

# DETERMINACIÓN DE MODELO UNIDIMENSIONAL DE VELOCIDAD EN EL CENTRO-OCCIDENTE COLOMBIANO UTILIZANDO TOMOGRAFÍA SÍSMICA LOCAL

DETERMINATION OF ONE DIMENSIONAL MODEL OF SPEED IN COLOMBIAN CENTRAL WEST USING LOCAL SEISMIC TOMOGRAPHY

Jorge Armando Flórez Hurtado, Luz Marlen Osorio Hoyos, Hugo Monsalve Jaramillo\*.

Centro de Estudios e Investigaciones de la Facultad de Ingeniería,  
Universidad del Quindío

Recibido: Septiembre 2 de 2013

Aceptado: Septiembre 20 de 2013

\*Correspondencia del autor. Centro de Estudios e Investigaciones de la Facultad de Ingeniería, Universidad del Quindío.

E-mail: hugom@uniquindio.edu.co.

## RESUMEN

Fueron determinados un modelo General de velocidad unidimensional utilizando los tiempos de arribo de las ondas P, y tres modelos para provincias denominadas Eje Cafetero, Tolima y Subducción, permitiendo así una mejor localización de los eventos encontrados en la zona de estudio limitada al cuadrante definido por: longitud 76.7°W a 74.5°W y latitud 4.0°N a 5.8°N. Los eventos fueron suministrados por la Red Sísmica Nacional de Colombia (RSNC, Ingeominas), el Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Manizales (OVSM) y el Observatorio sismológico de la Universidad del Quindío (OSQ). Se determinó mediante el método de Wadati una relación  $V_p/V_s=1.771$ ; para la zona de estudio se localizaron 3349 eventos con SEISAN y empleando el método de inversión no linealizada de rayos (VELEST), se seleccionaron eventos con  $GAP \leq 250$ ,  $RMS \leq 0.2$  y errores en hipocentro y epicentro menores a 20 km quedando 1327 eventos, con los cuales se determinaron los modelos de estructura y velocidad.

*El resultado final de la inversión muestra modelos de velocidades de capas planas*, para los modelos superficiales las profundidades están entre 0 y 100 km de profundidad y para el modelo de Subducción su profundidad está entre 60 km y 205 km. El moho para estos modelos se encuentra en promedio entre 30 y 40 km. El modelo General tiene un RMS de 0.065 seg; el modelo Tolima tiene un RMS de 0.064 seg; el modelo Eje Cafetero tiene un RMS de 0.048 seg y el modelo Subducción tiene un RMS de 0.082 segundos.

**Palabras claves:** Inversión no linealizada de Rayos, VELEST, Modelo de velocidad unidimensional, Rayos Sísmicos, Provincias sismotectónicas, Ondas P.

## ABSTRACT

A general one-dimensional velocity model was determined using the arrival times of P waves, and three models for seismic zones called Eje Cafetero, Tolima and Subduction, allowing thus a better location of seismic events found in the study area limited to the quadrant defined as longitude  $76.7^{\circ}$  W  $74.5^{\circ}$  W and latitude  $4.0^{\circ}$  N to  $5.8^{\circ}$  N. The events were provided by the National Seismic Network of Colombia (NSNC, Ingeominas), the Volcanological and Seismological Center of Manizales (CVSM) and the Seismological Observatory at University of Quindío (SOQ). Using the Wadati method, a relationship  $V_p/V_s=1.771$  was determined. For the study zone, 3349 events were located using the software SEISAN and the non-linearized ray inversion method of VELEST. Well-located events, with  $GAP \leq 250$ ,  $RMS \leq 0.2$  and errors in hypocenter and epicenter location smaller than 20 km, were selected. With the 1327 remaining events the velocity structure model were determined.

The final result of the inversion shows velocity models of flat layers. For the shallow models, the depths are between 0 and 100 km; and for the Subduction model the depths range between 60 km and 205 km. The Moho (Mohorovicic discontinuity) for these models is located between 30km and 40 km approximately. The General model has a RMS of 0.064925 sec, the model for the seismic zone Tolima has a RMS of 0.064259 sec; the model for the seismic zone *Eje Cafetero* has a RMS of 0.0479s and the model for the seismic zone *Subduction* has a RMS 0.082256 seconds.

**Keywords:** non-linearized ray inversion, VELEST, one-dimensional velocity model, Seismic rays, P and S waves

## INTRODUCCIÓN

El territorio colombiano comprende un dominio continental deformado y el centro-occidente del país que se caracteriza por la tectónica y la sismicidad, está situado en el límite de tres placas tectónicas mayores: la placa Suramericana, la placa de Nazca y la placa Caribe. Los movimientos relativos de estas placas durante la era Cenozoica dieron origen al sistema orogénico de los Andes del Norte, compuesto por distintas cadenas de montaña separadas por valles y depresiones intramontañas (1). La identificación e historia geológica de diferentes terrenos en la corteza andina, ha sido observada con base a las características estructurales a través de la geomorfología superficial y de alguna manera estudiada con sismicidad instrumental.

