

V. DISTRIBUCIÓN DE FRACTURAS TECTÓNICAS EN LAS FACIES DE LA FORMACIÓN MORELOS

5.1 INTRODUCCIÓN

Las fracturas son las estructuras geológicas más comunes en la corteza terrestre, se presentan en diferentes tipos de rocas y se producen en diferentes escenarios tectónicos; pueden encontrarse en un amplio rango de escalas, desde una sección delgada (milímetros o micras) hasta una carta geológica (metros o kilómetros). Estas estructuras pueden afectar profundamente la configuración de la superficie de la tierra, controlando la forma de las costas (Hobbs, 1904; Nilsen, 1973), sistemas de drenaje (Hobbs, 1905), etc. Así mismo, las fracturas pueden condicionar considerablemente en el flujo y almacenamiento de importantes recursos naturales como el agua (Sharp, 1993; Adler y Thovet, 1999), los hidrocarburos (Nelson, 2001) y depósitos de minerales hidrotermales (Sanderson et al., 1994).

Este estudio se basa en la medición sistemática de los atributos espaciales de las fracturas en los afloramientos. El propósito de este estudio es aplicar los atributos de las fracturas de las rocas carbonatadas de la Formación Morelos, para inferir el grado de fracturamiento en algunas de las facies descritas en el Capítulo IV.

En el estudio se registraron datos de la densidad de fracturas, definida como el número de fracturas presentes en una determinada longitud en pequeños afloramientos a lo largo de líneas de exploración (*scan line*), perpendiculares a los sistemas de fracturas principales. Las densidades se expresan en términos de fracturas por unidad de longitud. Dado que se presentan fracturas con diversas aperturas, se registró el rango de apertura de las fracturas por cada medida de densidad como lo propone Ortega et al., (2006). Por ejemplo, en un afloramiento,

dado una unidad de longitud, supongamos que hay 100 fracturas menores a 1 mm de apertura, 10 fracturas de 1 mm de apertura, pero sólo una fractura de ancho de 1 cm. Entonces, puede ser reportada como una fractura/unidad de longitud para las fracturas ≥ 1 cm de apertura, o 111 fracturas/unidad de área para las fracturas ≥ 1 micra de ancho.

5.2 OBJETIVO

Encontrar una correlación entre la densidad de fracturamiento y la textura y/o contenido de bioclastos en algunas facies descritas en el Capítulo IV.

5.3 MECANISMOS DE FRACTURAMIENTO

El término “fractura” ha sido definido de varias maneras: Ramsay y Huber (2002) y Lawn y Wilshaw (1975) definen a las fracturas como superficies de ruptura o discontinuidad mecánica a través de la cual el material pierde cohesión

Según Pollard y Segall (1987), existen tres características físicas básicas de las fracturas en las rocas: (1) tienen dos superficies que convergen en el frente de propagación de ruptura (Fig. 5.1); (2) estas superficies son generalmente planares (Fig. 5.1); y (3) el desplazamiento relativo entre los planos que definen la fractura es pequeño comparado con la longitud de la fractura. Pollard y Aydin, 1988 proponen tres modos de propagación del fracturamiento, Modo I, fracturas con desplazamiento entre sus planos (desplazamiento de apertura), Modo II, fracturas con un desplazamiento en la dirección del frente de propagación de la ruptura y Modo III, fracturas con un desplazamiento perpendicular al frente de propagación de la ruptura (cizalla) (Fig. 5.1).

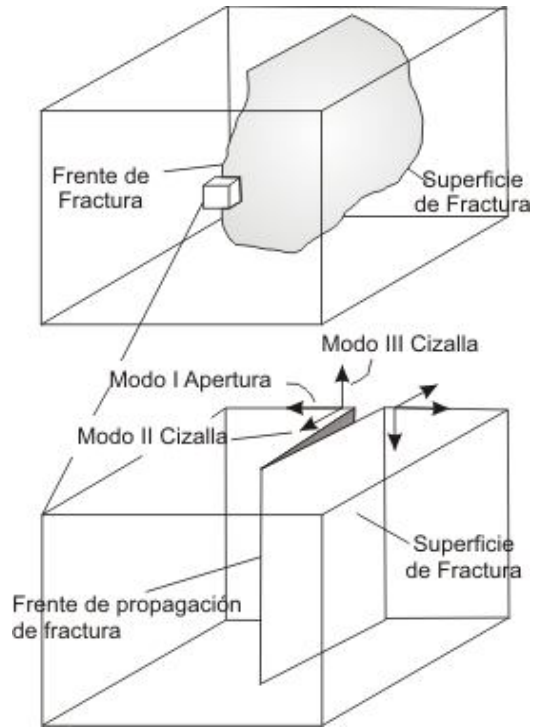


Figura 5.1 Idealización de una fractura en un macizo rocoso mostrando el Modo I (apertura o tensión), Modo II (desplazamiento en la dirección del frente de propagación de la ruptura) y Modo III (desplazamiento perpendicular al frente de propagación de la ruptura), (Pollard y Aydin, 1988).

Las fracturas de tensión son asociadas con el modo de apertura, Modo I, mientras que las fracturas de tipo cizalla al igual que las fallas con los Modos II y III (Pollard y Aydin, 1988).

5.3.1 Fracturas Tectónicas

Las fracturas tectónicas se producen por la aplicación de fuerzas superficiales, su origen puede ser asociado a un evento tectónico con base en la orientación, distribución y morfología de las fracturas (Nelson, 1985).

5.3.1.1 Sistemas de Fracturas asociadas al fallamiento

Las fracturas asociadas con fallas están relacionadas al propio estado de esfuerzo que causó el fallamiento, las relaciones entre estas las fallas y fracturas han sido mostradas y documentadas por Stearns y Friedman (1972).

Las fracturas en el entorno de una falla presentan tres direcciones preferenciales, las cuales corresponden a las direcciones posibles de fracturas experimentales (Fig. 5.2).

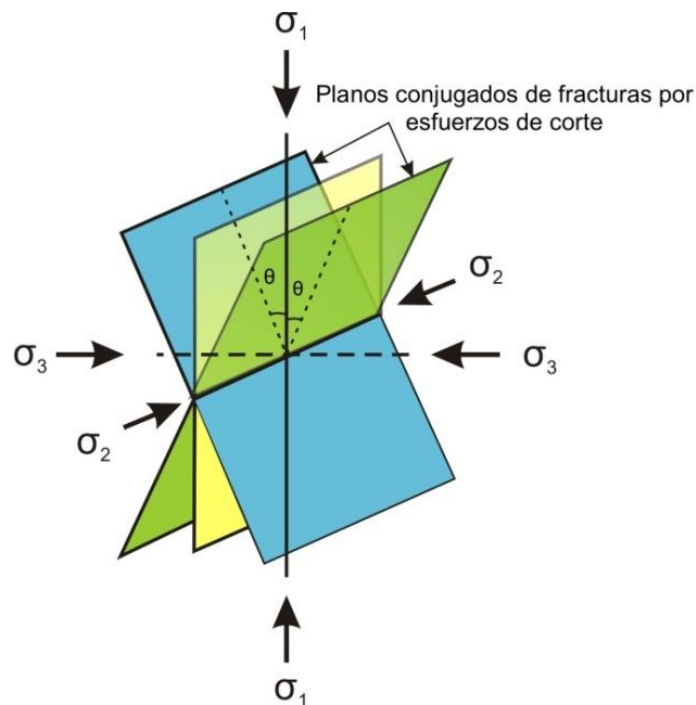


Figura 5.2 Planos posibles de fracturas desarrollados en pruebas de compresión en laboratorio. Fracturas de cizalla (planos verde y azul) y fracturas de tensión (plano amarillo). Tomado de Nelson (1985).

