

DOI: <https://doi.org/10.24054/16927257.v36.n36.2020.3991>Recibido: 15 febrero de 2020
Aceptado: 3 de marzo de 2020**CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA DEL SUBSUELO EN EL RELLENO
SANITARIO REGIONAL “LA CORTADA”, PAMPLONA (NORTE DE
SANTANDER) A PARTIR DE DATOS GEOFÍSICOS****GEOTECHNICAL CHARACTERIZATION OF THE SUBSUELO IN THE
REGIONAL FILLING "LA CORTADA", PAMPLONA (NORTH OF
SANTANDER) FROM GEOPHYSICAL DATA****Jalexis Adelaida Sánchez Duarte*, Manuel Antonio Contreras**
Jairo Alberto Torres *******Universidad de Pamplona**, Grupo de Investigación en Ingeniería Civil ETENOHA.
Km 1 vía Bucaramanga, Pamplona, Norte de Santander, Colombia.
E-mail: *jasd_1224@hotmail.com, **macontreras7@hotmail.com,
***jatorresp@gmail.com

Resumen: Este artículo presenta una caracterización geotécnica del subsuelo en el Relleno Sanitario Regional “La Cortada”, Pamplona (Norte de Santander). Los parámetros geotécnicos fueron obtenidos a partir de datos geofísicos usando las técnicas de Tomografía de Refracción Sísmica (TRS), Análisis Multicanal de Ondas Superficiales (MASW) y Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE). Este trabajo abarca el diseño, la adquisición, el procesamiento y la interpretación de los datos geofísicos. Se obtuvieron perfiles de suelos D y C asociados a areniscas de granos muy finos con ángulos de fricción ϕ entre $19,6^\circ$ - $15,8^\circ$ y $15,8^\circ$ - $12,3^\circ$, capacidad de carga admisible Q_a entre 20,29 - 232,19 kPa y 232,19 - 312,47 kPa respectivamente; Coeficiente de Poisson entre 0,399 y 0,44; Densidades entre 1464,8 – 1538,5 Kg/m³ entre otros parámetros de importancia. La aplicación de técnicas geofísicas actuales y modernas como complemento en la caracterización geotécnica en estudios de ingeniería, es un aporte novedoso en las ciencias de la ingeniería y la geotecnia. Finalmente se muestra un modelo integrado de la información geofísica y geológica.

Palabras clave: Relleno sanitario, TRS, MASW, TRE.

Abstract: This article presents a geotechnical characteristic of the subsoil in the Regional Sanitary Landfill "La Cortada", Pamplona (North of Santander). The geotechnical parameters were obtained from geophysical data using the Seismic Refraction Tomography (SRT), Multichannel Surface Wave Analysis (MASW) and Electrical Resistivity Tomography (ERT) techniques. This work covers the design, acquisition, processing and interpretation of geophysical data. Soil profiles D and C were obtained, associated with very fine grained sandstones with friction angles between 19.6° - 15.8° and 15.8° - 12.3° , admissible load capacity Q_a between 20.29 - 232.19 kPa and 232.19 - 312.47 kPa respectively; Poisson Coefficient between 0,399 and 0,44; Densities between 1464,8 – 1538,5 Kg/m³ among other important parameters. The application of current and modern geophysical techniques as a complement to geotechnical characterization in engineering studies, is a novel contribution in the engineering and geotechnical sciences.. Finally, a model of the geophysical and geological information is shown.

Keywords: Landfill, SRT, MASW, ERT

1. INTRODUCCIÓN

En el campo de la Ingeniería Civil conocer el comportamiento mecánico y la geología del subsuelo es de gran importancia para la proyección de obras ingenieriles como edificaciones, túneles, represas, infraestructura vial entre otras. Los estudios geotécnicos comprenden la exploración del subsuelo (apiques, perforaciones y otros), pruebas de campo y ensayos de laboratorio. Estos estudios arrojan información puntual del subsuelo, los cuales pueden ser complementados con técnicas geofísicas como Tomografía de Refracción Sísmica (TRS), Análisis Multicanal de Ondas Superficiales (MASW) y Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE); los métodos han sido aplicados a la caracterización de macizo rocoso como por ejemplo para la proyección de un túnel en San Juan, Argentina (Imohf *et al.*, 2011), en la determinación de parámetros dinámicos del subsuelo (Merchan, 2016), en rellenos sanitarios con la finalidad de detectar las posibles fugas de lixiviado como en el caso del basurero municipal de la ciudad de Gualagaychú (Pomposiello *et al.*, 2004, 2009), en la determinación de riegos de contaminación producido por los botaderos (Rivera *et al.*, 2009), en el mapeo de plumas de lixiviados con el fin de controlar la contaminación generada por el relleno sanitario “Rio Azul” en Costa Rica (Suarez y Zúñiga, 2013), en la determinación del movimiento de lixiviados al igual que el flujo de aguas subterráneas (Reyes *et al.*, 2013), en el mapeo de plumas de lixiviado en los rellenos sanitarios “El Carrasco” en Bucaramanga (Hidroingeniería S.A.S., 2016; Geología y Servicios LTDA., 2017) y “Doña Juana” en Bogotá (Alicon Ingeniería S.A.S., 2017).

