

IMPORTANCIA DE CONSIDERAR CORTEZA NO-HOMOGÉNEA EN SISMOLOGÍA

ISABEL RESTREPO

roldan@epm.net.co

Ingeniera Geóloga, Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Minas, Medellín.

ALEJANDRO CHICA

alchisan@epm.net.co

Profesor Asociado, Escuela de Geociencias y Medio Ambiente, Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Minas, Medellín.

Recibido para revisar 29 de Julio de 2002, aceptado 20 de Noviembre de 2002, versión final 10 de Abril de 2003.

RESUMEN: La corteza terrestre no es una masa uniforme y homogénea. Es una sucesión de rocas que poseen distinto origen y naturaleza, de allí que se distingan en cuanto a sus propiedades mecánico-estructurales y que se comporten de una manera particular cuando viaja a través de ellas una onda sísmica. Se plantea un análisis geofísico del sismo del 25 de enero de 1999, en el Eje Cafetero Colombiano, que incluye la cuantificación de velocidades de propagación de la onda P en corteza no homogénea y las comparaciones con los resultados obtenidos en corteza homogénea.

PALABRAS CLAVES: Sísmica, Corteza No Homogénea, Velocidad de Propagación, Ondas P, Hipocentros.

ABSTRACT: The Earth crust is not an uniform and homogeneous mass. It is a rock issue with different origin and nature. This is why they could be distinguished by their mechanical and structural properties which makes them to respond in a particular way when a seismic wave travels through. The author propose a geophysical analysis of the earthquake occurred on january 25 of 1999 at the "Eje Cafetero" in Colombia which includes the propagation speed quantification of the P wave in non homogeneous crust and the comparissons with the results obtained in homogeneous crust.

KEYWORDS: Seismic, Non Homogeneous Crust, Propagation Speed, P Wave.

1. INTRODUCCIÓN

El estudio parte de la motivación de probar lo poco conveniente que es trabajar con corteza terrestre homogénea en sismología, tal como se hace actualmente en Colombia. Para ello se decidió tomar como caso en concreto el sismo del 25 de enero de 1999, y hacer un trabajo básico que permitiera conclusiones determinantes.

Los sismogramas correspondientes al movimiento sísmico del 25 de enero de 1999 (afectó principalmente al Eje Cafetero Colombiano) permiten, en primera instancia,

tener una localización aproximada del área epicentral ya que en la estación TOL.SP.Z (Figura 2), las ondas sísmicas P y S llegaron prácticamente de manera simultánea (ver Figura 1). Lo anterior, como se anotó, permite ubicar el área epicentral en el Departamento del Quindío o en el Departamento del Tolima; posteriormente, aplicando algún método gráfico y ciertas consideraciones de efectos sísmicos en superficie, fue precisado por las instituciones afines (OSO, RSNC y USGS – NATIONAL EARTHAQUAKE) el epicentro en zona rural cercana al municipio de Córdoba (Quindío) (Figura 3).