- Paralela a la falla. La mayoría de las fracturas asociadas a las cercanías de las fallas y con disposición paralela a las mismas, son llamadas fracturas de tipo cizalla (Modos II y III) (ver Figura 5.3).

- Oblicuas al plano de falla principal se ubican las fracturas de tipo cizalla conjugadas que la cortan con ángulo agudo (2θ) y que son el complemento cinemático de la misma (ver Figura 5.3).
- Oblicuas tanto a la falla como a las fracturas de tipo cizalla, se alinean las fracturas de tensión (Modo I), bisecando en ángulo agudo (θ) los dos sistemas conjugados de fracturas de tipo cizalla (ver Figura 5.3).

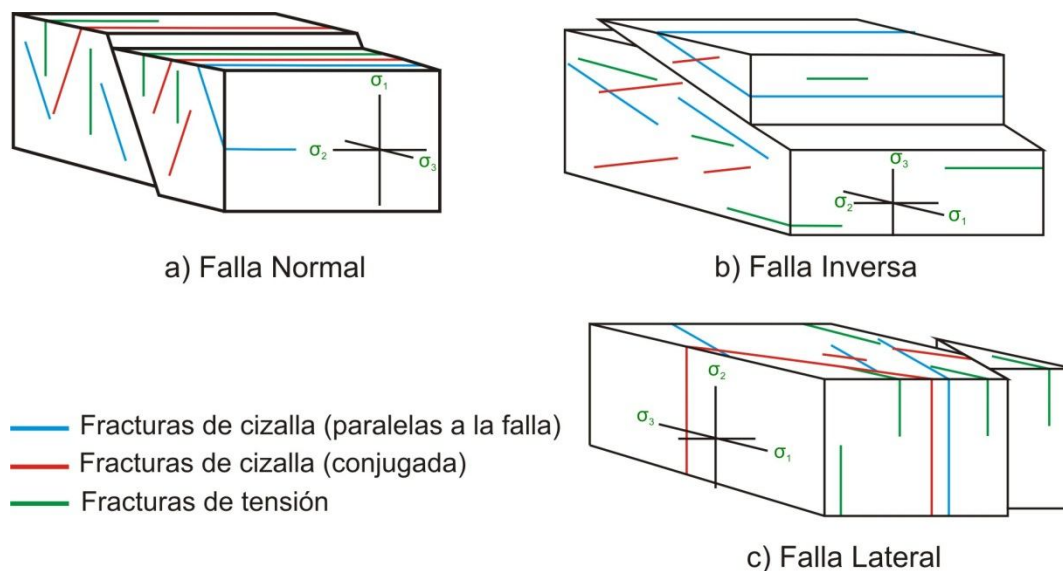


Figura 5.3 Esquema que muestra las fracturas asociadas a un fallamiento: a) normal, b) inverso y de c) desplazamiento lateral. Sistema conjugado de fracturas (líneas azul y roja), fracturas de tensión (líneas verdes) bisecando en ángulo agudo los sistemas de fracturas conjugados. Modificado de Nelson (1985).

Según Nelson (1985), de las relaciones entre el fallamiento y el fracturamiento, es posible determinar la dirección de los esfuerzos principales o cargas en el tiempo de la deformación. Asimismo, si se conoce la orientación del plano de falla y sus fracturas asociadas, puede determinarse el sentido de movimiento de la falla. Las relaciones entre las fracturas y las fallas se dan a cualquier escala. Friedman (1969) predijo la orientación e inclinación de una falla cercana, con base en el

análisis de la orientación de las fracturas microscópicas en muestras de núcleo orientado.

Nelson (1985) propone que la densidad del fracturamiento asociado con fallas depende de:

- La litología
- La distancia al plano de falla
- La cantidad de desplazamiento a lo largo de la falla
- La deformación total dentro de la roca
- La profundidad de sepultamiento a la que ocurrió el fallamiento
- La naturaleza de la falla

5.2.1.2 Sistemas de Fracturas asociadas al plegamiento

Durante el desarrollo de un pliegue, la historia de esfuerzos y la deformación en el interior de las rocas es muy compleja, de ahí las fracturas presentan una gran diversidad de patrones. Stearns (1964, 1968a, 1968b) proponen una descripción sobre la geometría de las fracturas asociadas a pliegues (Tabla 5.1 y Fig. 5.4).

Aun cuando todos los tipos de fracturas son importantes para el entendimiento de los procesos de plegamiento, las fracturas más frecuentes y que tienen un número significativo de fracturas para ser considerados son los del Tipo I y II y en menor proporción el Tipo III. Los tres tipos de arreglos presentan un sistema de fracturas de tipo cizalla conjugada y otro sistema de fracturas de tensión.

En el arreglo Tipo I, las fracturas de tensión son paralelas al plano geométrico ac, mientras que las fracturas de cizalla están contenidas en el plano geométrico ab (Fig. 5.4). Este tipo de arreglo muestra un acortamiento en la dirección del buzamiento de las capas y un alargamiento en la dirección del rumbo de las

capas. En este caso no se tiene acortamiento o alargamiento en el sentido normal a la estratificación.

Tipo	σ_1	σ_2	σ_3
I	Paralelo a la dirección del echado.	Perpendicular a la estratificación.	Paralelo a la estratificación.
	Paralelo a la estratificación.		
II	Perpendicular a la dirección del echado.	Perpendicular a la estratificación.	Paralelo a la estratificación.
	Paralelo a la estratificación.		
III	Perpendicular a la estratificación (a).	Paralelo al rumbo de la estratificación.	Paralelo a la dirección del echado.
	Paralelo a la dirección del echado (b).	Paralelo al rumbo de la estratificación.	Perpendicular a la estratificación.
IV	Paralelo a la estratificación.	Paralelo al rumbo de la estratificación.	Perpendicular a la estratificación.
V	En un ángulo al plano de estratificación (ángulo diedral).	Paralelo al rumbo de la estratificación.	En un ángulo al plano de estratificación (90°-ángulo diedral).

Tabla 5.1 Arreglo de las fracturas asociadas a pliegues, con base en los ejes de esfuerzos principales.

Las fracturas de tensión en el arreglo Tipo II, son paralelas al plano geométrico bc, mientras que las fracturas de cizalla están contenidas en el plano geométrico ab (Fig. 5.4). La geometría de este segundo patrón presenta un alargamiento paralelo al buzamiento de las capas, acortamiento paralelo con el rumbo de la capa y ningún cambio en la normal a la estratificación.

