

# Simulación de perfiles sísmicos verticales (VSP) a partir de registros de velocidades de ondas P y SV en pozos petroleros

Toni E. Charfan\*  
José P. Franceschini\*\*

*Recibido en junio de 2015; aceptado en abril de 2016*

## Abstract

In this paper approximate travel time it is applied to the P and S seismic waves, simulating the trajectory from the moment it leaves the source until the geophone anchored at different depths of the well, in the case of the P wave calculated delta anisotropy parameters ( $\delta$ ) and epsilon ( $\epsilon$ ), that are useful for calculating NMO velocities, which is the speed considering the anisotropic medium and heterogeneity factor of the medium, while for the S wave anisotropy parameters to estimate are gamma ( $\gamma$ ) and sigma ( $\sigma$ ), likewise necessary to calculate speeds and heterogeneity factor as the equation of time travel it depends on the values above as appropriate. Starting from sonic logs and conducting an analysis of average speeds including an isotropic model is constructed and then obtain a correction function speeds so you can generate Pseudosónico values at several points taking into account the anisotropy of the medium. Once you do that, contour maps are constructed to define stratification, new travel times for comparison with actual and obtain new values of speed to generate new contour maps are calculated.

*Key words: Time travel, delta, epsilon, gamma, sigma.*

## Resumen

En el presente trabajo se aplica una aproximación de tiempo de viaje para las ondas sísmicas **P** y **S**, simulando la trayectoria desde el momento que sale de la fuente hasta llegar al geófono anclado a diferentes profundidades del pozo, para el caso de la onda **P** se calculan los parámetros de anisotropía delta ( $\delta$ ) y épsilon ( $\epsilon$ ), que son útiles para calcular velocidades NMO, que es la velocidad considerando el medio anisotrópico y el factor de heterogeneidad del medio, mientras que para la onda **S** los parámetros de anisotropía a calcular son gamma ( $\gamma$ ) y sigma ( $\sigma$ ), de igual manera necesarios para calcular velocidades y factor de heterogeneidad ya que dicha ecuación de tiempo de viaje depende de los valores antes mencionados según sea el caso. Partiendo de registros sísmicos de pozos y realizando un análisis de velocidades promedios entre ellos se construye un

\*tcharfan@hotmail.com, 0426-5584976

\*\* Centro de modelado científico. La Universidad del Zulia.

modelo isotrópico para luego obtener una función de corrección de velocidades y así poder generar valores Pseudosónico en varios puntos tomando en cuenta la anisotropía del medio. Una vez hecho eso, se construyen mapas de contornos para definir la estratificación, se calculan los nuevos tiempos de viaje para compararlos con los reales y poder obtener nuevos valores de velocidades para generar nuevos mapas de contornos.

*Palabras clave:* Tiempo de viaje, delta, épsilon, gamma, sigma.

## Introducción

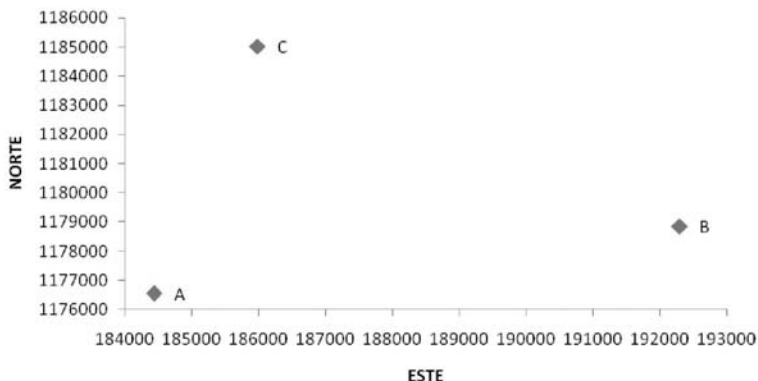
La geofísica estudia la tierra en su estructura y dinámica sobre la base de medidas de carácter físico que normalmente se realizan desde la superficie del planeta. Cuando este estudio tiene que ver con áreas relativamente pequeñas y profundidades que no sobrepasen unos pocos kilómetros, se habla de geofísica aplicada, y el conjunto de métodos para obtener ese fin constituyen la prospección geofísica.

Se pueden inferir información sobre la estructura del subsuelo mediante algún parámetro físico medido en superficie, que puede ser la velocidad de una onda mecánica (método sísmico), la intensidad de una corriente asociada a la facilidad de propagación de las cargas eléctricas (método eléctrico), entre otros. En estos estudios usaremos el modelo sísmico, que establece que una perturbación originada en superficie genera ondas que se propagan en el medio y dependiendo de la estructura del mismo estas ondas se reflejaran o se transmitirán. Estos tiempos de viajes se calcularan variando la distancia horizontal entre la fuente y el receptor (offset) y se expresaran como curvas de tiempo en función de offset.

