

3. MARCO TEÓRICO

Como se mencionó en el planteamiento del problema, este proyecto se enfatiza en el procesamiento de datos sísmicos de reflexión, en especial, en la fase de migración de estos datos. En esta sección se mostrará de forma general las bases teóricas que se tuvieron en cuenta para el desarrollo del proyecto.

3.1 PROCESAMIENTO DE DATOS SÍSMICOS DE REFLEXIÓN

A continuación se mencionará cada uno de los pasos del procesamiento de datos sísmicos, que se tuvieron en cuenta para el desarrollo de este proyecto, no se profundizo en esto, ya que existe mucha información en la literatura, para mayor información ver [Özdoğan Yilmaz(2001)], [Biondi(2006)], [Florez y Antonieta(2004)], [Hernández(2008)],[Ullod(2000)], entre otros.

Este método se basa en las reflexiones del frente de onda sísmico sobre las distintas interfases del subsuelo. Como en la refracción, estas interfases responden a contrastes de impedancia que posteriormente se relacionaran con las distintas capas geológicas. Las reflexiones son detectadas por los receptores (geófonos) que se ubican en superficie y que están alineados con la fuente emisora. Debido a que las distancias entre fuente y los geófonos son pequeñas respecto a la profundidad de penetración, esto hace que se opere en ángulos pequeños, asegurando la obtención de reflexiones, ver figura 3.1.

Luego de tener los registros de campo, las reflexiones registradas por los diferentes geófonos, se procede a la etapa del pre-procesamiento, la cuál abarca:

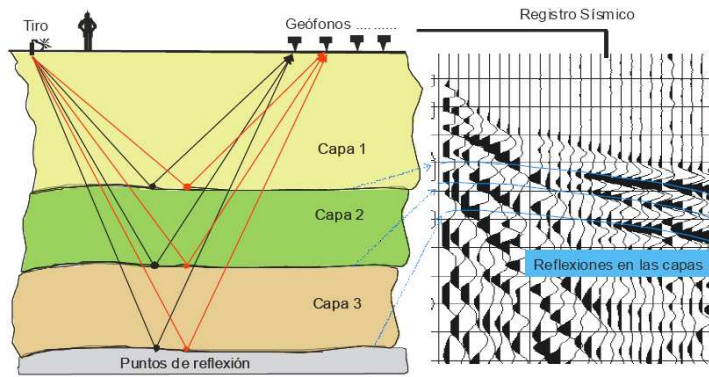


Figura 3.1: Recorrido de los rayos reflejados en tres capas para una posición de tiro y dos estaciones receptoras (geófonos). Debido a la ecuación de propagación, las reflexiones quedan marcadas en el registro sísmico como trayectorias hipérbolicas. Tomado de [Florez y Antonieta(2004)].

- **Asignación de geometría:** La manera según la cual estaban distribuidos los puntos de tiro y los receptores en el levantamiento sísmico es incorporada a los datos sísmicos.
- **Edición de trazas:** Las trazas ruidosas, las trazas con picos (spikes) aleatorios, o las señales monofrecuencia deben ser suprimidas; las trazas con polaridad invertida deben ser corregidas.
- **Recuperación de amplitudes:** Una función de ganancia es aplicada a los datos para corregir los efectos de la divergencia esférica en la energía de la frente de onda.
- **Filtro en frecuencia:** Filtros de frecuencia son los más importantes en procesamiento de señales. La energía de las reflexiones está presente en un cierto intervalo de frecuencias. Ruidos específicos de la fuente, bien como otros ruidos, son comúnmente encontrados en diferentes intervalos de frecuencia, siendo posible la separación del ruido de la información de reflexión.
- **Deconvolución:** Típicamente, la deconvolución tiene por objetivo mejorar la

resolución temporal, comprimiendo, en lo posible, el pulso efectivo de la fuente contenido en la traza sísmica a un Pulso de Dirac o Función Delta.