En Norte de Santander existe gran variedad de yacimientos naturales de arcilla, los cuales son utilizados principalmente para fabricar productos de mampostería, lo que implica que los suelos de esta región sean principalmente arcillosos, lo cual le da características específicas a los suelos de la región (García – León y Solano 2018). Debido a la presencia de suelos arcillosos de alta plasticidad en la región nortesantandereana, se han desarrollado estudios de aplicación de productos que mejoren el comportamiento del suelo para la construcción de infraestructura como rellenos sanitarios entre otras (Gallardo *et al.* 2017).

Esta investigación busco aplicar algunas técnicas geofísica en el Relleno Sanitario Regional “La

Cortada” que actualmente se encuentra en operación y recibe residuos sólidos de regiones aledañas al municipio de Pamplona. Se emplearon métodos sísmicos TRS, MASW y el método eléctrico TRE con el fin de caracterizar geotécnicamente los suelos que se encuentran en esta zona.

Tomografía de Refracción Sísmica (TRS)

La técnica se basa en el registro del tiempo de llegada de las ondas sísmicas, que han sido refractadas críticamente en las diferentes interfaces de las capas en el subsuelo. El método consiste en perturbar el medio mediante una fuente sísmica (natural o artificial), generar ondas mecánicas y registrarlas en receptores (geófonos) ubicados en la superficie (Díaz, 2005). El método permite obtener los valores velocidades de ondas P, que son ondas de cuerpo de tipo compresional u longitudinal. Se han desarrollado muchos estudios de migración sísmica inversa considerado uno de los métodos más precisos para migrar datos sísmicos obtenidos en ejercicios de campo. La gran restricción en este caso es la migración de gran cantidad de datos como los obtenidos en la búsqueda de yacimientos de hidrocarburos, debido a los altos costos computacionales que requiere (Cabrera *et al.* 2014).

Análisis multicanal de ondas superficiales (MASW)

El método MASW consiste en el registro y el análisis de la propagación de las ondas Rayleigh, éstas son generadas también por una fuente de impacto (martillo o explosivos) ubicada en la superficie del suelo y luego son registradas utilizando géofonos, estos se disponen linealmente, equidistantes entre sí. El objetivo de este ensayo es obtener un perfil de velocidad de onda S en profundidad (1D o 2D), este perfil se obtiene mediante la inversión de las curvas de dispersión del modo fundamental de las ondas superficiales tipo Rayleigh cuando estas se transforman en el dominio de la frecuencia y la velocidad de fase (Humire *et al.*, 2012).

Tomografía de resistividad eléctrica (TRE)

El estudio de Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE) (2D), comúnmente encontrado en la bibliografía como ERT, abreviación de Electrical Resistivity Tomography o “Electrical Imaging”

(Dahlin, 2001), es un método que permite investigar la variación de la resistividad del subsuelo. Este método geofísico fue desarrollado para la investigación de áreas de geología compleja (Griffiths y Barker, 1993). Su aplicación es diversa, como en la exploración de recursos naturales y actualmente en numerosas aplicaciones ambientales, hidrogeológicas, arqueológicas y geotécnicas; el método se basa en la inyección de corriente eléctrica en el terreno, posteriormente se mide la diferencia o el potencial eléctrico en la superficie, considerando la disposición de los electrodos en superficie se puede determinar la resistividad eléctrica aparente del subsuelo (Kearey *et al.*, 2002; Lowrie, 2007); estos valores de resistividad aparente se invierten con la finalidad de encontrar los valores reales, cabe aclarar que la resistividad eléctrica es una propiedad geofísica que mide la oposición de las rocas al flujo de corriente eléctrica (Herman, 2001).