Este es un método diferente, el cual consiste en la simulación de estos tiempos a partir de registros sísmicos de velocidades de onda P y SV de pozos petroleros, que con el uso de herramientas matemáticas es posible construirlos y que estos exhiban alto nivel de similitud con los reales sin la necesidad de ir al campo y realizar el montaje experimental para obtener las medidas de tiempo – distancias respectivamente.

## Parte experimental

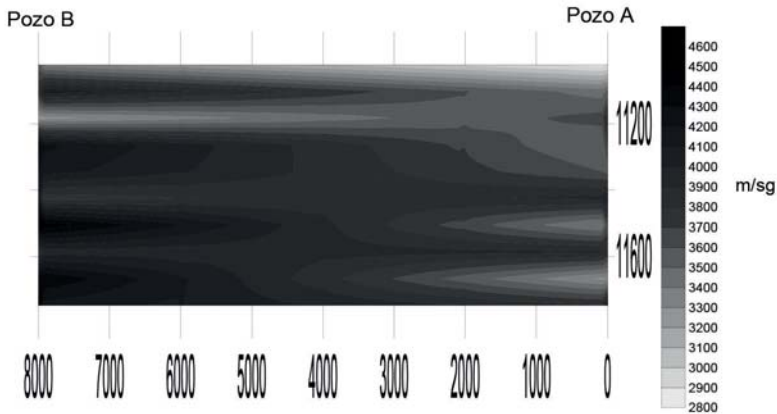
Para el estudio realizado se analizaron varios pozos del área mostrada en la Figura 1 los cuales se identifican como A, B y C con sus respectivos registros sísmicos, adicional nos facilitaron cada 1,000 metros entre ellos (trayectoria A-B, trayectoria B-C y trayectoria C-A) perfiles sísmicos verticales, teniendo en cuenta que todos estos registros tienen datos de velocidades de onda P y S.



**Figura 1.** Ubicación de los pozos en el área de estudio en coordenadas norte - este.

Primero basaremos nuestra explicación en la trayectoria A-B, ya que para las otras dos restantes el procedimiento es el mismo. Se acomodaron los datos sísmicos de los pozos A y B para determinar lecturas de velocidades en profundidad iguales y así calcular un promedio de las velocidades en ellos, este valor promedio de velocidad sísmica se asemeja a los datos de un registro sísmico que existiría en la mitad de la separación de los dos pozos, asumiendo que el medio es homogéneo e isotrópico, la separación entre ellos es de aproximadamente 8,000 metros, por lo tanto, el promedio de las velocidades lo ubicaríamos a los 4,000 metros del pozo A, se aplica el mismo método del promedio pero ahora con las velocidades del pozo A y las del Pseudosónico a los 4,000 metros que se calculó previamente para obtener un nuevo registro ubicado aproximadamente en los 2,000 metros del pozo A. Se repite este mismo paso desde el Pseudosónico a los 4,000 metros del pozo A hasta en pozo B y se obtiene un registro en los 6,000 metros de distancia al pozo A. Teniendo nuestra trayectoria desde A hasta B completa con valores de velocidades sísmicas a profundidades iguales procedemos a realizar nuestro mapa de contorno de velocidades de onda P en cual se muestra en la Figura 2 y así poder definir la estratificación del medio, que permite determinar con precisión las zonas donde existen mayores variaciones de velocidad entre estos dos puntos, la entrada de los datos se hace a través de una hoja de cálculo la cual debe tener 3 columnas para definir distancia horizontal, profundidad y valores de velocidad de onda P. Los mapas están compuestos por una componente vertical definida como la profundidad del pozo en pies a la cual se realizaron los registros sísmicos, esta varía desde 11,000 a 11,800 pies, una componente horizontal la cual representa la ubicación de los registros Pseudosónicos calculados cada 2,000 metros, e inmerso en ese cuadro tenemos el comportamiento de la velocidad