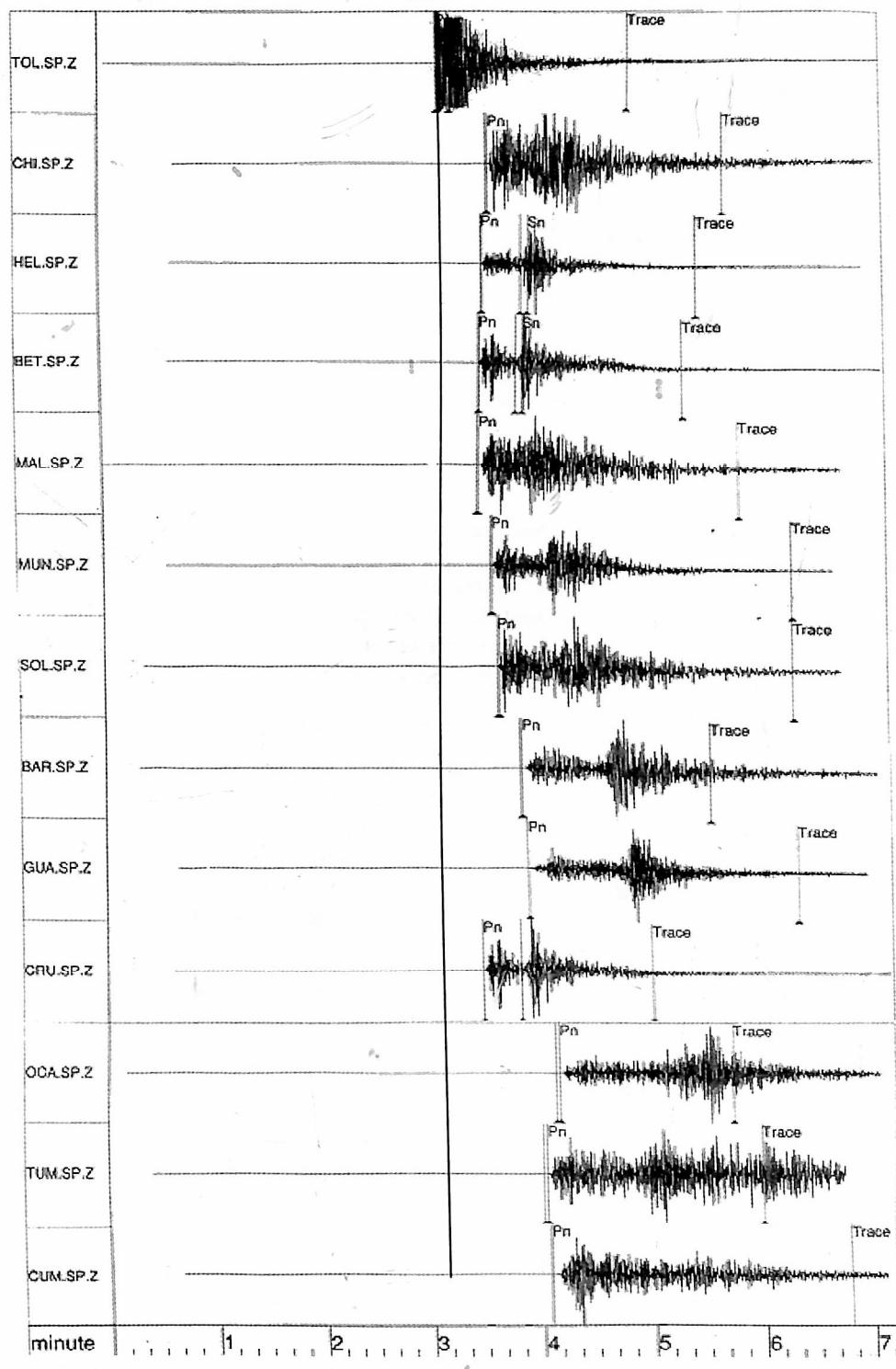


Figura 1. A la izquierda muestra el nombre de la estación y a la derecha el sismograma de cada uno de ellas. En estos, donde aparece Pn significa la llegada de la onda P . Puede verse que para TOL.SP.Z el registro de las ondas se concentra al inicio, puesto que allí, las ondas S y P llegaron de manera casi simultánea. La línea Vertical permite dar correspondencia a t_0 , con cada sismograma, la distancia de cada onda Pn a esta, equivale a mayor o menor tiempo de retardo. (Información suministrada por el CPIS, U.Nal Sede Medellín)

Para el estudio, se partió de la siguiente hipótesis: si se toma como centro de círculos concéntricos la estación sismológica TOL.SP.Z en caso de tenerse una corteza terrestre homogénea e isotrópica, las estaciones que queden localizadas en un mismo círculo, deben reportar tiempos de llegada de ondas *P* iguales y mayores que los correspondientes a las ondas *S*. Cualquier desviación de los resultados indica obviamente la presencia de corteza terrestre heterogénea y anisotrópica en mayor o menor grado, dependiendo de la magnitud de desviación de los resultados.

Lo anterior es precisamente el objetivo del presente estudio, con el cual se demuestra lo que de por sí es lógico, pero no tenido en cuenta para la definición de epicentros y por ende de movimientos sísmicos: La heterogeneidad y anisotropía de la corteza terrestre involucrada en los análisis.

