

## **Tomografía sísmica a partir de registros de SPT**

**Jorge Alberto Rodriguez, PhD**

**Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá**

[rodriguezja@javeriana.edu.co](mailto:rodriguezja@javeriana.edu.co)

### **RESUMEN**

El presente artículo explora la posibilidad de determinar perfiles de suelos utilizando tomografía sísmica mediante la medición de tiempos de arribo en superficie de ondas producidas en profundidad en el terreno en la medida que se hace el ensayo de penetración estándar. El ensayo realizado consistió en el registro de los golpes generados por el SPT mediante 12 geófonos colocados en superficie a una separación de 4m entre ellos a lado y lado del sitio de la perforación y medidos mediante un sismógrafo de refracción.

La señal de la onda generada por el SPT es muy clara en todos los geófonos hasta 50 m del sitio de la perforación, aun cuando en general hay vibraciones ambientales significativas. Estos registros tienen en general mucha mejor relación señal a ruido que los del ensayo de down hole, y tienen la ventaja de que corresponden al mismo evento para todo el rango de profundidades y se tiene varios registros correspondientes a cada uno de los golpes del ensayo de SPT a cada profundidad.

Con base en los datos obtenidos comparados con otras mediciones realizadas en el sitio se concluye que el método de interpretación analizado permite obtener resultados al menos tan confiables y consistentes como los de otros métodos geofísicos aplicables en la actualidad. Este método se puede utilizar de manera efectiva para obtener perfiles de Vs como alternativa de ensayos tales como el de Down Hole.

### **ABSTRACT**

This article explores the possibility of identifying soil profiles using seismic tomography from arrival times measured on the surface of waves produced in depth by the standard penetration test. The test performed consisted of registration of shocks generated by the SPT through 12 geophones placed on surface at 4 m spacing from each side of the drilling site and measured by a 24 channel refraction seismograph.

The signal generated by the SPT is very clear in all the geophones, although in general there was significant environmental noise. These records have in general much better signal to noise ratio than the down hole test, and have the advantage that correspond to the same event for the entire range of depths and it has several records corresponding to each of the blows of the SPT test at each depth.

Based on the data obtained it can be concluded that the method of interpretation of seismic tomography of the vibrations generated by the SPT and measured on surface allows to obtain results at least as reliable and consistent as of other currently applicable geophysical methods. This method can be used effectively to obtain profiles of Vs as an alternative of tests such as Down Hole. The new method does not need to install pipes and avoids many of the limitations and coupling problems of Down Hole testing.

## INTRODUCCIÓN

En diciembre de 1974 Yutaka Ohta y Noritoshi Goto realizaron un experimento en Sapporo (Japón) con el objeto de desarrollar una técnica para medir la velocidad de onda de corte simultáneamente con el ensayo de penetración estándar, aprovechando que este es el método más común de exploración geotécnica. De acuerdo con el artículo publicado por Ohta et al en 1978 durante las pruebas de penetración estándar se generan ondas elásticas en el fondo de la perforación por el impacto del muestreador. Si los arribos de dichas ondas se registran en superficie, las velocidades de onda de corte  $V_s$  pueden ser obtenidas mediante un análisis del tiempo de viaje y el recorrido de la señal entre la profundidad del impacto y la superficie.

Según Ohta et al, durante el desarrollo de un ensayo de penetración estándar tradicional el impacto en el fondo de la perforación genera varios tipos de ondas, cuya identificación no resulta evidente, ya que el mecanismo de la penetración parece muy complicado. Sin embargo una interpretación simplificada del evento como una fuerza vertical aplicada en profundidad en un medio elástico puede ser un modelo bastante bueno para representar la generación de ondas por el efecto de la penetración del muestreador.

En coordenadas esféricas  $(r, \theta, \Phi)$ , si una fuerza de magnitud  $G$  dependiente del tiempo actúa en el origen de la dirección vertical ( $\Phi = 0$ ), los tres componentes del desplazamiento ( $u_r, u_\theta, u_\phi$ ) en profundidad estarían descritos como:

$$\begin{aligned}u_r &= \frac{G \cos\varphi}{4\pi\rho\alpha^2 r} g\left(t - \frac{r}{\alpha}\right) \\u_\theta &= 0 \\u_\phi &= \frac{G \operatorname{sen}\varphi}{4\pi\rho V_s^2 r} g\left(t - \frac{r}{V_s}\right)\end{aligned}$$

Donde  $\alpha$  es la velocidad de onda de compresión ( $p$ ),  $V_s$  de la velocidad la onda corte ( $s$ ) y  $\rho$  la densidad del material.

De acuerdo con lo anterior es claro que el desplazamiento radial  $u_r$ , se debe sólo a las ondas  $p$ , mientras la componente tangencial  $u_\phi$  es atribuible solamente a la acción de las ondas  $s$ .

La relación de amplitud entre las ondas  $p$  y las ondas  $s$  está dada por  $\alpha^2/V_s^2$ , por lo que se espera, en general, que las ondas  $s$  resulten de mayor amplitud que las ondas  $p$ .