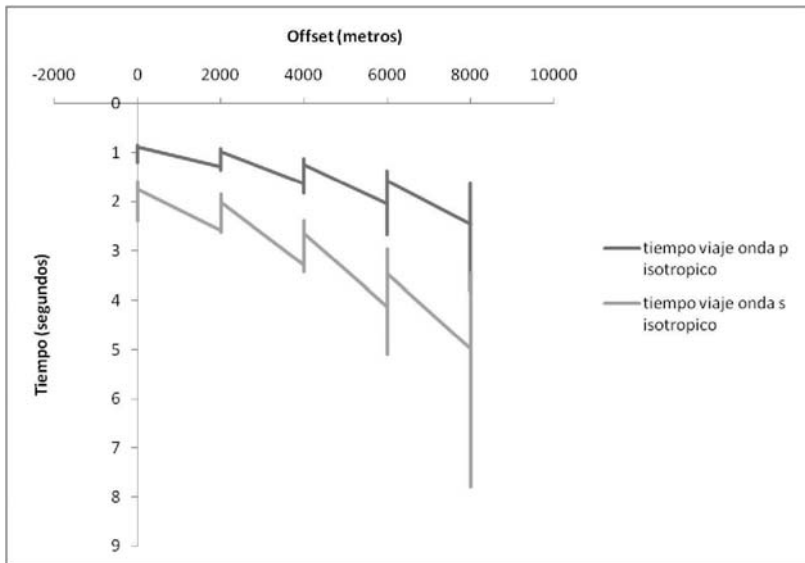
de onda P, la cual esta variando a lo largo de la trayectoria con una escala de grises que representa los valores de velocidad en metros/sg.



**Figura 2.** Mapa de contorno de velocidad isotrópica, trayectoria A-B.

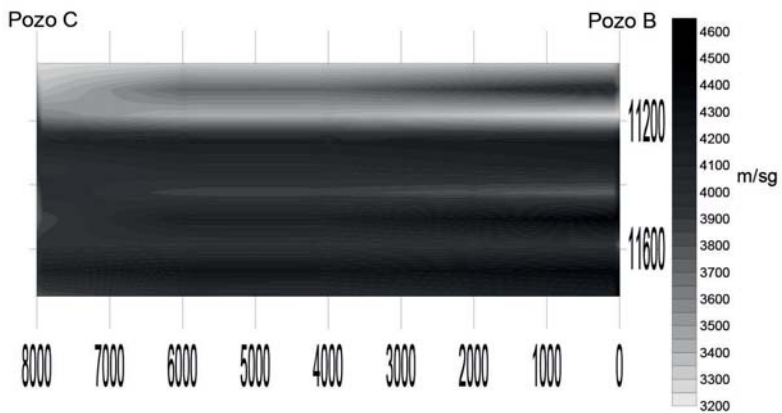
En esta trayectoria se observa un estrato inclinado que parte en B desde los 11,000 pies y llega a A con una profundidad de 11,100 pies aproximadamente, entre los 3,000 y 8,000 metros de distancia horizontal se nota una intrusión de una zona de baja velocidad, esta misma intrusión se repite a los 11,500 y 11,700 pies de profundidad entre el pozo A y los 1,500 metros de distancia horizontal. A continuación se realiza la construcción las curvas de tiempo para saber el comportamiento según el offset (distancia horizontal entre la fuente y el receptor), esto es representado a través de la Figura 3 dando como resultado gráficas que están definidas por un eje horizontal el cual representa el offset expresado en metros y una componente vertical que representa el tiempo de viaje en sg de las ondas P y S. El tiempo de viaje inicial de la onda p en  $x=0$  representa el tiempo de viaje perpendicular de la onda ida y vuelta hacia el reflector (tiempo doble de viaje).

De la misma manera se trabaja para las trayectorias B-C y C-A, obteniéndose como resultado la Figura 4, donde se observa claramente 3 reflectores, a los 11,200, 11,500 y 11,700 pies de profundidad, nuevamente se observa el inicio de la zona buzada en el pozo B a 11,000 pies la cual se extiende hasta C bordeando un área de velocidad promedio y su respectivas CURVAS DE TIEMPO DE VIAJE mostrado en la Figura 5. De manera similar en el tramo C-A de la Figura 6 a los



**Figura 3.** Curva de tiempo en la trayectoria A-B.

11, 000 pies esta una zona de baja velocidad que está presente en las otras dos trayectorias, se pueden definir 2 reflectores presentes a los 11, 400 y 11, 600 pies aproximadamente, permitiendo una mayor velocidad de la onda P y su curva de tiempo de viaje es mostrado en la Figura 7.



