

## Obtención de parámetros geotécnicos en la ciudad de Luanda a partir de sondeos eléctricos verticales

Maria A. Pereira de Barros-da Silva  
Héctor M. Fernández-Núñez  
Gabriela J. Pereira Teixeira-Pires  
José Pérez-Lazo

### Resumen

La presente investigación tuvo como objetivo obtener el índice de resistencia a la penetración de los ensayos de penetración estándar N a partir de Sondeos Eléctricos Verticales (SEV) realizados en un perfil de la Ciudad de Luanda, Angola. Para ello se desarrolló un procedimiento metodológico que considera igualar el número de abertura  $AB/2$  al número de capas para ser analizados con los datos de los ensayos de Penetración Estándar (prueba de penetración dinámica); los resultados muestran excelentes correlaciones lineales entre los valores de resistividad aparente y los parámetros de Dar Zarrouk con los valores de N para las condiciones ingeniero geológicas de esta ciudad. Se concluye que la reinterpretación de SEV ya realizados en la ciudad de Luanda permite obtener los parámetros geotécnicos necesarios para la cartografía geotécnica de la ciudad.

**Palabras clave:** Geotecnia; Sondeos Eléctricos Verticales; Parámetros de Dar Zarrouk, Resistividad Aparente.

## Geotechnical parameter estimation in Luanda city based on Vertical Electrical Surveys

### **Abstract**

The objective of this investigation was to estimate the penetration resistance rate of the N standard penetration test based on the Vertical Electrical Surveys carried out in the city profile of Luanda, Angola. The methodological procedure implemented involved of equaling the opening number  $AB/2$  to the number of layers to be analyzed together with the Standard Penetration test data (Dynamic Penetration Test). The results show excellent linear correlations between the apparent resistivity values and the Dar Zarrouk parameters with the N values for the engineering and geological conditions of the city. SEV reinterpretations completed in the city of Luanda allow obtaining the required geotechnical parameters to complete the information needed for generating a geotechnical map of the city.

**Keywords:** Geotechnique; Vertical Electrical Surveys; Dar Zarrouk parameters; apparent resistivity.

## 1. INTRODUCCIÓN

Los métodos geofísicos aplicados a la ingeniería geológica y en estudios geotécnicos no constituyen una novedad en la actualidad, pero al ser los equipamientos cada vez más sofisticados, desde el punto de vista tecnológico, permite que se utilicen masivamente para realizar diferentes tipos de trabajos someros.

Cuando se emplea un método geofísico cualquiera se hace con un fin determinado y la metodología empleada de adquisición, procesamiento e interpretación se diseña para este objetivo, pero la ambigüedad de la respuesta geofísica nos indica que el campo medido responde a todo lo que esté debajo de la superficie, es por eso que pueden reinterpretarse campos geofísicos con una metodología de adquisición diferente para ser aplicado a otros objetivos técnicos; por lo que en el caso de estudio del presente trabajo los datos de los Sondeos Eléctricos Verticales (SEV) utilizados proceden de investigaciones precedentes de trabajo hidrogeológico (Auge 2008).

Dentro de la geofísica somera los métodos eléctricos son los de mayor uso, por su bajo costo y por la rapidez con que se obtienen los resultados. Estas bondades favorecen su empleo para estudios hidrogeológicos (Bosch 2001), geotécnicos (Bolton *et al.* 1985), ambientales (Casas & Busquets 1995) y otros (Arias 2011) en que las fuentes de estudios no poseen profundidades elevadas; por tal motivo, existen trabajos que después de haber sido utilizados para cierto objetivo quedan en el olvido, sin que sean empleados para otros usos que no sean los propuestos para resolver la tarea técnica, ya sea científica o de servicio, para los que fueron creados.

Los métodos eléctricos con fines geotécnicos han sido ampliamente aplicados a nivel mundial (Fauzi, Irsyam & Fauzi 2014; Arias & Vargas 2003; Arias 2011), adoptándose metodologías para cada una de las situaciones ingeniero-geológicas particulares de las regiones de estudio. Primeramente, Braga *et al.* (1999) obtuvieron correlaciones lineales entre los parámetros de Dar Zarrouk con los resultados de los ensayos de penetración estándar (SPT), desarrollados por Cosenza *et al.* (2006). Utilizando un levantamiento 2D con dispositivo Wenner, establecieron correlaciones lineales importantes entre los valores de resistividad obtenidos y los valores de penetrómetro estático expuestos por Sudha *et al.* (2009), quienes, a su vez, utilizaron una tomografía eléctrica y obtuvieron dependencias lineales entre las resistividades obtenidas y los valores de SPT; mientras que Oh & Sun (2008),

empleando otros procedimientos, llegaron a similares resultados, lo cual demuestra que los métodos eléctricos constituyen una alternativa eficaz para las investigaciones geotécnicas.

Teniendo en cuenta lo antes expuesto se evidencia que el estudio de la resistividad puede ser empleado para hacer estimaciones de la calidad geotécnica de los suelos, por lo cual el objetivo del presente trabajo es reinterpretar tres sondeos eléctricos verticales realizados en la ciudad de Luanda para, a partir de ellos, obtener la dependencia del parámetro N (número de golpes) de los ensayos geotécnicos de SPT con los valores de resistividad y de los parámetros de Dar Zarrowk.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1. Localización geográfica

El área de estudio es un perfil NW-SE que atraviesa al municipio de Kilamba-Kiaxi y se extiende hasta los límites del municipio de Viana de la ciudad de Luanda, Angola (Figura 1).

En el área se han realizado innumerables estudios hidrológicos (Miguel 2001) y geotécnicos (Horta da Silva 1975), los cuales fueron utilizados para la realización de este trabajo.