Con el fin de realizar estudios tectónicos y sísmicos en el Centro-Occidente Colombiano, se instalaron redes tele-métricas como el OVSM, el OSSO, el OSQ y la RSNC que localizaban los eventos sísmicos; a partir de los estudios de refracción sísmica del proyecto Nariño I y II (2); se incrementaron las redes de estaciones telemétricas, estaciones acelerográficas y de banda ancha con el fin de aportar valiosa información al catalogo de localizaciones. Sin embargo se desconocen las diferencias substanciales en el espesor de la corteza y en la estructura del manto superior entre terrenos adyacentes que fueron emplazados en diferentes épocas geológicas. El interés que llevó a la realización de este trabajo es el obtener estructuras de velocidad sísmica más realistas que permitan comprender mejor las características tectónicas de las regiones y poder avanzar en el cono-

cimiento de la estructura cortical del Centro-Occidente Colombiano y por lo tanto mejorar los estudios de amenaza sísmica de la región.

El catalogo de localizaciones está compuesto por 3349 eventos registrados desde septiembre 1993 a marzo de 2009; para la inversión se utilizaron 1327 eventos con buena calidad, con los cuales se determinaron los modelos de velocidad.

### Antecedentes

La idea de que los terremotos representan una reacción elástica a un fenómeno de generación de esfuerzos (fuerzas tectónicas) fue propuesta por primera vez por Hooke (1705); la primera conexión clara entre los terremotos, las fallas y los procesos tectónicos fue hecha por (3) basándose para ello en las observaciones de los efectos de un terremoto y en una gran cantidad de medidas geodésicas; con lo anterior (4) propuso un primer modelo mecánico de cómo se producía la fractura (teoría del rebote elástico).

Por otra parte, basados en los conceptos de la tectónica de placas, varios autores (5, 6), han explicado la relación entre el campo de esfuerzos, la presencia de rasgos geomorfológicos, la distribución de sismicidad y Colombia; ubicada en la esquina Nor-Occidental de Suramérica donde convergen las placas Nazca, Suramericana y Caribe, originando el proceso de subducción a lo largo de la trinchera Colombo-Ecuatoriana.

En Colombia se definieron las líneas fuentes asociadas a las grandes fallas conocidas con el entonces catálogo sísmico oficial de esa época. INGEOMINAS, en el 2000, realizó la monografía de fuentes sísmicas del eje

cafetero y del Sur Occidente Colombiano, donde, propuso una definición de zonas sísmicas; además de relacionar los epicentros con los principales sistemas de falla, demostró que es necesario un concepto más amplio de asociación entre estos dos parámetros, para que entre sí puedan tener una interpretación adecuada, teniendo en cuenta la incertidumbre y la densidad de datos que se puedan relacionar. Atendiendo a estas sugerencias surge la Propuesta de Definición de Provincias Sismotectónicas para Colombia (7), en la cual se definen 32 zonas denominadas provincias sismotectónicas que con base en el esquema tectónico planteado por provincias, se generalizó el comportamiento teórico para definir bloques de deformación activos que explican los fenómenos neotectónicos.

En las últimas décadas se han realizado ajustes sustanciales en métodos tomo-gráficos tradicionales (8, 9) y (10) para la modelación cortical en áreas pequeñas. Nos referimos a la tomografía como el conjunto de técnicas con capacidad de reconstruir imágenes a partir de proyecciones o señales indirectas que en nuestro caso serán ondas sísmicas (11-13). En sismología se aplica la técnica tomográfica conocida como inversión simultánea para indicar que la ubicación espacial de los terremotos locales se llevó a cabo simultáneamente con la determinación de estructuras de velocidad de una región mediante el uso de rayos que la atraviesan (10).

Para derivar un modelo 1D que puede ser usado en la localización de sismos y como modelo de referencia inicial para estudios de tomografía sísmica (12, 14) se utiliza el programa VELEST que originalmente fue escrito en 1976 por W.L. Ellsworth y S. Roecker para estudios de tomografía sísmica con el nombre del programa HYPO2D (15). En 1984, (14), después de modificaciones a la estructura de flujo y la implementación de nuevas opciones, lo usaron para calcular el modelo óptimo de velocidades que mejor ajuste en localizar sismos y tomografía sísmica 3-D del área de Long Valley, California. Desde entonces se ha aplicado VELEST a diferentes áreas en California, Alaska, Wyoming, Utah y los Alpes (12, 16).

### Localización

La zona inicialmente proyectada está ubicada entre latitudes  $4^{\circ}\text{N}$  -  $6^{\circ}\text{N}$  y longitudes  $74.5^{\circ}\text{W}$ -  $78.0^{\circ}\text{W}$  (cuadrante del OSQ), pero debido a que la base de datos no contiene información representativa de un sector en el cuadrante la zona fue delimitada a: latitudes entre  $4^{\circ}\text{N}$  -  $5.8^{\circ}\text{N}$  y longitudes  $74.5^{\circ}\text{W}$ -  $76.7^{\circ}\text{W}$ , en esta zona se buscará hallar la estructura de velocidad cortical (figura 1)



Figura 1. Localización de la zona de estudio. Se señalan la cordillera occidental y la cordillera central.

