

Mapeamento geoestatístico do N_{SPT} na área urbana de Frederico Westphalen/RS - Brasil

João Antônio RIBOLI ^a, Thaís Aquino dos SANTOS ^{b, 1} e

Tiago Alberto da Silva PEREIRA ^c

^a *Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões – Campus de Frederico Westphalen, RS, Brasil*

^b *Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – Universidade Federal de Santa Maria, RS, Brasil*

^c *Universidade Federal do Alagoas – Campus Sertão, AL, Brasil*

Resumo. O presente artigo resulta da caracterização geotécnica do subsolo da área urbana da cidade de Frederico Westphalen/RS/Brasil, com área de aproximadamente 5,7 km², fundamentada em conceitos da geoestatística. A metodologia consistiu em mapeamentos realizados com o software de geoprocessamento Quantum Gis (QGIS), com base na estimativa de valores de N_{SPT} para diferentes profundidades de análise, a partir de resultados de sondagens de simples reconhecimento executados na localidade. De modo geral, os mapas evidenciaram que as regiões norte, sul e leste do município apresentam solos mais resistentes, enquanto que na região oeste o subsolo apresenta uma resistência intermediária. O território central contemplou a zona com solos menos resistentes. Verificou-se ainda que a área analisada possui uma maior variabilidade de resistência nas cotas iniciais e que o impenetrável geralmente se encontra entre as cotas -5 m e -9 m abaixo da superfície.

Palavras-Chave. N_{SPT} , caracterização geotécnica, análise espacial, Quantum Gis.

1. Introdução

No âmbito da Engenharia Civil, o conhecimento do comportamento e das condições do solo em subsuperfície se faz imprescindível, independentemente do porte e/ou finalidade da obra, tendo em vista a obtenção de projetos seguros, econômicos e com desempenho satisfatório.

No Brasil, as sondagens a percussão utilizadas em consonância com o ensaio de penetração dinâmica (SPT) representam o tipo de investigação comumente utilizado. As informações obtidas com o ensaio atuam como subsídio fundamental ao planejamento, projeto e execução de obras geotécnicas, uma vez que permitem a disponibilização de parâmetros essenciais às etapas de cálculo, análise e monitoramento dos mais diversos fins em obras civis [1]. Dentre os parâmetros obtidos, destaca-se o índice de resistência

¹ Autor correspondente, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Avenida Roraima 1000, 97105-900, Santa Maria, Rio Grande do Sul, Brasil; E-mail: thais_as@hotmail.com

à penetração (N_{SPT}), que fornece um indicador qualitativo das propriedades mecânicas e estratigráficas do solo.

Apesar de consistir uma pequena fração do orçamento total de uma obra, uma prospecção de qualidade do subsolo nem sempre é tangível, seja por falta de recursos disponíveis, seja por falha ou ineficácia na investigação. Desta forma, cada vez mais são inseridas no meio geotécnico, metodologias matemáticas que visam auxiliar no conhecimento do comportamento do solo de forma contínua [2].

O uso da aplicação de técnicas de geoestatística na caracterização geotécnica de subsolos vem sendo utilizada ao longo dos anos e constitui o objeto de estudo de diversas pesquisas [3, 4, 5]. A estimativa dos valores de N_{SPT} a partir desse tipo de análise é uma realidade consolidada tanto a nível nacional quanto internacional [1, 2, 6, 7, 8, 9]. No entanto, essa espacialização do comportamento geomecânico do solo só é possível pelo uso concomitante de ferramentas como a geoestatística e os Sistemas de Informação Geográfica (SIG) [9]. A primeira oferece a possibilidade de se prever, por meio da interpolação, o comportamento de determinados atributos entre pontos conhecidos. A segunda é responsável pela locação, gerenciamento e apresentação das informações georreferenciadas.