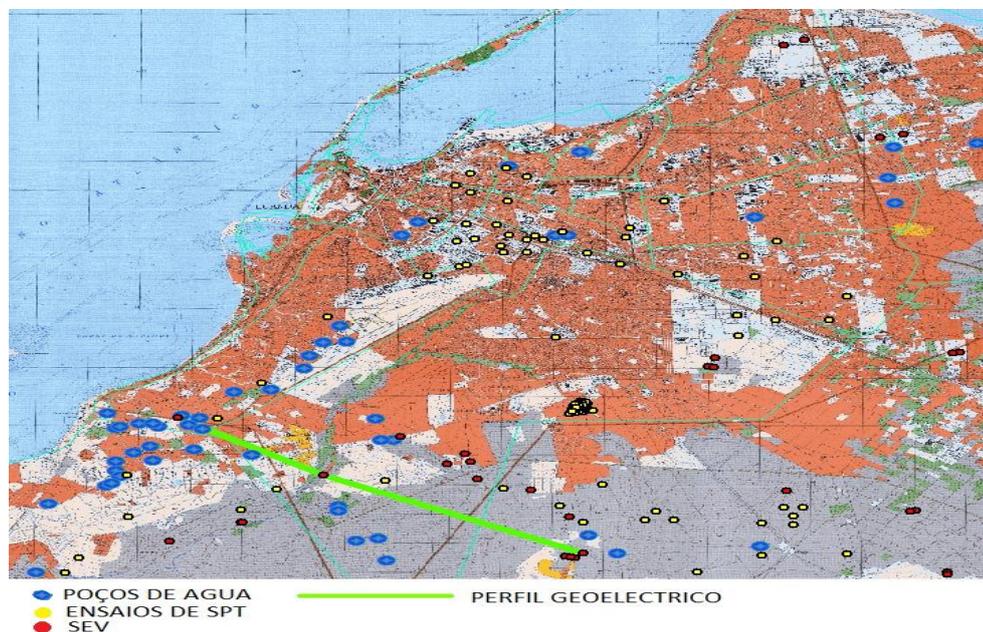


Figura 1. Localización del área de estudio.

El perfil de estudio se encuentra en un nivel de terraza de segundo orden y atraviesa la zona del valle del río Cambamba Cabolombo y es predominante el relieve llano (Figura 2).

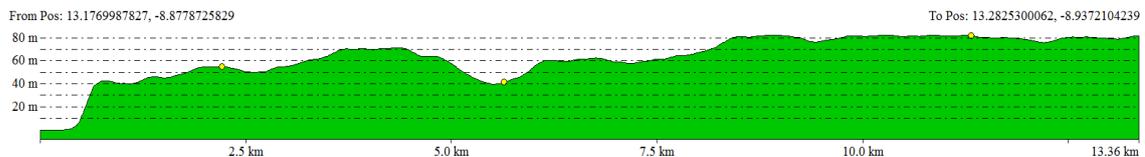


Figura 2. Perfil topográfico del área de estudio.

Los sondeos eléctricos verticales utilizados fueron los realizados con fines hidrogeológicos en la ciudad de Luanda por el Departamento de Geofísica de la Facultad de Ciencias de la Universidad Agustino Neto (Luanda, Angola), donde fue utilizado un equipo geoelectrico modelo PASI 16 GL de fabricación italiana. Las principales características de este equipamiento son:

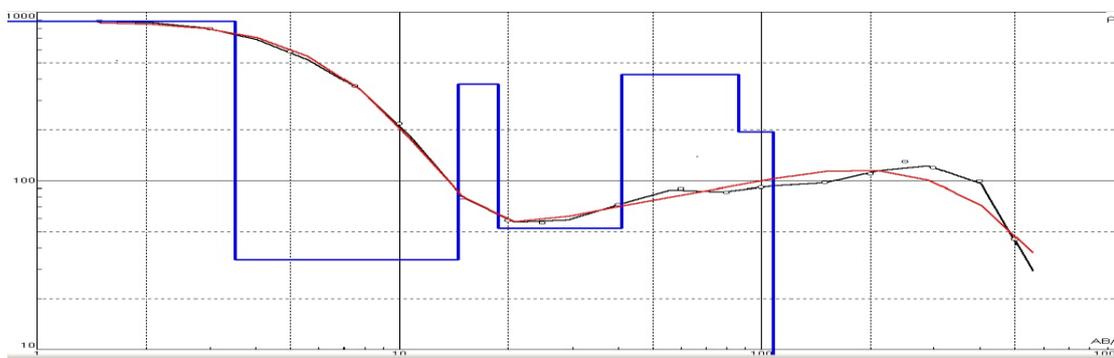
- Efectúa y memoriza registros con 16 bit.
- La tensión para AB está en el rango entre  $\pm 20$  mV y  $\pm 1\ 280$  V.
- La resolución máxima es de 600 mV, con un rango de  $\pm 20$  mV.
- Su máxima tensión conmutable es de 1 000 V, con características del energizador a conectar de 900 V máximo (para salidas de 1 800 V de pico-pico) y 0,5 A máximo, con protección contra elevado flujo de corriente a través de un fusible auto-restaurante.
- El instrumento tiene una autonomía superior a 50 horas, con filtración para ruidos de red eléctrica de 50/60 Hz.
- Posee dos baterías para memorizar los datos: una de plomo, que se puede cargar desde un campo externo, y la otra de litio.

Para la aplicación práctica de los métodos de resistividad existen diferentes tipos de arreglos de los electrodos. En este estudio se aplicó la configuración del dispositivo Schlumberger, donde la distancia MN es pequeña en relación con AB, generalmente  $AB/5 > MN > AB/20$ . En la práctica MN se mantiene tan pequeño como sea posible siempre que se puedan conseguir lecturas correctas del voltímetro.

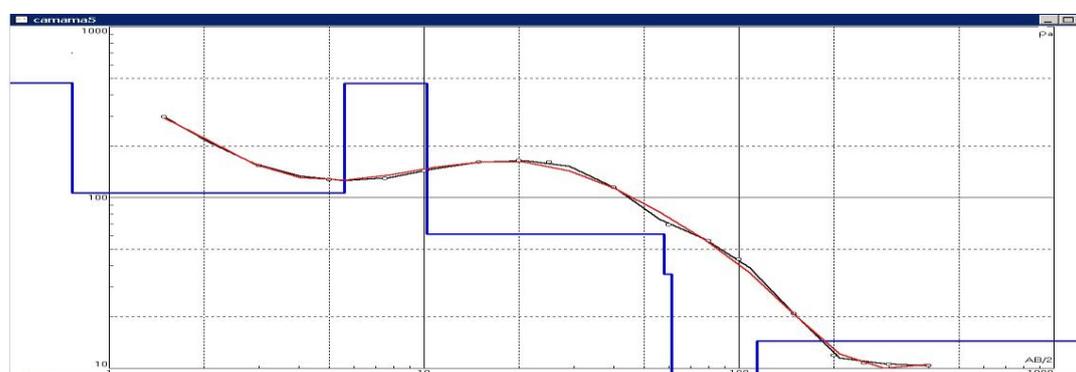
El AB/2 máximo utilizado fue de 500 m. En algunos casos, los bajos valores de tensión permitieron aperturas máximas de AB/2 de tan solo 200 m a 300 m; las distancias entre electrodos de potencial (MN) variaron desde 1 m hasta 40 m, como valores mínimos y máximos, respectivamente.

