

Tiempo de tránsito multiparamétrico CRS: definición y aplicaciones

Farid Majana, Numérica Ltda, fmajana@numerica.com.co

Copyright 2005, NUMERICA LTDA.

Este documento ha sido preparado por Numérica Ltda. El contenido del mismo es propiedad de Numérica y de los autores.

Está prohibida la reproducción total o parcial por cualquier medio de este documento sin el consentimiento escrito de Numérica Ltda.

Resumen

El método de la superficie común de reflexión (CRS) es una extensión del tradicional método NMO. A diferencia de su contraparte que solo opera con trazas agrupadas en secciones de punto medio común, el método CRS facilita operar con trazas dispuestas en configuraciones más generales. Para tal propósito, el método CRS utiliza una ecuación de tiempo de tránsito generalizada, que depende de la tradicional velocidad NMO y de otros parámetros. En este trabajo se comparan las ecuaciones de tiempo de tránsito NMO y CRS para un caso 2D.

Introducción

Durante la segunda mitad del siglo XX se desarrollaron teorías, algoritmos y programas de computador para enfrentar el problema de obtener una imagen del subsuelo a partir de la información que portan las ondas sísmicas en su viaje de ida y vuelta por la corteza terrestre. Los algoritmos se desarrollaron sobre modelos matemáticos sencillos que aproximan razonablemente bien la mayoría de las estructuras geológicas. Sin embargo, cuando el subsuelo está formado por estructuras geológicas complejas, las suposiciones contenidas en los métodos tradicionales pueden llevar a errores que distorsionan o dificultan obtener la imagen.

Debido a la reducción de costos en la adquisición de datos sísmicos y a los avances en la computación (software y hardware), la comunidad geofísica ha desarrollado nuevos métodos de obtención de imágenes del subsuelo que mejoran o solucionan algunas limitaciones implícitas en los métodos tradicionales. Algunos de estos métodos proponen ecuaciones alternativas para los tiempos de tránsito, entre ellas, las ecuaciones multiparamétricas. En la literatura se pueden encontrar varias expresiones de aproximación multiparamétrica de tiempo de tránsito, en Hubral (1999) hay un compendio de las más importantes. El método de la superficie común de reflexión (CRS, por sus siglas en inglés) utiliza una fórmula multiparamétrica hiperbólica de tiempo de tránsito. Una característica importante esta fórmula de tiempo de tránsito es que solo presupone el conocimiento de la velocidad superficial del medio de propagación.

En este trabajo se comparan las ecuaciones de tiempo de tránsito NMO y CRS para un caso 2D, es decir, cuando las fuentes y receptores están dispuestos en una única línea sísmica, que se supone horizontal. Además, la situación 2D supone que todos los efectos de propagación están contenidos en el plano vertical debajo de la

línea sísmica. En el método tradicional NMO, la información sísmica se suma o apila tomando en cuenta los datos organizados en familias fuente-receptor con punto medio común, conocidas como secciones CMP. En estas secciones, que representan un subconjunto restringido si se les compara con todos los datos disponibles, el tiempo de tránsito de un evento de reflexión sigue la ecuación:

$$t^2(h) = t_0^2 + \frac{4h^2}{v_{NMO}^2},$$

donde h es la mitad de la distancia entre las posiciones de la fuente que genera las ondas y el receptor de las mismas y v_{NMO} , es la llamada velocidad NMO. El método NMO tiene como ventajas (a) mejoramiento de la relación señal/ruido, (b) atenuación de eventos indeseables y (c) fácil implementación. Entre las desventajas están (a) el análisis de coherencia se restringe a pequeños subconjuntos de datos y (b) involucra muchos procedimientos manuales. El método CRS, además de tener las mismas ventajas del método NMO, no tiene sus desventajas. En este, se aplica una fórmula multiparamétrica hiperbólica de tiempo de tránsito dada por

$$t^2(x, h) = [t_0 + A(x - x_0)]^2 + B(x - x_0)^2 + Ch^2,$$

para todas las fuentes y receptores alrededor de un determinado punto de coordenadas x y h . El resultado de esta expresión más general es una mayor utilización de los datos disponibles. Lo cual a su vez, redundará en una mejor imagen del subsuelo.

