

Lucianna Herbst

**MAPEAMENTO GEOTÉCNICO NO MUNICÍPIO DE
JOINVILLE/SC: APLICAÇÃO DE FERRAMENTAS
GEOESTATÍSTICAS EM UM BANCO DE DADOS DE
SONDAGENS SPT**

Dissertação submetida ao
Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Civil da
Universidade Federal de Santa
Catarina para obtenção do título
de Mestre em Engenharia Civil.
Orientador: Rafael Augusto dos
Reis Higashi, Dr.

Florianópolis
2017

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Herbst, Lucianna

Mapeamento geotécnico no município de Joinville/SC: aplicação de ferramentas geoestatísticas em um banco de dados de sondagens SPT / Lucianna Herbst ; orientador, Rafael Augusto dos Reis Higashi, 2017.
178 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Florianópolis, 2017.

Inclui referências.

1. Engenharia Civil. 2. Mapeamento geotécnico. 3. Sondagem à percussão (SPT). 4. Geoestatística. 5. Sistemas de Informações Geográficas (SIG). I. Higashi, Rafael Augusto dos Reis. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. III. Título.

Lucianna Herbst

**MAPEAMENTO GEOTÉCNICO NO MUNICÍPIO DE JOINVILLE/SC:
APLICAÇÃO DE FERRAMENTAS GEOESTATÍSTICAS EM UM
BANCO DE DADOS DE SONDAgens SPT**

Esta Dissertação foi julgada adequada para a obtenção do Título de “Mestre em Engenharia Civil” e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - PPGEC da Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC.

Florianópolis, 09 de março de 2017.

Prof. Glicério Trichês, Dr.
Coordenador do PPGEC

Banca Examinadora:

Prof. Rafael Augusto dos Reis Higashi, Dr.
Orientador
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Luiz Antonio Bressani, Dr.
Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof. Edgar Odebrecht, Dr.
Universidade do Estado de Santa Catarina

Prof.^a Liseane Padilha Thives, Dr.^a
Universidade Federal de Santa Catarina

Aos meus maiores incentivadores,
meu pais Alfredo e Silvia, pelo
apoio incondicional e eterno amor.
Gratidão.

AGRADECIMENTOS

Ao Pai celestial e amigos espirituais pela vida e proteção nos milhares de quilômetros rodados na conexão Joinville-Florianópolis ao longo de todos os anos de mestrado.

À minha família maravilhosa, Alfredo, Silvia, Luiz Alfredo, Isabelle, vó Marly, vó Isolde e vó Gerhard pelo incentivo, coragem, suporte e amor ao longo de toda a minha vida.

Às amigas Manoelle e Juliana, irmãs que eu escolhi a dedo, pela paciência em me ouvir, pela compreensão nas ausências, pelos conselhos e toda a força nos (muitos) momentos de cansaço.

Ao amigo Glauciano, por dividir comigo toda a minha vida acadêmica e profissional, pelo apoio e parceria nestes longos anos de amizade.

À Universidade Federal de Santa Catarina e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil pela oportunidade de realização desta pesquisa e de me desenvolver tecnicamente.

Ao meu orientador, professor Dr. Rafael Augusto dos Reis Higashi, pelo apoio à proposta de trabalho, confiança, paciência e valiosos conhecimentos divididos comigo nesta orientação. Minha eterna gratidão.

Aos professores membros da banca de avaliação deste trabalho.

A todos os professores do mestrado que me ajudaram a chegar até aqui.

Às amigas que o mestrado me trouxe, Ângela, Fernanda e Gisele, pela ajuda, incentivo e por dividirem comigo as alegrias e angústias do mestrado.

Às empresas Azimute Engenharia, Geoforma, Sondagel, Autopista Litoral Sul e todos os demais amigos e parceiros da vida profissional, pela disponibilização de seus valiosos acervos de sondagens.

Aos estagiários e colegas de trabalho Thiago, Glauca e Matheus pelo auxílio na estruturação do banco de dados e com os inúmeros mapas.

A todos os que não foram aqui citados, mas que de alguma forma contribuíram para que esse trabalho fosse concluído.

Muito obrigada!

RESUMO

O estudo desenvolvido nesta dissertação apresenta o resultado da aplicação de ferramentas geoestatísticas para análise da variabilidade espacial e estimativas de dados geotécnicos oriundos de sondagens de simples reconhecimento com *Standard Penetration Test* (SPT), a partir de um banco de dados georreferenciados e estruturados em um *software* SIG (Sistemas de Informações Geográficas) de 700 sondagens localizadas na Bacia Hidrográfica do Rio Cachoeira e seu entorno, zona urbana de Joinville/SC, com área de aproximadamente 83 km². As atividades desenvolvidas possibilitaram a confecção de mapas de estimativas das profundidades do nível d'água e do impenetrável à percussão e também da resistência N_{SPT} dos solos ao longo de sua profundidade. Tais estimativas foram associadas à quantificação e espacialização de seus erros, possibilitadas através da execução de interpolações geoestatísticas pelo método da krigagem ordinária. As informações obtidas foram correlacionadas ao mapa geotécnico da área, elaborado neste estudo através da metodologia Davison Dias (1995), que resultou na definição de 9 unidades geotécnicas na área: Asq (Solo Aluvial substrato sedimentos quaternários), Cgl (Cambissolo substrato granulito), Cgn (Cambissolo substrato gnaiss), GHsq (Solo Glei substrato sedimentos quaternários), PVgl (Podzólico Vermelho-Amarelo substrato granulito), PVgn (Podzólico Vermelho-Amarelo substrato gnaiss), Rgl (Solo Litólico substrato granulito), Rgn (Solo Litólico substrato gnaiss) e SMsq (Solos de Mangue substrato sedimentos quaternários). A associação entre as estimativas obtidas com a geoestatística e os mapeamentos geológico, pedológico e geotécnico da área permitiu a elaboração dos perfis estratigráficos das unidades geotécnicas mapeadas. De maneira geral as estimativas se mostraram válidas, pois estão associadas também com seus erros de interpolação, sendo estes menores nas regiões com maior densidade de sondagens e mais significativos nas regiões com poucos dados amostrais.

Palavras-chave: Mapeamento Geotécnico. Sondagem à Percussão (SPT). Geoestatística. Sistemas de Informações Geográficas (SIG).

ABSTRACT

The study developed in this dissertation presents the results of the application of geostatistical tools to analyze the spatial variability and estimates of geotechnical data from surveys of simple recognition with Standard Penetration Test (SPT), from a database georeferenced and structured in a GIS (Geographic Information System) software of 700 SPT boreholes located in the Cachoeira River watershed and its surroundings, urban area of Joinville/SC, with an area of approximately 83 km². The developed activities allowed the preparation of maps of estimates of the depths of the groundwater level and the SPT impenetrable layer depth and also the N_{SPT} resistance of the soils along its depth. These estimates were associated to the quantification and spatialization of their errors, made possible through the execution of geostatistical interpolations using the ordinary kriging method. The information obtained was correlated to the geotechnical map of the area, elaborated in this study through Davison Dias methodology (1995), which resulted in the definition of 9 geotechnical units in the area: Asq (Alluvial Soil substrate quaternary sediments), Cgl (Cambisol substrate granulite), Cgn (Cambisol substrate gneiss), GHsq (Gleysol substrate quaternary sediments), PVgl (Red-Yellow Podzolic substrate granulite), PVgn (Red-Yellow Podzolic substrate gneiss), Rgl (Litho-granular substrate granulite), Rgn (Litho-granular substrate gneiss) and SMsq (Mangrove Soils substrate quaternary sediments). The association between the estimates obtained with the geostatistics and the geological, pedological and geotechnical mapping of the area allowed the elaboration of the stratigraphic profiles of the geotechnical units mapped. In general, the estimates proved to be valid, since they are also associated with their interpolation errors, which are lower in the regions with higher sampling densities and more significant in regions with few sample data.

Keywords: Geotechnical Engineering Mapping. Standard Penetration Test (SPT). Geostatistics. Geographic Information Systems (GIS).

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Equipamento de sondagem SPT	23
Figura 2. Aspectos tecnológicos de um SIG	27
Figura 3. Exemplo de dados vetoriais em SIG	29
Figura 4. Elementos de representação vetorial e raster	30
Figura 5. Exemplo de tabela de atributos de um SIG.....	31
Figura 6. Diferenças entre a estatística clássica e a geoestatística	32
Figura 7. Relação entre a função variograma e a função covariância..	36
Figura 8. Esquema ilustrativo de fenômenos espaciais: a) isotrópico e b) anisotrópico	37
Figura 9. Tipos de anisotropias: a) geométrica e b) zonal	38
Figura 10. Propriedades de um típico variograma com patamar	39
Figura 11. Modelos de variogramas com patamar: a) esférico, exponencial e gaussiano e b) cúbico, pentaesférico e efeito “furo”	40
Figura 12. Modelos de variogramas de potência (sem patamar).....	42
Figura 13. Cruzamento entre os principais mapas utilizados na metodologia de Davison Dias (1995).....	50
Figura 14. Simbologia das unidades geotécnicas utilizada na metodologia de Davison Dias (1995).....	51
Figura 15. Mapa de localização da BHRC	57
Figura 16. Mapa dos bairros abrangidos pela BHRC.....	58
Figura 17. Mapa da densidade demográfica (2014) na BHRC	63
Figura 18. Mapa da população (2014) na BHRC	64
Figura 19. Mapa de uso do solo da BHRC	65
Figura 20. Mapa da hidrografia principal na BHRC	68
Figura 21. Mapa hipsométrico da BHRC	71
Figura 22. Mapa geológico da BHRC.....	73
Figura 23. Percentuais das áreas das unidades geológicas na BHRC	74
Figura 24. Mapa litológico da BHRC	75
Figura 25. Percentuais das áreas das unidades litológicas na BHRC..	76
Figura 26. Mapa pedológico da BHRC	78
Figura 27. Percentuais das áreas das unidades pedológicas na BHRC.	80
Figura 28. Fluxograma das atividades da pesquisa	82
Figura 29. Modelo digital do terreno na BHRC.....	85
Figura 30. Mapa de declividades da BHRC	87
Figura 31. Exemplo de boletim de sondagem SPT recebido	88
Figura 32. Localização das sondagens SPT recebidas	90
Figura 33. Mapa geotécnico preliminar da BHRC	94
Figura 34. Localização das unidades geotécnicas preliminares inconsistentes	96
Figura 35. Mapa geotécnico da BHRC	102

Figura 36. Porcentagens das áreas das unidades geotécnicas na BHRC.....	104
Figura 37. Porcentagens das áreas de solos residuais e sedimentares na BHRC.....	105
Figura 38. Toposequência típica dos solos na BHRC.....	107
Figura 39. Perfil estatístico das unidades geológicas <i>versus</i> profundidade.....	113
Figura 40. Perfil estatístico das unidades pedológicas <i>versus</i> profundidade.....	117
Figura 41. Perfil estatístico das unidades geotécnicas <i>versus</i> profundidade.....	120
Figura 42. Superfície variométrica e ajuste ao modelo exponencial - cota do nível d'água	123
Figura 43. Mapas estimativos do nível d'água na BHRC.....	125
Figura 44. Superfície variométrica e ajuste ao modelo exponencial - cota do impenetrável à percussão	128
Figura 45. Mapas estimativos do impenetrável à percussão na BHRC	130
Figura 46. Superfície variométrica e ajuste ao modelo exponencial - resistência N_{SPT} na profundidade 2,0m.	134
Figura 47. Mapas estimativos do N_{SPT} na BHRC na profundidade 2,0m	136
Figura 48. Mapas estimativos do N_{SPT} na BHRC na profundidade 4,0m	137
Figura 49. Mapas estimativos do N_{SPT} na BHRC na profundidade 6,0m	138
Figura 50. Mapas estimativos do N_{SPT} na BHRC na profundidade 8,0m	139
Figura 51. Mapas estimativos do N_{SPT} na BHRC na profundidade 10,0m.....	140
Figura 52. Mapas estimativos do N_{SPT} na BHRC na profundidade 12,0m.....	141
Figura 53. Mapas estimativos do N_{SPT} na BHRC na profundidade 15,0m.....	142
Figura 54. Mapas estimativos do N_{SPT} na BHRC na profundidade 20,0m.....	143
Figura 55. Perfil geoestatístico da resistência N_{SPT} <i>versus</i> profundidade nas unidades geotécnicas.....	148
Figura 56. Perfil estratigráfico genérico dos Solos Litólicos Rgn/Rgl (substrato gnaisse/granulito)	151
Figura 57. Perfil estratigráfico genérico dos Solos Podzólicos Vermelho-Amarelos PVgn/PVgl (substrato gnaisse/granulito).....	152
Figura 58. Perfil estratigráfico genérico dos Cambissolos Cgn/Cgl (substrato gnaisse/granulito)	154

Figura 59. Perfil estratigráfico genérico dos Solos Aluviais Asq (substrato sedimentos quaternários)	155
Figura 60. Perfil estratigráfico genérico do Solo Glei GHsq (substrato sedimentos quaternários)	157
Figura 61. Perfil estratigráfico genérico dos Solos de Mangue SMSq (substrato sedimentos quaternários)	158

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Estados de compacidade e consistência dos solos em função do N_{SPT}	24
Tabela 2. Influência das propriedades de solos granulares no N_{SPT}	26
Tabela 3. Modelos teóricos de variogramas com patamar	41
Tabela 4. Simbologia simplificada das classes pedológicas na metodologia de Davison Dias (1995)	52
Tabela 5. Simbologia simplificada das classes geológicas na metodologia de Davison Dias (1995)	53
Tabela 6. Limites das classes de relevo para elaboração do mapa de declividade.....	54
Tabela 7. Bairros abrangidos pela BHRC e respectivas áreas.....	59
Tabela 8. Densidade demográfica e distribuição da população na BHRC	61
Tabela 9. Uso do solo na BHRC	66
Tabela 10. Correlação entre as unidades pedológicas do SiBCS 2006 e a classificação antiga, na área da BHRC.....	79
Tabela 11. Áreas das unidades geotécnicas preliminares da BHRC.....	93
Tabela 12. Unidades geotécnicas preliminares inconsistentes	95
Tabela 13. Critérios para escolha do variograma teórico através da validação cruzada.....	99
Tabela 14. Áreas das unidades geotécnicas da BHRC	103
Tabela 15. Classificação dos solos nas unidades geotécnicas da BHRC quanto à sua origem	104
Tabela 16. Elevação e declividade das unidades geotécnicas da BHRC	106
Tabela 17. Estatísticas gerais	108
Tabela 18. Análise estatística das unidades geológicas.....	111
Tabela 19. Análise estatística das unidades pedológicas.....	115
Tabela 20. Análise estatística das unidades geotécnicas.....	119
Tabela 21. Parâmetros geoestatísticos e validação cruzada dos modelos simulados - variável cota do nível d'água.....	122
Tabela 22. Parâmetros geoestatísticos e validação cruzada dos modelos simulados - variável cota do impenetrável à percussão..	127
Tabela 23. Parâmetros geoestatísticos e validação cruzada dos modelos simulados - variável resistência N_{SPT} ao longo da profundidade.....	132
Tabela 24. Resumo da análise geoestatística <i>versus</i> mapa geológico	146
Tabela 25. Resumo da análise geoestatística <i>versus</i> mapa pedológico	146
Tabela 26. Resumo da análise geoestatística <i>versus</i> mapa geotécnico	147

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A	Solo aluvial
a	Arenito
a	Alcance
A4PP2	Paragnaisses Luís Alves
gla	
A4PP2	Gnaisses granulíticos Luís Alves
la	
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ag	Argilito
Agl	Solo aluvial de substrato granulito
Agn	Solo aluvial de substrato gnaisse
an	Andesito
AQ	Areias quartzosas
ar	Ardósia
ASE	<i>Average Standard Error</i>
B	Solo tipo brunizém
b	Basalto
BH	Bacia hidrográfica
BHRC	Bacia hidrográfica do Rio Cachoeira
BR	Rodovia federal
br	Brecha
BV	Solo tipo brunizém vértico
C	Cambissolo
C	Contribuição
c	Conglomerado
C+C ₀	Patamar
C ₀	Efeito pepita
ca	Calcário
CB	Cambissolo Bruno
CE	Estado do Ceará
Cgl	Cambissolo de substrato granulito
Cgn	Cambissolo de substrato gnaisse
cm	Complexo metamórfico
CPRM	Serviço Geológico do Brasil
cr	Carvão
Csq	Cambissolo de substrato sedimentos quaternários
CV	Coefficiente de variação
d	Diorito
da	Dacito

DNPM	Departamento Nacional de Produção Mineral
EMBR	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
APA	
EPAG	Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural
RI	de Santa Catarina
ESRI	<i>Environmental Systems Research Institute</i>
f	Folhelho
g	Granito
gd	Granitoide
GH	Solo Glei
GHgl	Solo Glei de substrato granulito
GHgn	Solo Glei de substrato gnaisse
GHsq	Solo Glei de substrato sedimentos quaternários
gl	Granulito
gn	Gnaisse
HO	Solo Orgânico
IAEG	<i>International Association of Engineering Geology</i>
IPPUJ	Instituto de Pesquisa e Planejamento para o Desenvolvimento Sustentável de Joinville
KO	Krigagem ordinária
LA	Latossolo amarelo
LB	Latossolo bruno
LBC	Latossolo Bruno Câmbico
LBR	Latossolo Bruno-Roxo
LE	Latossolo Vermelho-Escuro
LR	Latossolo Roxo
LV	Latossolo Vermelho-Amarelo
ma	Mármore
MDT	Modelo digital do terreno
ME	<i>Mean Error</i>
MSE	<i>Mean Standardized Error</i>
NA	Nível d'água
NBR	Norma brasileira (ABNT)
NE- SW	Direção nordeste-sudoeste
N-S	Direção norte-sul
N _{SPT}	Resistência à penetração do amostrador SPT
P	Solos tipo Podzois Indiscriminados
p	Pelito
PB	Solo Podzólico Bruno-Acinzentado
PB	Estado da Paraíba

PE	Solo tipo Podzólico Vermelho-Escuro
PL	Planossolo
PLP	Planossolo Plíntico
PLV	Planossolo Vértico
PMJ	Prefeitura Municipal de Joinville
PR	Estado do Paraná
PT	Plintossolo
PV	Solo Podzólico Vermelho-Amarelo
PVgl	Podzólico Vermelho-Amarelo de substrato granulito
PVgn	Podzólico Vermelho-Amarelo de substrato gnaisse
PVsq	Solo Podzólico Vermelho-Amarelo de substrato sedimentos quaternários
q	Quartzito
Q2a	Depósitos aluvionares
Q2ma	Depósitos de maré arenosos
Q2pm	Depósitos de pântanos e mangues
R	Solo Litólico
r	Riolito
Rgl	Solo Litólico de substrato granulito
Rgn	Solo Litólico de substrato gnaisse
RIPSA	Rede Interagencial de Informações para a Saúde
RMSE	<i>Root-Mean-Square Error</i>
RMSS	<i>Root-Mean-Square Standardized Error</i>
E	
RS	Estado do Rio Grande do Sul
Rsq	Solo Litólico de substrato sedimentos quaternários
s	Siltito
SC	Estado de Santa Catarina
si	Sienito
SiBCS	Sistema Brasileiro de Classificação de Solos
SIG	Sistema de informações geográficas
SM	Solos de Mangue
SMsq	Solos de Mangue de substrato sedimentos quaternários
SPT	<i>Standard Penetration Test</i>
SPT-T	<i>Standard Penetration Test with Torque Measurement</i>
sq	Sedimentos quaternários
st	Sedimentos terciários
S _u	Resistência ao cisalhamento não drenada
TB	Terra Bruna-Estruturada
TBR	Terra Bruna-Roxa

TBV	Terra Bruna Podzólica
TR	Terra Roxa Estruturada
UFRG	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
S	
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
UFSM	Universidade Federal de Santa Maria
USP	Universidade de São Paulo
UTM	Universal Transversa de Mercator
V	Vertissolo
x	Xisto

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	19
1.1 OBJETIVO GERAL	21
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	21
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	22
2.1 O ENSAIO SPT	22
2.1.1 Considerações Gerais	22
2.1.2 Equipamentos e Procedimentos	24
2.1.3 Fatores que Influenciam o N_{SPT}	25
2.2 SISTEMA DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS (SIG).....	26
2.2.1 Conceitos Gerais	26
2.2.2 Principais Áreas de Aplicação	27
2.2.3 Base de Dados Espaciais	28
2.2.4 Base de Dados Descritivos	30
2.3 GEOESTATÍSTICA	31
2.3.1 Histórico e Considerações iniciais	31
2.3.2 Variáveis Regionalizadas	33
2.3.3 O Semivariograma	33
2.3.4 Interpolação por Krigagem Ordinária (KO)	42
2.3.5 Validação Cruzada	44
2.3.6 Aplicações da Geoestatística em Geotecnia	44
2.4 MAPEAMENTO GEOTÉCNICO.....	46
2.4.1 Considerações Gerais	46
2.4.2 Metodologia de Zuquette (1987)	48
2.4.3 Metodologia de Davison Dias (1995)	49
2.4.4 Adaptações de Davison Dias (1995) elaboradas por Higashi (2006)	53
2.4.5 Aplicações da Metodologia	55
2.4.6 Banco de Dados Geotécnicos	55
3. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	56
3.1 LOCALIZAÇÃO E CONFIGURAÇÃO GERAL	56

3.2	CARACTERÍSTICAS GERAIS.....	58
3.2.1	Bairros, População e Uso do Solo.....	58
3.2.2	Clima	66
3.2.3	Hidrografia	67
3.2.4	Vegetação.....	69
3.2.5	Geomorfologia e Hipsometria	69
3.2.6	Geologia	72
3.2.7	Pedologia	76
4.	MATERIAIS E MÉTODOS.....	82
4.1	CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	83
4.2	LEVANTAMENTO DE DADOS EXISTENTES	84
4.2.1	Dados Gráficos	84
4.2.2	Sondagens SPT	88
4.3	GERENCIAMENTO DOS DADOS DAS SONDAGENS	89
4.3.1	Georreferenciamento e Espacialização das Sondagens	89
4.3.2	Transcrição dos Boletins de Sondagens.....	91
4.3.3	Análise e Estruturação do Banco de Dados em um SIG....	91
4.4	MAPEAMENTO GEOTÉCNICO PRELIMINAR	92
4.5	DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS ESTATÍSTICOS... 97	
4.6	ANÁLISE GEOESTATÍSTICA.....	97
4.7	DESCRIÇÃO DAS UNIDADES GEOTÉCNICAS E RESPECTIVOS PERFIS ESTRATIGRÁFICOS.....	100
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	101
5.1	MAPEAMENTO GEOTÉCNICO	101
5.2	ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	107
5.2.1	Considerações Gerais.....	107
5.2.2	Análise Estatística das Unidades Geológicas.....	110
5.2.3	Análise Estatística das Unidades Pedológicas.....	114
5.2.4	Análise Estatística das Unidades Geotécnicas.....	118

5.3	ANÁLISE GEOESTATÍSTICA	121
5.3.1	Estimativas da Cota e Profundidade do Nível d'Água	121
5.3.2	Estimativas da Cota e Profundidade do Impenetrável à Percussão	126
5.3.3	Estimativas de Isovalores N_{SPT} ao Longo da Profundidade	131
5.3.4	Resumos Geoestatísticos dos Mapas Temáticos	145
5.4	DESCRIÇÃO DAS UNIDADES GEOTÉCNICAS E PERFIS ESTRATIGRÁFICOS GENÉRICOS	149
5.4.1	Solos Litólicos Rgn/Rgl (Substrato Gnaisse/Granulito)	150
5.4.2	Solos Podzólicos Vermelho-Amarelos PVgn/PVgl (Subst. Gnaisse/Granulito)	151
5.4.3	Cambissolos Cgn/Cgl (Substrato Gnaisse/Granulito)	152
5.4.4	Solos Aluviais Asq (Substrato Sedimentos Quaternários)	154
5.4.5	Solo Glei GHsq (Substrato Sedimentos Quaternários)	156
5.4.6	Solos de Mangue SMSq (Substrato Sedimentos Quaternários)	157
6.	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA ESTUDOS FUTUROS ...	159
6.1	PRINCIPAIS CONCLUSÕES	159
6.2	SUGESTÕES PARA ESTUDOS FUTUROS	162
	REFERÊNCIAS	164
	APÊNDICE A: HISTOGRAMAS DAS VARIÁVEIS ANALISADAS	171

1. INTRODUÇÃO

O município de Joinville caracteriza-se como o mais populoso do Estado de Santa Catarina, sendo um dos quinze maiores municípios arrecadadores de tributos e taxas municipais, estaduais e federais, concentrando grande parte de sua atividade econômica na indústria (FUNDAÇÃO IPPUJ, 2015a).

Totalmente inserida na área urbana de Joinville e representando 7,4% da área do município encontra-se a Bacia Hidrográfica do Rio Cachoeira (BHRC) com área de 83 km², comportando aproximadamente 50% da população total e que vem sendo ocupada de maneira desordenada ao longo dos anos (FUNDAÇÃO IPPUJ, 2015a).

Citam-se como consequências desta problemática urbana a ocupação de áreas propensas a riscos geológico-geotécnicos como inundações, recalques diferenciais, escorregamentos, erosões, bem como a ocupação de áreas de recarga de aquífero. Este é o caso da área abrangida pela BHRC, considerada como de alto risco para a população, principalmente na área central do município. A combinação de fatores como a ocorrência de uma intensa pluviosidade, baixa altitude da foz do Rio Cachoeira, um relevo plano e suavemente ondulado que dificulta o escoamento das águas pluviais e uma imperfeita condição de drenagem dos solos da área resulta em intensos e frequentes episódios de inundações, entre outros registros de diferentes origens e magnitudes.

Kobiyama *et al.* (2004) demonstraram que os desastres naturais brasileiros que implicam nas maiores perdas humanas são as inundações, seguidas dos escorregamentos.

Houve, nos últimos anos, uma intensificação dos prejuízos oriundos de desastres devido ao mau planejamento urbano e, caso não sejam aplicadas medidas para a redução dos mesmos, os efeitos podem ser majorados no que diz respeito à intensidade, magnitude e frequência (KOBİYAMA *et al.*, 2006).

Constata-se que ainda hoje as tratativas dos órgãos públicos em resposta aos desastres estão concentradas no

avanço tecnológico de previsões meteorológicas e na prestação de ajuda humanitária após os desastres. Entretanto, verifica-se que em grande parte do país as medidas mitigadoras cabíveis a longo prazo não são usuais e são, em muitos casos, desconhecidas tanto pelo público quanto pelos governantes. Um adequado investimento na implantação destas medidas possibilita uma economia, se comparado aos custos de recuperação.

Higashi (2002) expõe ser de fundamental importância para o desenvolvimento urbano um planejamento do espaço que leve em consideração o conhecimento prévio das características qualitativas e quantitativas referentes ao comportamento geotécnico dos materiais em subsuperfície, a fim de promover projetos e, conseqüentemente, obras de engenharia menos onerosas e mais seguras.

Conforme Soares (2011), a utilização de bancos de dados geológico-geotécnicos são ferramentas importantes para viabilizar tal planejamento, porém nem sempre os dados se encontram disponíveis ou são de fácil acesso.