Se calcularon las profundidades y resistividades reales una vez que se representaron los datos en papel logarítmico y se obtuvieron las curvas que fueron interpretadas empleando las tablas de Orellana & Money (1966), por el método de los puntos auxiliares, y luego reinterpretadas a través del programa informático IPI 2WIN, disponibles en el

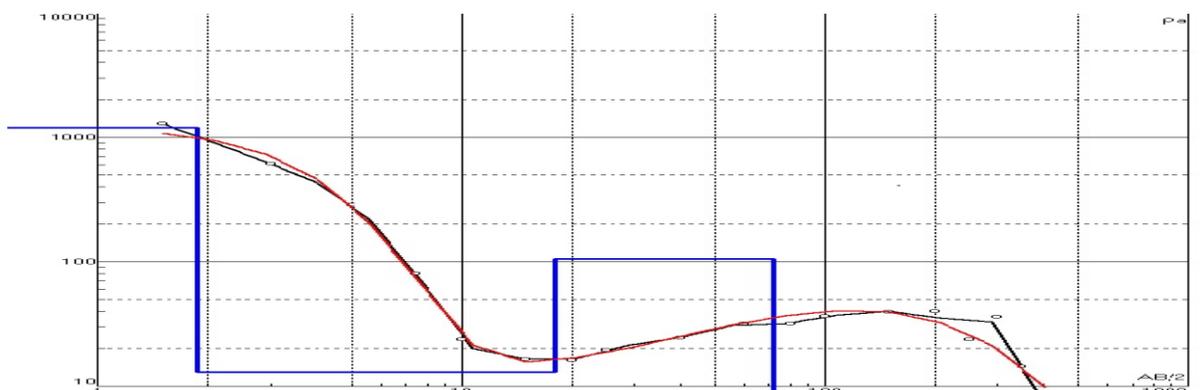
Departamento de Geofísica de la Universidad Agostino Neto (Figura 3 a, b y c).



a): SEV Camama 1



b): SEV Camama 5



c) SEV Multiperfil

Figura 3 a, b, c: Curvas de SEV de campo e interpretadas.

Para el desarrollo de la investigación se escogió un perfil con SEV paramétrico próximo a un pozo con columna litológica completa y resistividades, por tanto, puede atribuirse directamente a los materiales descritos, en este caso fue el SEV Multiperfil. De igual manera el resto de los otros sondeos se encuentran dentro del Mapa Geológico de Luanda, escala 1:25 000, el cual brinda buena información para la interpretación.

## 2.2. Litología

En el área se distinguen dos unidades lito-estratigráficas: las superficiales, que corresponden a las unidades recientes del Pleistoceno, y las del substrato, al Mioceno-Plioceno. Las unidades recientes incluyen: las arenas de playa (ap), que constituyen las islas y cordones litorales; los sedimentos de terraplén (T), formados por materiales heterogéneos; los aluviones (al), constituidos por sedimentos fluviales y lacustres; los depósitos de vertientes (a3) y los conos de deyección (a2); y los aluviones recientes (a1), que están asociados a las líneas de agua, las unidades de arcillas negras o arcillas de Cazenga (Q3), la formación Quelo (Q2) y arenas grises (Q1), constituidas esencialmente por arenas de edad Pleistoceno, se incluyen también en las unidades superficiales. Las unidades del substrato corresponden a la formación Luanda (p1) del Plioceno, compuesta por materiales no consolidados, arenas, sílices y arcillas y materiales consolidados como las arenitas y la formación Cacuaco (m1c), formada por carbonatos descompuestos y calcáreos. Las unidades más antiguas que afloran en el área corresponden a la formación Quifangondo, que está dotada de margas y arcillas (m1) del Mioceno (Figuras 4 y 5).

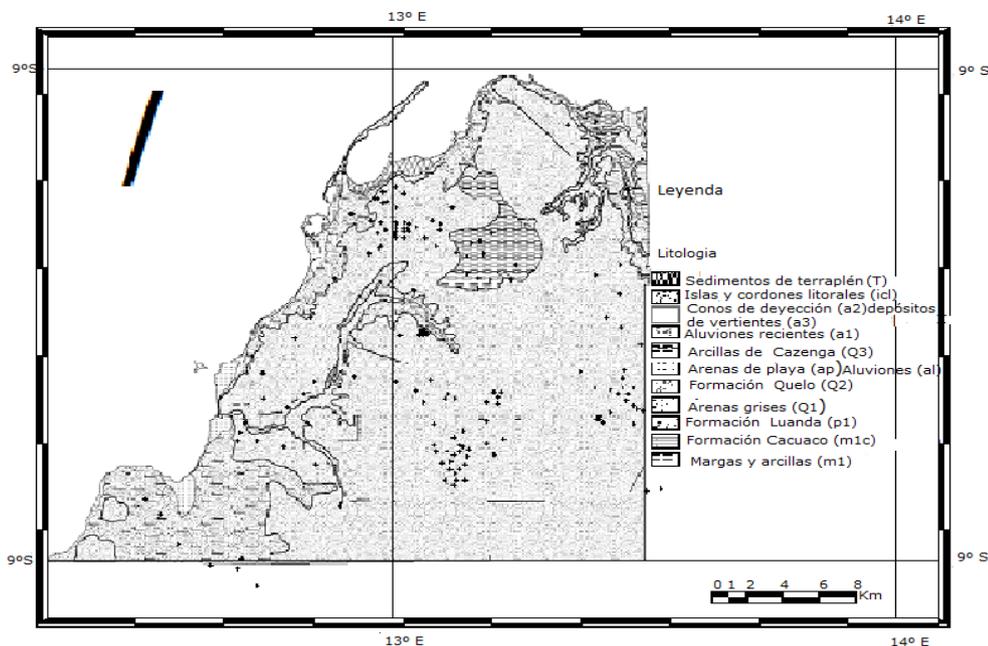


Figura 4. Carta litológica de la ciudad de Luanda y localización de los puntos de SPT y SEV (tomado de Pires & Fernández 2007).