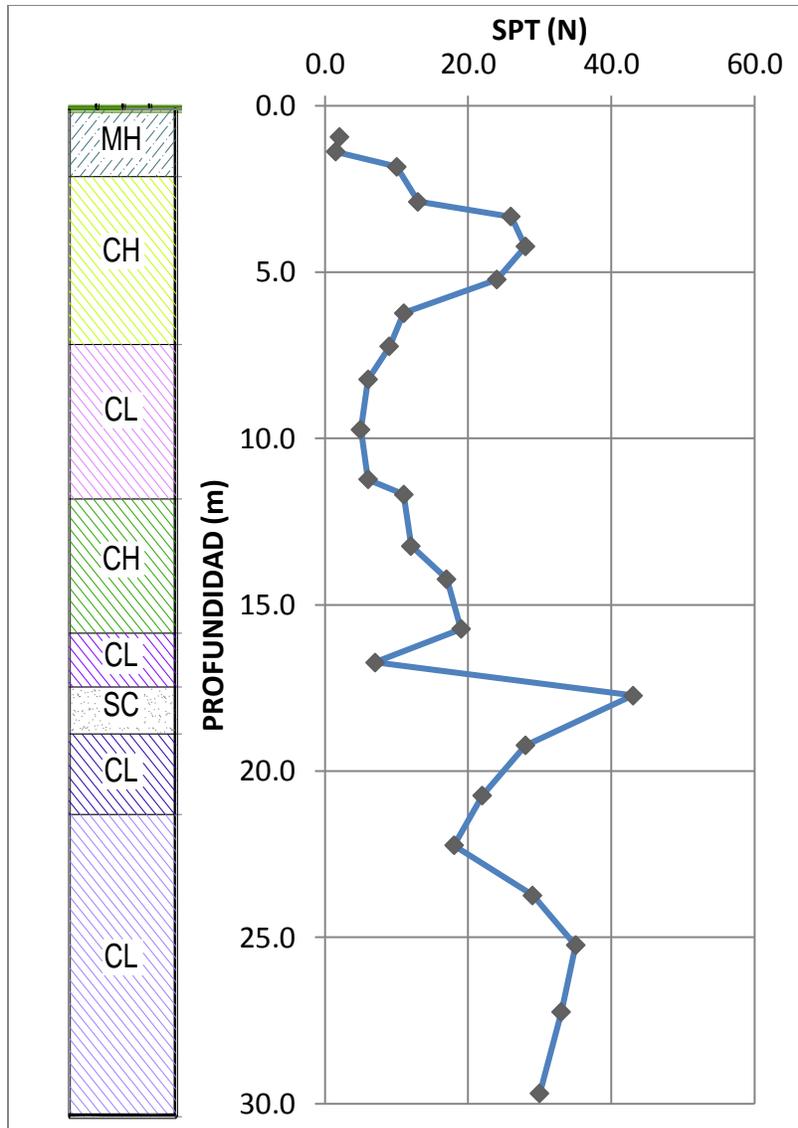
Lo expuesto anteriormente resulta beneficioso para las mediciones de ondas  $s$  originadas por el impacto del muestreador durante ensayos de penetración estándar, dado el predominio en el registro de las ondas de corte generadas en la prueba.

El presente artículo muestra los resultados de mediciones de vibraciones producidas mediante la realización del ensayo en una perforación y registradas en superficie mediante un sismógrafo de 24 canales. El sitio de exploración se localizó en la finca “La Pelusa” ubicada en el kilómetro 3 en la vía que comunica los municipios de El Rosal y Facatativá en el Departamento de Cundinamarca – Colombia. Este es un sitio de experimentación geotécnica que ha servido para realizar diferentes mediciones con el fin de evaluar y calibrar diferentes métodos de exploración geotécnica (Aponte, 2011, Diaz, 2011, Restrepo, 2010).