A través de la tecnología Landsat, se puede realizar una observación cronológica del desarrollo y avance del funcionamiento de rellenos sanitarios mediante el procesamiento de imágenes de este tipo (Guerrero *et al.* 2015). Se han obtenido imágenes satelitales del lugar en estudio a través de sistemas satelitales ubicados en órbita alrededor del planeta con los cuales se puede realizar seguimiento de lo que suceda en la superficie de las instalaciones del relleno sanitario como en otros estudios (Sanabria *et al.* 2010).

2. MARCO GEOLÓGICO

El municipio de Pamplona geológicamente se encuentra al lado norte del Macizo de Santander sobre la Cordillera Oriental y dentro del sistema de fallas Bucaramanga – Santa Marta a escala regional, estratigráficamente en esta zona afloran litologías de diferente orígenes y edades como rocas metamórficas del Proterozoico tardío-Paleozoico, rocas ígneas intrusivas y rocas sedimentarias de edades Paleozoicas, Mesozoicas y Cenozoicas pertenecientes al Bloque de Maracaibo.

El Macizo de Santander es un bloque que está limitado al oeste por la falla Bucaramanga- Santa Marta y al este por el sistema de fallas Pamplona-Cubogón-Mercedes (García *et al.*, 2005). Dentro del área se tiene expuestas rocas sedimentarias de edad cretácica perteneciente a las formaciones Aguardiente, Tibú Mercedes, formación Capacho perteneciente al ortogneis. El relleno sanitario “La Cortada” se encuentra sobre las formaciones Colon y Mito-Juan y la formación Luna; la zona de

estudio se encuentra limitada por el círculo rojo (Fig. 1).

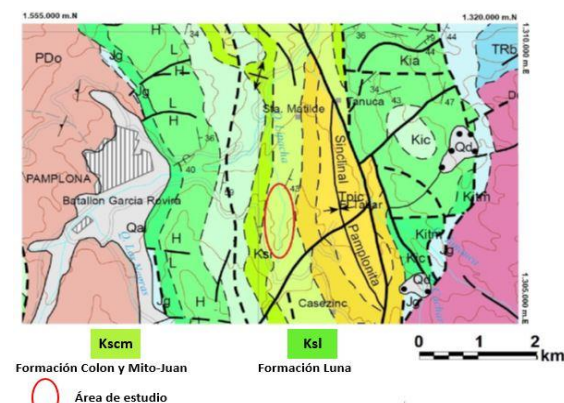


Fig. 1. Ubicación del Relleno Sanitario Regional "La Cortada" en el mapa geológico Plancha 110 Pamplona (Fuente: Ingeominas, 1977)

Formación Colon y Mito-Juan (Kscm).

La Formación Colón se caracteriza por lutitas microfósilíferas gris oscuro a negras, macizas, piríticas y ocasionalmente micáceas o glauconíticas, con margas y capas de caliza subordinada. Las lutitas son más arenosas hacia la base y hacia la parte superior, donde la unidad cambia transicionalmente a la Formación Mito Juan. De acuerdo con Ramírez y Campos (1969), la Formación Mito Juan es muy similar a Colón, de la cual se diferencia únicamente en el aumento gradual de arena hacia el tope de la formación y la diferente fractura, irregular o astillosa, en comparación con la subconcooidal de Colón.

Formación Luna (Ksl).

Inicialmente descrita por A. Garner en el año de 1926 y el nombre procede de la Quebrada La Luna, localizada al NW de la Serranía de Perijá, Zulía (Venezuela). A causa de su amplia extensión regional, en Colombia Nororiental esta Formación conserva su nombre (Morales *et al.*, 1958). Su estructura está constituida por caliza gris oscura, arcillosa, lutitas grises a negras, calcáreas, en capas delgadas; lutitas grises oscuras con intercalaciones de calizas arcillosas, concreciones de calizas con fósiles, capas delgadas de chert negro; también capas fosfáticas hacia la parte superior. En el Valle Medio del Magdalena se subdivide en el Miembro inferior Salada, el Miembro intermedio Pujamana y el Miembro superior Galembo.

3. LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA

El Relleno Sanitario Regional “La Cortada” se encuentra ubicado en el municipio de Pamplona Norte Santander, vereda de Chichira, al costado Nororiental de la vía Pamplona – Chitaga a la altura del kilómetro 5. Sus coordenadas de ubicación Norte entre 1.307.000 y 1.308.000, y Este entre 1.159.000 y 1.160.000 (sistema de coordenadas MAGNA-SIRAS), una altura promedio de 2375 m.s.n.m (Fig. 2).