Nesse contexto, este artigo tem como propósito realizar a caracterização do subsolo da área urbana do município de Frederico Westphalen/RS, por meio da análise espacial de dados de perfis de sondagem SPT (N_{SPT}), utilizando o software de geoprocessamento livre Quantum Gis. Esse é um estudo pioneiro na região e tem o intuito de contribuir com a comunidade local, fornecendo um instrumento para a avaliação preliminar da capacidade geotécnica do solo do município.

2. Processos Metodológicos

A metodologia dessa pesquisa divide-se em duas linhas de trabalho. Em um primeiro momento, realizou-se a caracterização da área de estudo e a aquisição de informações, a partir da obtenção dos boletins de sondagem de simples reconhecimento. Posteriormente, a espacialização das informações inseridas na plataforma SIG – QGIS foi executada com a aplicação do interpolador IDW. Os dados de saída foram o mapas geotécnicos com as estimativas dos valores de N_{SPT} em função das profundidades analisadas.

2.1. Caracterização da área de estudo

Frederico Westphalen é um município brasileiro situado no extremo norte do estado do Rio Grande do Sul, na microrregião do Alto Uruguai (Figura 1). Localiza-se a uma latitude 27° 21' 33" sul e a uma longitude 53° 23' 40" oeste, estando a uma altitude de 566 metros. Possui cerca de 30 mil habitantes, uma área territorial total de aproximadamente 265 km² e uma mancha urbana de 5,7 km² [10, 11].

A geologia da região é predominantemente composta por rochas vulcânicas, originárias durante a era Mesozóica, há 135 bilhões de anos [12]. O município encontra-se assente sobre a formação Serra Geral, caracterizada por derrames basálticos granulares finos [13]. Os solos são, em sua maioria, de granulometria argilosa, classificados como latossolos vermelhos, bem drenados e profundos.

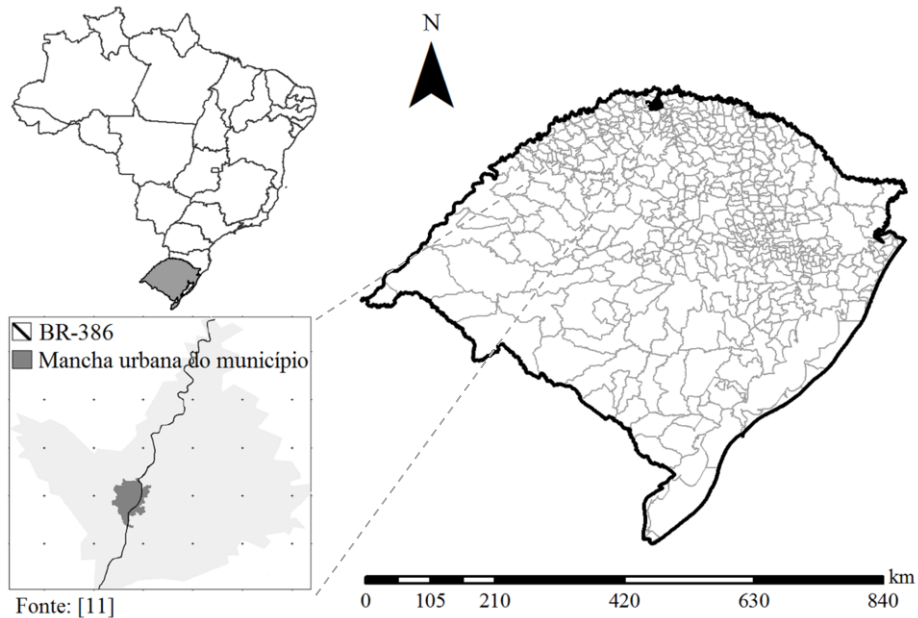


Figura 1. Localização do município de Frederico Westphalen/RS.

2.2. Coleta e compilação dos perfis de sondagem SPT

Inicialmente foram buscados junto a Prefeitura, Universidades e empresas da área da construção civil, boletins de sondagens SPT de diferentes pontos do município de Frederico Westphalen/RS. Devido a não exigência de relatórios de sondagem por parte dos órgãos municipais aliado à cultura local pela não realização de prospecção do subsolo, há poucos locais amostrados no município. Mesmo assim foram obtidos doze perfis geotécnicos, considerado um quantitativo adequado para a realização deste trabalho, tendo em vista uma área urbana de aproximadamente 5,7 km².