Tiempo de tránsito NMO

Un rayo de reflexión normal o "zero offset" es aquel que parte de la superficie de adquisición en un punto M , alcanza al reflector con un ángulo de 90° y vuelve a la superficie al mismo punto M , como se muestra en la figura 1. El tiempo de tránsito a lo largo del rayo normal se denota por t_0 . Considere, en la configuración CMP y para una reflexión determinada, el tiempo normal t_0 como referencia. La posición de cada receptor en la línea sísmica queda determinada por la mitad de su "offset" (h), es decir, la mitad de la distancia entre la fuente y el receptor. Además del tiempo de referencia (t_0) y de la posición variable (h) el tiempo de tránsito de la reflexión depende de la llamada velocidad NMO (v_{NMO}), la cual es una especie de media de la velocidad a lo largo del rayo normal. Como es bien conocido en la literatura sísmica, el tiempo de tránsito de reflexión debido a una interfaz en profundidad observado en la configuración CMP está dado por:

$$t^2 = t_0^2 + \frac{4h^2}{v_{NMO}^2}. \quad (1)$$

La expresión de tiempo de tránsito de arriba se denomina tiempo NMO. En lo que sigue y con el objetivo de tener un mejor entendimiento del parámetro v_{NMO} , se hace una pequeña revisión del tiempo NMO, iniciando con modelos simples y aumentando el grado de complejidad de los mismos.

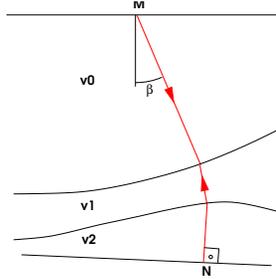


Figura 1: Rayo normal

Reflector plano horizontal. Considere el modelo de una capa de velocidad constante y reflector horizontal de profundidad H , mostrado en la figura 2. En esta figura, S y G representan las posiciones de la fuente y el receptor respectivamente, $h = (G - S)/2$ es la mitad de la distancia entre la fuente y el receptor. Denótase por v_0 la velocidad constante en la capa y t_0 el tiempo de tránsito considerando la fuente y el receptor coincidentes en el punto medio M , es decir

$$t_0 = 2t_{MN} = \frac{2H}{v_0}. \quad (2)$$

Observe en la misma figura, que el rayo \overline{MNM} es el rayo de reflexión normal. Este rayo incide perpendicularmente en el reflector en el punto N . El punto de incidencia N es llamado NIP (*Normal Incident Point*).

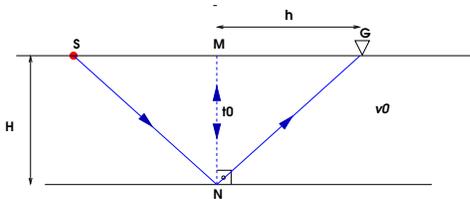


Figura 2: Modelo de una capa de velocidad constante con reflector plano y horizontal.

Debido a la simetría del problema, el tiempo que necesita un rayo para hacer el recorrido SNG es igual al doble del tiempo del recorrido a lo largo de los segmentos iguales NG o NS , es decir

$$t_{SNG} = 2t_{NG} = 2t_{NS}. \quad (3)$$

Usando simples argumentaciones geométricas se puede ver que

$$t_{NG}^2 = \left(\frac{t_0}{2}\right)^2 + \left(\frac{h}{v_0}\right)^2, \quad (4)$$

lo que, teniendo en cuenta la ecuación (3), lleva a la expresión

$$t_{SG}^2 = t_0^2 + \frac{4h^2}{v_0^2}. \quad (5)$$

Observe que la ecuación (5) tiene la forma general de la ecuación (1), en la cual podemos identificar $v_{NMO} = v_0$.

Onda NIP. El concepto de onda NIP es de importancia para representar las ecuaciones de tiempo de tránsito en forma alternativa a la ecuación (1). La onda NIP es una onda hipotética, generada por una fuente puntual en el punto NIP , que se propaga con la mitad de la velocidad del medio y es registrada en la superficie en el punto M , ver figura 3. En el caso de esta Figura, el radio de curvatura de la onda NIP está dado por:

$$R_{NIP} = \frac{v_0 t_0}{2}. \quad (6)$$

Introduciendo esta última expresión en (5) se obtiene

$$t_{SG}^2 = t_0^2 + \frac{2t_0}{v_0} \frac{h^2}{R_{NIP}}. \quad (7)$$

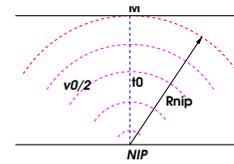


Figura 3: Onda NIP.