## INFORACION DE REFERENCIA PARA VALIDACION

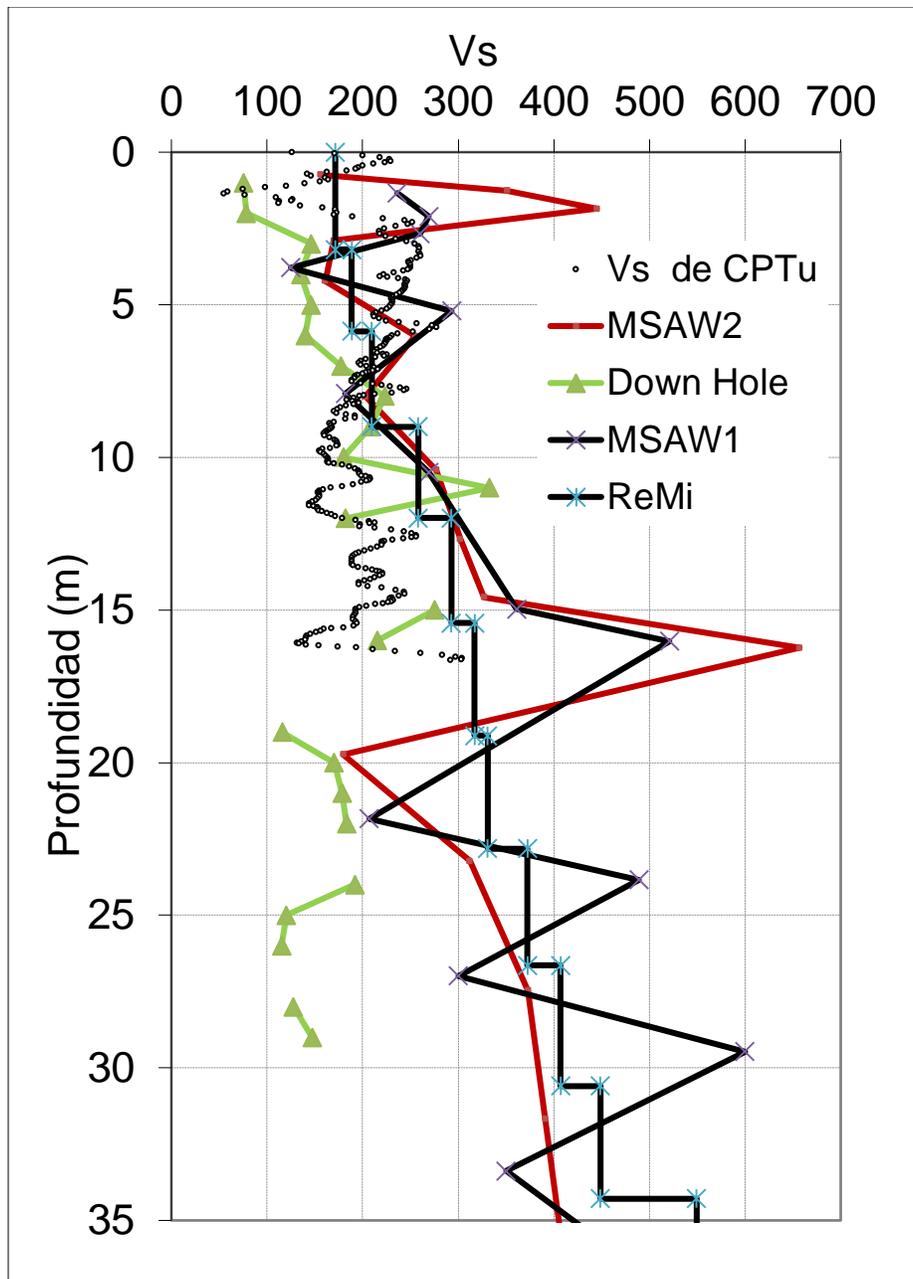
Para el desarrollo de la prueba se registraron algunos de los ensayos de penetración estándar realizados en una perforación realizada para otro proyecto en el sitio (Restrepo, 2010). De acuerdo con Restrepo op. Cit, el sector donde se llevó a cabo la prueba está localizado regionalmente sobre conos y lóbulos coluviales de formas convexas e inclinaciones suaves generados por depósitos recientes con granulometría fina en donde la composición predominante es areno-arcillosa de la formación Subachoque. Dichos depósitos se encuentran subyacidos por arcillolitas grises oscuro y claro intercaladas con paquetes de areniscas cuarzosas de grano fino a grueso pertenecientes a la Formación Guaduas.

Localmente el sector de prueba ocupa áreas de relieve plano a levemente inclinado con dirección predominante al sureste, el cual de acuerdo con la exploración realizada, presenta una estratigrafía aproximadamente horizontal integrada en los primeros 2m por limos orgánicos de alta plasticidad y baja resistencia, subyacidos hasta los 17m de profundidad por intercalaciones de arcillas arenosas de alta y baja plasticidad en espesores que varían entre 1,5m y 5.0m. A partir de 17m y hasta 18.5m se encuentran arenas arcillosas de compacidad densa. Finalmente entre 18.5m y 30m se observan arcillas arenosas de baja plasticidad y consistencia firme a dura. Es importante destacar la componente arenosa establecida para el perfil de suelo la cual varía entre 15% y 60%. En la Figura 1 se muestra la estratigrafía establecida por Restrepo Op cit para el sitio de prueba junto con el perfil de valores de SPT. La estratigrafía se consideró horizontal para efectos de la investigación, aunque la evidencia de líneas de geofísica indica que hay algunas variaciones longitudinales de los estratos en el área. Estas variaciones no son muy grandes y no se contó con suficiente información para tratar de identificarla a partir de las mediciones realizadas a partir del SPT.



**Figura 1 - Perfil estratigráfico establecido por Restrepo (2010).**

Como parte de las actividades para caracterización del sitio de experimentación se han realizado ensayos de SPT, piezocono (CPTU), Down Hole, y mediciones geofísicas de superficie mediante análisis de refracción, dispersión de ondas superficiales con fuentes activas (MSAW) Geogiga, (2011). y con fuentes pasivas (ReMi), Louie, J. N. (2001).. Además se han hecho ensayos de laboratorio sobre muestras obtenidas en las perforaciones. Los resultados de las mediciones geofísicas se presentan en la Figura 2 junto con La velocidad de onda de corte se calculada a partir del registro de un ensayo de CPTU (Diaz , 2011)



