

CONSORCIO TIBITOC 2006

INFORME DE LA EXPLORACION GEOFISICA REALIZADA PARA EL PROYECTO DETERMINACION DE LA RESPUESTA DINAMICA DEL SUBSUELO Y LA VULNERABILIDAD SISMICA DEL SISTEMA SUELO- TUBERIA A LO LARGO DEL CORREDOR DE LA RED MATRIZ TIBITOC-CASABLANCA

1. RESUMEN

El presente informe se refiere a los resultados obtenidos de la exploración realizada combinando dos métodos geofísicos conocidos como refracción sísmica y resistividad eléctrica. Los resultados de este informe incluyen catorce perfiles de refracción sísmica, nueve sondeos eléctricos verticales y 20 ensayos downhole.

La interpretación de las líneas se hizo empleando dos métodos. El primero de ellos es convencional para refracción y se denomina "Delay Times". Usando esta interpretación, se encontró un modelo del subsuelo compuesto por tres a cuatro capas de las cuales la última es un basamento de velocidad alta asimilable a velocidad de roca o suelos muy consolidados, la cual se encuentra a profundidades variables. La interpretación tomográfica es un método que permite detallar mayor número de capas y en consecuencia permite ver más claramente variaciones laterales y en profundidad de las velocidades compresionales lo cual, a su vez, permite afinar la interpretación en cuanto a que deja ver mas claramente anomalías correlacionables con discontinuidades de cualquier tipo.

Los ensayos downhole están específicamente diseñados para medir dentro de una perforación los tiempos de llegadas de las ondas compresionales y de corte lo cual permite calcular las velocidades de propagación de estas ondas y a su vez los módulos elásticos del subsuelo llamados módulos de elasticidad o de Young (E), módulo de corte máximo (Go), módulo de deformación volumétrica (K) y la relación de Poisson.

Adicionalmente a lo anterior, la investigación se complementó con la ejecución de 9 sondeos eléctricos verticales a fin de conocer el subsuelo desde el punto de vista de la geoeléctrica la cual aporta conocimiento sobre niveles freáticos y profundidad del relleno coluvial o de Sabana presente en la zona.

Se dispuso además de la información proveniente de las perforaciones realizadas lo cual permite caracterizar y correlacionar las velocidades sísmicas y las resistividades eléctricas halladas con los diferentes materiales del subsuelo.

1.1 Objetivos

Los estudios geofísicos tuvieron como objetivos específicos complementar la información geotécnica en los siguientes aspectos:

- Determinar las velocidades compresionales (V_p) y de corte (V_s) de los estratos del subsuelo y calcular los módulos elásticos E, G, K, v .
- Establecer una correlación entre los resultados obtenidos con líneas sísmicas y sondeos geoeléctricos y la geología local mediante modelos del subsuelo, caracterizados por velocidades y espesores en el caso de la sísmica y caracterizados por resistividades eléctricas y espesores en el caso de la geoeléctrica.

1.2 Metodología

Tal como se mencionó, se planearon y ejecutaron en total catorce perfiles de refracción sísmica, 9 sondeos geoeléctricos y 20 ensayos tipo downhole. Las normas que aplican son las ASTM D5777 y ASTM D4428.

El procedimiento seguido fue el siguiente:

- a) Planeamiento y definición de sitios.
- b) Localización en terreno de los sitios de los ensayos
- c) Ejecución de las líneas , sondeos eléctricos y ensayos downhole (adquisición de datos)
- d) Revisión de datos en campo
- e) Interpretación en oficina.
- f) Elaboración de informe final.

1.2.1 Equipo empleado

La adquisición de los datos sísmicos se hizo utilizando un sismógrafo marca Geometrics modelo Geode de 12 canales con computador portátil externo, geófonos, cables y demás elementos.

La adquisición de datos de geoeléctrica se hizo con equipo Campus Ohmega, digital, con lectura directa de voltaje sobre intensidad, porcentaje de error en las lecturas, con variador de voltaje e intensidad de corriente y salida digital de datos.

Los equipos cuentan con software de recepción de datos, control de calidad e interpretación y en consecuencia toda la información se encuentra debidamente almacenada en archivos digitales.

1.2.2 Interpretación Sísmica

La interpretación se hizo empleando el paquete SEISMAGER mencionado el cual se compone de varios programas de computador para aplicaciones específicas dentro del proceso de interpretación (Oyo Geophysics, actualización 2006).

Este paquete de programas está homologado y es suministrado por la casa fabricante del sismógrafo.

Los métodos interpretativos empleados para refracción sísmica fueron los conocidos como tiempos de retraso o 'Delay Times' y Tomografía sísmica y las etapas para la interpretación fueron las siguientes:

a) Tiempos de llegada de las ondas

Estos tiempos se definen con el empleo del programa PickWin de una manera semiautomática. El programa marca los tiempos de llegada de las ondas, y éstos se revisan y ajustan manualmente cuando es necesario. Los tiempos de llegada se leyeron tanto para las ondas compresionales como para las de corte.

b) Entrada de datos y creación de archivos

Una vez definidos los tiempos de llegada para cada disparo o shotpoint, deben reunirse los archivos o disparos que componen una línea, entendiendo por línea un tramo de 100 metros de longitud. Para cada tramo de 100 metros se hicieron 5 disparos y el paso siguiente es generar un nuevo archivo que corresponde a la línea sísmica o spread. En otras palabras, cada línea sísmica o spread (tramo de 100 metros) se compone cinco registros correspondientes a cada shotpoint y cada registro tiene los tiempos de llegada de los doce geófonos.

Una vez se tienen las líneas en tramos de 100 metros, se unen las que correspondan para armar un perfil, el cual queda compuesto por varias líneas sísmicas.

c) Delay Times

A continuación se asignan también en forma semiautomática las capas a las que pertenece cada lectura de tiempos de llegada y se prepara el gráfico Tiempo-Distancia. El programa estima las velocidades, los espesores y las profundidades de las capas.

d) Revisión

Usualmente es necesario calcular iterativamente una línea hasta encontrar que las velocidades son similares para cada capa y que el resultado final es satisfactorio. Entre mayor complejidad exista en la geología de la zona en particular, mayor será el número de iteraciones que habrá que realizar. Paralelamente a este proceso se consulta la información acerca de la geología, perforaciones, etc., con el fin de establecer la correlación entre velocidades, espesores y clases de material.

El ajuste matemático se entiende que está suficientemente bien realizado cuando el valor del RMS (Least Square) es menor a 2 y preferiblemente está entre 1 y 1,5.

e) Interpretación final

Cuando se tiene un modelo matemáticamente correcto y satisfactorio (RMS< 2), nuevamente se comparan los resultados con perforaciones, apiques y mapas geológicos con el fin de establecer la correlación definitiva entre las capas. En esta etapa normalmente es necesario reinterpretar y ajustar los modelos previamente definidos.

1.2.3 Interpretación geoeléctrica

La interpretación se hizo empleando los programas ATO (Automatic Direct Interpretation of Vertical Electrical Soundings) publicado por el servicio geológico de los Estados Unidos (USGS) y con el programa R1 SIP publicado por H.M. Looke en 2004.

Ambos métodos son de interpretación directa y el de H.M. Looke permite introducir y ajustar modelos definidos por el usuario.

El procedimiento seguido una vez tomados los datos en campo consiste en lo siguiente:

- a) El equipo lee directamente el cociente $\Delta V/I$, es decir la resistencia aparente o de campo, dato que es necesario multiplicar por el factor geométrico K que depende de la posición de los electrodos según el dispositivo usado. En este caso se empleó el arreglo Schlumberger. Con esta información y el factor geométrico se preparan las carteras de campo.
- b) Se introducen los datos al programa ATO con el fin de visualizar las curvas de campo y revisar las carteras si hay lugar a ello cuando se presentan puntos anómalos en las curvas.
- c) Se corren ambos programas y se hace una interpretación preliminar con una distribución de capas con espesores y resistividades.
- d) Se elaboran los perfiles y se establece la correlación entre resistividades y capas. Este proceso también es iterativo y se continúa hasta encontrar un modelo matemáticamente correcto y satisfactorio desde el punto de vista de la correlación con el subsuelo.

1.2.4 Localización y nomenclatura

En el anexo 1 se encuentran los planos de localización, en el anexo 2 se encuentran las hojas de cálculo y los perfiles de las líneas sísmicas, los ensayos geoeléctricos están en el anexo 3 y los ensayos downhole en el anexo 4. En dichos planos se indica el sentido en que se realizaron las líneas mediante un 0 que marca el inicio y un 100 que marca el final.

Las líneas se localizaron en campo con mapas topográficos existentes del área.

2. RESULTADOS E INTERPRETACIÓN DE LAS LINEAS DE REFRACCION SISMICA

La interpretación de las líneas se presenta a continuación con un texto explicativo y las hojas con los cálculos se encuentran en el anexo 2 mencionado.

En el texto explicativo se describen los resultados obtenidos, se comenta sobre los objetivos buscados y se hacen aclaraciones sobre algunas situaciones especiales. Este texto está basado en los resultados obtenidos en las tablas de cálculo.

Los resultados de los anexos mencionados consisten en tablas y gráficos, cuyo significado es el siguiente:

a) Primer grupo de tablas: INPUT DATA

Esta sección contiene los datos leídos en campo y de entrada al programa de cálculo los cuales son los siguientes:

- This spread contains..... Esta información describe la cantidad de shotpoints (puntos de disparo) y la cantidad de geófonos (receptores de señal).
- SP, Elev, X-loc, Y-Loc y Depth significan respectivamente: Shotpoint, Elevación o cota, Abscisa X, Ordenada Y y profundidad. Cuando se hace levantamiento topográfico específico, se indican las coordenadas, Este y Norte o X, Y según sea el caso.
- La siguiente tabla contiene las columnas Geo, Elev, X-loc, Y-loc y a continuación SP1, SP2, SP3. etc. Geo significa geófono o punto de recepción de la señal, Elev, X , Y tiene el mismo significado dado anteriormente y en las columnas SP1, SP2, etc, se encuentra los tiempos de llegada de la onda compresional medidos en milisegundos para cada geófono y desde cada punto de disparo.

b) Segundo grupo de tablas: INTERPRETATION

Esta sección contiene los resultados de la interpretación representados en tablas las cuales indican las profundidades para cada uno de los estratos, en cada uno de los geófonos y en cada una de las líneas. Al final se indican las velocidades utilizadas para el cálculo de las profundidades.

La tabla que está en la parte superior de la hoja se refiere únicamente a los puntos de disparo o shotpoints cuya abreviatura es SP. La columna X-Loc contiene la localización dentro del abscisado; la columna Elev contiene la cota o elevación del punto.

Las columnas Layer 2 (Capa 2), Layer 3 (Capa 3) etc. contienen la profundidad (depth) de la capa respectiva y su cota o elevación (Elev).

La siguiente tabla contiene la misma información anterior pero para cada geófono (Geo). El abscisado está bajo la columna X-Loc y las profundidades de las capas bajo las columnas Layer 2,Layer 3,etc.

Se encuentran dos tipos de tablas diferentes. La interpretación convencional con Delay Times genera modelos de tres a cuatro capas en tanto que la tomografía genera modelos de 10 o mas capas. La presentación de los datos es la misma salvo que en las tomografías hay mas capas.

c) Gráficos de resultados.

Con las profundidades calculadas anteriormente se elaboraron los perfiles que se presentan junto con las tablas. El primero de ellos corresponde al modelo simple obtenido por Delay Times tiene como objetivo mostrar las capas y los contactos entre capas con líneas.

El segundo gráfico, es la interpretación tomográfica y mediante el código de colores indicado al lado derecho se pueden interpretar los cambios de velocidad tanto lateralmente como en profundidad así como se destacan algunos rasgos estructurales de las formaciones tales como pliegues.

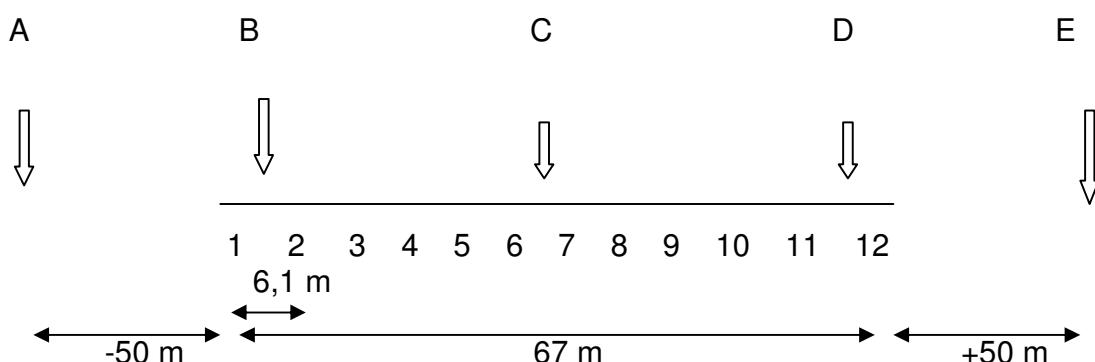
d) Abscisados y especificaciones de las líneas

En el esquema siguiente se indica la forma como se realizaron las líneas. Las especificaciones generales son:

- 12 geófonos separados cada 20 pies (6,10 m) por lo cual el abscisado va de 0 a 67 m (220 pies).
- Cinco disparos o shotpoints ubicados así : Uno en la abscisa 3 (geófonos 1 y 2), otro en la abscisa 33 (entre el 6 y el 7), un tercero en la abscisa 64 (geófonos 11 y 12) y dos externos, en abscisas + 50 y -50 para una longitud total de exploración de 167 metros. En algunos casos las abscisas

+50 y -50 se cambiaron por razón de espacio y facilidad en campo y en las tablas del anexo 2 se indica la posición en la que realmente quedaron.

En el diagrama las letras A,B,C,D y E representan los sitios de los disparos o shotpoints. Los números 1 al 12 son los geóponos y el abscisado empieza en 0 para el geófono 1 y termina en 67 para el geófono 12, razón por la cual los disparos externos se llaman -50 y +50 o la distancia que en realidad se usó que como ya se indicó es diferente en algunos casos.



Esquema de distribución de geófonos y disparos de cada línea sísmica

2.1 PERFIL 1

Se interpretó con un modelo de tres capas de velocidades 420,917 y 1132 m/seg que corresponden a un relleno superficial limo arcilloso blando la primera y rellenos de la Formación Sabana compuestos por intercalaciones de limos y arcillas en la segunda seguramente con suelo residual y roca meteorizada en la base.

En las figuras 1 y 2 se muestran las interpretaciones por Delay Times y por tomografía respectivamente. Por razones de espacio, se remite al lector al Anexo 2 en donde encontrará el perfil a una escala apropiada para lectura.

La línea muestra contactos curvos con un aumento del espesor de la capa 2 entre las abscisas 0 y 30 interpretada como una geoforma labrada por el agua en épocas remotas, agua proveniente del cerro, cuya descarga está enfrentada a la línea.

La tomografía no es explícita en cuanto a esta geoforma y la insinúa mucho más suavemente. El suelo va gradualmente aumentando su espesor hasta llegar a la máxima velocidad interpretada como roca meteorizada después de unos 15 metros de profundidad.

El modelo es continuo e indica que el subsuelo también lo es con suaves plegamientos en las capas.