## GEOLOGIA DEL CENTRO – OCCIDENTE COLOMBIANO

En la región del centro occidente de Colombia afloran unidades geológicas de origen oceánico y continental, de la edad paleozoica y mesozoica. Estas unidades que conforman el basamento en la región, están separadas por grandes fallamientos regionales y están cubiertas por una gran unidad fluvio-volcánica de edad cuaternaria en la figura 2, se muestra el mapa geológico de la zona de estudio digitalizado del mapa geológico colombiano INGEOMINAS 2007

La geomorfología dominante en el centro occidente de Colombia es el complejo andino; justamente al Norte del Ecuador el macizo Andino se bifurca en tres cadenas montañosas: Occidental, Central y Oriental y es surcado por 2 valles aluviales; el valle del Cauca-Patía que separa la cordillera Occidental de la Central y el valle del Magdalena que separa la cordillera Central de la Oriental.

Dentro de dichas unidades se encuentra El Abanico del Quindío, El Complejo Arquía, Complejo Quebrada Grande, todas estas unidades están cubiertas por capas de ceniza de edad cuaternaria, provenientes de los volcanes de la Cordillera Central, el espesor total promedio de las cenizas sobre el abanico del Quindío es de 10 a 20 metros, aumentando hacia la parte alta de la cordillera. Esta zona está constituida por rocas de diferentes edades y tipos que se podría describir así (17):

**Cordillera Central:** Consta principalmente de rocas plutónicas y metamórficas recubierta por retazos aislados de rocas sedimentarias marinas del Cretáceo y por detritos volcánicos en las áreas próximas a los grandes volcanes como el Huila, Ruiz, Tolima, Quindío y Santa Isabel. Se presentan rocas metamórficas de edad precámbrica y paleozoica, areniscas y rocas verdes, esquis-

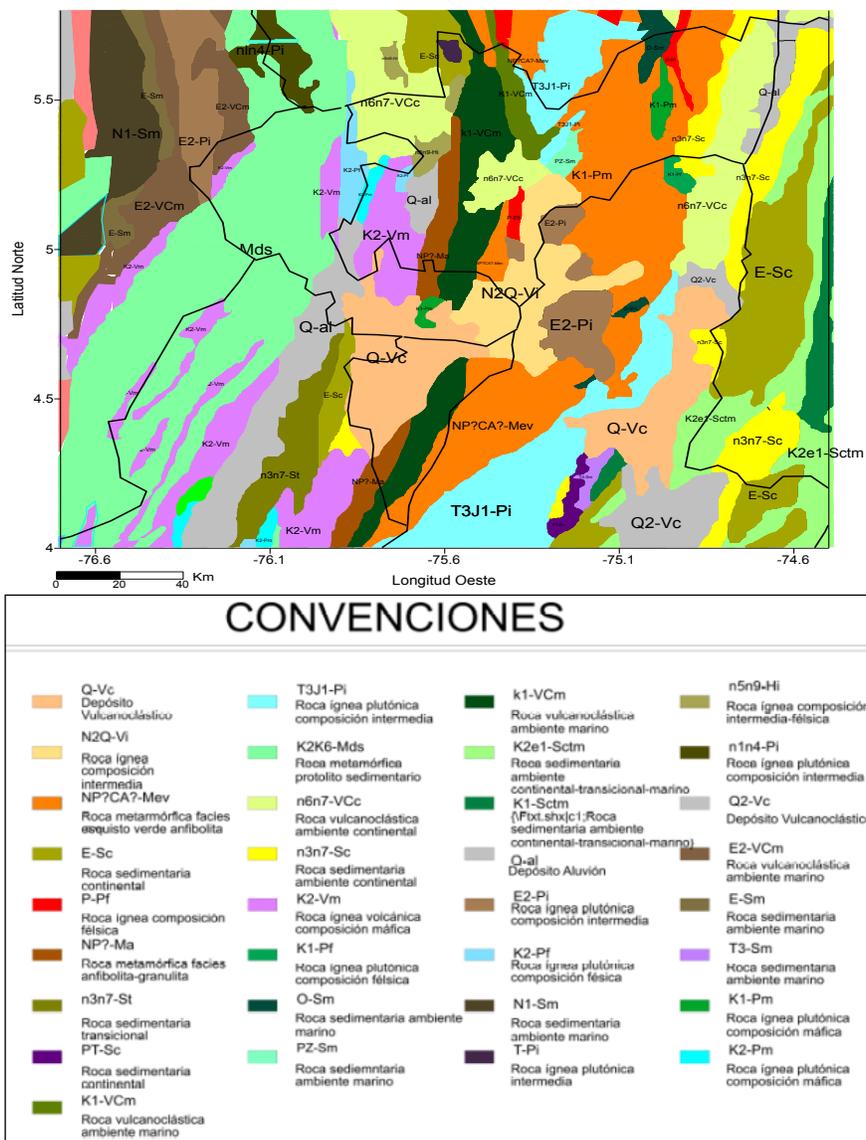


Figura 2. Mapa geológico de la zona de estudio digitalizado del mapa geológico colombiano INGEOMINAS 2007

tos cataclásticos, serpentinitas, granodioritas y dioritas del Cretáceo. Las variedades litológicas y las foliaciones de estas rocas buzan de norte al noreste, fueron mapeadas por (18-20). Uno de los más grandes complejos volcánicos del Cenozoico Tardío de los Andes en el Norte es el complejo Tolima-Ruiz cerca a la ciudad de Manizales una de las capitales del Eje Cafetero Colombiano. Varias grandes fallas que van de norte al noreste han sido reconocidas en esta cordillera; por su importancia se mencionan las fallas de Romeral y Palestina, estudiadas por (20) y (19) respectivamente.

