

## DETERMINACIÓN DE UN MODELO UNIDIMENSIONAL DE VELOCIDADES PARA EL EJE CAFETERO COLOMBIANO UTILIZANDO TOMOGRAFÍA SISMICA

Lina Katherin Espinosa Ospina<sup>1</sup>, Hugo Monsalve Jaramillo<sup>1</sup>

1) Centro de Estudios e Investigaciones de la Facultad de Ingeniería – CEIFI, Universidad del Quindío.

### RESUMEN

El objetivo de este trabajo es determinar una estructura unidimensional de velocidades en el Eje Cafetero colombiano utilizando tiempos de arribo de ondas P y S.

La región en estudio se limita al Eje Cafetero colombiano, donde es posible tener la información sísmica mínima suficiente, que corresponde a las localizaciones de las estaciones sismológicas del OVSM, el OSSO y el OSQ.

Para alcanzar nuestro objetivo, la metodología empleada estuvo basada en localizaciones de réplicas con HYPO71 y método de inversión no linealizado de rayos, VELEST. El uso generalizado de sismómetros e instrumentos digitales, a hecho fácil aprovechar los registros sísmicos en su totalidad, las fases de ondas P y S, al igual que sus reflexiones y refracciones en las diferentes estructuras interna de la corteza, para obtener un modelo confiable de  $V_p$ . Los datos que se utilizan para efectuar la inversión de estructura de velocidades provienen de registros sísmicos, 1344 sismos de los cuales se utilizaron solo 450 que cumplieron con tener un  $\text{gap} < 200^\circ$  y un  $\text{rms} < 0.2 \text{ s}$ , para obtener un mejor modelo, los eventos localizados contaron con una muy buena calidad. Desde el punto de vista sísmico, contar con un buen modelo de la estructura de velocidades es esencial para obtener localizaciones de eventos y parámetros de fuente confiables, para entender el movimiento de los suelos durante temblores fuertes. En particular conocer las velocidades y atenuación de ondas P y la atenuación cortical como un segundo factor son variables a determinar.

Los resultados obtenidos muestran una distribución de velocidades uniforme. El resultado final de la inversión utilizando un modelo inicial, muestra un modelo de velocidades de capas planas con resolución de las capas superficiales (0 – 100 Km de profundidad) buena. Sin embargo para las capas profundas la resolución no es tan buena, ya que la mayoría de los sismos se encuentran arriba de ellas y no existen rayos sísmicos que las atraviesen

Tenemos para los 450 eventos un RMS de 0.03 seg y una profundidad de 14.1 Km, magnitud de 1.21 promedio. en la fig 6 mostramos el modelo final arrojado por el VELEST.

La combinación de muchos modelos de velocidades para la zona del Eje Cafetero nos han permitido definir algunos elementos claves que han aclarado el panorama, avanzando en el conocimiento de la estructura cortical de la zona. Llegando a obtener un propio modelo de estructura cortical de velocidades para el Eje Cafetero colombiano y así obtener una mejor localización de sismos y conocer la diferencia más acertada en el espesor de la corteza y en la estructura del manto superior entre terrenos adyacentes que fueron emplazados en diferentes épocas geológicas.

Palabras Claves: Inversión no linealizada de Rayos, VELEST, Modelo de Velocidad capas planas, Profundidad, Rayos Sísmicos, Ondas P y S.

### ▪ METODOLOGÍA

Para el objetivo central del presente estudio que es la definición de un modelo Unidimensional de velocidades de ondas sísmicas para el Eje Cafetero, se necesita tener lecturas de sismos que pertenezcan a la zona en estudio ósea lecturas S-P entre 1 a 25 segundos, también las localizaciones de los sismos de muy buena calidad. Básicamente, la metodología a emplear estará basada en localizaciones de replicas con el Hypo71, método de inversión no linealizada de rayos, VELEST. El uso generalizado de sismómetros e

instrumentos digitales de datos ha hecho sumamente fácil aprovechar los registros sísmicos en su totalidad, las fases de ondas P y S, al igual que sus reflexiones y refracciones en las diferentes estructuras internas de la corteza.

Las lecturas de los sismos locales y algunos regionales, para los cuales es necesario conocer los tiempos de arribo de las ondas P y S en las diferentes estaciones se realizaron con el programa ZRS; en él se pueden ver las señales que fueron clasificadas como Re, Tl que tengan hasta 25 segundos de S-P. Sólo se leyeron fases de sismos con más de dos estaciones.

Se realizaron lecturas a 1337 eventos aproximadamente, aunque ya había una base de datos predeterminada, se tenían que tener lecturas confiables para dichos eventos y para este trabajo.

Para asegurar la consistencia de las lecturas se hizo una primera localización de los eventos con el HYPO 71 (Lee y Valdés, 1985) utilizando un modelo de velocidad de la RSNC fig 1 para ondas P y se revisó las lecturas inconsistentes. Se encontraron muchos eventos con errores muy grandes en la localización; para estos eventos se revisaron las lecturas de todas las estaciones y se trato de completar fases, pero la mayoría estaban correctas. Luego se localizaron eventos con solo lecturas de estaciones analógicas y otra con solo lecturas digitales. Una vez revisadas las lecturas de tiempos de arribo, se localizaron de nuevo todos los eventos.