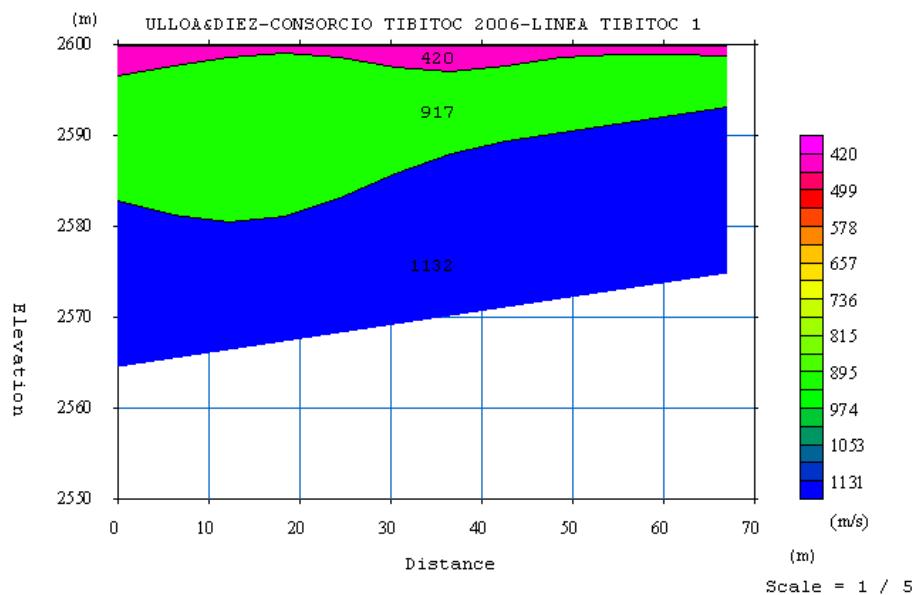


Figura 1. Modelo general Perfil 1

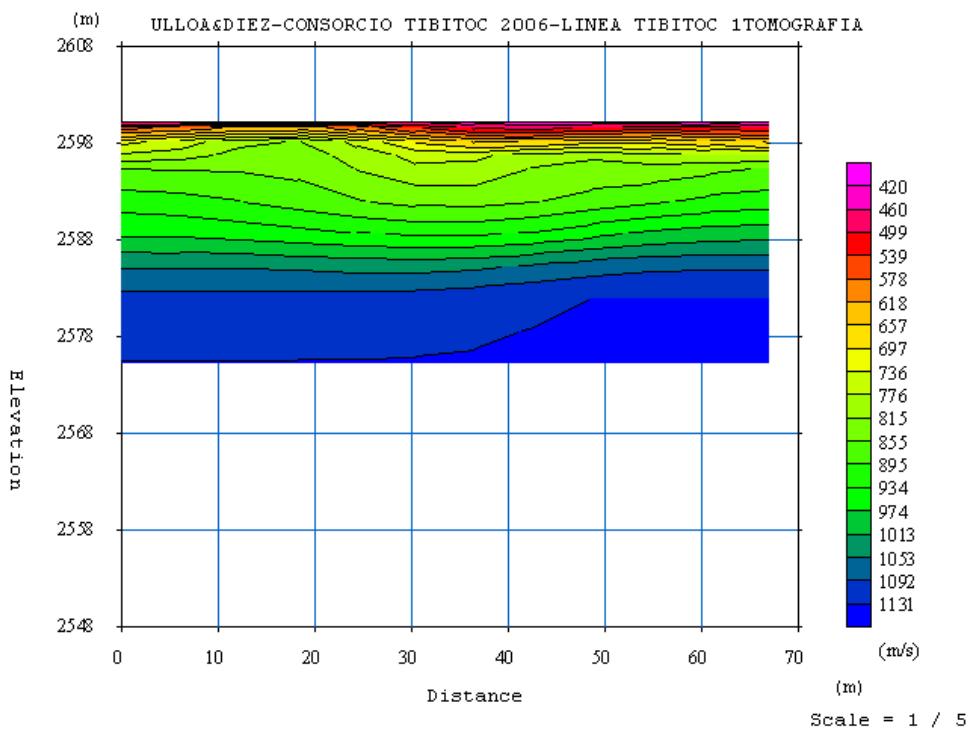


Figura 2 Tomografía Perfil 1

2.2 PERFIL 2

Se interpretó con un modelo de tres capas de velocidades 415,915 y 1940 m/seg que corresponden a un relleno superficial limo arcilloso blando la primera , suelos residuales la segunda y ambos conjuntos descansan sobre roca meteorizada.

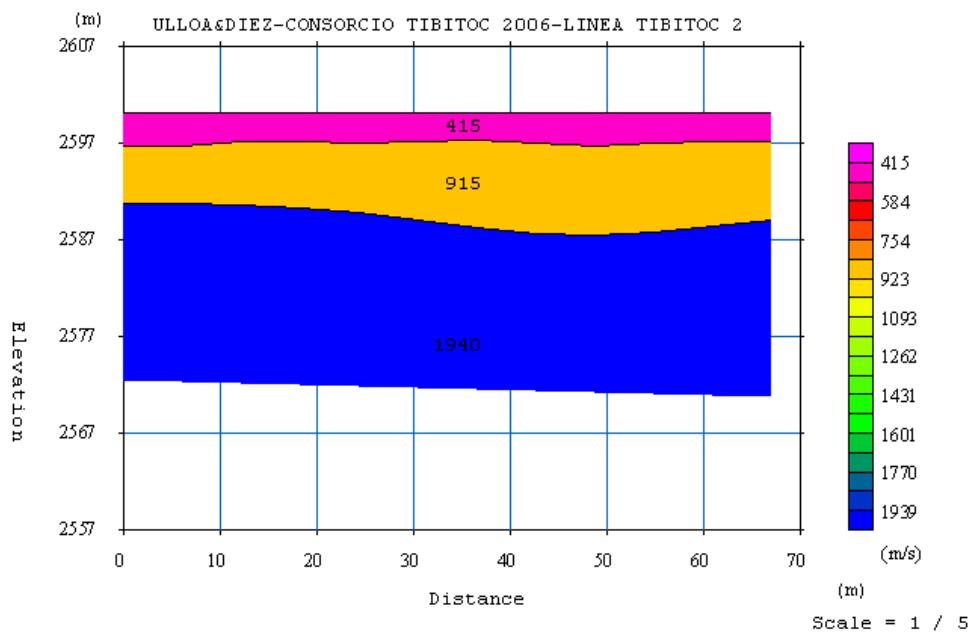


Figura 3. Modelo general Perfil 2

De acuerdo con la interpretación mostrada en la figura 2 y las tablas del anexo 2, la roca meteorizada se alcanzará después de 8 a 10 metros de profundidad y la capa blanda está en el orden de 2 a 3 metros.

La tomografía de la figura 4 muestra que las capas tienen una sedimentación horizontal con pocas variaciones laterales y en profundidad. La roca meteorizada de la base se muestra un poco mas profunda, a partir de unos 15 metros para encontrarla en su mayor velocidad aunque empieza a aparecer desde los 10 metros de profundidad.

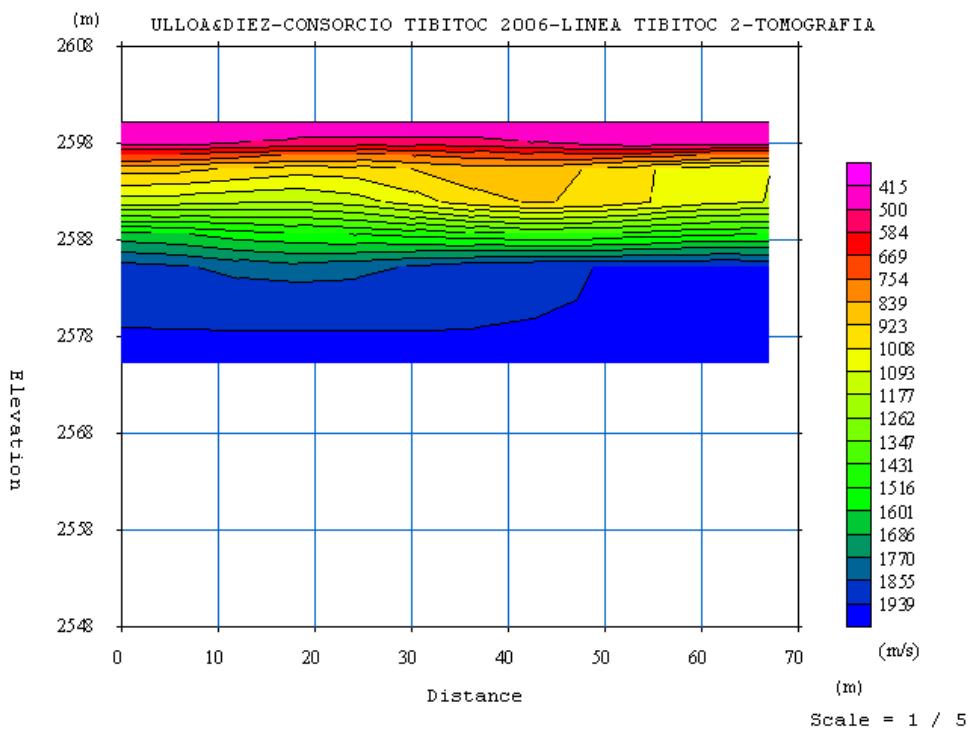


Figura 4. Tomografía Perfil 2

2.3 PERFIL 3

Se interpretó con un modelo de tres capas de velocidades 299 para la primera capa, 750 para la segunda capa y 1705 para el basamento, todas medidas en m/seg. La correlación propuesta es la misma indicada para la línea anterior, es decir, un relleno superficial limo arcilloso la primera, suelos residuales en la segunda y roca meteorizada en el basamento o tercera capa.

Se observa una leve inclinación de las capas hacia la abscisa 70, consecuencia del buzamiento de las capas que afloran en el cerro frente a la línea la cual se hizo en sentido perpendicular a la tubería.

La profundidad para alcanzar el basamento está entre los 5 y 8 metros aproximadamente y el modelo es continuo en toda la línea.

En las figuras 5 y 6 se muestran las interpretaciones en los perfiles respectivos.

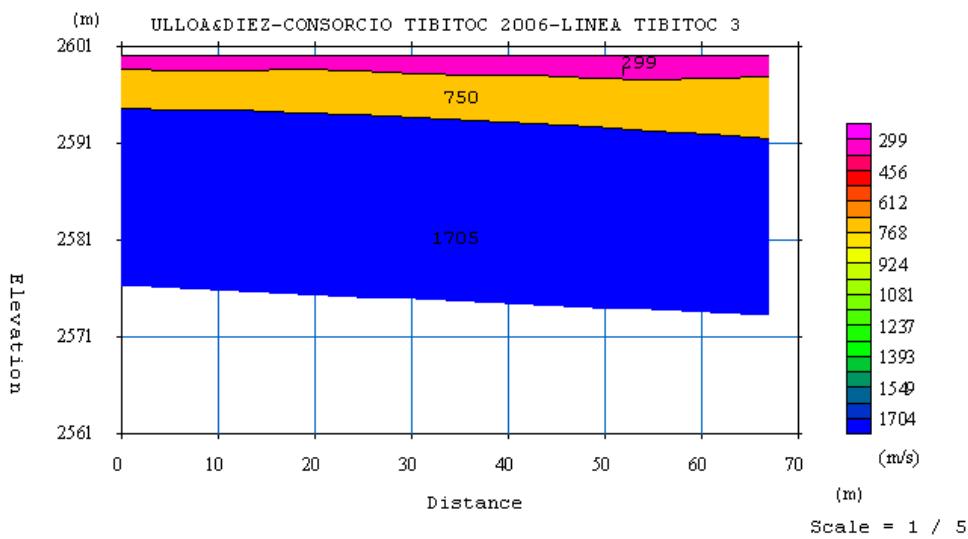


Figura 5. Modelo general Perfil 3

Al igual que en el perfil anterior, la tomografía muestra una sucesión de capas horizontales con contactos moderadamente curvos que aumentan su dureza y densidad con la profundidad.

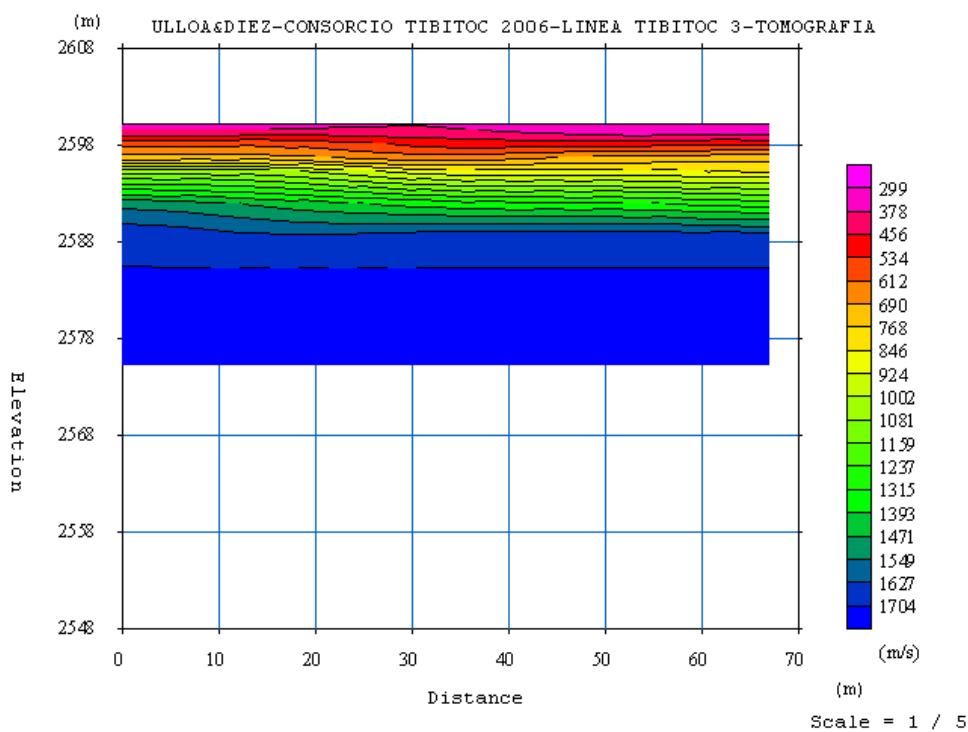


Figura 6. Tomografía Perfil 3

2. 4 PERFIL 4

Se interpretó con un modelo de dos capas de velocidades 516 a 519 para la primera capa, y 1068 a 1173 para el basamento, todas medidas en m/seg. La correlación propuesta es un relleno superficial limo arcilloso la primera y suelos duros en la segunda o basamento con presencia de arenas.

En las figuras 7 y 8 se muestran las interpretaciones por Delay Times y por tomografía respectivamente. Por razones de espacio, se remite al lector al Anexo 2 en donde encontrará el perfil a una escala apropiada

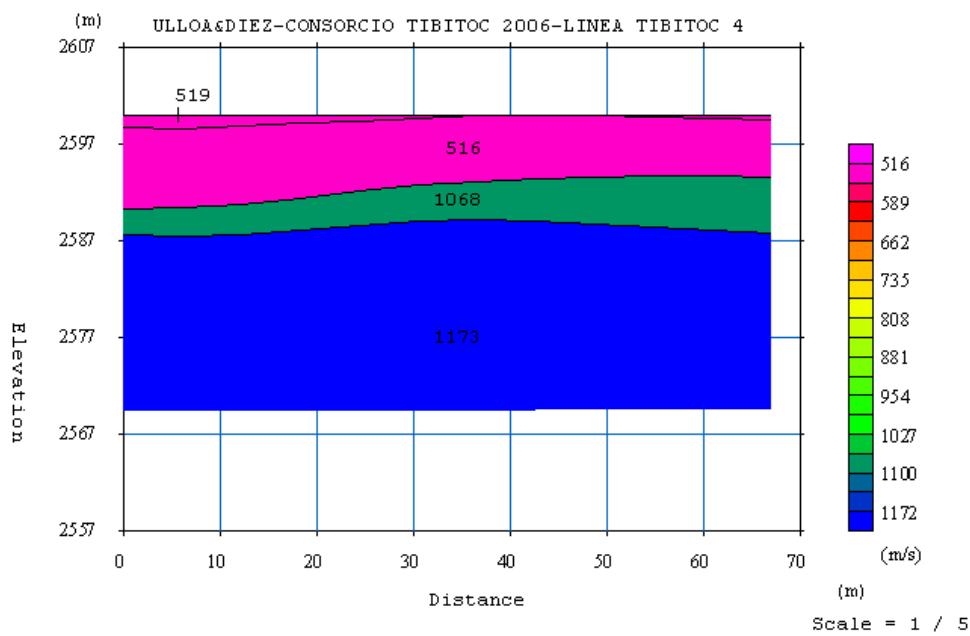


Figura 7. Modelo general Perfil 4

La tomografía mostrada indica capas en secuencia que aumentan su dureza con la profundidad, sin anomalías, mostrando continuidad en sentido horizontal y vertical.