Os dados citados são geralmente provenientes de campanhas de investigação geotécnica nas quais a realização de sondagens é a atividade mais rotineira e que fornece dados básicos do subsolo. As sondagens permitem que sejam extraídas amostras e outras informações, tais como a composição textural dos solos através de descrição tátil-visual dos mesmos e a profundidade do nível freático, além da obtenção do índice de resistência à penetração de um amostrador padronizado (*Standard Penetration Test* - SPT) no caso da execução de sondagens de simples reconhecimento (FONTELES, 2003).

Conforme exposto por Folle (2002), os índices de resistência obtidos em um ensaio SPT podem ser utilizados para estimarem-se recalques no solo e também a capacidade de carga de fundações.

O custo estimado para a realização de sondagens é entre 0,2% e 0,5% do total previsto a ser despendido na execução de uma obra de engenharia convencional, podendo ser mais elevado em obras especiais ou em condições adversas do subsolo

(SCHNAID; ODEBRECHT, 2012). No entanto, nem todas as obras possuem uma adequada investigação, muitas vezes devido à falta de recursos financeiros disponíveis por parte do empreendedor.

Sendo assim, a geoestatística surgiu como uma ferramenta de investigação considerada preditiva, nas quais são escolhidas amostras que representam uma área de estudo quando não é possível conhecê-la completamente devido a dificuldades na logística de execução de ensaios ou limitações de acessibilidade e/ou de custos, conforme citado.

Tal ferramenta objetiva, através de estimativas por interpolação, a caracterização espacial de um atributo por meio do estudo de sua distribuição e variabilidade espaciais, inclusive com determinação das incertezas associadas (YAMAMOTO; LANDIM, 2013).

1.1 OBJETIVO GERAL

Esta pesquisa estabeleceu como objetivo geral a aplicação da metodologia geoestatística em um banco de dados de sondagens SPT para compreensão do relevo e da geotecnia da área de abrangência da bacia hidrográfica do Rio Cachoeira em Joinville/SC através da confecção de mapas temáticos.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Elaborar o mapa geotécnico da BHRC;
- Estruturar um banco de dados em um Sistema de Informações Geográficas (SIG) com as informações obtidas em sondagens SPT na área de estudo;
- Elaborar mapas da profundidade do nível d'água e do impenetrável à percussão, bem como da resistência à penetração do amostrador SPT (N_{SPT}) em diversas profundidades, associados às suas respectivas incertezas;
- Correlacionar os resultados da análise geoestatística com os mapas geotécnico, geológico e pedológico da área de estudo;
- Representar graficamente os perfis estratigráficos dos solos mapeados na BHRC.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 O ENSAIO SPT

2.1.1 Considerações Gerais

De acordo com o exposto por Talamini Neto (2001), notadamente a execução de sondagens de simples reconhecimento é a ferramenta mais utilizada no Brasil em campanhas de investigação geotécnica, cujos dados resultantes são utilizados principalmente na avaliação da capacidade de carga dos solos em projetos de fundações. Por este motivo, áreas densamente edificadas inseridas em um perímetro urbano são comumente investigadas por sondagens deste tipo.

A simplicidade do equipamento e execução do ensaio, o baixo custo e a obtenção de um índice numérico que pode ser relacionado com regras empíricas de projeto são os principais atrativos para a ampla utilização de ensaios do tipo *Standard Penetration Test* - SPT (SCHNAID; ODEBRECHT, 2012).

Neste tipo de sondagem é possível obter uma classificação expedita dos solos amostrados por exame tátil-visual, caracterização da compacidade/consistência dos solos, o perfil estratigráfico no local do ensaio, a profundidade do nível d'água e amostras para análises (QUARESMA *et al.*, 1998).

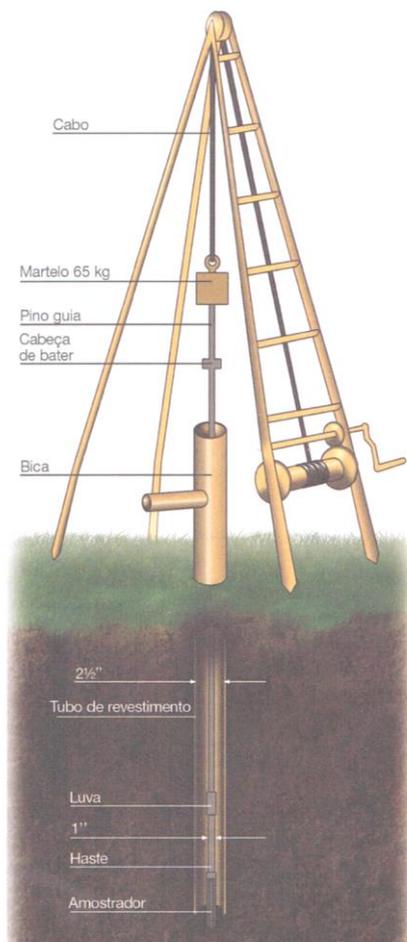
Segundo Schnaid e Odebrecht (2012), a perfuração no local ensaiado é obtida por tradagem e circulação de água com a utilização de um trépano de lavagem para escavação. A cada metro perfurado são coletadas amostras do solo por um amostrador padrão de 50 mm de diâmetro externo.

O ensaio propriamente dito é caracterizado pela cravação dinâmica do amostrador através da queda de um peso de 65 kg a partir de uma altura de 75 cm, conforme ilustrado na Figura 1.

O índice que representa a resistência do solo frente à penetração do amostrador é denominado de N_{SPT} e corresponde ao número de golpes necessários para cravação de 30 cm deste

amostrador, após uma cravação inicial de 15 cm. A norma brasileira que rege este ensaio é a NBR 6484 (ABNT, 2001).

Figura 1. Equipamento de sondagem SPT



Fonte: Schnaid e Odebrecht (2012).

A Tabela 1 apresenta a compacidade dos solos granulares e consistência dos solos coesivos em função do N_{SPT} , conforme apresentado na NBR 6484/2001.

Tabela 1. Estados de compactidade e consistência dos solos em função do N_{SPT}

Solo	N_{SPT}	Designação
Areias e siltes arenosos	≤ 4	Fofa(o)
	5 a 8	Pouco compacta(o)
	9 a 18	Medianamente compacta(o)
	19 a 40	Compacta(o)
	> 40	Muito compacta(o)
Areias e siltes argilosos	≤ 2	Muito mole
	3 a 5	Mole
	6 a 10	Média(o)
	11 a 19	Rija(o)
	> 19	Dura(o)

Fonte: NBR 6484 (ABNT, 2001).

2.1.2 Equipamentos e Procedimentos

Seis equipamentos integram um sistema de sondagem SPT: amostrador, hastes, martelo, tripé de sondagem, cabeça de bater e conjunto de perfuração, ilustrados na Figura 1 (SCHNAID; ODEBRECHT, 2012).

A perfuração do solo pode ser manual ou mecanizada. No caso de perfuração manual acima do lençol freático, esta é realizada com a utilização de trado helicoidal; abaixo do nível freático, utiliza-se um sistema de circulação de água que é bombeada através das hastes até a extremidade inferior do furo de sondagem. A perfuração mecanizada é realizada com um tubo denominado de *hollow auger*.

Após o posicionamento do amostrador no furo de sondagem, marcam-se sobre a haste três segmentos de 15 cm cada e a cravação é iniciada, registrando-se o número de golpes necessários à cravação de cada um dos segmentos. O martelo utilizado na cravação é suspenso de forma manual ou mecanizada.

Desta forma, o N_{SPT} utilizado para diversas finalidades nos projetos de engenharia corresponde ao somatório do número de golpes registrados nos últimos 30 cm cravados, dentre os três segmentos citados (SCHNAID; ODEBRECHT, 2012).

Ainda conforme os autores, no caso de ocorrência de solos moles é comum o amostrador penetrar mais do que os 15 cm iniciais com apenas um golpe. Nestes casos registra-se o número de golpes com a sua penetração correspondente (exemplo: 1/45 - 1 golpe para cravação de 45 cm). De maneira análoga, no caso de solos muito resistentes também se registra o número necessário de golpes (geralmente elevado) *versus* penetração (geralmente pequena) como, por exemplo, 30/10 - 30 golpes para cravação de 10 cm.

2.1.3 Fatores que Influenciam o N_{SPT}

Desconsiderando-se causas relacionadas a fatores humanos e a não observância das normativas e recomendações de boas práticas da engenharia, Schnaid e Odebrecht (2012) listam alguns fatores capazes de influenciar os resultados do ensaio SPT, tais como:

- Diferenças nos métodos de perfuração;
- Utilização e tipo de fluido estabilizante;
- Diâmetro do furo de sondagem;
- Mecanismo de suspensão e liberação da queda do martelo;
- Rigidez das hastes;
- Geometria do amostrador;
- Métodos de cravação;
- Características e condições do solo.

A técnica utilizada para perfuração e o método de estabilização do furo são os fatores mais importantes, ressaltando-se: (a) perfuração revestida e não preenchida totalmente com água; (b) uso de bentonita; (c) revestimento cravado além do limite de cravação; (d) ensaio executado dentro da região revestida.

A resistência não drenada (S_u) dos solos coesivos influencia o N_{SPT} nas sondagens realizadas neste tipo de solo através de características como a plasticidade, a sensibilidade e a fissuração da argila. Nos solos granulares, alguns fatores influenciáveis são apresentados na Tabela 2 (SCHNAID; ODEBRECHT, 2012).

Tabela 2. Influência das propriedades de solos granulares no N_{SPT}

Fator	Influência
Índice de vazios	Redução do índice aumenta o N_{SPT}
Tamanho médio da partícula	Aumento do tamanho aumenta o N_{SPT}
Coeficiente de uniformidade	Solos uniformes: menor N_{SPT}
Pressão neutra	Solos finos: dilatam e aumentam o N_{SPT} (solos finos muito fofos podem se liquefazer no ensaio)
Angulosidade das partículas	Aumento na angulosidade aumenta o N_{SPT}
Cimentação	Aumenta o N_{SPT}
Nível de tensões	Aumento de tensão vertical/horizontal aumenta o N_{SPT}
Idade	Solos mais antigos: maior N_{SPT}

Fonte: Adaptado de Schnaid e Odebrecht (2012).

2.2 SISTEMA DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS (SIG)

2.2.1 Conceitos Gerais

Maguire, Goodchild e Rhind (1991) definem SIG como sistemas computacionais que possuem a função de capturar, armazenar, consultar, manipular, analisar e imprimir dados referenciados espacialmente em relação à superfície da Terra.

Em termos práticos, é uma tecnologia que utiliza recursos de computação gráfica e processamento digital de imagens para associar informações geográficas a bancos de dados convencionais.

Existe uma grande diferença entre o conceito de SIG e o de geoprocessamento, pois, de acordo com o exposto por Valente (1999), este termo se refere a um conjunto de tecnologias capazes de realizar a coleta, processamento e manipulação de informações espaciais, seus cruzamentos, análises e produtos. Entre essas tecnologias, destacam-se: (a) sensoriamento remoto; (b) digitalização de dados; (c) automação de tarefas cartográficas;

(d) utilização de Sistemas de Posicionamento Global (GPS); (e) SIG (CARVALHO; PINA; SANTOS, 2000).

Dentro deste conceito, percebe-se que SIG é um elemento de apenas uma das tecnologias que compõem o geoprocessamento.

O SIG constitui-se da integração de três aspectos distintos da tecnologia computacional: (a) sistemas de gerenciamento de banco de dados (dados gráficos e não gráficos); (b) procedimentos para obtenção, manipulação, exibição e impressão de dados com representação gráfica; (c) algoritmos e técnicas para análise de dados espaciais. A Figura 2 ilustra estes três aspectos.

Figura 2. Aspectos tecnológicos de um SIG



Fonte: Elaborado pela autora (2017).

2.2.2 Principais Áreas de Aplicação

O universo de problemas onde o SIG pode atuar com contribuições substanciais é muito vasto, conforme descrito por Ramirez (1994):

- Planejamento e gerenciamento urbano: redes de infraestrutura como água, luz, telecomunicações, gás e esgoto, limpeza urbana, cadastramento territorial urbano e mapeamento eleitoral;
- Saúde e educação: rede hospitalar, rede de ensino, saneamento básico e controle epidemiológico;
- Transportes: supervisão de malhas viárias, roteamento de veículos, controle de tráfego e sistema de informações turísticas;

- Segurança - supervisão dos espaços aéreo, marítimo e terrestre; controle de tráfego aéreo, sistemas de cartografia náutica e serviços de atendimentos emergenciais;
- Uso da terra: planejamento agropecuário, estocagem e escoamento da produção agrícola, classificação de solos e vegetação, gerenciamento de bacias hidrográficas, planejamento de barragens, cadastramento de propriedades rurais, levantamento topográfico e planimétricos e mapeamento do uso do solo;
- Uso de recursos naturais: controle do extrativismo vegetal e mineral, classificação de poços petrolíferos, planejamento de gasodutos e oleodutos, distribuição de energia elétrica, identificação de mananciais e gerenciamento costeiro e marítimo;
- Meio ambiente: controle de queimadas, estudos de modificações climáticas, acompanhamento de emissão e ação de poluentes, e gerenciamento florestal de desmatamento e reflorestamento;
- Atividades econômicas: planejamento de marketing, pesquisas socioeconômicas, distribuição de produtos e serviços e transporte de matéria-prima e insumos.

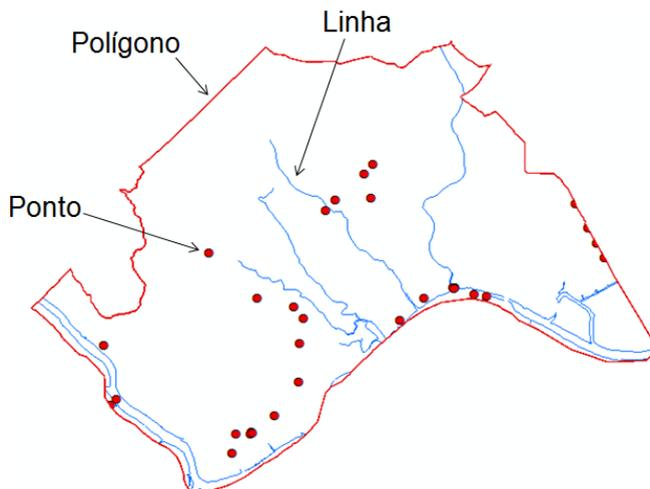
2.2.3 Base de Dados Espaciais

2.2.3.1 Dados Vetoriais

Segundo Mafra Júnior (2007) o dado vetorial representa graficamente o mundo real através de um par de coordenadas X e Y e pode ser apresentado de três formas distintas: pontos, linhas e polígonos.

A Figura 3 ilustra um exemplo destes elementos, no qual o polígono representa a delimitação de uma área, os pontos representam a localização de furos de sondagem e as linhas caracterizam a hidrografia.

Figura 3. Exemplo de dados vetoriais em SIG



Fonte: Elaborado pela autora (2017).

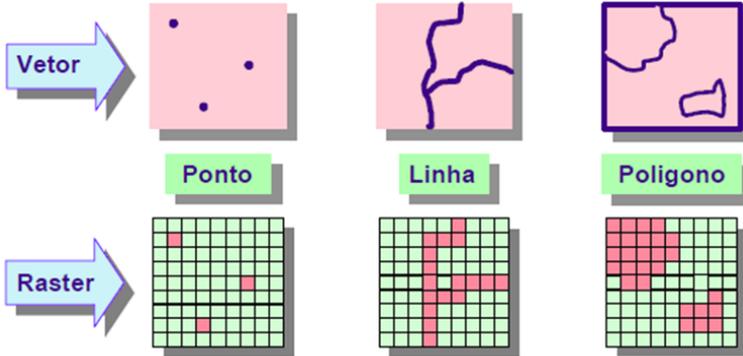
2.2.3.2 Dados Matriciais ou *Raster*

Mafera Júnior (2007) define como dados matriciais uma representação gráfica através células (pixels) usualmente quadradas, que são definidas pelas suas posições em relação a colunas e linhas de uma malha. Um valor é registrado em cada célula para representar a natureza do objeto na posição correspondente. A matriz de valores gera a representação raster.

Citam-se como exemplos deste tipo de dados as matrizes de elevação, classes de uso do solo e dados geológicos.

A Figura 4 apresenta um comparativo entre dados vetoriais e raster.

Figura 4. Elementos de representação vetorial e raster



Fonte: Miranda (2008).

2.2.4 Base de Dados Descritivos

Também conhecidos pela denominação “banco de dados”, estes elementos informam as características quantitativas e/ou qualitativas dos dados espaciais.

Segundo Carvalho, Pina e Santos (2000), a grande maioria dos SIG utiliza um modelo no qual a estrutura dos dados se dá através de tabelas, onde cada linha corresponde a uma ocorrência e cada coluna se refere a um atributo da entidade em questão.

A Figura 5 ilustra um exemplo de tabela de atributos utilizada em um SIG.

Figura 5. Exemplo de tabela de atributos de um SIG

obje	FID	Shape *	nome bairr	Area m2	Populacao	Dens demog
18	8	Polygon	ADHEMAR GARCIA	411137	2089	5095
39	26	Polygon	AMÉRICA	4540330	12122	2670
29	16	Polygon	ANITA GARIBALDI	3042340	8780	2888
28	15	Polygon	ATIRADORES	2428080	4656	1916
21	11	Polygon	BOA VISTA	4292910	14333	3341
32	19	Polygon	BOEMERWALD	3136900	17462	5561
41	28	Polygon	BOM RETIRO	1912890	6190	3241
37	24	Polygon	BUCAREIN	2040180	5841	2863
38	25	Polygon	CENTRO	1313040	5340	4076
26	13	Polygon	COSTA E SILVA	6445330	28935	4486
19	9	Polygon	FÁTIMA	2213420	15035	6803
30	17	Polygon	FLORESTA	4993610	19361	3880
27	14	Polygon	GLÓRIA	3330500	6893	2070
20	10	Polygon	GUANABARA	2552070	12217	4791
42	29	Polygon	IRIPÍRI	1173700	4523	3866

Fonte: Elaborado pela autora (2017).

2.3 GEOESTATÍSTICA

2.3.1 Histórico e Considerações iniciais

Na década de 1950, na África do Sul, o engenheiro de minas Daniel Krige concluiu que uma adequada estimativa do teor de ouro em blocos mineralizados não seria possível caso não considerasse a configuração geométrica das amostras, ou seja, suas localizações e volumes. Estas avaliações foram essenciais para que o engenheiro francês Georges Matheron desenvolvesse a teoria que estuda o comportamento de variáveis distribuídas espacialmente e que representam um fenômeno natural. Na década de 60, Matheron generalizou os métodos de estimativas aplicados anteriormente por Krige e desenvolveu os fundamentos teóricos da variabilidade de amostragem associada ao tamanho de amostras, bem como formulou uma teoria dos erros de estimativas (STURARO, 2015).

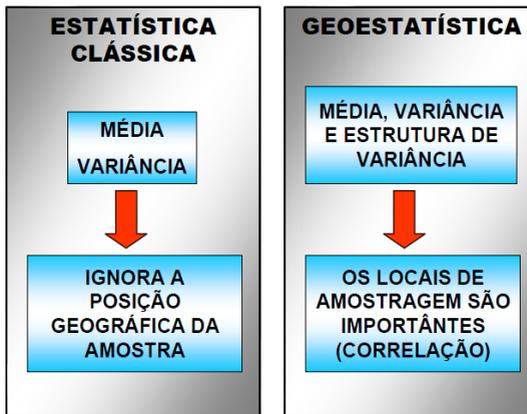
A geoestatística é definida, então, como a área de aplicação de estudos de técnicas estatísticas relacionadas à espacialização de propriedades quaisquer num espaço geograficamente definido.

Segundo Yamamoto e Landim (2013), o objetivo geral da geoestatística é a caracterização espacial de uma variável através do estudo de sua distribuição e variabilidade espaciais, com determinação das incertezas associadas.

A análise geoestatística é concretizada através de estimativas por interpolação que empregam fatores como distância entre amostras, anisotropia do solo, variabilidade, regionalidade, entre outros.

Sturaro (2015) comenta que, para realizar uma previsão em locais onde não foram coletadas amostras é preciso ter o modelo do comportamento do fenômeno natural que originou a variável que se quer estudar. Sabe-se, no entanto, que é muito difícil detalhar fenômenos naturais tais como o processo de formação de solos e rochas, que são o suporte de propriedades geotécnicas. Neste sentido surge, então, a diferenciação entre a estatística clássica e a geoestatística, cujas principais diferenças estão ilustradas na Figura 6.

Figura 6. Diferenças entre a estatística clássica e a geoestatística



Fonte: Bezerra (2014).

2.3.2 Variáveis Regionalizadas

Para Yamamoto e Landim (2013), pode-se definir uma variável regionalizada como qualquer função numérica com uma distribuição e variação espacial, mostrando uma continuidade aparente, mas cujas variações não podem ser previstas por uma função determinística.

Conforme os autores, o ajuste de um polinômio aos dados não é exato, pois há uma diferença entre o valor estimado e o observado, qualquer que seja o grau polinomial. Esta diferença é conhecida como resíduo e se caracteriza por ser a componente aleatória da variável, enquanto o valor estimado é denominado de componente regional, apresentando grande continuidade espacial.

Andriotti (2003) expõe que próximo a um valor elevado é mais provável que seja encontrado outro valor elevado do que outro muito baixo e, segundo a teoria de probabilidade, os valores dessas duas observações próximas estão correlacionados. Assim, regionalização é o caráter estruturado dos fenômenos, e a linguagem que permite tratá-los como tal é a das “funções aleatórias”, ou seja, por meio destas, estudam-se as variáveis regionalizadas.

No estudo do comportamento das variáveis regionalizadas, existem duas ferramentas fundamentais dos métodos geoestatísticos: o semivariograma e a krigagem.

2.3.3 O Semivariograma

Segundo Landim (2006), seja uma variável regionalizada x_i coletada em diversos pontos i distribuídos por certa região; o valor de cada ponto está relacionado de algum modo com valores obtidos a partir de pontos situados a certa distância, sendo razoável pensar que a influência é tanto maior quanto menor for a distância entre os pontos.

Para expressar essa relação é definido o vetor de distância $\vec{\Delta h}$, que possui uma orientação específica. O grau de relação entre pontos numa certa direção pode ser expresso pela covariância e, embora a covariância exista entre todas as distâncias possíveis ao longo de h , pode ser estipulado que somente sejam considerados valores entre pontos regularmente espaçados por múltiplos inteiros de Δh .

A covariância entre valores encontrados nessas distâncias separadas por Δh ao longo de h é expressa pela Equação 1.

$$C(h) = C(\Delta h) = \frac{1}{n} \sum x_i x_{i+h} - m^2 \quad (1)$$

onde m é a média da variável regionalizada x_i .

Isso significa que a covariância é igual à média dos produtos cruzados dos valores x_i encontrados nos pontos i pelos valores x_{i+h} nos pontos $i+h$, distantes a um intervalo Δh , subtraídos do quadrado da média da variável regionalizada x_i ; n representa o número de pares de valores comparados. Como a covariância depende do tamanho do vetor h , se $h=0$, $C(h)$ passará a representar a variância, representada por $C(0)$ (Equação 2).

$$C(0) = E[X^2] - E[X]^2 = Var[X] \quad (2)$$

Desse modo, pode-se calcular uma função denominada de semivariância, definida como metade da variância das diferenças (Equação 3).

$$\gamma\left(\vec{h}\right) = \gamma(h) = \frac{1}{2n} \sum (x_{i+h} - x_i)^2 \quad (3)$$

Valendo-se da Equação 2, na qual $Var[X] = E[X^2] - E[X]^2$ pode-se representar $\gamma(h)$ pela Equação 4.

$$\gamma(h) = \left[\frac{1}{2n} \sum (x_{i+h} - x_i)^2 \right] - \left[\frac{1}{2n} \sum (x_{i+h} - x_i) \right]^2 \quad (4)$$

Como a média da variável regionalizada x_i é também a média da variável regionalizada x_{i+h} , pois se trata da mesma variável, apenas tomadas em lugares i e em $i+h$, tem-se o indicado na Equação 5.

$$\left[\frac{1}{2n} \sum (x_{i+h} - x_i) \right]^2 = 0 \quad (5)$$

Desenvolvendo-se o primeiro termo desta Equação, tem-se a Equação 6.

$$\gamma(h) = \frac{1}{2n} \sum x_{i+h}^2 - 2 \frac{1}{2n} \sum x_{i+h} x_i + \frac{1}{2n} \sum x_i^2 = \frac{1}{n} \sum x_i^2 - m^2 - C(h) \quad (6)$$

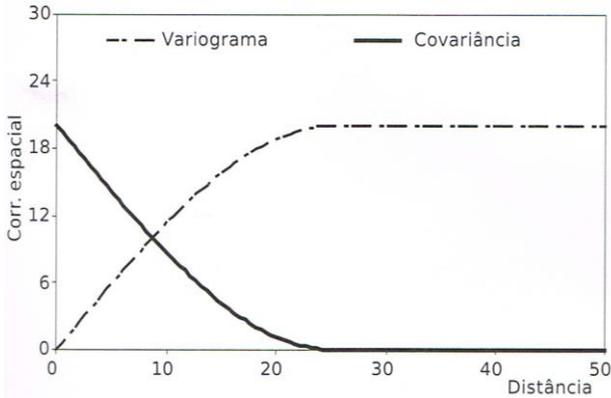
E isso significa o demonstrado na Equação 7.

$$\gamma(h) = C(0) - C(h) \quad (7)$$

De acordo então com o exposto acima por Landim (2006), percebe-se que quanto menor o vetor Δh , menor a variância e maior a covariância.

Haverá um valor Δh para o qual ambas podem apresentar valores aproximadamente iguais, porém, à medida que Δh aumenta, a covariância diminui enquanto a variância aumenta, porque ocorre progressivamente maior independência entre os pontos em distâncias cada vez maiores. A Figura 7 ilustra tal situação.

Figura 7. Relação entre a função variograma e a função covariância



Fonte: Yamamoto e Landim (2013).

A semivariância distribui-se de zero (quando $h=0$) até um valor igual à variância das observações para um alto valor de h se os dados forem estacionários, ou seja, se não ocorrer a presença de tendência nos valores. Essas relações são mostradas quando a função $\gamma(h)$ é colocada em um gráfico *versus* Δh para originar o semivariograma.

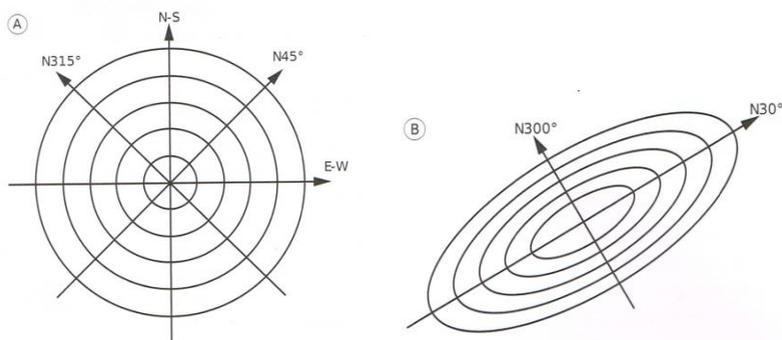
A distância na qual $\gamma(h)$ atinge um valor que se torna constante, denominado de patamar ou soleira (*sill*), é chamada de alcance ou amplitude (*range*). Geralmente o patamar é representado por “ $C+C_0$ ” e o alcance por “ a ”.

A semivariância não é apenas igual à média das diferenças ao quadrado entre pares de pontos espaçados nas distâncias “ h ”, mas também é igual à variância dessas diferenças (LANDIM, 2006).