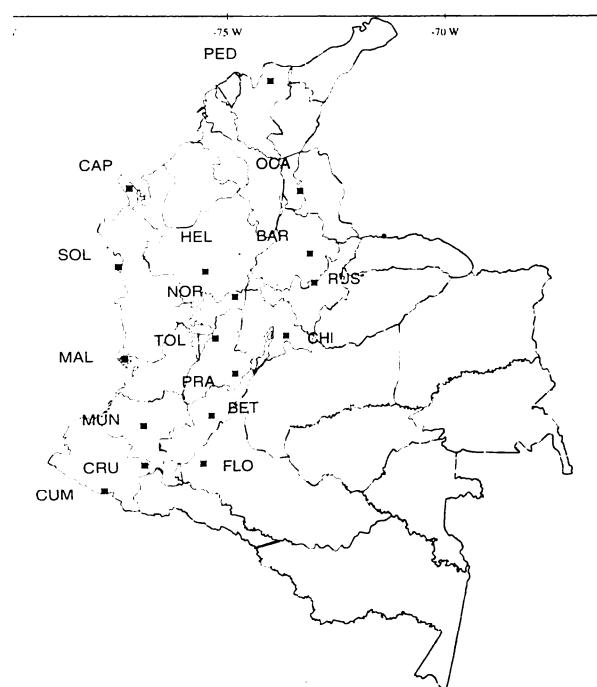


Figura 2. Ubicación de las estaciones sismológicas que reportaron el sismo (imagen CPIS).

Recientemente *Chica* (2000) publicó un método en el cual se tiene en cuenta la corteza terrestre lo más próxima posible a la real existente, el cual denominó "Codificación sismológica de planos de falla. Una propuesta metodológica". Con este estudio se pretende continuar esta línea de investigación y de manera complementaria, sugerir la velocidad promedio de propagación de la onda *P* para algunos perfiles lito-estructurales colombianos radiados desde la estación TOL.SP.Z.

Finalmente, se quiere resaltar que el estudio de resultados de sismos bien documentados permite enriquecer con muchos perfiles lito-estructurales colombianos, las bases de datos utilizables posteriormente en otras investigaciones.

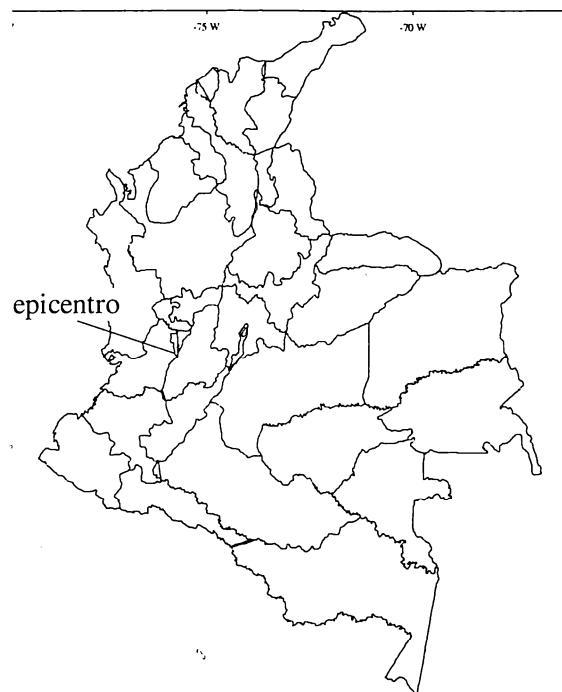


Figura 3. Localización del epicentro según OSSO (Observatorio sismológico del Suroccidente) Imagen suministrada por el CPIS.

2. MARCO TEÓRICO

Cuando se genera un sismo, éste se manifiesta como una complejidad de ondas que se propagan a través del terreno de muchas maneras.

La base de los métodos sísmicos es la elasticidad. Se entiende como onda elástica aquella que se produce en un medio en el cual se ha aplicado una tensión que lo deforma y que luego de lo cual éste se recupera.

Las ondas elásticas pueden ser internas o externas, las primeras pueden ser a su vez, longitudinales (*P*) y transversales (*S*). Las ondas *P* son de compresión y el movimiento del medio se da en la misma dirección de propagación de la onda (como lo son las ondas sonoras).

De todos los tipos de ondas presentes en un sismo, este trabajo está dirigido a las ondas *P*. Para este tipo específico de onda se calculan las velocidades de propagación con base en las siguientes ecuaciones:

Velocidad de onda *P*:

$$V_p = \sqrt{(k + (4/3) n) / \rho} \quad (1)$$

Donde:

k: Módulo de compresibilidad

n: Módulo de rigidez

ρ: Densidad del medio

Esta velocidad se calcula para cada tipo de roca o estrato.

Velocidad Ponderada de la onda reflejada en la interfaz

n-ésima horizontal:

$$V_n = \frac{\sum_{k=1}^{n-1} h_k}{\sum_{k=1}^{n-1} \frac{h_k}{V_k}} \quad (2)$$

Esta velocidad es el resultado de la propagación de la onda sísmica *P* al pasar por todos los estratos. Cada estrato o roca corresponde a una interfaz.