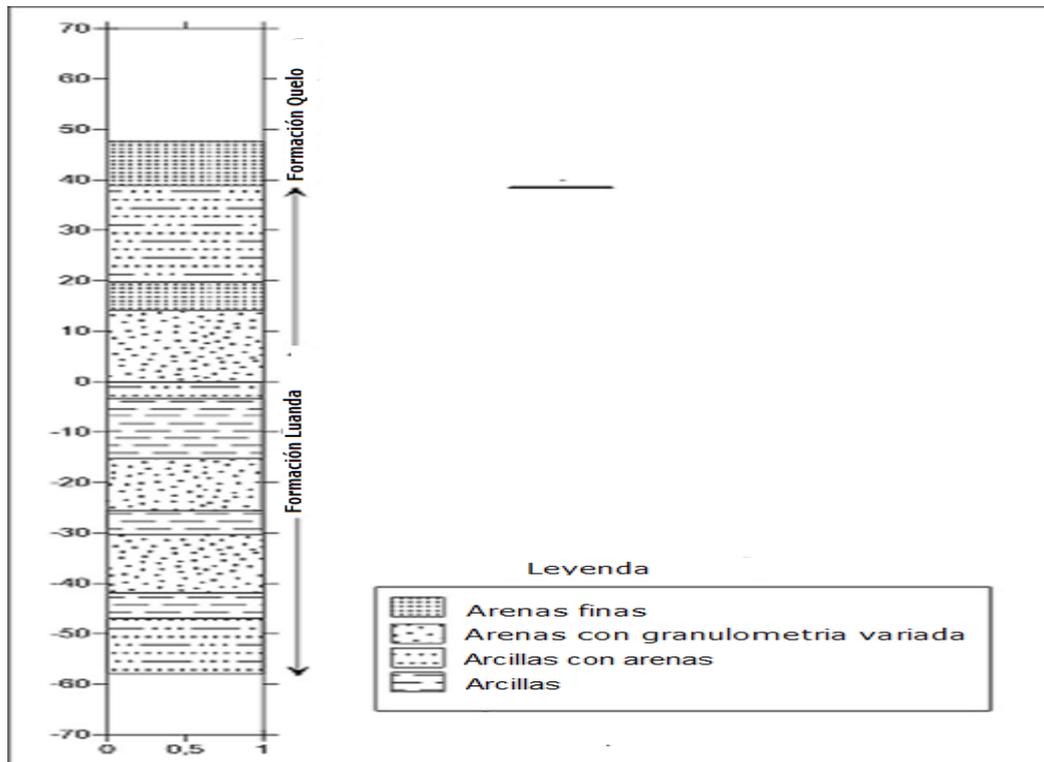


Figura 5. Columna litológica del pozo "Multiperfil".

### 2.3. Características de las unidades geotécnicas

#### Unidades superficiales

Los sedimentos no consolidados recientes, a lo largo de la avenida marginal, están constituidos por materiales heterogéneos, arcillo-arenosos, arenosos y pedregosos. Estos depósitos se encuentran sobre las arenas de playa, los depósitos de vertiente o depósitos fluviales marinos y constituyen los sedimentos no consolidados recientes en la parte baja de la ciudad. El espesor varía entre 2 m y 5 m, alcanzando un espesor máximo de 9 m. En el Planalto de Luanda los sedimentos no consolidados recientes constituyen los terraplenes, sobre las arcillas del Cazenga, y presentan un espesor más reducido, inferior a 1 m.

Las arenas de playa ocupan una banda a lo largo del litoral y están constituidas por arenas heterogéneas, limpias de granulometría variada, muchas veces, con fragmentos de conchas. Estos depósitos alcanzan espesores en el orden de dos decenas de metros; en la isla de Luanda y en los depósitos a lo largo de la marginal el espesor está en el orden de los 5 m.

Los depósitos de vertiente están formados por materiales provenientes de los acantilados adyacentes, con materiales heterogéneos derivados de la desintegración, transportados y depositados en la época de lluvias.

Ocupan la base de las vertientes en la baja zona de la ciudad de Luanda y al sur, a lo largo de la base de las vertientes del Morro de la Samba.

Los conos de deyección son las unidades constituidas por arenas y guijarros y ocupan áreas restrictas en la desembocadura de las líneas de agua.

Los depósitos de aluviones más antiguos ocupan los terrenos de cotas bajas. Están formados por depósitos fluviales marinos, con arenas de granulometría variada y arcillas.

Los aluviones recientes constituyen los depósitos heterogéneos con arenas y guijarros, los cuales se encuentran en el fondo de los valles del río Cambamba y Cabolombo, al norte de Luanda; estos depósitos se encuentran en el fondo de los valles Mulenvos.

### 3. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

#### 3.1 Procesamiento e interpretación de los SEV

Utilizando las curvas de resistividad aparente (Orellana & Monney 1966) se realizó la interpretación clásica para determinar el corte geoelectrico y se asoció una litología en cada uno de los SEV del perfil (Tabla 1); no obstante, se reinterpreto nuevamente cada SEV utilizando el siguiente procedimiento:

- Se asumió que cada abertura AB/2 era una capa y se le calculó a cada una su resistividad aparente y todos los parámetros de Dar Zarrowk (Tablas 2, 3 y 4).