Ainda conforme o autor, o semivariograma ilustra a medida do grau de dependência espacial entre amostras ao longo de um suporte específico e, para sua construção, são utilizadas as diferenças ao quadrado dos valores obtidos, assumindo-se uma estacionaridade nos incrementos. Isso significa que o semivariograma é uma medida da variabilidade de um parâmetro, condicionada pela distância. Tal variabilidade pode ser bastante

desigual quando se consideram diferentes direções de análise, conforme ilustrado na Figura 8.

Figura 8. Esquema ilustrativo de fenômenos espaciais: a) isotrópico e b) anisotrópico



Fonte: Yamamoto e Landim (2013).

É também utilizada, ao invés do termo “semivariograma,” a expressão “variograma”, porém, para o cálculo sempre levasse em consideração a divisão por “ $2n$ ”.

Landim (2006) também afirma que os semivariogramas expressam o comportamento espacial da variável regionalizada e mostram:

- O tamanho da zona de influência em torno de uma amostra, pois toda amostra cuja distância ao ponto a ser estimado for menor ou igual ao alcance, fornece informações sobre o ponto;
- A anisotropia, quando os semivariogramas mostram diferentes comportamentos para diferentes direções de linhas de amostragem e de estudo da variável; neste caso a anisotropia pode ser: (a) geométrica, quando o alcance varia de acordo com as diversas direções consideradas, mantendo-se o patamar constante e (b) zonal, quando o alcance permanece constante e o patamar varia conforme é modificada a

direção de análise. Estes comportamentos anisotrópicos estão demonstrados na Figura 9;

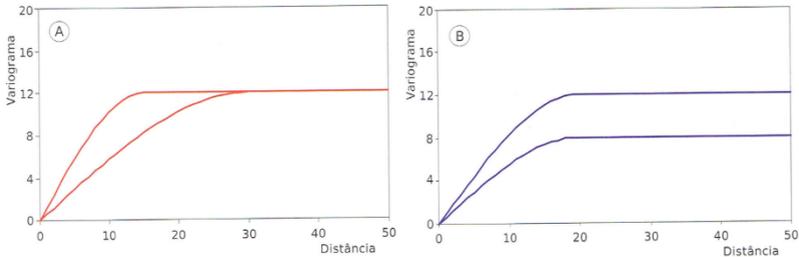
- Continuidade, pela forma do semivariograma, em que para $h \cong 0$, $\gamma(h)$ já apresenta algum valor. Essa situação é conhecida como efeito pepita (*nugget effect*) e é representada por C_0 .

O efeito pepita pode ser atribuído a erros de medição ou ao fato de que os dados não foram coletados a intervalos suficientemente pequenos para mostrar o comportamento espacial subjacente do fenômeno em estudo.

A ocorrência de efeito pepita puro significa a ausência completa de correlação espacial entre os pontos amostrados. Isto significa não haver possibilidade de diferenciar quais amostras estão mais próximas ou mais distantes. Nessa situação, os resultados geoestatísticos serão os mesmos indicados pela estatística clássica (ANDRIOTTI, 2003).

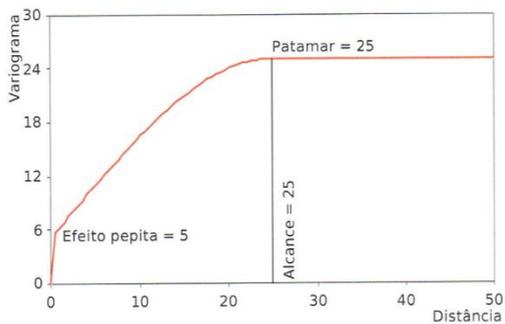
A Figura 10 ilustra as propriedades de um variograma típico com patamar (patamar, alcance e efeito pepita).

Figura 9. Tipos de anisotropias: a) geométrica e b) zonal



Fonte: Yamamoto e Landim (2013).

Figura 10. Propriedades de um típico variograma com patamar

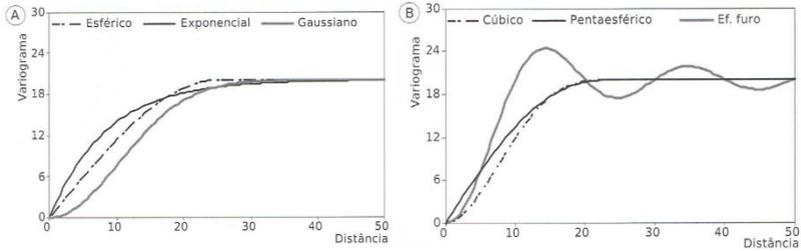


Fonte: Yamamoto e Landim (2013).

Dados estes conceitos básicos que caracterizam um semivariograma, a Figura 11 e a

Tabela 3 ilustram os modelos teóricos mais comuns e suas equações que podem explicar a variabilidade da maioria dos fenômenos espaciais e ajustam os semivariogramas experimentais.

Figura 11. Modelos de variogramas com patamar: a) esférico, exponencial e gaussiano e b) cúbico, pentaesférico e efeito “furo”



Fonte: Adaptado de Yamamoto e Landim (2013).

Tabela 3. Modelos teóricos de variogramas com patamar

Modelo	Equação
Esférico	$\gamma(h) = C_0 + C \left[1,5 \frac{h}{a} - 0,5 \left(\frac{h}{a} \right)^3 \right]$ para $h < a$ $\gamma(h) = C_0 + C$ para $h \geq a$
Exponencia l	$\gamma(h) = C_0 + C \left[1 - \exp\left(-\frac{h}{a}\right) \right]$
Gaussiano	$\gamma(h) = C_0 + C \left[1 - \exp\left(-\left(\frac{h}{a}\right)^2\right) \right]$
Cúbico	$\gamma(h) = C_0 + C \left[7\left(\frac{h}{a}\right)^2 - \frac{35}{4}\left(\frac{h}{a}\right)^3 + \frac{7}{2}\left(\frac{h}{a}\right)^5 - \frac{3}{4}\left(\frac{h}{a}\right)^7 \right]$ para $h < a$ $\gamma(h) = C_0 + C$ para $h \geq a$
Pentaesféri co	$\gamma(h) = C_0 + C \left[\frac{15}{8}\left(\frac{h}{a}\right) - \frac{5}{4}\left(\frac{h}{a}\right)^3 + \frac{3}{8}\left(\frac{h}{a}\right)^5 \right]$ para $h < a$ $\gamma(h) = C_0 + C$ para $h \geq a$
Efeito furo	$\gamma(h) = C_0 + C \left[1 - \frac{\text{sen}\pi\left(\frac{h}{a}\right)}{\pi\left(\frac{h}{a}\right)} \right]$

Fonte: Adaptado de Yamamoto e Landim (2013).

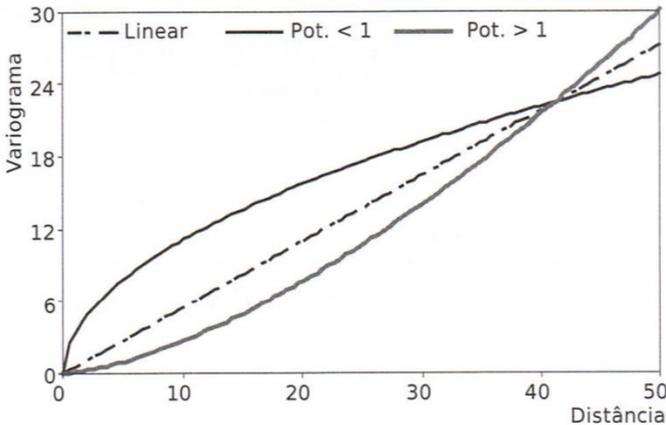
Dentre os modelos apresentados, três deles explicam a maioria dos fenômenos espaciais: esférico, exponencial e gaussiano (YAMAMOTO; LANDIM, 2013). Os autores ressaltam ainda que para qualquer um dos modelos apresentados $\gamma(0) = 0$

Ainda conforme os autores, quando a amostragem é insuficiente/incompleta ou com presença de tendência nos dados, é possível que o variograma experimental não apresente patamar. Assim, o modelo teórico para variogramas sem patamar pode ser representado pelo variograma de potência, ilustrado na Figura 12 e explicado pela Equação 8.

$$\gamma(h) = \alpha h^{\beta}, \text{ com } 0 < \beta < 2 \quad (8)$$

O α representa uma constante positiva e multiplica a distância elevada a uma potência β que, se for igual a 1, ocorre o variograma linear e, se for igual a zero, corresponde ao modelo com efeito pepita puro.

Figura 12. Modelos de variogramas de potência (sem patamar)



Fonte: Yamamoto e Landim (2013).

2.3.4 Interpolação por Krigagem Ordinária (KO)

A krigagem é largamente utilizada devido à qualidade dos resultados que ela apresenta. Yamamoto e Landim (2013) expõe que somente a krigagem apresenta estimativas não tendenciosas e a mínima variância associada ao valor estimado, sendo definida pelos autores como um processo geoestatístico de estimativa de

valores de variáveis distribuídas no espaço e/ou tempo, com base em valores adjacentes quando considerados correlacionados pela análise variográfica.

O uso do semivariograma para a estimativa por krigagem não exige que os dados tenham uma distribuição normal, mas a presença de distribuição assimétrica com muitos valores anômalos deve ser considerada, pois a krigagem é um estimador linear.

Dentre os diversos algoritmos, tais como krigagem simples, da média, ordinária, universal, entre outros, a krigagem ordinária se caracteriza como o interpolador mais usual atualmente devido à sua simplicidade e resultados que proporciona (YAMAMOTO; LANDIM, 2013).

A diferença entre a krigagem e outros métodos de interpolação é a maneira como os pesos são atribuídos às diferentes amostras.

Supondo que a média de um ou mais pontos não amostrados seja desconhecida e considerando-se uma estimação pontual, então a predição do valor de uma variável aleatória Z de um ponto x_0 é realizada por uma média ponderada dos dados, conforme demonstrada pela Equação 9 (YAMAMOTO; LANDIM, 2013).

$$Z_{KO}^*(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) \quad (9)$$

onde λ_i são os pesos.

Para assegurar que a predição seja não enviesada, a soma dos pesos deve ser igual a 1, conforme a Equação 10.

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1 \quad (10)$$

Sob a premissa de não viés, a esperança do erro, ou seja, a predição subtraída do valor medido deverá ser igual à zero, conforme indicado na Equação 11 e demonstrada por Yamamoto e Landim (2013).

$$E[Z_{KO}^*(x_0) - Z(x_0)] = 0 \quad (11)$$

Tais condicionantes visam assegurar que a diferença entre o valor verdadeiro, $Z(x_0)$, e o seu valor estimado, $Z_{KO}^*(x_0)$, seja a menor possível, de acordo com a Equação 12.

$$\left(Z(x_0) - \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) \right)^2 = \text{menor possível} \quad (12)$$

Para obtenção de conhecimento detalhado acerca das deduções matemáticas do método, Soares (2011) lista as seguintes pesquisas na área: David (1977), Burrough (1987), Camargo (1997), Isaaks e Srivastava (1989), Yamamoto (1994), Peres (1998), Landim (2003) e Fonteles (2003). Acrescenta-se também o material didático elaborado por Yamamoto e Landim em 2013.

2.3.5 Validação Cruzada

A validação cruzada é o procedimento utilizado para se verificar as suposições adotadas na krigagem. Para tal, cada amostra é removida do conjunto de dados e realiza-se uma nova krigagem para estimar o seu valor. Assim, quanto melhor a estimativa, mais próximo de zero será o valor médio das diferenças. Deve haver também uma correlação entre os valores krigados e os valores originais do conjunto de dados, aproximadamente igual à unidade (ANDRIOTTI, 2003).

2.3.6 Aplicações da Geoestatística em Geotecnia

Sturaro (1994) utilizou a krigagem ordinária para estimar a resistência de um solo através do uso de um banco de dados de

sondagens SPT. Também aplicou a cokrigagem para estimar a posição do nível do lençol freático e do topo do impenetrável ao amostrador do SPT.

Talamini Neto (2001) aplicou conceitos da geoestatística para mapear o subsolo de Curitiba/PR e caracterizá-lo quanto às suas unidades geotécnicas para subsídios ao planejamento do uso do espaço subterrâneo. Os dados geotécnicos utilizados são oriundos de sondagens SPT, poços, mapas topográficos e inspeções de campo.

Folle (2002) utilizou a krigagem ordinária em dados de sondagens SPT em Passo Fundo/RS para análise da estimativa da resistência N_{SPT} .

Fonteles (2003) aplicou a krigagem ordinária e a cokrigagem em dados de sondagens SPT para caracterizar uma área de Fortaleza/CE, com elaboração do mapa de superfície freática, mapa da superfície do impenetrável ao amostrador do SPT e mapas da resistência N_{SPT} em diversos níveis altimétricos do terreno.

Silva (2008) aplicou estatística descritiva e ferramentas da geoestatística em um banco de sondagens para realizar o mapeamento da resistência N_{SPT} e do torque máximo do SPT-T (*Standard Penetration Test with Torque Measurement*) em parte da zona urbana de Londrina/PR.

Soares (2011) utilizou krigagem ordinária para elaboração de mapas de estimativas da profundidade do nível do lençol freático, da resistência N_{SPT} e do uso sugerido para fundações em João Pessoa/PB a partir de um banco de dados de sondagens SPT.

Bezerra (2014) aplicou rotinas geoestatísticas por krigagem em dados de sondagens SPT para análise da estimativa da resistência N_{SPT} e da variabilidade espacial da capacidade de carga de uma estaca (computada pelo método semiempírico de Décourt e Quaresma) a fim de se otimizar projetos de fundações estaqueadas.

2.4 MAPEAMENTO GEOTÉCNICO

2.4.1 Considerações Gerais

É notável a constante evolução do mapeamento das características do meio físico em diversas áreas, tais como ciências do solo e geologia.

Segundo Zuquette e Gandolfi (2004), desde 1900 são elaborados documentos cartográficos que representam informações que subsidiam a adequada implantação de obras de engenharia e demais atividades antrópicas, principalmente em áreas urbanas. Ao conjunto de procedimentos que compõem as metodologias de obtenção e registro de informações geotécnicas, dá-se o nome de mapeamento geotécnico.

No Brasil, o primeiro trabalho sobre mapeamento geotécnico foi publicado por Haberlehner em 1966, abordando aspectos teóricos. Em 1974 foram divulgados dois importantes trabalhos na área, pois não só abordaram aspectos referentes à elaboração de documentos cartográficos, mas também demonstraram uma preocupação acerca do uso dos dados geotécnicos (ZUQUETTE; GANDOLFI, 2004).

Conforme citado pelos autores, dentre as diversas conceituações existentes do termo “mapeamento geotécnico”, destacam-se:

- *A International Association of Engineering Geology - IAEG (1976)* o define como um tipo de mapeamento geológico que apresenta de forma generalizada as características principais de um ambiente, em seu contexto geológico, para utilização no planejamento do solo em obras de engenharia;
- Matula (1976) considera que um bom mapa geotécnico representa de forma clara e abrangente o ambiente geológico de uma área, permitindo a utilização dos dados apresentados para diversas finalidades na área da engenharia.

Sendo assim, Zuquette e Gandolfi (2004) concluem que o mapeamento geotécnico é constituído por um conjunto de estudos que retrata o meio físico de um ponto de vista pragmático, sob uma forma que permita a obtenção de informações básicas para orientação na escolha da área mais adequada à implantação de um empreendimento e que também apresente os critérios a serem utilizados nas investigações geotécnicas necessárias.

Os autores ainda ressaltam a distinção entre os conceitos de cartografia geotécnica e mapeamento geotécnico, pois o primeiro refere-se à elaboração do produto cartográfico em si e não à obtenção de dados geotécnicos. Portanto, a cartografia geotécnica é apenas uma dentre as diversas etapas de um mapeamento geotécnico.

Em 1995, Davison Dias definiu o mapa geotécnico como um produto cartográfico apropriado na função de representar regiões com solos que possuem comportamentos geotécnicos semelhantes no que se refere ao uso e ocupação do mesmo. Estas regiões, homogêneas, são nomeadas de “unidades geotécnicas” pela autora e são estabelecidas através da superposição da pedologia e a geologia do local.

Higashi (2006) expôs que as principais particularidades de um solo podem ser representadas em um mapa, originado em uma metodologia de mapeamento geotécnico. Este mapa permite que seja previsto o comportamento geral de cada unidade geotécnica determinada no mesmo, conforme definição citada.

De acordo com Maciel Filho (1997 *apud* Valente, 1999) são diversas as aplicações de um mapa geotécnico, tais como na elaboração de cartas de recomendação do uso do solo, na busca por uma localização adequada para novos loteamentos, no auxílio ao mapeamento de áreas de risco, na prospecção do subsolo e de jazidas de materiais para a construção civil e infraestrutura viária, no projeto de fundações de edificações e em estudos envolvendo geologia ambiental (destinação de resíduos e escolha de áreas de preservação).

Segundo Higashi (2006), em todo o mundo existem diversas e distintas metodologias de mapeamento geotécnico que foram

desenvolvidas e/ou adaptadas para variadas escalas e finalidades, tendo como marco inicial o método de Moldenhawer em 1919, que fundamentou todas as demais técnicas (ZUQUETTE; GANDOLFI, 2004).

Valente (1999) destaca duas metodologias brasileiras para a elaboração de mapas geotécnicos: (a) a desenvolvida em 1987 pela Universidade de São Paulo (USP), também conhecida como Metodologia Zuquette e (b) a desenvolvida por Davison Dias em 1995 na Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), que vem sendo muito utilizada atualmente no sul do Brasil. Esta é a metodologia adotada na presente pesquisa, cujos princípios e procedimentos estão detalhados na sequência.

2.4.2 Metodologia de Zuquette (1987)

A proposta de Zuquette (1987) é fundamentada nos conceitos de *landforms* (formas de terreno) para as condições brasileiras. Tal metodologia agrupa atributos que caracterizam o meio físico, tais como tipo e espessura de solos e rochas, profundidade do lençol freático, declividade, permeabilidade e drenagem, localização das áreas de inundação, formato e extensão de encostas e demais parâmetros que representam a ocupação de um local (VALENTE, 1999).

No entendimento de Higashi (2006), as mais significativas informações mapeadas originam alguns documentos como: (a) mapas básicos fundamentais (topográficos, geológicos, de águas), (b) mapas básicos opcionais (pedológico, geofísico, geomorfológico, climático e de ocupação), (c) mapas auxiliares (mapas de documentação ou de dados) e (d) cartas derivadas ou interpretativas (de erodibilidade, fundações, obras viárias, materiais para construção, etc.).

Zuquette (1987 *apud* Pejon e Zuquette, 1995) afirma que o problema crucial consiste em definir, isolar e identificar os atributos necessários para o correto estabelecimento das unidades componentes dos documentos.

A partir de fotografias aéreas, mapas topográficos, geomorfológicos, dados de sondagens existentes e expedições *in*

loco é elaborado um mapa preliminar de unidades geotécnicas homogêneas. Tal mapa posteriormente é associado às informações disponíveis acerca dos solos e da litologia local, originando um mapa de *landforms* e também um mapa com os dados das condições geotécnicas de uma área. A integração entre estes mapas permite a interpretação final do comportamento geotécnico de uma área, visando o planejamento urbano (VALENTE, 1999; HIGASHI, 2006).

2.4.3 Metodologia de Davison Dias (1995)

Esta pesquisa utiliza esta metodologia para definição do mapa geotécnico da BHRC, tornando-se base para as análises exploratórias e geoestatísticas realizadas na área.

Davison Dias apresentou, em 1995, um método denominado de Mapeamento Geotécnico de Grandes Áreas, largamente utilizado no sul do Brasil que ilustra, em um mapa, certas unidades geotécnicas estimadas essencialmente em função da superposição entre o mapa pedológico, geológico e topográfico disponível em uma área.

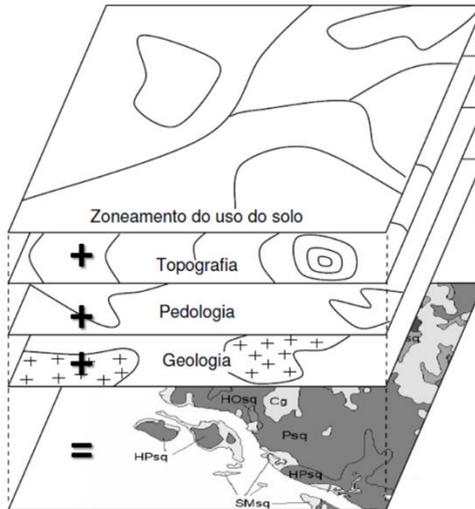
Após a definição preliminar destas unidades, são realizados trabalhos de campo para verificação visual da morfologia local com a realização de sondagens a trado e a possível coleta de amostras para ensaios de laboratório que visam o ajuste das unidades preliminares, definidas anteriormente.

Este mapa geotécnico ajustado possibilita aos usuários do mesmo obter uma visão geral do comportamento geotécnico dos diferentes tipos de materiais encontrados em cada unidade (DAVISON DIAS, 1995).

A litologia predominante oriunda do mapa geológico permite o entendimento das características do horizonte de alteração da rocha (saprolítico) e os dados pedológicos definem as características do solo superficial. As curvas de nível oriundas do mapa topográfico possibilitam uma delimitação mais refinada das fronteiras entre as unidades.

A Figura 13 ilustra de forma esquemática o processo de criação de um mapa geotécnico de acordo com esta metodologia.

Figura 13. Cruzamento entre os principais mapas utilizados na metodologia de Davison Dias (1995)



Fonte: Adaptado de Higashi (2006).

Conforme exposto por Higashi (2006), considerando-se que os tipos de solos podem variar em função da declividade do terreno, indiretamente esta metodologia utiliza os conceitos de *landforms* introduzidos por Zuquette (1987) na caracterização do solo.

O autor também comenta que os resultados obtidos através desta metodologia apenas auxiliam no entendimento do comportamento geotécnico geral de um local e que os dados apresentados não devem ser utilizados como parâmetros finais na concepção de um projeto de engenharia, cujas sondagens e ensaios laboratoriais não devem ser dispensados.

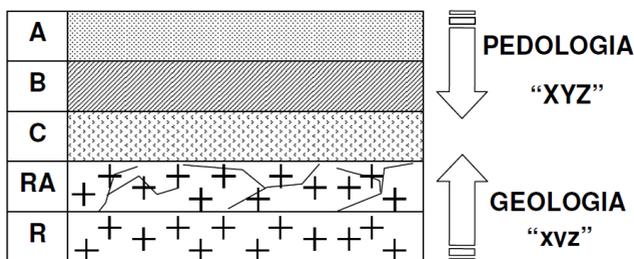
Após o cruzamento entre pedologia e geologia, Davison Dias (1995) utiliza a simbologia "ABCxyz" para denominar as unidades geotécnicas obtidas, cujas letras maiúsculas "ABC" correspondem à classificação pedológica e as minúsculas "xyz"

identificam a litologia predominante, conforme ilustrado na Figura 14.

Se houver mais de uma única litologia que caracterize o substrato, adotam-se as siglas destas litologias em letras minúsculas, separadas por vírgula.

Desta forma, é gerado o “mapa de estimativas de unidades geotécnicas” (HIGASHI, 2006).

Figura 14. Simbologia das unidades geotécnicas utilizada na metodologia de Davison Dias (1995)



Fonte: Higashi (2006).

As letras A, B, C, RA e R da Figura 14 representam os possíveis horizontes de um perfil de solo.

A Tabela 4 e Tabela 5 demonstram, respectivamente, as simbologias utilizadas na representação das classes pedológicas e geológicas conforme metodologia de Davison Dias (1995).

Tabela 4. Simbologia simplificada das classes pedológicas na metodologia de Davison Dias (1995)

Sigla	Classificação	Sigla	Classificação
A	Aluviais	P	Podzois Indiscriminados
AQ	Areias Quartzosas	PB	Podzólico Bruno-Acinzentado
B	Brunizém	PE	Podzólico Vermelho-Escuro
BV	Brunizém Vértico	PL	Planossolo
C	Cambissolo	PLV	Planossolo Vértico
CB	Cambissolo Bruno	PLP	Planossolo Plíntico
GH	Glei	PT	Plintossolo
HO	Solo orgânico	PV	Podzólico Vermelho-Amarelo
LA	Latossolo Amarelo	R	Litólico
LB	Latossolo Bruno	TR	Terra Roxa Estruturada
LBC	Latossolo Bruno Câmbico	TB	Terra Bruna-Estruturada
LBR	Latossolo Bruno-Roxo	TBR	Terra Bruna-Roxa
LE	Latossolo Vermelho-Escuro	TBV	Terra Bruna Podzólica
LR	Latossolo Roxo	V	Vertissolo
LV	Latossolo Vermelho-Amarelo		

Fonte: Davison Dias (2001) *apud* Higashi (2006).

Tabela 5. Simbologia simplificada das classes geológicas na metodologia de Davison Dias (1995)

Sigla	Classificação	Sigla	Classificação
a	Arenito	g	Granito
ag	Argilito	gl	Granulito
an	Andesito	gn	Gnaisse
ar	Ardósia	gd	Granitoide
b	Basalto	ma	Mármore
br	Brecha	p	Pelito
c	Conglomerado	q	Quartzito
ca	Calcário	r	Riolito
cm	Complexo metamórfico *	si	Sienito
cr	Carvão	s	Siltito
d	Diorito	sq	Sedimentos quaternários
da	Dacito	st	Sedimentos terciários
f	Folhelho	x	Xisto

* Complexo formado por várias rochas metamórficas de difícil individualização

Fonte: Davison Dias (2001) *apud* Higashi (2006).

2.4.4 Adaptações de Davison Dias (1995) elaboradas por Higashi (2006)

Em sua tese de doutorado, Higashi (2006) elaborou algumas adaptações da metodologia de Davison Dias (1995). Descrevem-se a seguir algumas delas que constituem a etapa denominada pelo autor de “individualização de universos geotécnicos” e que serão aplicadas nesta pesquisa:

- A elaboração de um mapa de declividades da área em estudo com base no modelo digital do terreno (MDT) obtido em um SIG, o que possibilita, junto à utilização das curvas de nível, o ajuste do mapa geotécnico preliminar através da diferenciação entre a ocorrência de solos sedimentares (em regiões planas, de baixas cotas e declividades) e solos residuais;
- A realização de investigações em campo através da execução de sondagens a trado para verificação dos

horizontes superficiais de um solo e o registro de seu nível d'água, constituindo-se numa ferramenta que também permite o ajuste do mapa geotécnico preliminar;

- A concepção, estruturação e gerenciamento de um banco de dados de sondagens SPT, o que permite, além do registro do nível d'água, a definição da espessura do horizonte C de ambos os tipos de solos (sedimentares ou residuais) pois, devido às elevadas profundidades em que ocorrem, não é possível a sua caracterização através das tradagens.

Os intervalos de declividades utilizados por Higashi (2006) estão apresentados na Tabela 6, conforme informações apresentadas pelas classes gerais de relevo da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA (1999).

Tabela 6. Limites das classes de relevo para elaboração do mapa de declividade

Classes de relevo	Declividade (%)
Plano	0 a 3
Suave ondulado	3 a 8
Ondulado	8 a 20
Forte ondulado	20 a 45
Montanhoso	45 a 75
Escarpado	Maior que 75

Fonte: EMBRAPA (1999).