Las dos primeras velocidades son en realidad una misma capa ya que la diferencia entre ellas es muy pequeña, al igual que la tercera y cuarta velocidades. El significado de esto es que aumenta la densidad con la profundidad y por ello también la velocidad aumenta.

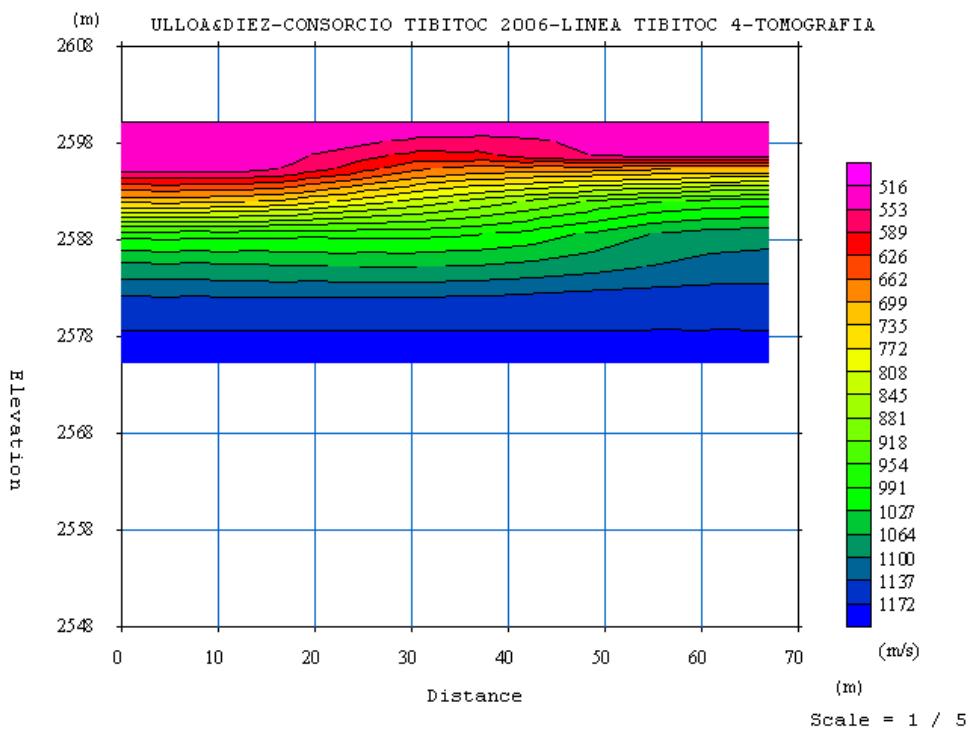


Figura 8. Tomografía perfil 4

2.5 PERFIL 5

Se interpretó con un modelo de dos capas de velocidades 329 a 362 para la primera capa y 1484 para el basamento, todas medidas en m/seg. La correlación propuesta es un relleno superficial limo arcilloso la primera y arcillas y suelo residual en la base.

En las figuras 9 y 10 se muestran las interpretaciones por Delay Times y por tomografía respectivamente.

La velocidad de la segunda capa tiene un valor que para la zona es algo confuso ya que coincide bien con suelos intercalados de arenas y arcillas de consistencia alta pero también puede interpretarse como suelo residual de roca o bien roca meteorizada.

La tomografía indica que las velocidades altas se encuentran en realidad después de unos 17 metros de profundidad en tanto que entre 10 y 18 existe una zona transicional de velocidades del orden de 1000 m/seg que son más típicas de suelos consolidados. Según esta visión, el suelo residual de la roca aparece a los 18 a 20 metros de profundidad y sobre éste hay suelos.

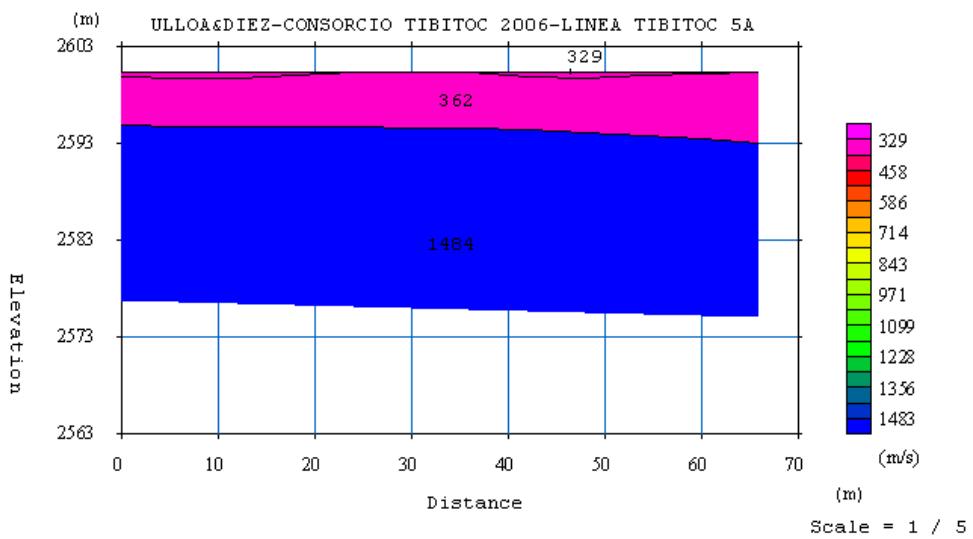


Figura 9. Modelo general Perfil 5

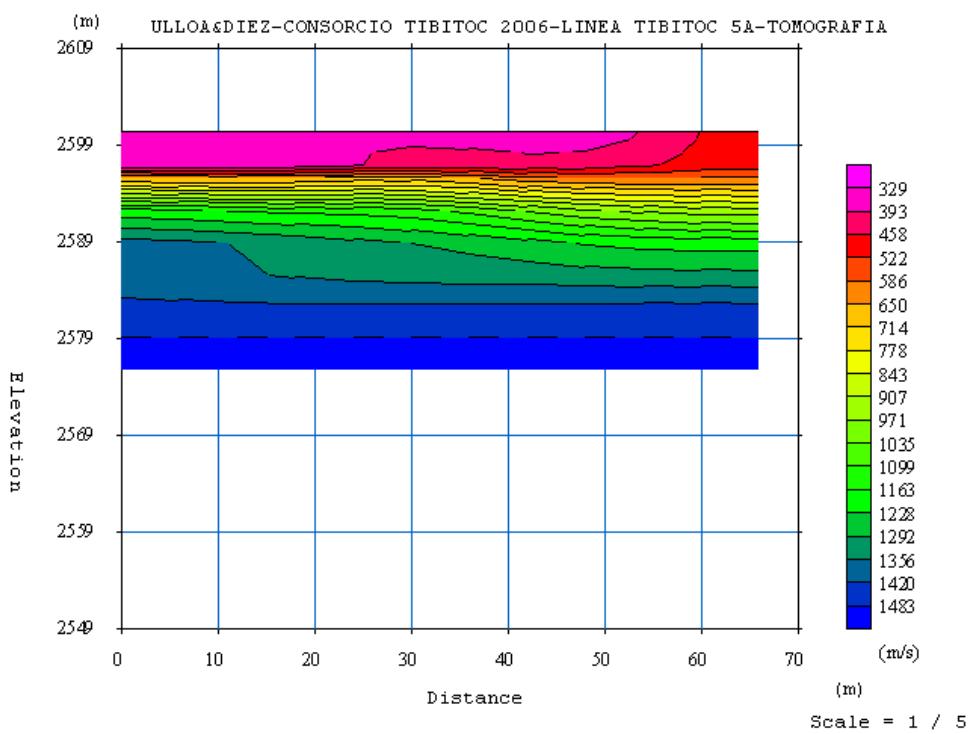


Figura 10. Tomografía Perfil 5

2.6 PERFIL 6

Se interpretó con un modelo de dos capas de velocidades 1133 y 1827, medidas en m/seg. La correlación propuesta es un relleno superficial duro, roca meteorizada tipo arcillolita en la base.

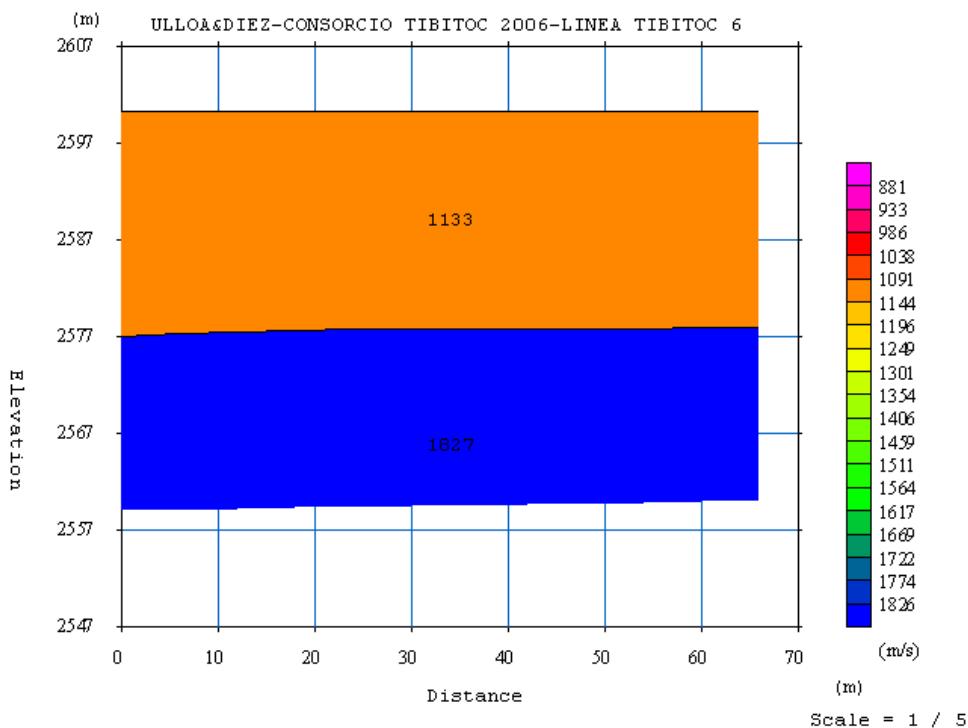


Figura 11. Modelo general Perfil 6

El espesor de los suelos es considerable pues alcanza fácilmente los 25 metros de espesor y es probable que dentro de esta capa se incluyan suelos residuales arcillosos provenientes de la roca.

La tomografía muestra muchas irregularidades y heterogeneidades tanto en profundidad como lateralmente y sugiere que la meteorización de la roca es diferencial, mayor entre las abscisas 0 a 20 y menor en el resto del perfil.

Las capas suprayacentes al basamento también indican importantes cambios en las velocidades y muestran que en la superficie del terreno la densidad del suelo es variable a lo largo del perfil.

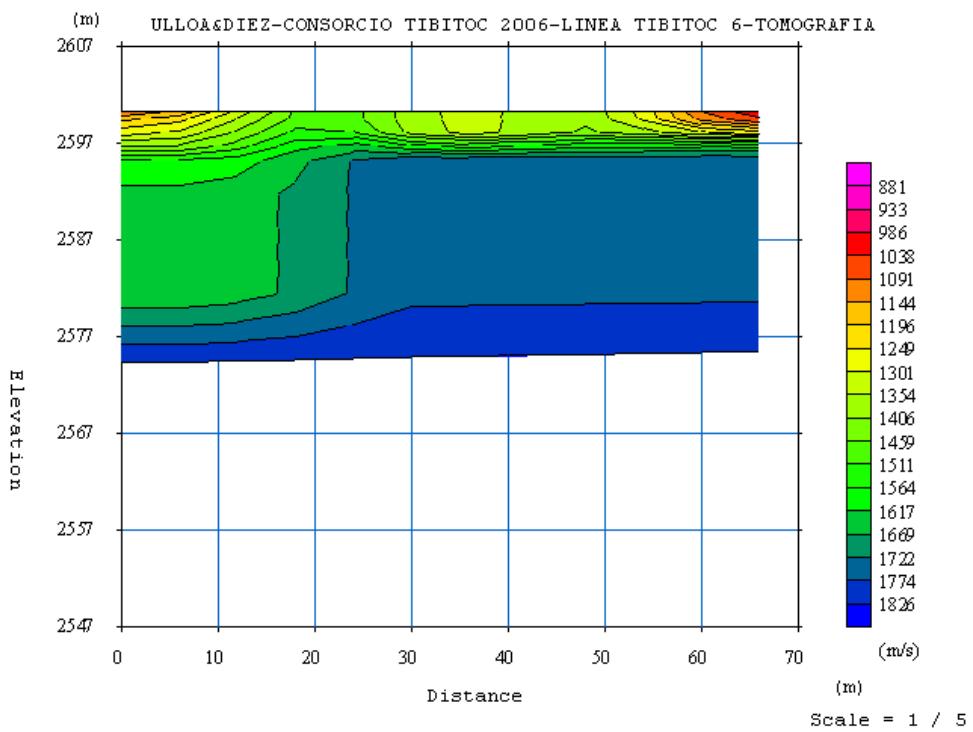


Figura 12. Tomografía Perfil 6

2.7 PERFIL 7

Se interpretó con un modelo de tres capas de velocidades 499, 1674 y 3465 m/seg para el basamento, todas medidas en m/seg. La correlación propuesta es un relleno superficial limo arcilloso la primera, mezcla de suelo y roca meteorizada la segunda y roca en la base seguramente arenisca a juzgar por la velocidad.

En las figuras 13 y 14 se muestran las interpretaciones por Delay Times y por tomografía respectivamente. Por razones de espacio, se remite al lector al Anexo 2 en donde encontrará el perfil a una escala apropiada.

Las capas del subsuelo muestran una tendencia a estar sedimentadas en forma sub horizontal, con estratos paralelos y leves ondulaciones entre los contactos. La roca de la base está a unos 10 metros en la abscisa 0 y a unos 6 metros en el otro extremo con valores intermedios en el resto del perfil.

La tomografía indica que después de unos 12 a 15 metros se tendrá la roca en su mejor expresión y que antes de esto la roca irá mejorando su calidad especialmente entre los 10 y los 12 o 15 metros según el sitio.