**Figura 4.** Mapa de contorno de velocidad isotrópica, trayectoria B-C.

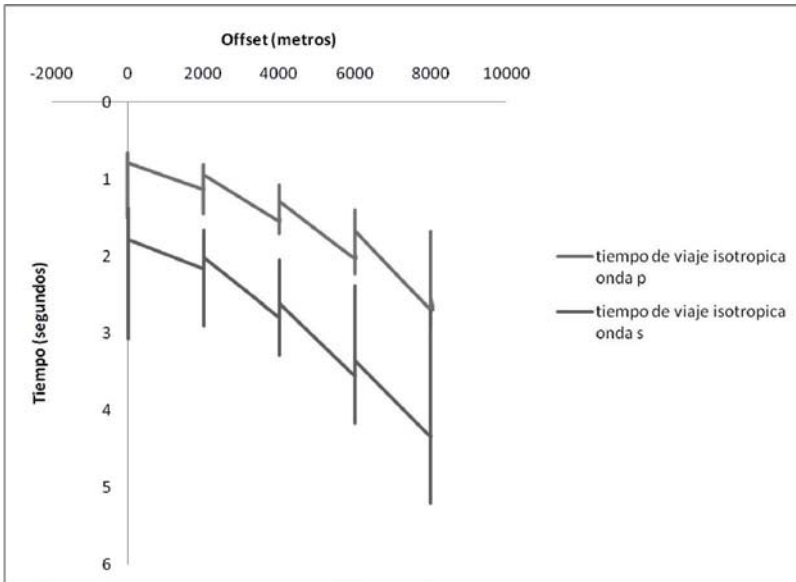


Figura 5. Curva de tiempo de viaje en la trayectoria B-C.

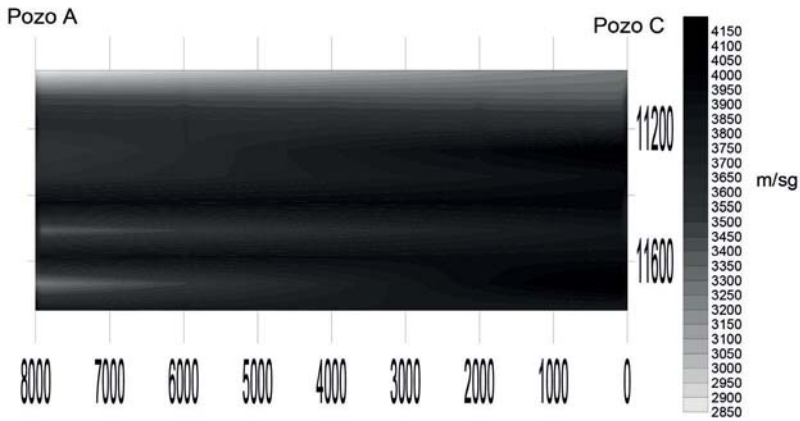


Figura 6. Mapa de contorno de velocidad, trayectoria C-A.

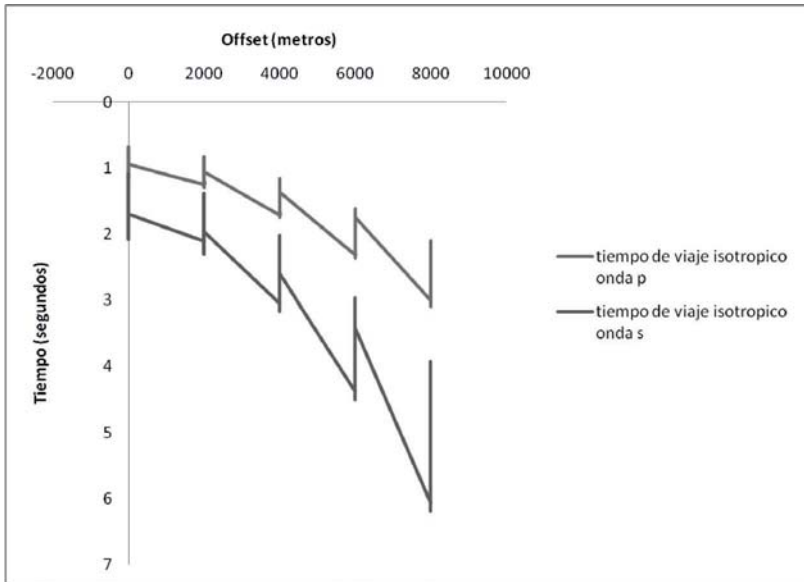


Figura 7. Curva de tiempo de viaje en la trayectoria C-A.