O autor expõe que os pontos nos quais serão realizadas tradagens devem se concentrar nas áreas com mudanças de declividade, geralmente na base das elevações mais pronunciadas. Na sequência, depois de realizada a diferenciação entre solos sedimentares e residuais, as tradagens são intensificadas em cada um destes universos para a distinção das unidades de solos pertencentes a cada classe geotécnica.

Higashi (2006) ainda ressalta que algumas áreas de estudo não apresentam a necessidade de serem avaliadas quanto à

individualização de universos geotécnicos, já que podem apresentar apenas regiões com solos sedimentares.

2.4.5 Aplicações da Metodologia

Encontram-se na literatura diversos trabalhos desenvolvidos com base na metodologia de Davison Dias (1995), destacando-se: Bastos (1991), Orlandini (1991), Pinheiro (1991), Abitante (1997), Lima Junior (1997), Santos (1997), Duarte (1999), Valente (1999), Silva (2000), Higashi (2002), Guaresi (2004), Higashi (2006), Mafra Júnior (2007) e Miranda (2008).

Além da utilização daquela metodologia, os seguintes trabalhos também aplicaram as adaptações realizadas por Higashi (2006): Reginatto (2013), Christ (2014), Oliveira (2015) e Sbroglia (2015).

2.4.6 Banco de Dados Geotécnicos

De maneira análoga à definição de banco de dados em ambiente SIG, quando aplicados na área da geotecnia se transformam em ferramentas que possibilitam o rápido acesso às informações compiladas, são facilmente passíveis de receber atualizações de suas informações (principalmente quando são organizados em um SIG) e, conseqüentemente pela sua facilidade de uso, podem ser utilizados por um grande número de usuários (HIGASHI, 2006).

As informações que alimentam um banco de dados geotécnicos podem se originar de resultados de ensaios geotécnicos de laboratório e campo e também de sondagens a trado e SPT, como as utilizadas nesta pesquisa.

3. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

3.1 LOCALIZAÇÃO E CONFIGURAÇÃO GERAL

A Bacia Hidrográfica do Rio Cachoeira, nomeada de BHRC, localiza-se no município de Joinville, região norte do estado de Santa Catarina, sendo a única entre as sete bacias hidrográficas municipais que está totalmente inserida na área urbana.

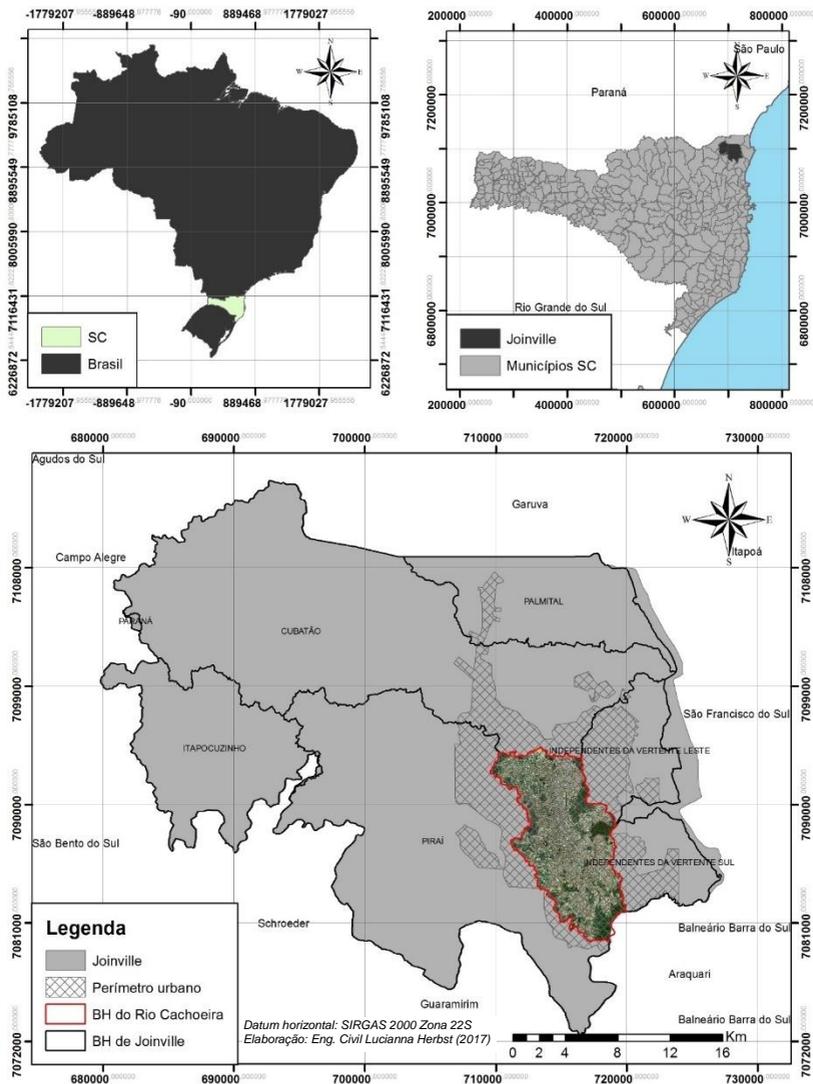
A referida bacia limita-se ao norte pela bacia hidrográfica (BH) do Rio Cubatão, a leste pelas BH Independentes da Vertente Leste e pelas BH Independentes da Vertente Sul, e a sul e oeste pela BH do Rio Pirai. Seu ponto central situa-se nas coordenadas geográficas 26°18'16" S e 48°52'68" W.

Possui área de 82,85 km², representando 7,4% da área total do município, conforme os dados mais atuais apresentados por Fundação IPPUJ (2015a).

Os limitantes mais extremos da BHRC configuram um retângulo genérico com 14,9 km de comprimento na direção norte-sul e 10,4 km de largura na direção leste-oeste.

A Figura 15 apresenta o mapa de localização da área de estudo, com a indicação das bacias hidrográficas municipais e os limites geográficos do município e seu perímetro urbano.

Figura 15. Mapa de localização da BHRC



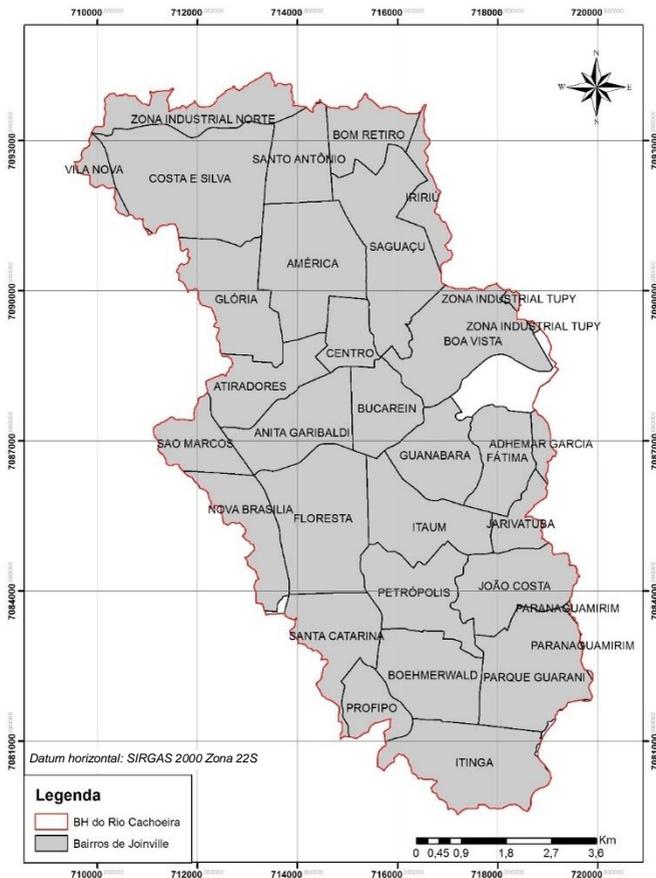
Fonte: Elaborado pela autora (2017).

3.2 CARACTERÍSTICAS GERAIS

3.2.1 Bairros, População e Uso do Solo

Joinville possui 41 bairros e 2 zonas industriais (FUNDAÇÃO IPPUJ, 2015a). Destes, a BHRC abrange 29 bairros e as 2 zonas industriais citadas, ilustrados na Figura 16, conforme informações contidas no arquivo digital em formato *shapefile* recebido da Prefeitura Municipal de Joinville (PMJ).

Figura 16. Mapa dos bairros abrangidos pela BHRC



Fonte: Adaptado da PMJ.

A Tabela 7 apresenta os dados referentes às áreas dos bairros na BHRC.

Tabela 7. Bairros abrangidos pela BHRC e respectivas áreas

Bairro	Área total (km ²)	Área na BHRC (km ²)	Área do bairro inserida na BHRC (%)	Representatividade do bairro na BHRC (%)
Adhemar Garcia	1,96	0,41	21	0,5
América	4,54	4,54	100	5,5
Anita Garibaldi	3,04	3,04	100	3,7
Atiradores	2,81	2,43	86	2,9
Boa Vista	5,37	4,29	80	5,2
Boehmerwald	3,14	3,14	100	3,8
Bom Retiro	3,91	1,91	49	2,3
Bucarein	2,04	2,04	100	2,5
Centro	1,31	1,31	100	1,6
Costa e Silva	6,58	6,45	98	7,8
Fátima	2,21	2,21	100	2,7
Floresta	4,99	4,99	100	6,0
Glória	5,37	3,33	62	4,0
Guanabara	2,55	2,55	100	3,1
Iririú	6,22	1,17	19	1,4
Itaum	3,18	3,18	100	3,8
Itinga	7,73	4,26	55	5,1
Jarivatuba	2,09	1,04	50	1,3
João Costa	3,41	3,03	89	3,7
Nova Brasília	7,85	2,27	29	2,7
Paranaguamirim	11,51	0,05	0,4	0,1
Parque Guarani	4,41	4,31	98	5,2
Petrópolis	3,04	3,04	100	3,7
Profipo	1,66	1,39	84	1,7
Saguaçu	4,89	4,88	100	5,9
Santa Catarina	5,42	2,69	50	3,3

Bairro	Área total (km ²)	Área na BHRC (km ²)	Área do bairro inserida na BHRC (%)	Representatividade do bairro na BHRC (%)
Santo Antônio	2,20	2,18	99	2,6
São Marcos	5,71	1,66	29	2,0
Vila Nova	14,18	0,56	4	0,7
Zona Industrial Norte	30,07	2,56	9	3,1
Zona Industrial Tupy	1,47	0,13	9	0,2
Outros	-	1,80	-	2,2
TOTAL BHRC	-	82,85	-	100

Fonte: FUNDAÇÃO IPPUJ (2015b). Organizado pela autora.

Verifica-se que os três bairros mais representativos em relação à área ocupada na BHRC são o Costa e Silva (7,8% da área), seguido pelo Floresta (6%) e o Saguazu (5,9%).

A população joinvilense é de 554.601 habitantes, conforme estimativas do ano de 2014 apresentadas por Fundação IPPUJ (2015a). Tendo como base a densidade demográfica de cada bairro exposta por Fundação IPPUJ (2015b), a população estimada em 2014 na BHRC é de 261.622 habitantes, representando 47,2% da população total.

A Tabela 8 apresenta os dados referentes à densidade demográfica e população na BHRC, também ilustrados nas Figura 17 e Figura 18.

Tabela 8. Densidade demográfica e distribuição da população na BHRC

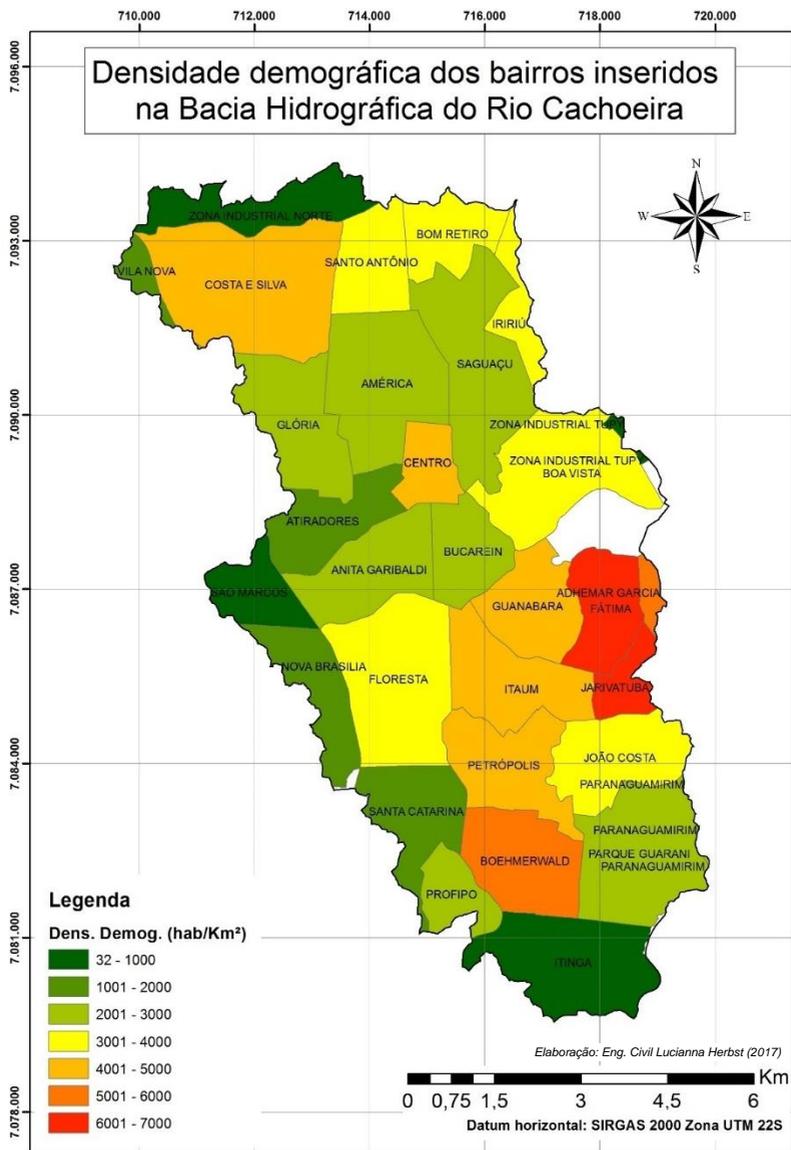
Bairro	Dens. demográfica (hab. /km²)	População na BHRC (hab.)	% do total da BHRC
Adhemar Garcia	5.095	2.089	0,80
América	2.670	12.122	4,63
Anita Garibaldi	2.888	8.780	3,36
Atiradores	1.916	4.656	1,78
Boa Vista	3.341	14.333	5,48
Boehmerwald	5.561	17.462	6,67
Bom Retiro	3.241	6.190	2,37
Bucarein	2.863	5.841	2,23
Centro	4.076	5.340	2,04
Costa e Silva	4.486	28.935	11,06
Fátima	6.803	15.035	5,75
Floresta	3.880	19.361	7,40
Glória	2.070	6.893	2,63
Guanabara	4.791	12.217	4,67
Iririú	3.866	4.523	1,73
Itaum	4.835	15.375	5,88
Itinga	900	3.834	1,47
Jarivatuba	6.343	6.597	2,52
João Costa	3.964	12.011	4,59
Nova Brasília	1.756	3.986	1,52
Paranaguamirim	2.593	130	0,05
Parque Guarani	2.601	11.210	4,28
Petrópolis	4.733	14.388	5,50
Profipo	2.866	3.984	1,52
Saguaçu	2.880	14.054	5,37
Santa Catarina	1.203	3.236	1,24
Santo Antônio	3.207	6.991	2,67
São Marcos	499	828	0,32
Vila Nova	1.670	935	0,36

Bairro	Dens. demográfica (hab. /km ²)	População na BHRC (hab.)	% do total da BHRC
Zona Industrial Norte	110	282	0,11
Zona Industrial Tupy	32	4	0,002
TOTAL BHRC	-	261.622	100

Fonte: FUNDAÇÃO IPPUJ (2015b). Organizado pela autora.

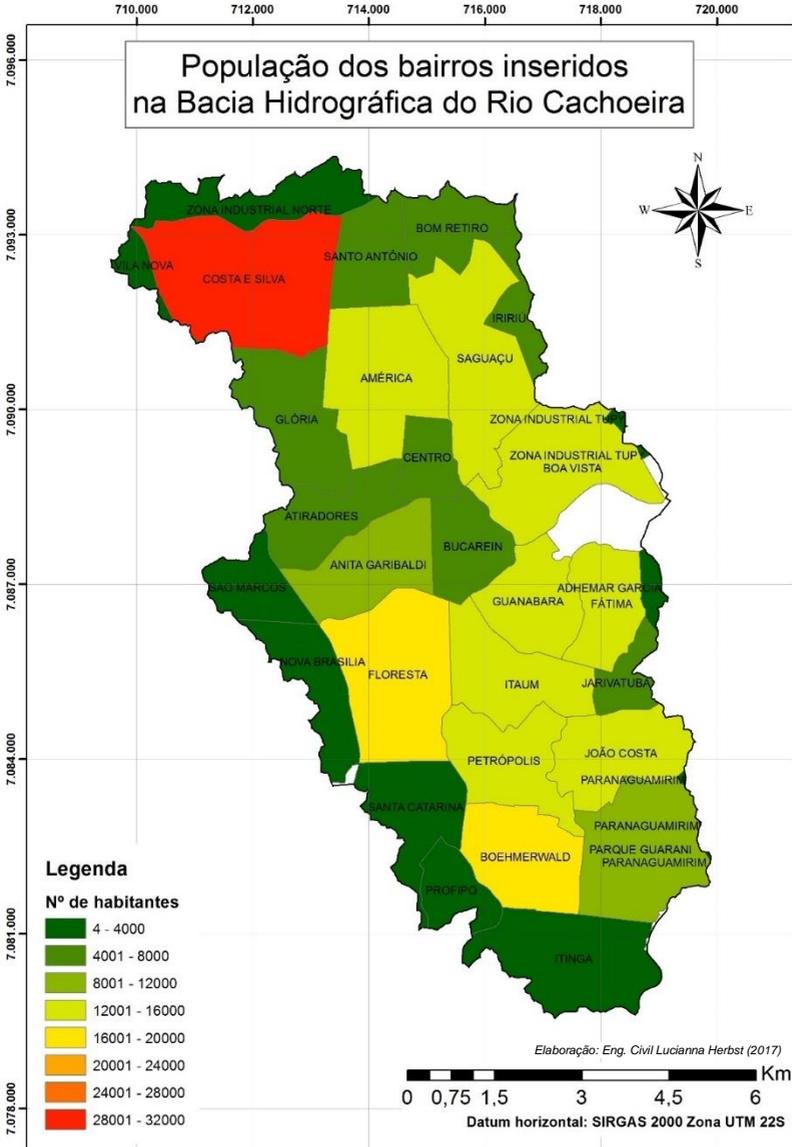
Através do exposto verifica-se que o bairro mais densamente habitado na BHRC é o Fátima e o mais populoso é o bairro Costa e Silva, representando aproximadamente 11% da população total na BHRC.

Figura 17. Mapa da densidade demográfica (2014) na BHRC



Fonte: Elaborado pela autora (2017).

Figura 18. Mapa da população (2014) na BHRC

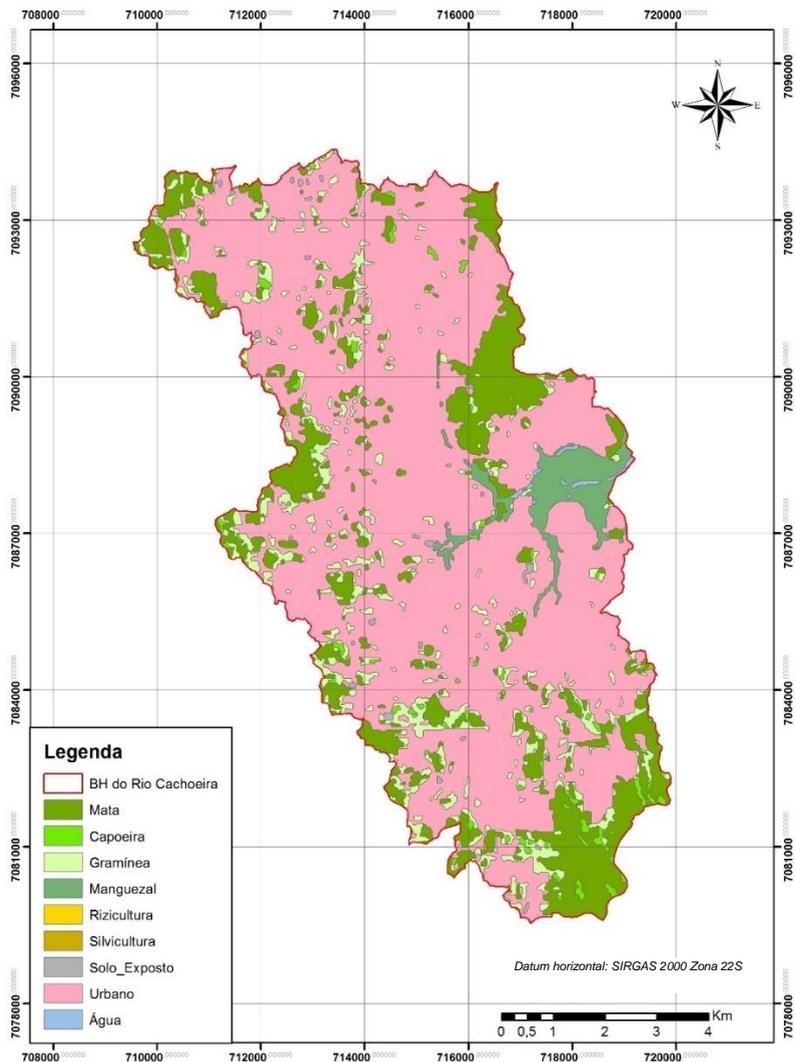


Fonte: Elaborado pela autora (2017).

A Figura 19 e a Tabela 9 demonstram os dados referentes à configuração do uso do solo na área da BHRC, conforme

informações contidas no arquivo digital em formato *shapefile* recebido da PMJ.

Figura 19. Mapa de uso do solo da BHRC



Fonte: Adaptado da PMJ.

Tabela 9. Uso do solo na BHRC

Uso do solo	Área (km²)	% do total
Água	0,18	0,2
Capoeira	1,09	1,3
Gramínea	6,90	8,3
Manguezal	2,68	3,2
Mata	14,89	18,0
Rizicultura	0,0048	0,006
Silvicultura	0,0084	0,01
Solo Exposto	0,28	0,3
Urbano	56,81	68,6
TOTAL BHRC	82,85	100

Fonte: PMJ. Organizado pela autora.

Verifica-se que aproximadamente 69% da BHRC são de uso urbano e que a área verde (mata) representa 18% da área. Convém também ressaltar que os manguezais ocupam aproximadamente 3% da área da bacia.

3.2.2 Clima

De acordo com o apresentado por Fundação IPPUJ (2015a), nos últimos 15 anos o regime térmico na área da BHRC evidencia uma temperatura média anual de 22,2 °C, com média das máximas de aproximadamente 27,2 °C e média das mínimas de 18,6 °C.

Segundo a classificação climatológica de Köppen, Joinville apresenta clima do tipo “Cfa”, o que representa um clima mesotérmico e úmido, com ausência de uma estação seca definida.

Em relação à umidade relativa do ar, a média anual é de aproximadamente 76%, com possibilidade de variação entre 84 a 87%, observado como o valor mais alto no estado de Santa Catarina (UBERTI, 2011).

A proximidade com a Serra do Mar influencia o regime pluviométrico da área. Fundação IPPUJ (2015a) expõe que a precipitação média anual verificada entre 2000 e 2014 é de 2.131

mm. Observam-se, em média, 156 a 185 dias de chuva por ano na área, representando um dos mais altos índices catarinenses.

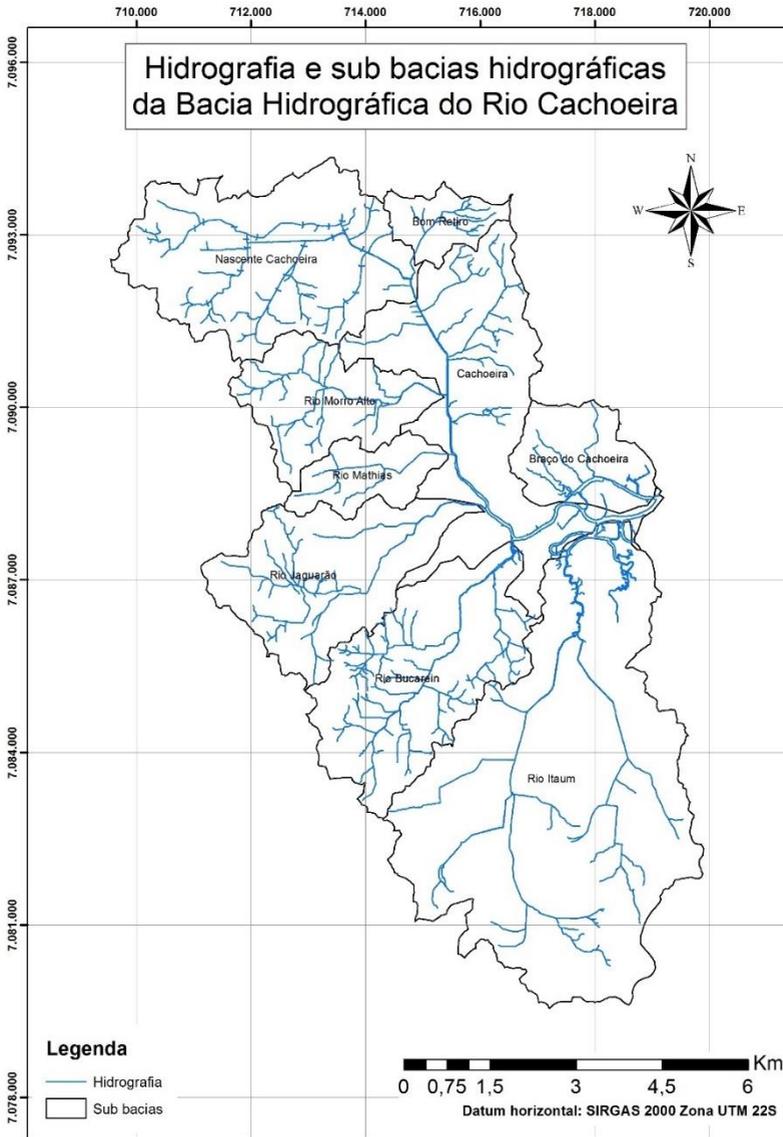
3.2.3 Hidrografia

As nascentes do Rio Cachoeira localizam-se na porção norte da BHRC, em uma altitude de aproximadamente 40 metros e o referido rio, ao longo dos seus 14,9 km de extensão, possui aproximadamente 20 afluentes principais (FUNDAÇÃO IPPUJ, 2015a).

Ainda conforme exposto pelo autor, grande parte do curso do Rio Cachoeira situa-se em áreas com altitudes entre 5 e 15 metros e sua foz encontra-se em uma região estuarina que sofre a influência das marés, cujo local se encontram remanescentes de manguezais. Ocorre na área o fenômeno da inversão do fluxo da água do Rio Cachoeira devido à presença da água salgada que adentra pelo canal em períodos de “maré cheia”. Este fenômeno, somado às baixas altitudes próximas à foz e às chuvas intensas, causa frequentes problemas de inundações principalmente na região central de Joinville, atingindo também alguns afluentes.

A Figura 20 ilustra a configuração da hidrografia principal na área de estudo.