Reflector plano inclinado. Considere ahora el tiempo de tránsito para un par fuente y receptor (S, G), también en la configuración CMP y con *offset* medio h , en el modelo con reflector inclinado de la figura 4. Observe que el tiempo de tránsito del rayo normal relativo al CMP está dado por $t_0 = 2\overline{MNIP}/v_0$. Por consideraciones geométricas (ver, por ejemplo, Yilmaz (1997)), se puede demostrar que el tiempo t , a lo largo del rayo SRG está dado por

$$t^2 = t_0^2 + \frac{4 \cos^2 \beta}{v_0^2} h^2 = t_0^2 + \frac{4h^2}{v_{NMO}^2}. \quad (8)$$

Se puede verificar que la ecuación anterior tiene la misma forma de la ecuación de tiempo NMO (ecuación (1)), en

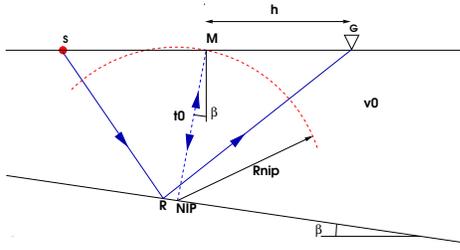


Figura 4: Modelo de una capa inclinada de velocidad constante.

la cual se identifica que la velocidad v_{NMO} ahora es dada por $v_{NMO} = v_0 / \cos \beta$.

En la misma figura 4, se puede verificar que, al igual que en el caso anterior, $R_{NIP} = v_0 t_0 / 2$ (ver ecuación (6)). La forma alternativa del tiempo de tránsito NMO en función de R_{NIP} es

$$t^2 = t_0^2 + \frac{2t_0 \cos^2 \beta}{v_0} \frac{h^2}{R_{NIP}}. \quad (9)$$

Observe que la ecuación (9) contiene dos parámetros (β y R_{NIP}) a diferencia del único parámetro de (1), v_{NMO} . Este hecho, que en principio permite la obtención de más información sobre la superficie de reflexión, ha sido explorado en la literatura para la inversión de modelos de velocidades a partir de información de tiempos de tránsito (ver, por ejemplo Hubral and Krey (1980)).

Reflectores planos y horizontales. La figura 5, muestra un modelo compuesto por capas homogéneas separadas por reflectores planos y horizontales. En este modelo, el espesor de cada capa puede ser definido en términos del doble tiempo de tránsito en la situación *zero offset* (Δt_i) y de la velocidad (v_i). De acuerdo con Shah (1973), la ecuación de tiempo NMO referente a este caso se puede expresar como

$$t_{SNG}^2 \approx t_0^2 + \frac{4h^2}{v_{RMS}^2}, \quad (10)$$

donde v_{RMS} es la llamada velocidad RMS (*Root Mean Square*) relativa al rayo normal en el CMP y que a su vez está dada por

$$v_{RMS}^2 = \frac{1}{t_0} \sum_{i=0}^{N-1} v_i^2 \Delta t_i. \quad (11)$$

Es fácil verificar que la ecuación (10) tiene la forma general del tiempo NMO, dada por (1), con la simple identificación de $v_{NMO} = v_{RMS}$. También de acuerdo con Shah (1973), es válida la relación

$$R_{NIP} = \frac{t_0}{2v_0} v_{RMS}^2 = \frac{t_0}{2v_0} v_{NMO}^2, \quad (12)$$

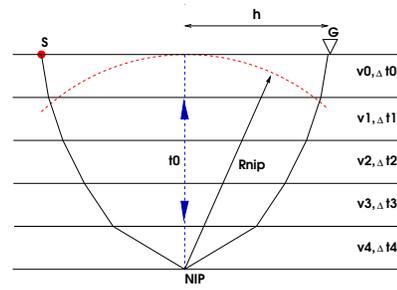


Figura 5: Modelo con múltiples capas de velocidad constante separadas por reflectores horizontales.

lo que nuevamente produce la ecuación alternativa de tiempo de tránsito (9).

Reflectores planos e inclinados. El modelo de múltiples capas homogéneas con reflectores planos inclinados es también bastante conocido en la literatura (ver, por ejemplo, Shah (1973)). Para estos modelos, identificamos el tiempo NMO de la ecuación original (1) como:

$$v_{NMO}^2 = \frac{1}{t_0 \cos^2 \beta_0} \sum_{j=0}^{N-1} v_j^2 \Delta t_j \prod_{k=1}^j \left(\frac{\cos^2 \alpha_k}{\cos^2 \beta_k} \right). \quad (13)$$

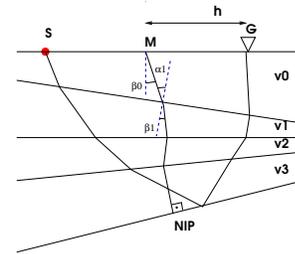


Figura 6: Modelo de múltiples capas separadas por reflectores inclinados.

