

Utilização de Técnicas Geoestatísticas para a Predição da Resistência a Penetração SPT

Juciela Cristina dos Santos

Professora, Universidade Federal de Alagoas, Campus CECA, Maceió, Brasil, juciela.santos@ceca.ufal.br

Roberto Quental Coutinho

Professor, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Brasil, roberto.coutinho@ufpe.br

RESUMO: A geoestatística mostra-se como uma técnica bastante eficiente em diversas áreas do conhecimento em que se necessita lograr valores em regiões sem amostras, permitindo a compreensão da distribuição espacial de fenômenos e variáveis. Diante disso, esse trabalho objetivou a apresentação de uma abordagem de utilização de técnicas geoestatísticas para geração de mapas preditivos da resistência a penetração SPT. As análises foram realizadas a partir de 304 sondagens SPT distribuídas espacialmente em 3,61km² sob sedimentos de formação Barreiras na cidade de Maceió-AL, utilizando o método de krigagem ordinária. Os valores de resistência a penetração N_{spt} foram interpolados para as profundidades de 2,00m, 4,00m, 6,00m, 9,00m e 12,00m, segregados em duas estações, seca, entre os meses de agosto a março e chuvosa, entre os meses de abril a junho. As análises realizadas mostraram que no período chuvoso ocorre reduções dos valores N_{spt} em toda a área de estudo, o que pode estar diretamente relacionado com o aumento da umidade, observada de maneira mais significativa entre as profundidades de 0m-6m. De acordo com os resultados percebe-se que em geral, os mapas probabilísticos apresentam-se satisfatórios para a predição dos valores N_{spt} , principalmente para as áreas com uma abundância de amostras e boa distribuição espacial.

PALAVRAS-CHAVE: Geoestatística, Resistência N_{spt} , Mapas Probabilísticos.

ABSTRACT: Geostatistics proves to be a very efficient technique in several areas of knowledge in which it is necessary to obtain values in regions without samples, allowing the understanding of the spatial distribution of phenomena and variables. Therefore, this work aimed to present an approach for using geostatistical techniques to generate predictive maps of resistance to SPT penetration. The analyzes were carried out from 304 SPT surveys spatially distributed over 3.61km² under Barreiras formation sediments in the city of Maceió-AL, using the ordinary kriging method. The N_{spt} penetration resistance values were interpolated for depths of 2.00m, 4.00m, 6.00m, 9.00m and 12.00m, segregated into two seasons, dry, between the months of August to March and rainy, between the months of April to June. The analyzes carried out showed that during the rainy season there are reductions in N_{spt} values throughout the study area, which may be directly related to the increase in humidity, observed more significantly between the 0m-4m layers. According to the results, it is clear that in general, probabilistic maps are satisfactory for predicting N_{spt} values, especially for areas with an abundance of samples and good spatial distribution.

KEYWORDS: Geostatistics, N_{spt} Resistance, Probabilistic Maps.

1 INTRODUÇÃO

O conhecimento acerca do comportamento e das características do solo desempenham um papel crucial no planejamento urbano, na gestão ambiental, na concepção de estruturas de contenção, na estabilidade de taludes, na elaboração de projetos de fundações, entre outros diversos aspectos. Esses dados são rotineiramente obtidos através de investigações geotécnicas de campo e laboratório que resultam em parâmetros fundamentais para subsidiar decisões técnicas em projetos e obras de engenharia.

Diversas técnicas e tecnologias são atualmente empregues para auxiliar nessas aquisições e uma delas é a incorporação de dados de investigação de campo provenientes de ensaios SPT (*Standard Penetration Test*) conjugados a espacialização através dos Sistemas de Informação Geográficas (SIG). Esta técnica, já consolidada em algumas áreas, está ganhando cada vez mais destaque no campo da geotecnia e foi explorada neste trabalho com a finalidade de elaboração de mapas preditivos de resistência a penetração em áreas com boa distribuição de dados.

No que diz respeito aos bancos de dados geotécnicos, estes se consolidam no Brasil e no mundo, como ferramenta importante e de finalidades distintas para engenharia, tratando de armazenamento e produção de informações úteis para planejamento territorial e obras de engenharia. No Brasil merecem destaque os bancos de dados geotécnicos estruturados por Bastos *et al.* (2007), Miranda, (2007) no Rio Grande do Sul, Augusto Filho (2005) em Minas Gerais, Coutinho, Monteiro e Oliveira (1996) entre outros.