Figura 20. Mapa da hidrografia principal na BHRC



Fonte: Adaptado da PMJ.

3.2.4 Vegetação

Dentro do contexto da Floresta Ombrófila Densa que ocupava originalmente a maior parte da região na qual a área de estudo está inserida, predominava na BHRC a formação Floresta das Terras Baixas, representada pelas florestas pouco desenvolvidas e pouco densas das planícies quaternárias costeiras de origem fluvial ou flúvio-marinha (UBERTI, 2011). Remanescentes de tal formação estão concentrados nos Morros do Boa Vista e Iririú e também nas nascentes dos afluentes do Rio Cachoeira (FUNDAÇÃO IPPUJ, 2015a).

Devido à BHRC estar totalmente inserida no perímetro urbano, nas áreas mais planas a cobertura vegetal original foi descaracterizada pela ação antrópica.

3.2.5 Geomorfologia e Hipsometria

Segundo Silva e Bortoluzzi (1987), a BHRC é caracterizada por apresentar configuração geomorfológica associada a dois grupos, denominados de Modelados de Acumulação - associados às unidades geomorfológicas deposicionais (sedimentos recentes de origem marinha, lacustre, coluvionar e fluvial), e os Modelados de Dissecção - associados ao embasamento cristalino (colinas, morros e montanhas).

As Planícies Litorâneas são verificadas na porção leste da BHRC, nos limites com a Baía da Babitonga. As formas típicas foram resultantes da modelagem marinha, por ocasião das oscilações das marés e transgressões durante o Período Quaternário. Estas flutuações são evidenciadas pela presença de concheiros e sambaquis, situados em diferentes altitudes acima do atual nível do mar (SILVA; BORTOLUZZI, 1987).

As Planícies Aluvionares representam a deposição sedimentar que ocorreu dentro de um sistema de transição entre ambiente terrestre e marinho, onde se desenvolveram manguezais, terraços arenosos e aluviões. É neste ambiente, quase ao nível do mar, que o Rio Cachoeira corta a cidade de Joinville e se direciona para a vertente do Atlântico, com foz na

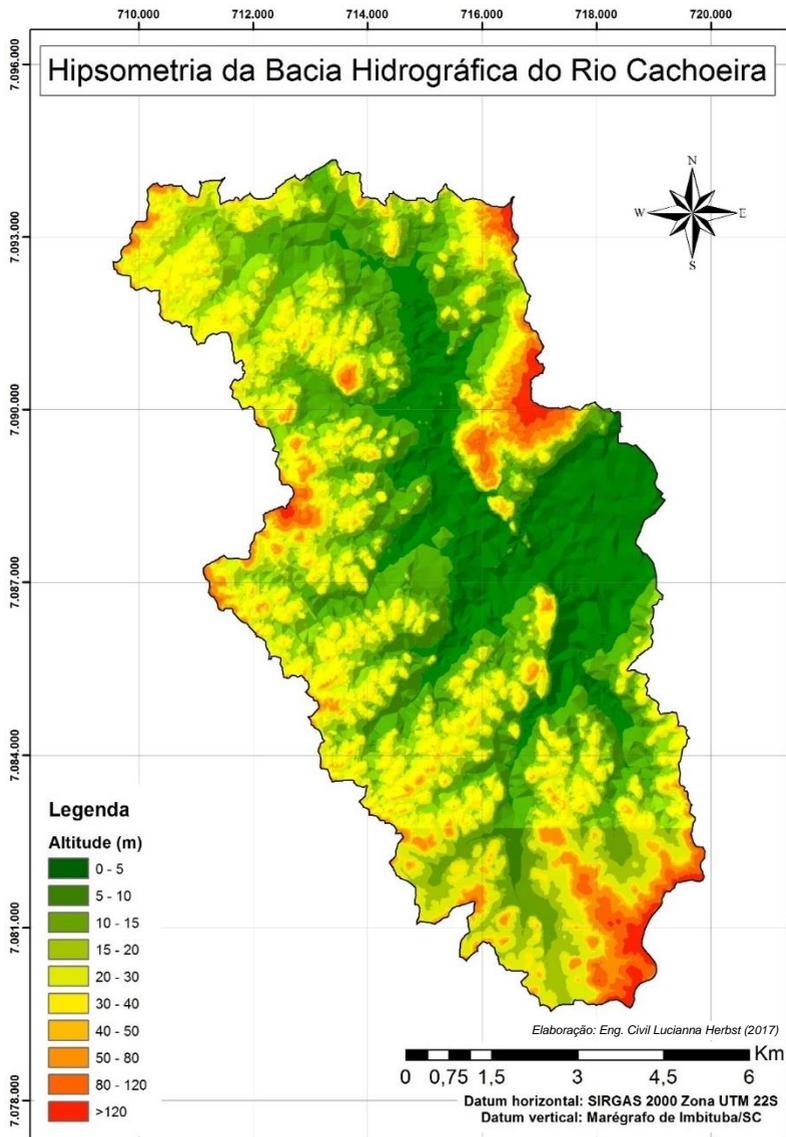
Lagoa do Saguçu, que se liga com a Baía da Babitonga (SILVA; BORTOLUZZI, 1987).

As áreas do Embasamento Cristalino exibem formas escarpadas dissecadas e que caracterizam linhas de falha. O intemperismo e a força gravitacional promovem a formação de depósitos coluvionares nas áreas de transição entre planícies e encostas, cujo material é pouco consolidado e apresenta granulometria variável. Estes depósitos são transportados para as cotas mais baixas ao serem saturados pela água na ocasião de elevadas precipitações pluviométricas. As regiões de cotas elevadas conhecidas como “Morro do Boa Vista” e “Morro do Iririu” permanecem como testemunhos deste modelado de dissecação. Na extensa planície da BHRC existe uma feição denominada de “mar de morros” que se constitui por um agrupamento de morros que dão origem à feição ondulada e/ou forte ondulada observadas pontualmente na área (SILVA; BORTOLUZZI, 1987).

Verificam-se na BHRC cotas altimétricas que variam do nível médio do mar até 225 metros de altitude, conforme observado no mapa hipsométrico da BHRC, apresentado na Figura 21.

Este mapa foi elaborado a partir da modelagem digital do terreno originada das curvas de nível com equidistância de 5 metros, disponibilizadas pela PMJ em arquivo digital em formato *shapefile*.

Figura 21. Mapa hipsométrico da BHRC



Fonte: Elaborado pela autora (2017).

3.2.6 Geologia

O embasamento cristalino presente na BHRC, nas áreas cujo relevo varia desde suavemente ondulado até montanhoso, é representado pelo Complexo Luís Alves, também denominado Complexo Granulítico de Santa Catarina, de origem arqueana (KAUL; TEIXEIRA, 1982).

Este complexo apresenta rochas metamórficas (SILVA; DIAS, 1981) das fácies granulito (gnaisses enderbíticos, gnaisses cálcico-silicáticos, quartzos e ultramafitos) e das fácies anfibolito, epidoto-anfibolito e xistos verdes. Segundo Teixeira (1993) *apud* Oliveira (2015) a predominante coloração cinza, apresentando tonalidades esverdeadas e azuladas são as principais características mesoscópicas dos gnaisses granulíticos.

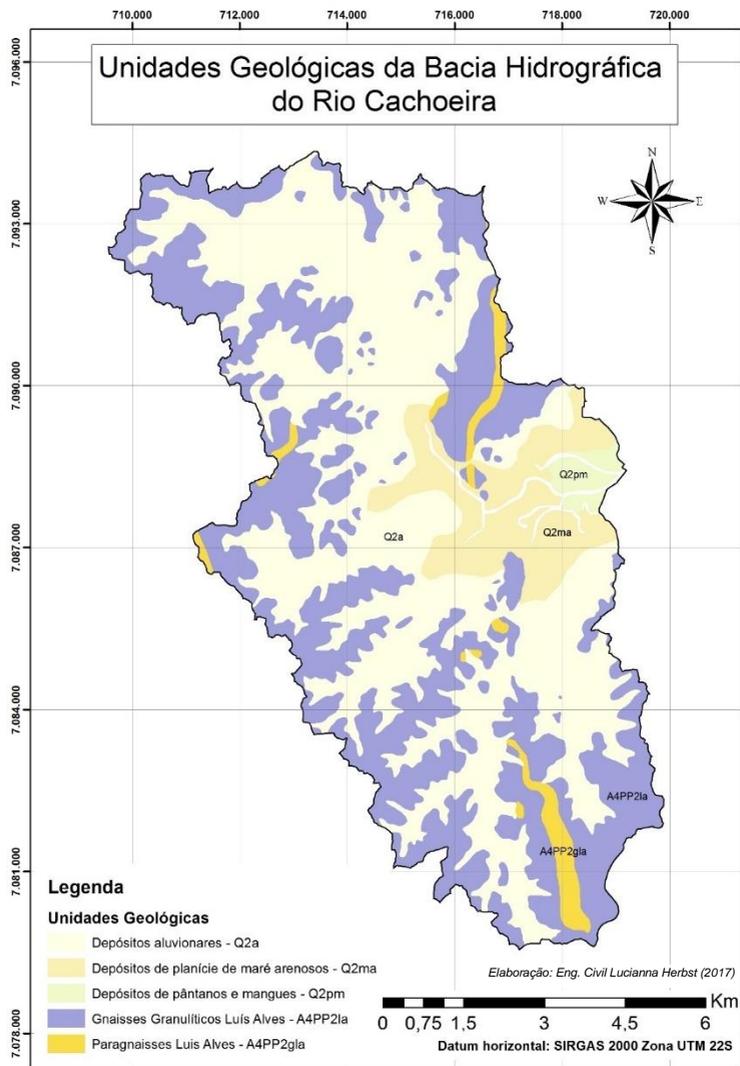
A litologia deste complexo cristalino compreende gnaisses quartzo-feldspáticos, leuco a melanocráticos e subordinadamente gnaisses calcossilicáticos, kinzigitos, quartzitos, anortositos e, menos frequentemente, fuchsíticos e formações ferríferas, estruturas foliadas e bandeadas nos gnaisses (HARTMANN *et al.*, 1979; SILVA; DIAS, 1981).

O Rio Cachoeira e seus tributários se instalaram sobre gnaisses de composição mineralógica quartzo-feldspática, piroxênios, diopsídio e hornblenda e migmatitos. Apresentam uma leve estrutura foliada e alternam bandas claras e escuras (UBERTI, 2011).

De acordo com o exposto por Uberti (2011), nas áreas de relevo plano predominam os depósitos aluvionares de sedimentos quaternários, inconsolidados, formados em ambiente marinho, fluvial, eólico, lagunar ou misto durante o Holoceno. Constituem-se por areias finas a grossas, cascalhos, seixos e sedimentos silto-argilosos. Também ocorrem na área da BHRC depósitos coluvionares próximo às encostas dos morros. Nas proximidades da foz do Rio Cachoeira, cujo ambiente é característico de uma transição laguna-continente, estão presentes sedimentos areno-argilosos contaminados por matéria orgânica proveniente dos mangues observados no local.

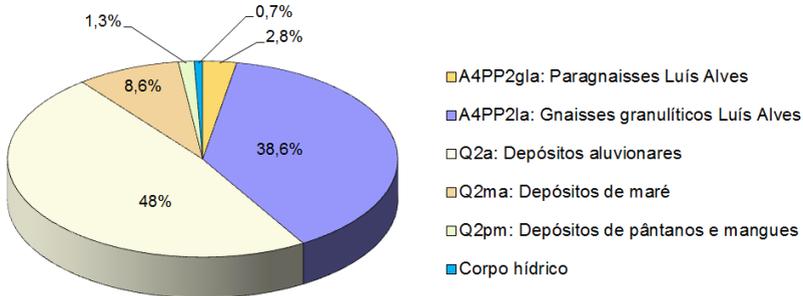
O mapa geológico da BHRC é apresentado na Figura 22 e está fundamentado no material publicado por CPRM (2011), cujos dados resumidos referentes aos percentuais das áreas das unidades geológicas observadas estão ilustrados na Figura 23.

Figura 22. Mapa geológico da BHRC



Fonte: Adaptado de CPRM (2011).

Figura 23. Percentuais das áreas das unidades geológicas na BHRC

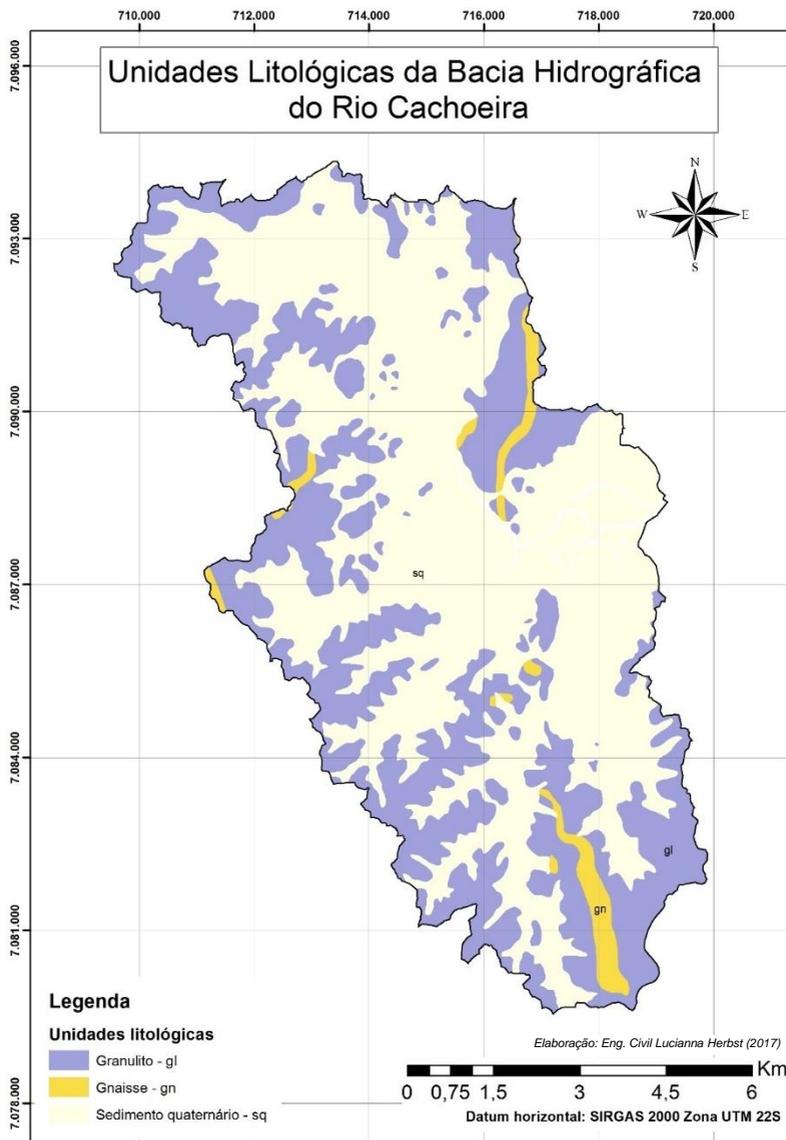


Fonte: CPRM (2011), organizado pela autora.

De acordo com o exposto, verifica-se que os sedimentos aluvionares possuem a maior representatividade na BHRC (48%), seguido pelos gnaisses granulíticos Luís Alves (aproximadamente 39%).

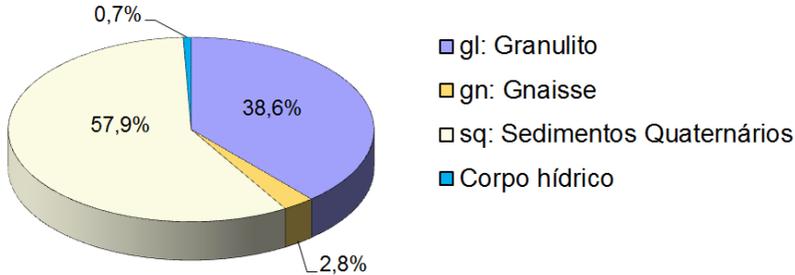
Com embasamento no mapa geológico apresentado anteriormente, elaborou-se o mapa das litologias predominantes na BHRC, ilustrado na Figura 24, cujos dados resumidos referentes aos percentuais das áreas das unidades litológicas observadas estão ilustrados na Figura 25.

Figura 24. Mapa litológico da BHRC



Fonte: Elaborado pela autora (2017).

Figura 25. Percentuais das áreas das unidades litológicas na BHRC



Fonte: Elaborado pela autora (2017).

De acordo com o demonstrado, verifica-se que os sedimentos quaternários (sq) possuem a maior representatividade na BHRC (aproximadamente 58%), seguido pelos granulitos (gl), representando aproximadamente 39% da área.

3.2.7 Pedologia

As informações referentes à cobertura pedológica da área de estudo estão fundamentadas no mapeamento pedológico realizado no ano de 2011 nas bacias hidrográficas do município de Joinville, cujos trabalhos foram subsidiados pela municipalidade através do “Projeto Viva Cidade”.

Conforme descrito por Uberti (2011), para execução deste mapeamento foram utilizadas na fotointerpretação aerofotos pancromáticas com escala 1:25.000 obtidas junto ao Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM) e à Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina (EPAGRI). Após a fotointerpretação foram realizadas as atividades de campo que nortearam a definição das unidades pedológicas, tais como observação dos perfis de solo em corte de estradas e demais obras de terraplenagem, análise das formas de relevo e cotas altimétricas, verificação de mudanças de declividade e grau de dissecação, distribuição e natureza da cobertura vegetal remanescente e o uso do solo. Foram registradas características morfológicas dos solos, tais como cor, textura, estrutura, cerosidade, consistência e transição entre os horizontes.

A classificação dos solos obedeceu ao Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS) desenvolvido pela EMBRAPA em 2006. Os limites das unidades pedológicas foram aferidos com apoio na base cartográfica digital disponibilizada pela PMJ.

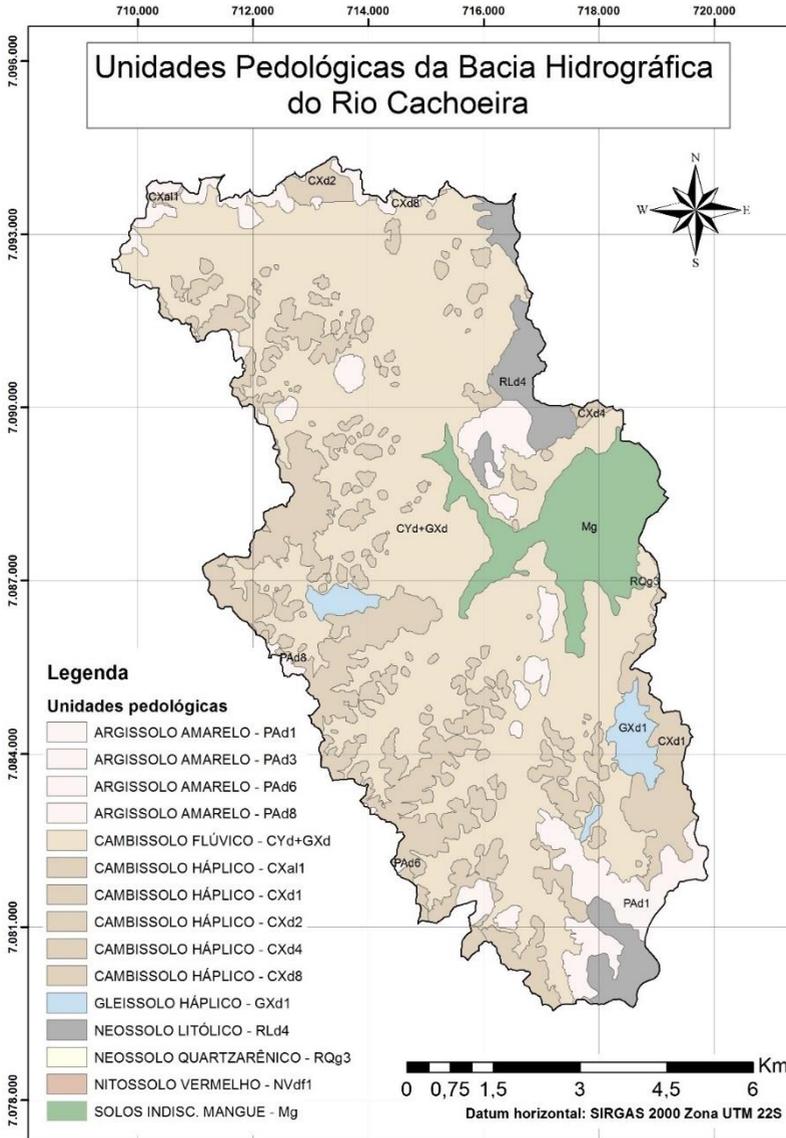
Todos os produtos obtidos deste mapeamento foram elaborados em ambiente SIG e disponibilizados pela PMJ em arquivo digital em formato *shapefile*.

A cobertura pedológica da área compreende Argissolos, Cambissolos, Gleissolos, Neossolos, Nitossolos e Solos Indiscriminados de Mangue, conforme apresentado no mapa pedológico ilustrado na Figura 26.

Conforme citado, a classificação dos solos deu-se conforme o SiBCS de 2006. De forma a correlacionar com a classificação da EMBRAPA anterior ao ano de 2006 (utilizada na metodologia de mapeamento geotécnico apresentada no Capítulo 2), as unidades pedológicas foram convertidas conforme o exposto na Tabela 10.

Os dados resumidos referentes aos percentuais das áreas das unidades pedológicas na BHRC (conforme a classificação antiga) estão ilustrados na Figura 27.

Figura 26. Mapa pedológico da BHRC



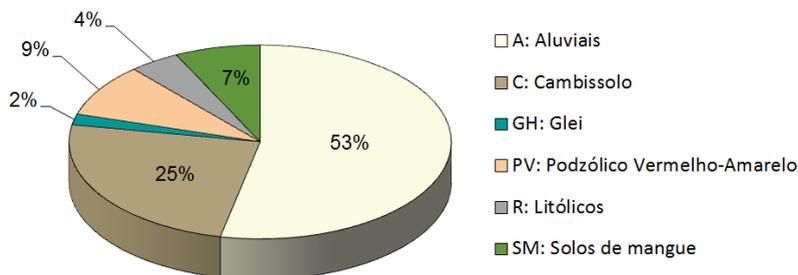
Fonte: Adaptado de Uberti (2011).

Tabela 10. Correlação entre as unidades pedológicas do SiBCS 2006 e a classificação antiga, na área da BHRC

Sigla SiBCS 2006	Sigla anterior	Unidade SiBCS 2006	Unidade anterior
CXa1	C	Cambissolo Háplico	Cambissolo
CXd1	C	Cambissolo Háplico	Cambissolo
CXd2	C	Cambissolo Háplico	Cambissolo
CXd4	C	Cambissolo Háplico	Cambissolo
CXd8	C	Cambissolo Háplico	Cambissolo
CYd+GXd	A	Cambissolo Flúvico	Solos Aluviais
GXd1	GH	Gleissolo Háplico	Glei
Mg	SM	Solos Indiscriminados de Mangue	Solos de Mangue
NVdf1	PV	Nitossolo Vermelho	Podzólico Vermelho-Amarelo
PAd1	PV	Argissolo Amarelo	Podzólico Vermelho-Amarelo
PAd3	PV	Argissolo Amarelo	Podzólico Vermelho-Amarelo
PAd6	PV	Argissolo Amarelo	Podzólico Vermelho-Amarelo
PAd8	PV	Argissolo Amarelo	Podzólico Vermelho-Amarelo
RLd4	R	Neossolo Litólico	Solos Litólicos
RQg3	A	Neossolo Quartzarênico	Solos Aluviais

Fonte: Elaborado pela autora (2017).

Figura 27. Percentuais das áreas das unidades pedológicas na BHRC



Fonte: Elaborado pela autora (2017).

Verifica-se que os Solos Aluviais (A) são os predominantes na BHRC (53%), seguido pelos Cambissolos (25%) e os Podzólicos Vermelho-Amarelos (9%).

Os Solos Residuais referentes ao embasamento cristalino da área compreendem os Cambissolos, Podzólicos Vermelho-Amarelos e Litólicos e correspondem a 38% da BHRC. Os demais solos (Aluviais, Glei e de Mangue) referem-se aos depósitos quaternários, totalizando 62% da área de estudo.

Conforme descrito por Higashi (2002), os Cambissolos caracterizam-se pela ausência de hidromorfismo, com drenagem ora acentuada, ora imperfeita. Apresentam horizonte A seguido de um horizonte B incipiente, sem caráter plíntico, de textura franco-arenosa ou mais fina. A variação entre os horizontes A-B-C é frequentemente modesta, mas ainda sim diferenciável. Neste caso da BHRC, como são solos derivados de gnaisses e granulitos, é possível que se verifique a presença de fragmentos de rochas e/ou minerais primários facilmente intemperizáveis. Nestes solos geralmente verificam-se altos teores de silte.

Acerca dos solos Podzólicos, o autor expõe que os mesmos apresentam perfis bem desenvolvidos nos quais se observam espessuras variando entre 1,5 a 2 metros, moderadamente ou bem intemperizados e seus horizontes são facilmente identificados. O horizonte B possui coloração avermelhada ou vermelho-amarelada, indicativo de uma acumulação de argila no mesmo. Os Podzólicos Vermelho-Amarelos evidenciam

tonalidades vermelho-amareladas ou amarelo-avermelhadas devido à sua boa condição de drenagem e são encontrados em áreas de relevo ondulado e forte ondulado.

Quanto aos Solos Litólicos, Higashi (2002) comenta que estes se caracterizam por serem bem drenados, pouco espessos e pouco desenvolvidos, cuja sequência de horizontes é A-R ou A-C-R. O horizonte A está diretamente assente sobre a rocha de origem ou sobre um delgado horizonte C, geralmente com muito material de rocha em decomposição. Por serem frequentemente observados em locais de topografia acidentada, são constantemente removidos por processos erosivos.

Quanto aos solos sedimentares presentes nas coberturas geológicas recentes, estes se caracterizam como pouco desenvolvidos e com drenagem impedida (UBERTI, 2011).

Os solos aluviais, de acordo com o exposto por Higashi (2006), são constituídos por argilas, areias, cascalho e materiais siltico-argilosos. Os sedimentos de maior granulometria são verificados normalmente nas áreas próximas às nascentes dos rios, e os sedimentos mais finos, nas planícies de inundação. Frequentemente estes solos apresentam tonalidade cinza claro.