La profundidad del hipocentro y el tipo de roca por donde viaja la onda *P* inciden en su velocidad. La Tabla 1 muestra los valores de la velocidad ponderada teórica de la onda *P*. Por su parte, la Tabla 2 muestra los valores hallados por *Buitriago et al* (2001) para diferentes tipos de rocas en Colombia.

3. METODOLOGÍA

El trabajo se dividió en dos fases, una primera en donde se pretendió buscar el epicentro asumiendo corteza homogénea por capas horizontales empleando el Método Gráfico, para probar lo errado de los resultados y una segunda, más extensa, que buscaba obtener los tiempos de retardo de la onda *P*, de diversas estaciones con respecto a TOL.SP.Z, mediante diversas consideraciones.

Tabla 1. Velocidades ponderadas teóricas si la corteza fuera homogénea. Modelo Teórico Estándar

Profundidad del Hipocentro (km)	Velocidad de <i>P</i> (km/s)
0-2	4
2-5	5.5
5-25	6.4
25-35	7.1
> 35	8.1

Tabla 2. Velocidades de la onda *P* según el tipo de roca. Valores hallados por *Buitriago et al*, (2001).

Granodiorita	6.44 km/s
Diorita	6.10
Gabro	7.06
Pizarras	5.91
Cuarcitas	6.15
Gneis	6.07
Granulitas	7.25
Anfibolitas	7.21
Lutitas	3.5
Basalto	6.63

El desarrollo del modelo, fue hecho tomando los valores registrados para el sismo nombrado con la información suministrada por el CPIS. Para los perfiles lito-estructurales, se trabajó con el Mapa Geológico Colombiano, escala 1:1'500.000, 1985.

Fase 1.

1. **REVISIÓN DEL MODELO HOMOGÉNEO GRÁFICAMENTE.** Cálculo del epicentro (método gráfico) con base en el modelo de corteza homogénea e isotrópica en capas horizontales, para Colombia, con el supuesto de que el hipocentro estuvo a 30 km de profundidad (como fue reportado) y tomando una distancia promedio de 340 km (entre las estaciones elegidas a TOL.SP.Z que se reportan en la Tabla 4), se buscó una velocidad ponderada de onda P teórica (ecuación 2) y se usaron otras dos velocidades teóricas para el mismo modelo. Es decir, se obtuvieron tres epicentros diferentes a partir de estas tres velocidades para comprobar la poca eficiencia del modelo de corteza homogénea por capas horizontales (ver Figura 4), usado actualmente para el estudio de sismos en Colombia.

Fase 2.

1. Elección del sismógrafo que presentó menor diferencia de tiempos de llegada de las ondas *S* y *P*, que fue tomado como el centro de los círculos concéntricos que permiten hacer el estudio (ver Figura 6). El seleccionado es TOL.SP.Z, ubicado en el Nevado del Tolima, cuyo valor de tiempo de llegada de las ondas es $t = t_0$ (Figura 1)
2. Con base en t_0 se calculó, para todos los sismógrafos reportados, el retardo de la llegada de la onda *P*, a partir de la Figura 7. (resultados en la Tabla 3, sección 4.b). Puesto que estos valores son tomados a partir de los resultados directos de los sismógrafos constituyen los valores reales de referencia. Todo modelo que se plantea debe

permitir encontrar valores lo más cercanos posibles a estos.