- **Estáticas de elevación:** Consiste en la alineación vertical, de la posición de fuentes y receptores. Después de aplicar la corrección, se considera que las fuentes y los receptores se encuentran en el mismo nivel de referencia.
- **Estáticas de refracción:** Usando el picado de primeros arribo, se crea un modelo de velocidad y profundidad, de la zona de baja velocidad.
- **Estáticas residuales:** El objetivo de las correcciones de estáticas residuales es desplazar las trazas, individualmente, de tal manera que las reflexiones en una familia CMP queden lo más próximo, posible, de una hipérbola.
- **Ordenamiento CMP:** Consiste en pasar del dominio fuente-receptor al dominio punto medio común - offset, (x_m, h) estos puntos se calculan por la relación $x_m = \frac{g+s}{2}$ y $h = \frac{g-s}{2}$, donde $g = (x_g, y_g)$ son las coordenadas del receptor y $s = (x_s, y_s)$ son las coordenadas de las fuentes.

Después de tener los datos con las correcciones, se procede al último análisis de velocidades, el objetivo del análisis de velocidades es encontrar la velocidad que mejor horizontalice la hipérbola de la reflexión y, como consecuencia, proveer el mejor resultado cuando el apilamiento es aplicado. Antes de este análisis, se tuvieron otros preliminares con cada estática.

Luego de tener el campo de velocidades RMS suavizado, se procede con la etapa de apilado, que consiste de dos pasos, los cuales se definen a continuación

- **Corrección NMO:** El campo de velocidades es usado en la corrección del sobretiempo normal (NMO) en las familias CMP. Después de la corrección NMO, los eventos son virtualmente horizontalizados a lo largo del eje de los

offsets. En otras palabras, el efecto de la distancia fuente-receptor es eliminado del tiempo de propagación.

- **Apilado:** El apilamiento es realizado por la suma horizontal de los datos, corregidos de NMO, de una familia CMP. Idealmente, el resultado es una aproximación de la sección Zero Offset donde las reflexiones son supuestas abajo de la posición del CMP.

Por último vendría la migración, aunque también podría ser una migración pre-apilado, a continuación se explica en detalle en qué consiste este proceso.

3.1.1 MIGRACIÓN SÍSMICA

El proceso de migración se usa para mover los reflectores de una posición dada a su ubicación e inclinación real. Se basa en las diversas soluciones de la ecuación de onda, que describe la propagación de la onda elástica a través del medio, tomando en cuenta el análisis de velocidades para redistribuir la energía de los reflectores desde el punto medio hasta su posición verdadera.

Existen diferentes métodos o algoritmos de migración, y cada uno de ellos pueden traer consigo soluciones diferentes, dependiendo del modelo de velocidades y de la calidad de los datos a procesar.

Algunos algoritmos de migración son

- **Migración FK:** Este algoritmo básicamente realiza la migración en el dominio de las frecuencias. Calcula la FFT 2D de las trazas apiladas luego de llevar los datos a profundidad por medio del análisis de velocidades (interpola linealmente las velocidades RMS entre cada punto de control). Posteriormente, reubica la energía en el dominio frecuencia Vs. número de ondas y le aplica la

FFT inversa para pasarlos al dominio del tiempo y revertir la conversión a profundidad. El paso a profundidad de los datos lo hace tomando en cuenta las velocidades RMS del análisis de velocidades o utilizando las pseudos-velocidades de Stolt. Estas últimas se calculan por el método de Stolt, que busca mejorar las variaciones de velocidades verticales, estrechando el eje del tiempo antes de la migración, para hacer que los eventos reflectivos aparezcan como si hubiesen sido adquiridos en un medio de velocidad constante [Hernández(2008)].