Fig. 2. Línea de estudio Relleno Sanitario Regional “La Cortada” (Fuente: Google Earth, 2018)

4. METODOLOGÍA

Levantamiento topográfico

El levantamiento topográfico de la línea se realizó con una estación total de referencia GEOMAX modelo 30-2 A6 para una longitud de 180 metros, generando el perfil longitudinal del terreno con el Software Civil 3D versión 2018 de Autodesk.

Adquisición de datos Geofísicos

La adquisición de los datos para el método refracción sísmica fue realizado para dos tendidos de 90 m, los cuales fueron adquiridos con ayuda del Equipo SeisMeX16 (Subsuelo 3D) de 16 canales. Se usaron geófonos de frecuencia de 10 Hz ubicados cada 6 m; Se generaron frentes de ondas elásticas utilizando como fuente de energía la caída de una porra de 16 lb sobre una placa metálica (cuyas dimensiones son 0,25x0,25 m), se tomó un intervalo de muestreo fueron de 0,5 ms y para un tiempo de registro de 0,2 s, se adquirieron tiempos en 7 posiciones de disparos ubicados a lo largo de cada línea.

Para el método MASW 1D se adquirieron los datos con el mismo equipo, para este se hizo necesario realizar un tendido de 30 m ubicando los geófonos cada 2 m. Los disparos fueron generados al 10%, 30% y 40% de la longitud del tendido con un

intervalo de muestreo de 0,25 ms y una longitud de registro 1 s.

La técnica TRE se realizó con un tendido de 180 m, usando el arreglo tipo gradiente. Los datos fueron tomados con el equipo TERRAMETER LS (ABEM Terrameter LS, 2012), que consta de un set de cables LUND 2 cables con 21 salidas, 42 *Jumper* cable electrodo y 41 electrodos ubicados 4,5 m a lo largo de la línea.

Procesamiento de datos Geofísicos

El procesamiento de los datos sísmicos se realizó con el software (SeisImager/ SW TM, 2009), donde se hicieron picados para cada dato adquirido en el dominio del disparo, teniendo en cuenta los primeros arribos más notorios de las ondas P propagadas. A partir de los picados realizados, se obtuvo un modelo inicial para realizar una inversión por el método de Tomografía de Refracción Sísmica, la cual generó un modelo final de velocidades de ondas P, este modelo es mostrado más adelante. Se comparó el dato observado y el dato calculado obteniendo un error de 8,6 ms (Fig. 3).

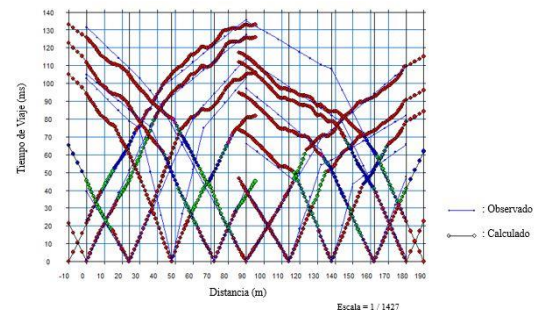


Fig. 3. Diferencia obtenida entre el dato observado con el calculado (Fuente: Autor)

Para el método MASW los de datos se transformaron al dominio de la frecuencia mediante la transformada rápida de Fourier y tras dicha conversión la diferencia de fase se computó en cada frecuencia utilizando un valor máximo de velocidad de fase de 600 m/s y un rango de frecuencia de las ondas superficiales entre 10-70 Hz, realizando el picado del modo fundamental (Fig. 4).

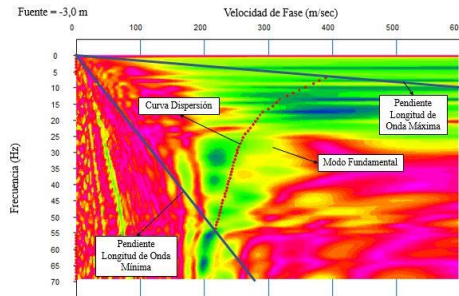


Fig. 4. Picado del módulo fundamental MASW
(Fuente: Autor)

Posteriormente se consiguió una gráfica donde se observa la curva de dispersión y la relación señal-ruido para el disparo. (Fig. 5).

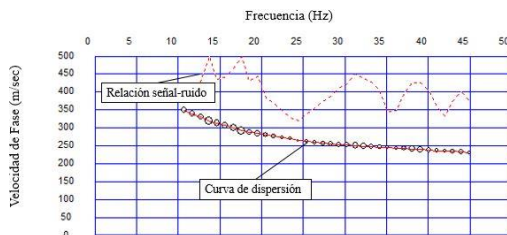


Fig. 5. Relación Señal-Ruido y Curva de dispersión
(Fuente: Autor)

Finalmente se generó el modelo invertido de velocidades de onda S con 10 iteraciones con un error RMS de 0.93 %, este modelo es mostrado en la etapa de análisis de los resultados.