3. Con centro en TOL.SP.Z, sobre el mapa de ubicación de las estaciones en Colombia, se trazaron círculos concéntricos (Figura 5, sección 4.c) para definir cuáles de los sismógrafos están a distancia aproximadamente igual al centro, lo que equivale a buscar pares o tríos de sismógrafos sobre un mismo círculo. Si la corteza es homogénea, las estaciones que queden en un mismo círculo deben reportar el mismo tiempo de retardo, lo que no sucede como se muestra más adelante en los resultados.
4. Selección de sismógrafos que cumplen la condición del numeral anterior: BET-MAL (Betania- Malpelo), OCA-CUM (Ocaña- Cumbal), MUN-SOL-BAR (Munchique, Solano, Barichara).
5. Cálculo de distancias de cada uno a TOL.SP.Z, a partir de las coordenadas previamente conocidas. (Tabla 4, sección 4.d)
6. Cálculo de velocidad de propagación de la onda como si viajara a través de corteza no homogénea utilizando la distancia obtenida en 6 y del tiempo obtenido en 3 (resultados en la Tabla 5, sección 4.e)
7. Realización de perfiles geológicos (figura 6) entre TOL.SP.Z y cada una de las estaciones escogidas y nombradas en 4. Para conocer los cambios litológicos superficiales laterales entre una y otra estación y calcular tiempos de retardo para corteza mixta con velocidades acordes a cada tipo de roca, halladas al tanteo (ver velocidades de tanteo en la tabla 7).
8. Análisis de resultados: Elaboración de una tabla que permita comparar, con referencia al sismógrafo TOL.SP.Z, las diferencias de tiempos (Δt) reportadas en los sismógrafos, con los calculados según modelos de corteza homogénea, corteza mixta. (superficialmente heterogénea y a profundidad homogénea por capas horizontales). Y corteza mixta con velocidades al tanteo. El análisis de esta tabla-síntesis (Tabla 6), permite extraer las conclusiones y recomendaciones de este estudio.

4. RESULTADOS

En esta sección aparecen en tablas y gráficos los resultados de cada numeral de la metodología y son la base de donde se obtienen las conclusiones presentes en la próxima sección.

El método gráfico representado en la Figura 5 asume este tipo de modelo para hallar el epicentro.

- **Fase 1.**

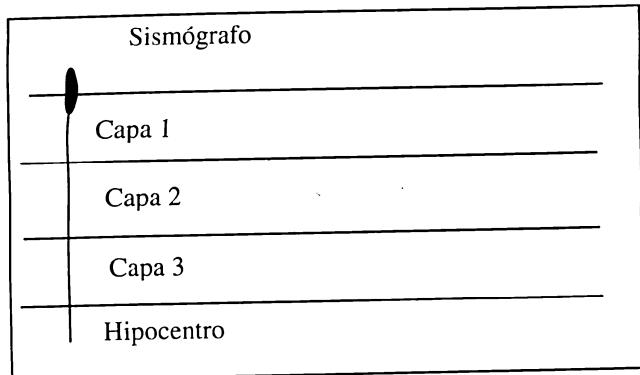


Figura 4. Esquematización del modelo de corteza de capas homogéneas horizontales, cada capa corresponde a una roca o estrato y por lo tanto a una velocidad diferente.

4.a Epicentros si la corteza fuera homogénea por capas (ver Figura 5):

Velocidad Teórica 1 $V_n = 4 \text{ km/s}$

Velocidad Teórica 2 $V_n = 4.75 \text{ km/s}$

Velocidad Teórica calculada 3: se calculó la velocidad de Propagación Ponderada a partir de la Ecuación 2: Con la cual se supone calcularon el epicentro para el sismo del 25 de enero (1999).

Donde:

$h_k = 340 \text{ km}$:Distancia promedio a TOL.SP.Z

$V_1 = 4, V_2 = 5.5, V_3 = 6.4, V_4 = 7.1,$

$V_n = 8.22 \text{ km/s}$

Localización del Epicentro aproximadamente, según cada velocidad:

Velocidad 1 y 2. Departamento de Cundinamarca (ver Figura 5)

Velocidad 3. No tiene solución por el método gráfico.