No que tange as técnicas geoestatísticas, tem sido bastante utilizada há várias décadas para estimativa e interpolação de dados com o propósito de analisar variáveis regionalizadas, onde a continuidade espacial desempenha papel crucial na precisão das estimativas. Essas técnicas foram inicialmente empregadas nas áreas de Engenharia de Minas, Ambiental, Petróleo e Geologia, e mais recentemente na Geotecnia.

Essa técnica tem sido explorada por diversos trabalhos, com destaque para o Nordeste, o banco de dados realizado para a cidade de João Pessoa – Paraíba (Soares, 2011), em que foram utilizadas 705 sondagens, localizadas em 3 subáreas da cidade, que possuíam duas unidades geológicas distintas (Sedimentos Marinhos e Formação Barreiras), o trabalho realizado por Mendes e Lorandi (2008), através de estudos geoestatísticos a partir de sondagem SPT para a cidade de São José do Rio Preto, São Paulo, determinando variação do lençol freático nos períodos seco e chuvoso, correlacionando com a existência de solos colapsíveis, os estudos de Luiz e Gutierrez (2020), que realizaram uma avaliação geoestatística através do método de krigagem ordinária a partir de 109 poços de água para a cidade de Maringá, Paraná, identificando correlações entre valores de N_{spt} e a geomorfologia da região estudada, dentre tantos outros transbordamentos que esta técnica pode oferecer.

É diante deste aspecto que se desenvolve este trabalho, que teve como objetivo realizar a construção de um banco de dados espacial de sondagens SPT e a partir dele a incorporação e análises geoestatísticas a partir de mapas preditivos de resistência a penetração nos períodos seco e chuvoso para uma porção territorial da cidade de Maceió-Alagoas.

2 ÁREA DE ESTUDO

A cidade de Maceió possui uma área territorial de aproximadamente 511km² e uma população de 957.916 habitantes (IBGE, 2022). Está localizada no litoral do Estado de Alagoas, Nordeste do Brasil, banhada pelo Oceano Atlântico na sua porção leste e por uma das lagunas que denominaram o estado, a laguna Mundaú, na porção oeste. Possui um clima quente e úmido, classificado como tipo As', segundo a classificação Köppen. Existem duas estações bem definidas, a chuvosa, que vai de março a agosto, com a quadra chuvosa se estendendo entre os meses de abril a julho, onde ocorrem as maiores precipitações, e a estação seca, que se estende entre os meses de setembro a fevereiro.

Maceió possui aproximadamente 72% de sua área urbana localizada sobre terrenos sedimentares correspondente a Formação Barreiras, considerada a última deposição da Bacia Sedimentar Alagoas, ocorrendo com uma largura média de 20km, formando um pacote entre 60 a 130m (SANTOS, LIMA e NETO, 2004). Os quaternários resultam da ação marinha, fluvial e eólica, que originou uma planície litorânea e lagunar com terraços marinhos e lacustres, cordões arenosos e antigos estuários afogados que dão origem às lagoas.

A área de estudo objeto deste artigo (Figura 1), é uma porção do território de Maceió, que possui 3,61km², estando compreendida entre as coordenadas UTM E= 198396,269 e N = 8940374,300; E = 200228,394 e N = 8944195,805, zona 25S, meridiano central -33°, onde estão inseridas parte dos bairros Antares, Benedito Bentes, Tabuleiro dos Martins e Cidade Universitária.