Los datos de TRE fueron procesados por el software RES2DINV - v3.53g (Geotomo Software, 2010), que aplica una inversión por mínimos cuadrados amortiguada (Loke, 2000; Loke *et al.*, 2003) para generar un perfil tomográfico de resistividad eléctrica. Se obtuvieron 512 puntos de resistividades medidas y se eliminaron 30 puntos de datos malos que presentaron ruido sistemático y ruido aleatorio. En el proceso de inversión se obtuvo en 7 iteraciones con un error cuadrático medio (RMS error) de 3,5 % que se generó a partir de la pseudosección de resistividad aparente medida (datos de campo) y el modelo de la distribución de la resistividad real del subsuelo (Fig. 6), de forma que el modelo teórico de esta sea similar a las observaciones de campo.

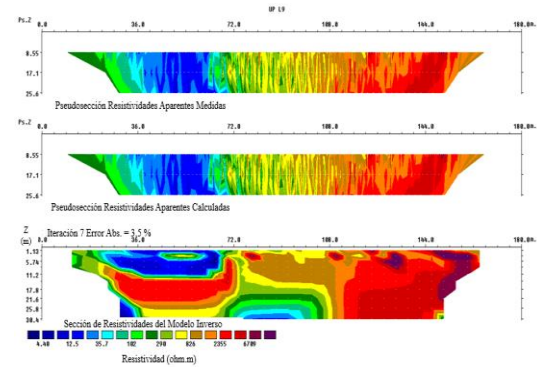


Fig. 6. Pseudosecciones de resistividades
aparentes y calculadas luego de realizar la
inversión (Fuente: Autor)

5. RESULTADOS

Los métodos sísmicos dieron como resultado valores de velocidades de onda P (Tabla 1) y S. La técnica TRS alcanzó una profundidad máxima de investigación de 43.87 metros aproximadamente. En la tabla 2 se resumen los resultados obtenidos para La técnica MASW.

Tabla 1. Descripción de velocidades, número de capas de la línea SRT (Fuente: Autor)

Capas	Descripción	Vp (m/s)
1	Celdas residuos solidos	442-866
2	Estrato 1	442-583
3	Estrato 2	583-1007
4	Estrato 3	1007-1290

Tabla 2. Descripción de velocidades, numero de capas y sus espesores para el método MASW (Fuente: Autor)

Capas	Descripción	Espesor (m)	Vp (m/s)	Vs (m/s)
3	Estrato 2	8,9	583-700	239-372
4	Estrato 3	9,1	700-780	372-421

Los resultados de la TRE se muestran en la Tabla 3. Se evidenciaron valores de resistividades bajas en un rango de 4,92 - 38.8 $\Omega \cdot m$ entre los 30 y 72 metros lineales, alcanzando una profundidad máxima hasta de 20 m.

Tabla 3. Rango de resistividad real de la línea y profundidad (Fuente: Autor)

TRE	Resistividad Mínima ($\Omega \cdot m$)	Resistividad Máxima ($\Omega \cdot m$)	Profundidad Máxima (m)
L1	4,92	6793	35

6. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Teniendo las velocidades de ondas V_p y V_s de los métodos SRT y MASW, se obtienen los parámetros dinámicos con base a las ecuaciones de módulo elástico según Khalil y Hanafy (2008), la Tabla 4, muestra los parámetros de los métodos conjugados y en la Tabla 5 solo el método MASW.

Tabla 4. Parámetros dinámicos relacionando los métodos SRT y MASW (Fuente: Autor)

Capas	3	4
V_p (m/s)	583-1007	1007-1290
V_s (m/s)	239-372	372-421
Coefficiente de Poisson	0,399-0,421	0,421-0,44
Densidad (Kg/m ³)	1464,8-1519,2	1519,2-1538,5
Módulo de Rigidez ϵ (kN/m ²)	83675,9-210238,5	210238,5-272687
Módulo de Young E (Pa)	234125,3-597497,8	597497,8-785338,7
Φ	19,6-15,8	15,8-12,3
Qf (kPa)	321,18-928,76	928,7-1249,91
Qa (kPa)	20,29-232,19	232,19-312,47

Tabla 5. Parámetros dinámicos método MASW (Fuente: Autor)