En el arreglo Tipo III (a), las fracturas de cizalla están contenidas en el plano geométrico ac , mientras que las fracturas de tensión son paralelas a bc (Fig. 5.4). La geometría del patrón muestra un alargamiento paralelo con el buzamiento de las capas y acortamiento perpendicular al buzamiento de las capas. Las fracturas de tensión del Tipo III (b) son paralelas al plano geométrico ab , mientras que las fracturas de cizalla están contenidas en ac (Fig. 5.4). El alargamiento y acortamiento que presenta este arreglo son paralelo a la estratificación y en dirección de la estratificación respectivamente.

Las fracturas de cizalla (Tipo I, II y III) rara vez muestran desplazamientos importantes (decimétricos). Sin embargo son señaladas como de tipo de cizalla o de tensión considerando las descripciones mencionadas anteriormente.

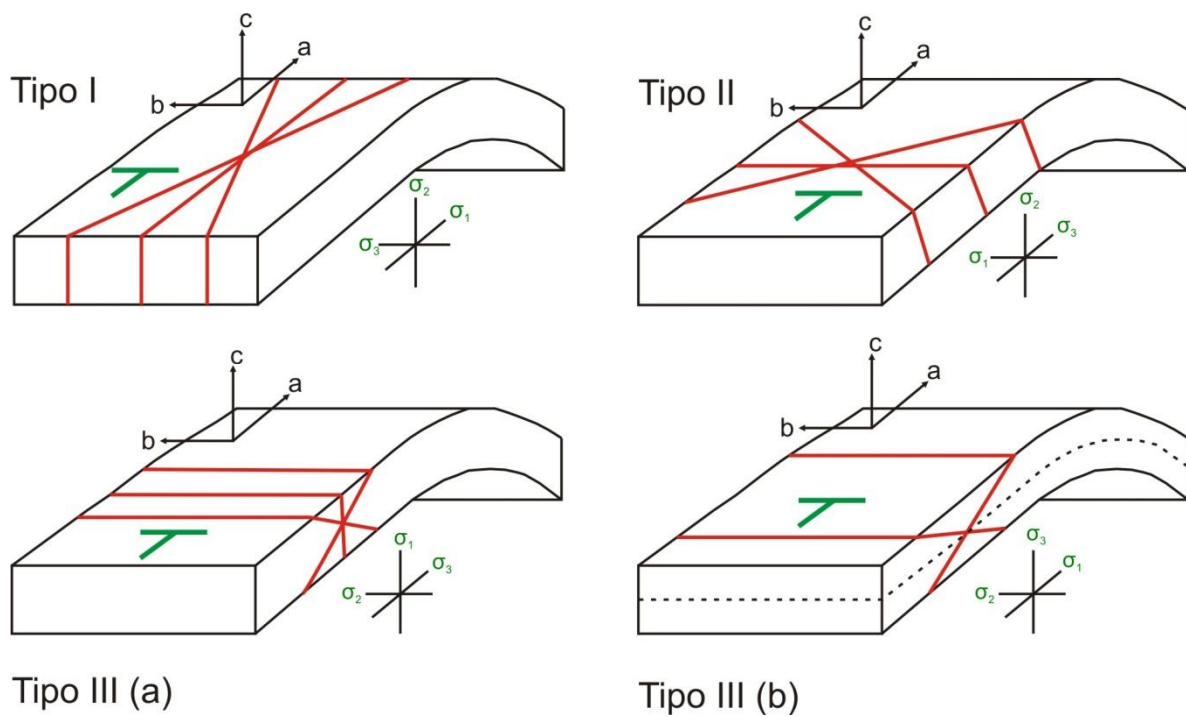


Figura 5.4 Clasificación de los sistemas de fracturas relacionadas con la formación de pliegues. Modificado de Stearns (1968b). Plano geométrico ab paralelo a la estratificación; plano geométrico ac normal a la estratificación y paralelo a la dirección de la máxima pendiente, y plano geométrico bc normal a la estratificación y paralelo a la línea de rumbo.

5.4 ARREGLO ESPACIAL DE FRACTURAS

La forma en que las fracturas de una misma familia o set (misma orientación e inclinación), se disponen una respecto a la otra en el espacio se define como arreglo espacial de las fracturas. El espaciamiento entre las fracturas es la distancia entre dos fracturas adyacentes de un mismo sistema de fracturas y medido a lo largo de una línea recta (*scan line*) que se traza de manera perpendicular a la orientación del sistema principal de las fracturas (Fig. 5.5) (Priest y Hudson, 1976; Gross et al., 1995).

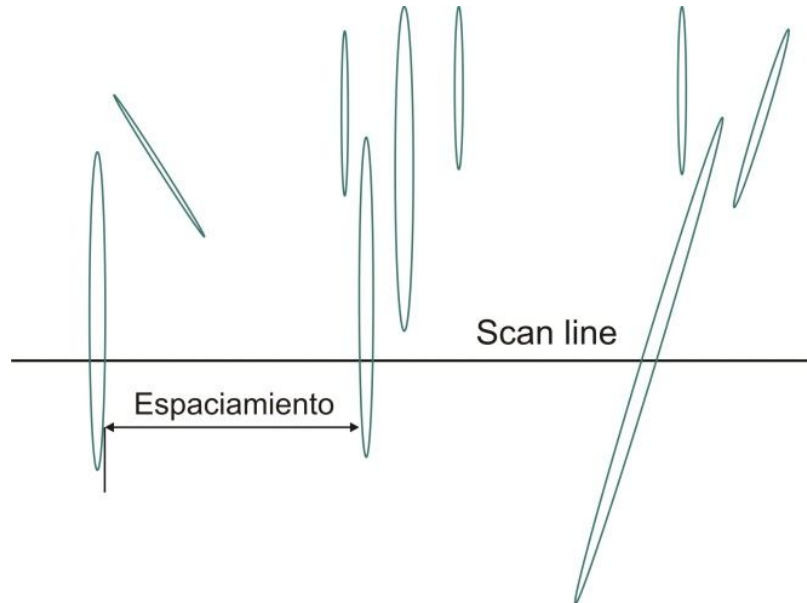


Figura 5.5 Representación esquemática del espaciamiento de fracturas y aperturas cinemáticas.

5.5 DENSIDAD DE FRACTURAS

En la literatura, se utilizan los términos de densidad de fracturas, intensidad de fracturas, espaciamento promedio de fracturas y frecuencia de fracturamiento, para describir la abundancia espacial de las fracturas.

La densidad de fracturamiento, puede obtenerse mediante: a) la relación entre el número de fracturas y la longitud de observación, b) la suma de longitudes de fracturas y el área de análisis, y c) la suma de la superficie fracturada y el volumen de estudio (Mauldon et al., 2001).

En este trabajo la densidad de fracturas (F) será determinada por la relación entre el número de fracturas (N) y la longitud total (L) del *scan line*:

$$F = \frac{N}{L}$$

Existen diversos ejemplos de cómo obtener la densidad de fracturamiento en afloramiento (Corbett et al., 1987; Huang y Angelier, 1989; Narr y Suppe, 1991; Gross, 1993). Sin embargo, los datos usados para inferir las relaciones entre el espesor y/o facies y la intensidad de fracturamiento y/o promedio de espaciamento, no precisan la apertura de la fractura considerada para tal determinación. Estos autores suponen que todas las fracturas son de la misma dimensión, no obstante, las fracturas comúnmente muestran una amplia gama de dimensiones.