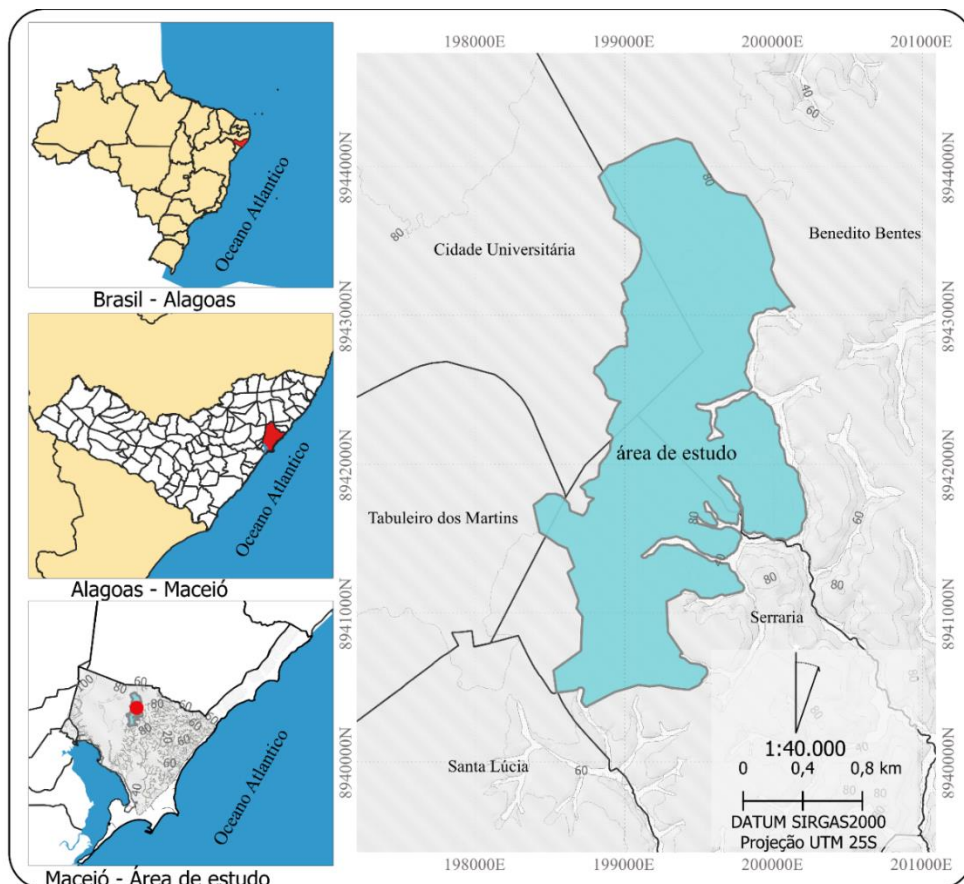


Figura 1. Localização da área de estudo.

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

A proposta metodológica apresentada neste trabalho é composta por quatro partes essenciais: a coleta e a análise dos perfis de sondagens existentes na cidade de Maceió; a estruturação do banco de dados geográfico destas sondagens e seu tratamento geoestatístico; A definição da área de estudo onde existem maiores disponibilidades de registros de sondagens SPT espacialmente distribuídas e as análises geoestatísticas propriamente ditas, com a geração de mapas probabilísticos e de incertezas. Para uma melhor compreensão das etapas descritas, é apresentado um fluxograma por meio da Figura 2.



Figura 2. Etapas Metodológicas.

As sondagens utilizadas neste artigo foram cedidas pela empresa AGM Geotécnica, sendo especializadas no território de Maceió através das coordenadas geográficas na projeção UTM – Sistema SIRGAS2000. Considerando a variabilidade espacial desses dados, os registros SPT foram segregados em dois períodos com relação a estação seca (agosto-março) e estação chuvosa (abril-julho), realizando as análises geoestatísticas quanto a resistência à penetração N_{spt} nas profundidades de 2,0m, 4,0m, 6,0m, 9,0m e 12,0m. Esses valores foram considerados em função das experiências de execução das fundações na região estudada, sendo essas profundidades as mais relevantes. As análises geoestatísticas foram realizadas através do software ArcGis 10.4.1, conectado ao sistema gerenciador de banco de dados PostGIS.

A análise exploratória foi realizada com base na estatística descritiva se deu através da ferramenta Geostatistical Analytic do ArcGis. Essa ferramenta fornece parâmetros estatísticos básicos e subsídio para avaliação da correlação entre as amostras. Estão disponíveis para realização das análises o histograma, contendo a estatística básica, a análise através do gráfico Normal Q-Q, do mapa de Voronoi, do semivariograma e da nuvem de covariância.

A análise estatística foi realizada com base na krigagem ordinária, onde se realizou a interpolação propriamente dita. Uma das grandes vantagens desse método é a possibilidade de avaliação das incertezas na interpolação, analisadas a partir da variância e covariância. Nesta etapa, foi avaliada a possível ocorrência de anisotropias através do variograma unidirecional, com direção de 0°, 45° e 135° e abertura de 90°. Foi observado que as amostras demonstram a presença de anisotropia em relação a variável resistência N_{spt} , ou seja, ocorre uma variação nas propriedades em função das direções. Dessa forma, as direções de análises variaram em função das profundidades e dos períodos em cada área estudada, de forma a minimizar esse fenômeno.