Construidos y analizados nuestros mapas de contornos procedemos a calcular en los pozos y en cada uno de los Pseudosónicos, parámetros de Lamé ( $\mu, \lambda$ ) con las ecuaciones

$$\beta_0 = \sqrt{\frac{C_{44}}{\rho}} = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \tag{1}$$

$$\gamma_0 = \frac{\alpha_0}{\beta_0} = \sqrt{\frac{C_{33}}{C_{44}}} = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\mu}} \tag{2}$$

donde se define como la velocidad de onda P,  $\gamma_0$  es la velocidad de la onda S y  $\rho$  es la densidad del medio, estos tres factores son conocidos por nosotros, se calcula la fracción del material ( $\Phi$ ) a través de la ecuación (3), los parámetros de anisotropía  $\delta$  según ecuación (4) y  $\varepsilon$  con la ecuación (5), el parámetro moveout de la onda s  $\sigma$  con la ecuación (6), factor de heterogeneidad  $G$  con ecuaciones (7) y (8) para onda P y S respectivamente y velocidades considerando la anisotropía la cual llamaremos  $V_{nmo}^2$ , ecuaciones (9) y (8) para los dos tipos de ondas, de manera de obtener todas las variables necesarias

$$\Phi = \frac{\left(\frac{1}{V_{S_2}}\right) \bar{V}_{S_2}^2 - \left(\frac{1}{V_{P_2}}\right) \bar{V}_{P_2}^2}{\rho_2 \bar{V}_{P_2}^2 - \rho_1 \bar{V}_{P_1}^2} \left[ \frac{\left(\frac{1}{V_{P_1}}\right) \bar{V}_{P_1}^2 - \left(\frac{1}{V_{P_2}}\right) \bar{V}_{P_2}^2}{\rho_2} - \frac{\bar{V}_{S_2}^2}{\bar{V}_{P_2}^2} \left( \frac{1}{\rho_1} + \frac{1}{\rho_2} \right) \right] \quad (3)$$

$$\delta = \frac{(C_{13} + C_{44})^2 - (C_{33} - C_{44})^2}{2C_{33}(C_{33} - C_{44})} = \frac{2\Phi(1 - \Phi)}{(\lambda_1 + 2\mu_1)(\lambda_2 + 2\mu_2)} \left[ \frac{(\mu_2 - \mu_1)(\lambda_1\mu_2 - \lambda_2\mu_1)}{\mu_2\Phi + \mu_1(1 - \Phi)} \right] \quad (4)$$

$$\varepsilon = \frac{2\Phi(1 - \Phi)}{(\lambda_1 + 2\mu_1)(\lambda_2 + 2\mu_2)} [(\lambda_1 + \mu_1) - (\lambda_2 + \mu_2)] \quad (5)$$

$$\sigma = \gamma^2(\varepsilon - \delta) = \frac{(C_{11} - C_{44})(C_{33} - C_{44}) - (C_{13} + C_{44})^2}{2C_{44}(C_{33} - C_{44})} \quad (6)$$

$$G_p = \frac{a_1}{(1 + a_0)^2} = \frac{2(\varepsilon - \delta)}{(1 + 2\delta)^2} \left[ 1 + \frac{2\gamma_0^2\delta}{\gamma_0^2 - 1} \right] \quad (7)$$

$$G_s = \frac{b_1}{(1 + b_0)^2} = -\frac{2\sigma}{(1 + 2\sigma)^2} \left[ 1 + \frac{2\delta\gamma_0^2}{\gamma_0^2 - 1} \right] \quad V_s^2 = \beta_0^2(1 + 2\sigma) \quad (8)$$

$$V_p^2 = \alpha_0^2(1 + 2\varepsilon) \quad (9)$$

para determinar los tiempos de viaje usamos la ecuación (10) según sea el caso [6].

$$T(x)^2 = T_0^2 + \frac{X^2}{V_{ano}^2} - \frac{GX^4}{V_{ano}^4 \left[ T_0^2 + \frac{X^2}{V_{ano}^2} (1 + 4G) \right]} \quad (10)$$

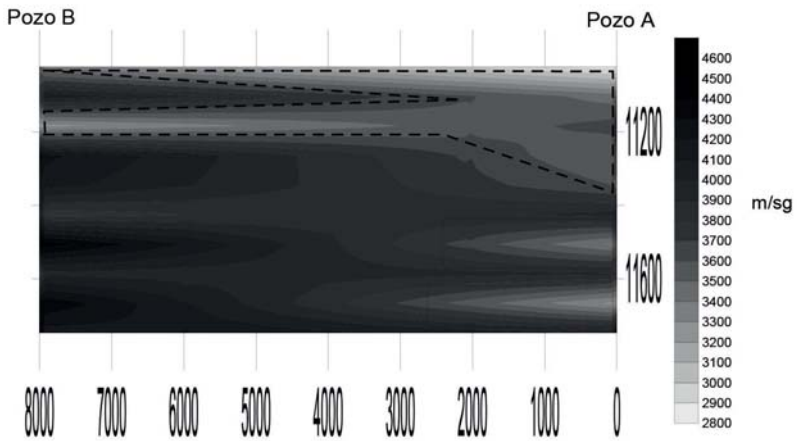
Todos estos cálculos se realizaron a través de macros de Visual Basic en hojas de cálculo de Excel.