**Valle del Cauca:** Una gran depresión tectónica que separa las cordilleras Occidental y Central por una distancia aproximada de 500 Km, la depresión es una estructura de graben llena principalmente de clásticos del Terciario y rocas volcánicas. Aunque la depresión es de

origen tensional la presencia de plegamientos sugiere una componente compresiva durante el Terciario. Consta de rocas cizalladas y falladas que forman parte de la zona de cizalladura de Dolores, zona que yuxtapone las rocas continentales de la cordillera Central contra rocas sedimentarias profundas de origen marino y rocas volcánicas de la cordillera Occidental.

**Cordillera Occidental:** Es parte del complejo ígneo básico, uno de los complejos ofiolíticos mas grande del mundo que se extiende desde Costa Rica a través de Panamá, Colombia y Ecuador (22)(Kellogg and Vega, 1995). Esta cordillera consiste en estratos marinos del Cretáceo, rocas metamórficas, basaltos toleíticos, andesitas máficas calcoalcalinas, andesitas y cuarzdioritas del Terciario.

Los tipos de rocas más frecuentes de las tres cordille-

ras son: Areniscas, grauvaca, lutitas y rocas verdes. El levantamiento más reciente de las tres cordilleras tuvo lugar durante el Cenozoico Tardío; los levantamientos están confinados por fallas y plegamientos empinados de rumbo norte (23)(Monsalve, H., 1998).

### MATERIALES Y MÉTODOS

Para la definición de modelos unidimensionales de velocidad del centro occidente Colombiano es necesario tener lecturas de fases de ondas P y S de sismos que pertenezcan a la zona de estudio, cuya lecturas de S-P no supere 60 segundos en promedio, los datos deben ser representativos y tener buena calidad. Posteriormente se completo la base de datos en SEISAN y se efectuó la inversión unidimensional no linealizada de rayos VELEST; para esto se compilaron los sismogramas digitales de la RSNC, OVSM y el OSQ. La figura 3 muestra la distribución de las estaciones utilizadas en el proyecto y en la figura 4 los sismos localizados.

Las características principales de VELEST son, la parametrización de la zona de estudio, trazado de rayos desde el hipocentro a las estaciones sismológicas y ajuste de la solución de la estructura de velocidades a los datos. Para alcanzar los objetivos de este proyecto la metodología a emplear es la siguiente:

- $0 < \text{RMS} \leq 0.2$ .
- Errores en las distancias epicentrales e hipocentrales de -20 a 20 km.

### La asignación de eventos para las diferentes zonas

El ambiente tectónico en la zona de estudio es complejo y gracias al estudio realizado por (7)Orozco (2003) se identifican varias provincias tectónicas a las cuales se les asignaran los eventos del catálogo. La figura 4 muestra las provincias sismo-tectónicas y las zonas asignadas a los modelos por provincias; estas se agrupan en dos grandes zonas.

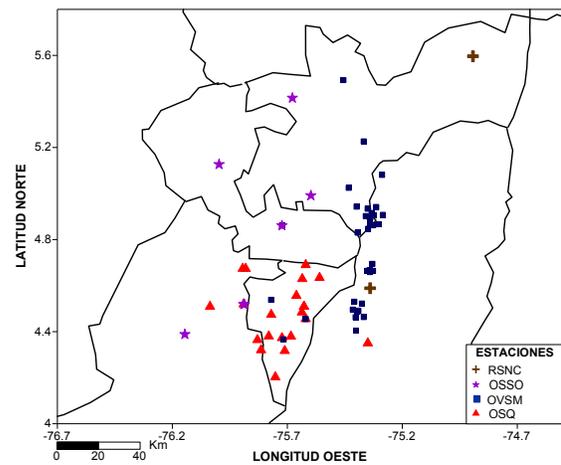


Figura 3. Distribución de estaciones sismológicas en la zona de estudio

### Recopilación y actualización del catálogo de localizaciones

Para este proyecto se recopilaron las trazas sísmicas registrados por la Red Sismológica Nacional de Colombia (RSNC), Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Manizales (OVSM) y Observatorio Sismológico del Quindío (OSQ) y se utilizó la información de los eventos que pertenecen a la zona de estudio.

### Compilación y complementación del catálogo de localizaciones

Los registros digitales se procesaron en el programa SEISAN, se completo la información, se localizaron y se revisaron los datos no confiables con el fin de mejorarlos optimizando la base de datos.

Para que los eventos sean representativos deben cumplir ciertas condiciones; en los catálogos se seleccionan los eventos que han sido registrados con mínimo 3 estaciones, garantizando la calidad en los resultados para que sean confiables dentro de los márgenes de error estipulados en el proyecto; estos límites de error vienen dados por:

- $\text{GAP} \leq 250$ .

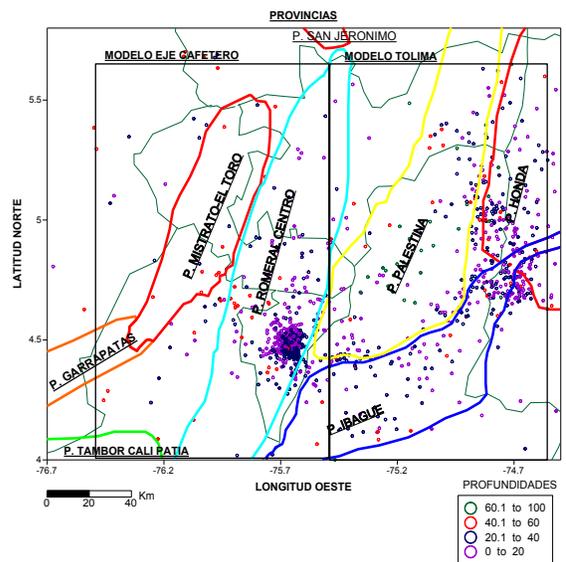


Figura 4. Localización de sismos para los modelos por provincias tectónicas de la región.