En este caso, la ecuación del R_{NIP} es más complicada

$$R_{NIP} = \frac{1}{v_0} \sum_{j=0}^{N-1} v_j^2 \Delta t_j \prod_{k=1}^j \left(\frac{\cos^2 \alpha_k}{\cos^2 \beta_k} \right). \quad (14)$$

Conforme con Shah (1973), también es válida la expresión alternativa

$$t^2 = t_0^2 + \frac{2t_0 \cos^2 \beta_0}{v_0} \frac{h^2}{R_{NIP}}. \quad (15)$$

Múltiples capas no homogéneas y reflectores curvos. Finalmente, se considera el caso más general, representado en la figura 7. En este, el rayo normal sigue en el

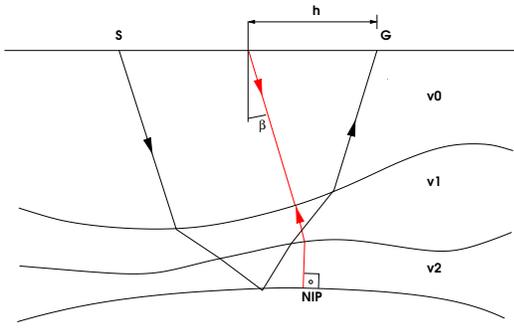


Figura 7: Modelo de múltiples capas no homogéneas separadas por reflectores curvos.

punto medio entre la fuente y el receptor, pero las capas tienen curvatura arbitraria.

En esta situación, las ecuaciones de tiempo de tránsito son iguales a las correspondientes ecuaciones relativas a los modelos de múltiples capas homogéneas separadas por interfaces planas. En otras palabras, se tiene que

$$t^2 = t_0^2 + \frac{4h^2}{v_{NMO}^2} = t_0^2 + \frac{2t_0 \cos^2 \beta}{v_0} K_{NIP} h^2. \quad (16)$$

donde se utiliza la relación entre la velocidad v_{NMO} y la curvatura de la onda NIP, $K_{NIP} = 1/R_{NIP}$, dada por

$$v_{NMO}^2 = \frac{2v_0}{t_0 K_{NIP} \cos^2 \beta}. \quad (17)$$

Por lo tanto, podemos decir que, el parámetro v_{NMO} , en su forma más general, está definido para un medio de múltiples capas de velocidad no homogénea y separado por interfaces de curvaturas arbitrarias.

Las ecuaciones de tiempo de tránsito estudiadas hasta ahora, resultan del hecho de que el rayo normal de referencia está en el punto medio común entre los pares fuente-receptor (configuración CMP). En seguida, se estudia una ecuación de tiempo de tránsito más general, en la que el rayo normal de referencia no parte del punto medio entre fuente-receptor. En otras palabras, los pares fuente-receptor podrán tener una localización arbitraria en la vecindad de un punto central fijo donde se considera el rayo normal de referencia.

Tiempo de tránsito CRS

La ecuación de tiempo de tránsito CRS depende de tres parámetros en el caso bidimensional y de ocho en el caso tridimensional. Este trabajo se concentra en el caso bidimensional.

En la literatura se pueden encontrar diferentes métodos de apilamiento sísmico basados en ecuaciones de tiempo de tránsito multiparamétricas. Las principales contribuciones son los métodos *Multifocusing* (Gelchinsky et al. (1999)), *Polystack* (de Bazelaire (1988)) y el *Common Reflection Surface* (CRS). En Jäger (1999) se encuentra una

comparación entre los operadores de apilamiento de estos métodos.

Ya se mostró como el tiempo de tránsito NMO resulta del hecho de que el rayo normal de referencia está en el punto medio entre los pares fuente-receptor. Con el objetivo de retirar esa restricción, es decir, que los pares fuente y receptor puedan estar situados arbitrariamente en relación a un rayo normal de referencia, considere ahora la figura 8. Esta muestra un rayo normal que sale del punto X_0 , alcanza el reflector en el punto NIP y vuelve al punto inicial X_0 . Considere ahora, y en lo que sigue, que el punto X_0 es fijo y será denominado *punto central*. Observe que si el punto X_0 es fijo, también lo será el rayo normal de referencia, que se llamará desde ahora *rayo central*. En la misma figura, el tiempo de tránsito del rayo que sale de la fuente en S , alcanza el reflector en el punto R y retorna al receptor en el punto G , con coordenadas de punto medio y *offset* medio (x, h) , puede ser aproximado por una expansión en series de Taylor de segundo orden en torno al punto central, el cual tiene coordenadas $(x = x_0, h = 0)$