O modelo esférico foi o utilizado por apresentar melhor adequação para as amostras utilizadas. Ao realizar a análise por validação cruzada foi possível avaliar através do variograma, o erro produzido na interpolação. Também foi possível a construção de um mapa apontando áreas onde os resultados da interpolação possuem maiores ou menores incertezas. Após a realização das interpolações por krigagem, foi necessário a definição de intervalos de representação espacial exibidos através de classes temáticas nos mapas produzidos. Esses intervalos foram definidos considerando os estados de compactidade e consistência dos solos sugeridos pela ABNT NBR 6484/2020.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O número de registros SPT trabalhados para a área estudada teve um universo amostral inicial estudado foi de 304 sondagens, havendo uma diminuição do número de registros no período chuvoso como também ao longo da profundidade. Nas análises exploratórias foi observado maior coeficiente de variação na profundidade de 2,00m no período seco. A Tabela 2 apresenta os parâmetros estatísticos obtidos na etapa de análise exploratória dos dados, considerando as profundidades e períodos estudados.

Tabela 1. Parâmetros estatísticos obtidos na análise exploratória das sondagens para a área estudada.

Parâmetros	Nspt (2,0m)		Nspt (4,0m)		Nspt (6,0m)		Nspt (9,0m)		Nspt (12,0m)	
	S	C	S	C	S	C	S	C	S	C
	Nº de sondagens	144	87	142	97	137	55	83	44	34
Mínimo	2	2	4	7	6	9	14	14	18	19
Máximo	14	9	25	27	35	30	50	50	50	50
Média	6	6	13	13	20	18	30	30	35	30
Desvio padrão	2,08	1,72	3,87	3,88	5,78	4,83	7,84	9,29	8,38	8,48
Mediana	6,5	6	13	14	20	17	29	30	35	32
Coef. de variação	0,31	0,27	0,29	0,28	0,29	0,26	0,26	0,31	0,24	0,28

Nota: S – período seco; C – período chuvoso.

Na área de estudo os parâmetros estatísticos mostraram um alcance variando entre 450m e 600m. Esse alcance pode ser considerado relativamente alto dada a proporção territorial estudada, estando relacionado

com a má distribuição espacial dos registros de sondagem sob esse território. Os parâmetros de ajuste obtidos para a modelagem geoestatística podem ser observados através da Tabela 2.

Tabela 2. Parâmetros obtidos na estimativa dos valores por krigagem ordinária para a área estudada.

Parâmetros	Nspt (2,0m)		Nspt (4,0m)		Nspt (6,0m)		Nspt (9,0m)		Nspt (12,0m)	
	S	C	S	C	S	C	S	C	S	C
	Esf.	Esf.	Esf.	Esf.	Esf.	Esf.	Esf.	Esf.	Esf.	Esf.
Efeito pepita(C0)	2	3	15	13	21	8	25	22	27	35
Patamar (C+C0)	2	1	2	0	17	12	35	73	66	78
alcance (a) (m)	400	450	450	400	35	500	500	600	500	500

Nota: S – período seco; C – período chuvoso.

As análises geoestatísticas mostraram intervalos com faixa de valores predominantes para cada profundidade e a área que correspondeu a cada intervalo foi calculada e está representada através da Tabela 4. Nota-se que em 2,00m de profundidade, mais de 80% dos registros de sondagem possuem Nspt no intervalo entre 6 – 10 golpes, tanto para o período seco como para o chuvoso, as maiores perdas ocorrem com Nspt entre 3-5, variando de 9% no período seco para 20% no período chuvoso. Para 4,00m de profundidade, foi observado que 100% da área está entre o intervalo de 11 – 19 golpes. Em 6,00m de profundidade, o intervalo predominante está com Nspt 20 – 30 no período seco e 11 – 19 no período chuvoso. Em 9,00m de profundidade, a frequência de ocorrência dos intervalos Nspt entre 20 – 30 golpes e golpes, enquanto para a profundidade de 12,00m, destaca-se a predominância do intervalo > 30 golpes. Essas características condizem com o esperado, um aumento de resistência com o aumento da profundidade.