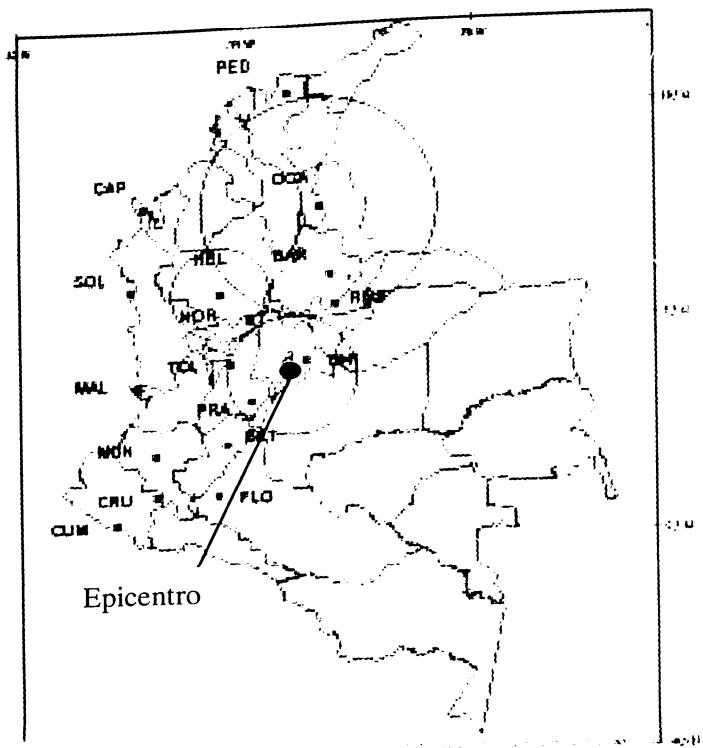


Figura 5. Método Gráfico para la ubicación de Epicentro, note que para el sismo en cuestión, el epicentro, considerando corteza homogénea se da en el departamento de Cundinamarca.

- **Fase 2**

4.b Del cálculo del tiempo de retardo se obtuvieron los resultados de la Tabla 3.

Tabla 3. Estos valores se obtuvieron con base en la Figura 1 y son los tiempos reales de la onda P en el terreno.

Estación	Tiempo de Retardo (minutos)
Tol: Tolima	0
Chin Chingaza	0.482
Hel:Santa Helena	0.424
Bet: Betania	0.411
Mal: Malpelo	0.411
Mun: Munchique	0.539
Sol: Bahía Solano	0.623
Bar: Barichara	0.790
Gua	0.829
Cru: La Cruz	0.399
Oca: Ocaña	1.028
Tum: Tumaco	0.928
Cum : Cumbal	0.976

- 4.c La Figura 6 muestra las estaciones que coinciden en un mismo círculo, lo que significa igual distancia a TOL.SP.Z que es de donde se comparan los datos.
- 4.d Distancias de cada una de las estaciones escogidas a TOL.SP.Z:

Tabla 4. Estas distancias son utilizadas para el cálculo de velocidades.

ESTACIÓN	DISTANCIA (m)
Bet	28178,85
Mal	231204,8
Mun	289006
Sol	303456,3
Bar	332356,9
Oca	447959,3
Cum	491310,2

- 4.e Las velocidades de propagación ponderada (V_n) a partir de las Tablas 3 y 4, se muestran en la Tabla 5.

Tabla 5. Estas velocidades consideran corteza no-homogénea

ESTACIÓN	V_n (km/s)
Centro : TOL:SP:Z	0
Bet	11,8
Mal	9,68
Mun	9,08
Sol	8,47
Bar	7,01
Oca	6,96
Cum	8,553

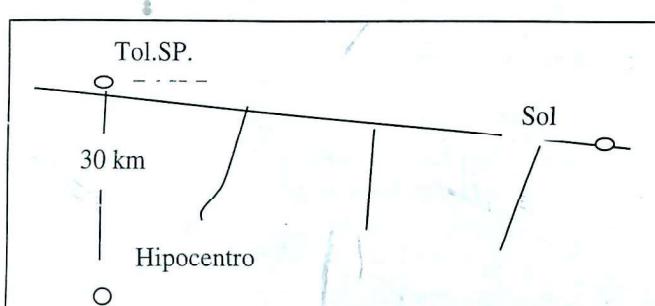


Figura 7. Esquematización de uno de los perfiles lito-estructurales, donde Tol.SP.Z es la estación base, Sol es el sismógrafo ubicado en Solano. Con los perfiles fue posible trabajar heterogeneidad en superficie hasta 20 km y a partir de allí, homogeneidad terrestre.

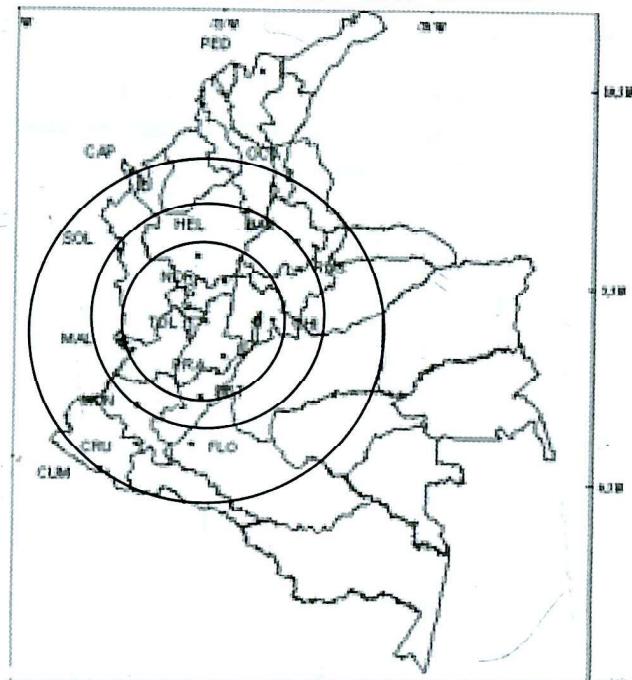


Figura 6. Círculos concéntricos para elección de pares y tríos de estaciones.