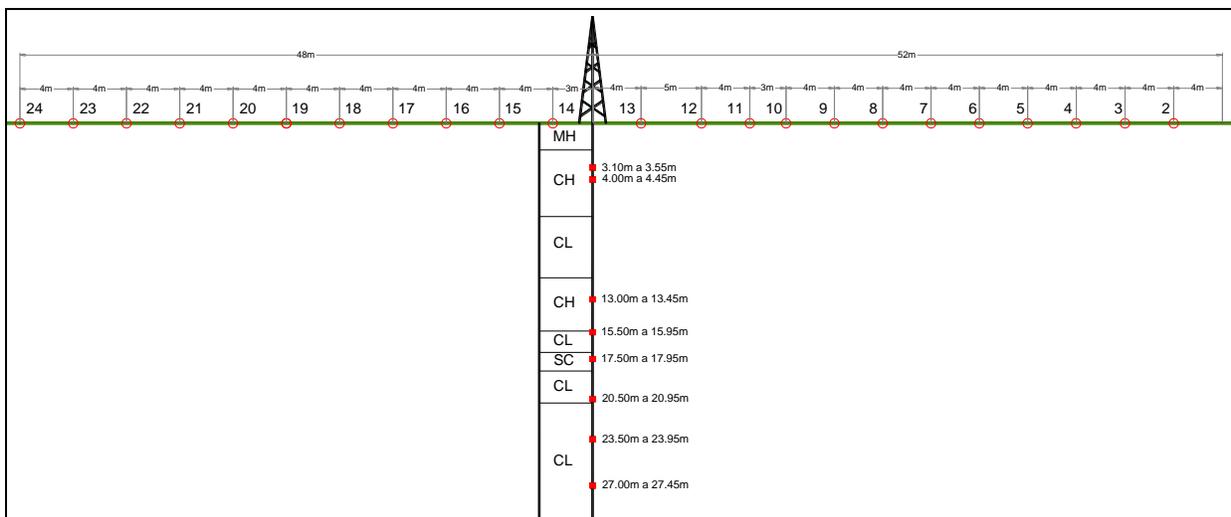
**Figura 2- Perfil de Vs establecido para el sitio de pruebas mediante ensayos Down Hole, CPTU, y geofísica superficial (MSAW y ReMi).**

Durante la instalación de la tubería para la realización del ensayo de down hole no fue posible inyectar adecuadamente lechada alrededor del tubo entre éste y la pared de la perforación, por lo que la calidad de la información de este ensayo tiene incertidumbres.

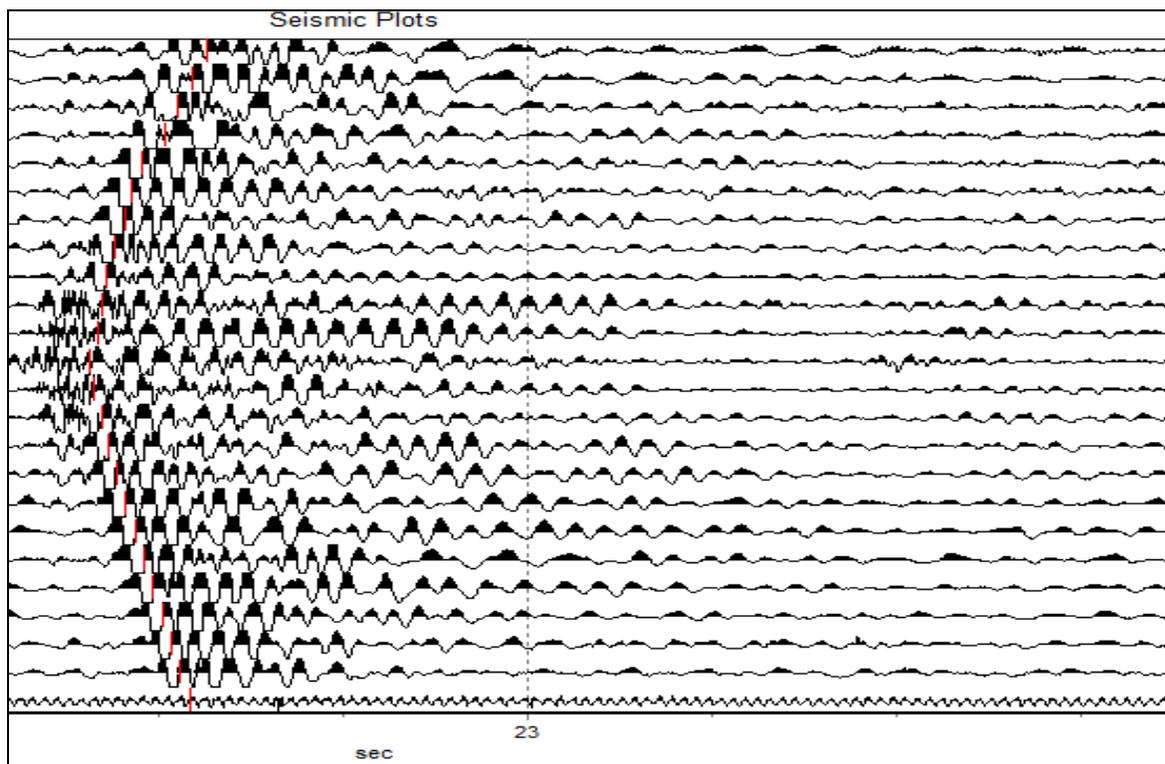
### **ENSAYO REALIZADO**

El ensayo e interpretación realizado para el proyecto de grado de maestría por el Ing. Javier Aponte (Aponte, 2011) bajo dirección del Autor, y consistió en el registro de los golpes

