

TECNICAS GEOESTADISTICAS APLICADAS EN LA DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE PARAMETROS GEOTECNICOS

José E. Gutiérrez Ramírez, Betzabé Y. Tafur Borjas y Miguel Zulueta T.

Email: egutierrez@mibsac.com, btafur@svsingenieros.com y mzuluetatorres@hotmail.com

RESUMEN

El presente trabajo describe una metodología desarrollada con la finalidad de tomar en consideración la variabilidad espacial de las propiedades de los materiales geológicos. Son mostrados los elementos de geoestadística, comúnmente usados para la evaluación de yacimientos minerales, como una herramienta importante en la caracterización de las propiedades mecánicas de los materiales.

Presentamos una aplicación en la que hemos desarrollado una metodología que integre conceptos geológicos, geoestadísticos y geotécnicos en el estudio de los depósitos cuaternarios del subsuelo de la Planta Nuclear Angra 2, ubicada en el estado de Río de Janeiro en el Brasil.

INTRODUCCIÓN

La formación de materiales geológicos es un fenómeno natural complejo, donde varios factores físicos y químicos se integran simultáneamente. En consecuencia la previsión de la continuidad de los parámetros geotécnicos (en este caso obtenidos a partir del número de golpes SPT) es bastante difícil de realizar, salvo en los casos en que se tomen supuestos (como la hipótesis de homogeneidad) que faciliten el desarrollo de un modelo analítico.

Tanto en las obras civiles como en la minería es importante definir la distribución espacial de las propiedades de las litologías que conforman un depósito, el propósito, es mejorar el flujo de información entre las áreas de geología e ingeniería, tornando más eficiente el análisis desde el punto de vista técnico, operacional y económico.

CASO DE ESTUDIO: VARIABILIDAD ESPACIAL DE LOS PARAMETROS DE RESISTENCIA MECANICA EN EL SUBSUELO DE LA PLANTA NUCLEAR ANGRA 2 - RJ

Para la caracterización del subsuelo en el área de estudio fueron realizados 111 sondajes para realizar los ensayos de penetración estándar SPT, a cada 1m de profundidad en un área de 400x400m² en la región de Angra de los Reyes, estado de Río de Janeiro, Brasil.

UBICACIÓN

La Planta Nuclear Angra 2 está localizada en la Latitud 23°00'30,2'' S y la longitud 44°27'26,3'' W, a menos de medio grado al norte del trópico de Capricornio.

Situado en la playa de Itaorna, en la Bahía de Isla Grande, está distante en línea recta, de 14Km de la ciudad de Angra de los Reyes y 130Km de la ciudad de Río de Janeiro. En la Figura 1 se presenta el mapa índice de Brasil, en el cual se localiza el estado de Río de Janeiro, donde se ubica la ciudad Angra de los Reyes - Isla Grande, que es la ciudad donde tenemos la actual ubicación de la Planta Nuclear Angra 2.



Figura 1. Mapa Índice de Brasil, donde se localiza el área de estudio.

GEOLOGIA

La playa de Itaorna es una estrecha faja de arena, 2 a 4m encima del nivel del mar. De modo general el basamento rocoso está constituido predominantemente por gneis, migmatitas y granitos pre-cambrianos con características intrusivas y reciben los nombres de Mambucaba, Angra y Mangarativa.

La roca sana se sitúa entre 20-30m debajo de la superficie del terreno, estando recubierta por suelo residual, entre 10-20m de profundidad. Encima, el paquete sedimentario compuesto de arena media intercalada con lentes de arena fina, limo y arcilla. La parte superior del paquete sedimentario está compuesto de arenas, y el número de horizontes de arena y arcilla en la columna sedimentaria crece en dirección a la línea de la costa. La porción central del área de Itaorna es la más profunda del paquete (más de 20m de espesor).

MODELAMIENTO GEOLOGICO (GEOMETRICO Y NUMERICO)

La metodología de modelaje geológico e geotécnico es una modificación de la metodología de Houlding (1994), y está dividida en modelamiento geométrico y numérico.

El modelamiento geométrico debe dar un espacio tridimensional a partir del cual se podrá producir un modelo de bloques y se podrá evaluar la variabilidad espacial con métodos geoestadísticos. Según Gutiérrez (2009), se recomienda un proceso o conjunto de criterios que evalúe toda la información en unidades geológicas geotécnicas homogéneas.