Tabla 1. Resultados de la interpretación de los SEV

SEV	Valor de la resistividad aparente ( $\Omega.m$ ), espesor(m)	Rango de variación de la resistividad eléctrica (litología característica)
<b>Formación Quelo</b>		
Multiperfil	1 332 (2 m)	4 - 1 332 $\Omega.m$ (arcillas, limos, arenas)
Camama 5	486 (1 m)	
Camama 1	900 (3 m)	
<b>Formación Luanda</b>		
Multiperfil	13 (24 m) 128 (64 m) 0,11 (infinito)	1,51-128 $\Omega.m$ (arcillas, limos, arenas y calizas)
Camama 5	52 (71 m) 1,51 (115 m)	
Camama 1	94 (91 m)	
<b>Formación Arenas Gris</b>		
Camama 5	110 (4 m)	arenas
<b>Formación Cacucaco</b>		
Camama 5	580 (9 m)	calizas

#### 3.2 Parámetros y función de Dar Zarrowk

En las discusiones teóricas sobre los medios conductivos estratificados determinados parámetros tienen fundamental importancia en la interpretación y entendimiento del modelo geoelectrico para una específica situación geológica en profundidad. Tales parámetros resultan de una combinación, por medio de multiplicación o división, del espesor y resistividad de cada camada geoelectrica lograda en el modelo. Aunque citado con anterioridad por Henriot (1976), Koefoed (1979), Orellana (1963), Orellana & Monney (1972), Zohdy (1965) y Zohdy, Jackson & Bisdorf (1975), la importancia de estos parámetros fue relatada por primera vez por Maillet (1947), cuyo trabajo propuso para los nuevos parámetros la denominación de parámetros de Dar Zarrouk - DZ.

Considerándose una sección geoelectrica, como la indicada en la Figura 6, la corriente eléctrica, al fluir en el subsuelo, puede tomar dos caminos preferenciales: uno perpendicular y otro paralelo a la estratificación.

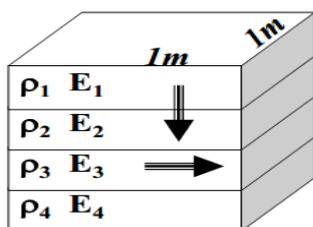


Figura 6. Parámetros de Dar Zarrouk - DZ.

Resistencia transversal unitaria ( $Z$ ) ohms/m

$$Z = \sum_{i=1}^p E_i R = \rho \frac{L}{S} \quad (1)$$

Donde:

$E_i$ : Espesor de la capa;

$R$ : Resistencia, (ohms);

$\rho$ : Resistividad eléctrica del cuerpo en (ohm.m)

$L$ : Longitud del conductor (m);

$S$ : Sección transversal del conductor en (m).

**Caso (1): La intensidad de corriente ( $I$ ) pasa perpendicular a la estratificación**

Se define la resistencia transversal ( $R_T$ )

$$R_{ri} = Ti = \Delta Ti = \rho_i \frac{E_i}{l \times l} = R_{ri} = \rho_i E_i \quad (2)$$

Donde: ( $T_i$ ) es resistencia total en (ohm.m)

$$R_r(E) = \sum_{i=1}^p R_{ri} = \sum \rho_i E_i \quad (3)$$

Donde: ( $\rho_i$ ) Resistividad aparente de la capa.

### **Caso (2): La intensidad de corriente (I) pasa paralelo a la estratificación**

Se define la conductancia longitudinal S (E).

$$R_{Li} = \rho_i \left( \frac{1}{E_i \cdot 1} \right) = \frac{\rho_i}{E_i} \quad (4)$$

$$\frac{1}{R_L(E)} = \sum_{i=1}^p \frac{1}{R_{Li}}$$

$$S(E) = \frac{1}{R_L(E)} = \sum_{i=1}^p \frac{E_i}{\rho_i} \quad (5)$$

$$S(E) = \sum_{i=1}^p \frac{E_i}{\rho_i}$$

Donde: ( $R_{Li}$ ) Resistividad longitudinal en (ohm.m<sup>2</sup>)

Los parámetros de Dar Zarrouk se definen hasta una profundidad determinada:

$R_T(E)$  y  $S(E)$

Parámetros auxiliares

$$a) T = \rho_T E \Rightarrow \rho_T = \frac{T}{E} = \frac{\sum_{i=1}^p \rho_i E_i}{\sum_{i=1}^p E_i}, \quad (6)$$

$$b) S = \frac{E}{\rho_L} \Rightarrow \rho_L = \frac{E}{S} = \frac{\sum_{i=1}^p E_i}{\sum_{i=1}^p \frac{E_i}{\rho_i}}, \quad (7)$$

Si el corte es homogéneo  $\rho_T = \rho_L = \rho$ , si el medio es estratificado  $\rho_T > \rho_L$ .

Coeficiente de macro o pseudoanisotropía:

$$\lambda = \sqrt{\frac{\rho_r}{\rho_L}} \geq 1 \quad (8)$$

Resistividad en la sección transversal ( $\rho_r$ )

Resistividad en la sección longitudinal ( $\rho_L$ )

$$\text{Resistividad media } \rho_m = \sqrt{\rho_r \rho_L} \quad (9)$$

$$\rho_r = \lambda \rho_m \quad (10)$$

$$\rho_L = \frac{\rho_m}{\lambda} \quad (11)$$

Tabla 2. Resultados de la interpretación de los sondeos eléctricos vertical y parámetros de Dar Zarrouk hasta la profundidad de penetración estándar N de los ensayos de SPT. SEV Multiperfil

pa(Ω.m)	H(m)	S(mhos)	T(Ω.m)	T/S	Σ S	ΣT	pt(Ω.m)	pl(Ω.m)	pm(Ω.m)	N(SPT)
1 321,99	0,75	0,0006	991,5	1747645,08	0,00057	991,489	1 321,99	1 321,99	1 321,99	15
626,749	1,5	0,0012	470,1	392814,56	0,00176	1 461,55	974,367	850,35	910,249	36
295,467	2,5	0,0034	295,5	87301,0317	0,00515	1 757,02	702,807	485,583	584,185	24
82,2295	3,75	0,0152	102,8	6761,68985	0,02035	1 859,81	495,948	184,277	302,311	30
22,3878	5,0	0,0558	27,98	501,213039	0,07618	1 887,79	377,558	65,6307	157,415	15
15,6875	7,5	0,1594	39,22	246,098922	0,23555	1 927,01	256,935	31,8409	90,4491	30
13,7885	10,0	0,1813	34,47	190,122247	0,41686	1 961,48	196,148	23,9891	68,596	43
16,009	12,5	0,1562	40,02	256,286969	0,57302	2 001,5	160,12	21,8143	59,1008	48