generados por el SPT mediante geófonos colocados en superficie a una separación de 4m entre ellos a lado y lado del sitio de la perforación como se indica en la Figura 3. En esta figura se muestran también las profundidades de los ensayos de SPT registrados y analizados para el presente estudio. Los registros se hicieron con geófonos de 4.5 Hz de frecuencia fundamental y un sismógrafo de 24 canales de 24 bits de resolución, con muestreo a una tasa de 2 ms. En la figura 4 se ilustra uno de los registros, Nótese que la señal de la onda generada por el SPT es muy clara en todos los geófonos hasta 50 m del sitio de la perforación, aun cuando en general hay vibraciones ambientales significativas. Estos registros tienen en general mucha mejor relación señal a ruido que los del ensayo de down hole, y tienen la ventaja de que corresponden al mismo evento para todo el rango de profundidades y se tienen varios registros correspondientes a cada uno de los golpes del ensayo de SPT a cada profundidad. Esto indica que la señal generada por la prueba del SPT se puede utilizar con mucho beneficio para obtener perfiles de Vs como se discute a continuación.



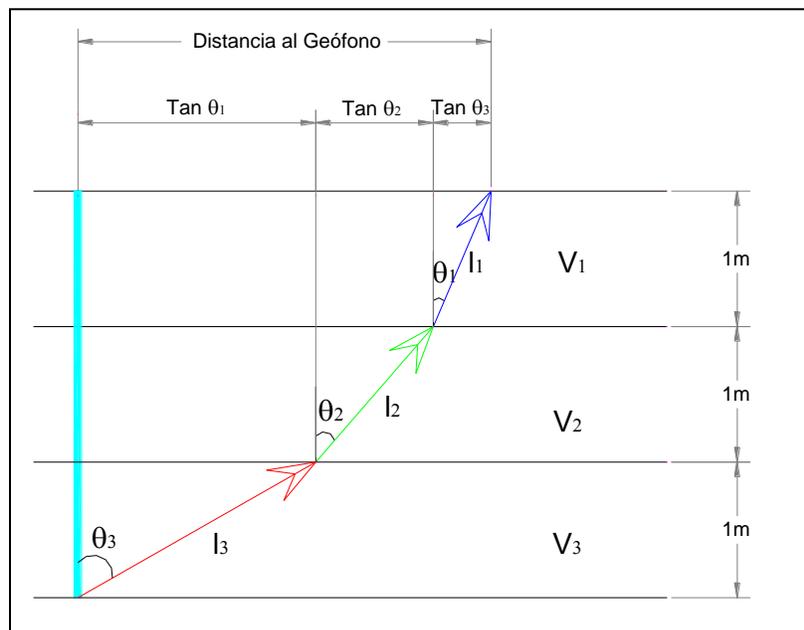
**Figura 3 – Localización de geófonos en superficie y profundidad a las que se hizo el ensayo de SPT registrado para los análisis.**



**Figura 4 - Registros de tiempos de arribo del impacto del SPT realizado a 21m. Las marcas rojas indican el registro del arribo de ondas S utilizado en cada geófono.**

### INTERPRETACION DEL ENSAYO

Para el análisis de los datos con el fin de verificar si es posible el cálculo de velocidades de onda de corte con base en los registros obtenidos, se planteó discretizar el perfil en espesores de 1m y emplear un sistema de ecuaciones que buscan, con base en la ley de Snell, calcular para cada metro de espesor las velocidades y trayectorias de propagación de la perturbación generada por el SPT en profundidad, teniendo como restricción el tiempo de arribo medido y la distancia a la perforación del geófono analizado. La **Figura 5** muestra esquemáticamente el modelo de análisis empelado para cada uno de los 8 ensayos SPT registrados, y para cada uno de los 24 geófonos que incluye cada medición. Se debe notar que no se debe hacer una interpretación con base en trayectorias lineales desde la profundidad de origen de la onda hasta la superficie ya que la trayectoria de las ondas no es lineal sino sólo en cada capa de velocidad constante, y cambia de dirección por difracción en las interfaces entre capas de diferente velocidad.



**Figura 5 - Esquema del modelo de propagación basado en la ley de Snell**

Para el modelo mostrado en la Figura 5, se tiene la distancia recorrida por la señal calculada para cada metro de profundidad como:

$$l_n = \frac{1}{\cos \theta_n}$$

Por lo que en consecuencia tendríamos el tiempo para el mismo caso calculado como:

$$t_n = \frac{1}{\cos \theta_n} \frac{1}{v_n}$$

Por lo que el tiempo de arribo registrado por cada geófono para su caso particular de distancia a la perforación y profundidad del ensayo SPT sería:

$$\sum t_n = \textit{Tiempo de arribo}$$

De acuerdo con la ley de Snell la relación entre las velocidades y los ángulos de incidencia y refracción está dada por:

$$\frac{v_1}{\sin \theta_1} = \frac{v_2}{\sin \theta_2} = \frac{v_3}{\sin \theta_3} = \dots$$

El valor de la relación  $v_n/\sin\theta_n$  debe ser igual para cada estrato de 1m de espesor analizado.