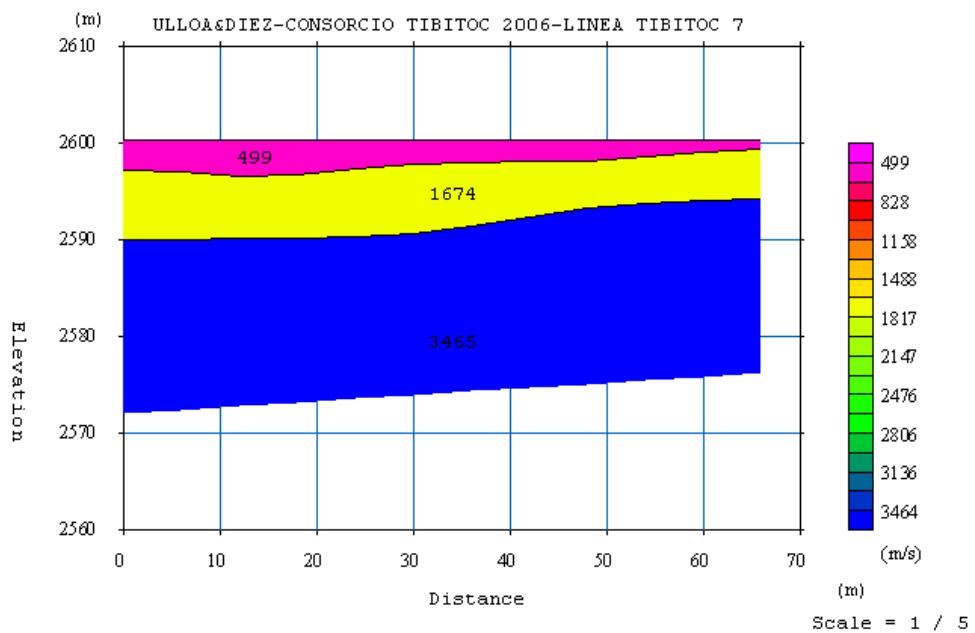


Figura 13. Modelo general Perfil 7

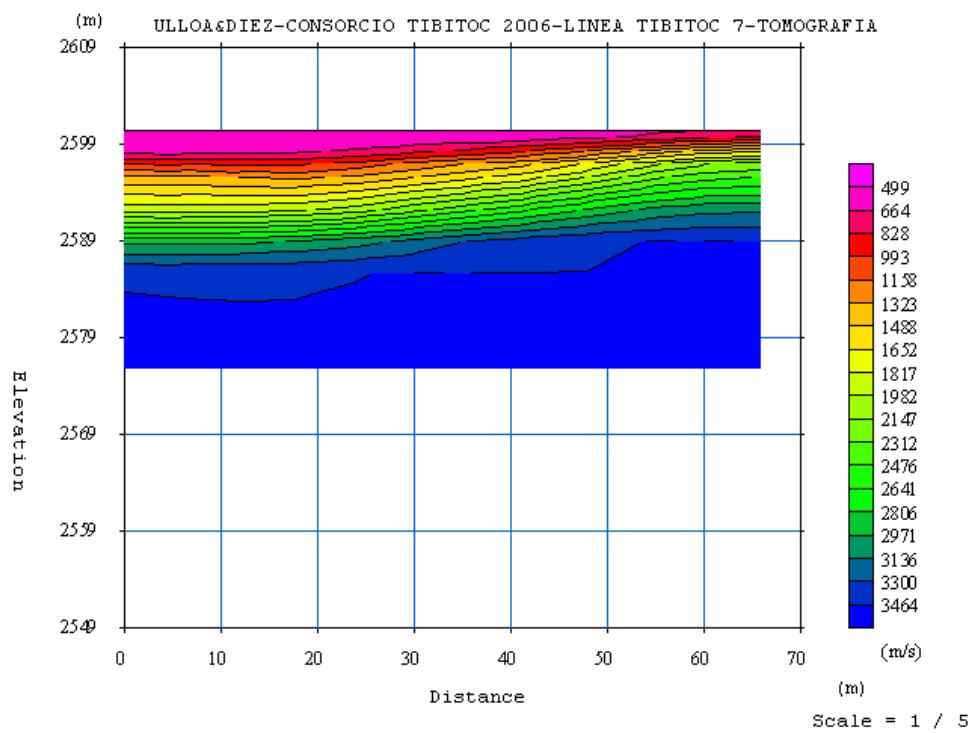


Figura 14. Tomografía Perfil 7

2.8 PERFIL 8

Se interpretó con un modelo de tres capas de velocidades 284 para la primera capa, 858 para la segunda capa, y 1442 para el basamento, todas medidas en m/seg. La correlación propuesta es un relleno superficial limo arcilloso la primera, suelos de consistencia media la segunda y suelo residual en la base.

En las figuras 13 y 14 se muestran las interpretaciones por Delay Times y por tomografía respectivamente.

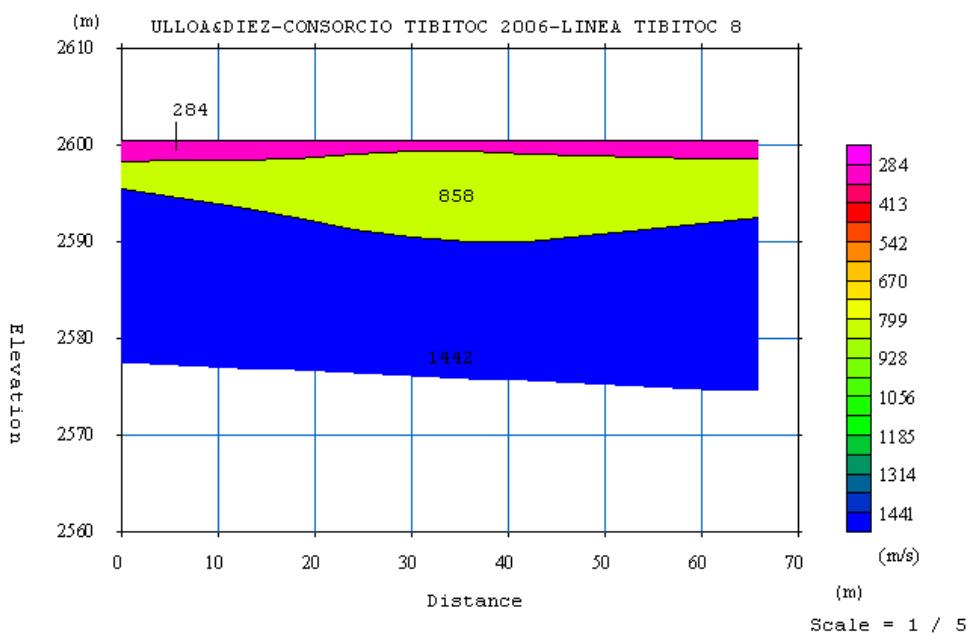


Figura 15. Modelo general Perfil 8

Las capas se muestran con curvaturas en los contactos y ello es más notorio en la tomografía. Por otra parte entre las abscisas 25 y 45 se ve una forma del contacto con la base que sugiere que ésta ha sido labrada por acción del agua en alguna época remota.

La tomografía muestra fuertes cambios en la dureza en los primeros 5 metros en tanto que a mayor profundidad los cambios son más paulatinos pero mas pronunciadas las curvaturas entre ellos.

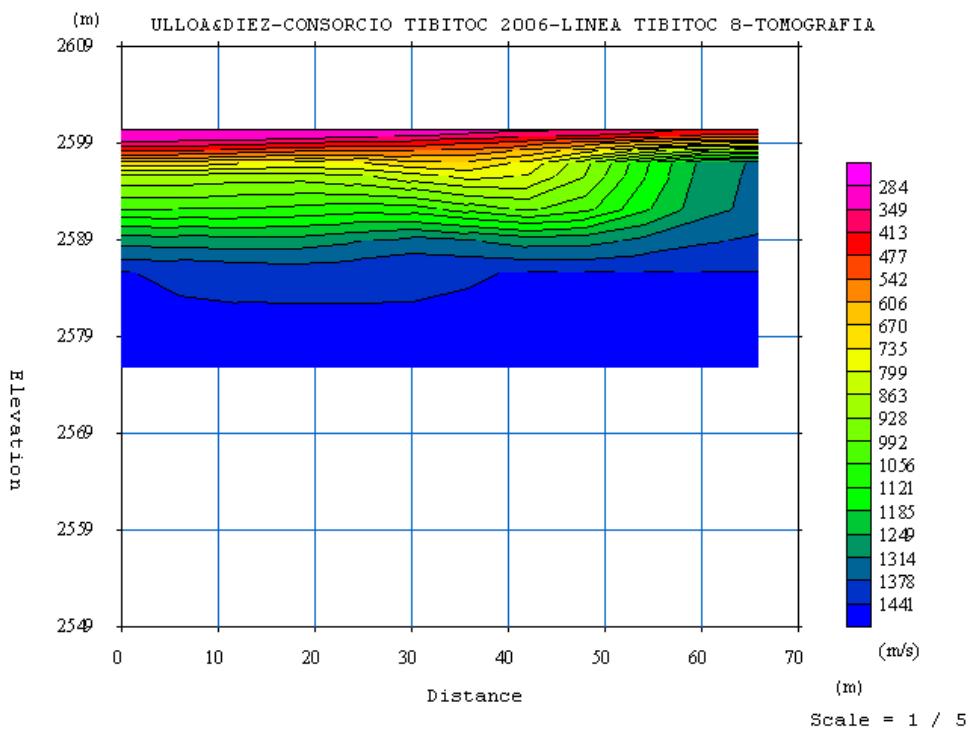


Figura 16 Tomografía Perfil 8

2.9 PERFIL 9

Se interpretó con un modelo de tres capas de velocidades 351 para la primera capa, 735 para la segunda capa y 1460 para el basamento, todas medidas en m/seg. La correlación propuesta es un suelo blando superficial, rellenos de arenas, arcillas y limos la segunda y basamento con roca meteorizada.

Nuevamente se presenta confusión con la correlación de la última capa ya que su velocidad es similar para varios tipos de subsuelo. Sin embargo la tomografía indica que las velocidades altas en realidad empiezan a profundidades cercanas a los 20 metros con lo cual el tramo entre 10 y 20 corresponde a suelos residuales primordialmente.

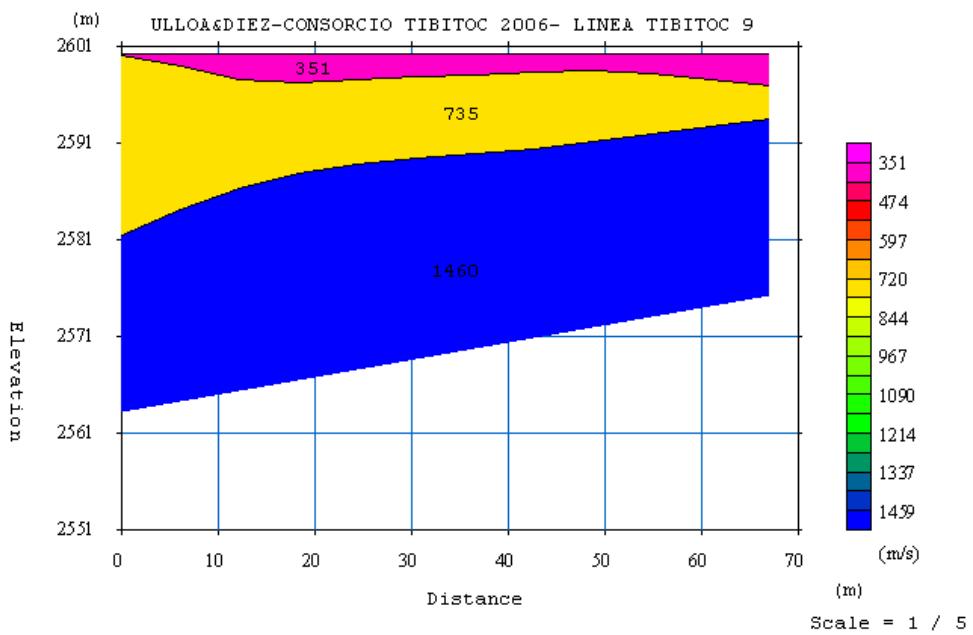


Figura 17. Modelo general Perfil 9

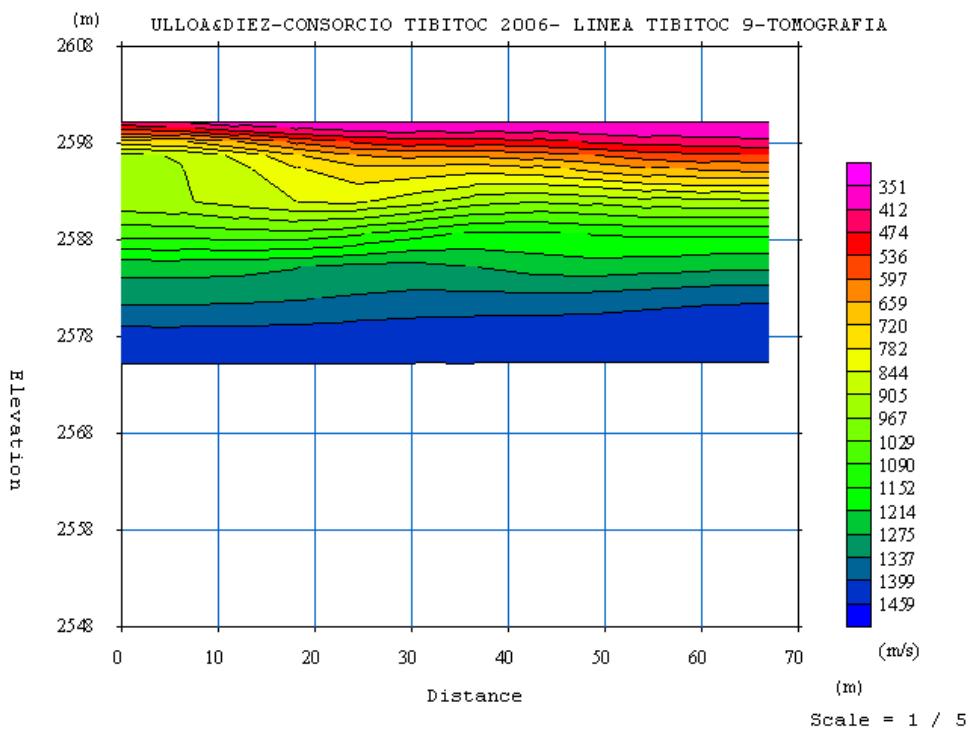


Figura 18 Tomografía Perfil 9

2.10 PERFIL 10

Se interpretó con un modelo de tres capas de velocidades 183 para la primera capa, 933 para la segunda capa y 1365 m/seg para el basamento, todas medidas en m/seg. La correlación propuesta es suelo blando y húmedo en la primera, depósitos de consistencia media a dura la segunda y roca meteorizada en la tercera, tipo arcillolita.

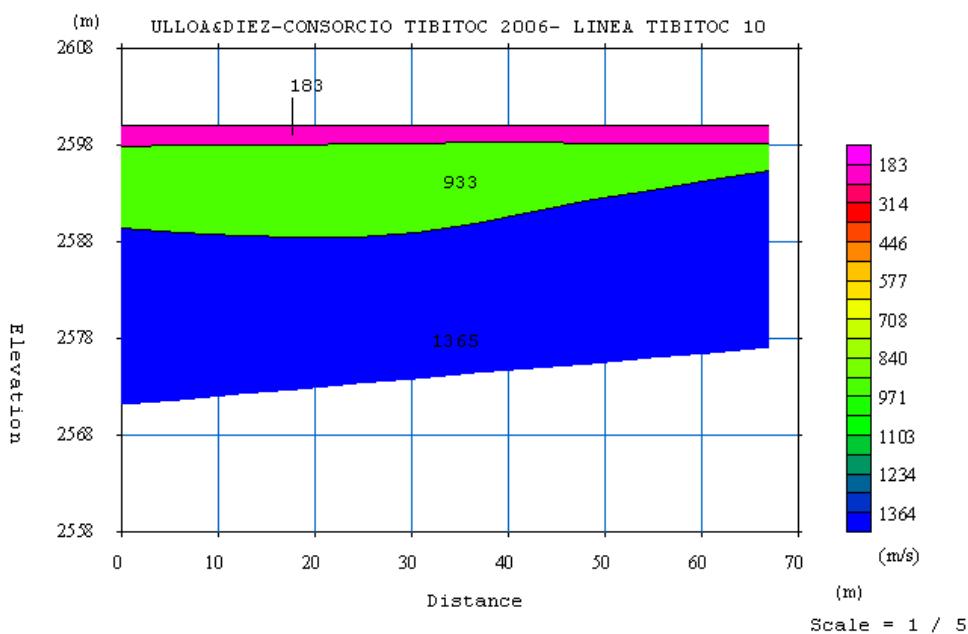


Figura 19. Modelo general Perfil 10

La figura 19 muestra que la roca aparece a poca profundidad en la abscisa 70 (alrededor de 6 metros) en tanto que en el otro extremo se encontrará a unos 10 metros de profundidad, indicando inclinación en la capa del basamento.