Tabla 3. Resultados de la interpretación de los sondeos eléctricos verticales y parámetros de Dar Zarrouk hasta la profundidad de penetración estándar N de los ensayos de SPT. SEV Camama 5

pa(Ω.m)	H(m)	S(mhos)	T	(T/S)	Σ S	ΣT	pl	pt	pm	N(SPT)
307,25	-0,3	0,001	92,17	94 401,3	0,001	92,17	307,3	307,25	307,25	22
159,44	-0,6	0,009	47,83	25 419,9	0,0029	140	209,9	233,34	221,33	42
132,18	-1	0,003	52,87	17 472,3	0,0059	192,9	169,9	192,88	181,05	51
133,69	-1,5	0,0037	66,84	17 872,72	0,0096	259,7	155,8	173,15	164,28	60
149,85	-2	0,0033	74,92	22 454,83	0,013	334,6	154,3	167,32	160,69	56
168,27	-3	0,0059	168,3	28 316,03	0,0189	502,9	158,7	167,64	163,11	47
172,48	-4	0,0058	172,5	29 749,83	0,0247	675,4	161,9	168,85	165,36	60
155,6	-5	0,0064	155,6	24 211,26	0,0311	831	160,6	166,2	163,39	60
110,23	-8	0,0272	330,7	12 150,52	0,0583	1 162	137,1	145,21	141,11	60

Tabla 4. Resultados de la interpretación de los sondeos eléctricos verticales y parámetros de Dar Zarrouk hasta la profundidad de los ensayos de SPT. SEV Camama 1

pa(Ω.m)	Si	Ti	Σ S	Σ T	(T/S)	H	pt	pl	pm	N(SPT)
896,61	0,0007	537,97	0,00067	537,97	803 914,23	-0,6	322,781	896,61	537,97	5
810,93	0,0007	486,56	0,00141	1 024,5	657 600,17	-1,2	1 229,43	851,62	1 023,2	33
590,93	0,0014	472,75	0,00276	1 497,3	349 204,13	-2	2 994,54	723,89	1 472,3	35
369,45	0,0027	369,45	0,00547	1 866,7	136 494,9	-3	5 600,17	548,49	1 752,6	60
218,61	0,0048	210,39	0,01022	2 077,1	44 262,286	-4	8 308,44	391,28	1 803	60
81,693	0,0259	154,6	0,0361	2 231,7	5 975,1398	-6	13 390,2	166,22	1 491,9	60
53,775	0,0372	107,55	0,07329	2 339,3	2 891,7594	-8	18 714,1	109,16	1 429,3	
50,283	0,0398	100,5	0,11309	2 439,8	2 524,9885	-10	24 397,6	88,425	1 468,8	
68,821	0,0929	387,56	0,20598	2 827,3	4 172,2993	-16	45 237,1	77,678	1 874,5	

### 3.3. Función de Dar Zarrouk (FDZ)

La curva de Dar Zarrouk, representada por los parámetros de resistividad transversal y la conductancia longitudinal, fue obtenida para los tres SEV del perfil y solo para los primeros 20 m que son las profundidades hasta las que se realizan los ensayos de SPT (Figura 7). Dicha curva es una línea quebrada dada por segmentos. Si podemos determinar la FDZ y el modelo puede describirse en términos de  $\rho$  constante, entonces es posible conocer el número de capas a partir del número de segmentos quebrados. Al conocer en cada segmento los valores de S y T se puede llegar a los valores de  $\rho$  y E de cada capa.

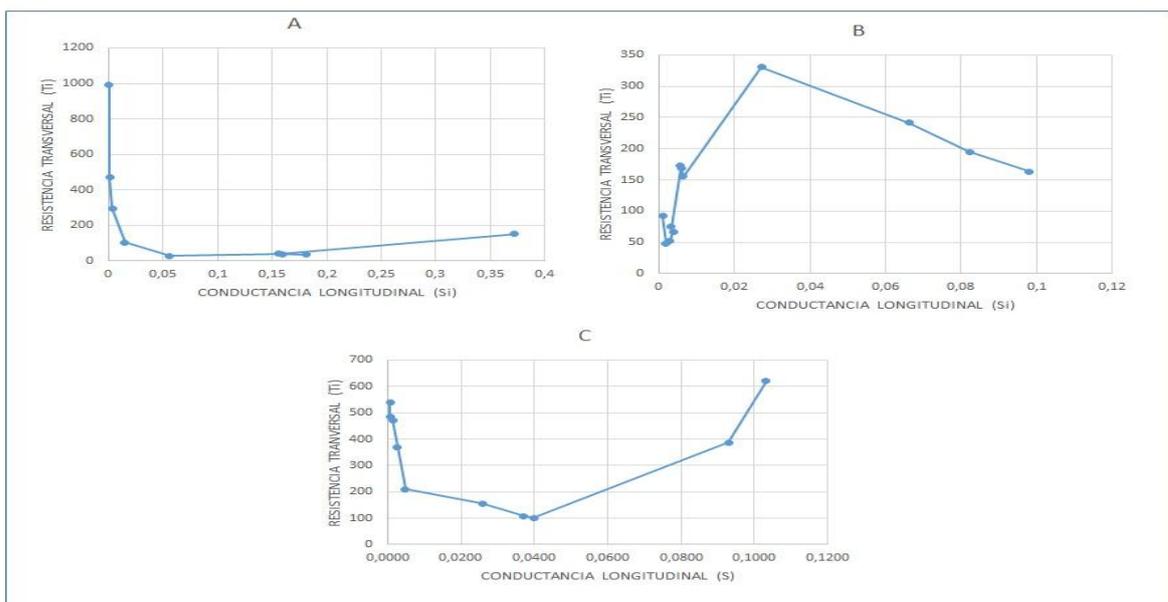


Figura 7. Curvas de Dar Zarrouk: a) SEV Multiperfil, b) SEV Camama 5 y c) SEV Camama 1.