En la Figura 2 se presenta el flujo del modelaje utilizado en este trabajo de investigación modificado a partir de la metodología de Houlding (1994). Donde las perforaciones realizadas para conocer el número de golpes SPT, serán utilizadas para determinar la geometría del depósito cuaternario.

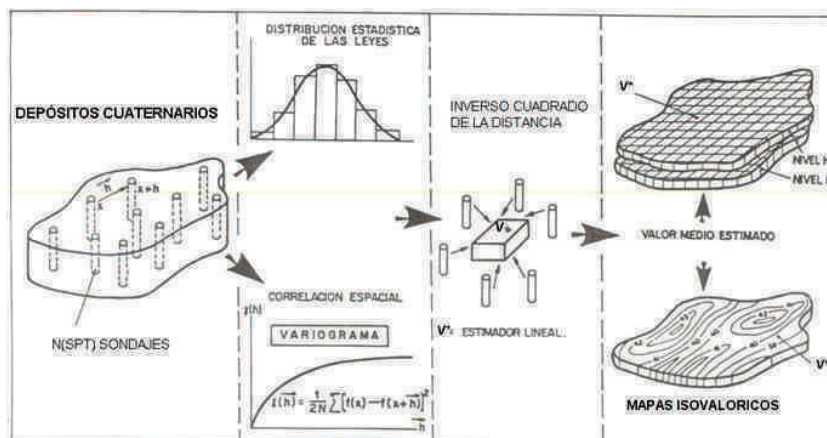


Figura 2. Diagrama de Flujo del Modelaje.

Se realizaron 111 sondeos para la toma del número de golpes SPT, la Figura 3 (lado izquierdo) muestra la ubicación de las perforaciones. Estas perforaciones contienen la siguiente información: Coordenadas de la boca del pozo, profundidad, litología, número de golpes SPT y nivel freático.

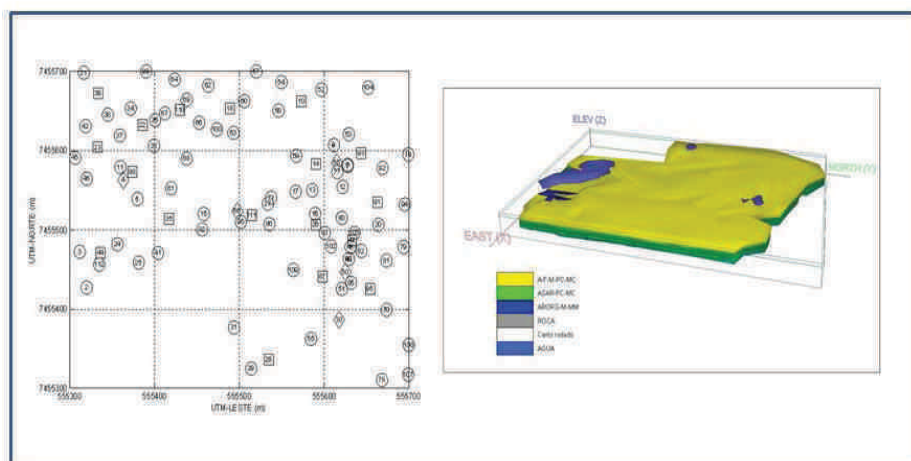


Figura 3. Ubicación de sondajes.

Los depósitos cuaternarios estudiados se clasifican geotécnicamente según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) como (Tabla1):

Tabla 1. Características de los horizontes de suelo

Código litológico	Clasificación Geotécnica (SUCS)	Descripción
A-F-M-PC-MC	SW	Arena limpias con pocos finos o sin ellos. Arenas bien graduadas.
ASAR-PC-MC	SM	Arena limosas, arenas con cantidad de finos apreciable. Mezcla de arena y limo mal graduado.
ARORG-M-MM	OH	Arcilla orgánica de plasticidad media a alta.

Con los datos obtenidos de los ensayos, que están representados en la planilla de datos para el ensayo SPT, fue creada una base de datos en Ms Access 2003 para la ejecución de los análisis estadísticos y geoestadísticos.

La estructura de la base de datos está compuesta de dos tablas, la primera está compuesta de los siguientes campos:

- Sondeo.- nombre del sondeo, identificado de la planilla del ensayo SPT.
- Norte.- coordenada norte en el sistema UTM.
- Este.- coordenada este en el sistema UTM.
- Elevación.- cota.