- **Migración Kirchhoff:** Se basa en que la respuesta de todo punto difractor es una hipérbola definida por una determinada velocidad, y que la suma sobre su inversa coloca en fase a la difracción. Por consiguiente esta migración trabaja realizando la suma de la energía a lo largo de las hipérbolas para sí recolocar el punto difractor en su posición verdadera [Hernández(2008)].
- **Migración por Diferencias Finitas:** Este algoritmo calcula las diferentes soluciones, aplicando diferencias finitas, de la ecuación de la onda, para implementar de forma eficiente la continuación en profundidad del campo de la onda sísmica y para manejar las variaciones laterales de las velocidades en el medio. Cada solución de la ecuación de la onda puede venir dada por diferentes aproximaciones matemáticas, y dichas aproximaciones establecen el carácter de la migración. La continuación en profundidad se obtiene por medio de una serie de pasos o ventanas, las cuales se van sumando en la medida de que las propiedades físicas entre ellas vayan siendo continuas; si los pasos o ventanas son largas la migración producirá dispersión en la sección, por ello se recomienda usar operadores pequeños. Por otra parte este algoritmo, calcula el grado límite de buzamiento de los eventos, para realizar la migración en tiempo; generalmente dicha solución se predefine para valores de 15 y 45 °, y hasta para valores de 65 °, llamada migración omega-x [Hernández(2008)].

A continuación se entrará en detalle en el proceso de migración Kirchhoff,

describiendo en que consiste y el algoritmo usado para el desarrollo de este proyecto.

Como se mencionó antes, la migración Kirchhoff, se basa en la suma de la energía a través de trayectorias hiperbólicas, que dependen de la velocidad, en el algoritmo 1 y en la figura 3.2, se pueden detallar los diferentes pasos para una migración 2D, cabe advertir que este algoritmo es basico y la calidad de los resultados dependen de diferentes procesos adicionales, que se deben agregar a este proceso para obtener una imagen con buena calidad.

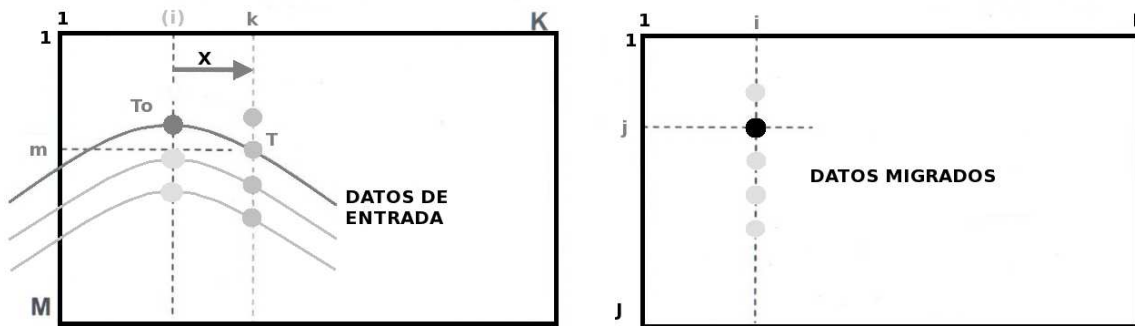


Figura 3.2: Migración básica Kirchhoff, migrando cada traza de entrada a una traza migrada, cada una de las variables mostradas en la figura, están relacionadas con el algoritmo descrito en 1. Tomado y modificado de [Bancroft(2007)].

Este algoritmo se explica con los siguientes pasos [Bancroft(2007)]:

- Se inicia la posición de una muestra migrada.
- Se calculan los tiempos de propagación T , para cada offset y así definir la curva de difracción.
- Interpolan y posiblemente filtran los datos de entrada en el tiempo T .
- Multiplican la muestra interpolada por el factor W .

Algoritmo 1 Algoritmo básico de Migración Kirchhoff. Tomado de [Bancroft(2007)].

Entrada: Datos sin migrar y modelo de velocidades.

Salida: Imagen migrada.

```

1: para  $i = 1 : I$  hacer
2:    $xm = i * dx, vel =$ 
3:   para  $k = 1 : K$  hacer
4:      $xin = k * dx$ 
5:      $xap = abs(xm - xin)$ 
6:     si  $xap < aperture$  entonces
7:       para  $j = 1 : J$  hacer
8:          $T_0 = j * dt$  ó  $z_0$ 
9:          $T = \sqrt{T_0^2 + \left(\frac{4 * xap}{V}\right)}$ 
10:         $m = \frac{T}{dt}$ 
11:        si  $m < M$  entonces
12:           $W = \frac{T_0}{T}$ 
13:           $Mig(j, i) = W * Indata(m, k)$ 
14:        fin si
15:      fin para
16:    fin si
17:  fin para
18: fin para
19: devolver

```

- Sumar los valores escalados.
- Insertar el valor total de la suma en la estructura de salida.
- Repetir el procedimiento para cada posición de la imagen migrada.
- Después de la suma total, puede ser requerido un escalado y filtrado.