Em uma análise inicial realizada nos perfis, observou-se que, no geral, há o predomínio de solos argilosos, coerente com a formação geológica da região do Alto Uruguai. Como cada boletim de sondagem apresenta uma média de três a seis perfurações cada, tornou-se necessária a realização de uma média entre elas, de forma a criar um perfil único, denominado perfil médio, para cada ponto de análise. Esse perfil médio ($N_{SPTMédio}$) foi criado com o propósito de simplificar as análises posteriores. Ressalta-se que as prospecções foram executadas por diferentes empresas do ramo, as quais consideram valores de N_{SPT} para o impenetrável de forma variável. Nesse caso, adotou-se o valor de 50 golpes, com o intuito de padronizar a resistência à penetração desta camada, valor definido com base em um dos critérios de paralização do ensaio SPT, estabelecidos em normativa [14].

2.3. Análise Espacial

Posterior à análise primária dos perfis foi realizada a locação dos dados e a inserção dos pontos por meio das coordenadas no SIG. O ambiente SIG empregado foi o software livre de geoprocessamento Quantum Gis - QGIS. A partir do banco de dados de todos os

boletins de sondagem, produziu-se a Tabela 1, a qual contempla o bairro de localização dos doze perfis estudados, o número de perfurações, um código para fins de análise, bem como os dados necessários à elaboração das superfícies contínuas: coordenadas decimais e valores de $N_{SPTMédio}$ para cada profundidade analisada.

Tabela 1. Valores de N_{SPT} dos perfis médios nas profundidades desejadas e coordenadas em decimais.

	Cód.	Bairro	Nº de perf	Coordenadas Decimais		Profundidade (m)				
				Latitude	Longitude	2m	3m	5m	9m	14m
$N_{SPTMédio}$	01	Itapagé	3	-27.359.444	-53.403.888	10	15	20	50	50
	02	Centro	3	-27.355.555	-53.397.222	4	5	12	23	46
	03	Centro	6	-27.355	-53.398.333	4	5	7	14	18
	04	Itapagé	5	-27.357.222	-534.047.222	2	7	24	50	50
	05	Ipiranga	6	-2.735.777	-533.919.444	28	27	43	50	50
	06	Aparecida	4	-273.625	-534.008.333	18	15	31	50	50
	07	Aparecida	3	-273.713.888	-534.002.777	8	34	35	50	50
	08	Ipiranga	6	-27.360.555.555	-53.394.444	15	43	50	50	50
	09	Centro	2	-2.735.111	-53.397.222	20	19	50	50	50
	10	Barril	2	-273.508.333	-53.395	37	47	50	50	50
	11	Fátima	4	-2.753.333	-533.997.222	22	27	38	50	50
	12	Santo Antônio	4	-27.346.111	-534.025	29	50	50	50	50

A espacialização das informações foi gerada com o auxílio do interpolador determinístico IDW (*Inverse Distance Weighted*). Esse método prediz um valor para algum local não medido, utilizando os valores amostrados à sua volta, que terão um maior peso do que os valores mais distantes, ou seja, cada ponto possui uma influência no novo ponto, que diminui na medida em que a distância aumenta [15]. A aplicação desse estimador requer algumas informações, como a definição do ponderador a ser utilizado nos cálculos de estimativas em locais não amostrados e o número de pontos que influenciam nessa estimativa. Nesse trabalho, adotou-se o ponderador de peso dois pontos vizinhos e um número de 12 pontos de influência, ambos considerados padrão pelo QGIS. A Eq. 1 apresenta o cálculo realizado pelo método IDW.

$$\hat{Z} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{z_i}{d_i^\beta}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i^\beta}} \quad (1)$$

Em que: $\hat{Z}$ é o atributo interpolado, z_i é o valor do ponto vizinho conhecido, d_i é a distância entre o ponto de vizinhança e o ponto amostrado, β é o expoente de ponderação e n é o número de pontos amostrados.