La segunda está compuesta por los siguientes campos:

- N(SPT).- número de golpes del ensayo SPT.
- Profundidad.- del punto central del intervalo ensayado.
- Litología.- tipo de material geológico o no geológico identificado en campo.
- Clasificación Geotécnica.- Código de clasificación de suelos según SUCS.
- Código de litología.- código numérico identificador de cada capa de suelos.

Se elaboraron 17 secciones con dirección Norte – Sur en el software Datamine y se realizó la interpretación geológica de cada sección. El resultado fue la obtención de un sólido representativo de cada material geológico (lado derecho Figura 3).

El Modelamiento numérico trata del proceso que subdivide los sólidos geológicos, elaborados en el modelaje geométrico, en bloques de dimensiones constantes en cada dirección (norte-sur, este-oeste, vertical). El conjunto de todos los bloques es llamado modelo de bloques y es muy utilizado en la evaluación de yacimientos minerales. En este trabajo se utilizó un bloque unitario con las siguientes dimensiones: 10 metros en la dirección Este-Oeste, 10 metros en la dirección Norte-Sur y 1 metro en la dirección vertical.

El procedimiento para la evaluación numérica de los valores del número de golpes SPT se resume en la Figura 4.

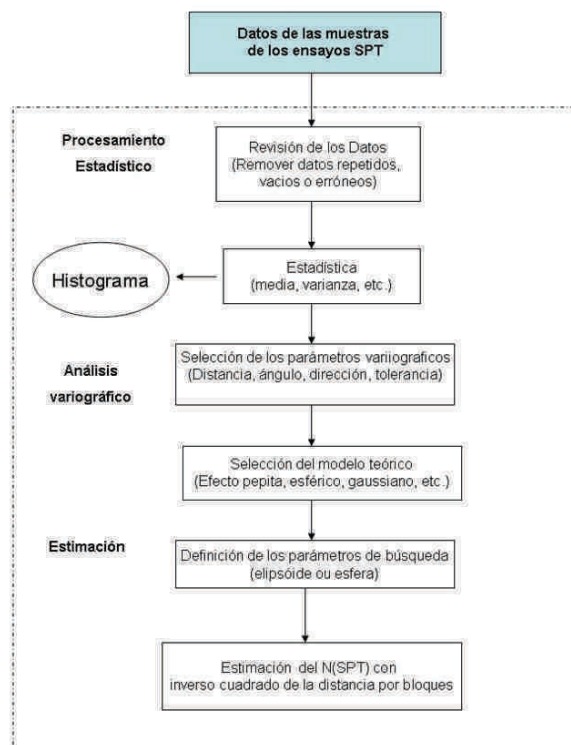


Figura 4. Diagrama de Procesos de Estimación.

El análisis estadístico del número de golpes SPT de los suelos de Angra de los Reyes esta resumido en la tabla 2:

Código Litológico	Variable	Nº muestras	Mínimo	Máximo	Media	Mediana	Moda	Varianza	Desviación Estándar	Coefficiente de Variación
A-F-M-PC-MC	N(SPT)	433	2	96	12.06	10	7	82.22	9.067	75.18
ASAR-PC-MC	N(SPT)	880	0	96	10	6	5	153	12	124
ARORG-M-MM	N(SPT)	353	0	83	8.89	5	2	137.9	11.74	132.1

En la Figura 5 podemos apreciar el bajo valor de los parámetros estadísticos de la litología con mayor contenido de arcilla, lo que indica que la resistencia de este suelo es menor comparado con los otros suelos. Esta característica es propia de las arcillas con contenido de materia orgánica, las cuales presentan una menor resistencia a la penetración si la comparamos con suelos granulares o con suelos argilosos sin contenido de materia orgánica. Para el análisis espacial de los datos también se elaboraron gráficos Scatter Plot que nos permiten realizar la comparación entre número de golpes SPT versus la cota (m).