Capas	3	4
V_p (m/s)	583-700	700-780
V_s (m/s)	239-372	372-421
Coefficiente de Poisson	0,399-0,303	0,303-0,294
Densidad (Kg/m ³)	1464,8-1519,2	1519,2-1538,5
Módulo de Rigidez ϵ (kN/m ²)	83675,9-210238,5	210238,5-272687
Módulo de Young E (Pa)	234125,3-547881,5	547881,5-705714
Φ	19,6-34,42	34,42-35,70
Qf (kPa)	321,18-928,76	928,7-1249,91
Qa (kPa)	20,29-232,19	232,19-312,47

En el perfil las capas 3 y 4 corresponden a tipos de suelos D y C respectivamente, teniendo en cuenta estos se puede obtener una apreciación del espectro de respuesta del comportamiento del suelo para una estructura de grado de importancia I en zona de amenaza sísmica alta; está definido para un

coeficiente de amortiguamiento del 5% de acuerdo con NSR-10 (Decreto 926, 2010) (Fig. 7).

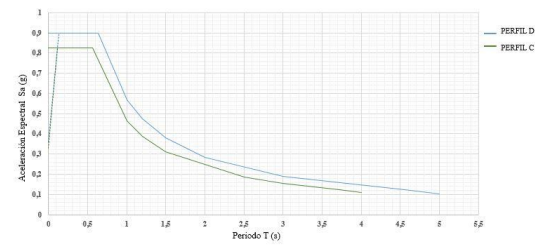


Fig. 7. Diagramas de aceleración espectral para diferentes tipos de suelos (Fuente: Autor)

De los resultados obtenidos por cada método geofísico, las velocidades de onda P entre (442-866 m/s) se asocian para material de desechos (residuos sólidos) evidenciando la acumulación de lixiviados producidos por estos en las celdas del relleno sanitario. De acuerdo con la geología local de la zona en las líneas sísmica y eléctrica se encontró depósito coluvial transportado que se caracteriza por tener roca fragmentada angulosa en forma de lajas con una matriz limo-arcillosa considerándose como un suelo meteorizado de grado IV, limolita de grado de compactación mayor, areniscas de grano muy fino y finalmente se encontró afloramiento de roca chert. En la Figura 8.

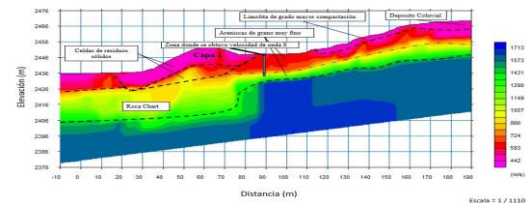


Fig. 8. Interpretación de resultados de Refracción Sísmica (Fuente: Autor)

La caracterización geotécnica para la Zona donde se realizó el método de MASW se obtuvo una profundidad máxima confiable de 10,5 metros donde el material que compone las Capa 1 y 2 es el mismo siendo rígido en la parte superior y denso o roca blanda en el sustrato, estos estratos son de arenisca de grano muy fino que hacen parte de las rocas sedimentarias (Fig. 9).

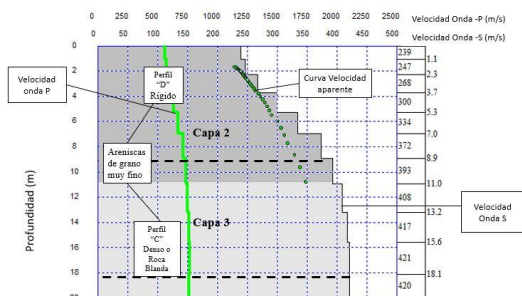


Fig. 9. Interpretación de resultados de MASW
(Fuente: Autor)

En el caso de la técnica TRE el perfil de resistividades presentó anomalías; el relleno sanitario tiene una profundidad máxima de 20 metros aproximadamente evidenciando la presencia de material de desecho saturado con lixiviado en la cual las resistividades varían entre 4,92 – 38,8 $\Omega.m$ y en los tipos de perfiles D y C la resistividad es aproximadamente 861 $\Omega.m$ (Fig. 10).

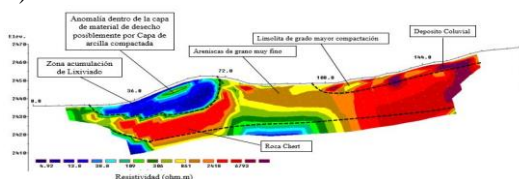


Fig. 10. Interpretación de resultados de TRE
(Fuente: Autor)

Finalmente se integran los resultados de los métodos geofísicos con la información geológica de la zona para generar un perfil del subsuelo mostrando los espesores aproximados para cada estrato a lo largo de la línea (Fig. 11).