Al tomar en cuenta la apertura de las fracturas, en el estudio de su arreglo espacial, es posible inferir el posicionamiento preferencial de las fracturas de un tamaño específico en una región específica.

Gomez y Marret, (2005) y Ortega et al. (2006), utilizan una distribución de frecuencia acumulada, tomando en cuenta el atributo de interés (apertura,

longitud) de la fractura, para poder hacer una estimación de la abundancia de fracturas.

El espaciamiento entre las fracturas a lo largo de un *scan line* ha sido medido en diversas litologías tales como granitos (Rouleau y Gale, 1985), cuarcitas (Simpson, 2000), cretas (Priest y Hudson, 1976; Gale, 2002), pedernal (Narr y Suppe, 1991; Gross, 1993), calizas (Huang y Angelier, 1989; Rives et al., 1992; Gillespie et al., 2001), dolomías (Gross y Engelder, 1995; Gomez, 2004), y areniscas (Priest y Hudson, 1976; Huang y Angelier, 1989; Gillespie et al., 1993), obteniéndose diferentes funciones algebraicas para las distribuciones que describen la frecuencia relativa de las fracturas.

5.6 METODOLOGÍA

Para estudiar las fracturas que afectan las facies de la Formación Morelos (Cap. IV) se colectaron datos estructurales en 12 estratos de diferente espesor, cubriendo 5 de las 10 facies identificadas y descritas en el capítulo IV. Para obtener datos confiables se seleccionaron las superficies que presentaran menor meteorización y en donde fuera posible observar los atributos más importantes de las diferentes familias de fracturas. Estos atributos (apertura y espaciamiento) se midieron a lo largo de un *scan line* (Fig. 5.5).

5.6.1 Espesor de los estratos

El espesor de los estratos se definió a partir de condiciones texturales, donde los estratos son caracterizados por una textura homogénea. El límite textural se delimitó en afloramientos con lupa y en gabinete con lámina delgada. También fueron observados los límites estilolíticos y estratigráficos (Fig. 5.6), debido a que

estos pueden modificar la propagación de las fracturas (Eyssautier-Chuine et al., 2002).

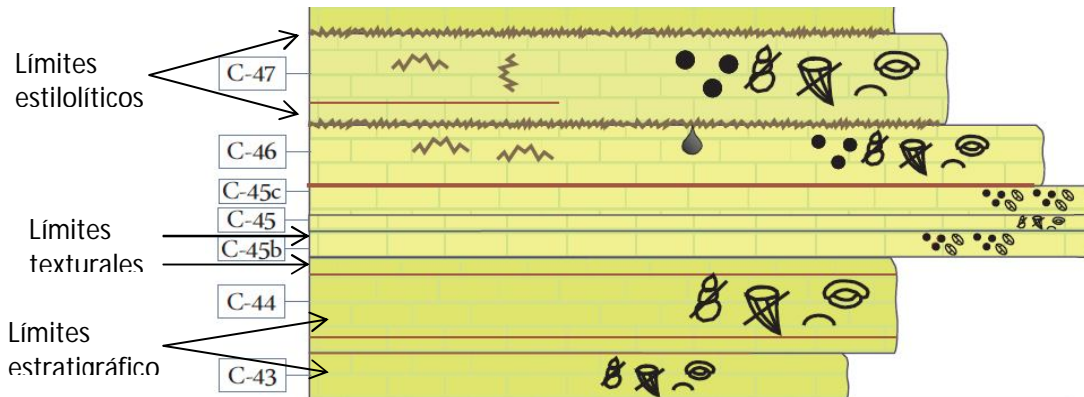


Figura 5.6 Porción de la columna estratigráfica que muestra los diferentes tipos de límites de estratos que pueden modificar la propagación y distribución de las fracturas.

5.6.2 Atributos de las fracturas

La primera medición que se registró fue la distancia entre el origen del *scan line* y el plano más cercano de la primera fractura a lo largo del *scan line*. Posteriormente, se midió la distancia entre los dos planos (la apertura cinemática) de la fractura. Finalmente, se midió la distancia entre las paredes de la primera y la segunda fractura (espaciamiento). Estos dos últimos pasos se repitieron a lo largo de toda la longitud del *scan line* para cada fractura (Fig. 5.7).

Las fracturas se consideraron como rasgos planares; así se caracterizaron mediante la orientación y buzamiento, datos que fueron utilizados para correcciones posteriores de espaciamientos y aperturas de las fracturas, del plano de fractura de cada uno de los sistemas atravesados por el *scan line*. De igual manera se midió el buzamiento del plano que tuviera la misma orientación que el

scan line y que fuera aproximadamente perpendicular a la superficie, además de la longitud total del *scan line* (Anexo 2a).

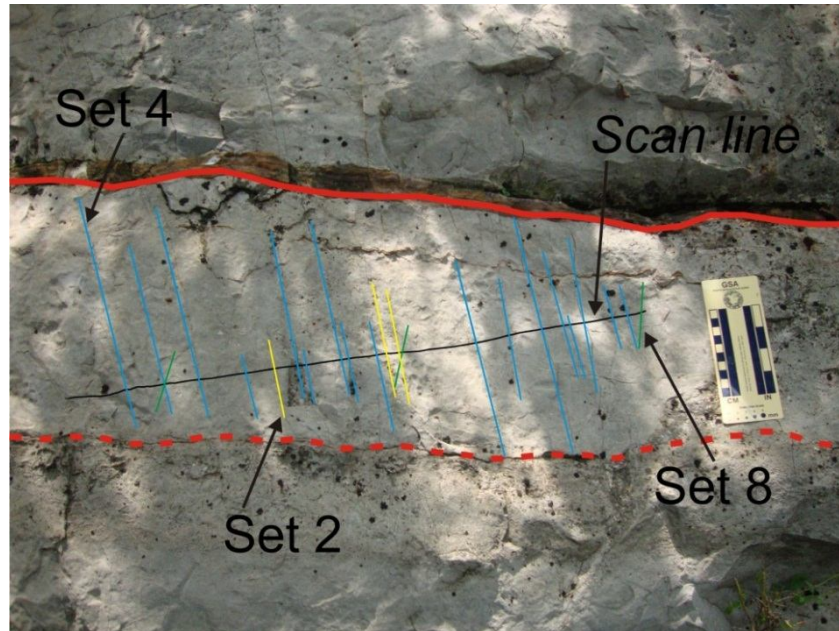


Figura 5.7 *Scan line* para la colección de los datos de apertura y espaciamento de cada una de las fracturas en el estrato 8. La facies en este sitio es Grainstone de intraclastos y bioclastos. La línea discontinua corresponde al límite textural y la línea continua al límite estratigráfico del estrato. *Scan line* (línea negra) se trazó aproximadamente perpendicular a la familia principal de fracturas (líneas azules).

Marrett et al. (1999) definen la apertura de la fractura (apertura cinemática), como la distancia perpendicular entre los planos de la fractura. La medición de este atributo se realizó en aquellas fracturas que se encontraban rellenas por calcita. La apertura de las fracturas se estimó con base en una regla comparativa que contiene líneas incrementales que inician con 0.05 mm hasta 5 mm de ancho (Fig. 5.8). Para los casos donde las fracturas presentaran aperturas mayores a 5 mm, el valor se obtuvo con una regla milimétrica o una cinta métrica.