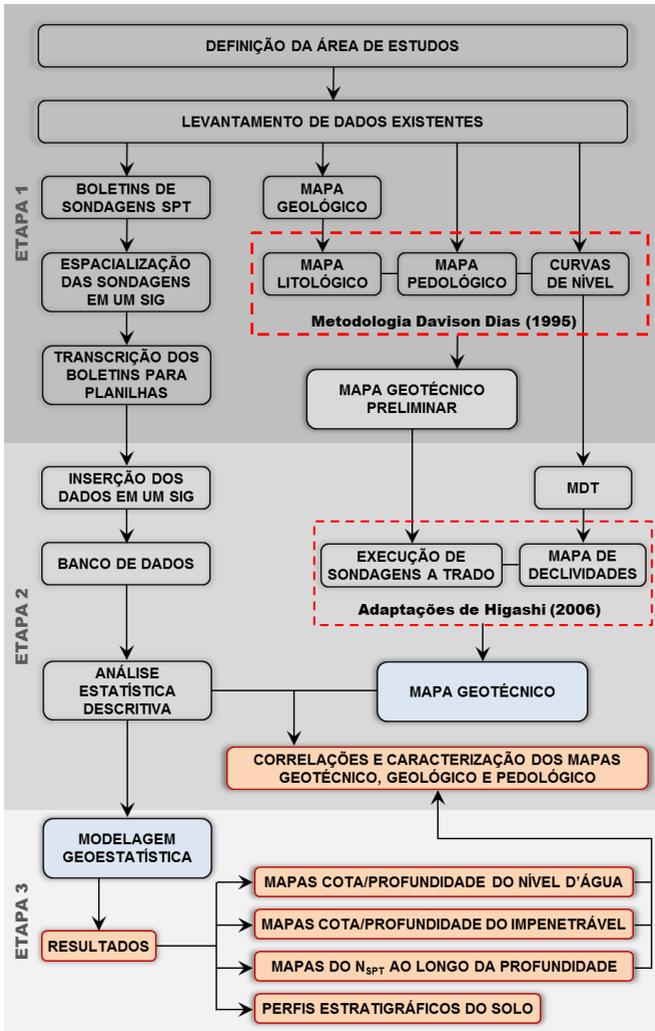
Os solos tipo Gleis são assim nomeados pois tal palavra indica intensa redução de ferro durante o desenvolvimento do solo, sob condições de má drenagem ou alagamento. Estes solos hidromórficos apresentam tonalidades cinza-azuladas e podem apresentar-se com mosqueados ou não. Contemplam características de má ou muito má drenagem e forte gleização. Ocorrem em áreas de várzeas, áreas deprimidas, planícies aluvionais, locais de terras baixas, vinculadas a excesso d'água (HIGASHI, 2002). A permeabilidade destes solos é muito baixa e apresentam textura normalmente argilosa e muito argilosa.

Os solos de mangue ocorrem no litoral, normalmente próximo às desembocaduras dos rios, sob influência do movimento das marés. Não possuem nítida diferenciação de horizontes, e estão relacionados a um relevo plano, com oscilação diária das marés, o que promove péssimas condições de drenagem.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

O fluxograma apresentado na Figura 28 demonstra de forma sintética as atividades envolvidas na elaboração da pesquisa, segmentada em três etapas.

Figura 28. Fluxograma das atividades da pesquisa



Fonte: Elaborado pela autora (2017).

4.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

A Etapa 1 consistiu na definição da área de estudos e pesquisa por sondagens SPT e mapas existentes, no georreferenciamento e espacialização das sondagens obtidas em um SIG e transcrição dos seus dados para planilhas e também na elaboração do mapa geotécnico preliminar com a utilização da metodologia de Davison Dias (1995).

A Etapa 2 compreendeu a análise dos perfis das sondagens e manipulação dos dados georreferenciados, inseridos em um SIG e estruturados em um banco de dados e elaboração das análises através da estatística clássica. Consistiu também na elaboração do mapa geotécnico final através de ajuste do mapa preliminar através das informações de declividade, execução de sondagens e inspeções de campo, conforme proposto por Higashi (2006). Com o mapa geotécnico finalizado, correlacionou-se o mesmo com as análises estatísticas.

Por fim, a Etapa 3 tratou da modelagem geoestatística dos dados com elaboração dos mapas da profundidade do nível d'água, do impenetrável a percussão e do N_{SPT} em diversas profundidades e também da correlação das informações obtidas nestes mapas com as unidades geotécnicas, geológicas e pedológicas da BHRC.

O software de SIG utilizado em todas as etapas citadas anteriormente é o ArcGIS® *for Desktop* versão 10.3, idealizado em 2014 pela empresa norte-americana *Environmental Systems Research Institute* (ESRI).

Todos os mapas e arquivos digitais elaborados nesta pesquisa foram georreferenciados na Projeção Universal Transversa de Mercator (UTM) com origem no Equador e meridiano central 51°W, zona 22S. O *datum* horizontal refere-se ao Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas (SIRGAS 2000), elipsoide de referência Grs80. O *datum* vertical é o marégrafo de Imbituba/SC.

4.2 LEVANTAMENTO DE DADOS EXISTENTES

4.2.1 Dados Gráficos

O polígono que delimita a área da bacia hidrográfica do Rio Cachoeira, base para todas as análises e mapas elaborados, foi extraído do arquivo digital com a delimitação das bacias hidrográficas de Joinville, em formato *shapefile*, recebido pela Prefeitura de Joinville.

O mapa geológico apresentado na Figura 22 foi obtido através da manipulação e recorte da carta geológica SG.22-Z-B, folha Joinville, com escala 1:250.000, desenvolvida e disponibilizada pelo CPRM em 2011.

O mapa litológico (Figura 24) foi elaborado através da interpretação das rochas/sedimentos predominantes em cada unidade presente no mapa geológico.

O mapa pedológico apresentado na Figura 26 foi obtido através da disponibilização pela Prefeitura de Joinville do mapeamento da cobertura pedológica realizado em 2011 no município, conforme metodologia apresentada na seção 3.2.7.

Acerca dos aspectos topográficos da área de estudo, as curvas de nível com equidistância de 5 metros foram recortadas do arquivo digital em formato *shapefile* recebido pela Prefeitura de Joinville. De maneira análoga, realizou-se o recorte do Modelo Digital do Terreno (MDT), que originou o mapa hipsométrico apresentado na Figura 21.

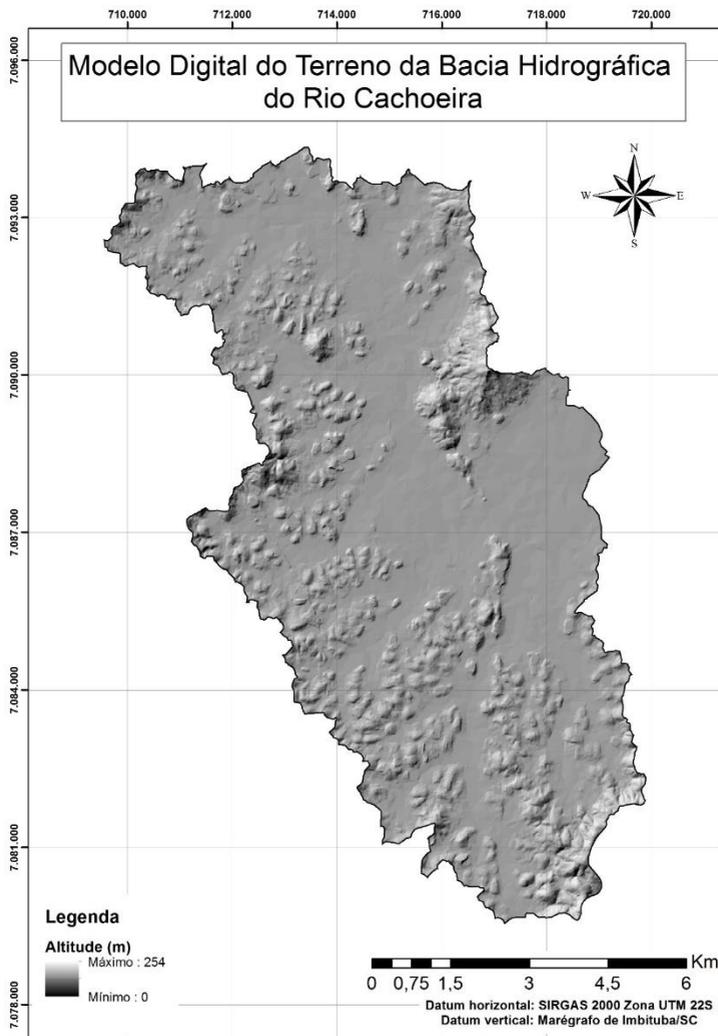
A partir do MDT também foi elaborado o mapa de declividades da área, cujos intervalos estão em conformidade ao apresentado pela EMBRAPA (1999), ilustrados na Tabela 6.

4.2.1.1 Modelo Digital do Terreno (MDT)

A Figura 29 ilustra o MDT da área de estudo. Constata-se que a maior parte da BHRC apresenta configuração plana e que as feições mais acidentadas se localizam na porção nordeste da

BHRC, contemplando parte dos bairros Boa Vista, Saguauçu e Iririú; no entanto toda a porção oeste e sul da área é caracterizada por um agrupamento de morros denominado “mar de morros”, conforme exposto no capítulo 3.

Figura 29. Modelo digital do terreno na BHRC

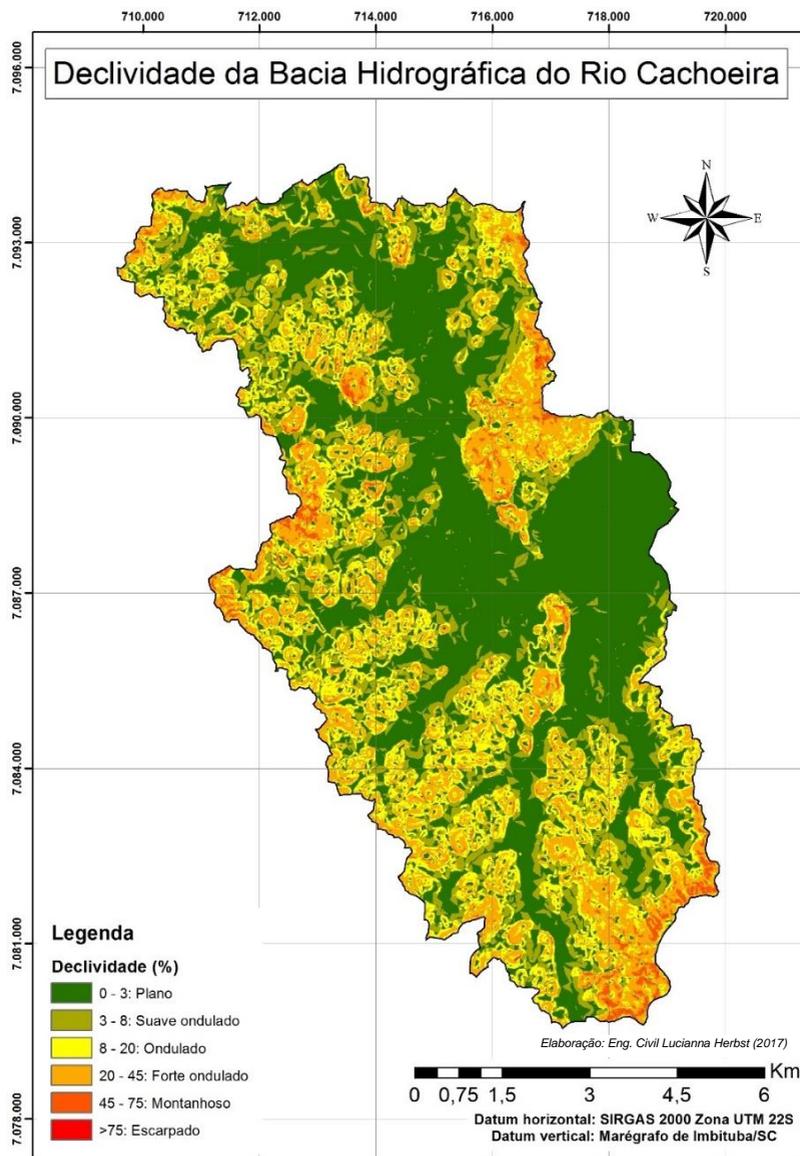


Fonte: Adaptado da PMJ.

4.2.1.2 Mapa de Declividades

O mapa apresentado na Figura 30 corrobora com o MDT, pois as maiores declividades também são identificadas na porção nordeste (bairros Boa Vista, Saguazu e Iriú), porção oeste (principalmente bairro Atiradores e São Marcos) e porção sul (bairros Itinga e Parque Guarani). Algumas áreas pontuais da região norte também apresentam declividades elevadas devido ao agrupamento de morros”.

Figura 30. Mapa de declividades da BHRC



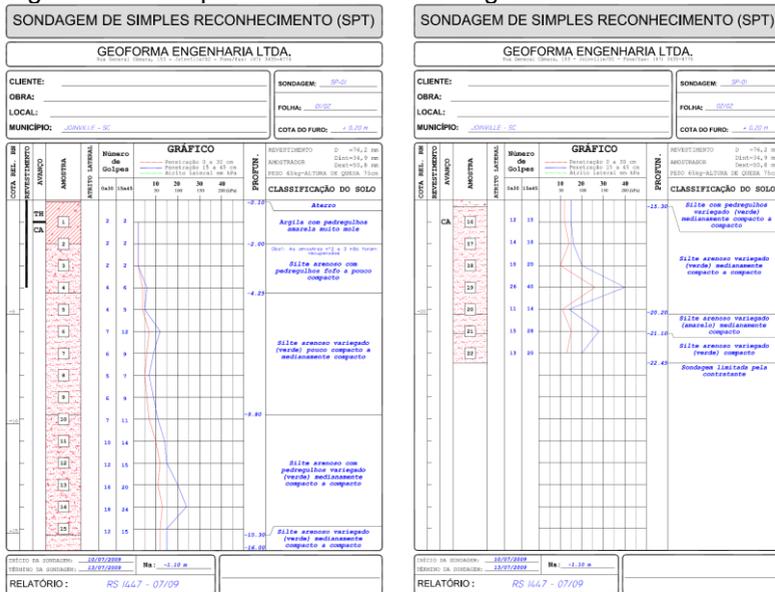
Fonte: Elaborado pela autora (2017).

4.2.2 Sondagens SPT

A busca por sondagens SPT disponíveis ultrapassou os limites do polígono que representa a BHRC, sendo considerados todos os dados encontrados nas proximidades de uma área de influência (*offset* ou *buffer*) de três quilômetros além da área de estudo de forma a facilitar a compreensão da área e auxiliar nas modelagens geoestatísticas, pois a influência das bordas da área poderia gerar erros nos cálculos.

Foram obtidos e cadastrados 712 boletins de sondagens SPT, fornecidos por empresas da região. A Figura 31 apresenta um exemplo de boletim de sondagem SPT recebido.

Figura 31. Exemplo de boletim de sondagem SPT recebido



Fonte: Acervo próprio.

4.3 GERENCIAMENTO DOS DADOS DAS SONDAGENS

4.3.1 Georreferenciamento e Espacialização das Sondagens

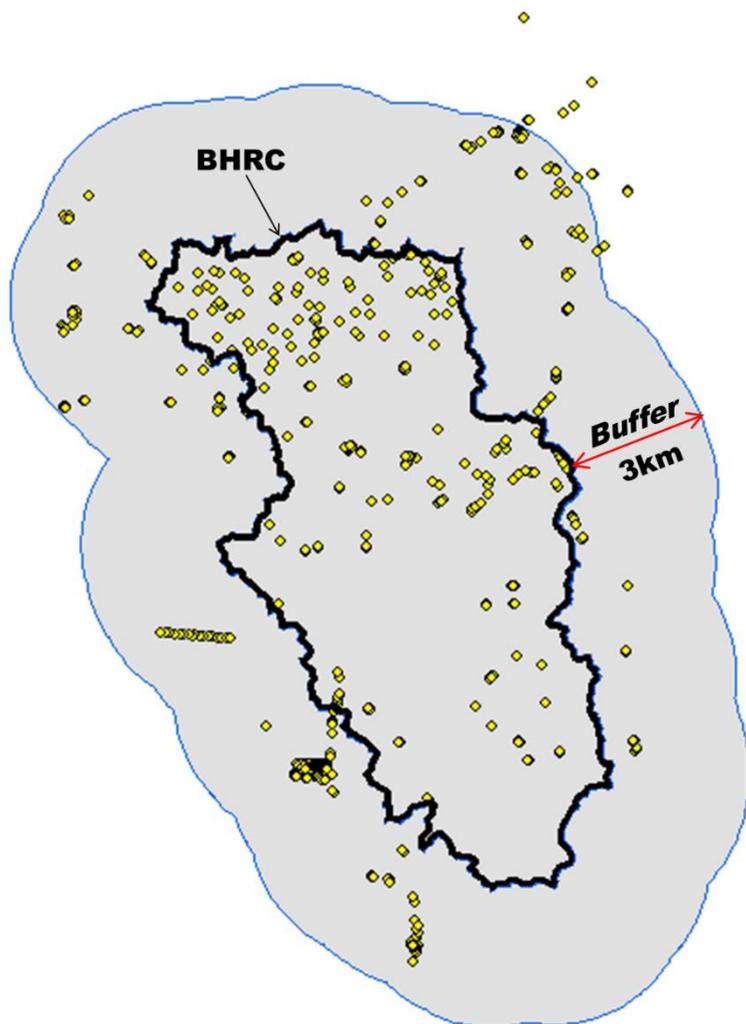
De posse dos boletins de sondagens, recebidos tanto em meio físico quanto digital, os laudos que possuíam coordenadas registradas em seu próprio boletim foram diretamente espacializados no ArcGIS® em coordenadas UTM, sendo realizadas as conversões de coordenadas geográficas para UTM, quando necessário.

No entanto, nem todos os boletins indicaram as coordenadas dos furos; neste caso, estes são geralmente acompanhados de seus croquis de localização em relação ao nome das ruas, número dos lotes/quadras, postes e/ou outros elementos físicos. Estes pontos foram, então, espacializados com o auxílio de mapas viários georreferenciados de Joinville, de domínio público.

A Figura 32 ilustra a localização das 712 sondagens recebidas.

Foram localizados e descartados do banco de dados 12 pontos situados além dos limites do buffer, restando 700 dados disponíveis na área de influência.

Figura 32. Localização das sondagens SPT recebidas



Fonte: Elaborado pela autora (2017).

4.3.2 Transcrição dos Boletins de Sondagens

De forma a subsidiar a estruturação do banco de dados em SIG e as análises estatísticas e geoestatísticas, os dados de cada boletim de sondagem foram inseridos em planilhas eletrônicas e se referem às seguintes informações:

- Cota da boca do furo;
- Profundidade e cota do nível d'água;
- Profundidade e cota do impenetrável a percussão/limite da sondagem;
- Resistência N_{SPT} em cada metro perfurado.

4.3.3 Análise e Estruturação do Banco de Dados em um SIG

Com os dados das 700 sondagens organizados em planilhas, estes foram transferidos para o ArcGIS® na forma de tabela de atributos.

Realizou-se uma análise individual de cada sondagem inserida no banco de dados, pois muitas delas representavam um agrupamento de muitos furos executados em um mesmo terreno/lote. Definiu-se um espaçamento mínimo de 35 metros entre cada furo a permanecer no banco de dados e foram selecionados apenas os perfis mais representativos de seu entorno, possibilitando uma melhor distribuição espacial.

Os critérios para seleção destes perfis foram a maior profundidade possível do impenetrável, a menor profundidade do nível d'água e, em última instância, a menor soma do N_{SPT} ao longo da profundidade perfurada.

Esta filtragem resultou em um banco de dados final composto por 284 dados em toda a área de influência, sendo 161 deles inseridos na área da BHRC.

Os dados que não fizeram parte do banco de dados final foram utilizados para aferição e validação das simulações geoestatísticas realizadas.

Para que todas as sondagens fossem consideradas nas análises geoestatísticas e não houvesse campos vazios no banco de dados em SIG (independente da profundidade analisada), foram realizados ajustes nos perfis das sondagens componentes do banco de dados final.

Assim, tomando-se como premissa o critério de paralisação de norma que indica o impenetrável quando um somatório de 50 golpes for observado ao longo de toda a profundidade de cravação, este foi o valor inserido no banco de dados para todas as sondagens nas profundidades além do impenetrável, até o limite de 45 metros (máxima profundidade observada nos dados cadastrados).

Nos furos em que o nível d'água não foi observado, este foi considerado na mesma profundidade do impenetrável para que não houvesse campos vazios no banco de dados.

Para as 20 sondagens que não atingiram o impenetrável indicado por norma (furos com profundidades limitadas pelos seus contratantes), estas permaneceram no banco de dados para estimativas da superfície do nível d'água e da resistência ao longo da profundidade.

4.4 MAPEAMENTO GEOTÉCNICO PRELIMINAR

O mapa geotécnico preliminar da BHRC com as estimativas das unidades geotécnicas (Figura 33) foi elaborado conforme metodologia proposta por Davison Dias (1995), detalhada no capítulo 2, que consiste no cruzamento dos mapas pedológico e litológico. Constatou-se a presença de 16 unidades geotécnicas preliminares e, destas, 7 foram consideradas inconsistentes, nas quais os seus solos superficiais derivados da pedologia não condizem com seus substratos, originados e interpretados do mapa litológico.

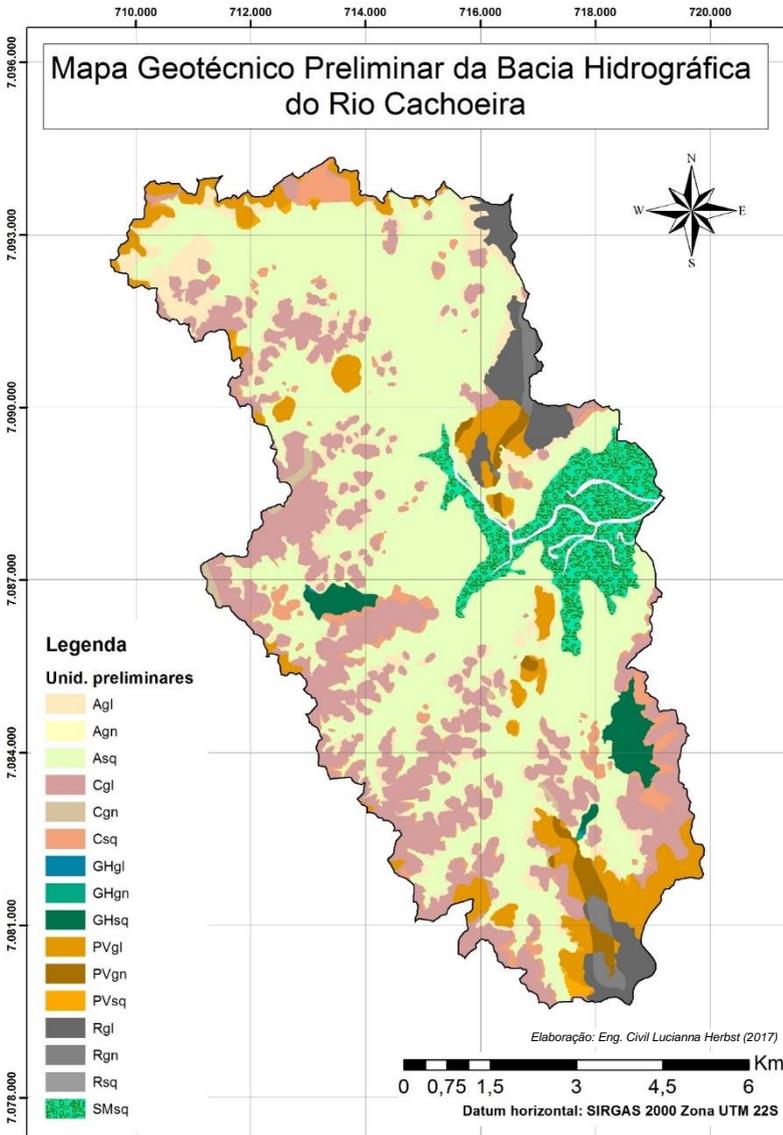
A Tabela 11 apresenta e quantifica as áreas das unidades geotécnicas encontradas.

Tabela 11. Áreas das unidades geotécnicas preliminares da BHRC

Sigla	Descrição	Área (km²)	Área (%)
1 Agl	Solo Aluvial de substrato granulito	6,51	7,85
2 Agn	Solo Aluvial de substrato gnaissse	0,17	0,21
3 Asq	Solo Aluvial de substrato sedimentos quaternários	37,48	45,24
4 Cgl	Cambissolo de substrato granulito	16,63	20,07
5 Cgn	Cambissolo de substrato gnaissse	0,39	0,47
6 Csq	Cambissolo de substrato sedimentos quaternários	3,26	3,94
7 GHgl	Solo Glei de substrato granulito	0,02	0,02
8 GHgn	Solo Glei de substrato gnaissse	0,01	0,02
9 GHsq	Solo Glei de substrato sedimentos quaternários	1,47	1,78
10 PVgl	Podzólico Vermelho-Amarelo de substrato granulito	6,07	7,32
11 PVgn	Podzólico Vermelho-Amarelo de substrato gnaissse	0,93	1,13
12 PVsq	Podzólico Vermelho-Amarelo de substrato sedimentos quaternários	0,33	0,40
13 Rgl	Solo Litólico de substrato granulito	2,77	3,34
14 Rgn	Solo Litólico de substrato gnaissse	0,78	0,94
15 Rsq	Solo Litólico de substrato sedimentos quaternários	0,00097	0,0012
16 SMsq	Solos de Mangue de substrato sedimentos quaternários	5,43	6,55
-	Corpos hídricos	0,60	0,73
TOTAL	-	82,85	100,00

Fonte: Elaborado pela autora (2017).

Figura 33. Mapa geotécnico preliminar da BHRC



Fonte: Elaborado pela autora (2017).

As unidades inconsistentes estão apresentadas na Tabela 12 e ilustradas na Figura 34, representando aproximadamente

12,5% da área total das unidades preliminares. As mais representativas são as unidades Agl (Solo Aluvial de substrato granulito) e a Csq (Cambissolo de substrato sedimentos quaternários).

Tabela 12. Unidades geotécnicas preliminares inconsistentes

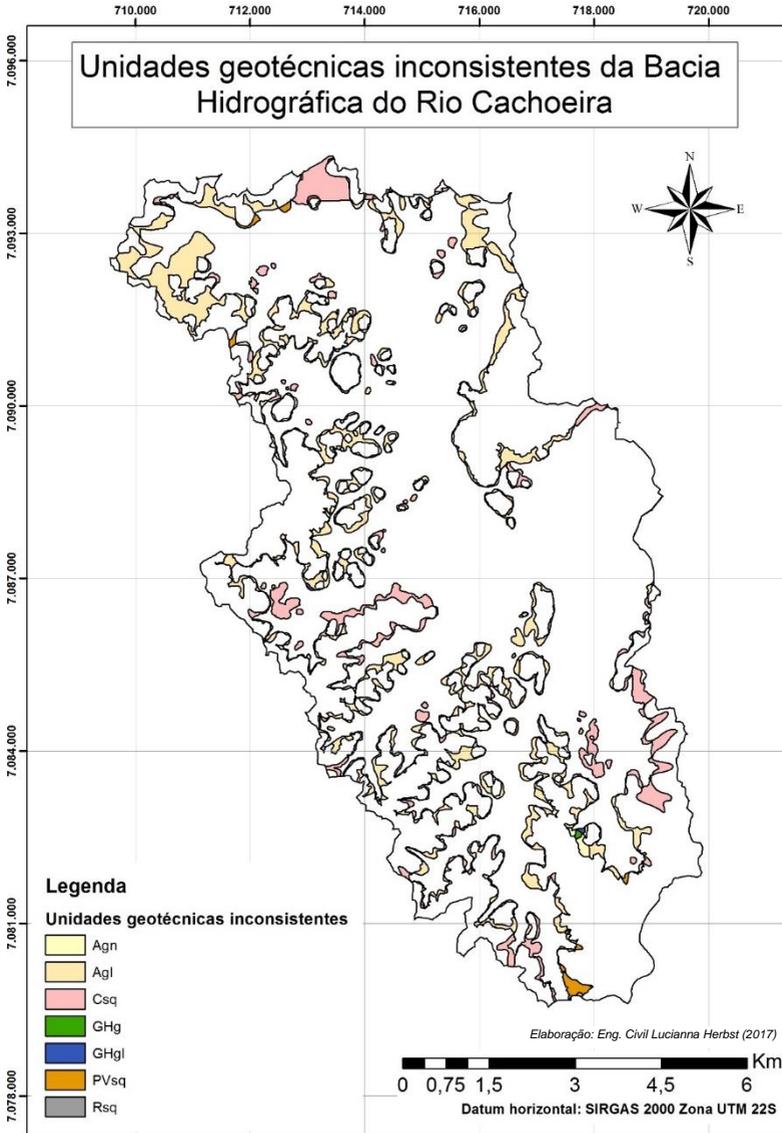
	Sigla	Descrição	Área (km²)	Área (%)
1	Agl	Solo Aluvial de substrato granulito	6,51	7,85
2	Agn	Solo Aluvial de substrato gnaisse	0,17	0,21
3	Csq	Cambissolo de substrato sedimentos quaternários	3,26	3,94
4	GHgl	Solo Glei de substrato granulito	0,02	0,02
5	GHgn	Solo Glei de substrato gnaisse	0,01	0,02
6	PVsq	Podzólico Vermelho-Amarelo de substrato sedimentos quaternários	0,33	0,40
7	Rsq	Solo Litólico de substrato sedimentos quaternários	0,0010	0,0012
TOTAL		-	10,30	12,44

Fonte: Elaborado pela autora (2017).