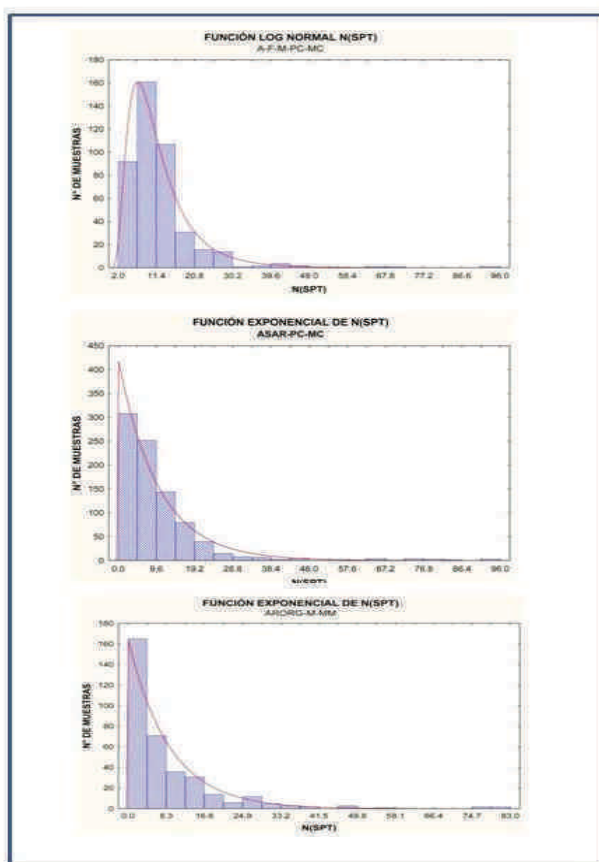


Figura 5. Histograma de los horizontes de suelo.

El objetivo de la geoestadística es estimar o predecir el valor de una variable que no se conoce a partir de escasa información conocida. En el presente trabajo, hemos utilizaremos los datos obtenidos de los ensayos SPT efectuados en la zona de Angra para estimar el número de golpes SPT en zonas no ensayadas. Para ello utilizamos la principal herramienta de la geoestadística: “El variograma”. Para el cálculo de los variogramas fueron usados el Lag o espaciamentos diferenciados, en la horizontal el Lag fue de 10 metros y en la vertical el Lag fue de 1 metro (debido a que el número de golpes SPT es medido cada metro). Para determinar el valor del efecto pepita se realizó el cálculo y modelamiento de los variogramas omnidireccionales de cada suelo (figura 6). Las direcciones horizontales en las que fueron calculados los variogramas direccionales fueron cuatro (Norte-Sur, N 45°, Este-Oeste y N 135°).

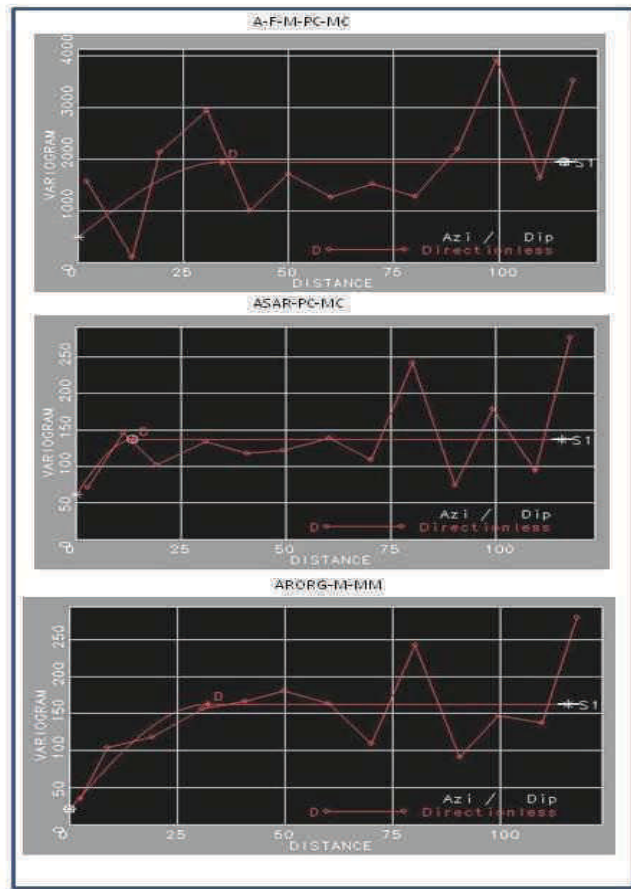


Figura 6. Varigramas Omnidireccionales de los Horizontes.