Se calcularon los tiempos de viaje de las ondas variando el offset en los mismos puntos donde se realizaron los Pseudosónicos y los perfiles sísmicos verticales originales para poder compararlos. Adicional a los tiempos de viaje de las ondas se realizaron nuevos mapas de contornos de velocidades con los valores de  $\alpha$  y así comparar nuestro modelo simulado con el real para ver la similitud o diferencia.



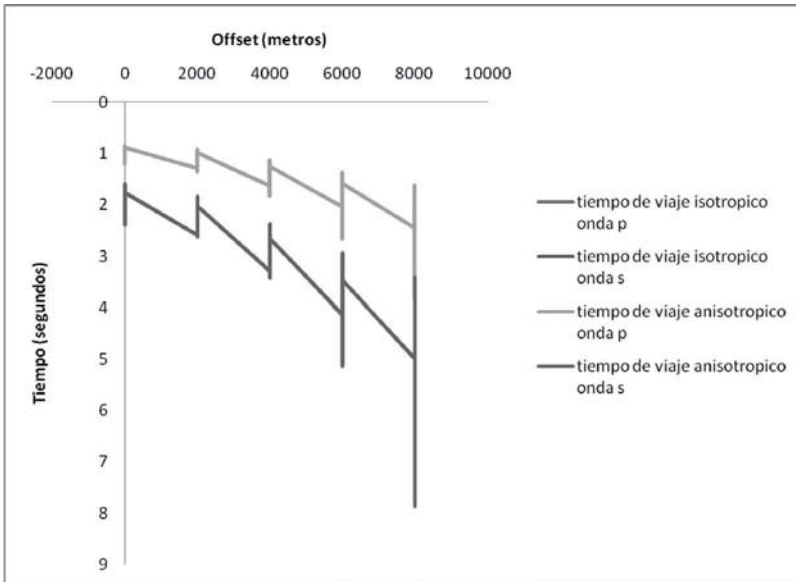
**Análisis de los resultados**

Para el cálculo de tiempo de viaje es necesario el cálculo de las velocidades considerando la anisotropía, es por ello que se realizaron nuevos mapas de contornos con estas velocidades para compararlos con los anteriores y ver las similitudes o diferencias que puedan tener. Para el caso de la trayectoria A-B tenemos la Figura 8, este mapa tiene mucho en común con el de la Figura 2 , la zona buzando está presente de igual manera pero con una intrusión mayor de una zona de velocidad media identificada por la línea punteada, las zonas de baja velocidad señaladas por líneas continuas en los 11, 500 y 11, 700 pies de profundidad se encuentran mayormente resaltadas que el caso isotrópico, en líneas generales el modelo de la formación se mantiene en ambos casos. Al ver que el modelo anisotrópico presenta muy buena exactitud con el real, la curva de tiempo es de esperarse, que de la misma manera representa en una gran precisión el original.



**Figura 8.** Mapa de contorno de velocidad en la trayectoria A-B.

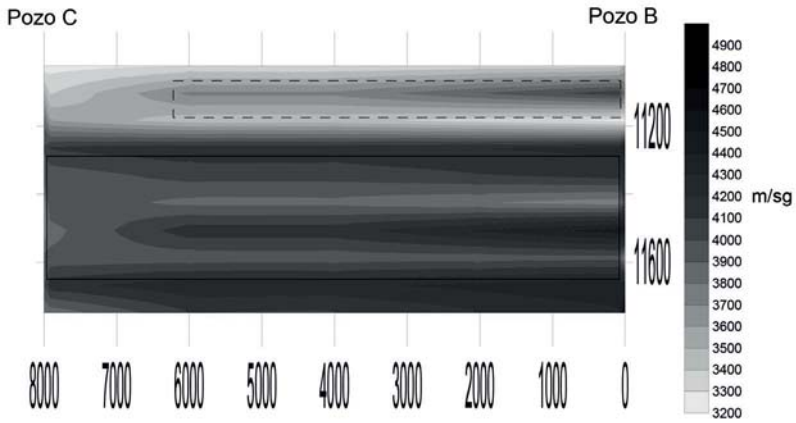
Como se nota, la curva de tiempo simulada de la Figura 9 esta superponiendo por completo al real. Aunque en esta gráfica no se nota, se calculó un error entre los valores de tiempo de viaje isotrópico y anisotrópico y se encontró que existe una variación de los valores entre el 1% y 3%, entre estos valores, estos valores están dentro del rango de lo aceptable dando curvas de tiempos con muy buena precisión.