As superfícies contínuas foram geradas para as profundidades de interpolação de 2 m, 3 m, 5 m, 9 m e 14 m, com a finalidade de estimar um provável valor do N_{SPT} para

qualquer localidade desejada dentro dos limites territoriais da área urbana do município. Salienta-se que a escolha de tais cotas se justifica pela maior disponibilidade de informações precisas utilizadas na produção dos mapas, tendo em vista que, na maioria dos pontos onde foram realizadas as sondagens, a profundidade máxima de penetração do amostrador padrão não superou a cota de - 7 m. Os mapas com profundidade superior a esse valor tem o objetivo de mostrar as áreas onde o impenetrável se encontra em camadas mais profundas.

3. Resultados e Discussões

As Figuras 2 a 4 apresentam os resultados da interpolação para os diferentes níveis de profundidade analisados. Os pontos em destaque na cor verde representam as localidades onde foram realizadas as prospecções, acompanhados do bairro no qual estão situados, juntamente com o seu código de identificação. O polígono irregular delimitado pela cor preta representa a área com maior grau de urbanização da cidade. Já a principal estrada de acesso ao município está representada na cor vermelha.

A Figura 2 apresenta uma estimativa de valores de N_{SPT} para a profundidade 2 metros. É possível observar que o solo na porção norte da área urbana do município apresenta altos índices de resistência à penetração, acima de 20 golpes. Verifica-se ainda que, somente o bairro Barril (Cod10) apresenta valores de N_{SPT} superiores a 30 golpes para a referida profundidade. Na região centro-oeste, nota-se um solo menos resistente, com N_{SPT} variando de 0 a 10 golpes. Mais ao sul da cidade verifica-se a predominância de índices de resistência à penetração intermediária, alternando de 10 a 20 golpes.

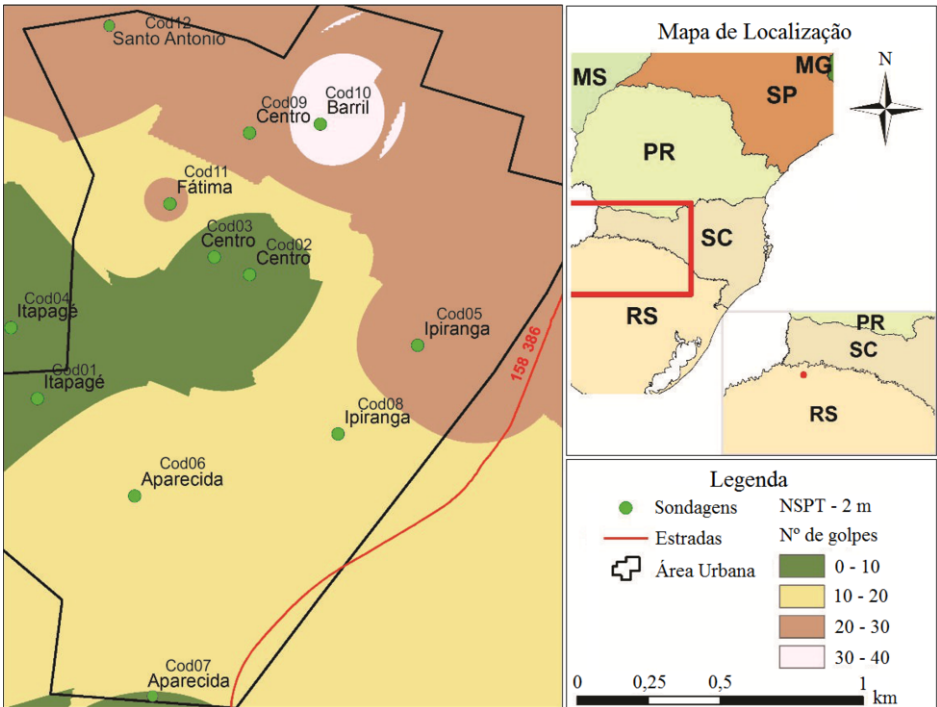


Figura 2. Valores de N_{SPT} estimados para a profundidade de 2 metros.