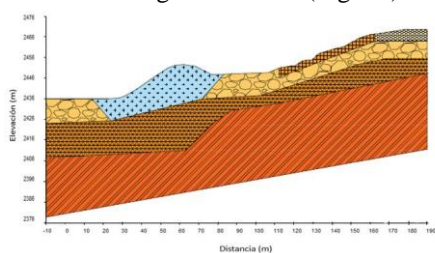


Fig. 11. Perfil final con geología local (Fuente: Autor)

7. CONCLUSIONES

La profundidad de la celda del relleno sanitario se encuentra aproximadamente a 20 m con velocidades de ondas V_p (442-866 m/s) y resistividades en el rango de (4 $\Omega.m$ -30 $\Omega.m$). El análisis de los parámetros dinámicos del suelo fue enfocado para obras civiles de grado de importación I, por lo que el riesgo sísmico, la

resistencia del suelo, y las propiedades de deformación del suelo de cimentación puede ser obtenido para los diseños preliminares de cimentación. De acuerdo con la NSR-10 los perfiles de suelos en la zona son D y C con ángulos de fricción ϕ que varían entre $19,6^\circ$ - $15,8^\circ$ y $15,8^\circ$ - $12,3^\circ$, la capacidad de carga admisible Q_a de los suelos oscila entre los rangos de 20,29 - 232,19 kPa y 232,19 - 312,47 kPa respectivamente; finalmente cabe resaltar que el municipio de Pamplona se encuentra zona de amenaza sísmica alta para los factores del comportamiento de aceleración espectral, se debe tener cuidado al aplicar los resultados, ya que el uso de la V_{s30} como un indicador de riesgo sísmico en el sitio es sólo aproximada.

RECONOCIMIENTO

Agradecimientos al Programa de Ingeniería Civil de la Universidad de Pamplona, al Programa RC0266 de 2013 Cofinanciado por Colciencias-Ecopetrol.

REFERENCIAS

- Imhof, A. Sánchez, M. Calvo, C. y Martin, A. (2011). Aplicación de la tomografía de refracción sísmica para el diseño de un túnel en la montaña Santa Clara, San Juan, Argentina. *Earth Sciences Research Journal*, Vol 26 No 2:81-88.
- Merchán, S. (2016). Determinación de los parámetros dinámicos de los suelos mediante el uso del aparato de refracción sísmica en un lote del municipio de Charta., Santander. Universidad Industrial de Santander.
- Pomposiello, C. Favetto, A. y Ostera, H. (2004). Resistivity imaging and ground penetrating radar survey at Gualagaychu landfill, Ríos province, Argentina: Evidences of contamination plume. *Revista Latino-Americana de Hidrologia Subterranea (ALHSUD)*.
- Pomposiello, C., Dapeña, C., Boujon, P. y Favetto, A. (2009). Tomografías eléctricas en el basurero municipal ciudad de Gualagaychu, Provincia de Entre Ríos: Evidencias de contaminación. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 64 (4): 603-614.
- Rivera, F., Aparicio, O. (2009). Evaluación Geoeléctrica del antiguo botadero de residuos sólidos urbanos de Mariona. Tesis de Grado. Universidad De El Salvador.
- Suarez, J. y Zúñiga, H. (2013). Detección de capas de desechos con métodos geoeléctricos: caso