Tabela 3. Percentual de área correspondente ao intervalo de resistência SPT nas profundidades estudadas.

Intervalo Nspt	Nspt (2,0m)		Nspt (4,0m)		Nspt (6,0m)		Nspt (9,0m)		Nspt (12,0m)	
	Área (%)*		Área (%)*		Área (%)*		Área (%)*		Área (%)*	
	S	C	S	C	S	C	S	C	S	C
≤ 2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3 - 5	9	20	-	-	-	-	-	-	-	-
6 - 10	86	80	-	1	-	-	-	-	-	-
11 - 19	5	-	100	99	43	62	-	2	-	3
20 - 30	-	-	-	-	57	38	56	70	30	48
> 30	-	-	-	-	-	-	44	28	70	49

Nota: S – período seco; C – período chuvoso. *Percentual da área total referente a área estudada.

Os mapas de variabilidade espacial da resistência Nspt para as profundidades estudadas são apresentados através da Figura 03 e 04.

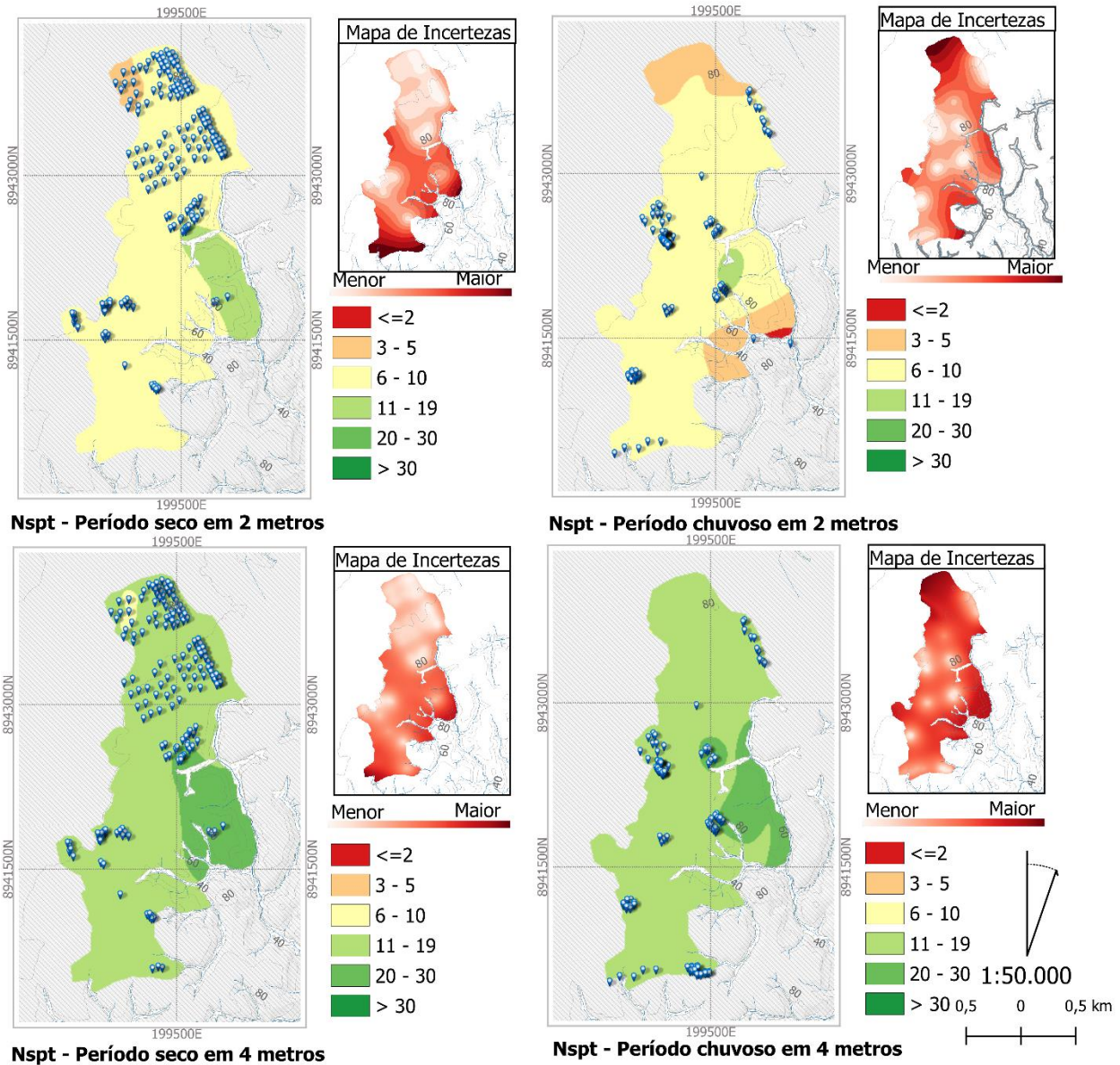


Figura 3. Mapa de variabilidade dos valores Nspt no período seco e chuvoso para as profundidades de 2m e 4m.