Las magnitudes consideradas facilitan la graficación de los datos en una escala logarítmica. Adicionalmente, esto permite que los valores de las aperturas estén

espaciados uniformemente. Para el análisis e interpretación de estos datos, se graficaran en escalas log-log (Ortega et al., 2006).

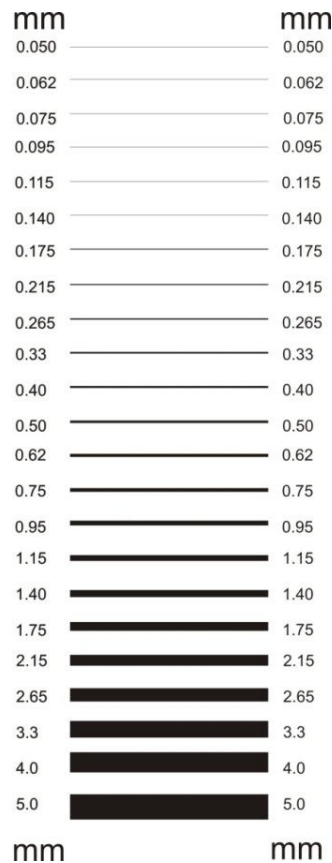


Figura 5.8 Regla comparativa que se utilizó para medir las aperturas de las fracturas. Escala tomada de Ortega et al. (2006).

Para estimar la densidad de fracturas, tomando en cuenta la apertura de la fractura, se usó una distribución de frecuencia acumulativa-apertura de fractura. Esto nos permite hacer una comparación entre los datos obtenidos en distintos lugares y/o diferentes niveles de observación (Ortega et al., 2006). Las fracturas con longitudes inferiores al espesor del estrato donde se trazó el *scan line*, o no

tenían una continuidad a lo largo del estrato, no fueron contempladas en el análisis (p.e, Laubach y Tremain, 1991; Laubach et al., 1998).

5.6.3 Corrección de datos

Las magnitudes obtenidas a lo largo de una *scan line* se corrigieron para obtener los valores reales. Las distancias medidas fueron corregidas dos veces, mientras que la apertura solo tuvo una corrección (Anexo 2b).

La primera corrección se aplicó a las distancias aparentes (d), mediciones en campo sobre el *scan line*. Solo se tomaron en cuenta las orientaciones de cada una de las familias de fracturas con respecto a la orientación de la *scan line*, esto para obtener el valor angular entre la orientación de la familia de fracturas y de la *scan line*, y con la ayuda de funciones trigonométricas (ecuación 1), obtener las distancias perpendiculares (d_1) en el plano de la superficie (Fig. 5.9).

$$d_1 = d * \cos \alpha \dots\dots\dots(1)$$

Una vez calculadas las distancias d_1 se aplicó una segunda corrección, con base en el valor angular, obtenido en proyecciones estereográficas apoyado de stereonet®, entre el plano de la superficie (perpendicular al plano del *scan line*) y el plano de la fractura (Fig. 5.10), obteniéndose el valor real del espaciamiento d_r (ecuación 2).

$$d_r = d_1 * \sin \beta \dots\dots\dots(2)$$

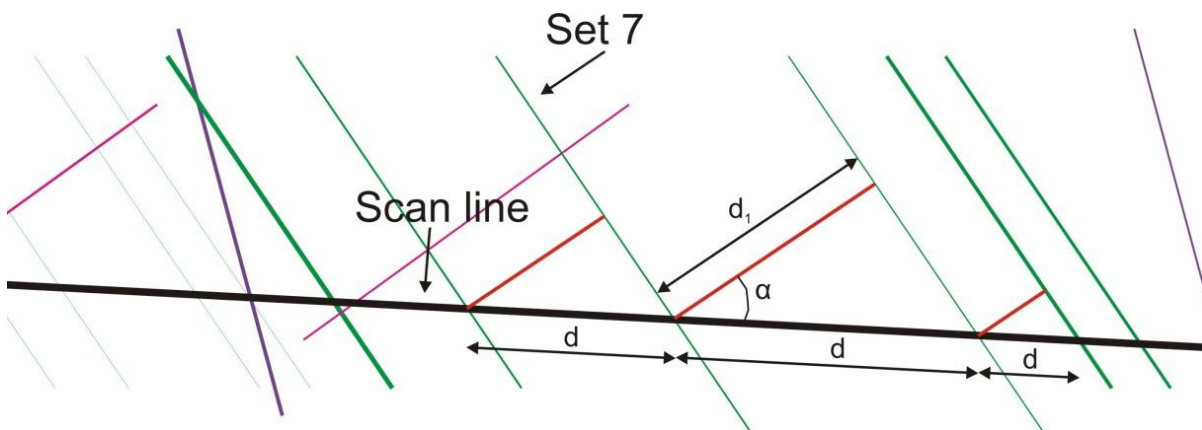


Figura 5.9 Esquema que muestra el método gráfico para obtener el valor de la distancia d_1 a partir de los espaciamientos medidos en campo. Donde α es el ángulo entre la orientación del *scan line* y el plano de fractura. *Scan line* 1.

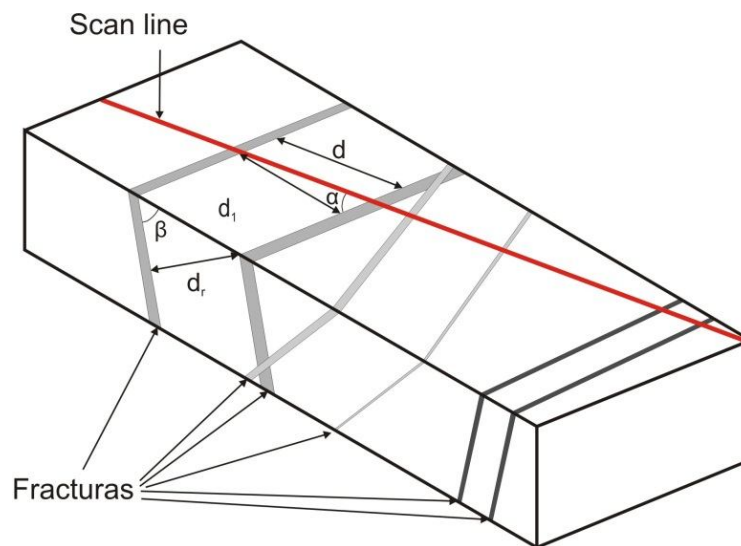


Figura 5.10 Esquema que muestra la orientación de las fracturas a lo largo del *scan line*, para obtener la distancia real (d_r) entre cada una de las fracturas de una misma familia. Donde α es el ángulo entre la orientación del *scan line* y la orientación del plano de fractura y β es el ángulo entre el plano de la superficie y el plano de fractura.