- relleno sanitario río Azul, Costa Rica. *Revista geológica de América central*, 49:129-139.
- Reyes, L. Vázquez, M. Pedroza, S. Gómez, G. y Macedo, M. 2013. Estudio geoelectrónico y hidroquímico para mapear la pluma de lixiviados derivados de un basurero a cielo abierto en Mexicalzingo, Estado de México. *Revista latinoamericana de recursos naturales*, 9(1):107114.
- Hydroingeniería S.A.S., 2016. Aplicación de Tomografías de resistividad eléctrica y sondeos electromagnéticos en dominio del tiempo en el Relleno Sanitario El Carrasco, Informe de consultoría.
- Geología y Servicios LTDA., 2017. Exploración geofísica mediante el método de tomografía de resistividad eléctrica (TRE) en el Relleno Sanitario El Carrasco, Informe de consultoría.
- Alicon Ingeniería S.A.S., 2017. Aplicación del método geofísico de tomografía de resistividad eléctrica en el Centro de Gerenciamiento de Residuos Sólidos Doña Juana, Informe de consultoría.
- García-León, R.A., Solano, E.F., 2018. Caracterización térmica de mezclas de arcilla utilizadas en la fabricación de productos de mampostería para la construcción. *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada* ISSN: 1692-7257.
- Gallardo, R.J., Cuanalo, O.A., Quintero, L.J., Muñoz, A.A., Martínez, C.A., 2017. Análisis del Comportamiento de Suelos de Alta Plasticidad con la Adición del Material de Residuos en la Fabricación de Ladrillo Cerámico. *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada* ISSN: 1692-7257.
- Díaz, J. A. (2005). *Dinámica de suelos*. México, DF: Limusa / UNAM.
- Cabrera, F.C., Castaño, J.D., Vivas, F.A., 2014. Estabilidad y Dispersión Numérica de la Migración Sísmica RTM en 2D. *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada* ISSN: 1692-7257.
- Humire, F., Sáez, E., Leyton, F. y Yáñez, G. (2012). Aplicación del Análisis Multi-canal de Ondas Superficiales para la Obtención del perfil Velocidades en diferentes tipos de Suelos. Departamento de Ingeniería Estructural y Geotécnica, Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile.
- Griffiths, D.H. and Barker, R.D., (1993). Two-dimensional resistivity imaging and modelling in areas of complex geology. *Journal of Applied Geophysics*, 29, 211-226.
- Kearey, P., Brooks, M., and Hill, I. 2002. *An introduction to geophysical exploration*. Third Edition. Blackwell Scienc, 262p.
- Lowrie, W. (2007). *Fundamentals of geophysics*. Second Edition. New York. Cambridge University Press, 381p.
- Herman, R. (2001). An introduction to electrical resistivity in geophysics. *American Journal of Physics*, 69 (9): 943.
- Guerrero, T.E., García, C.A., Gallardo, R.J., 2015. Identificación de Coberturas Vegetales a partir de Imágenes Satelitales sobre la Cuenca Media y Baja del Catatumbo. *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada* ISSN: 1692-7257.
- Sanabria, J.J., Archila, J.F., Bautista, L.E., 2010. Discriminación de usos del suelo a partir de imágenes multiespectrales. *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada* ISSN: 1692-7257.
- García, C., Ríos, C., and Castellanos, O. 2005. Medium-pressure metamorphism of the Silgará Formation in the central Santander Massif, eastern cordillera, Colombian Andes: constraints for a collision model. *Boletín de Geología*, 27(2): 43-68.
- Ingeominas, (1977). *Geología del cuadrángulo H13, Municipio de Pamplona*, Mapa Geológico del Departamento de Santander, Servicio Geológico Colombiano.
- Ramírez, C. y Campos, V. (1969). *Geología de la región de la Grita-San Cristóbal, estado Táchira*. *Memorias del IV Congreso Geológico de Venezuela*, vol. 2: pp. 861-897.
- Morales, L., Podesta, D., Hadfield, W., Tanner, H., Jones, S., et al., 1958, General geology and oil occurrences of Middle Magdalena Valley, Colombia: In *Habitat of oil symposium: American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, pp. 641-691.
- Abem Terrameter LS, 2012. *Manual de instrucción Terrameter L*.
- SeisImager/SWT M, Manual, 2009, Versión 3.0, PickwinT M v. 4.0.1.5 WaveEqT M v. 2.3.0.8 GeoPlotT M v. 8.4.1.3
- Loke, M.H., (2000). Topographic modelling in resistivity imaging inversion. 62nd EAGE Conference & Technical Exhibition Extended Abstracts, D-2.
- Loke, M.H., Acworth, I., Dahlin, T., (2003). A comparison of smooth and blocky inversion

methods in 2D electrical imaging surveys. *Explor. Geophys.* 34, 182–187.

Geotomo Software. 2010. Rapid 2-D Resistivity & IP Inversion using the leastsquares method Wenner (α, β, γ), dipole-dipole, inline pole-pole, poledipole, equatorial dipole-dipole, offset pole-dipole, Wenner-Schlumberger, gradient and non-conventional arrays On land, water and cross-borehole surveys. Malaysia.

Khalil, M.H., Hanafy, S.M., (2008). Engineering applications of seismic refraction method: a field example at WadiWardan, Northeast Gulf of Suez, Sinai, Egypt. *J. Appl. Geophys.* 65, 132–141.

Decreto 926 NRS-10, 2010. Requisitos Generales de Diseño y Construcción Sismo Resistente, Bogotá D.C: Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Págs. 186, 34.