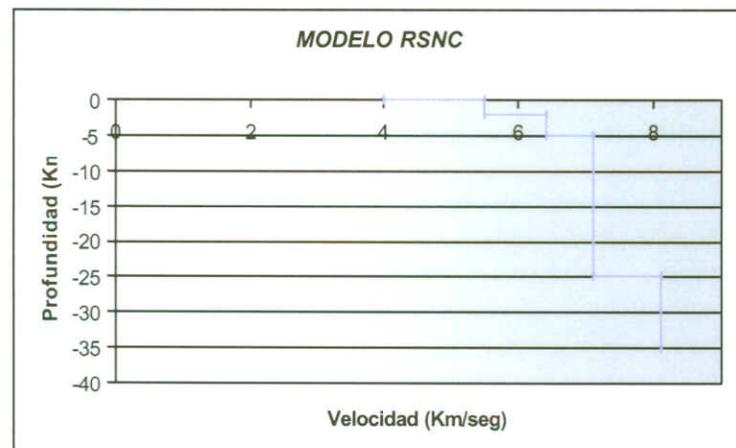


fig 1. Modelo de velocidades de onda P de la RSNC.

Para la relocalización de los mismos se utilizara un método de relocalización conjunta, Joint Hipocentral Determination (JHD), propuesto por Dewey [1989]. las replicas del Quindío, tienen una localización de muy buena calidad, pero es necesario Relocalizar para mirar si se puede mejorar su calidad. Las localizaciones de los 1337 sismos podemos verla en la fig 2.

Para el presente estudio y por los objetivos del trabajo de hallar una estructura de velocidades, se requerirán localizaciones de eventos de muy buena calidad en la zona de estudio planteada, cuyos resultados sean confiables dentro de las márgenes de error con sismos de calidad A, B y C.

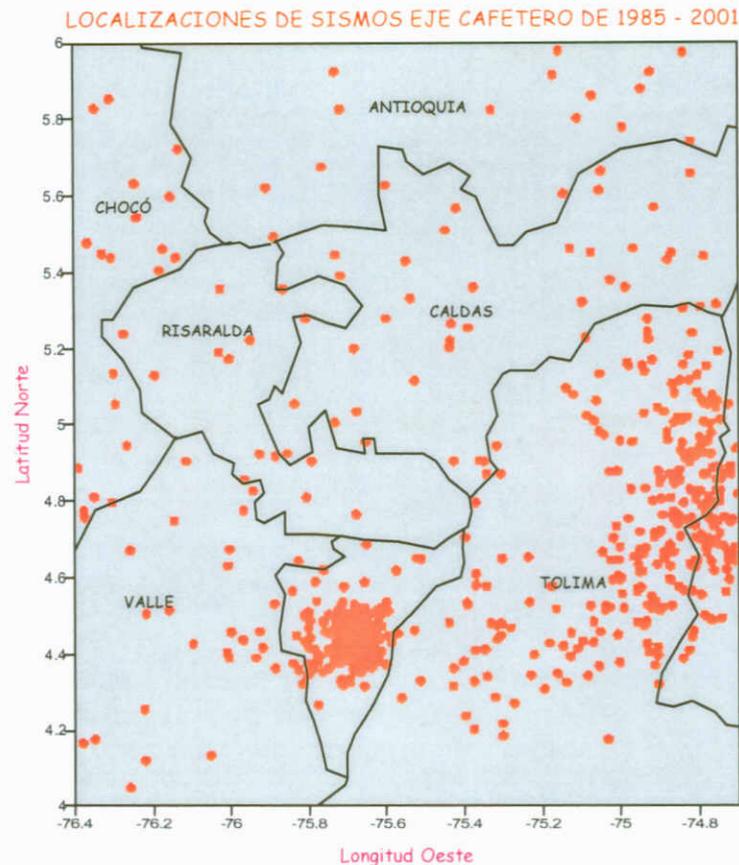


Fig 2. Localizaciones de los 1337 eventos presentados en el Eje Cafetero

El procedimiento a seguir para calcular un modelo unidimensional de velocidades con el VELEST es el siguiente: En modo simultaneo o en modo sencillo, en los dos modos el problema es resuelto por trazado de rayos desde la fuente al receptor, calculando el rayo directo, el refractado y el reflejado (opcional) pasando a través del modelo 1D. En ambos modos el problema inverso es solucionado por medio de la inversión total de la matriz de amortiguamiento de minimos cuadrados, debido a que el problema inverso es no lineal, la solución es obtenida iterativamente.

El VELEST ha sido diseñado para permitir gran flexibilidad en la aproximación y por lo tanto un gran número de opciones y parametros de control deben ser establecidos y debidamente ajustados en el proceso. Sin embargo el calculo de un modelo 1D requiere multiples corridas del VELEST para seleccionar y evaluar los parametros de control adecuados para el problema. Si estamos acostumbrados a que los programas de computador den una única solución que es precisa o inapropiada, pues con el VELEST hasta varias corridas son inutilles.