De manera análoga a la distancia d_1 , se corrigió el valor de apertura (a) colectada en campo (ecuación 3).

$$a_{\text{real}} = a \cdot \sin \beta \dots \dots \dots (3)$$

a = apertura colectada en campo

β = ángulo entre el plano de la superficie y el plano de fractura

5.6.4 Distribución de frecuencia de fracturas

Para estimar la distribución de la frecuencia acumulativa-apertura de fractura, de los datos reales de cada uno de los sistemas del *scan line*, se siguieron los siguientes pasos propuestos por Ortega et al. (2006):

- Se ordenaron las mediciones de apertura, de mayor a menor.
- Cada apertura se numeró, de tal forma que el valor mayor de apertura fue el número 1 y así sucesivamente hasta el valor más pequeño de apertura (generando una lista de números acumulativos).
- De la lista se eliminaron aquellas fracturas que tenían el mismo valor de apertura, a excepción de la que poseía el mayor número acumulativo.
- Los números acumulativos fueron normalizados con la longitud del *scan line*. Generando un estimado de la densidad de fracturamiento acumulada (número de fracturas de una cierta apertura por unidad de longitud del *scan line*). Este parámetro puede ser utilizado para comparar densidades de fracturamiento en diferentes estratos y/o escalas de observación.
- Se graficó la densidad de fracturamiento acumulada vs apertura de fractura, para tener una representación más detallada de la distribución de fracturas. Varias distribuciones pueden ser ajustadas adecuadamente usando leyes

matemáticas. Obteniéndose un modelo lineal dado por la Ley de potencia en una gráfica log-log o un modelo exponencial en una gráfica log-lineal.

- Los parámetros del modelo fueron obtenidos para cada sistema, de la distribución de frecuencia observada.

En estadística, una distribución de frecuencias es un inventario de los valores que toma una variable en una muestra (Salkind, 2004). Las distribuciones de frecuencia de los atributos de fractura, se puede comparar con un modelo predeterminado que tiene una expresión algebraica conocida y que describe la frecuencia relativa de cada valor en la muestra estadística. Este tipo de modelo (comúnmente conocido como modelo de probabilidad o distribución de probabilidad) representa la estructura esencial de una distribución de frecuencias, como si un número infinito de mediciones de fractura fueran obtenidas con una precisión infinita.

La calidad de ajuste de una distribución de probabilidad, a los datos de espaciamiento de un sistema de fracturas en particular, es expresada usando los coeficientes R^2 o X^2 . Por lo general, la distribución de probabilidad con un coeficiente R^2 mayor o un X^2 menor, será la distribución que será asignada al conjunto de datos. Los modelos de probabilidad más común para el espaciamiento entre las fracturas naturales en las rocas son: log-normal, exponencial negativo, logarítmico exponencial, normal y ley de potencias.

5.7 RESULTADOS

Para este trabajo se midieron 390 fracturas en total, de acuerdo a la longitud y calidad de los afloramientos se registraron entre 22 y 65 fracturas por estrato. Se representaron los planos de fracturas de cada estrato, en stereonet®, pudiéndose identificar 8 sistemas de fracturas, con base en las orientaciones preferenciales de

los planos de las fracturas. Se consideraron siete sistemas conjugados, tomando en cuenta aquellos sistemas que tuvieran aproximadamente las mismas orientaciones y el mismo valor de buzamiento, pero con un sentido opuesto (Fig. 5.11).

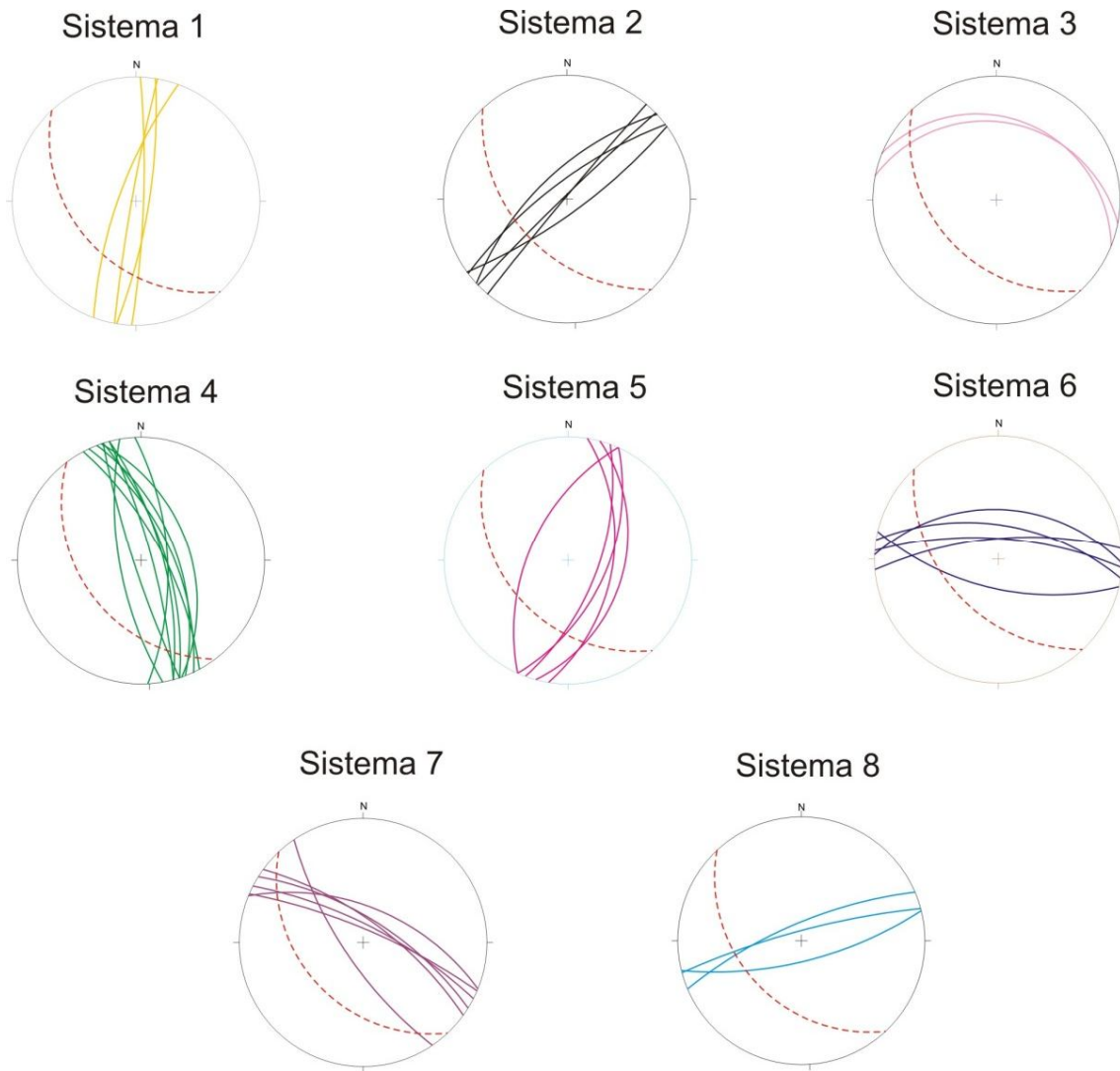
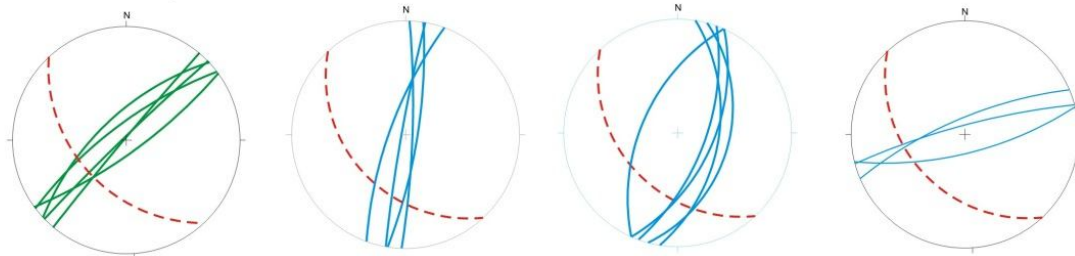


Figura 5.11 Representación estereográfica de los sistemas de fracturas medidos en los 12 *scan lines*. Las trazas ciclográficas discontinuas representan los planos de estratificación y las trazas ciclográficas continuas los planos de fracturamiento.