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES

• Fase 1

El método gráfico sirve como prueba para mostrar lo equívoco del modelo de corteza homogénea por capas horizontales, que en este caso ubica el epicentro en el departamento de Cundinamarca, cuando las evidencias mostraron que debía estar en el Quindío. Otra prueba está dada en el cálculo de tiempo de retardo con esta misma condición, cuyos valores aparecen en la columna 3 de la Tabla 6, los valores reales se reportan en la misma tabla en la columna 2.

Tabla 6. Resultados de los Δt (minutos) obtenidos por diferentes métodos.

	Δt real	Δt c.h	Δt c.m	Δt ajuste
TOL-BET	0.411	0.767	0.703	0.440
TOL-MAL	0.411	0.630	0.644	0.412
TOL-MUN	0.539	0.786	0.902	0.5699
TOL-SOL	0.23	0.825	0.937	0.572
TOL-BAR	0.803	0.903	1.077	0.690
TOL-OCA	1.028	1.216	1.452	0.923
TOL-CUM	0.976	1.332	1.507	0.957

- **Fase 2**

En la Tabla 6, la primera columna indica el nombre de las dos estaciones donde se está calculando la diferencia de tiempo (Δt). La segunda es el intervalo de tiempo hallado en la Tabla 3. Esta diferencia de tiempo de llegada de la onda P , corresponde al real.

La tercera columna contiene la diferencia de tiempo para un modelo de corteza homogénea ($c.h$), dicho tiempo se obtuvo de la ecuación:

$$t = 1,625 * 10 \exp -4 * L$$

Hallada para el sismo en cuestión por *Chica* (1998).

La cuarta columna corresponde al cálculo del intervalo con corteza mixta; lo que quiere decir es una corteza que considera heterogeneidad desde superficie hasta 20 km de profundidad (tomando las unidades litológicas dominantes de cada perfil) y usando para éstas las velocidades halladas por *Buitrago et al* (2001) y que son las ilustradas en la Tabla 2.

Para profundidades mayores a 20 km, se aceptó el modelo de corteza homogénea por capas horizontales cuyas velocidades están reportadas en la Tabla 1. La razón por la cual se propone corteza mixta, es porque a estas profundidad las condiciones de presión hacen que la onda adquiera velocidades mayores que las que tendría con la misma litología en superficie.

La última columna se obtuvo tanteando velocidades para las diferentes tipos de rocas a partir de la ecuación

$$t = \sum (l_i / V_i)$$

Donde:

l_i es la distancia hipocentro-estación i .

El tanteo resulta por la necesidad de ajustar lo máximo posible los valores de esta columna con la segunda. Las velocidades ajustadas se reportan en la Tabla 7.

A partir de esta tabla que expone la síntesis de la investigación se concluye que:

Los resultados para corteza homogénea son los más alejados a los reales (Columna 3 vs. Columna 2) Lo que quiere decir que definitivamente considerar corteza homogénea induce grandes errores en los análisis sísmicos.

Los resultados con corteza mixta, asumiendo las velocidades propuestas por (*Buitriago et al*, 2001) no representan tampoco a los reales, pues para el cálculo de los mismos fue necesario utilizar ciertas hipótesis del modelo de corteza homogénea lo que los hace por lo tanto alejarse de los reales. (columna 4 vs. columna 2)

Los intervalos de tiempo para la última columna, que si consideran corteza heterogénea, se aproximan más a los reales(columna 5 vs. columna 2) sin embargo, tienen el inconveniente de que para hallarse hubo que modificar las velocidades de propagación de la onda hasta valores muy elevados.(ver Tabla 7)

La Tabla 7 reporta valores muy elevados para la propagación de la onda P , en comparación con los hallados por *Buitrago et al*, mostrados en la Tabla 2. Para poder reducir tales velocidades, es necesario hacer trabajos que refinen el modelo de corteza no homogénea.

Tabla 7. Valores ajustados para las diferentes litologías.