En caso de utilizarse la dependencia  $\rho_m$  vs  $\lambda E$  cada capa se refleja como un segmento de arco; para este trabajo solo se presenta el primer caso dado que los resultados son semejantes.

Como se puede observar en la Figura 7, las tres curvas tienen forma diferente, demostrando así la alta variabilidad que existe en la disposición de las capas litológicas en la ciudad de Luanda.

En el caso del SEV Multiperfil (Figura 7a) puede definirse claramente la existencia de tres capas, siendo la primera asociada a la formación Quelo con arenas altamente resistivas.

Si en la FDZ, para un pequeño incremento de  $S$  ocurre un gran incremento de  $\Delta T$  (alta pendiente), se produce equivalencia en  $T$ . Esto es por la presencia de una capa delgada y de gran resistividad; para eliminar esta equivalencia debemos conocer algún parámetro adicional, como por ejemplo, el espesor de esta capa, la cual fue obtenida de la descripción del pozo existente en el área.

Como se puede observar en este gráfico (Figura 7) la tercera capa es bastante conductora y esto puede estar asociado a la presencia de agua salobre. En resumen, para una correcta interpretación de este SEV debe usarse un modelo de tres capas.

En el caso del SEV Camama 5 puede observarse cierta irregularidad en la primera capa pero también se puede interpretar con un modelo de tres capas, teniendo en cuenta que dadas las pendientes de la curva pueden existir equivalencias entre modelos.

En el SEV Camama 1, según la cantidad de líneas quebradas, puede utilizarse un modelo de cuatro capas, observándose la capa delgada y altamente resistiva.

La interpretación se basa en buscar tantas capas como resistividades existan (o sea, se persigue una solución equivalente). Se buscan los segmentos rectos mayores posibles sin que varíe la pendiente media.

En la FDZ, en tramos de rectas, o muy pendientes o muy poco pendientes, es donde se ponen en crisis las condiciones de equivalencia de  $T$  o  $S$  correspondientes.

Es posible encontrar un número de capas distintas que produzca una respuesta similar.

Todo corte geoelectrico puede ser expresado en tres formas:

a) A partir de  $\rho = \rho(z)$

- b) A partir de la FDZ  $S=S(T)$  - segmentos de recta
- c) A partir de la curva de resistividades medias -  $\rho_m = \rho(\lambda z)$  segmentos de arcos.

Un caso particular es el principio de supresión que es utilizado cuando las pendientes de las líneas quebradas son similares.

En términos generales, a pesar de haber considerado que cada abertura es una capa, al utilizar esta metodología, la interpretación se hace a partir de modelos de tres y cuatro capas, por tal motivo, siempre se pueden encontrar soluciones con un número mayor de capas.

Una vez calculados los parámetros de Dar Zarrouk se procede a realizar el análisis estadístico con los ensayos de SPT que existen cerca de los tres SEV; para el cual se utilizaron solamente los primeros 20 m de profundidad coincidente con la profundidad aproximada de los ensayos de SPT (Tabla 5).

Tabla 5. Coeficiente de correlación lineal entre los valores de N (SPT) y los parámetros de Dar Zarrouk en el SEV

	<b>N(SPT) MULTIPERFIL</b>	<b>N(SPT) CAMAMA 5</b>	<b>N(SPT) CAMAMA I</b>
$\rho_a$ (resistividad aparente) ( $\Omega.m$ )	-0,31287084	-0,86160241	-0,90965129
H	0,83912245	0,6039468	0,8336321
S	0,94168475	0,42248648	0,50523078
T	-0,32897229	0,35523554	-0,84169183
T/S	-0,19135177	-0,87008434	-0,94616977
$\Sigma S$	0,93909078	0,58304914	0,57658342
$\Sigma T$	0,35157391	0,61540291	0,96165574
$\rho_t$	-0,53517965	-0,94216459	0,80771888
$\rho_l$	-0,41022036	-0,9414822	-0,84496316
$\rho_m$	-0,46496918	-0,9446134	0,93217248

#### 4. DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos no coinciden en todos los casos con los de Braga *et al.* (1999) donde se obtuvieron correlaciones no lineales entre los parámetros de Dar Zarrouk y los valores de N (SPT). Braga *et al.* alcanzaron buenas correlaciones con la variable  $\Sigma S$  mientras que en este trabajo se deducen buenas dependencias lineales con otros parámetros, como se puede observar en la Tabla 5; no obstante, en el caso del SEV Multiperfil sí puede observarse que el parámetro  $\Sigma S$  es el que mejor correlación lineal presenta, por lo cual, según los resultados obtenidos, deben hacerse más trabajos de este tipo para llegar a conclusiones definitivas y obtener la relación entre los parámetros de Dar Zarrouk y

los valores de N (SPT) para las condiciones geológicas propias de la ciudad de Luanda.

De la Tabla 5 se deduce que los valores de resistividad aparente ( $\rho_a$ ) obtenida de la interpretación de los SEV poseen buena correlación lineal, principalmente en los SEV Camama 1 y Camama 5; lo cual es coincidente con los resultados alcanzados por los trabajos de Baharom & Fahad (2012), Cosenza *et al.* (2006), Oh & Sun. (2008) y Sudha *et al.* (2009). De igual manera, una dependencia lineal óptima se observa con los valores de resistividad derivados de las ecuaciones (6), (7) y (9) y el parámetro N.

En este trabajo no presentamos las ecuaciones de regresión calculadas pues no se poseen suficientes datos para hacer generalizaciones debido a las condiciones ingeniero-geológicas de la ciudad de Luanda; aun así se demuestra la utilidad de este procedimiento metodológico para reinterpretar otros SEV y a partir de ellos obtener parámetros geotécnicos.

## **5. CONCLUSIONES**

1. Se obtuvieron dependencias lineales aceptables entre la resistividad aparente ( $\rho_a$ ) de los suelos de la ciudad de Luanda y los valores N (SPT), indicando que al aumentar la resistividad se incrementan también los valores de resistencia a la penetración, lo cual demuestra la posibilidad de utilizar los sondeos eléctricos verticales para hacer estudios geotécnicos de mayor alcance.
2. Los parámetros de Dar Zarrouk poseen también buena dependencia lineal con los valores de N y pueden utilizarse para hacer valoraciones geotécnicas cuando la resistividad eléctrica de los suelos no proporciona buenos resultados.
3. La reinterpretación de SEV ya realizados en la ciudad de Luanda permite obtener los parámetros geotécnicos fundamentales para ayudar a completar la información necesaria que se requiere para conformar la cartografía geotécnica de la ciudad.