La tomografía muestra la misma tendencia pero mas moderada indicando pliegues en la capa 2 y mayor cercanía del basamento en el extremo de la abscisa 70 que en el inicio de la línea.

Por lo demás las capas se ven más o menos paralelas, el modelo es continuo y no hay anomalías sobresalientes.

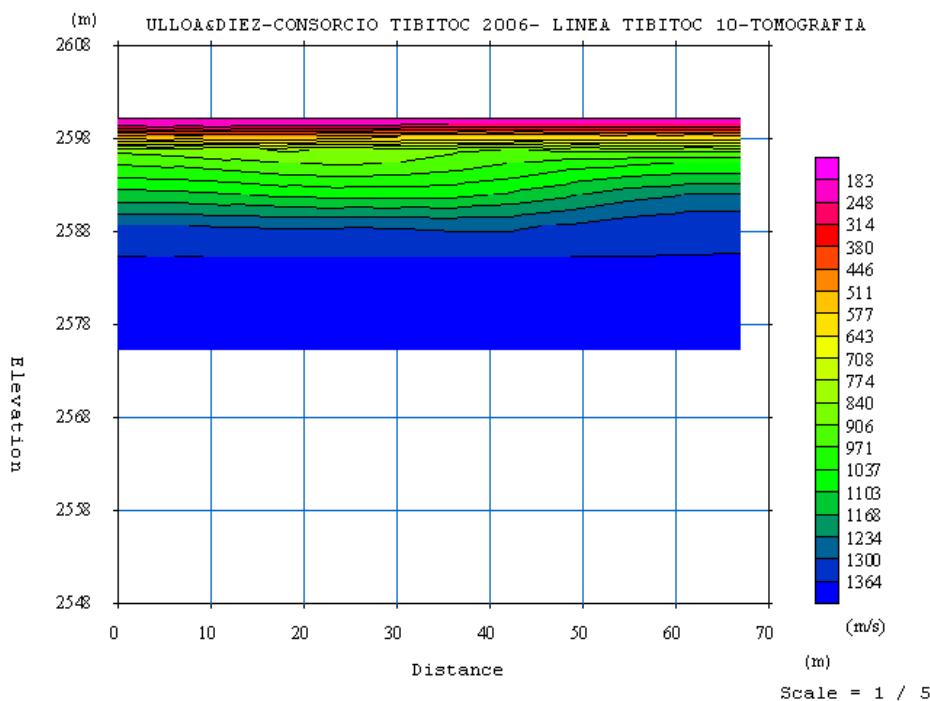


Figura 20. Tomografía Perfil 10

2.11 PERFIL 11

Se interpretó con un modelo de cuatro capas de velocidades que en realidad parecen dos principales únicamente. La velocidad hallada es de 179 para la primera capa, 1051 a 1081 para la segunda capa y 1343 para el basamento, todas medidas en m/seg. La correlación propuesta es suelos muy blandos sobre suelos duros y sobre roca meteorizada.

Probablemente las velocidades de 1181, 1051 y 1337 correspondan a la misma capa que es correlacionable con arcillolitas meteorizadas en diferentes grados. Las velocidades más bajas corresponden a mayor meteorización y las mas altas a roca en mejor estado. No obstante se aclara que la roca arcillosita presente en el área, en estado fresco tiene velocidades del orden de 2300 a 2600 por lo cual se infiere que siendo los valores hallados cercanos a la mitad del valor de la roca en buen estado, ésta se halla en alto estado de meteorización.

La tomografía muestra más clara esta tendencia en el sentido que existe una zona meteorizada con capas mas o menos horizontales que va mejorando su calidad con la profundidad.

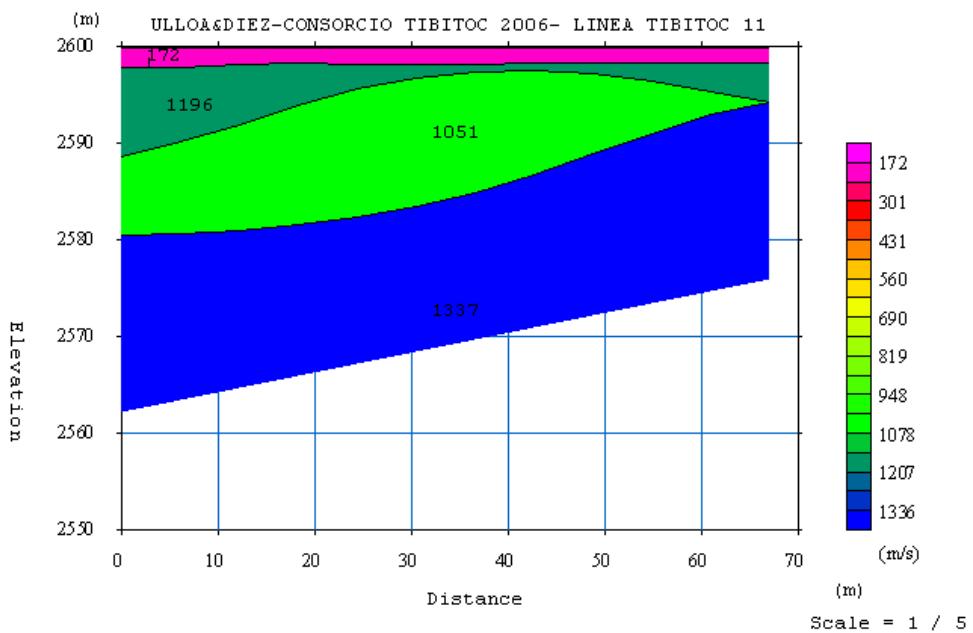


Figura 21. Modelo general Perfil 11

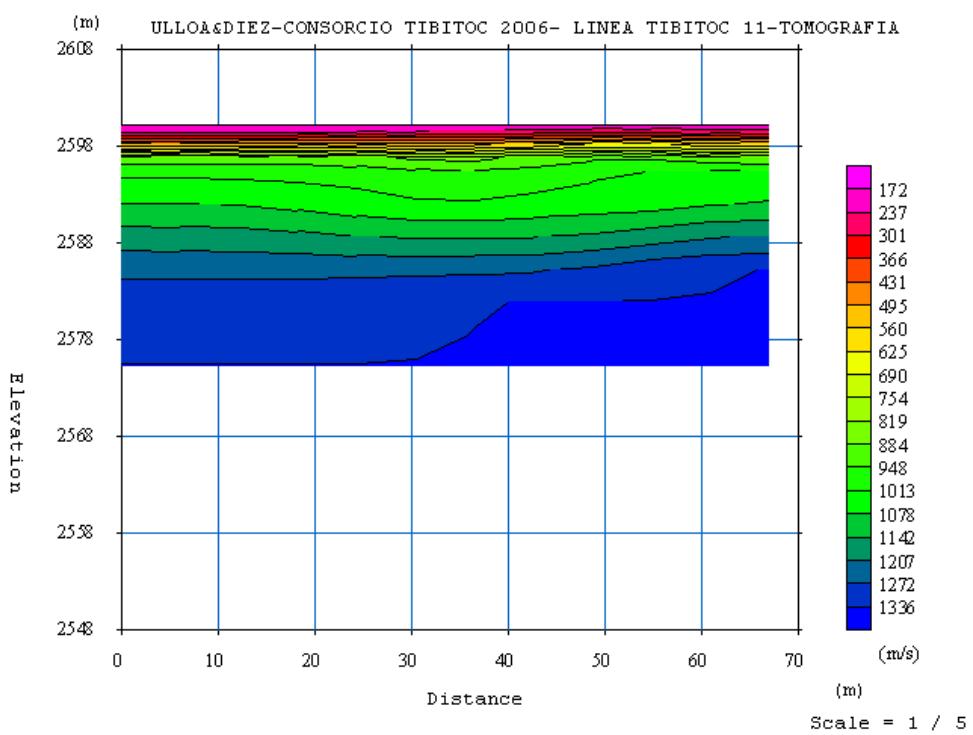


Figura 22. Tomografía Perfil 11

2.12 PERFIL 12

Se interpretó con un modelo de tres capas de velocidades 253,844 y 1531 a 1556 para el basamento, todas medidas en m/seg. La correlación propuesta es un suelo blando sobre suelos duros y roca meteorizada tipo arcillolita.

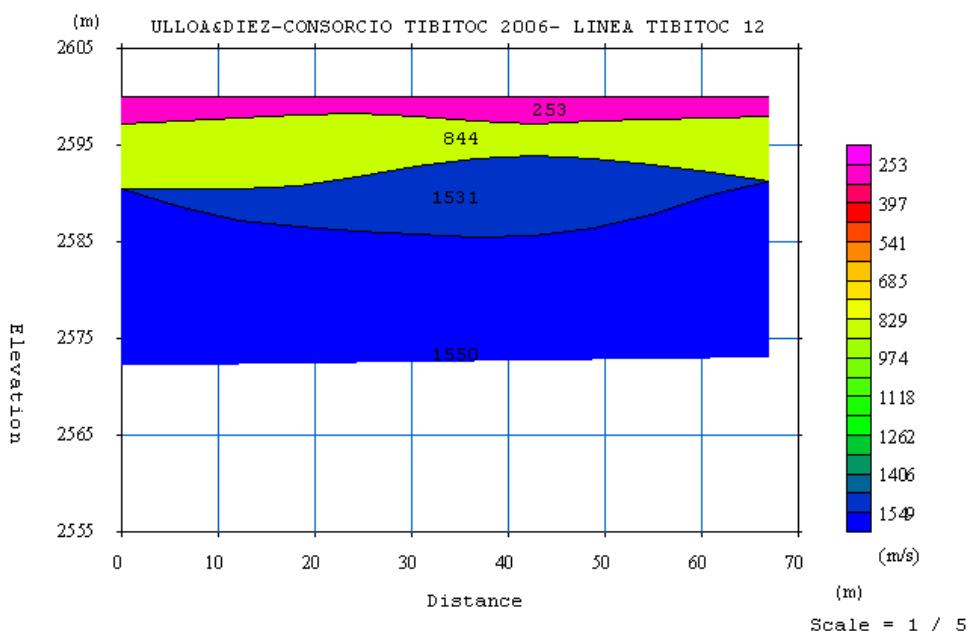


Figura 23. Modelo general Perfil 12

No existe gran diferencia entre las dos últimas velocidades y por ello se afirma que se trata de la misma capa con algún cambio en su estado de meteorización. La tomografía muestra más claramente el fenómeno y lo indica con capas horizontales que van aumentando su velocidad y como consecuencia de ello su calidad con la profundidad.

La roca se encontrará a profundidades diferentes pero 10 metros es un valor promedio que se considera representativo para encontrar el basamento.

Nuevamente se encuentra un modelo del subsuelo continuo en toda la longitud del perfil, sin cambios bruscos ni anomalías.

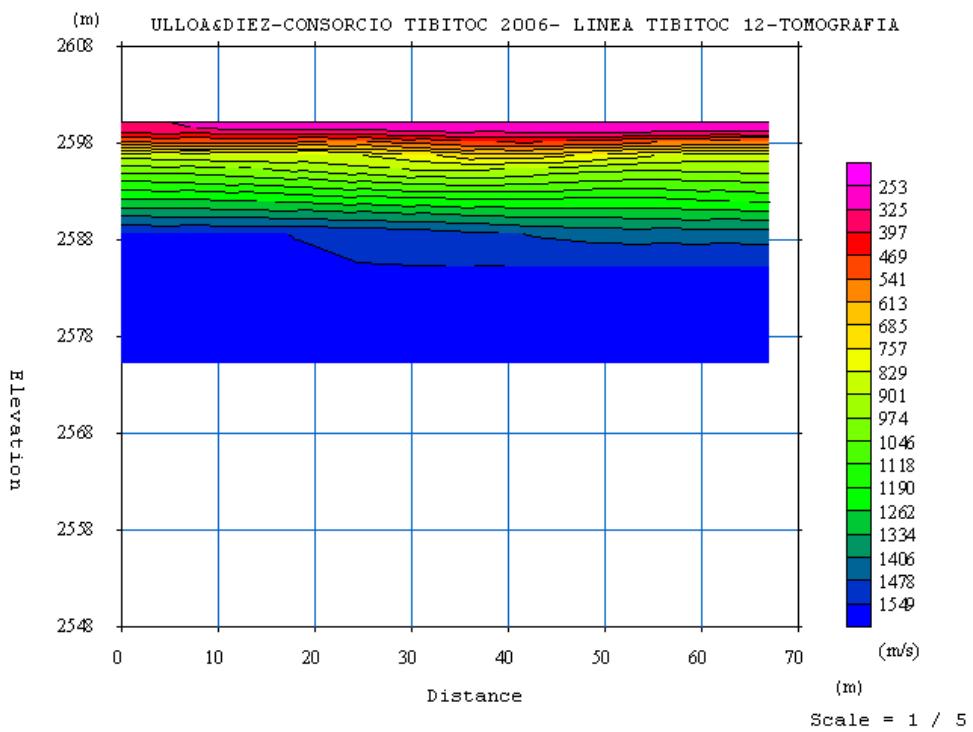


Figura 24. Tomografía Perfil 12

2.13 PERFIL 13

Se interpretó con un modelo de tres capas de velocidades 210 para la primera capa, 761 para la segunda capa y 2057 para el basamento, todas medidas en m/seg. La correlación propuesta es suelos blandos sobre suelos de consistencia media a dura y sobre roca tipo arcillolita.

Las capas se muestran con moderadas curvaturas en un modelo del subsuelo continuo y sin irregularidad o anomalías notorias indicado en las figuras 25 y 26.

La tomografía muestra un aumento en la profundidad del perfil de meteorización de la roca basal entre las abscisas 30 y 70 aproximadamente siendo este fenómeno lo único diferente en el perfil.

La velocidad de 2057 se acerca mas a los valores típicos de la arcillolita de la Formación Guaduas, cercanos a los 2300- 2600 m/seg.