Rocas ígneas plutónicas	10 km/s
R. Metamórficas	9.5
R. Sedimentarias	5.2
R. Volcánicas	7.0
R. de corteza homogénea	11

Tales refinamientos deben estar dirigidos a aspectos como:

- Definir las verdaderas disposiciones de contactos entre cuerpos (ígneometamórfico-sedimentario) pues en los perfiles hechos para este estudio, los contactos se asumieron verticales.
- Estimación de la profundidad de la interfaz (teórica) corteza homogénea-corteza heterogénea.
- Reevaluación de las velocidades de onda P del modelo de corteza homogénea.
- Consideración de la refracción del rayo sísmico en cada contacto litológico

(igneo-mmetamórfico,
sedimentario,
sedimentario)

igneo-
metamórfico-
sedimentario

Se hace notar que en la Tabla 6, el error entre cada una de las columnas 3 y 4, respecto a la columna 2, es mayor para las estaciones que se encuentran más cercanas a TOL.SP.Z.

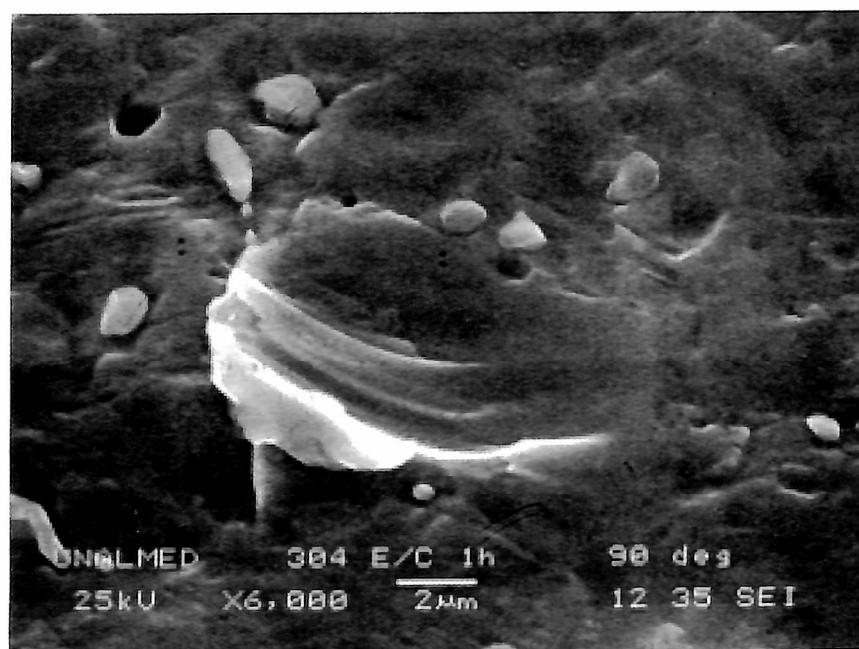
Un análisis detallado de los sismogramas, permite ver que en dirección norte-sur, sismógrafos más alejados pueden reportar diferencias de tiempos similares a las de sismógrafos más cercanos pero ubicados en dirección este-oeste, esto se debe a que las unidades litológicas regionales en Colombia tienen tendencias Norte-sur y por ende las heterogeneidades litológicas se presentan en mayor cantidad en secciones perpendiculares a tales tendencias.

Aunque las tendencias actuales de investigación no consideran rigurosamente las heterogeneidades de la corteza sitio a sitio, en esta línea de investigación se ha decidido hacerlo pues la corteza heterogénea es una condición real de la naturaleza y su implementación nunca

estaría de sobra en los modelos que se desarrollen.

REFERENCIAS

- Butriago, J, et al. *Codificación sismológica de un segmento de la falla Cauca-Almaguer y sus aplicaciones en el Departamento de Antioquia*. Trabajo dirigido de grado. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, 2001
- Centro de procesamiento de información Sismológica -CPIS-. *Primer informe sismo 25 de enero de 1999*. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, 1999
- Chica, A. Codificación Sismológica de planos de falla. Una propuesta Metodológica. *Dyna* 129, 2000
- Chica, A. *Cuadernos de ingeniería geológica # 6: geofísica aplicada -Sísmica y Geoeléctrica*. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, 1998
- INGEOMINAS, *Mapa geológico colombiano ESC. 1: 1'500.000*, 1988



Marca de erosión causadas por partículas de cuarzo chocando sobre una superficie metálica.