La siguiente tabla resume los parámetros obtenidos a partir del modelamiento de variogramas direccionales de las capas de suelo:

Código Litológico	Dirección	Modelo	Meseta	Alcance (m)	Pepita
A-F-M-PC-MC	N	Esférico	31.01	28.1	489.4
	N45°	Esférico	15.11	50	489.4
	N90°	Esférico	1285.2	31.5	489.4
	N135°	Esférico	2680.3	19.3	489.4
	Vertical	Esférico	1460.4	1.2	489.4
ASAR-PC-MC	N	Esférico	106.2	20.9	61.2
	N45°	Esférico	151.1	13.5	61.2
	N90°	Esférico	151.1	34.4	61.2
	N135°	Esférico	129.8	21.2	61.2
	Vertical	Esférico	177.2	5.2	61.2
ARORG-M-MM	N	Esférico	113	24.7	20.8
	N45°	Esférico	204.4	13.7	20.8
	N90°	Esférico	180.6	33.3	20.8
	N135°	Esférico	189.7	21.4	20.8
	Vertical	Esférico	49.1	6.3	20.8

En la Figura 7 se observa las direcciones principales de los aportes de sedimentos en el proceso de formación de las unidades geotécnicas, las cuales evidencian que los mayores aportes fueron dados por material coluvial, aportados directamente de los taludes de rocas dando origen a la formación del depósito arenoso A-F-MC-PC (la flecha roja dirigida hacia el mar indica la dirección de este aporte). Otro gran agente de aporte de sedimentos es el mar, el cual invadió el continente en los procesos transgresión - regresión marina que dieron origen a la formación de los depósitos arenosos-limosos y el depósito de arcillas con contenido orgánico (la flecha amarilla). Los sedimentos marinos fueron depositados paralelos a la línea de costa (las flechas amarillas indican aproximadamente la dirección de estos aportes). Cabe recordar que estas direcciones principales fueron calculadas a partir del modelamiento variográfico y coinciden con las características geológicas de estos depósitos.

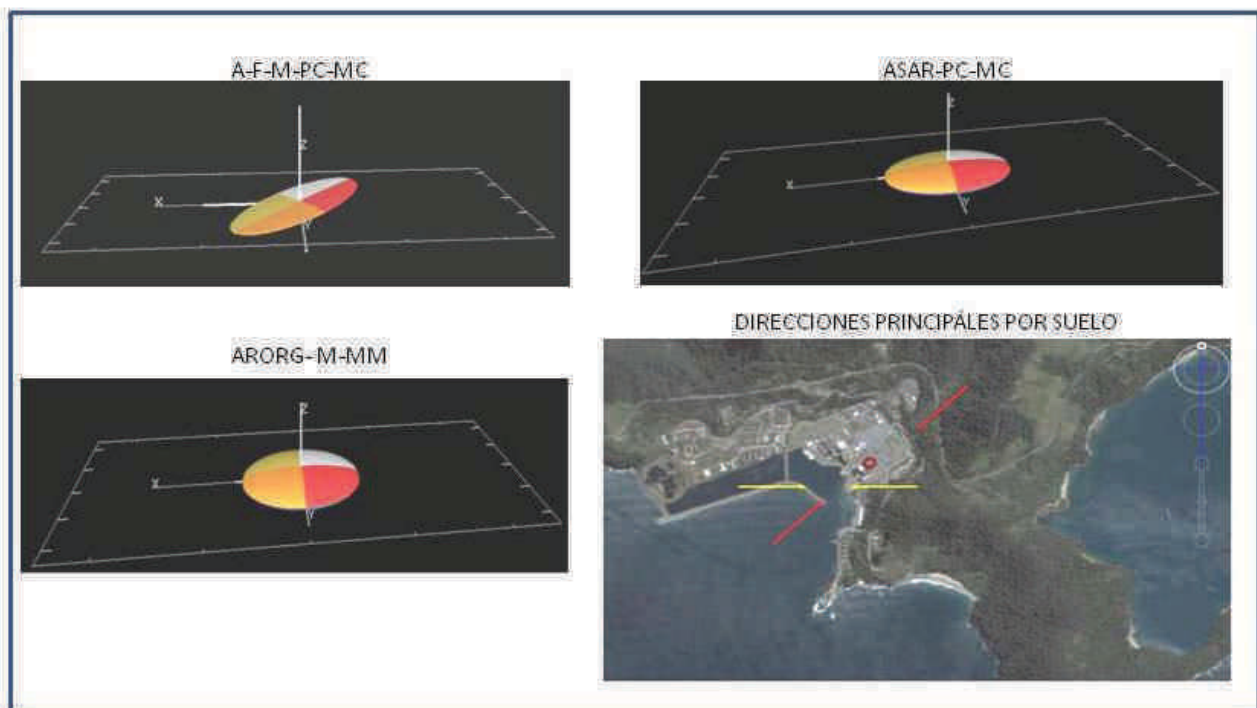


Figura 7. Elipsoides de Influencia y direcciones principales de los horizontes.