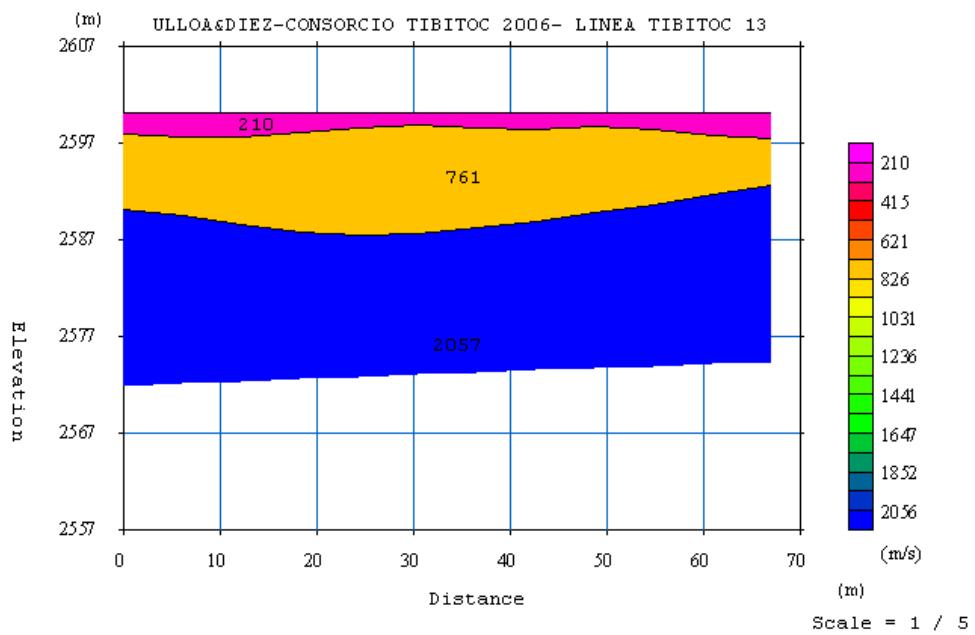


Figura 25. Modelo general Perfil 13

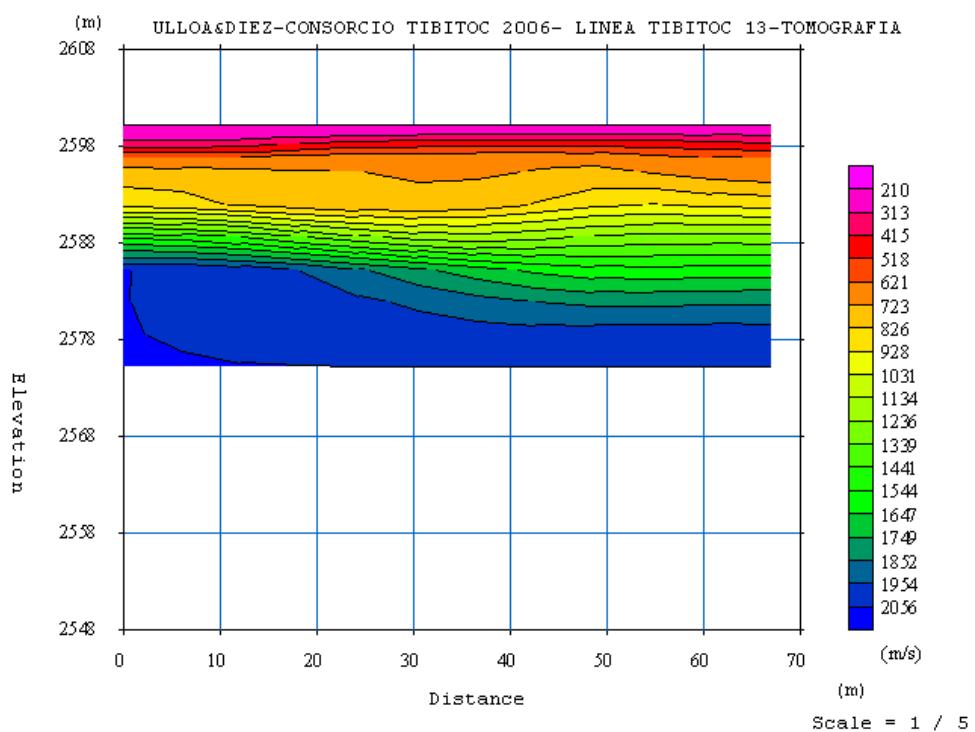


Figura 26. Tomografía Perfil 13

2.14 PERFIL 14

Se interpretó con un modelo de tres capas de velocidades 349 para la primera capa, 991 para la segunda capa, y 1353 para el basamento, todas medidas en m/seg. La correlación propuesta es suelos blandos sobre suelos duros y sobre roca meteorizada.

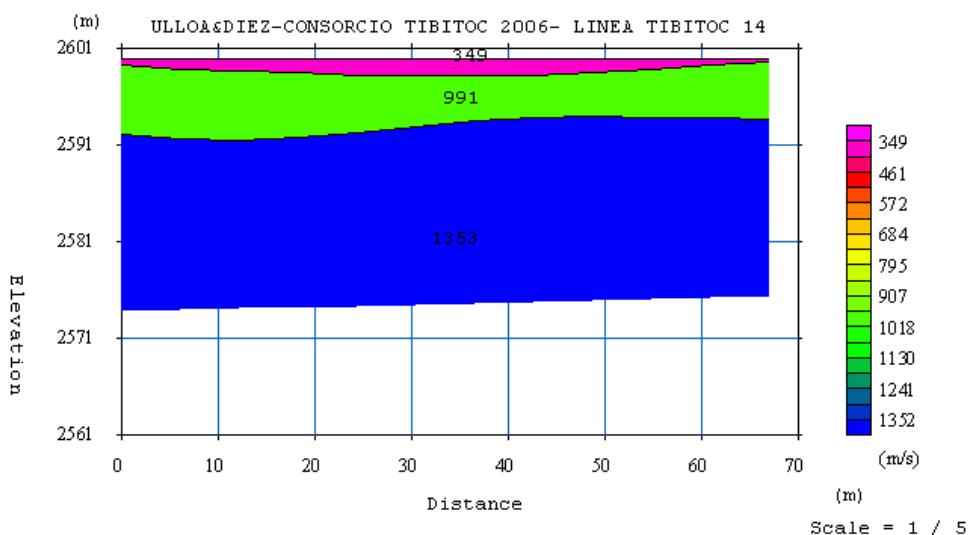


Figura 27. Modelo general Perfil 14

El perfil mostrado en las figuras 27 y 28 tiene continuidad de un extremo al otro e indica contactos moderadamente curvos entre las capas. El basamento tiene una velocidad baja que sugiere una roca muy meteorizada ya que como se ha mencionado anteriormente, las arcillolitas presentes en el área están en el orden de 2300 a 2600 m/seg de velocidad.

Entre las abscisas 30 y 50 se sugiere plegamientos en el basamento indicados en la tomografía en tanto que las capas horizontales permanecen horizontales. La profundidad al basamento está variando entre 8 y 10 metros y parece estar más cerca de 8 en la mayor parte del perfil.

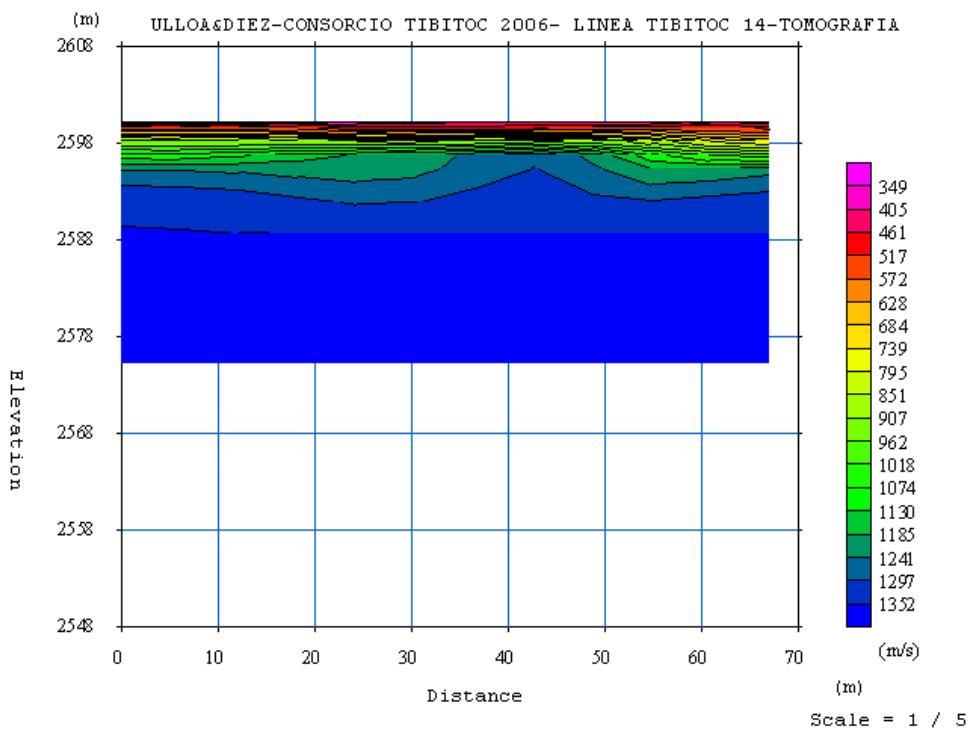


Figura 28. Tomografía Perfil 14

3. ENSAYOS DOWNHOLE

Estos ensayos están diseñados específicamente para medir las velocidades compresionales y de corte en una perforación y con base en esas velocidades y conocidos los pesos unitarios de los diferentes estratos que componen el subsuelo, se calculan los módulos de Elasticidad (E), de Corte máximo (G_o), de deformación Volumétrica (K) y la relación de Poisson en un perfil detallado ya que normalmente las mediciones se hacen cada metro.

3.1 Metodología

La ejecución de los ensayos se hizo utilizando la metodología descrita y publicada por la casa matriz del sismógrafo (Geometrics). En esencia la documentación describe en forma resumida la teoría y métodos descritos en "Shear Waves, Techniques and Systems" cuyo autor es Douglas Crice .

El procedimiento llevado para llevar a cabo un ensayo consiste esencialmente en lo siguiente:

- Instalar el sismógrafo con sus accesorios y conectar la sonda triaxial.

- Colocar la sonda en el fondo o en el principio de la perforación, adherida firmemente a uno de los lados.
- Generar ondas compresionales mediante golpes verticales en el suelo.
- Leer el tiempo de llegada y grabarlo.
- Generar ondas de corte mediante golpes laterales en las paredes de una trinchera.
- Los golpes deben darse a un lado primero y luego al otro, grabando cada señal por separado.
- Subir o bajar la sonda cada metro hasta la profundidad que se desee y repetir el procedimiento.

El primer golpe se hace para obtener una señal sísmica normal (perpendicular) en la cual el tiempo de las ondas refractadas llega primero que las demás siendo fácilmente distinguibles en el sismograma.

Como quiera que las ondas de corte (shear waves) llegan después mezcladas con las demás ondas, es difícil y a veces imposible distinguirlas en un registro común y corriente, por lo cual se ideó el ensayo Down Hole.

Mediante los golpes laterales a la viga o a la trinchera se generan señales ricas en ondas de corte y aprovechando la posibilidad de polarizar la señal que tiene el sismógrafo empleado, es posible distinguir la onda de corte por su forma, frecuencia y amplitud así como por sus "picos" que son en un sentido cuando se golpea por un lado (hacia arriba o hacia abajo) y en el otro sentido cuando se golpea el otro lado.

Una vez conocidos los tiempos de llegada tanto de las ondas P como de las ondas S, se calcula su velocidad simplemente como $V = s/t$ en donde s es el espacio y t el tiempo. El espacio usualmente se toma como el espesor de cada capa y el tiempo como la diferencia de lecturas en esa misma capa, o bien trazando líneas rectas s-t cuya pendiente es la velocidad.

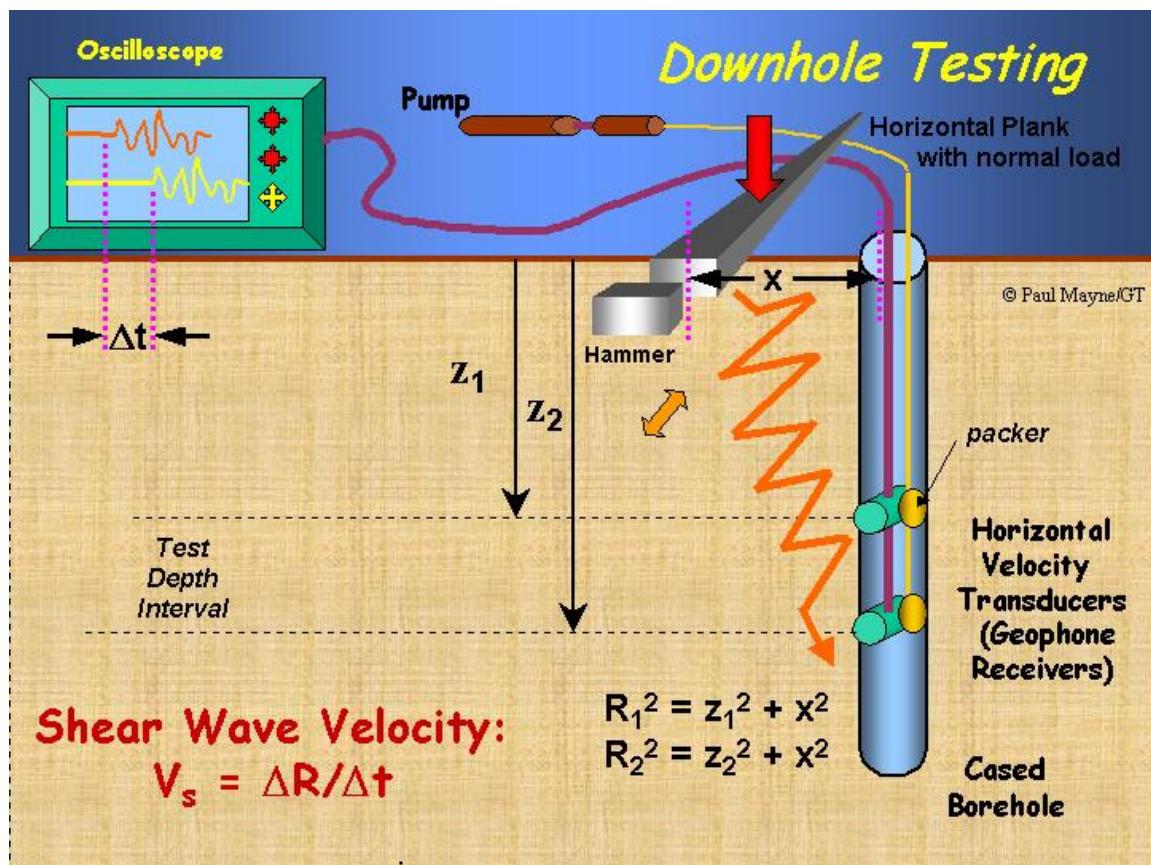


Figura 29 .Esquema de instalación del downhole

En el ensayo lo que se mide en campo es el tiempo de llegada de las ondas. Con base en los tiempos de llegada se hicieron los cálculos de velocidades y los resultados están en el anexo 4.

4. RESULTADOS DE LA RESISTIVIDAD ELECTRICA

Mediante una investigación geoeléctrica se determina la resistividad eléctrica del subsuelo. Este proceso se lleva a cabo efectuando sondeos eléctricos verticales (SEV) desde la superficie, a partir de los cuales se obtienen perfiles o curvas de variación de la resistividad.

Un SEV se efectúa mediante una disposición de cuatro electrodos, colocados sobre la superficie en línea recta simétricamente respecto a un punto central.

A través de los electrodos exteriores se hace pasar una corriente eléctrica por el subsuelo y esto produce una caída de potencial, entre los 2 electrodos interiores. Para iniciar el sondeo se colocan los electrodos de corriente a una distancia media (C/2) de 1.5 m y los electrodos de potencial a una distancia media de 0.5 m (P/2).

En la distribución Schlumberger utilizada en esta investigación, en cada sondeo se hace una serie de medidas aumentando cada vez la distancia C de tal manera que se aumente la profundidad de investigación. El aumento de la distancia entre los electrodos significa una penetración mayor de la corriente en el subsuelo, siendo $C/2$ la profundidad teórica alcanzada, debido que se supone que la corriente se distribuye según una semiesfera en el subsuelo, cuyo radio es $C/2$. La distancia entre los electrodos de potencial se amplía cuando la caída de potencial disminuye y se dificulta su lectura.

Para cada lectura de intensidad de corriente y de diferencia de potencial, y teniendo en cuenta la distancia en cada punto, se obtienen la resistividad eléctrica de acuerdo a la Ley de Ohm.

La resistividad obtenida es en realidad una resistividad aparente, si se tiene en cuenta que el subsuelo no es homogéneo ni isotrópico lo cual hace que la profundidad real alcanzada no es $C/2$ como se esperaba sino menor.