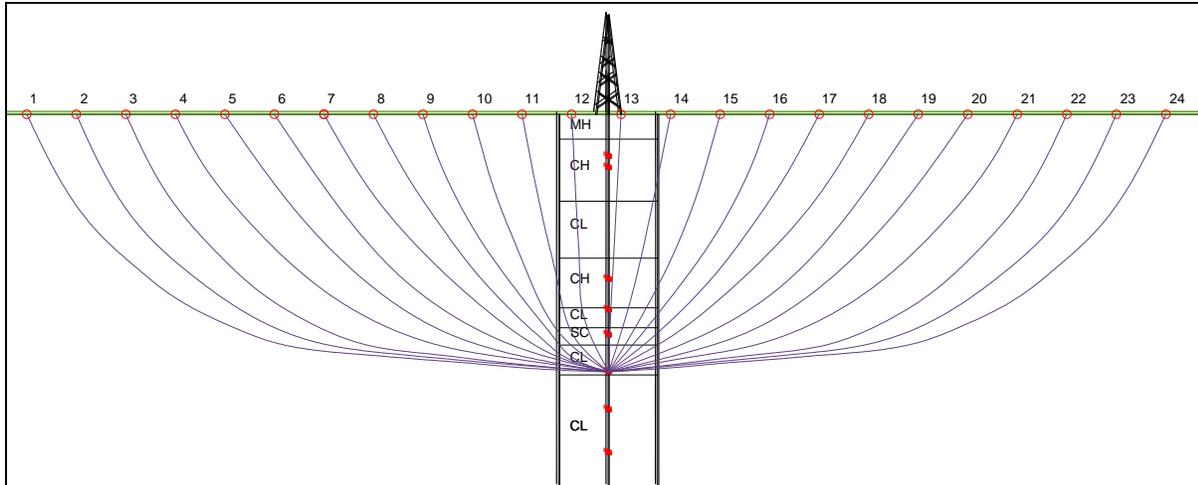
Teniendo para cada estrato de 1m de espesor analizado la  $\tan\theta_n$  como la proyección horizontal de la trayectoria recorrida por la señal, la distancia horizontal al geófono puede ser calculada como:

$$\sum \tan \theta_n = \textit{Distancia al Geófono}$$

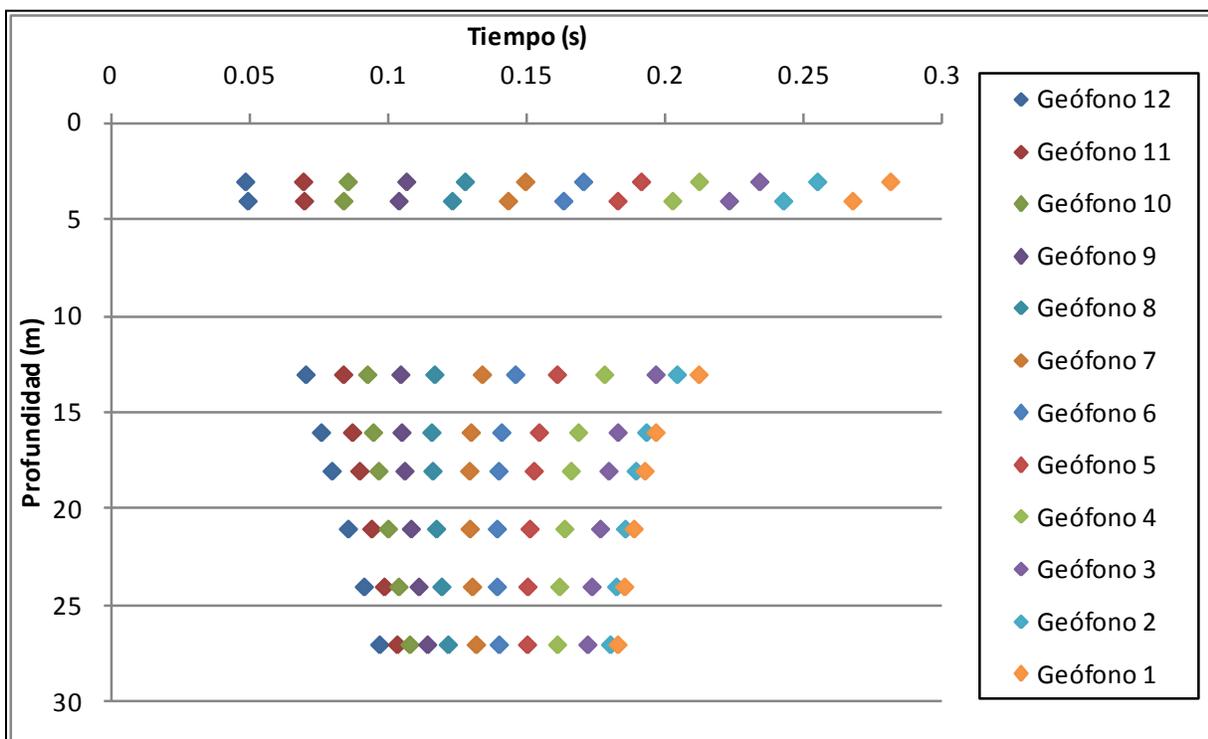
Es importante destacar la redundancia en el cálculo de las velocidades para cada metro de suelo y para cada geófono localizado a lo largo de la línea instrumentada, lo que permite asignar un alto nivel de confianza en los resultados obtenidos mediante esta metodología, más aún cuando para nuestro caso particular y con base en los otros resultados de la caracterización del sitio, el perfil de suelo muestra incremento de la rigidez con la profundidad, lo que permite asignar como restricción adicional a nuestro modelo que tanto las velocidades como los ángulos de incidencia y refracción deberán aumentar con la profundidad.