Las fracturas medidas fueron consideradas como fracturas Modo I, debido a que ninguna de ellas mostraba un desplazamiento aparente significativo en la dirección del frente de propagación de la ruptura o perpendicularmente a este (Pollard y Aydin, 1988). Sin embargo, algunas de estas fracturas pudieron ser consideradas como fracturas de cizalla (Modo II y III) solo por su geometría de conjunto.

Se observó que las fracturas estaban asociadas a la formación de un pliegue, teniendo principalmente planos de fracturamiento Tipo I y Tipo II (Fig. 5.12) (Stearns, 1968b), sin embargo regionalmente también se pueden relacionar con la falla lateral de Papalutla (Silva-Romo, 2008).

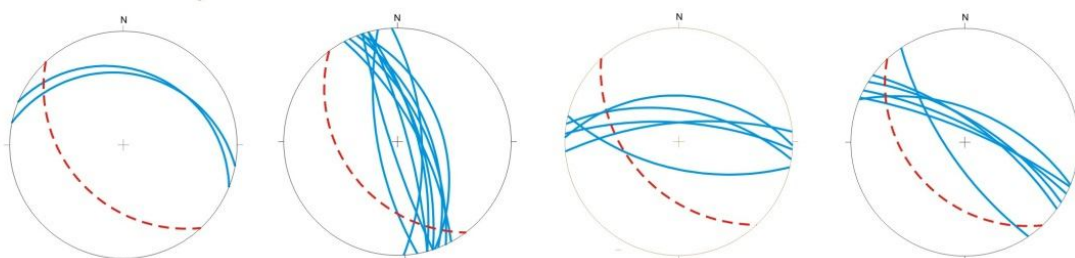
Fracturas Tipo I



Fracturas de tensión

Fracturas de cizalla (Sistemas 1, 5, 8)

Fracturas Tipo II



Fracturas de cizalla (Sistemas 3, 4, 6 y 7)

Figura 5.12 Representación estereográfica de los arreglos de fracturas (Tipo I y Tipo II). Las trazas ciclográficas discontinuas representan los planos de estratificación y las trazas ciclográficas continuas los planos de fracturamiento.

De manera general se obtuvo la densidad de fracturas, sumando las densidades de todos los sistemas en cada una de las siguientes facies analizadas (Tabla 2):

Boundstone de Toucasias

La facies Boundstone de Toucasias, caracterizada por tener una estratificación gruesa, presentaba una recristalización moderada. El *scan line* (SL-1) atravesó cuatro sistemas de fracturas, obteniéndose una densidad de 54 fracturas/metro.

Grainstone de intraclastos, bioclastos y peloides

La facies Grainstone de intraclastos, bioclastos y peloides, definida por tener una estratificación delgada a masiva, entre 20 y 140 cm de espesor, presentaba una recristalización de escasa a moderada. Se midieron tres *scan lines* (SL-3, SL-5 y SL-8), determinando una densidad de 23 fracturas/metro, 57.5 fracturas/metro y 45 fracturas/metro, respectivamente.

Mudstone-Wackestone de bioclastos

La facies Mudstone-Wackestone de bioclastos, se caracterizó por tener una estratificación delgada a masiva, entre 30 y 110 cm de espesor, presentando una recristalización de escasa a moderada. En ella se midió un *scan line* (SL-7), obteniéndose una densidad de 53 fracturas/metro.

Wackestone-Packstone de bioclastos y peloides

Esta facies, caracterizada por tener una estratificación delgada, entre 20 y 40 cm de espesor, mostraba una recristalización de intensa a moderada. En ella se midieron cuatro *scan lines* (SL-4, SL-6, SL-10 y SL-11), obteniéndose una densidad de 25 fracturas/metro, 74 fracturas/metro, 35 fracturas/metro y 34.5 fracturas/metro respectivamente.

Packstone-Grainstone de bioclastos y peloides/pellets

La facies Packstone-Grainstone de bioclastos y peloides/pellets, definida por tener una estratificación mediana a masiva, entre 60 y 110 cm de espesor, presentaba una recristalización de escasa a moderada. Se midieron cuatro *scan lines* (SL-2, SL-9 y SL-12), determinándose una densidad de 52 fracturas/metro, 35 fracturas/metro y 37.5 fracturas/metro, respectivamente.

Scan line	Facies	Familias de fracturas	Longitud del scan line	Espesor del estrato	Intensidad (fracturas/m)	Rasgos Diagenéticos
		(PD)	(cm)	(cm)		(Recristalización)
1	Boundstone de touaceas(Packstone a Grainstone de peloides)	1 N 006°, 81°	91.9	80	54	Moderada
		2 N 054°, 77°				
		4 N 342°, 65°				
		7 N 298°, 70°				
2	Grainstone de peloides	1C N 195°, 80°	53.1	50	52	Escasa-Moderada
		6 N 103°, 63°				
		5 N 017°, 52°				
3	Packstone- grainstone de intraclastos y peloides	2C N 227°, 79°	102.3	20	23	Moderada-Escasa
		4 N 342°, 65°				
		5 N 017°, 52°				
		7C N 139°, 67°				
		8 N 076°, 71°				
4	Packstone- de Peloides y bioclastos	1C N 195°, 80°	109	30	25	Intensa-Moderada
		4C N 166°, 77°				
		6C...N 273°, 62°				
		7C N 139°, 67°				
5	Grainstone de peloides, intraclastos y bioclastos	7C N 139°, 67°	40	80	57.5	Escasa-Moderada
6	Wackestone-packstone de bioclastos y peloides	4 N 342°, 65°	87	30	74	Moderada-Intensa
		5C N 204°, 55°				
7	Mudstone - wackestone de bioclastos	4 N 342°, 65°	66	50	53	Escasa-Moderada
		5 N 017°, 52°				
		6C N 273°, 62°				
		8C N 251°, 76°				
8	Grainstone de pellets e intraclastos	2C N 227°, 79°	63.7	20	45	Escasa-Moderada
		4 N 342°, 65°				
		5 N 017°, 52°				
		7 N 298°, 70°				
		8C N 251°, 76°				
9	Packstone-grainstone de peloides y bioclastos	4 N 342°, 65°	78	60	41	Escasa-Moderada
		6C N 273°, 62°				
10	Packstone de peloides	2C N 227°, 79°	62	27	35	Escasa-Moderada
		4 N 342°, 65°				
11	Packstone de bioclastos	2C N 227°, 79°	69.5	90	34.5	Moderada-Intensa
		3 N 287°, 25°				
		4C N 166°, 77°				
12	Packstone-grainstone de pellets	3 N 287°, 25°	80	40	37.5	Escasa-Moderada
		4 N 342°, 65°				
		6C N 273°, 62°				
		7C N 139°, 67°				

Tabla 2. Distribución de la densidad de fracturas en algunas de las facies determinadas en el capítulo IV.