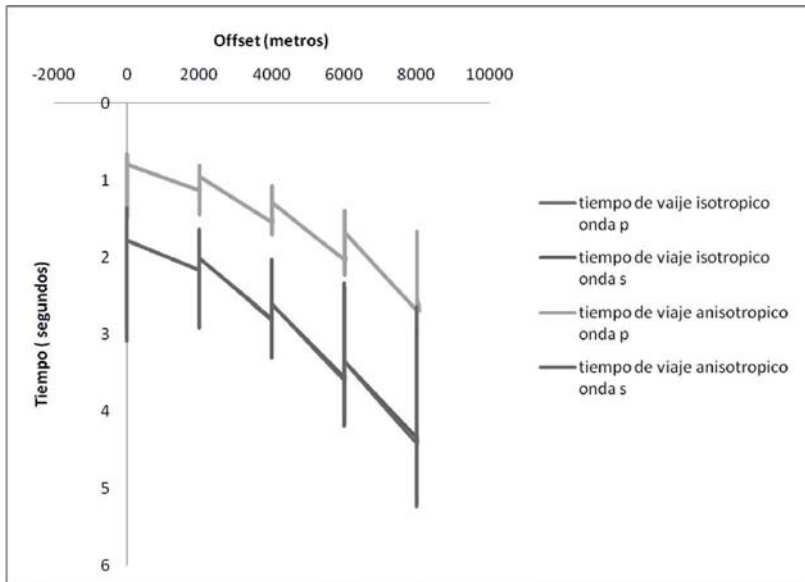
**Figura 9.** Curva de tiempo real y simulado en la trayectoria A-B.

En la trayectoria B-C, mostrado en la Figura 10 tenemos el mismo modelo de zonas descrito en el caso isotrópico, resaltando las áreas de baja velocidad que definen la estratificación del medio, sin embargo se observa una disminución de la velocidad en aproximadamente 11, 400 y 11, 600 pies de profundidad, la cual se extiende a lo largo de toda la trayectoria, la zona en los 11, 000 y 11, 200 pies esta expandida sobre todo el recorrido disminuyendo la franja de velocidad media que se encuentra inmersa en ella, definida por la línea punteada. La curva de tiempo de este tramo mostrado en la Figura 11, presenta una sobre posición de los tiempos de viaje de onda P a lo largo de la trayectoria manteniendo un error que varía entre el 1% y el 3%.

Cosa que no se repite en los tiempos de viaje de la onda S, que mantiene valores de tiempo en los primeros 2, 000 metros de distancia horizontal, luego de esa distancia se empieza a mostrar un error de aproximadamente 5% y 6% que se observa con facilidad ambas líneas en las gráficas. Este aumento del tiempo de viaje anisotrópico se puede referir al aumento de espesor de la zona de baja velocidad presente entre los 11, 000 y 11, 200 pies, además de la intrusión presente en la trayectoria completa B-C entre los 11, 400 y 11, 600 pies de profundidad.



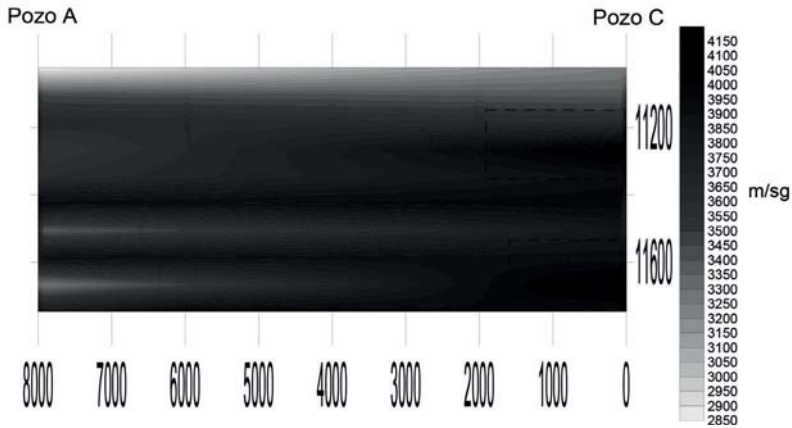
**Figura 10.** Mapa de contorno de velocidad en la trayectoria B-C.