ANÁLISIS E INTERPRETACION DE RESULTADOS

A partir de la distribución del número de golpes SPT y de correlaciones empíricas que relacionan los ensayos SPT con los parámetros de resistencia del suelo, hemos podido determinar la distribución espacial de las características de cada material geológico. En el horizonte de suelo denominado A- F-M-PC-MC usamos la correlación de **Hunt - 1984 (*)** a fin de obtener la densidad relativa (D_r), y la correlación de **Meyerhof - 1956 (*)** en el cálculo del ángulo de rozamiento interno (Φ'). Para el horizonte de suelo denominado ASAR - PC - MC utilizamos la correlación propuesta por Parra y Ramos (*), a fin de obtener el ángulo de rozamiento interno (Φ') y la cohesión no drenada (C_u). Para el horizonte de suelo denominado ARORG - M - MM utilizamos la correlación de Hunt, para el cálculo de la resistencia no drenada (q_u) y el peso específico saturado (γ_{sat}).

Para A- F-M-PC-MC : $\Phi' = 30 + 0.15 Dr$ (< 5% arena fina y limo) (Hunt)

Para ASAR - PC – MC: $\Phi' = 5.35 \ln N(SPT) + 14.44$, $C_u = 0,22 \ln N(SPT) - 0,40$ (Parra y Ramos)

Para ARORG - M – MM (Hunt):

Consistencia	Nº de golpes (SPT)	Identificación manual	γ_{sat} g/cm ³	Resistencia a la compresión simple q_u (Kg/cm ²)
Dura	> 30	Se marca difícilmente	> 2,0	> 4,0
Muy rígida	15-30	Se marca con la uña del pulgar	2,08-2,24	2,0-4,0
Rígida	8-15	Se marca con el pulgar	1,92-2,08	1,0-2,0
Media (firme)	4-8	Moldeable bajo presiones fuertes	1,76-1,92	0,5-1,0
Blanda	2-4	Moldeable bajo presiones débiles	1,60-1,76	0,25-0,5
Muy blanda	< 2	Se deshace entre los dedos	1,44-1,60	0-0,25

(*) Parra & Ramos realizan una revisión detallada de estos métodos y sus aplicaciones a diferentes tipos de suelo en el trabajo de investigación presentado por ASG - Geotecnia.

Cabe indicar que han sido considerados parámetros efectivos porque se há supuesto que todos los horizontes están bajo el nivel freático (de esta manera trabajamos a favor de la seguridad).

A partir de los resultados obtenidos con las correlaciones encontramos que el área (alrededor 8,500m²) con los mejores parámetros de resistencia, está delimitada por los siguientes puntos: 7455374N/555659E, 7455453N/555659E, 7455453N/555555E y 7455374N/555555E.

CONCLUSIONES

La aplicación de la variografía y del método del inverso cuadrado de la distancia nos permitió realizar la previsión del valor de Número de Golpes N(SPT) en lugares no ensayados y a través de correlaciones empíricas determinar los parámetros de resistencia del suelo.

La aplicación de las técnicas de modelamiento tridimensional han mostrado su gran utilidad en Geo - Ingeniería, en el caso expuesto nos han ayudado a determinar la ubicación de las capas con las mejores condiciones de resistencia, además dentro de estas capas hemos podido determinar cómo los parámetros de resistencia se distribuyen (basados en características geológicas innatas en cada uno de los materiales).

REFERENCIAS

- Folle D.; Leite J.; Renard D.; Koppe J.; Zingano A.(2008), 3-D soil-resistance maps in the presence of a strong vertical trend. Engineering Geology Journal.
- Gutiérrez, J. (2009). Variabilidade Espacial do Parâmetro Geomêcanico RQD no Depósito Mineral Animas-Peru, Dissertação de Mestrado. PUC-RIO.
- Houlding, W. (1994), 3D Geoscience Modeling, Springer.
- Lambe, W.; Whitman R (2001), Mecánica de suelos. Limusa.
- Mendes R.; Lorandi R. (2008), Analysis of spatial variability of SPT penetration resistance in collapsible soils considering water table depth. Engineering Geology Journal.
- Parra, F. & Ramos, L. Obtención de Parámetros Geomecánicos a partir de Ensayos a Penetración Dinámica continua en Suelos Mixtos Cohesivos- Granulares. ASG – Geotecnia.
- Rodrigues, S (1999). Estudo Geoestatístico do Subsolo da Usina Nuclear Angra 2, RJ. Dissertação de Mestrado. PUC-RIO.