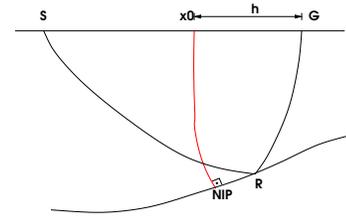


Figura 8: Modelo con reflector arbitrario

$$t(x, h) \approx t(x_0, 0) + A(x - x_0) + Dh + \dots + \frac{1}{2} [B(x - x_0)^2 + 2E(x - x_0)h + Ch^2] \quad (18)$$

donde

$$A = \left. \frac{\partial t}{\partial x} \right|_{(x_0, 0)}, \quad B = \left. \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} \right|_{(x_0, 0)}, \quad C = \left. \frac{\partial^2 t}{\partial h^2} \right|_{(x_0, 0)}$$

$$D = \left. \frac{\partial t}{\partial h} \right|_{(x_0, 0)}, \quad E = \left. \frac{\partial^2 t}{\partial h \partial x} \right|_{(x_0, 0)}. \quad (19)$$

El tiempo de tránsito (18) es una función par en h , toda vez que por el principio de reciprocidad, fuente y receptor pueden cambiar de posición sin alterar el resultado. Como consecuencia de esto $D = E = 0$, por lo que la ecuación anterior queda reducida a

$$t(x, h) \approx t(x_0, 0) + A(x - x_0) + \dots + \frac{1}{2} [B(x - x_0)^2 + Ch^2]. \quad (20)$$

La aproximación anterior se denomina *ecuación parabólica de tiempo de tránsito*. La correspondiente aproximación

hiperbólica se obtiene elevando al cuadrado ambos miembros de (20) y descartando los términos de orden superior a dos

$$t^2(x, h) \approx [t_0 + A(x - x_0)]^2 + \dots + t_0 [B(x - x_0)^2 + Ch^2]. \quad (21)$$

Onda N. Para seguir representando las ecuaciones de tiempo de tránsito en forma alternativa, es necesario introducir el concepto de onda N. La onda N parte del punto NIP con la curvatura local del reflector en este punto y, al igual que su contraparte la onda NIP, viaja a la mitad de la velocidad del medio, siendo registrada en superficie en el punto central (X_0), como se muestra en la figura 9. La curvatura del frente de onda N registrado en X_0 se denomina K_N .

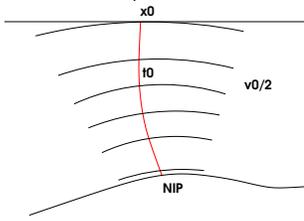


Figura 9: Onda N.

Las curvaturas de las ondas N y NIP se relacionan, respectivamente, con los coeficientes B y C de la ecuación (21). Esta relación, para el caso particular donde la superficie de adquisición es plana y la velocidad del medio en la vecindad del punto central es constante, está dada por (ver, por ejemplo, Tygel et al. (1997)),

$$A = \frac{2 \sin \beta}{v_0}, \quad B = \frac{2 \cos^2 \beta K_N}{v_0}, \quad C = \frac{2 \cos^2 \beta K_{NIP}}{v_0}. \quad (22)$$

Donde K_{NIP} y K_N son las curvaturas de los frentes de onda NIP y N respectivamente, registradas en la superficie, en el punto x_0 y β es el ángulo de incidencia del rayo central en el punto x_0 .

Introduciendo las expresiones (22) en la ecuación (21), se obtiene la ecuación de tiempo de tránsito del rayo SRG de la figura 8 en función de los parámetros del rayo central de referencia:

$$t^2(x, h) = \left[t_0 + \frac{2 \sin \beta}{v_0} (x - x_0) \right]^2 + \dots + \frac{2 t_0 \cos^2 \beta}{v_0} [K_N (x - x_0)^2 + K_{NIP} h^2] \quad (23)$$

Ahora se estudia la ecuación de tiempo de tránsito CRS en varios dominios particulares con el objetivo de

establecer una comparación entre esta y su contraparte NMO. A través de estas comparaciones es fácil darse cuenta que la ecuación de tiempo de tránsito NMO no es más que un caso particular de la CRS.