De acordo com a Figura 3, na cota de - 3 metros o comportamento do solo sofre grande alteração quando comparado com a análise anterior, visto ocorrer o avanço de apenas 1 metro na profundidade. Consta-se que as regiões norte e sul contemplam altos índices de resistência N_{SPT} , acima de 30 golpes, destacando os perfis 08, 10 e 12, os quais apresentam valores superiores a 40 golpes. Na zona leste, verifica-se um solo com resistência mediana, variando de 20 a 30 golpes. À oeste da cidade nota-se o solo menos resistente do município, com índice de resistência entre 0 e 20 golpes. Comportamento semelhante a este é observado na região central.

Na profundidade de 5 metros (Figura 3), a região norte e leste do município explicitam os maiores índices de resistência à penetração, os quais compreendem um N_{SPT} entre 40 a 50 golpes. Nessa profundidade, a região oeste da cidade apresenta solos com resistência intermediária, com diversificados valores de N_{SPT} , que variam entre 10 a 30 golpes. Na zona sul há o predomínio de solos com relevante resistência, o que não ocorre na região central, próximo ao perfil Cod03, o qual apresenta valores inferiores a 10 golpes.

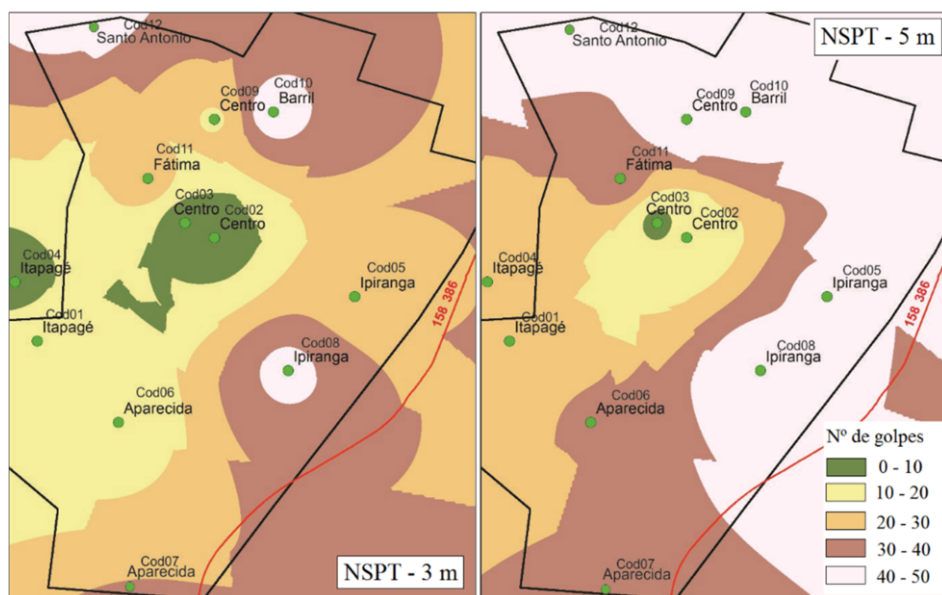


Figura 3. Valores de N_{SPT} estimados para a profundidade de 3 metros e 5 metros.

A Figura 4 apresenta os mapas do município de Frederico Westphalen com as estimativas de valores de resistência à penetração para as profundidades de 9 m e 14 m. Verifica-se que os mapas gerados para as duas profundidades apresentam características semelhantes, existindo uma predominância em todo território de índices de resistência à penetração com valores superiores a 40 golpes. A única exceção são os perfis de sondagem Cod02 e Cod03, localizados na região central do município, os quais, como esperado, seguiram a tendência inicial, apresentando os menores índices de resistência à penetração.