Estas resistividades se trasladan a un papel logarítmico, junto con el $C/2$ correspondiente, situando a éste en las abscisas y a aquellas en las ordenadas.

De aquí resulta la llamada curva de campo que representa resistividades aparentes vs. Distancias electródicas medias ($C/2$). Es necesario convertir esta gráfica en una de resistividades verdaderas vs. profundidades, que es el objetivo final de la investigación. En otras palabras, el resultado que se espera es dar unas capas del subsuelo, con sus correspondientes resistividades y profundidades o espesores.

La resistividad del agua es inversamente proporcional a la concentración de iones en solución por lo cual es un indicativo de la salinidad del agua. Existen tablas para determinar la concentración de cloruros con base en la resistividad y viceversa. Debe recalcarse que las resistividades están influidas por la calidad del agua así que una arena con agua salobre o salada dará una resistividad baja cuando la misma arena con agua de buena calidad dará resistividades altas.

El rango de variación es tan alto que por ejemplo en cercanías al mar en la costa atlántica se encuentran resistividades de arena con agua entre 2 y 15 Ohm-m mientras que en los llanos orientales este mismo material con agua dulce puede tener 1000 a 2000 Ohm-metro de resistividad.

En los numerales a continuación se muestran las curvas de campo e interpretadas en una misma hoja de la siguiente manera:

- a) Curva de campo: es la curva que une los puntos de campo y corresponden a las mediciones tomadas en la ejecución del ensayo. En las convenciones a mano izquierda se anota como "+ observed apparent resistivity" lo cual significa que son mediciones de resistividad aparente de acuerdo con lo

- explicado anteriormente. Los puntos van unidos mediante una curva llamada “Calculated apparent resistivity”
- Modelo Interpretado: es el diagrama de barras que aparece superpuesto a la curva de campo y se indica en las convenciones como “Computed model”.
 - RMS error en porcentaje significa que entre menor sea mejor ajuste matemático tiene la curva. Es deseable que el RMS (least square) sea menor de 2 para un excelente ajuste pero en general entre 2 y 10 se considera aceptable.
 - Para leer el modelo interpretado basta con tomar los valores de resistividad en el eje vertical, medidos en Ohm-m y la profundidad o espesor de la capa estará determinada por el principio y fin de cada barra, leyendo el espesor o profundidad en el eje horizontal de la parte superior del gráfico. Nótese que las escalas de ambos ejes son logarítmicas y que el eje horizontal de la parte inferior corresponde al espacio entre electrodos no a las profundidades.

En todos los casos se mencionará la interpretación bajo modelos de 3 a 5 capas que simplificados ya que el ajuste matemático realizado muestra entre 10 y 15 capas, las cuales se acostumbra agrupar en modelos mas generales y simplificados como se dijo.

4.1 SONDEO ELÉCTRICO TIBITOC 1

La curva corresponde a un modelo simplificado de cuatro capas principales así:

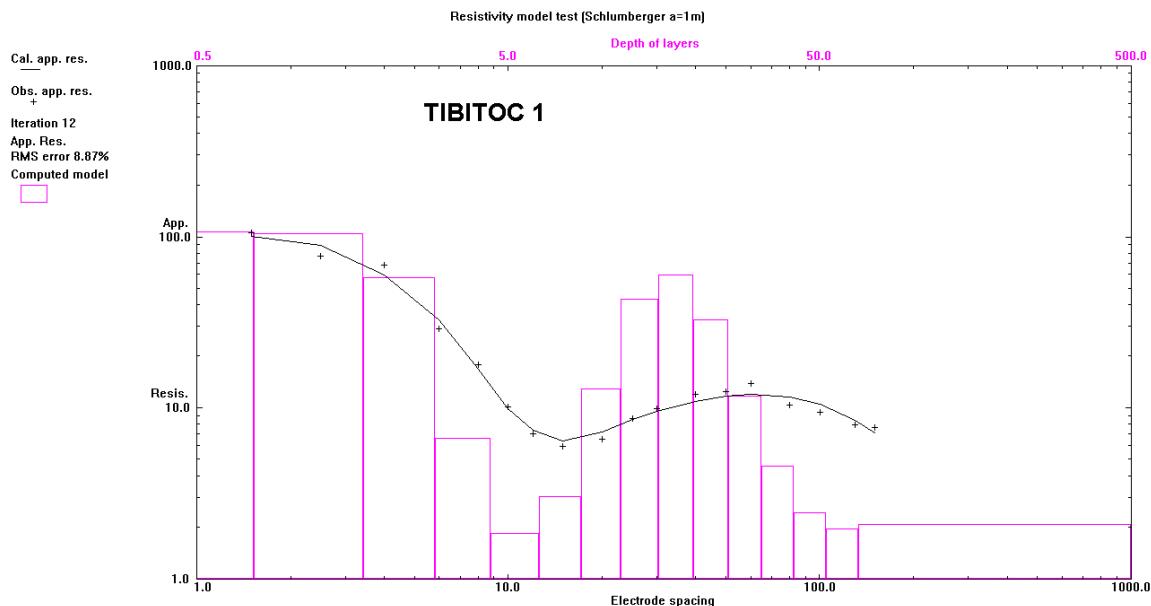
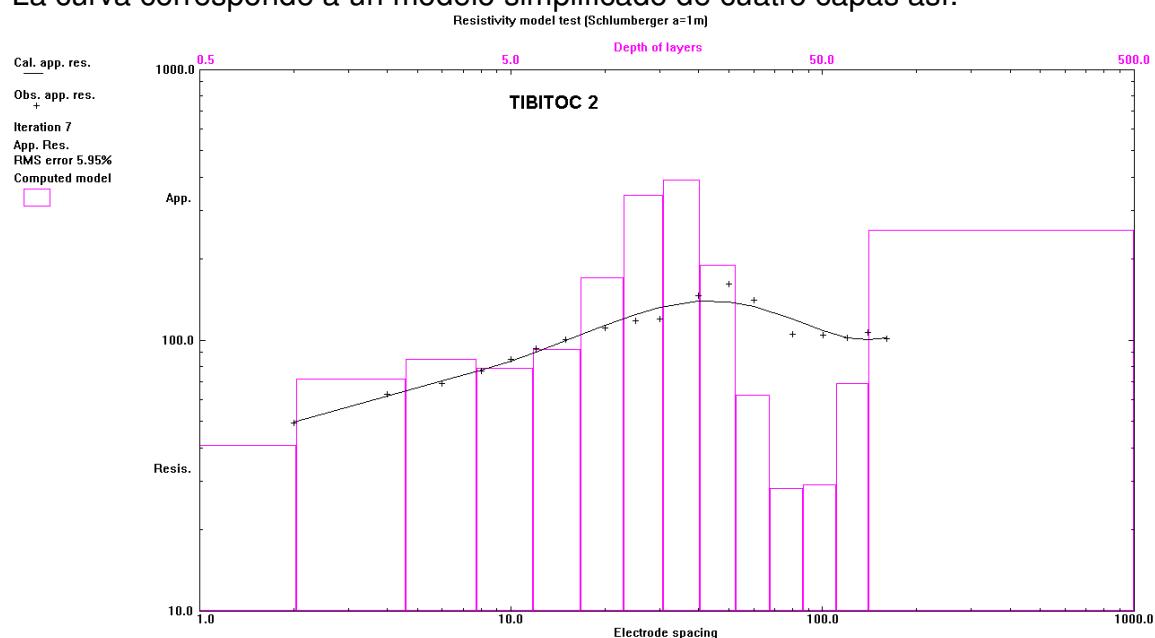


Figura 29. Sondeo eléctrico 1

Capa	Resistividad (Ohm-m)	Ubicación (m)	Correlación
1	80 a 100	0 a 3	Suelos secos
2	2 a 40	3 a 7	arcillas
3	60 a 100	7 a 25	Arenas y arcillas
4	2	25-50	Basamento con agua

4.2 SONDEO ELÉCTRICO TIBITOC 2

La curva corresponde a un modelo simplificado de cuatro capas así:

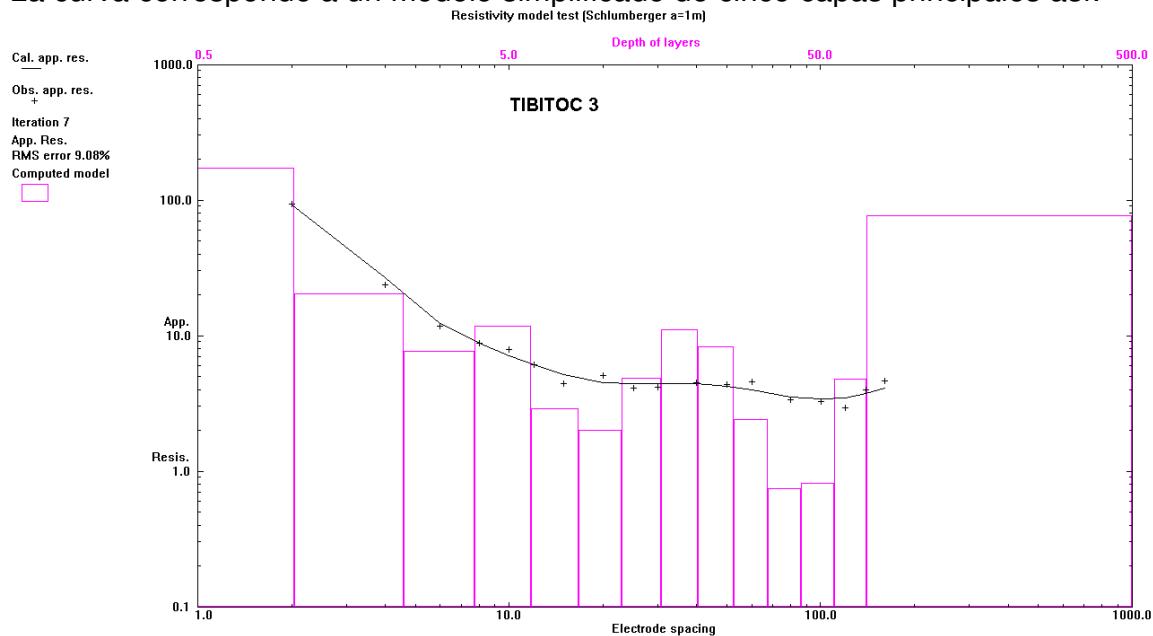


Capa	Resistividad (Ohm-m)	Ubicación (m)	Correlación
1	40 a 100	0 a 7	Suelos arcillosos secos
2	100 a 400	7 a 20	Arcillas y arenas
3	20 a 40	20 a 60	Arcillas con limos y arenas, intercaladas, con agua
4	250	50-80	Basamento rocoso con agua

De acuerdo con la interpretación realizada, el suelo tiene por lo menos 60 metros de espesor sin encontrar roca.

4.3 SONDEO ELÉCTRICO TIBITOC 3

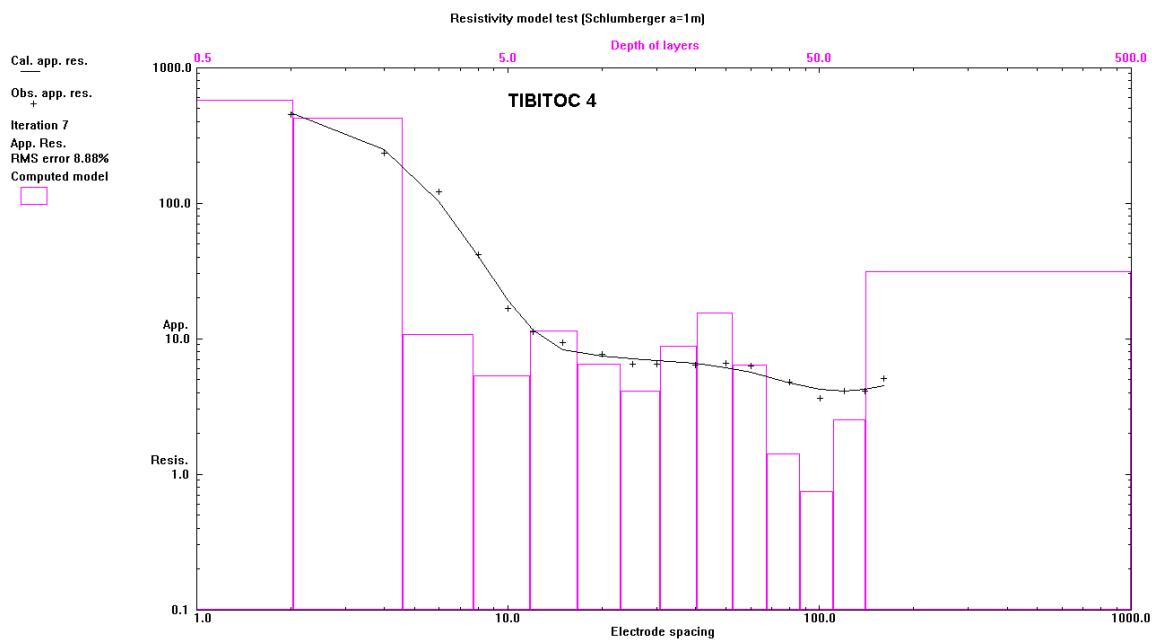
La curva corresponde a un modelo simplificado de cinco capas principales así:



Capa	Resistividad (Ohm-m)	Ubicación (m)	Correlación
1	180	0.5 a 1	Suelos secos
2	20 a 3	0.5 a 10	Arcillas saturadas
3	50 a 100	10 a 25	Arenas y arcillas
4	1 a 20	25-60	Arcillas saturadas
5	80	60- 100	Roca basal

4.4 SONDEO ELÉCTRICO TIBITOC 4

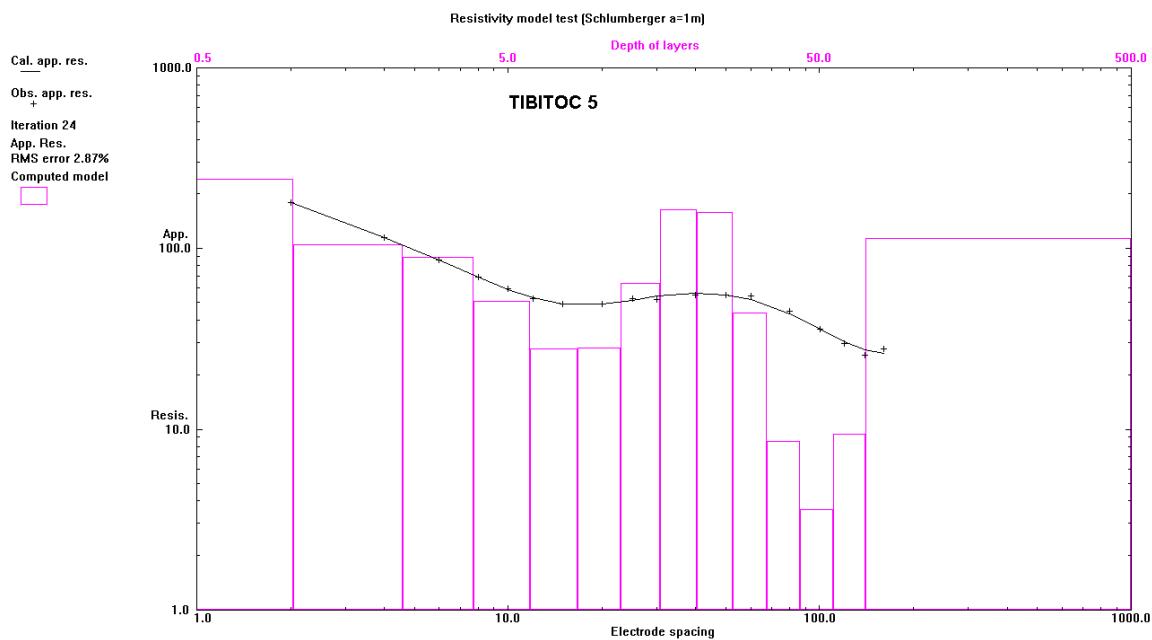
La curva corresponde a un modelo simplificado de cuatro grupos principales de capas así:



