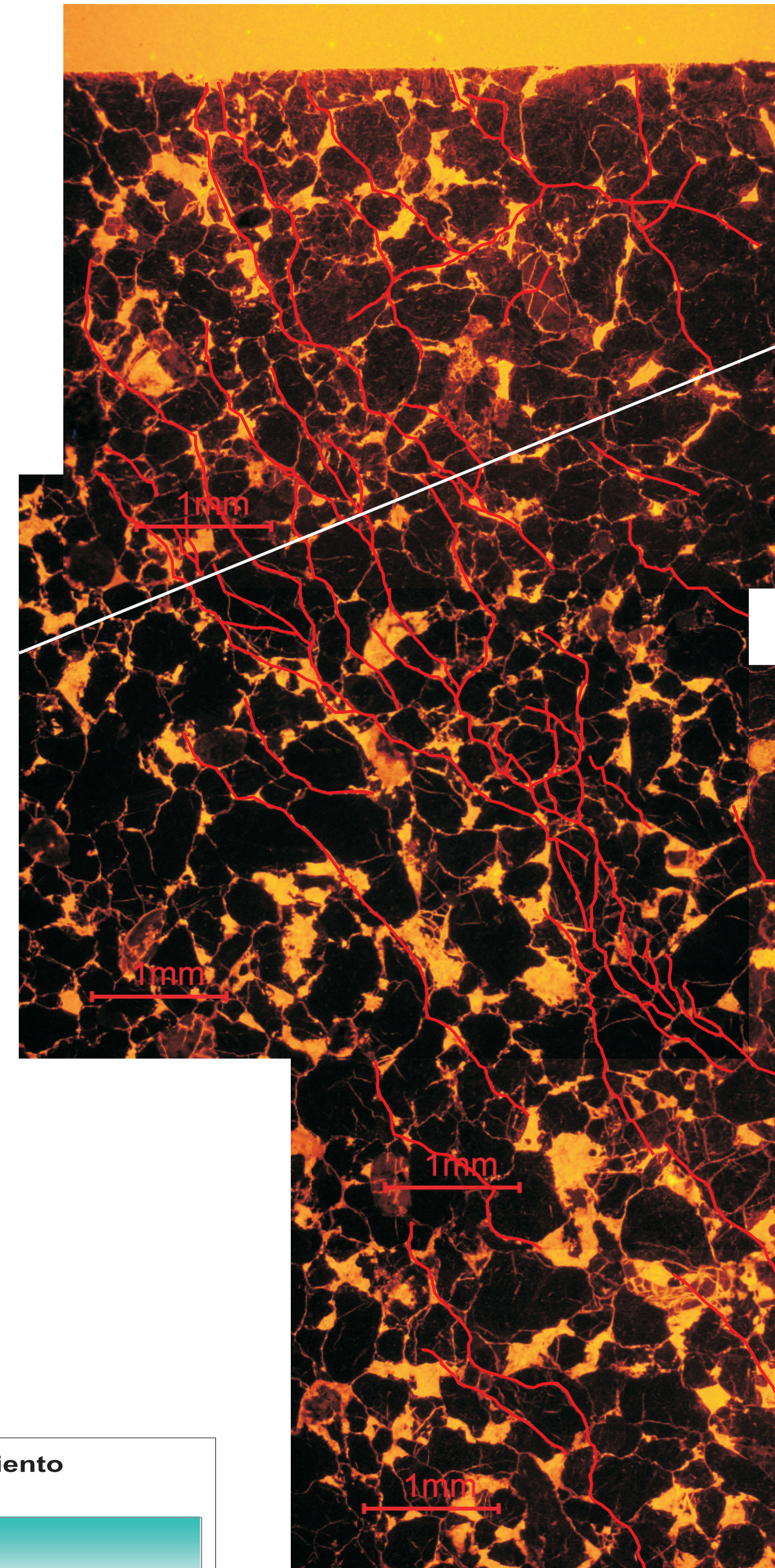
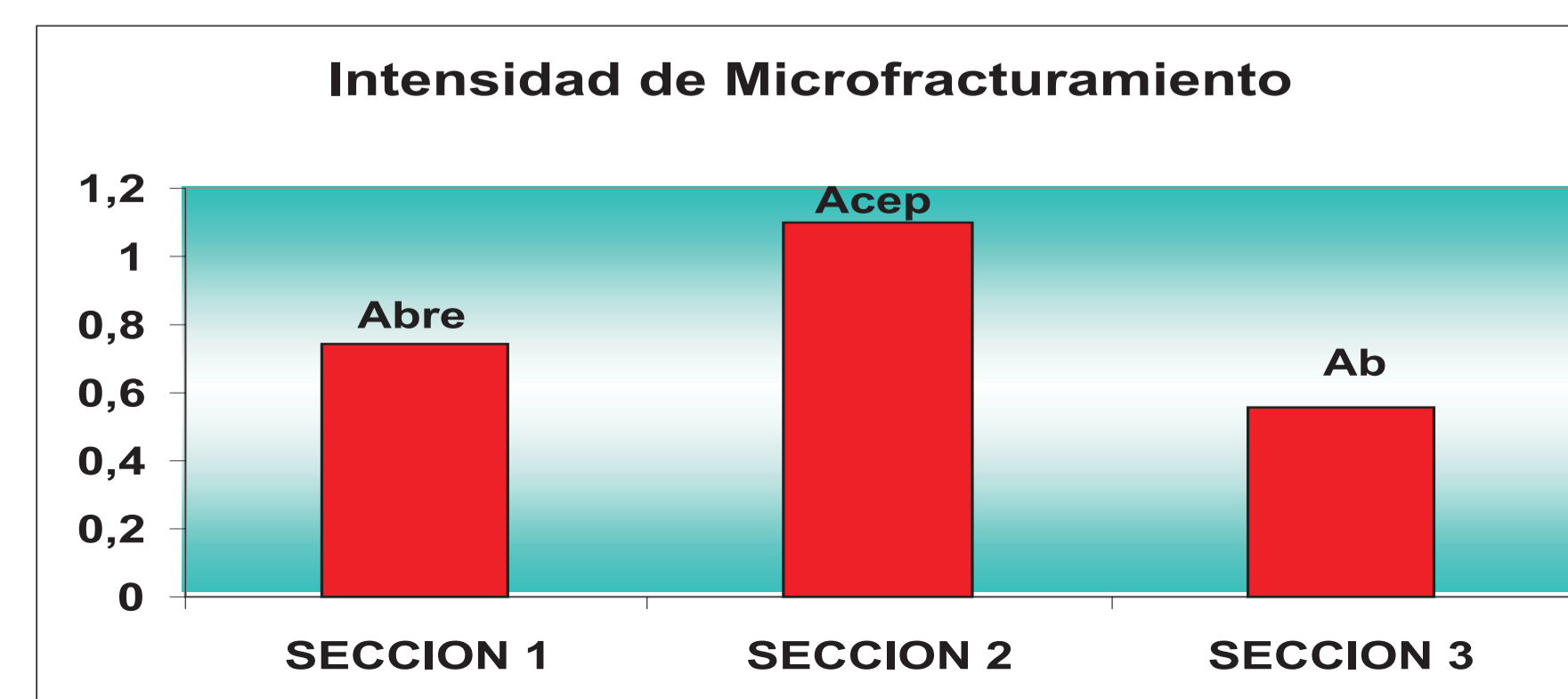
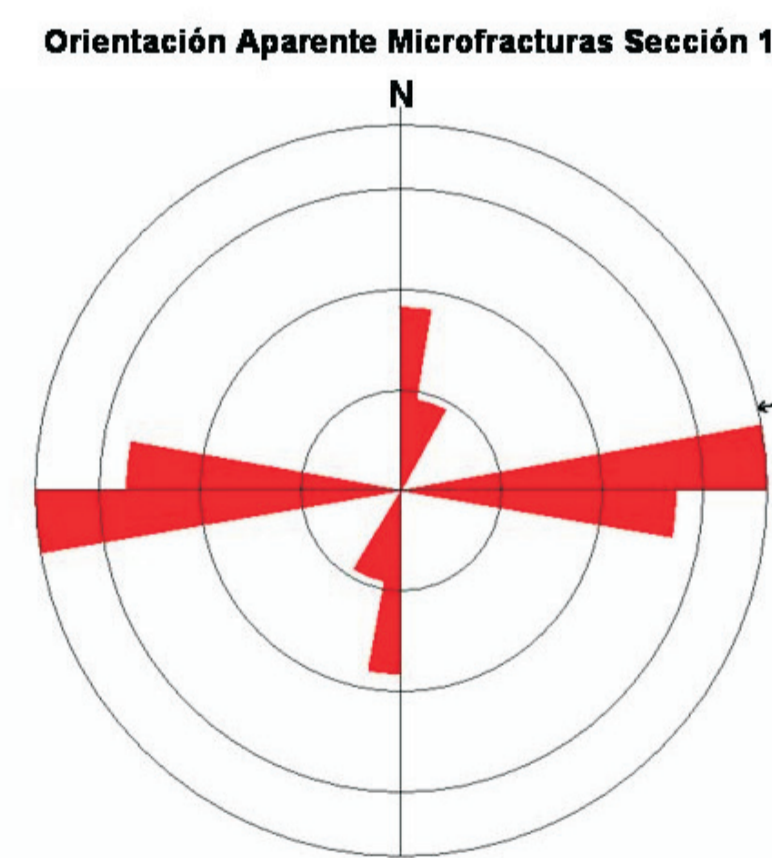
Pozo: I
Formación: Barco - Guadalupe
Objetivo: 2.5 X
Escala: 1:40



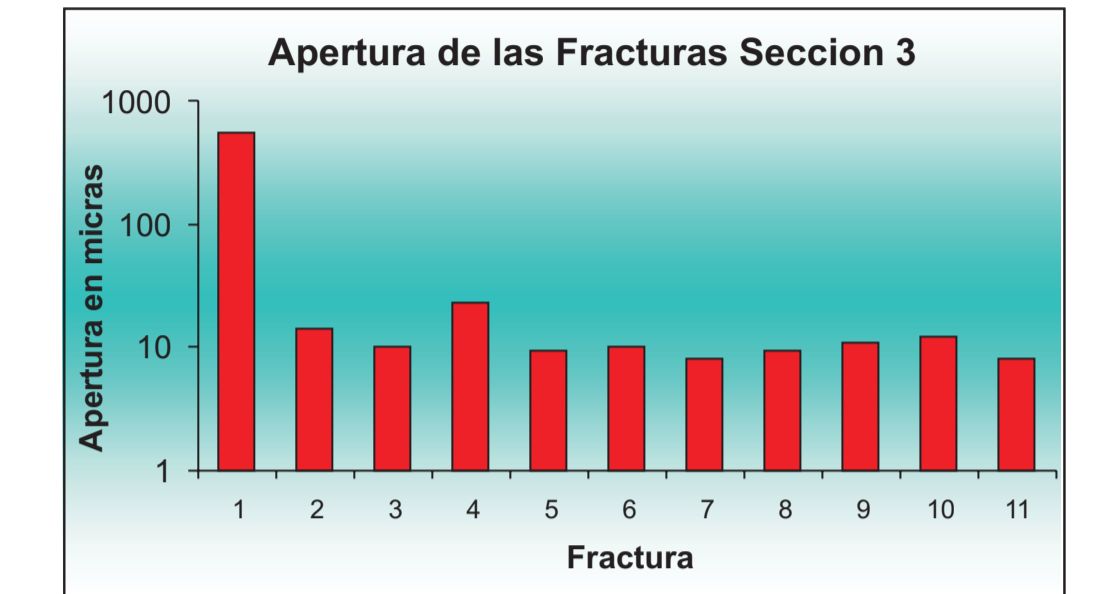
SECCIÓN 1 15721'4"
FORMACIÓN BARCO



SCANLINES SECCION 15721'4"						
SCANLINE HORIZONTAL						
FRACTURAS	APERTURA Y RELLENO	APERTURA EN MI	PERFIL	FACIES	aperturas en micras	IF
1	Abierta	0,2	Sinuoso		200	