Caso CMP. Se puede ver la relación entre la ecuación tradicional de tiempo de tránsito NMO con la ecuación general hiperbólica (23), analizando el caso particular en el que se representa esta última en una sección CMP, esto es cuando ($x = x_0$) en (23). Explícitamente

$$t^2(x = x_0, h) = t_0^2 + \frac{2 t_0 \cos^2 \beta}{v_0} K_{NIP} h^2, \quad (24)$$

recordando la relación entre la velocidad NMO, v_{NMO} , y el parámetro K_{NIP} , ecuación (17)

$$\text{sgn}(K_{NIP}) v_{NMO}^2 = \frac{2 v_0}{t_0 |K_{NIP}| \cos^2 \beta}, \quad (25)$$

donde $\text{sgn}(K_{NIP}) = \pm 1$ conforme sea el signo de K_{NIP} . Normalmente K_{NIP} es positivo, pero en teoría puede variar entre $[-\infty, +\infty]$.

Caso Zero Offset. La ecuación (23), para el caso *zero offset*, $h = 0$, queda reducida a

$$t^2(x, h = 0) = \left[t_0 + \frac{2 \sin \beta}{v_0} (x - x_0) \right]^2 + \dots + \frac{2 t_0 \cos^2 \beta}{v_0} K_N (x - x_0)^2. \quad (26)$$

De la misma forma en que los parámetros β y K_{NIP} fueron relacionados con la velocidad v_{NMO} , es posible relacionar β y K_N a una velocidad que será llamada *velocidad de pos-apilamiento* (Perroud and Tygel (2003)), dada por (comparar con la ecuación (25))

$$\text{sgn}(K_N) v_{PST}^2 = \frac{2 v_0}{t_0 |K_N| \cos^2 \beta}, \quad (27)$$

donde, $\text{sgn}(K_N) = \pm 1$ conforme sea el signo de K_N . A diferencia de el K_{NIP} y debido a la dependencia de K_N con la curvatura del reflector, es común encontrar valores de K_N negativos.

Para entender mejor el significado de v_{PST} , se reescribe la ecuación (26) usando la expresión (27)

$$t^2(x, h = 0) = \left[t_0 + \frac{2 \sin \beta}{v_0} (x - x_0) \right]^2 + \dots + \text{sgn}(K_N) \frac{4(x - x_0)^2}{v_{PST}^2}. \quad (28)$$

Es posible observar que, excepto por el desfase en tiempo $t = 2(\sin \beta / v_0)(x - x_0)$, esta ecuación tiene la misma forma que la ecuación de tiempo NMO (1). Por lo tanto, la velocidad v_{PST} , referida a la sección *zero offset*, es equivalente a la velocidad v_{NMO} en una sección CMP.

Tomando en cuenta las ecuaciones (25) y (27), se puede reescribir el tiempo de tránsito hiperbólico (23) en una forma que puede ser atractiva para las personas involucradas directamente con el procesamiento sísmico, en la que los parámetros son velocidades y no curvaturas de frentes de onda

$$t^2(x, h) = \left[t_0 + \frac{2 \sin \beta}{v_0} (x - x_0) \right]^2 + \dots \\ \text{sgn}(K_{NIP}) \frac{4h^2}{v_{NMO}^2} + \dots \\ \text{sgn}(K_N) \frac{4(x - x_0)^2}{v_{PST}^2}. \quad (29)$$

Aplicaciones del método CRS

Los parámetros CRS se deben extraer de los datos sísmicos a través de análisis de coherencia. En esta extracción reside la principal dificultad del método CRS, pero una vez obtenidos los parámetros hay una amplia variedad de aplicaciones para los mismos, siendo la más común el apilamiento.

En la figura 10 se puede observar el resultado del apilamiento de datos con los métodos NMO y CRS. Como es de esperar, y debido a las ventajas del método CRS sobre el NMO, la sección apilada con el método CRS presenta una visible mayor relación señal ruido, mejor definición de los eventos y mayor continuidad de los mismos. Esta fuera del alcance de este trabajo hacer un estudio detallado de las diferencias entre las dos secciones apiladas mostradas, el objetivo de estas es simplemente mostrar algunas diferencias mayores entre los dos resultados.

Otras aplicaciones de los parámetros CRS, que se pueden encontrar en la literatura son:

Obtención automática del campo de velocidades NMO.

La velocidad v_{NMO} se relaciona con los parámetros CRS a través de la expresión (25), entonces, una vez obtenidos los parámetros β y K_{NIP} resulta obvia la obtención de la sección de V_{NMO} . A diferencia de la sección de V_{NMO} obtenida en la secuencia de proceso tradicional NMO, la obtenida por CRS es más rica en detalles debido a que el cálculo de los parámetros se hace muestra a muestra y para cada sección CMP.