**Figura 11.** Mapa de contorno de velocidad en la trayectoria B-C.

En la trayectoria C-A de la Figura 12 se mantiene el mismo modelo, aumenta el espesor de la zona de baja velocidad y aumentando las zonas cercanas al pozo A denotadas por las líneas corridas, mientras que disminuye el espesor de áreas

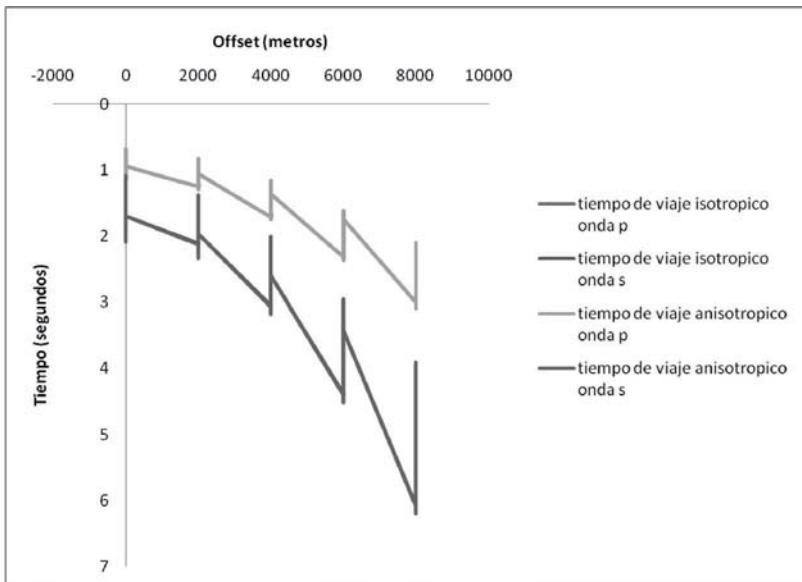
cercanas al pozo C definidas por líneas segmentadas, estos cambios pueden alterar la curva de tiempo de viaje que se construya a lo largo de la trayectoria.



**Figura 12.** Mapa de contorno de velocidad en la trayectoria C-A.

Como era de esperarse, el resultado de la curva de tiempo de viaje en la Figura 13, a lo largo de la trayectoria se mantiene casi igual isotrópico y anisotrópico. En el caso de la onda P el error es mínimo, entre el 1% y 3% de diferencia, para los tiempos de viaje de la onda S, los valores de tiempo aumenta un poco más que el anterior llegando casi al 5% a partir de los 1800 metros de distancia horizontal, a medida que se aumente el "offset" el error también aumenta, es por eso que se debe tener cuidado con la creación de la curva de tiempo de viaje de onda S para "largos offset".

En líneas generales el modelo propuesto representa con muy buena exactitud el real y permite simular los tiempos de viaje de ambas ondas, aunque se debe tener cuidado con el caso de onda s y largos offset.



**Figura 13.** Curva de tiempo de viaje real y simulado en la trayectoria C-A.

### Conclusiones

Los valores de anisotropía obtenidos son considerados como débiles. Mediante la técnica propuesta es posible ubicar con precisión las zonas donde sea necesaria la adquisición de nuevos registros sísmicos.

El empleo de una función de tiempo la cual incluye los parámetros de anisotropía del medio refleja con buena exactitud el modelo geológico real al cual se aplica.

Al trabajar con tiempos de viaje de onda s y grandes "offset" se debe tener cuidado ya que este tiempo va aumentando su error al aumentar la distancia horizontal lo cual puede ser perjudicial al momento de construir nuestro modelo geológico arrojando valores erróneos.

La inclusión del parámetro de anisotropía en la función de corrección de velocidades permite obtener estratos más definidos lo cual es muy bueno a la hora de calcular los tiempos de viaje de las ondas en el medio al cual se apliquen.

Al arrojar buenos valores, este perfil sísmico vertical se convierte en una herramienta para la industria petrolera ya que permite simular con buenas aproximaciones y abaratar costos en la prospección de hidrocarburos.

**Bibliografía**

- Bolívar, Manuel, 2204. Efectos del gas en la imagen sísmica y posible chimenea de gas, Carito, Venezuela, Subsurface Consultants.
- Brittan, J., Warner, M. and Pratt G., 1925. Anisotropic parameters of layered media in terms of composite elastic properties. *Geophysics*, Vol. 60, pp. 1243-1248.
- Franceschini, J. P., 2004. Propiedades elásticas de los sólidos. Guía de estudio.
- Hardege, Bob A., 1985. The use and abuses of VSP. Chief Geophysicist, Phillips Petroleum.
- Landau, L.D. and Lifshitz, E.M. 1969. Teoría de la elasticidad. Editorial Reverte S.A., Vol. 7, pp. 1-50.
- Meiners, Carlos F., 1986. "El VSP: Guía del Teprano". *Actualidad Energética*, Vol. 5, pp. 450-472.
- Telford, W.M., Geldart, L. P.; Sheriff, R.E. and Keys, D.A., 1976. *Applied Geophysics*. Syndics of the Cambridge University Press.
- Thomsen, L., 1954-1966, 1986. Weak elastic Anisotropy. *Geophysics*, Vol.51.