A partir da perspectiva apresentada ao longo do artigo foi possível verificar a grande heterogeneidade do solo do município de Frederico Westphalen/RS, principalmente no que tange a resistência do mesmo. Os valores da resistência à penetração (N_{SPT})

apresentaram oscilações tanto para uma mesma profundidade, quanto para profundidades diferentes. No geral, as regiões norte, sul e leste do município apresentaram os solos mais resistentes. A região oeste apresentou solos com resistência intermediária, enquanto que os solos do território central foram considerados os mais críticos. Constatou-se ainda uma maior variabilidade de resistência para solos mais superficiais, inferiores a profundidade de 5 m. Abaixo desta cota, o solo se manteve na maioria da área urbana com índices de N_{SPT} próximos à 50 golpes, caracterizando o impenetrável.

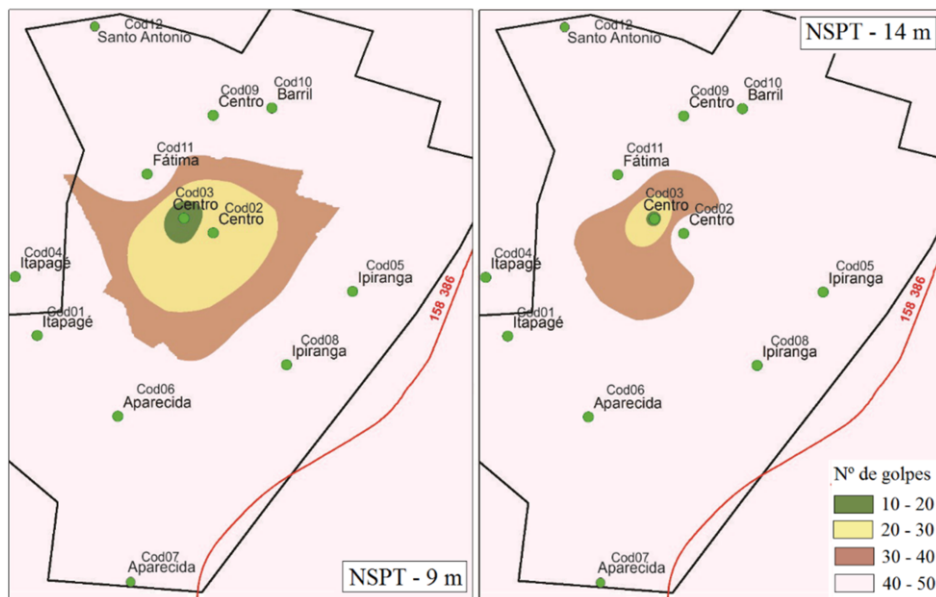


Figura 4. Valores de N_{SPT} estimados para a profundidade de 9 metros e 14 metros.

4. Conclusões

A partir dos mapas geotécnicos gerados através da espacialização foi possível realizar a estimativa do comportamento do solo, por meio do índice de resistência à penetração (N_{SPT}), perante a área urbana do município de Frederico Westphalen/RS. Observou-se que as regiões norte, sul e leste do município contemplam os solos de maior resistência, enquanto que na região oeste, os valores de N_{SPT} caracterizam solos com resistência intermediária. No geral, a região central apresenta a zona mais crítica, revelando solos com baixas resistências à penetração. Verificou-se ainda, uma maior variabilidade das resistências em solos mais superficiais. Com a variação de apenas 1 metro, da cota -2 m a cota -3 m, houve uma diferença notável de N_{SPT} indicado pelos mapas. Nesta análise também foi possível determinar que o nível do impenetrável, na maior parte do território, encontra-se entre 5 m e 9 m de profundidade.

O desenvolvimento do presente estudo possibilitou uma otimização das informações obtidas através dos ensaios de sondagem SPT, de modo a descrever o comportamento geomecânico do subsolo da região, com base em conceitos da geoestatística. A espacialização realizada em um software de geoprocessamento contribuiu para uma

caracterização mais consistente em forma de mapas georeferenciados, permitindo que o estudo englobasse toda a área urbana do município.