La curva de difracción para un tiempo de migración dado, se puede encontrar por medio de la ecuación 3.1.

$$T^2(x) = T_0^2 + \frac{4x^2}{V^2(T_0)} \quad (3.1)$$

donde x es la distancia entre la traza de entrada y la traza migrada, T_0 es el tiempo de ida y vuelta en offset cero, la distancia entre fuente y receptor es nula, y V es la velocidad definida en T_0 . La amplitud $A(x)$ usualmente es escalada por:

$$A(x) = \cos \beta = \frac{T_0}{T} \quad (3.2)$$

y reducida a cero entre algunos dips límites, como 40 a 60 grados.

El máximo offset medio X_{max} , ver figura 3.3, puede ser establecido desde el triángulo ABC y tomando la tangente de β_{max} en la región de interés T_0 .

$$x_{max} = \frac{T_0 V \tan \beta_{max}}{2} \quad (3.3)$$

La apertura de migración es el rango espacial de datos que contribuyen en los cálculos. Usualmente se usa un rango ordenado de offset, pero se puede ver desde un ángulo límite 3.4. A la primera forma se le llama Rango de apertura y la segunda Ángulo de apertura.

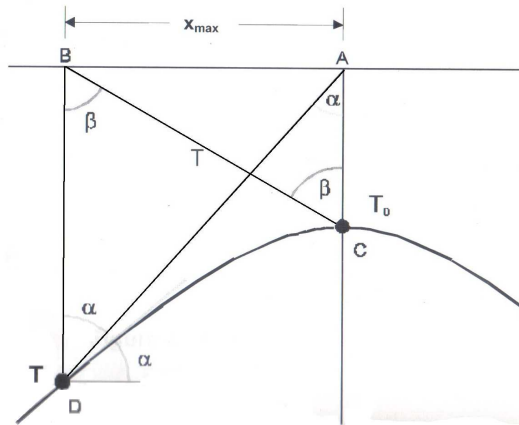


Figura 3.3: Relaciones angulares con la hipérbola. Tomado de [Bancroft(2007)].

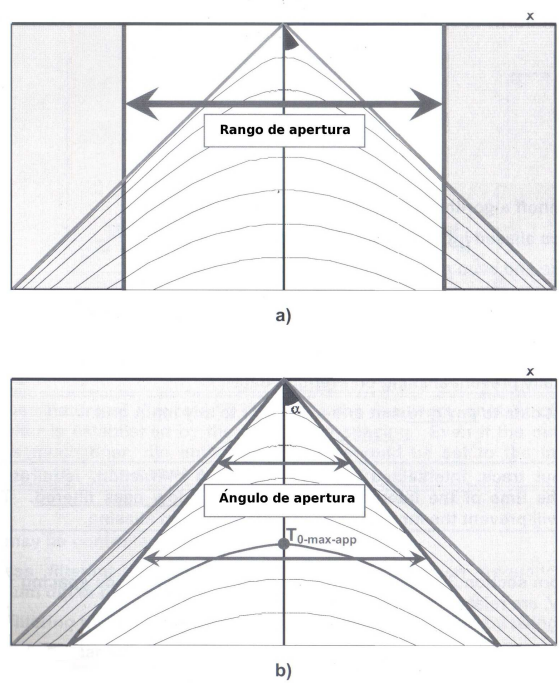


Figura 3.4: Apertura de migración. Tomado y modificado de [Bancroft(2007)].