### La determinación de los diferentes modelos corticales unidimensionales

Una vez realizadas las lecturas y revisado los tiempos de arribo de ondas P y S se hizo la primera localización de los eventos utilizando el programa SEISAN.

Para la determinación de los diferentes modelos corticales unidimensionales se empieza escogiendo los modelos iniciales que servirán para realizar la inversión.

Estos modelos son los usados en el proyecto de Estructura y velocidad para la zona Andina Colombiana [24] como el modelo del OSQ, RSNC, OSSO, PREM, Ocola, Vargas y otros modelos aleatorios de bajas y altas velocidades, igualmente se tomaron modelos de velocidad constante. Todos los modelos mencionados anteriormente se invirtieron con el VELEST con el fin de obtener modelos finales mejorados; a estos modelos se les compara su respectivo RMS escogiendo el de menor valor (figura 5), este se comprueba con la relocalización de la base de datos.

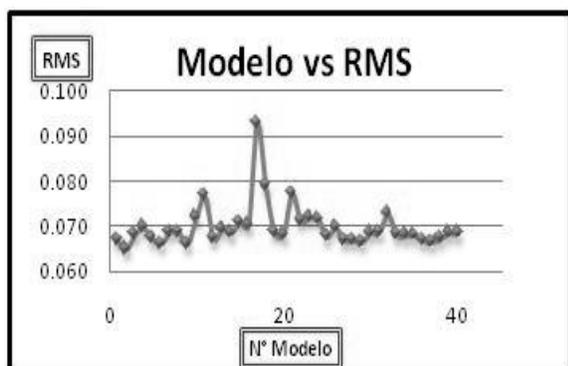


Figura 5. Variación de los modelos invertidos y se muestran los RMS de los 40 modelos iniciales.

Esta metodología se implementará igualmente para encontrar modelos unidimensionales de velocidad para las zonas asignadas a los modelos por provincias y llegar a modelos que representen la zona de Eje Cafetero, Tolima y Subducción.

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para obtener una inversión confiable de la estructura de velocidad de una zona, es necesario contar con una buena cobertura de estaciones sísmicas distribuidas uniformemente sobre la zona de estudio y también una distribución de sismos lo más homogénea posible para lograr una adecuada distribución de rayos. Desafortunadamente, las limitantes de los observatorios colombianos no permiten el despliegue de un mayor número de estaciones sísmicas y agregando que la geología es muy compleja en el Centro-Occidente Colombiano.

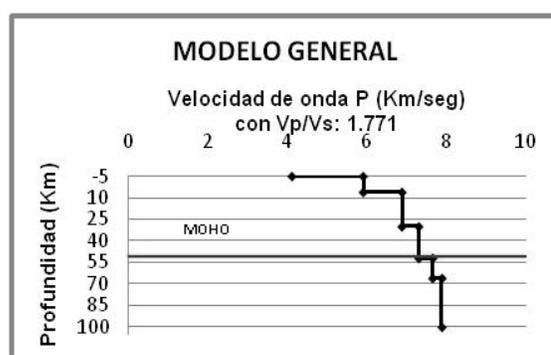
La base de datos tiene un gran porcentaje de eventos

concentrados principalmente en el Eje Cafetero y Tolima (figura 3), solo en la zona de Subducción se encuentran pocos eventos pero igualmente la cantidad es considerable (por estas concentraciones se definieron los modelos por provincias); las profundidades para el Modelo 1D del Eje Cafetero es de 0 a 60 km, para el Modelo 1D del Tolima es de 0 a 100 km, para el modelo 1D de subducción las profundidades varían de 60 a 205 km aproximadamente y para el modelo general de 0 a 100 km. Con lo anterior se puede decir que el modelo general representa una primera opción para la localización de eventos superficiales.

No se implementaron lecturas de ondas S, dado que la mayoría de las lecturas se realizaron con estaciones de periodo corto y no son fases confiables.

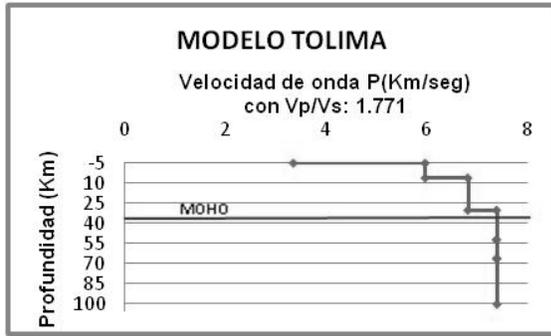
En general, a los eventos que se les realizó la inversión con VELEST tuvieron características aceptables y para los modelos General, Tolima y Eje Cafetero pueden ayudar a resolver adecuadamente las localizaciones posteriores ya que poseen valores relativamente pequeños de GAP, RMS y menores errores en las distancias horizontales y verticales.