Inversión del modelo de velocidades. A partir del ángulo de incidencia del rayo central y la curvatura de la onda NIP en superficie (K_{NIP}), se puede hacer un trazamiento inverso de rayos. Por definición de K_{NIP} (ecuación (6)), el reflector se encuentra en el punto en donde $K_{NIP} = 0$. Ver Hubral and Krey (1980), Duvencek (2004) o Biloti et al. (2002).

Análisis AVO. La abertura en dirección del offset y del punto medio, característica del método CRS, define lo que se llama un CRS supergather en cada punto CMP. Estos supergather pueden ser "aplanados" (corrección NMO) a partir de los parámetros CRS calculados para el CMP central y así compensar el "moveout". Los supergather corregidos pueden ser usados para análisis AVO. La ventaja de usar los CRS supergather radica en que el fold se incrementa aproximadamente tantas veces como secciones CMP tengan los CRS supergather. ver, por ejemplo: Pruessmann et al. (2004) y Biloti et al. (2001).

Además de las aplicaciones anteriores, los parámetros CRS han sido usados exitosamente en otras como la migración en tiempo (ver Mann (2002)), correcciones estáticas residuales (ver, por ejemplo, Ewig (2003)) y la supresión de múltiples (ver Gamboa (2003)).

Conclusiones

Se ha hecho una revisión de la ecuación de tiempo de tránsito NMO, la cual depende de un parámetro, la velocidad NMO, que a su vez es una especie de media de la velocidad a lo largo del rayo normal. Se introdujo también la ecuación multiparamétrica de tiempo de tránsito CRS, la cual depende de 3 parámetros para el caso 2D y de 8 para el caso 3D.

La ecuación de tiempo de tránsito CRS es una generalización del caso NMO. La utilización de esta en la rutina de procesamiento conlleva algunas ventajas en el resultado del procesamiento como el mejor aprovechamiento de los datos disponibles y una mejor relación señal ruido, produciendo entonces secciones de mejor calidad, con eventos mejor definidos y más continuos.

Las pruebas en datos reales muestran significantes diferencias entre las secciones apiladas con los métodos NMO y CRS. Estas diferencias, brevemente discutidas en el texto, muestran el potencial del método CRS para ser usado en la práctica diaria del procesamiento sísmico, sobre todo en regiones con pobre relación señal/ruido o simplemente donde el tradicional método NMO no aporte resultados satisfactorios.

Además del simple apilamiento, los parámetros CRS también han sido usados con éxito en inversión, análisis AVO, migración en tiempo, detección de múltiples, correcciones estáticas residuales, etc.

Agradecimientos

Este trabajo es parcialmente soportado por Colciencias, contrato n°314-2003.

Bibliografía

Biloti, R., Portugal, R., Santos, L., and Tygel, M., Obtaining avo and ava curves from crs attributes., Technical report, IMECC-UNICAMP, <http://www.lgc.ime.unicamp.br>, 2001.