## **6. AGRADECIMIENTOS**

Al Departamento de Geofísica de la Universidad Agustino Neto de Angola por facilitar la información de los SEV.

## 7. REFERENCIAS

- ARIAS, M. E. & VARGAS, A. 2003: Geofísica aplicada al problema de la intrusión salina en los acuíferos costeros de costa rica. *Tecnología de la intrusión de agua de mar en acuíferos costeros: países mediterráneos IGME. Madrid.*
- ARIAS, M. E. 2011: La prospección geoeléctrica y electromagnética en dos dimensiones y su aplicación en la hidrogeología. *Revista Geológica de América Central* 27.
- AUGE, M. 2008: Métodos geoeléctricos para la prospección de agua subterránea.
- BAHAROM, A. S. & FAHAD, I. S. 2012: Use of Vertical Electrical Sounding (VES) method as an Alternative to Standard Penetration Test (SPT) Proceedings of the Twenty-second International Offshore and Polar Engineering Conference Rhodes. Greece, June 17–22.
- BOLTON, H.; TOKIMATSU, K.; HARDER, L. F. & CHUNG, R. M. 1985: Influence of SPT procedures in soil liquefaction resistance evaluations. *Journal of Geotechnical Engineering* 111(12): 1 425-1 445.
- BOSCH, A. 2001: Investigación y exploración de acuíferos kársticos. *Boletín geológico y minero* 112(2): 65-76.
- BRAGA, A.; MALAGUTTI, W.; DOURADO, J. & CHANG, H. 1999: Correlation of electrical resistivity and induced polarization data with geotechnical survey standard penetration test measurements. *Journal of Environmental and Engineering Geophysics* 4(2): 123-130.
- CASAS, A. & BUSQUETS, E. 1995: Caracterización de vertederos y detección de penachos contaminantes mediante la utilización de métodos geofísicos. *Física de la tierra* 7: 207-226.
- COSENZA, P.; MARMET, E.; REJIBA, F.; JUN, Y.; TABBAGH, A. & CHARLERY, Y. 2006: Correlations between geotechnical and electrical data: A case study at Garchy in France. *Journal of Applied Geophysics* 60(3-4): 165-178.
- FAUZI, A.; IRSYAM, M.; FAUZI, U. J. 2014: Empirical correlation of shear wave velocity and N-SPT value for Jakarta. *Int. J. GEOMATE* 7(1): 980-984.
- HENRIET, J. P. 1976: Direct application of the Dar Zarrouk parameters in ground water surveys. *Geophysical Prospecting* 24(2): 344-353.
- HORTA DA SILVA, J. A. 1975: Solos Expansivos –Comportamento, Identificação, Quantificação da Instabilidade Volumétrica e Projecto de Fundações (II Parte). *Revista da Sociedade Portuguesa de Geotécnica* 14: 5-18.
- KOEFOD, O. 1979: *Resistivity sounding measurements*. Elsevier.
- MAILLET, R. 1947: The fundamental equations of electrical prospecting. *Geophysics* 12(4): 529-556.
- MIGUEL, G. L. 2001: Estudio geológico hidrogeológico y ambiental de los alrededores de Luanda (Angola). Suf. Invest. Departamento de Geología. Universidad de Alcalá.

- OH, S. & SUN, C. G. 2008: Combined analysis of electrical resistivity and geotechnical SPT blow counts for the safety assessment of fill dam. *Environmental Geology* 54(1): 31-42.
- ORELLANA, E. 1963: Properties and drawing of the so-called Dar Zarrouk curves. *Geophysics* 28(1): 99-110.
- ORELLANA, E. & MOONEY, H. M. 1966: *Tablas y curvas patrón para sondeos eléctricos verticales sobre terrenos estratificados*. Interciencia, Madrid.
- ORELLANA, E. & MOONEY, H. M. 1972: *Two and Three Layer Master Curves and Auxiliary Point Diagrams for Vertical Electrical Sounding Using Wenner Arranging: Curvas patrón de dos y tres capas y diagramas de punto auxiliar para sondeos eléctricos verticales mediante el dispositivo Wenner*. Interciencia, Madrid.
- PIRES, G. J. & FERNÁNDEZ, H. M. 2007: Valoração e avaliação de áreas de aptidão: Caso de estudo aplicado a cidade de Luanda.
- SUDHA, K.; ISRAIL, M.; MITTAL, S. & RAI, J. 2009: Soil characterization using electrical resistivity tomography and geotechnical investigations. *Journal of Applied Geophysics* 67(1): 74-79.
- ZOHDY, A. R. 1965: The auxiliary point method of electrical sounding interpretation, and its relationship to the Dar Zarrouk parameters. *Geophysics* 30(4): 644-660.
- ZOHDY, A. R.; JACKSON, D. B. & BISDORF, R. J. 1975: *Schlumberger soundings and total field measurements in the Raft River geothermal area, Idaho*. US Geological Survey.

**María A. Pereira de Barros-da Silva** [mely\\_barros@hotmail.com](mailto:mely_barros@hotmail.com)

Departamento-Geofísica, Facultad de Ciencias de la Universidad Agustino Neto,  
Luanda, Angola

**Héctor M. Fernández-Núñez** [hector@civil.cujae.edu.cu](mailto:hector@civil.cujae.edu.cu)

Instituto Superior Politécnico "José Antonio Echeverría",  
Ciudad de La Habana, Cuba

**Gabriela J. Pereira Teixeira-Pires** [gabrielapires@hotmail.com](mailto:gabrielapires@hotmail.com)

Departamento-Geología, Facultad de Ciencias de la Universidad Agustino Neto,  
Luanda, Angola

**José Pérez-Lazo** [jplazo@civil.cujae.edu.cu](mailto:jplazo@civil.cujae.edu.cu)

Instituto Superior Politécnico "José Antonio Echeverría",  
Ciudad de La Habana, Cuba