Una vez establecido y parametrizado el modelo de análisis a emplear para la interpretación de los registros, se procedió a implementar una metodología de solución al modelo mediante el uso del programa Excel y de su aplicación Solver, la cual básicamente permite encontrar una solución exacta u optimizar las posibles soluciones de una ecuación planteada en la hoja de cálculo, iterando y restringiendo los valores de las variables que intervienen en dicha ecuación. Esto último fue lo que se hizo en este caso.

En la Figura 6 se ilustran los patrones de viaje de las ondas generadas en uno de los ensayos a 21m de profundidad. Se aprecia como los patrones de propagación se curvan con la distancia en función de la variación de las velocidades consideradas en el perfil de acuerdo con la ley de Snell. En la figura 7 se presentan los tiempos de arribo de las ondas medidos para el mismo ensayo.



**Figura 6 - Modelo de propagación basado en la ley de Snell ReMi para una profundidad de 21.00m (Las líneas representan las trayectorias desde el impacto en profundidad hasta los geófonos en superficie)**



**Figura 7 - Tiempos de arribo calculados para los geófonos localizados al lado izquierdo de la perforación para la medición del SPT a 21 m de profundidad.**

Es interesante observar en primer lugar cómo, de acuerdo con las gráficas tanto de tiempos medidos de acuerdo con los registros de la prueba, como de tiempos calculados mediante el modelo basado en la ley de Snell, los intervalos de tiempo para la misma profundidad van reduciéndose conforme ésta aumenta. Lo anterior conlleva a que para distancias a la perforación menores a 20m aproximadamente los valores de tiempo para el mismo geófono se incrementen con la profundidad, mientras a partir de dicha longitud, los valores decrecen a

medida que los valores de profundidad aumentan. Dicha variación es atribuible básicamente a dos factores. El primero es el incremento de la rigidez con la profundidad y el segundo es la horizontalidad asumida para los estratos que subyacen el sitio de pruebas. La interacción de estos dos factores permiten que conforme se valla profundizando en el perfil de suelo se incremente la velocidad inicial con la que viaja el frente de ondas hasta el geófono, al tiempo que la distancia recorrida por dicho frente en los estratos más rígidos sea mayor.

En la Figura 8 se presentan los resultados de la interpretación de las mediciones realizadas de SPT a 7 profundidades a partir de los cuales se obtuvo el perfil de Vs que se muestra, comparado con los de los otros ensayos geofísicos realizados. Se puede observar que a pesar de que se tuvieron solo mediciones a 7 niveles, los valores de Vs obtenidos son muy consistentes entre todas las mediciones en particular hasta 15 m de profundidad. A esta profundidad se sabe a partir de los datos de SPT y CPTU que hay una capa de arena muy densa lo cual representa una limitación de resolución para todas las mediciones geofísicas realizadas, aunque los datos de MSAW muestran un incremento de velocidad a este nivel.