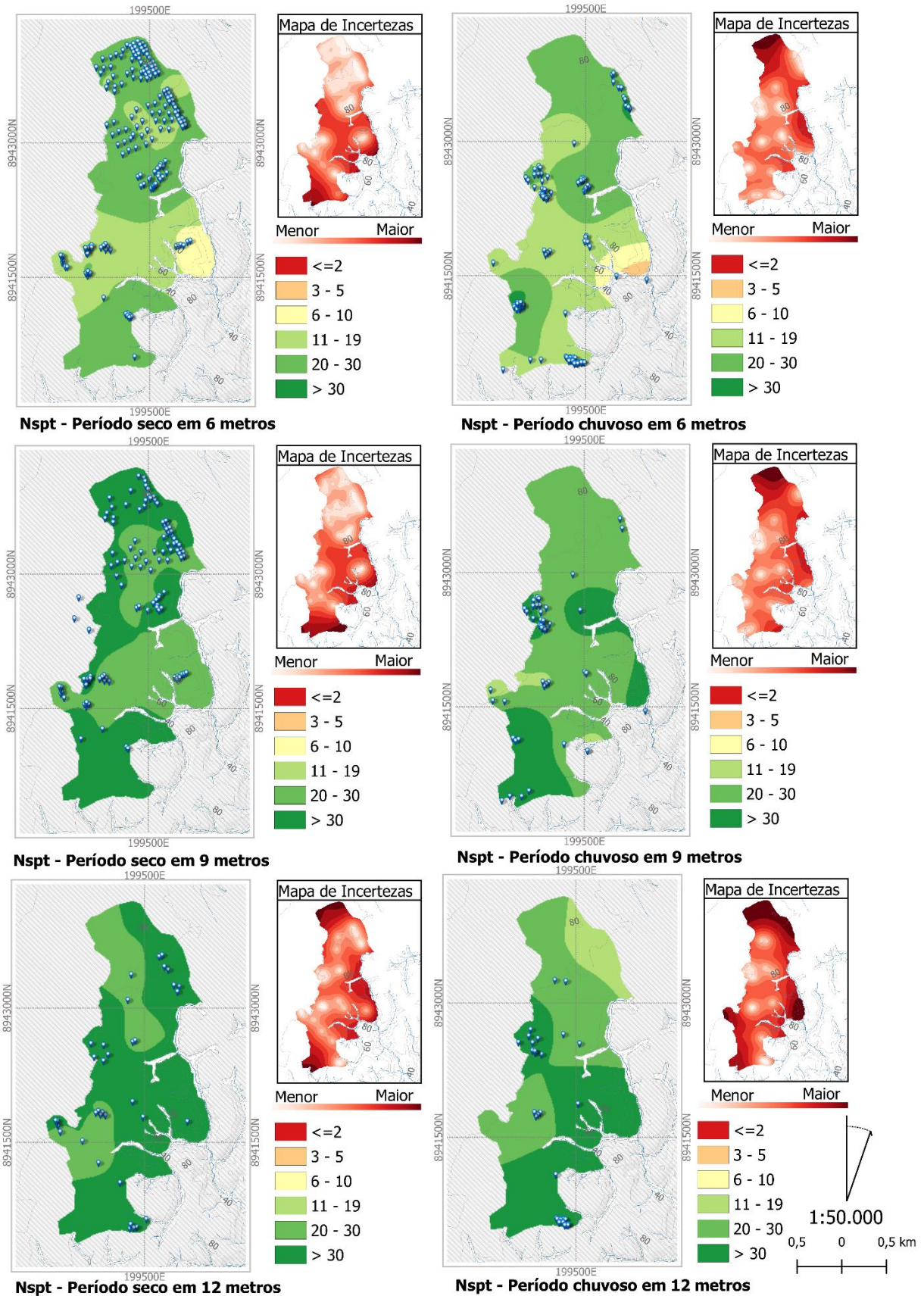


Figura 4. Mapa de variabilidade dos valores Nspt no período seco e chuvoso para as profundidades de 6m, 9m e 12m.