É importante salientar que o município tende a apresentar uma aceleração do uso e ocupação do solo, e por tal motivo os resultados oriundos dessa análise podem servir como ferramenta e/ou compor um banco de dados importante para melhorar a gestão do processo de urbanização da área em estudo. Desta forma, é possível promover a formulação de um plano diretor melhor elaborado, além de estimar as condições do subsolo para projetos de fundações. Ressalta-se ainda que os mapas geotécnicos apresentados devem ser tratados como complementares para a obtenção de estimativas de valores de N_{SPT} ao longo do território compreendido pelo município, auxiliando no planejamento inicial de qualquer obra. Contudo, sua utilização não dispensa a realização de investigações do subsolo, pois como visto, o solo pode variar de local para local, bem como em um mesmo perfil geotécnico.

Referências

- [1] Soares W. C. (2011). *Banco de dados geológico – geotécnicos com base em sondagens à percussão e uso de SIG: análise espacial da profundidade do lençol freático e do N_{SPT} para obras de fundação em João Pessoa* – PB. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo - USP, São Carlos, SP.
- [2] Folle D. (2002). *O estudo geoestatístico de sondagens SPT para geração de mapas auxiliares em obras de engenharia*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS.
- [3] Jiménez M. J., García-Fernández M., Zonno G. & Cella F. (2000) Mapping soil effects in Barcelona, Spain, through an integrated GIS environment. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 19 (4): 289-301.
- [4] El May M., Dlala M. & Chenini I. (2010). Urban geological mapping: Geotechnical data analysis for rational development planning. *Engineering Geology* 116: 129-138.
- [5] Bhunia G. S., Shit P. K. & Maiti R. (2018). Comparison of GIS-based interpolation methods for spatial distribution of soil organic carbon (SOC). *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences* (17): 114-126.
- [6] Mackean R. A. N. & Rosenbaum M. S. (1990). Geostatistical characterization of the SPT. In: *Proceedings of 6th International IAEG Congress*, Amsterdam, Balkema: 317-322.
- [7] Sturaro J. R. (1994). *Mapeamento geoestatístico de propriedades geológicas-geotécnicas obtidas de sondagens de simples reconhecimento*. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo - USP, São Carlos, SP.
- [8] Wan-Mohamad W. N. S. & Abdul-Ghani A. N. (2011). The Use of Geographic Information System (GIS) for Geotechnical Data Processing and Presentation. In: The 2nd International Building Control Conference, *Procedia Engineering* (20): 397-406.
- [9] Silva D. F. (2008). *Mapeamento geoestatístico dos parâmetros N_{SPT} e torque máximo de solos em parte da bacia do Ribeirão Cambezinho em Londrina/PR*. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual de Londrina, Londrina, PR.
- [10] IBGE (2018). Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística: *Área da unidade territorial*. Rio de Janeiro. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/cartografia/default_territ_area.shtm>. Acesso em: dez. 2018
- [11] Bertani G., Breunig F. M. & Spohr R. B. (2012). Análise de crescimento da mancha urbana do município de Frederico Westphalen, RS-Brasil através de imagens LANDSAT 5 TM. *Revista Geografar*, 7 (1): 68-83.
- [12] Leinz V. (1949). Contribuição à geologia dos derrames basálticos do sul do Brasil. In: *Boletim CIII, Geologia*, Universidade de São Paulo, São Paulo, (5): 61p.
- [13] CPRM (2006). Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais – Serviço Geológico do Brasil: *Mapa geológico do estado do Rio Grande do Sul*. Brasília: Escala 1: 750.000.
- [14] ABNT NBR 6484 (2001). Associação Brasileira de Normas Técnicas: *Solo – Sondagem de simples reconhecimento com SPT – Método de ensaio*. Rio de Janeiro: 17p.
- [15] Jakob, A. A. E., Young, A. F. (2006). O uso do método de interpolação espacial das análises sociodemográficas. In: *Anais do XV Encontro Nacional de Estudos Populacionais*, Caxambu, Minas Gerais, ABEP: 1-22.