Solos residuais do tipo Cambissolos e Podzólicos Vermelho-Amarelos, bem como Solos Litólicos, deveriam possuir substrato granulito ou gnaisse, no caso específico da BHRC. O substrato sedimentos quaternários é normalmente característico de solos tipo Aluviais e Glei, encontrados na área de estudo.

Em algumas situações, como na base de encostas ou antigos talwegues, podem ser encontrados solos de características notadamente residuais, mas derivados de depósitos coluvionares/aluvionares, com substrato sedimentos quaternários.

Figura 34. Localização das unidades geotécnicas preliminares inconsistentes



Fonte: Elaborado pela autora (2017).

4.5 DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS ESTATÍSTICOS

A análise estatística básica do banco de dados foi realizada para avaliar estatisticamente o comportamento geral das variáveis analisadas: cota da boca do furo; cota e profundidade do nível d'água; cota e profundidade do impenetrável a percussão e resistência N_{SPT} em cada metro perfurado.

As análises foram realizadas com os 161 dados sobrepostos em cada unidade geológica, pedológica e geotécnica da BHRC, permitindo, assim, a caracterização de cada uma delas.

Os dados estatísticos das variáveis consistiram das seguintes informações: histograma, média, mediana, valor mínimo, valor máximo, amplitude, desvio padrão, variância, coeficiente de variação, curtose e assimetria.

4.6 ANÁLISE GEOESTATÍSTICA

As informações que subsidiaram as aplicações do método geoestatístico foram extraídas do banco de dados e processadas através do módulo *Geostatistical Analyst* do *software* ArcGIS® nas variáveis estudadas (cota e profundidade do nível d'água, cota e profundidade do impenetrável a percussão e resistência N_{SPT} ao longo da profundidade).

Os dados foram submetidos a esta análise no intuito de se verificar a existência de dependência/correlação espacial através da confecção de variogramas clássicos.

As etapas contempladas nesta análise foram:

- Elaboração da superfície variométrica para detecção de possíveis anisotropias e sua influência;
- Elaboração de distintos variogramas experimentais omnidirecionais e também variando-se as direções, *lags*, espaçamento dos *lags* e ângulos de abertura;
- Ajustes de variogramas teóricos que melhor modelam os fenômenos, através de tentativa e erro;
- Interpolação por krigagem ordinária para estimativa de valores e seus erros associados em pontos não

amostrados, com elaboração dos mapas de cotas do nível d'água e do impenetrável, bem como da resistência N_{SPT} nas profundidades 2m, 4m, 6m, 8m, 10m, 12m, 15m e 20m;

- Testes de validação cruzada para avaliar o grau de incerteza associado aos parâmetros analisados, avaliando assim a qualidade da krigagem;
- Correlações com as unidades geológicas, pedológicas e geotécnicas da BHRC.

Para minimização de erros, as interpolações por krigagem ordinária para estimativas da superfície do nível d'água e do impenetrável a percussão foram realizadas em relação às suas cotas. Para a representação destas superfícies em relação às profundidades, partindo-se das cotas obtidas na krigagem e subtraindo-as das cotas do terreno foram geradas as novas superfícies através do interpolador determinístico Inverso Ponderado da Distância (*Inverse Distance Weighting* - IDW).

Foi selecionada para esta pesquisa a krigagem ordinária por ser o método mais utilizado devido a sua simplicidade e os resultados que proporciona. Para a utilização da krigagem, o variograma é a ferramenta básica, pois permite analisar quantitativamente a variação de um fenômeno regionalizado.

Para os ajustes dos variogramas experimentais aos modelos teóricos, foram testados os três modelos mais comuns com patamares: esférico, exponencial e gaussiano. A cada parâmetro analisado buscou-se o modelo mais apropriado.

As propriedades típicas dos variogramas analisados foram: alcance, efeito pepita, variância estrutural e patamar. Através da análise do semivariograma é possível perceber se o fenômeno é isotrópico (a função variograma não muda com a direção) ou anisotrópico (a função variograma se altera com a direção).

Foi verificado o Índice de Dependência Espacial (IDE), descrito por Cambardella *et al.* (1994). Este índice determina faixas de dependência espacial entre as amostras e permite calcular o grau de dependência em função da relação entre o efeito pepita (C_0) e o patamar ($C_0 + C$).

O IDE é descrito pela Equação:

$$IDE = \frac{C_0}{C + C} \times 100$$

Onde:

- IDE ≤ 25%: Forte dependência espacial;
- 25% < IDE ≤ 75%: Moderada dependência espacial;
- IDE > 75%: Fraca dependência espacial;
- IDE = 100%: Variável independente espacialmente (efeito pepita puro).

As escolhas dos modelos com melhores ajustes aos experimentais também decorreram das análises dos resultados das validações cruzadas apresentadas pelo *software* utilizado.

A Tabela 13 apresenta os critérios utilizados na etapa de validação cruzada para validação dos variogramas teóricos.

Tabela 13. Critérios para escolha do variograma teórico através da validação cruzada

Estimativas de Erros	Valores Ideais
Erro Médio (<i>Mean Error</i> - ME)	Valores pequenos
Erro Médio Quadrático (<i>Root-Mean-Square Error</i> - RMSE)	Valores pequenos e próximos entre si
Erro Padrão Médio (<i>Average Standard Error</i> - ASE)	
Erro Médio Normalizado (<i>Mean Standardized Error</i> - MSE)	Valores próximos de 0
Erro Médio Quadrático Normalizado (<i>Root-Mean-Square Standardized Error</i> - RMSSE)	Valores próximos de 1

Os critérios apresentados na Tabela 13 para avaliação dos erros de predição através do processo de validação cruzada se baseia nos seguintes princípios (JONHSTON *et al.*, 2001):

- A média dos erros de estimativa deve se aproximar de zero. No entanto, esses valores dependem da escala dos dados analisados;

- As estimativas devem se aproximar dos valores medidos. O erro médio quadrático é calculado como a raiz quadrada do quadrado das distâncias entre valores medidos e estimados. Quanto menor o erro médio quadrático, melhor a estimativa;
- É necessário garantir que a avaliação da incerteza dos erros da estimativa seja válida. Se o erro padrão médio é próximo do erro quadrático médio, então a estimativa da variabilidade está correta. Se o erro padrão médio é maior que o erro médio quadrático, então a variabilidade das estimativas está sendo superestimada. Se o erro padrão médio é menor que o erro médio quadrático então ocorre subestimativa da variabilidade das estimativas. Outra maneira de se observar é dividir cada erro de predição pelo seu estimado erro padrão. Eles devem ser semelhantes, na média, e então o erro médio quadrático normalizado deve ser próximo de 1.

4.7 DESCRIÇÃO DAS UNIDADES GEOTÉCNICAS E RESPECTIVOS PERFIS ESTRATIGRÁFICOS

Através das informações extraídas das análises estatísticas, geoestatísticas e propriedades físicas dos solos, foram elaborados perfis genéricos representativos das unidades geotécnicas da BHRC em termos de resistência N_{SPT} média, profundidade média do nível d'água e profundidade média do impenetrável a percussão.

Este tipo de procedimento é comumente associado ao mapeamento geotécnico, tal qual observado nos trabalhos de Miranda (2008), Oliveira (2015) e Thiesen (2016). Contudo, no caso específico desta pesquisa, os perfis elaborados não representam seções transversais específicas da área de estudo, mas uma configuração genérica que identifica os parâmetros médios de cada unidade geotécnica, de forma a auxiliar na compreensão do comportamento generalizado da unidade independentemente da localização na bacia.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os dados apresentados na sequência refletem os resultados alcançados nesta pesquisa para o município de Joinville/SC e referem-se ao mapeamento geotécnico da área da bacia hidrográfica do Rio Cachoeira - BHRC e representação dos perfis genéricos do solo de suas unidades geotécnicas, estimativas da profundidade do nível d'água e do impenetrável à percussão, bem como do índice de resistência N_{SPT} dos solos ao longo da profundidade.

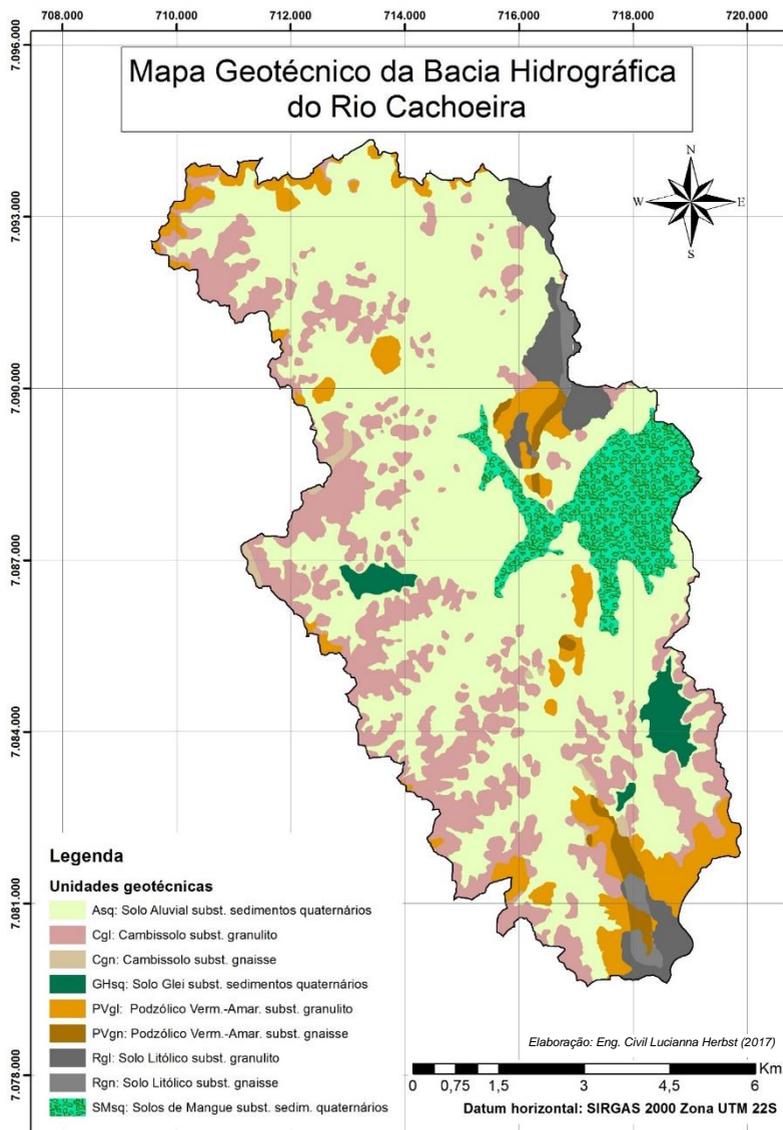
5.1 MAPEAMENTO GEOTÉCNICO

Para verificação das dúvidas e correção das inconsistências identificadas no mapa geotécnico preliminar, foram realizados ajustes dos contornos das unidades geotécnicas preliminares através do relevo com utilização das curvas de nível da área e do mapa de declividades, cujas informações possibilitaram o refinamento dos limites entre as unidades. Nesta etapa, foram realizadas inspeções de campo de forma a facilitar a compreensão quanto ao comportamento geomorfológico da área.

Após o ajuste através do relevo, foram consultados os boletins de sondagens SPT cadastrados na área para verificação de possíveis inconsistências remanescentes. Nas áreas com menor número de dados cadastrados e que ainda apresentaram inconsistências, foram realizadas algumas sondagens a trado para identificação do solo superficial e posterior classificação como residual ou sedimentar.

Todos os ajustes citados possibilitaram a elaboração do Mapa Geotécnico da BHRC, ilustrado na Figura 35.

Figura 35. Mapa geotécnico da BHRC



Base de dados: Carta geológica SG.22-Z-B Folha Joinville. CPRM (2011) 1:250.000

Cobertura pedológica da bacia hidrográfica do Rio Cachoeira. PMJ (2011) 1:25.000.

Fonte: Elaborado pela autora (2017).

A Tabela 14 apresenta e quantifica as unidades geotécnicas finais da BHRC, cujas três de maior representatividade são: Asq (54,85%), Cgl (22,27%) e PVgl (7,66%).

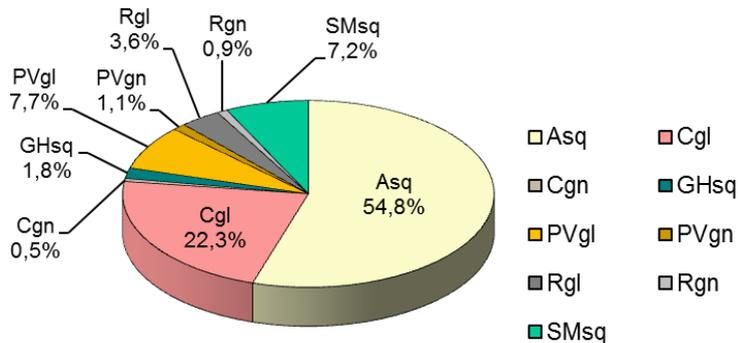
O gráfico da Figura 36 ilustra o resumo das unidades geotécnicas em termos de porcentagem de área.

Tabela 14. Áreas das unidades geotécnicas da BHRC

Sigla	Descrição	Área (km²)	Área %
1 Asq	Solo Aluvial de substrato sedimentos quaternários	45,44	54,85
2 Cgl	Cambissolo de substrato granulito	18,45	22,27
3 Cgn	Cambissolo de substrato gnaisse	0,45	0,54
4 GHsq	Solo Glei de substrato sedimentos quaternários	1,51	1,82
5 PVgl	Podzólico Vermelho-Amarelo de substrato granulito	6,35	7,66
6 PVgn	Podzólico Vermelho-Amarelo de substrato gnaisse	0,95	1,15
7 Rgl	Solo Litólico de substrato granulito	2,95	3,56
8 Rgn	Solo Litólico de substrato gnaisse	0,77	0,93
9 SMSq	Solos de Mangue de substrato sedimentos quaternários	5,98	7,22
TOTAL		82,85	100,00

Fonte: Elaborado pela autora (2017).

Figura 36. Porcentagens das áreas das unidades geotécnicas na BHRC



Fonte: Elaborado pela autora (2017).

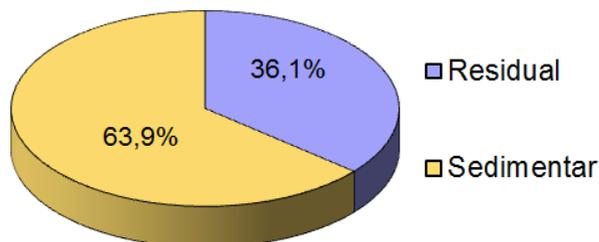
A Tabela 15 apresenta a classificação dos solos em sedimentares e residuais, cujo resumo gráfico em termos de porcentagem de área é ilustrado na Figura 37.

Tabela 15. Classificação dos solos nas unidades geotécnicas da BHRC quanto à sua origem

Sigla	Descrição	Classificação
Asq	Solo Aluvial de substrato sedimentos quaternários	Sedimentar
Cgl	Cambissolo de substrato granulito	Residual
Cgn	Cambissolo de substrato gnaisse	Residual
GHsq	Solo Glei de substrato sedimentos quaternários	Sedimentar
PVgl	Podzólico Vermelho-Amarelo de substrato granulito	Residual
PVgn	Podzólico Vermelho-Amarelo de substrato gnaisse	Residual
Rgl	Solo Litólico de substrato granulito	Residual
Rgn	Solo Litólico de substrato gnaisse	Residual
SMsq	Solos de Mangue de substrato sedimentos quaternários	Sedimentar

Fonte: Elaborado pela autora (2017).

Figura 37. Porcentagens das áreas de solos residuais e sedimentares na BHRC



Fonte: Elaborado pela autora (2017).

É possível perceber, assim, a predominância de solos sedimentares (63,9%), prevalecendo os do tipo Aluvial com substrato em sedimentos quaternários (Asq), que contemplam solos originalmente denominados no mapa pedológico de “Cambissolos Flúvicos” e “Neossolos Quartzarênicos”.

Nas diversas elevações e morrarias espalhadas ao longo da bacia predominam solos residuais do tipo Cambissolos com substrato em granulito (22,3% do total), que contemplam solos originalmente denominados no mapa pedológico apenas de “Cambissolos” e “Cambissolos Háplicos”

Nas maiores elevações da BHRC (porções Sul e Nordeste da área) prevalecem solos Podzólicos (8,8%) e Litólicos (4,5%), ambos com substratos em granulito e gnaisse (este, porém, em menor escala).

Os Solos de Mangue se concentram na região Leste, nas áreas com as menores cotas e declividades verificadas em toda a bacia, nas proximidades com a Baía da Babitonga e foz do Rio Cachoeira.

Identificam-se três áreas mapeadas com solos tipo Glei nas regiões Oeste e Sudeste da bacia, em áreas de baixas cotas e declividades.

A Tabela 16 apresenta os parâmetros de elevação e declividade média de cada unidade geotécnica da BHRC,

extraídos através de manipulação do MDT e mapa de declividades.

Tabela 16. Elevação e declividade das unidades geotécnicas da BHRC

Elevação		Declividade	
Unidade	Média (m)	Unidade	Média (%)
SMsq	1,8	SMsq	0,9
GHsq	8,1	GHsq	2,1
Asq	10,9	Asq	4,5
Cgl	31,0	Cgl	18,8
PVgl	48,2	PVgn	25,1
PVgn	54,8	PVgl	25,8
Cgn	54,9	Cgn	27,7
Rgl	83,4	Rgl	31,2
Rgn	↓ 100,8	Rgn	↓ 34,7

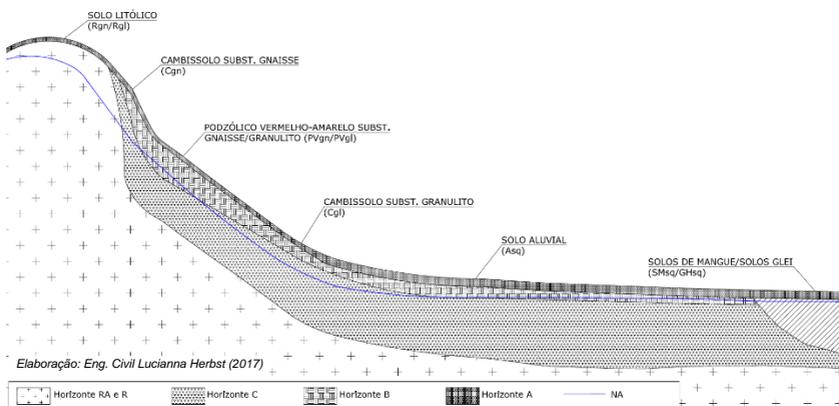
Fonte: Elaborado pela autora (2017).

A unidade geotécnica que representa os solos nas menores cotas da BHRC é a SMsq (Solos de Mangue) e nas cotas mais elevadas, verificam-se as unidades Rgn e Rgl (Solos Litólicos).

Quanto à declividade, a mínima é verificada nas áreas de manguezais (unidade SMsq) e a máxima se verifica em áreas com presença de Solos Litólicos (unidades Rgn e Rgl).

A partir do mapa geotécnico e das informações apresentadas na Tabela 16 definiu-se uma topossequência típica dos solos na BHRC, no sentido “topo de morro” → áreas baixas, caracterizada pelas unidades geotécnicas na seguinte ordem: Rgn/Rgl → Cgn → PVgn/PVgl → Cgl → Asq → GHsq → SMsq. A Figura 38 ilustra tal sequência.

Figura 38. Topossequência típica dos solos na BHRC



Fonte: Elaborado pela autora (2017).

Os Solos Litólicos são as unidades que se localizam nas áreas mais altas e acidentadas da bacia (relevo fortemente ondulado), enquanto que os Solos de Mangue são as unidades localizadas nas áreas mais baixas e planas. Os Cambissolos e Podzólicos Vermelho-Amarelos se intercalam em relação à sua distribuição altimétrica quando da presença ou não do substrato gnaisse. Na ocorrência de áreas com substrato apenas granulito, os Podzólicos se sobrepõem aos Cambissolos.

5.2 ANÁLISE ESTATÍSTICA

5.2.1 Considerações Gerais

Através da análise do banco de dados das sondagens SPT, a Tabela 17 apresenta os parâmetros estatísticos gerais da cota da boca do furo, profundidades do nível d'água e do impenetrável à percussão e resistência N_{SPT} nas profundidades entre 1,0 e 25,0m.

Os histogramas das variáveis estão apresentados nos Apêndices.

Tabela 17. Estatísticas gerais

Dados	Núm. pontos	Média	Mediana	Mín.	Máx.	Desv. Pad.	Variân.	Coef. Var. (CV)	Curt.	Assim.
Cota Furo (m)	161	17,08	13,31	0,59	84,28	15,48	239,62	0,91	4,50	1,90
Cota NA (m)	161	12,96	10,11	-18,05	69,18	14,05	197,37	1,08	4,87	1,83
Prof. NA (m)	161	4,12	1,93	0,01	29,15	4,93	24,34	1,2	6,16	2,25
Cota Imp. (m)	147	2,16	-0,1	-21,5	64,67	16,91	285,83	7,83	2,88	1,49
Prof. Imp. (m)	147	15,52	10,46	5,02	35,45	7,41	54,92	0,48	0,17	1,05
N_{SPT} médio										
Prof.=1m	161	4	4	0	23	3,54	12,56	0,89	4,57	1,67
Prof.=2m	161	5	4	0	32	4,78	22,87	0,96	6,96	2,09
Prof.=3m	161	7	5	0	63	7,25	52,58	1,04	23,17	3,85
Prof.=4m	161	9	7	0	50	8,23	67,68	0,91	9,2	2,66
Prof.=5m	159	9	8	0	54	7,76	60,16	0,86	14,67	3,19
Prof.=6m	159	12	10	0	50	9,19	84,46	0,77	4,86	1,96
Prof.=7m	159	14	11	0	50	11,17	124,7	0,80	2,99	1,82
Prof.=8m	158	16	12	0	51	12,31	151,45	0,77	1,96	1,59
Prof.=9m	153	18	14	0	50	13,48	181,73	0,75	0,67	1,25
Prof.=10m	153	22	17	1	54	14,88	221,43	0,68	-0,46	0,91
Prof.=11m	147	33	50	4	53	18,51	342,48	0,56	-1,77	-0,29
Prof.=12m	147	34	50	4	54	18,06	326,31	0,53	-1,70	-0,38
Prof.=13m	147	35	50	4	54	17,84	318,35	0,51	-1,65	-0,47
Prof.=14m	147	37	50	4	53	17,11	292,62	0,46	-1,54	-0,58
Prof.=15m	147	37	50	3	52	16,61	275,92	0,45	-1,44	-0,66
Prof.=16m	147	39	50	5	53	15,61	243,77	0,40	-1,06	-0,89

Dados	Núm. pontos	Média	Mediana	Mín.	Máx.	Desv. Pad.	Variân.	Coef. Var. (CV)	Curt.	Assim.
Cota Furo (m)	161	17,08	13,31	0,59	84,28	15,48	239,62	0,91	4,50	1,90
Cota NA (m)	161	12,96	10,11	-18,05	69,18	14,05	197,37	1,08	4,87	1,83
Prof. NA (m)	161	4,12	1,93	0,01	29,15	4,93	24,34	1,2	6,16	2,25
Cota Imp. (m)	147	2,16	-0,1	-21,5	64,67	16,91	285,83	7,83	2,88	1,49
Prof. Imp. (m)	147	15,52	10,46	5,02	35,45	7,41	54,92	0,48	0,17	1,05
N_{SPT} médio										
Prof.=17m	147	40	50	6	50	14,97	224,06	0,37	-0,75	-1,02
Prof.=18m	147	41	50	7	50	14,28	204,01	0,35	-0,43	-1,16
Prof.=19m	147	42	50	6	53	13,74	188,70	0,33	0,08	-1,35
Prof.=20m	147	43	50	4	51	13,24	175,33	0,31	0,32	-1,40
Prof.=21m	147	45	50	3	54	11,55	133,39	0,26	2,53	-1,96
Prof.=22m	147	45	50	10	51	10,95	119,91	0,24	3,08	-2,15
Prof.=23m	147	46	50	3	50	10,60	112,33	0,23	4,49	-2,41
Prof.=24m	147	46	50	3	50	10,29	105,94	0,22	5,60	-2,62
Prof.=25m	147	46	50	6	50	10,06	101,14	0,22	5,86	-2,69

Fonte: Elaborado pela autora (2017).

Através do exposto, percebe-se que a cota média da boca dos furos de sondagem SPT do banco de dados desta pesquisa é de aproximadamente 17,0m. O nível d'água observado situa-se numa profundidade média de 4,1m e o impenetrável, na profundidade média de 15,5m.

De maneira geral, a resistência N_{SPT} média é crescente com a profundidade, independentemente da localização das sondagens.

Em relação às medidas de dispersão, o desvio padrão da resistência N_{SPT} é maior à medida que a profundidade da sondagem aumenta. O maior coeficiente de variação da resistência N_{SPT} é observado na profundidade de 3,0m (CV de 104%) e o maior desvio padrão é na profundidade de 11,0m.

Referente ao nível d'água, o maior desvio padrão é em relação à cota do mesmo, no entanto a variabilidade é maior em relação à sua profundidade. Acerca do impenetrável à percussão, o maior desvio padrão também se refere à cota do mesmo, da mesma forma que a variabilidade também é maior em relação à sua cota.

5.2.2 Análise Estatística das Unidades Geológicas

A partir das informações extraídas da Tabela 17 e em conjunto com a análise espacial dos furos de sondagens na BHRC e com o mapa geológico, apresenta-se na Tabela 18 as devidas correlações, também ilustradas graficamente na Figura 39.

Verifica-se que a maior parte das sondagens obtidas se localiza na unidade geológica Q2a (depósitos aluvionares) seguida pela unidade A4PP2la (Gnaisses Granulíticos Luís Alves).

A unidade A4PP2gla (Paragnaisse Luís Alves) apresenta apenas 1 furo de sondagem que a caracteriza, fato que prejudica a consistência de sua avaliação estatística. No entanto, estudos indicam que esta unidade apresenta tendências semelhantes à unidade A4PP2la, melhor caracterizada por sondagens realizadas.