5 CONCLUSÕES

Este artigo traz uma contribuição para o campo científico e para a comunidade geotécnica local sob a perspectiva geral do comportamento geotécnico dos solos na região estudada, apresentando a utilização das geotecnologias através de banco de dados espacial de sondagens SPT e da geoestatística como aliados.

Através das análises realizadas pode-se perceber que a partir dos resultados obtidos é possível uma visão mais abrangente e detalhada da distribuição da resistência à penetração N_{spt} nas camadas de solo e ao longo da profundidade na região estudada, permitindo uma estimativa mais precisa das características geotécnicas e com isso enriquecendo o entendimento dos fatores que podem influenciar o comportamento do solo, fornecendo informações valiosas para projetos de engenharia e planejamento urbano na região. Os resultados apontam que em até 6,00m de profundidade são observados as maiores diferenças na resistência a penetração N_{spt} entre os períodos seco e chuvoso, observados nos mapas probabilísticos, com intervalos de resistência crescente com a profundidade, seguindo uma lógica esperada.

Em suma, os resultados probabilísticos demonstraram eficiência para o que se propõem, especialmente na área em que a densidade amostral foi mais significativa, ou seja, onde o número de sondagens era maior, e com uma distribuição espacial mais uniforme. Entretanto, a análise revelou incertezas mais pronunciadas nas regiões periféricas, sugerindo a necessidade de uma abordagem mais cuidadosa e avaliação detalhada nessas áreas específicas. Essa conclusão ressalta a importância da qualidade e quantidade dos dados amostrais para a precisão e confiabilidade dos mapas probabilísticos, além de destacar a relevância de considerar a variabilidade espacial para uma interpretação mais precisa dos resultados.

AGRADECIMENTOS

Ao Grupo de Engenharia Geotécnica de Encostas, Planícies e Desastres, ao qual este trabalho encontra-se associado, e a AGM Geotécnica LDA pela disponibilidade dos ensaios SPT na região estudada.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Augusto Filho, O. (2005). *Implementação de banco de dados geotécnico como ferramenta adicional de gestão urbana da URBEL*. 2005. 14p.
- Coutinho, R.Q.; Monteiro, C.F.B.; Oliveira, A. T. J. (1996) *Banco de Dados das Argilas Orgânicas Moles/Médias do Recife*. (ABMS -Núcleo Nordeste, Org.). São Paulo - Brazil: [s.n.], 1996. p. 105–116.
- Mendes, R. M.; Lorandi, R. (2008). *Analysis of spatial variability of SPT penetration resistance in collapsible soils considering water table depth*. Engineering Geology, 2008. v. 101, n. 3–4, p. 218–225.
- MIRANDA, T. C. (2007). *Mapeamento das Unidades Geotécnicas e Montagem de Banco de Dados na Área Abrangida Pela Obra de Duplicação da BR101 Sul, RS, Brasil*. ABGE - Associação Brasileira de Geologia de Engenharia. Coimbra. p. 15.
- Soares, W. C. (2011). *Banco de Dados Geológico - Geotécnico com Base em Sondagens á Percussão e Uso de SIG: Análise Espacial da Profundidade do Lençol Freático e do N_{spt} para Obras de Fundação em João Pessoa -PR*. Tese de Doutorado: Universidade de São Paulo.
- Luiz, A.M.F.; Gutierrez, N. H. M. (2020). *Geostatistical data analysis of the Standard Penetration Test (SPT) conducted in Maringá-Brazil and correlations with geomorphology*. Soils and Rocks, 2020. v. 43, n. 4, p. 619–629.
- Santos, R. J. Q.; Lima, R. C. A.; Ferreira, N. J. V.(2004) *A Geomorfologia do Tabuleiro como Consequência do Neotectonismo*. Geografia - Espaço, Tempo e Planejamento. Maceió: [s.n.], 2004.
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2022). *Censo Demográfico do Brasil - IBGE Cidades*. Disponível em < <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/al/maceio/panorama>>. Acesso em: 22 de fev. 2024.