Las ecuaciones anteriores describen el proceso de migración en el caso 2D, para los datos 3D el proceso es similar, pero hay que tener en cuenta que en este caso, aparece otra coordenada. El algoritmo usado para el procesamiento de los datos sísmicos, en el desarrollo de este proyecto, es descrito por la ecuación 3.4.

$$m_i(t_i) = \sum_{sg} a(t, r_{sg}) \frac{\partial}{\partial t} d_{sg}(t - t_{si} - t_{ig}) \quad (3.4)$$

donde m_i es la imagen migrada y t_i es el tiempo de migración en el punto i , $\frac{\partial}{\partial t} d_{sg}(t - t_{si} - t_{ig})$ es el valor en el tiempo $t_{si} + t_{ig}$ de la derivada parcial con respecto al tiempo, de los datos registrados por el receptor g desde la fuente s , t_{si} es el tiempo de propagación en una dirección, desde la fuente s , hasta el punto imagen y t_{ig} es un tiempo similar, pero este va desde el punto imagen al receptor, r_{sg} es el offset fuente-receptor, y a es el factor de escala que incluye el factor de obliquidad, filtrado antialiasing y la refracción y dispersión de la energía.

Los tiempos de propagación en una dirección son calculados asumiendo rayos rectos desde la fuente o receptor al punto imagen. Ver ecuaciones 3.5 y 3.6.

$$t_{si} = \sqrt{\frac{r_{si}^2}{V^2} + \left(\frac{t_i}{2}\right)^2} \quad (3.5)$$

$$t_{ig} = \sqrt{\frac{r_{ig}^2}{V^2} + \left(\frac{t_i}{2}\right)^2} \quad (3.6)$$

donde V es la velocidad de migración. Los valores r_{si} y r_{is} están dados por las ecuaciones 3.7 y 3.8.

$$r_{si} = \sqrt{(x_i - x_s)^2 + (y_i - y_s)^2} \quad (3.7)$$

$$r_{ig} = \sqrt{(x_g - x_i)^2 + (y_g - y_i)^2} \quad (3.8)$$

estas son las distancias en superficie de las proyecciones fuente a imagen y receptor a imagen de los rayos rectos. El algoritmo desarrollado en [Perez y Marfurt(2007)]

asume que la fuente y el receptor están en la superficie con coordenadas $(x_s, y_s, 0)$ y $(x_g, y_g, 0)$ respectivamente, la figura 3.5 representa esta geometría. El punto imagen tiene coordenadas (x_i, y_i, z_i) z_i es calculado por la conversión $z_i = (Vt_i)/2$.

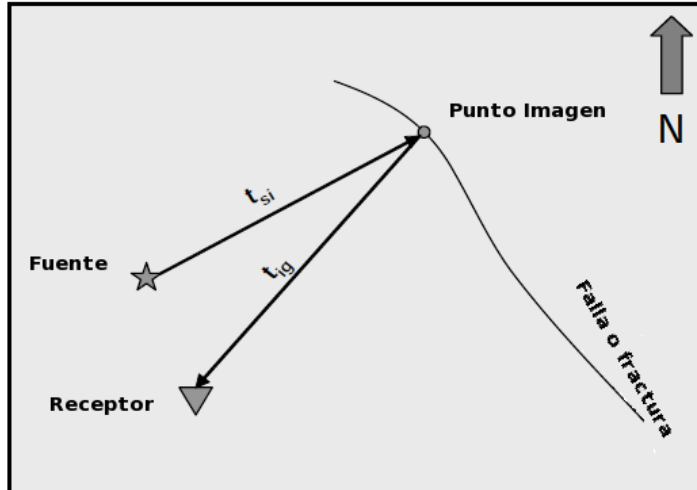


Figura 3.5: Diagrama de la geometría usada en la migración. Tomado y modificado de [Perez y Marfurt(2008)].

3.2 ACIMUT Y BINNING POR ACIMUT

En esta parte del marco teórico, se explicara terminos importantes para este proyecto, como es bin, binning y acimut.

Un bin, en una superficie dividida en una cuadrícula, es cada una de esos cuadrados, en el diseño de los datos procesados para este proyecto, ver figura 4.3, cada una de las celdas, son los bins. El número máximo de trazas que caen dentro de un bin, se conoce como fold.