Tomando en cuenta los resultados de las diferentes inversiones, es posible interpretar que la corteza continental para el Centro-Occidente Colombiano está formada en general por seis capas planas, donde el MOHO se ubica a una profundidad entre 35-40 km; para el Tolima es de 5 capas planas ubicando el MOHO a una profundidad de 35-40 km y para el modelo del Eje Cafetero es de nueve capas planas ubicando el MOHO a una profundidad de 50-55 km, la figura 6 muestra los modelos 1D finales.

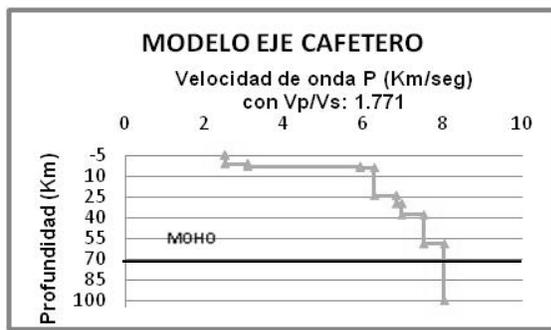


a)

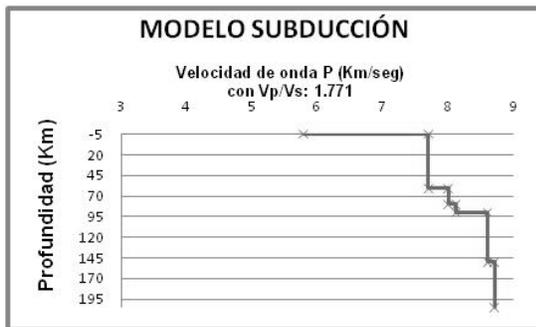
Figura 6. Modelos 1D finales. a) Modelo general (RMS=0.065)



b)



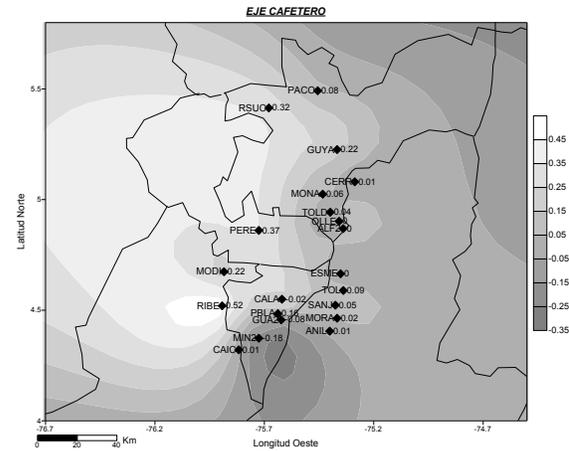
c)



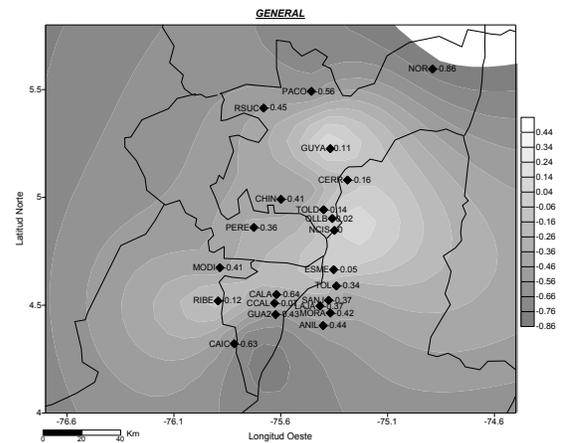
d)

**Figura 6.** Modelos 1D finales. b) Modelo Tolima (RMS=0.064), c) Modelo Eje Cafetero (RMS=0.048), d) Modelo de Subducción (RMS=0.082)

En cuanto a la relación del modelo con la geología de la zona de estudio, se obtuvieron residuales de estaciones positivas y negativas relativamente bajas, para estaciones que registraron eventos del cuadrante pero ubicadas fuera del mismo, algunos residuales fueron relativamente altos esto se le atribuye a que el área se encuentra en una zona de tectonismo complejo y de muchos fallamientos que pueden causar este tipo de anomalías, la figura 7 muestra los residuales por estación para el cuadrante de estudio.

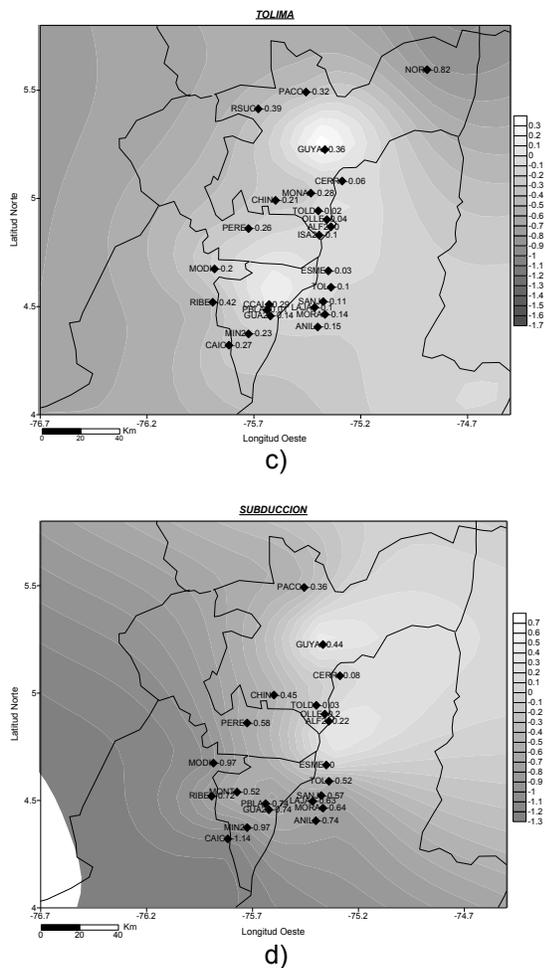


a)



b)