5.7.1 Influencia del espesor de los estratos en la densidad de fracturas

La densidad de fracturas fue basada en todos los sistemas que fueron medidos en cada uno de los estratos. El espesor de los estratos y la densidad de fracturas fueron graficados con el fin de verificar la relación que tiene el espesor en el fracturamiento (Fig. 5.13)

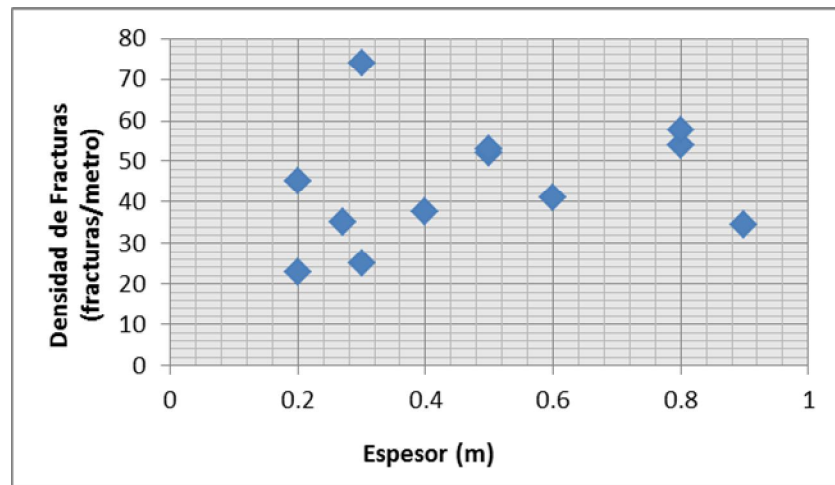


Figura 5.13 Relación entre el espesor de los estratos y la densidad de fracturas.

Los datos muestran un leve aumento de la densidad con el aumento del espesor, pero esta relación no es muy clara. Se conocen muchos casos donde el espaciamiento de las fracturas en rocas sedimentarias diverge en gran medida del espesor del estrato (Wennberg et al., 2006; Odonne et al., 2007), sin embargo, en rocas carbonatadas existen varios factores que podrían influenciar en la distribución de fracturas. Estos factores incluyen litología, diagénesis y propiedades mecánicas de la roca (Larsen et al., 2009), incluyendo también el tiempo de fracturamiento durante la historia de la roca (Gale et al., 2004). A diferencia de las rocas siliciclásticas (Ladeira y Price, 1981), en rocas carbonatadas la densidad de fracturas está controlada de mayor manera por la

textura que por su espesor, es decir, también puede ser controlado por el contenido de bioclastos y/o granos micríticos (Eyssautier-Chuine et al., 2002).

5.7.2 Relación de la textura de las rocas carbonatadas en la densidad de fracturas

Para poder inferir una posible relación entre la densidad y la textura, se comparó la densidad de fracturas de un mismo sistema que estuviera presente en diferentes texturas.

Los datos normalmente muestran efectos de truncamiento y censura (Marret et al. 1999). Estos efectos pueden producir desviaciones de una tendencia lineal en una gráfica log-log. El sesgo de truncamiento, es producido por el reconocimiento y registro de fracturas con aperturas cada vez menores. El sesgo de censura de grandes fracturas se debe a que estas fracturas son muestreos inadecuados en el área de observación. Estas desviaciones se pueden minimizar estableciendo un rango de medición para las aperturas de las fracturas que pueden ser observadas en todos los estratos. Los rangos de apertura de fractura para la ley de potencia es de .2 mm a 2 mm, de .05 mm a .2 mm para el segmento de truncamiento y 2 mm a 5 mm para el segmento de censura. Utilizamos un modelo de regresión para obtener la distribución de ley de potencia (segmento de recta en una gráfica log-log) de las fracturas en el afloramiento.

El segmento recto (Ley de potencias) para la población de aperturas de fracturas en una gráfica log-log, está representada por $F = ab^{-c}$, donde F es la frecuencia de fractura acumulativa, a es el coeficiente, b es la apertura y c la pendiente de la recta (Fig. 5.14). Estos parámetros pueden ser utilizados para inferir la distribución de fracturas con una apertura dada en el mismo volumen de roca (Marrett, 1996).

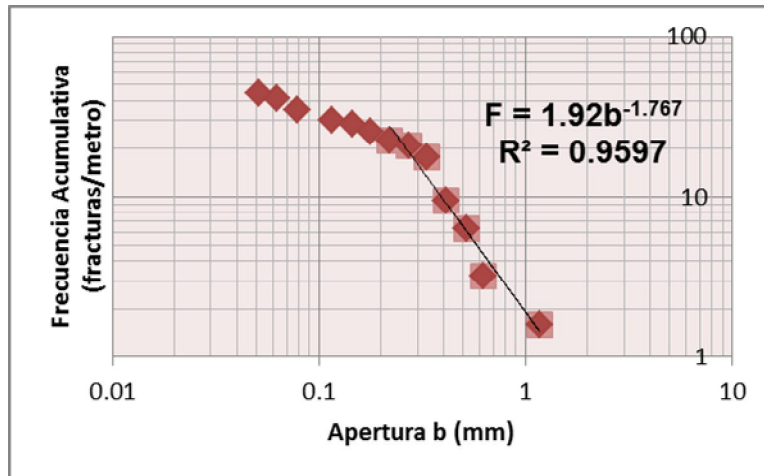


Figura 5.14. Distribución de la frecuencia acumulativa-apertura de fractura para el sistema 4 en el estrato 9.

Con base en los modelos obtenidos para cada una de las distribuciones de frecuencia acumulada-apertura de fractura (Anexo 2c), se observó que en los sistemas 6 y 7, la densidad de fracturas incrementa cuando hay mayor porcentaje de granos micríticos (pellets, peloides e intraclastos) y disminuye con la presencia de bioclastos en la textura. Para el sistema 4 no se encontró algún parámetro dominante para relacionarse con la densidad de fracturamiento, siendo la densidad variable tanto en diversas texturas como espesores. Los sistemas restantes no pudieron ser comparados por la falta de mediciones y porque no estaban presentes en dos o más estratos. Esta aparente discrepancia entre los resultados puede probablemente ser explicada por el hecho de que los granos son de diferente composición. En rocas carbonatadas, los granos son compuestos de partículas micríticas ($< 4\mu\text{m}$) y partículas de esparita ($> 4\mu\text{m}$) para los bioclastos.

Como consecuencia, las partículas micríticas pueden ser observadas tanto en la matriz como en lo granos que no sean bioclastos. Hanks et al. (1997) muestra que la densidad de fracturas para una textura lodo soportada es mayor que para un grano soportada, mientras que Eyssautier-Chuine et al. (2002) documenta que una

textura grano soportada puede comportarse como una lodo soportada, si los granos están compuestos principalmente de partículas micríticas (pellets, peloides e intraclastos).