Binning es la clasificación de las trazas dentro de un bin, comunmente se clasifican por offset solamente, pero también puede ser por acimut o ángulo de

reflexión.

El acimut es el ángulo horizontal, en sentido horario, medido desde el norte. En este trabajo, el binning, se hace de acuerdo a dos definiciones de acimut, estas definiciones se explican a continuación:

- La definición convencional consiste en agrupar las trazas por ángulo acimut cuya definición se da en la ecuación 3.9

$$\phi = \arctan \frac{s_x - g_x}{s_y - g_y} \quad (3.9)$$

. donde $X_g = (g_x, g_y)$ son las coordenadas de la fuente en superficie y $X_s = (s_x, s_y)$ son las coordenadas del receptor en superficie. Como se puede observar en la figura 3.6.

- La nueva definición de acimut, tiene en cuenta la posición de la imagen en superficie, ver figura 3.6, y está dada por la ecuación 3.10

$$\phi = \arctan \frac{(i_x - s_x) + (i_x - g_x)}{(i_y - s_y) + (i_y - g_y)} \quad (3.10)$$

donde i_x y i_y , son las coordenadas x y y , de la imagen en superficie. s_x y s_y son las coordenadas x y y de la fuente y por último g_x y g_y son las coordenadas x y y del receptor.

Para las dos definiciones de acimut, se dividió los ángulos posibles en 8 grupos de 0 a 180 grados, de 22.5° cada uno, ver figura 3.7

3.3 RELACIÓN SEÑAL/RUIDO

Debido a que unos de los objetivos del procesamiento sísmico es el de mejorar la relación señal/ruido (SNR), se escogió este parámetro como índice de la calidad

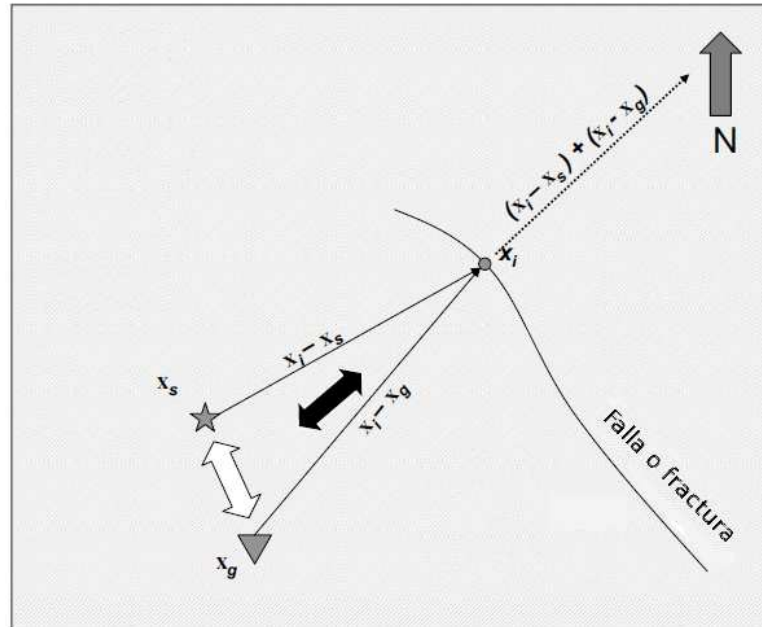


Figura 3.6: Coordenadas fuente, receptor y punto de imagen en la migración, La flecha blanca indica la definición formal de acimut, la flecha negra indica la nueva definición de acimut. Tomada de [Perez y Marfurt(2008)].

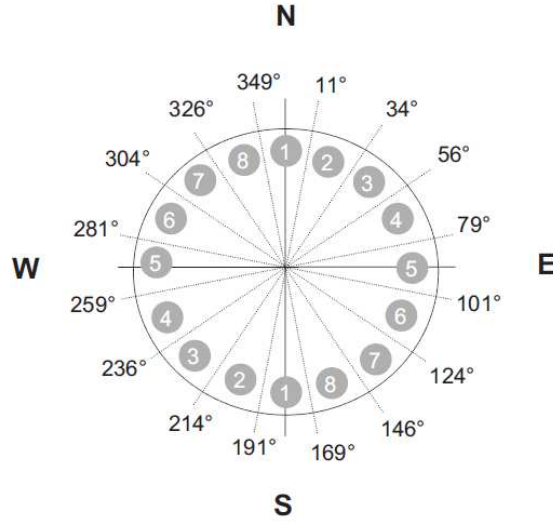


Figura 3.7: Grilla de ángulos usada para la migración. Tomada de [Perez y Marfurt(2008)].