**Figura 7.** Curvas de residual promedio por estación. a) Residuales Modelo del Eje Cafetero, b) Residuales Modelo General.



**Figura 7.** Curvas de residual promedio por estación. c) Residuales Modelo Tolima, d) Residuales Modelo Subducción

Se tomaron las localizaciones de los meses de mayo, junio y julio de 2009, se relocaron con el modelo General y los modelos de provincias y evidentemente se observa una mejor localización. El propósito del Modelo General es abarcar toda la zona de estudio y es un mejoramiento al modelo utilizado actualmente por el OSQ.

El modelo del Eje Cafetero presenta mayor cantidad de datos, mayor homogeneidad en la información y una concentración de eventos en el Quindío que permite al modelo ser más confiable para las localizaciones reflejándose en un RMS menor comparado con los otros modelos elegidos.

El modelo del Tolima abarca un gran sector y su cantidad de eventos es más dispersa comparada con la provincia definida para el Eje Cafetero por esto su RMS es alto pero su modelo no deja de ser representativo para los eventos que abarca; con una mayor cantidad de da-

tos el modelo para esta provincia se puede mejorar.

El modelo Subducción contiene una base de datos menor y la concentración de eventos es un más dispersa, representa la subducción en este cuadrante y el modelo puede mejorar con una base de datos mayor.

En general las lecturas y localizaciones de los eventos que se utilizaron fueron de muy buena calidad y se presentaron errores aceptables. En la cobertura de la sismicidad se tuvo en cuenta solo la del cuadrante de estudio y la cobertura de estaciones de distintos observatorios del país que registraron eventos del cuadrante (OVSM, el OSSO, el OSQ y la RSNC).

### CONCLUSIONES

La combinación de muchos modelos de velocidades para el Centro-Occidente Colombiano nos ha permitido definir algunos elementos claves que han aclarado el panorama, avanzando en el conocimiento de la estructura cortical de la zona. Llegando a obtener modelos propios unidimensionales de velocidades de ondas para la región presentando un modelo para la zona de estudio denominado Modelo General. Igualmente se obtuvieron otros modelos por provincias tectónicas denominados Modelo Eje Cafetero y Modelo Tolima además los eventos que se originan en el choque de la placa NAZCA y la placa continental que son profundos están representados en el Modelo Subducción; estos modelos están compuestos por:

#### Modelo General:

6 capas planas hasta 100 km de profundidad, un RMS de 0.0649 y  $V_p/V_s$ : 1.771 (tabla 1):

Tabla 1. Modelo General

VELOC. DE ONDA P (km/s)	PROF. (km)
4.14	-5
5.92	6
6.89	30
7.31	52
7.66	66
7.89	100

**Modelo Tolima:**

5 capas planas hasta 100 km de profundidad, un RMS de 0.0642 y  $V_p/V_s$ : 1.771 (tabla 2):

Tabla 2. Modelo Tolima

VELOC. DE ONDA P (km/s)	PROF. (km)
3.36	-5
5.98	6
6.83	30
7.40	66
7.41	100

**Modelo Eje Cafetero:**

9 capas planas hasta 100 km de profundidad, un RMS de 0.0479 y  $V_p/V_s$ : 1.771 (tabla 3):

Tabla 3. Modelo Eje Cafetero

VELOC. DE ONDA P (km/s)	PROF. (km)
2.50	-5
2.51	1
3.08	3
5.91	4
6.27	24
6.82	30
6.96	38
7.51	59
8.03	100

**Modelo Subducción:**

6 capas planas desde 60 km hasta 205 km de profundidad, un RMS 0.0823 y un  $V_p/V_s$ : 1.771 (tabla 4)

Tabla 4. Modelo Subducción

VELOC. DE ONDA P (km/s)	PROF. (km)
5.79	-5
7.70	61
8.00	80
8.12	90
8.60	150
8.71	205

Estos son modelos promedios de Corteza que serán implementados para el cuadrante del OSQ en este estudio. Esta propuesta de modelos Unidimensionales de velocidades está basada en un gran número de datos locales y esto representa un mejor conocimiento acerca de la estructura de corteza de la zona. Aunque los modelos son 1D, demostramos que son modelos confiables para

la localización de sismos en la zona de estudio, obviamente, la estructura 3D de la corteza en Colombia y del Moho es mucho más compleja para representarlo con modelos de capas planas, pero en particular es un elemento útil para la localización y relocalización de eventos; sin embargo, para la región en la cual estos modelos serán implementados, es justamente representativos considerando que se tiene unos bajos residuales de estación y unos bajos RMS en las relocalizaciones generales de los sismos. Por lo tanto estos modelos representan un buen punto de partida para una inversión tomográfica. Podemos también obtener mejores localizaciones de sismos y llegar a conocer las diferencias más acertadas en los espesores de la corteza y en la estructura del manto superior.