#### Marco teórico

##### o HYPO 71

HYPO71 es un programa de computador para determinar hipocentros, magnitudes y primeros movimientos de sismos locales. El programa original fue elaborado el 21 de diciembre de 1971 (Lee y Lahr, 1971). La localización de sismos con este programa requiere considerables cuidados, se debe tener las coordenadas precisas de las estaciones, un modelo razonable de estructura cortical y unos arribos confiables de ondas P y S. Normalmente el programa no responde correctamente si los datos de entrada contiene errores, por tal motivo es esencial un chequeo antes de correr el HYPO71, también se debe considerar los pequeños residuales y errores aunque esto no es suficiente para garantizar soluciones de hipocentros precisos.

El HYPO71 esta escrito en lenguaje FORTRAN IV y ha sido ejecutado con éxito bajo el compilador FORTRAN H o bajo el compilador MNF (Fortran Universidad de Minesota). El programa requiere para su ejecución aproximadamente 150 Kb del centro de almacenamiento y si el programa va hacer usado rutinariamente, debe ser creado un módulo de carga y guardado en un disco. Desde la compilación y enlacedición no es necesaria ejecutar el módulo de carga.

- Joint Hipocentral Determination (JHD)

Programa desarrollado por Dewey (1971) para la determinación de hipocentros de un grupo de sismos por mínimos cuadrados, usando tiempos de arribos de P y S, tiempos de arribos de ondas "P", en general tiempos de arribos de fases de ondas de cuerpo y ondas superficiales; además, usa el intervalo de tiempo entre pares de fases. Se empleará un sismo de referencia (sismo maestro), lo que permite determinar correcciones de tiempo para las estaciones.

Las ecuaciones de condición para un grupo de sismos son analizadas entre pares de fases a través de errores en un modelo camino - tiempo en un sistema linealizado de ecuaciones dispersas, para hipocentros y modelo de parámetros. En general el algoritmo realiza relocalizaciones hipocentrales mediante el cálculo simultáneo de los hipocentros de un grupo de sismos, con el fin de eliminar de una manera estadística errores de las lecturas de los tiempos de viajes observados. JHD es mas efectivo en localizar grupos de eventos bajo las siguientes situaciones [Dewey, 1971]:

- a. Si se usa un evento de calibración con estaciones que son utilizados en localizar otros eventos que no registraron el evento de calibración.
- b. Si se utilizan estaciones de calibración, cuando las estaciones de calibración no registraron algunos de los eventos a ser relocalizados.

En general con un simple evento maestro daría resultados tan buenos como los que arrojará el método JHD, es decir de la calidad del evento maestro depende el éxito de las relocalizaciones.

En varios trabajos se ha utilizado el método para trabajos similares o que tienen que ver con sismotectónica, Dewey y Algermissen [1974], Quintanar [1985], Pardo y Suárez [1995], Guzmán Speziale et al [1989], Escobedo [1997], Monsalve [1998] en los cuales se ha utilizado exitosamente la relocalización conjunta de hipocentros con el programa JHD, con base en las lecturas de fases el National Earthquake International Center (NEIC) y la Red Sísmica Nacional de Colombia (RSNC) y el Observatorio Sismológico del Quindío (OSQ).

- Tomografía Sísmica

Se plantea un esquema para la determinación de un modelo de velocidad Unidimensional en busca de establecer condiciones iniciales respecto a correcciones por estación y una mejor aproximación a las verdaderas localizaciones hipocentrales de los eventos sísmicos tenidos en cuenta. El cálculo de un óptimo modelo de velocidad inicial Unidimensional (Kissling, 1988) siguiendo las rutinas definidas en VELEST (Kissling, 1995; Kissling et al., 1994) es un procedimiento de ensayo y error basado en JHD para diferentes modelos iniciales de velocidad, localizaciones hipocentrales, parámetros de amortiguamiento y control para la inversión del problema acoplado. Se trata entonces de minimizar un error de localización uniforme, ó error final después de realizar los ajustes de localización sobre todos los datos. Para un conjunto de buenas localizaciones con GAP azimutal  $< 200^\circ$ , y al menos 6 observaciones de P, distribuidas sobre las estaciones de la red instrumental, la incertidumbre en la localización absoluta puede ser estimada mediante un cambio aleatorio y sistemático de las localizaciones hipocentrales iniciales.

- VELEST

El programa VELEST trabaja realizando trazado de rayos (raytracing) para determinar el problema hacia adelante de la fuente al receptor, esto es, calcula tiempos de ondas directas, refractadas y reflejadas que pasan por el modelo Unidimensional. Después, tanto para las localizaciones como para un nuevo modelo ajustado, calcula el problema inverso mediante la solución amortiguada de mínimos cuadrados. Debido a que el problema inverso es no-lineal, la solución se haya por iteraciones del problema directo y el inverso hasta converger en un error deseado.