de las trazas migradas con cada una de las definiciones de acimut, obteniendo así, un valor cuantitativo que se usó para comparar cada una de las metodologías de binning por acimut.

La relación señal/ruido, es la energía de la señal, dividida por la energía remanente (ruido), partiendo de [Rietsch(1980)], una imagen 2D se puede definir de acuerdo a la expresión 3.11

$$x_{i,j} \quad (i = 1, \dots, m, \dots, Nx; j = 1, \dots, n, \dots, Nt), \quad (3.11)$$

donde i es el índice espacial y j es el índice temporal.

En [Rietsch(1980)] se dió una definición sencilla de SNR (relación señal/ruido). Partiendo de una ventana, que contenga el registro o el área a la que se le va a calcular la relación señal/ruido:

$$D = [x_{i,j}]M \times N \quad (0 < M \leq N_x, 0 < N \leq N_t). \quad (3.12)$$

donde M , es el tamaño espacial de la ventana y N es el tamaño en el tiempo.

Se asumió que:

- La amplitud y la fase de la ondícula en la ventana D , es estable en relación con la distancia i .
- El ruido tiene una media igual a cero, aleatoriamente distribuido, a lo largo de la línea sísmica, independiente de la señal muestreada.

De manera tal que:

$$x_{i,j} = s_j + n_{i,j} \quad (3.13)$$

$$\sum_{i=1}^M n_{i,j} = 0 \quad (3.14)$$

donde s_j , es la amplitud de la señal, y $n_{i,j}$, es la amplitud del ruido. Estas asunciones implican una limitación de este método, pero pueden ser satisfechas si la ventana es escogida, en una región estable de la señal, de la sección sísmica. De modo que la energía en la ventana puede ser estimada de la siguiente manera:

$$E_S = M \sum_{j=1}^N s_j^2 = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^N \left(\sum_{i=1}^M x_{i,j} \right)^2 \quad (3.15)$$

La energía del ruido puede ser calculado por:

$$E_N = \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^M x_{i,j}^2 - E_S \quad (3.16)$$

Finalmente, la expresion para la relación señal/ruido quedará:

$$SNR = \frac{E_S}{E_N} = \frac{\frac{1}{M} \sum_{j=1}^N \left(\sum_{i=1}^M x_{i,j} \right)^2}{\sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^M x_{i,j}^2 - \frac{1}{M} \sum_{j=1}^N \left(\sum_{i=1}^M x_{i,j} \right)^2} \quad (3.17)$$

Debido a que los datos procesados en este proyecto son 3D, se asumió una relacion señal/ruido tomando cada inline como una línea 2D, y lo mismo se hizo para cada crossline. El promedio entre los dos, se asumió como la SNR general.

3.4 TÉRMINOS CLAVES

- **Atributo sísmico:** Una medida derivada de los datos sísmicos, normalmente basado en medidas de tiempo, amplitud, frecuencia, y/o atenuación. Generalmente los atributos se usan para analizar estructuras, estratigrafía y en general caracterización de reservorios.[Sheriff(2002)]
- **Falla:** Es una discontinuidad que se forma en las rocas superficiales de la Tierra (hasta unos 200 km de profundidad) por fractura, cuando las fuerzas tectónicas superan la resistencia de las rocas. La zona de ruptura tiene una superficie generalmente bien definida denominada plano de falla y su formación va acompañada de un deslizamiento de las rocas tangencial a este plano. [Sheriff(2002)]
- **Fractura:** Se consideran igual a las fallas, pero en una escala menor.[Sheriff(2002)]
- **Patch:** Arreglo de receptores, que está activo cuando se hace un registro.