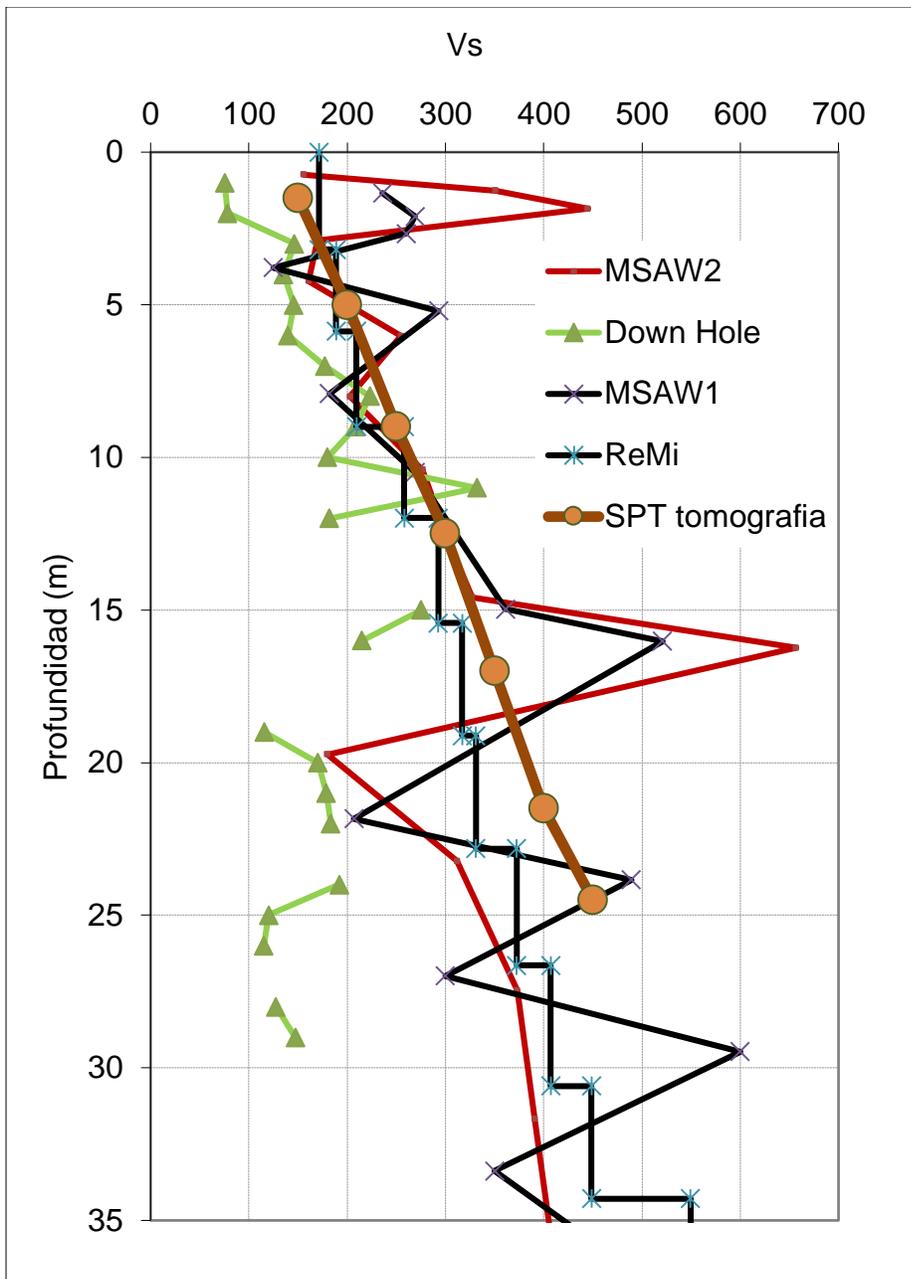


Figura 8 – Resultados de la interpretación del perfil de Vs mediante tomografía a partir de registros del SPT comparado con los de los otros métodos de medición geofísica empleados.

Los datos del Down hole por debajo de los 15 m indican valores más bajos que los otros métodos pero se sabe que hubo problemas en la instalación de la tubería para este ensayo y el hueco no quedó bien cementado. A los 15m comienzan los niveles arenosos y es muy posible que el hueco se haya derrumbado lo que no permite que la lechada haya obturado bien la perforación y las mediciones así realizadas no son confiables. Esta es un situación muy común en la instalación de tuberías para ensayos de Down hole que puede afectar significativamente los resultados de este tipo de medidas. Con base en los datos obtenidos se concluye que el método de interpretación de tomografía sísmica de las vibraciones generadas por el ensayo de

SPT y medidas en superficie permite obtener resultados al menos tan confiables y consistentes como los de otros métodos geofísicos aplicables en la actualidad.

## CONCLUSIONES

El uso de los perfiles de velocidad de onda de corte en suelos es el principal insumo para la clasificación sísmica de sitio de acuerdo con el norma NSR10 y la mayor parte de las normas internacionales. También es básico para la realización de estudios de respuesta sísmica local, microzonificación sísmica, y para obtener parámetros confiables de rigidez del terreno en sitio para análisis geotécnicos en general.

El presente artículo explora la posibilidad de determinar perfiles de suelos utilizando tomografía sísmica mediante la medición de tiempos de arribo en superficie de ondas producidas en profundidad en el terreno en la medida que se hace el ensayo de penetración estándar. Se muestra como este método se puede aplicar de manera exitosa para obtener perfiles de Vs utilizando sismógrafos y sensores convencionales de refracción sísmica. Este método se puede utilizar de manera efectiva para obtener perfiles de Vs como alternativa de ensayos tales como el de Down Hole. El nuevo método no tiene necesidad de instalar tuberías y evita las limitaciones y problemas de acople de esta tubería en el terreno los cuales se requieren para los ensayos de down hole. La relación señal a ruido obtenida mediante la generación de vibraciones en el ensayo de SPT es mucho mejor que en el ensayo de Down Hole convencional ya que se trata de un impacto de gran energía que produce ondas de compresión y de corte de gran intensidad que son fácilmente identificables en los sismogramas. También se puede realizar con equipos de refracción sin requerir una sonda especial para el down hole, y permite reducir la incertidumbre y obtener información redundante que permite hacer una sección en lugar de sólo un sondeo puntual.

## REFERENCIAS

- Aponte J., 2011, Evaluación de métodos no convencionales de caracterización geotécnica. Proyecto de grado de Maestría. Pontifica Universidad Javeriana, Bogotá.
- Geogiga Corp. (2011), Geogiga Seismic - shallow seismic data processing and interpretation software package.
- Louie, J. N. (2001). Faster, better: shear-wave velocity to 100 meters depth from refraction microtremor arrays, Bull. Seism. Soc. Am. 91, 347–364.
- Restrepo V., 2010, Interpretación del ensayo de penetración estándar instrumentado y su relación con la prueba dinámica de carga en pilotes. Proyecto de grado de Maestría. Pontifica Universidad Javeriana, Bogotá.
- Ohta N., Goto N., Kagami H., Shiono K., 1978, Shear wave velocity measurement during a Standard Penetration Test. Earthquake Engineering and structural dynamics, Vol. 6 43-50.
- Díaz G., 2011, Caracterización de un sitio mediante ensayo de CPTU. Proyecto de grado de Maestría. Pontifica Universidad Javeriana, Bogotá.