**AGRADECIMIENTOS**

Agradecemos al INGEOMINAS, a la Red Sísmica Nacional de Colombia (RSNC), al Observatorio Volcanológico y Sísmo-lógico de Manizales (OVSM) y al Observatorio Sísmológico de la Universidad del Quindío (OSQ) por el suministro de las trazas sísmicas digitales requeridas para este estudio, la información digital y la asesoría suministrada a lo largo de este proyecto.

**BIBLIOGRAFÍA**

1. Taboada, A., Dimaté, C., Fuenza-Lida, A. Sismotectónica de Colombia: Deformación continental activa y subducción, física de la Tierra, 1998; n° 10: 111-147.
2. Ocola, L.C., Aldrich, L.T., Gettrust, J.F., Meyer, R.P., Ramirez, J.E., Proyecto Nariño I: Estructura de la corteza debajo de los Andes en el de Colombia y Norte de Ecuador en base a datos de refracción sísmica. 1975.
3. Gilbert, G.K., Theory of the earthquakes of the Great Basin, with a practical application. Salt Lake City Tribune, Sept. 20, 1883. [Reprinted in 1884 in American Journal of Science, 1883; ser. 3, 27:49-53.].
4. Reid, H. F., The mechanics of the earthquake. In The California Earth-quake of April 11, 1906. Report of the State Earthquake Investigation Commission, 2. Carnegie Institution of Washington D.C. 1910.
5. Dewey, J., Algermissen. Seismicity of the middle America arc-trench System near Managua, Nicaragua, Bull. Seismol. Soc. Am. 1974; 64, 1033-1048.
6. Guzmán-Speziale, M., Penning-Ton, W.D., Matumoto, T., (1989). The triple junction of the North America, Cocos and Caribbean, plates seismicity and tectonics, 1989; 8,981-997.
7. Orozco, L. A., Propuesta de Definición de Provincias Sismotectónicas Para Colombia, Universidad de Caldas, Tesis de pregrado. 2003.

8. Aki, K., Lee, W.H.K. Determination of three-dimensional velocity anomalies under a seismic array using first P arrival times from local earthquake, a homogeneous initial model, *Geophysics research*, 1976; 81, n°23.
9. Crosson, R.S. Crustal structure modeling of earthquake data, Simultaneous least squares estimation of hypo-center and velocity parameters. - *J. Geophys. Res.* 1976; 81, 3036-3046.
10. Thurber, C.H. Earthquake location and three-dimensional crustal structure in the Coyote Lake area, central California. *J. Geophys. Res.* 1983; 88, 8226-8236.
11. Nolet, G. *Seismic Tomography With Applications in Global Seismology and Exploration Geophysics*, Reidel, Dordrecht, 1987; 386 pp.
12. Kissling, E. Geotomography with earthquake data. *Rev. Geophys*, 1988; 26, 659- 698.
13. Iyer, H. M., Hirahara, K.. *Seismic Tomography*, Chapman and Hall, London, 1993; 842 pp.
14. Kissling, E., Ellsworth, W.L., Eberhart-Philips, D., Kradolfer, U. Initial reference models in local earthquake tomography *J. Geophys. Res.*, 1994; 99, 19365-19646.
15. Ellsworth, W.L. Three-dimensional structure of the crust and mantle beneath the island of Hawaii, 327 págs. MIT, Massachusetts, EE.UU. [Ph D thesis]. 1977.
16. Kissling, E., Lahr, J.C. Tomographic image of the Pacific slab under southern Alaska-*Eclogae Geol. Helv.* 1991; 84, 297-315.
17. Woodward-Clyde., (1986). Consultants. Northwest Colombian Project.
18. Grosse, E. *Estudio Geológico del Terciario Carbonífero de Antioquia en la parte occidental de la Cordillera Central de Colombia*: Berlín, Verlag Von Dietrich Reimer (Ernst Vohsen), 1926; 361 P.
19. Botero, G.N. Contribución al conocimiento de la geología de la zona central de Antioquia. *Anales Fac. Minas*, 1963; 57, 1-107. Medellín.
20. Feininger, T. The Palestina Fault, Colombia. *Geol. Soc. Am. Bull.* 1970; 81, 1201-1216.
21. Campbell, C. J. The Santa Marta wrench fault of Colombia and its regional setting, en IV Conf. Geolog. Del Caribe, Trinidad. 1968.
22. Kellog, J.N., Vega, V. Tectonic development of Panama, Costa Rica and the Colombian Andes: Constraint from global positioning system geodetic and gravity. *Geol. Soc. Am. Bull.* 1995; special paper 295, 75-90.
23. Monsalve, H. Geometría de la Subducción de la Placa Nazca en el Noroeste de Colombia, Implicaciones Tectónicas y Sísmicas, Tesis de Maestría, Universidad Autónoma de México. 1998.
24. Monsalve, H, Espinosa, A., Montes, L., Hernandez, O. 2010. Estructura y velocidad para la corteza en la zona andina colombiana usando función receptor. Informe proyecto 1113-333-18668 COLCIENCIAS, Universidad del Quindío, Universidad Nacional. En edición.