2	Abierta	0,087	Sinuoso	Abre	87	0,74
3	Abierta	0,083	Sinuoso		83	
4	Abierta	0,015	Sinuoso		15	
SCANLINE VERTICAL						
FRACTURAS	APERTURA Y RELLENO	APERTURA EN MI	PERFIL	FACIES	aperturas en micras	IF
1	Abierta	0,019	Sinuoso		19	
2	Abierta	0,021	Sinuoso		21	
3	Abierta	0,022	Sinuoso		22	
4	Abierta	0,018	Sinuoso	Abre	18	0,63
5	Abierta	0,087	Sinuoso		87	
6	Abierta	0,033	Sinuoso		33	
7	Abierta	0,023	Sinuoso		23	



SECCIÓN 3 16366'3"
FORMACIÓN GUADALUPE



SCANLINES SECCION 16366'3"						
Fractura	Apertura y Relleno	Apertura en ml	Perfil	Facies	Aper. En Micras	IF
1	Abierta	0,55	Sinuoso		550	
2	Abierta	0,014	Sinuoso		14	
3	Abierta	0,023	Sinuoso		23	
4	Abierta	0,0094	Sinuoso		9,4	
5	Abierta	0,01	Sinuoso	Ab	10	0,56
6	Abierta	0,0082	Sinuoso		8,2	
7	Abierta	0,0094	Dentado		9,4	
8	Abierta	0,011	Dentado		11	
9	Abierta	0,012	Dentado		12	
10	Abierta	0,0082	Sinuoso		8,2	
11	Abierta	0,0082	Sinuoso		8,2	