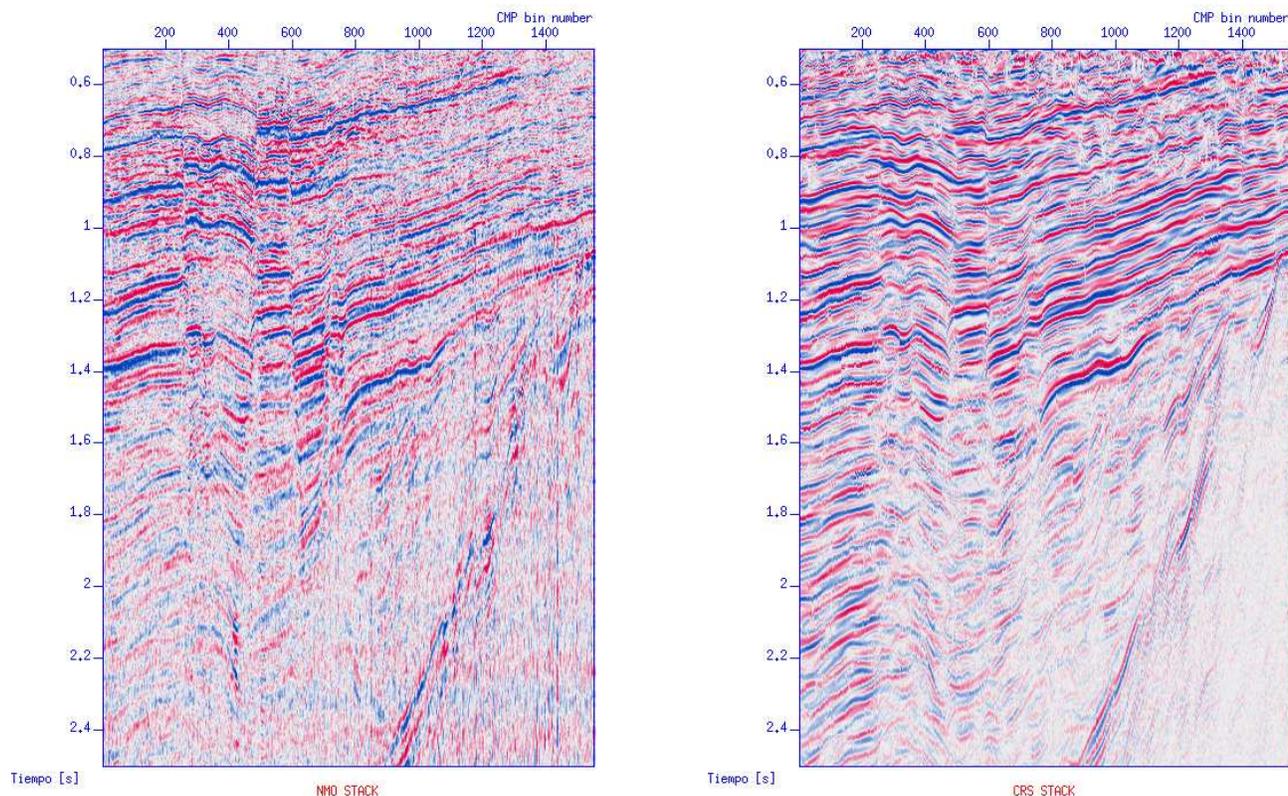


Figura 10: Secciones apiladas usando el tradicional operador de apilamiento NMO (izquierda) y el CRS (derecha). Cortesía del Laboratorio de Geofísica Computacional (LGC/UNICAMP), Campinas, SP, Brasil.

Biloti, R., Santos, L., and Tygel, M., 2002, Multiparametric travelt ime inversion: *Stud. Geophys. Geod.*, **46**, 177–192.

de Bazelaire, E., 1988, Normal moveout revisited - inhomogeneous media and curved interfaces: *Geophysics*, **53**, no. 2, 143–157.

Duveneck, E., 2004, Velocity model estimation with data-derived wavefront attributes: *Geophysics*, **69**, 265–274.

Ewig, E., 2003, Theory and application of residual static correction by means of crs attributes: Master's thesis, Universität Karlsruhe, Germany.

Gamboa, J., 2003, Caracterização e eliminação de múltiplas pelo método da superfície comum de reflexão (crs): Master's thesis, Universidade Estadual de Campinas, Brasil.

Gelchinsky, B., Berkovitch, A., and Keydar, S., 1999, Multifocusing homeomorphic imaging: Part i: basic concepts and formulas: *Journal of applied geophysics*, **42**, no. 3-4, 229–242.

Hubral, P., and Krey, T., 1980, Interval velocities from seismic reflection time measurements: *Society of exploration geophysicists*.

Hubral, P., 1999, Macro-model independent seismic reflec-

tion imaging: *J. Appl. Geoph.*, **42**, 137–148.

Jäger, R., 1999, The common reflection surface stack, theory and application: Master's thesis, Universität Karlsruhe, Germany.

Mann, J., 2002, Extensions and application of the common reflection surface stack method: Ph.D. thesis, Universität Karlsruhe, Germany.

Perroud, H., and Tygel, M., 2003, Velocity estimation by the crs method: A gpr real data example., *Submetido para publicação em Geophysics*.

Pruessmann, J., Coman, R., Endres, H., and Trappe, H., 2004, Improved imaging and avo analysis of a shallow gas reservoir by crs: *The Leading Edge*, **23**, no. 9, 915–918.

Shah, P., 1973, Use of wavefront curvature to relate seismic data with subsurface parameters: *Geophysics*, **38**, no. 5, 812–825.

Tygel, M., Müller, T., Hubral, P., and Schleicher, J., 1997, Eigenwave base multiparameter travelt ime expansion: 67th Annual Internat. Mtg. Soc. Expl. Geophys., 1770–1773.

Yilmaz, O., 1997, Seismic data processing: *Society of Exploration Geophysicists*.