Capa	Resistividad (Ohm-m)	Ubicación (m)	Correlación
1	>800	0 a 2	Suelos secos
2	8 a 20	2 a 30	Intercalaciones de arenas y arcillas saturadas
3	1 a 3	30 a 60	Arcillas y arenas saturadas
4	30	30	Roca saturada en la base

4.5 SONDEO ELÉCTRICO TIBITOC 5

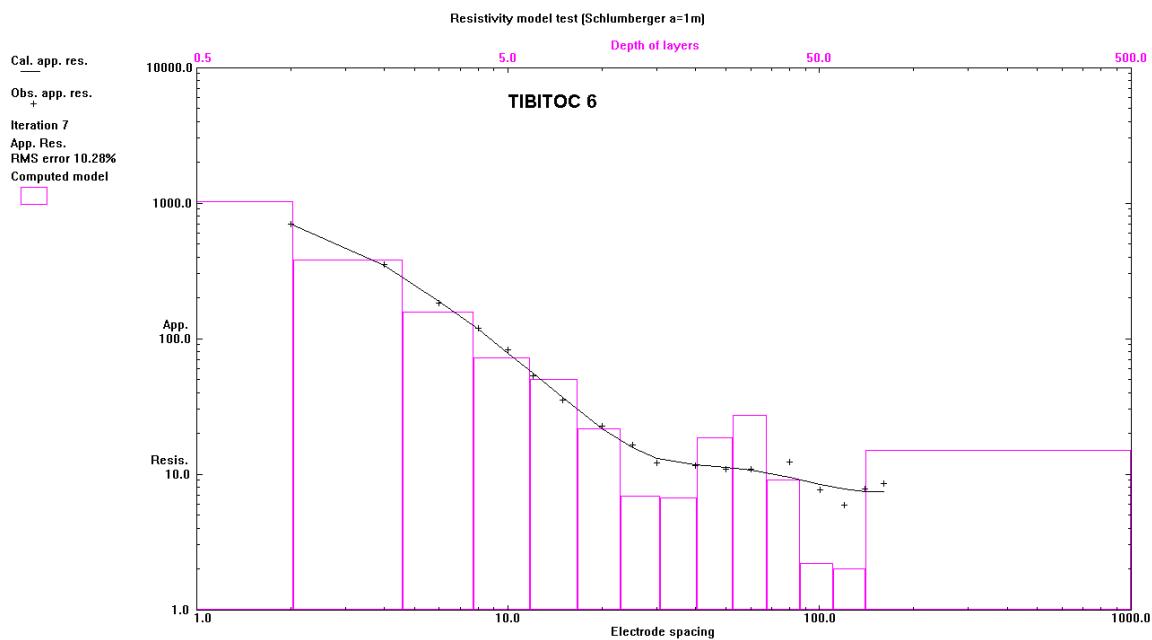
La curva corresponde a un modelo simplificado de cinco conjuntos de capas principales así:



Capa	Resistividad (Ohm-m)	Ubicación (m)	Correlación
1	250	0 a 1.5	Suelos secos
2	30	1.5 a 12	Arcillas secas
3	100 a 200	12 a 30	Arenas y arcillas
4	2 a 10	30 a 60	Arcillas y arenas saturadas
5	1200	60 a 100	Roca basal

4.6 SONDEO ELÉCTRICO TIBITOC 6

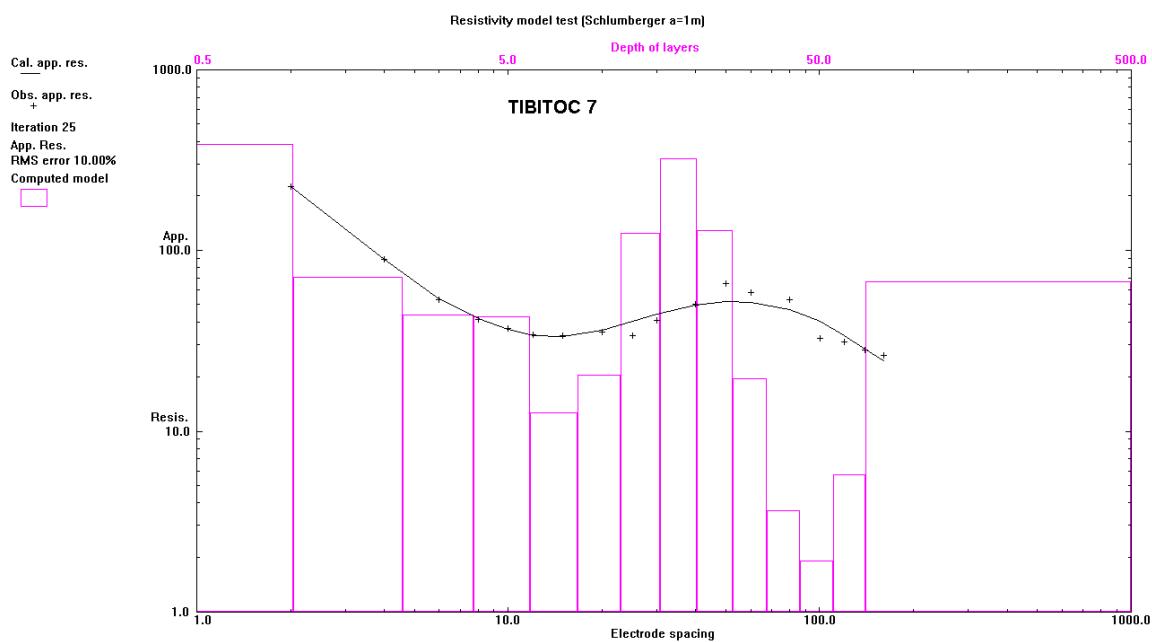
La curva corresponde a un modelo simplificado de seis capas principales así:



Capa	Resistividad (Ohm-m)	Ubicación (m)	Correlación
1	1000	0 a 1	Suelos secos
2	20 a 100	1 a 10	Intercalaciones de arenas y arcillas
3	8 a 10	10 a 20	Arcillas y limos
4	20 a 30	20 a 30	Predominio de arcillas y presencia de arenas y limos
5	2	30 a 70	Arcillas saturadas
6	15	70 a 100	Basamento

4.7 SONDEO ELÉCTRICO TIBITOC 7

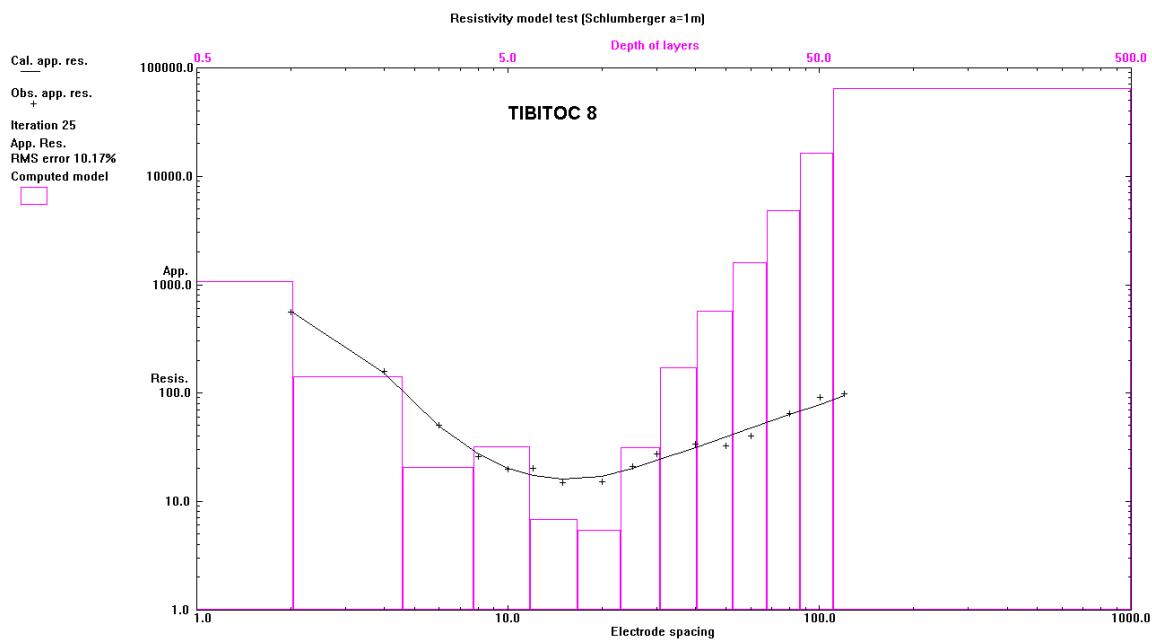
La curva corresponde a un modelo simplificado de cinco capas principales así:



Capa	Resistividad (Ohm-m)	Ubicación (m)	Correlación
1	300 a 400	0 a 1	Suelos secos
2	15 a 60	1 a 12	Arcillas y limos
3	60 a 300	12 a 25	Arenas y limos con agua
4	2 a 6	25 a 60	Intercalación arcilloso
5	65	60 a 100	Basamento arcillolita

4.8 SONDEO ELÉCTRICO TIBITOC 8

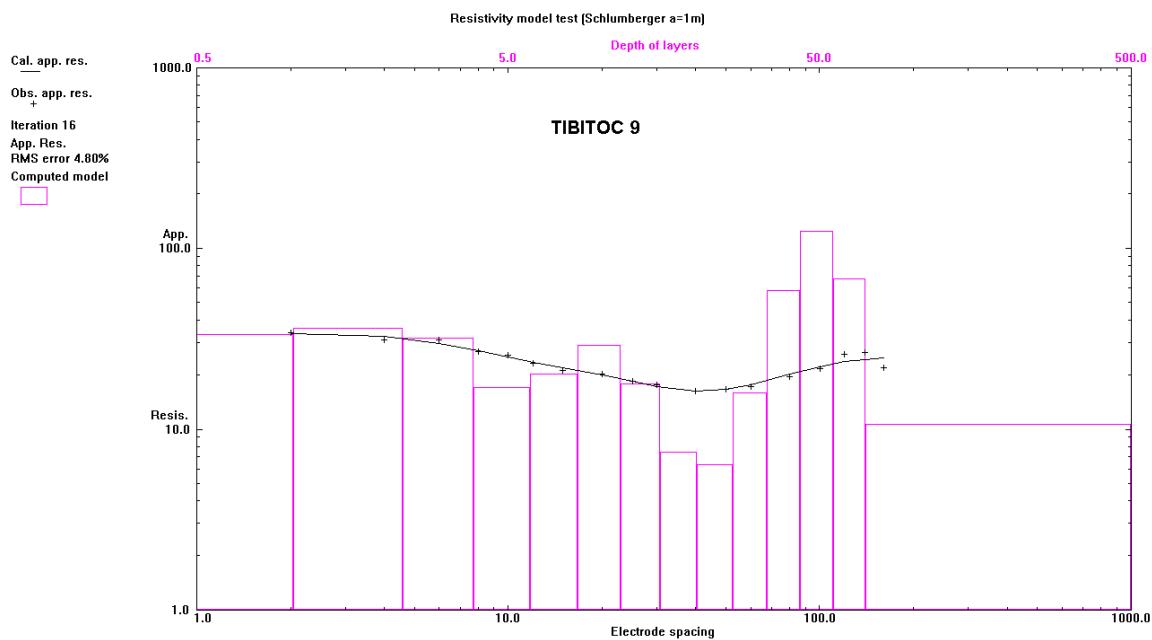
La curva corresponde a un modelo simplificado de cuatro capas principales así:



Capa	Resistividad (Ohm-m)	Ubicación (m)	Correlación
1	> 1000	0 a 1	Suelos secos
2	20 a 100	1 a 10	Arcillas y limos
3	10 a >1000	20 a 50	Residual de roca
4	>1000	50- 100	Arcillosita seca

4.9 SONDEO ELÉCTRICO TIBITOC 9

La curva corresponde a un modelo simplificado de cuatro capas principales así:



Capa	Resistividad (Ohm-m)	Ubicación (m)	Correlación
1	35	<2	Suelos secos
2	8 a 30	1 a 35	Arcillas, Limos y arenas
3	7 a 100	35 a 70	Arenas y limos
4	12	70 a 100	Basamento con agua.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Con base en los resultados obtenidos anteriormente, se concluye y recomienda lo siguiente:

- El subsuelo explorado en la zona de Tibitoc a Casablanca, se compone de tres a cuatro conjuntos de capas que corresponden a un depósito superficial limo arcilloso blando de unos 3 a 4 metros de espesor, seguido de un conjunto de depósitos coluviales y de relleno de la Sabana y de llanura de inundación sobre rocas meteorizadas y en algunos casos roca fresca.
- Existieron diferentes eventos los cuales hicieron que se encuentre en realidad una secuencia de coluviones, llanuras de inundación y depósitos de arenas y arcillas en la capa 2. Sin embargo, desde el punto de vista sísmico sus velocidades son muy similares.
- El basamento rocoso se encontró en los sondeos geoelectréticos a profundidades del orden de 50 a 70 metros como máximo y presenta cambios en la profundidad en sentido longitudinal y transversal.
- Las líneas sísmicas sugieren dos cambios principales de velocidades. El primero a profundidades entre 3 y 5 metros y corresponde al espesor de suelo sobre coluviones, depósitos de llanuras y aluviones. El segundo cambio varía pero tiende a estar alrededor de los 10 a 30 metros y representa un cambio en la densidad del material el cual se vuelve más denso a partir de esa profundidad. En algunos perfiles este cambio indica la presencia de rocas tales como arcillolitas de la Formación Guaduas y areniscas del Grupo Guadalupe.
- Algunos perfiles se interpretaron con modelos del subsuelo de 4 capas pero lo que se observa es que la diferencia entre las dos últimas no es significativa (significativo en geofísica quiere decir una relación de 2 o mayor) por lo cual se considera que el modelo es en realidad de tres capas principales.
- Las velocidades de corte y las compresionales se midieron con líneas sísmicas y con ensayos downhole lo cual permitió obtener los módulos del subsuelo tal como se explica en los numerales respectivos.
- Las interpretaciones por refracción en forma convencional y las tomografías deben verse juntas para todos los casos ya que frecuentemente no son exactamente iguales y la tomografía aporta más detalle en cuanto a las variaciones de las velocidades en el subsuelo y como consecuencia de esto se observan más detalles en los contactos.
- Desde el punto de vista geosísmico, el modelo interpretativo encontrado es el siguiente:

Descripción del material	Rango de velocidades compresional, Vp (m/seg)	Rango de velocidades de corte, Vs (m/seg)
Rellenos antrópicos y/o coluviones o aluviones poco a	450 a 550	170 a 225

medio densos, depósitos de la Formación Sabana		
Coluviones, Aluviones, Flujos de lodos, en general de granulometría media a gruesa	678 a 1466	256 a 635
Arcillolitas meteorizadas	1252 a 1500	786 a 856
Rocas tipo arcillolita	2000 a 2500	1150 a 1321
Rocas tipo arenisca	2500 a 3500	

- Desde el punto de vista de la resistividad eléctrica, el modelo del subsuelo es el siguiente:

Descripción del material	Rango de resistividades (Ohm-m)
Rellenos y capa vegetal, secos	Generalmente > 200
Rellenos , aluviales y coluviales con saturación o saturación parcial	30 a 50
Coluviales y/o Aluviales saturados, granulometría gruesa	100 a 500
Arcillas y limos saturados	10 a 20
Presencia de roca tipo arcillolita y/o arenisca.	>200

Atentamente,

ALEJANDRO ULLOA CARRILLO
Ingeniero Civil