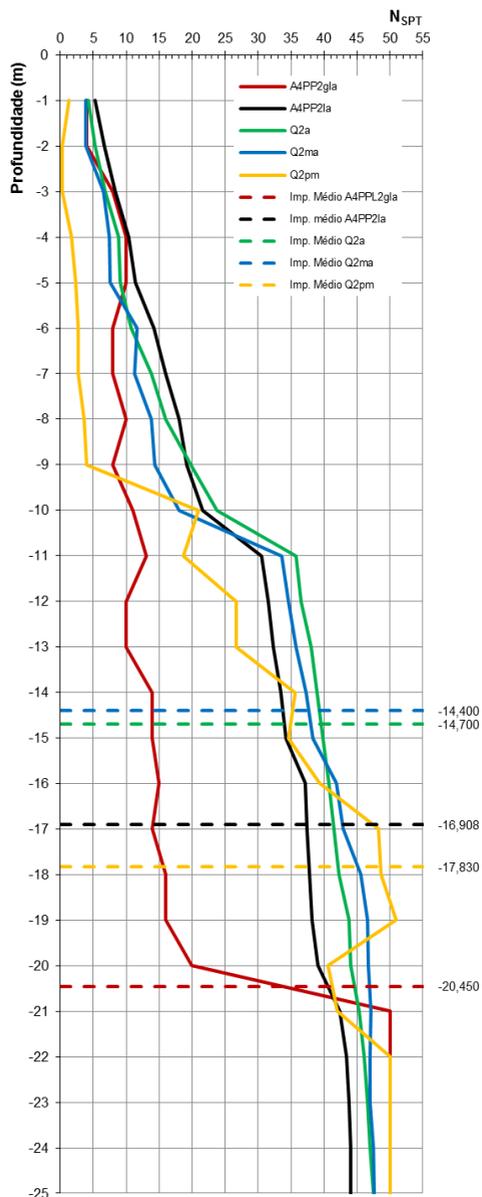
Tabela 18. Análise estatística das unidades geológicas

Unidade geológica	A4PP2gla	A4PP2la	Q2a	Q2ma	Q2pm
Descrição	Paragnaisse s Luís Alves	Gnaisses Granulíticos Luís Alves	Depósitos aluvionares	Depósitos de planície de maré	Depósitos de pântanos e mangues
Nº furos	1	52	79	26	3
Prof. média impenetrável (m)	20,450	16,908	14,700	14,400	17,830
Prof. média NA (m)	2,500	6,719	2,792	3,383	1,117
NSPT médio	R ² =0,6754	R ² =0,9535	R ² =0,9094	R ² =0,9166	R ² =0,9080
Prof.=1m	4	5	4	4	1
Prof.=2m	4	7	5	4	0
Prof.=3m	8	8	7	7	0
Prof.=4m	10	10	9	7	2
Prof.=5m	10	11	9	8	2
Prof.=6m	8	14	11	12	3
Prof.=7m	8	16	14	11	3
Prof.=8m	10	18	16	14	4
Prof.=9m	8	19	20	14	4
Prof.=10m	11	22	24	18	21
Prof.=11m	13	31	36	34	19
Prof.=12m	10	32	37	35	27
Prof.=13m	10	32	38	36	27
Prof.=14m	14	33	39	37	36
Prof.=15m	14	34	40	38	35

Unidade geológica	A4PP2gla	A4PP2la	Q2a	Q2ma	Q2pm
Descrição	Paragnaisse s Luís Alves	Gnaisses Granulíticos Luís Alves	Depósitos aluvionares	Depósitos de planície de maré	Depósitos de pântanos e mangues
Nº furos	1	52	79	26	3
Prof. média impenetrável (m)	20,450	16,908	14,700	14,400	17,830
Prof. média NA (m)	2,500	6,719	2,792	3,383	1,117
N_{SPT} médio	R ² =0,6754	R ² =0,9535	R ² =0,9094	R ² =0,9166	R ² =0,9080
Prof.=16m	15	37	41	42	39
Prof.=17m	14	37	42	43	48
Prof.=18m	16	38	42	46	49
Prof.=19m	16	38	44	47	51
Prof.=20m	20	39	44	47	41
Prof.=21m	50	42	45	47	42
Prof.=22m	50	43	46	47	50
Prof.=23m	50	44	47	47	50
Prof.=24m	50	44	47	48	50
Prof.=25m	50	44	48	48	50

Fonte: Elaborado pela autora (2017)

Figura 39. Perfil estatístico das unidades geológicas *versus* profundidade



Fonte: Elaborado pela autora (2017).

Nota-se que a resistência N_{SPT} é crescente com a profundidade e que os menores valores de resistência são observados na unidade Q2pm. O impenetrável menos profundo é verificado para a unidade Q2ma (solo sedimentar, $h=14,40m$) e o mais profundo na unidade Q2pm (solo sedimentar, $h=17,83m$). A menor profundidade do nível d'água é verificada na unidade Q2pm ($h=1,12m$) e a maior, na unidade A4PP2la ($h=6,72m$).

5.2.3 Análise Estatística das Unidades Pedológicas

A partir das informações extraídas da Tabela 17 e em conjunto com a análise espacial dos furos de sondagens na BHRC e com o mapa pedológico, apresenta-se na Tabela 19 as devidas correlações, também ilustradas graficamente na Figura 40.

Verifica-se que a maior parte das sondagens obtidas se localiza na unidade pedológica CYd+GXd (Cambissolo flúvico) seguida pela unidade CXd1,d2 (Cambissolo háplico).

Nota-se que a resistência N_{SPT} é crescente com a profundidade e que os menores valores de resistência são observados nas unidades Mg e GXd1. O impenetrável menos profundo é verificado para a unidade PAd1 (solo residual, $h=13,14m$) e o mais profundo na unidade GXd1 (solo sedimentar, $h=17,74m$). A menor profundidade do nível d'água é verificada na unidade Mg ($h=1,54m$) e a maior, na unidade RLd4 ($h=8,34m$).

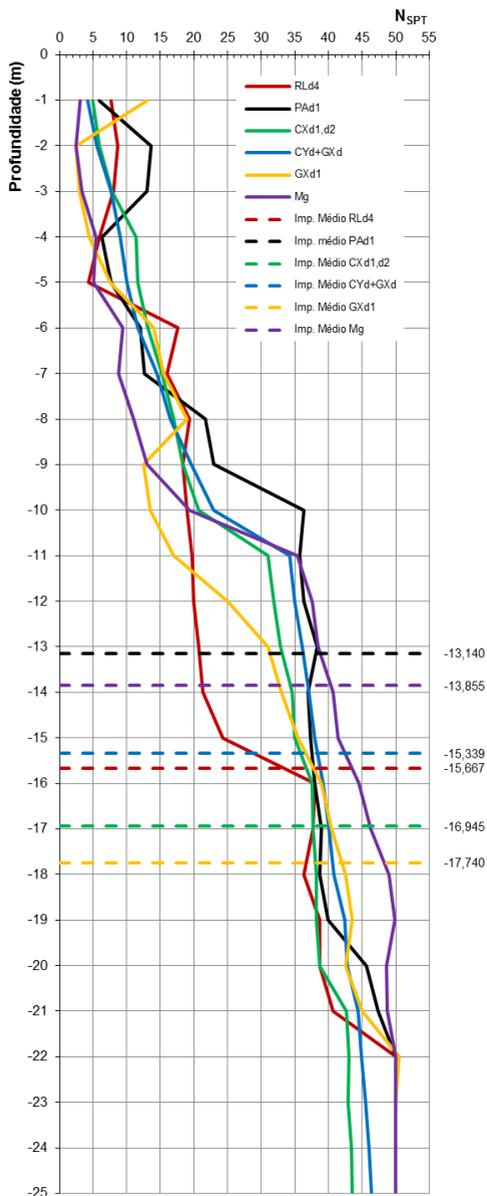
Tabela 19. Análise estatística das unidades pedológicas

Unidade pedológica	RLd4	PAd1	CXd1,d2	CYd+GXd	GXd1	Mg
Descrição	Neossolo Litólico	Argissolo Amarelo	Cambissolo Háptico	Cambissolo Flúvico	Gleissolo Háptico	Solos de Mangue
Nº furos	3	3	37	94	2	22
Prof. média impenetrável	15,667	13,140	16,945	15,339	17,740	13,855
Prof. média NA	8,337	7,517	6,954	3,403	2,630	1,538
N_{SPT} médio	R ² =0,9322	R ² =0,8989	R ² =0,9391	R ² =0,9243	R ² =0,9364	R ² =0,8979
Prof.=1m	8	6	5	4	13	3
Prof.=2m	9	14	6	6	3	2
Prof.=3m	8	13	8	8	3	3
Prof.=4m	6	6	11	9	5	5
Prof.=5m	4	8	12	10	8	5
Prof.=6m	18	12	13	12	14	9
Prof.=7m	16	13	15	14	16	9
Prof.=8m	19	22	17	16	19	11
Prof.=9m	18	23	18	20	13	13
Prof.=10m	19	36	21	23	14	19
Prof.=11m	20	36	31	34	17	35
Prof.=12m	20	36	32	35	25	38
Prof.=13m	21	38	33	36	31	38
Prof.=14m	21	37	35	37	33	41
Prof.=15m	24	37	35	38	36	41

Unidade pedológica	RLd4	PAd1	CXd1,d2	CYd+GXd	GXd1	Mg
Descrição	Neossolo Litólico	Argissolo Amarelo	Cambissolo Háplico	Cambissolo Flúvico	Gleissolo Háplico	Solos de Mangue
Nº furos	3	3	37	94	2	22
Prof. média impenetrável	15,667	13,140	16,945	15,339	17,740	13,855
Prof. média NA	8,337	7,517	6,954	3,403	2,630	1,538
N_{SPT} médio	R ² =0,9322	R ² =0,8989	R ² =0,9391	R ² =0,9243	R ² =0,9364	R ² =0,8979
Prof.=16m	38	38	38	39	39	45
Prof.=17m	38	39	38	40	41	46
Prof.=18m	36	39	38	41	43	49
Prof.=19m	39	40	38	42	44	50
Prof.=20m	39	46	39	43	43	49
Prof.=21m	41	47	43	44	45	49
Prof.=22m	50	50	43	45	51	50
Prof.=23m	50	50	43	46	50	50
Prof.=24m	50	50	43	46	50	50
Prof.=25m	50	50	44	46	50	50

Fonte: Elaborado pela autora (2017).

Figura 40. Perfil estatístico das unidades pedológicas *versus* profundidade



Fonte: Elaborado pela autora (2017).

5.2.4 Análise Estatística das Unidades Geotécnicas

De maneira análoga ao realizado nos demais mapas temáticos, apresenta-se na Tabela 20 as correlações estatísticas das unidades geotécnicas, também ilustradas graficamente na Figura 41.

Verifica-se que a maior parte das sondagens obtidas se localiza na unidade geotécnica Asq (Solo Aluvial substrato sedimentos quaternários) seguida pela unidade Cgl (Cambissolo substrato granulito).

Nota-se que a resistência N_{SPT} é crescente com a profundidade e que os menores valores de resistência são observados nas unidades SMSq e GHSq por se tratarem de solos sedimentares.

O impenetrável menos profundo é verificado para a unidade PVgl (residual, $h=12,38m$) e o mais profundo na unidade Cgn (residual, $h=20,45m$). A menor profundidade do nível d'água é verificada na unidade SMSq ($h=1,54m$) e a maior, na unidade Rgl ($h=8,34m$).

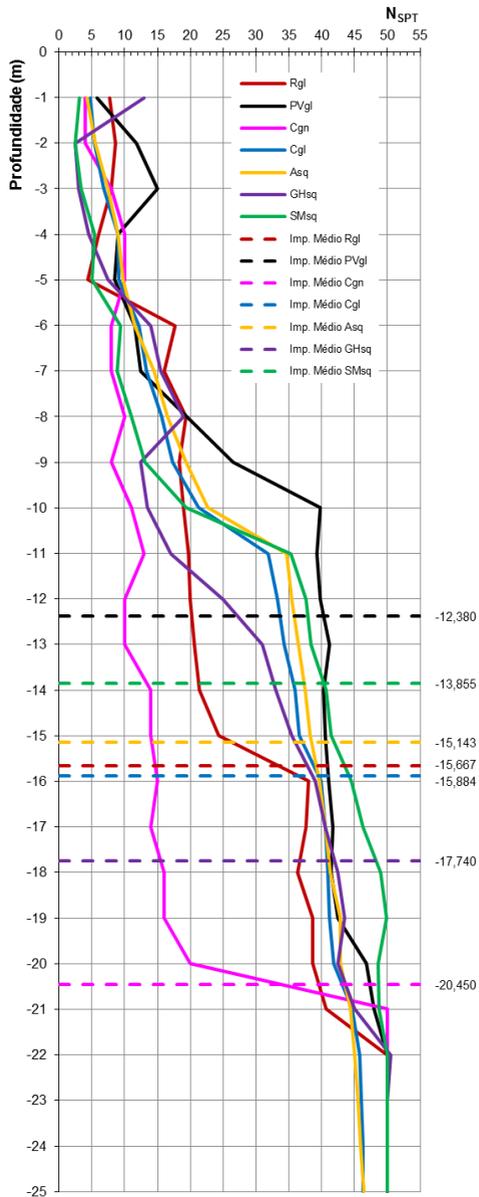
A unidade Cgn apresenta apenas 1 furo caracterizando-a, prejudicando a consistência de sua avaliação estatística. No entanto, tal unidade apresenta tendências semelhantes à unidade Cgl.

Tabela 20. Análise estatística das unidades geotécnicas

Unidade	Asq	Cgl	Cgn	GHsq	PVgl	Rgl	SMs q
Nº sondagens	92	37	1	2	4	3	22
Prof. média impenetrável	15,14	15,88	20,4 5	17,74	12,38	15,6 6	13,8 5
Prof. média NA	3,201	5,496	2,50	2,630	8,163	8,33	1,53
N_{SPT} médio	R ² 0,9184	R ² 0,938	R ² 0,67	R ² 0,936	R ² 0,863	R ² 0,93	R ² 0,89
Prof.=1m	4	5	4	13	6	8	3
Prof.=2m	6	5	4	3	12	9	2
Prof.=3m	7	7	8	3	15	8	3
Prof.=4m	9	9	10	5	9	6	5
Prof.=5m	10	9	10	8	9	4	5
Prof.=6m	12	12	8	14	12	18	9
Prof.=7m	14	13	8	16	13	16	9
Prof.=8m	16	16	10	19	20	19	11
Prof.=9m	19	17	8	13	27	18	13
Prof.=10m	23	21	11	14	40	19	19
Prof.=11m	35	32	13	17	39	20	35
Prof.=12m	35	33	10	25	40	20	38
Prof.=13m	36	34	10	31	41	21	38
Prof.=14m	37	36	14	33	40	21	41
Prof.=15m	38	37	14	36	41	24	41
Prof.=16m	40	40	15	39	41	38	45
Prof.=17m	41	41	14	41	42	38	46
Prof.=18m	41	41	16	43	42	36	49
Prof.=19m	43	41	16	44	43	39	50
Prof.=20m	43	42	20	43	47	39	49
Prof.=21m	44	45	50	45	48	41	49
Prof.=22m	45	46	50	51	50	50	50
Prof.=23m	46	46	50	50	50	50	50
Prof.=24m	46	46	50	50	50	50	50
Prof.=25m	46	46	50	50	50	50	50

Fonte: Elaborado pela autora (2017).

Figura 41. Perfil estatístico das unidades geotécnicas *versus* profundidade



Fonte: Elaborado pela autora (2017).

5.3 ANÁLISE GEOESTATÍSTICA

Os resultados obtidos foram apresentados sob forma de variogramas, relatórios de parâmetros e validações cruzadas e verificação dos erros associados entre os valores medidos e estimados, bem como apresentação dos mapas com as interpolações por krigagem ordinária e seus erros associados.

5.3.1 Estimativas da Cota e Profundidade do Nível d'Água

As análises foram desenvolvidas aplicando-se a técnica de krigagem ordinária aos dados das 284 sondagens selecionadas. Foram simulados ajustes aos três variogramas teóricos que explicam a maioria dos fenômenos espaciais: esférico, exponencial e gaussiano.

A Tabela 21 apresenta o resumo dos principais parâmetros geoestatísticos e da validação cruzada, derivados das simulações realizadas com ajustes aos três variogramas teóricos principais citados anteriormente.

Ressalta-se que inúmeras simulações foram realizadas variando-se os *lags* (espaçamento teórico entre as amostras), as direções e ângulos de abertura das varreduras, em condições de isotropia ou anisotropia. Entretanto, estão apresentados apenas os melhores resultados obtidos para cada modelo teórico. A comparação entre estes resultados condicionou a escolha do melhor ajuste que subsidiou as interpolações por krigagem ordinária para elaboração dos mapas.

Tabela 21. Parâmetros geoestatísticos e validação cruzada dos modelos simulados - variável cota do nível d'água

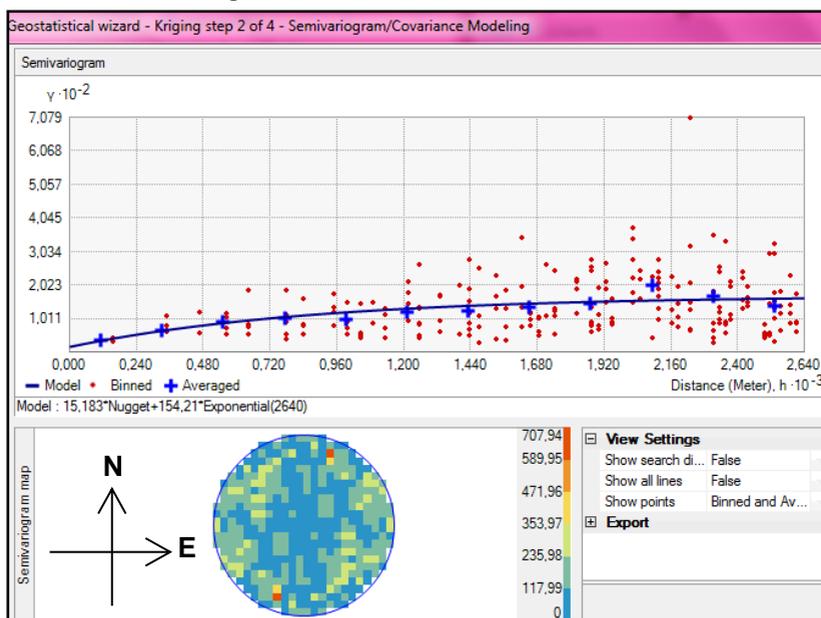
Modelo Teórico	Esférico	Exponencial	Gaussiano
Lag	412	220	220
Nº de lags	12	12	12
Anisotropia?	Não	Não	Não
Direção	Omnidirecional	Omnidirecional	Omnidirecional
Abertura	-	-	-
Alcance (a)	3.268,0	2.640,0	2.072,0
Efeito pepita (C₀)	38,94	15,18	54,38
Patamar (C+C₀)	193,32	169,39	165,25
Dependência espacial [C₀/(C+C₀) x100%	20,1% (Forte)	9% (Forte)	32,9% (Moderada)
Validação Cruzada			
Erro Médio (ME)	0,0898	0,3408	-0,0589
Erro Médio Quadrático (RMSE)	8,2351	7,7708	8,8109
Erro Padrão Médio (ASE)	8,4511	8,0503	8,6811
Erro Médio Normalizado (MSE)	0,0045	0,0256	-0,0060
Erro Médio Quadrático Normalizado (RMSSE)	0,9435	0,9361	0,9914

Fonte: Elaborado pela autora (2017).

A partir da Tabela 21 e tomando-se como base os critérios para seleção dos melhores modelos ajustados, conclui-se que dentre os três modelos teóricos simulados, o exponencial é o que apresenta o melhor ajuste aos dados empíricos.

A Figura 42 ilustra as imagens extraídas do *software* para a superfície variométrica e ajuste dos dados ao modelo exponencial escolhido.

Figura 42. Superfície variométrica e ajuste ao modelo exponencial - cota do nível d'água



Fonte: Elaborado pela autora (2017).

Os valores em azul e verde da superfície variométrica da Figura 42 indicam uma menor variabilidade dos dados e a maior variabilidade é representada pelas cores laranja e vermelho. Verifica-se que não há tendências direcionais quanto à variabilidade, validando, assim, a utilização do variograma omnidirecional no modelo adotado.

Conforme exposto na seção 4.6, a representação da superfície do nível d'água em relação à profundidade partiu das cotas obtidas na krigagem ordinária e foram subtraídas das cotas do terreno. Novas interpolações para esta variável foram desenvolvidas através do interpolador Inverso Ponderado da Distância (IDW).

Os mapas da Figura 43 ilustram as estimativas do nível d'água em termos de cota (a), profundidade (c) e o desvio padrão das estimativas (b).

Através da Figura 43c, verifica-se que a profundidade do nível d'água é menor e mais próxima à superfície nas regiões mais claras, as quais tendem a situar-se nas áreas de cotas mais baixas da bacia.

As menores profundidades verificam-se nas regiões Leste e Norte da bacia, sobrepondo-se às unidades sedimentares identificadas como Solos de Mangue, Glei e Aluviais.

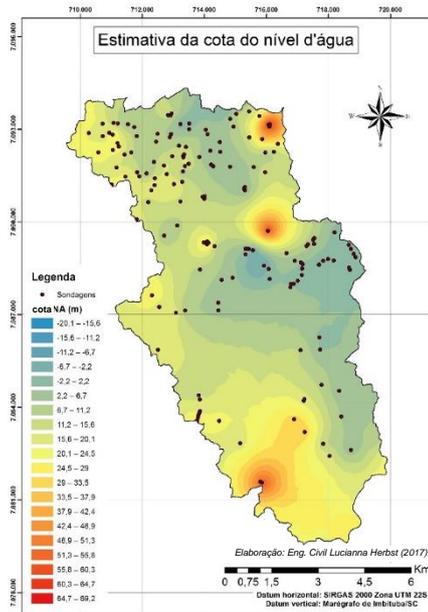
As maiores profundidades do nível d'água concentram-se em áreas de cotas mais elevadas principalmente nas porções Sul e Oeste da bacia, sobrepondo-se às unidades residuais identificadas como Cambissolos, Podzólicos e Solos Litólicos.

Tais observações corroboram com os resultados obtidos nas análises estatísticas.

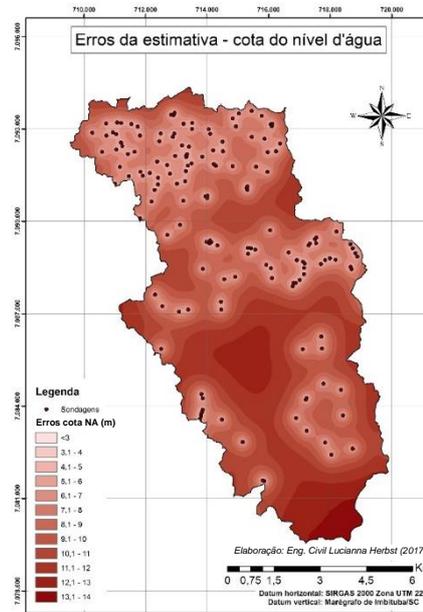
A Figura 43a apresenta o mapa da cota do nível d'água, no qual verifica-se que quase a totalidade da bacia, em áreas com baixas altitudes (menores que 10,0m) e relevo plano (declividade menor que 3%), possui as menores cotas, situadas abaixo do nível do mar.

Através da Figura 43b é possível notar que os erros associados às estimativas são maiores nas áreas mais escuras, em áreas menos densas de sondagens. As áreas que apresentam um agrupamento maior de sondagens no seu entorno indicam estimativas mais precisas, com menor desvio padrão, representadas pelas cores claras no mapa.

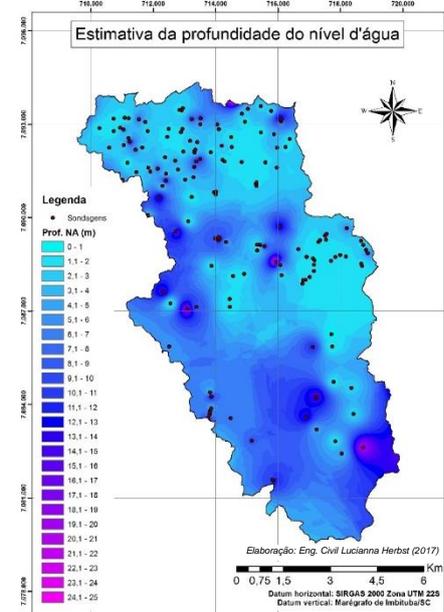
Figura 43. Mapas estimativos do nível d'água na BHRC



a) cota



b) desvio padrão da krigagem



c) profundidade

Fonte: Elaborado pela autora (2017).

5.3.2 Estimativas da Cota e Profundidade do Impenetrável à Percussão

As análises foram desenvolvidas aplicando-se a técnica de krigagem ordinária aos dados das 264 sondagens selecionadas. Foram simulados ajustes aos três variogramas teóricos que explicam a maioria dos fenômenos espaciais: esférico, exponencial e gaussiano.

A Tabela 22 apresenta o resumo dos principais parâmetros geoestatísticos e da validação cruzada, derivados das simulações realizadas com ajustes aos três variogramas teóricos principais citados anteriormente.

Ressalta-se que inúmeras simulações foram realizadas variando-se os *lags* (espaçamento teórico entre as amostras), as direções e ângulos de abertura das varreduras, em condições de isotropia ou anisotropia. Entretanto, estão apresentados apenas os melhores resultados obtidos para cada modelo teórico. A comparação entre estes resultados condicionou a escolha do melhor ajuste que subsidiou as interpolações por krigagem ordinária para elaboração dos mapas.

Tabela 22. Parâmetros geoestatísticos e validação cruzada dos modelos simulados - variável cota do impenetrável à percussão

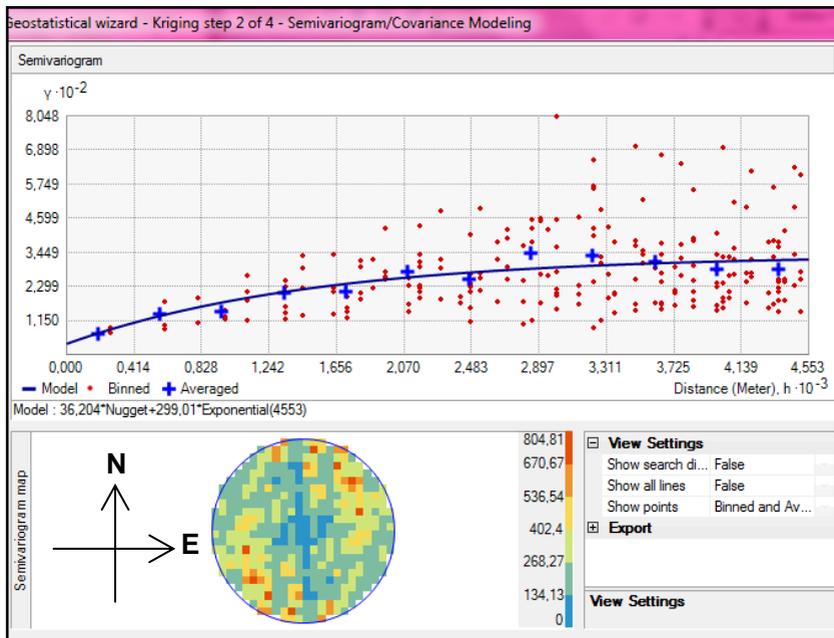
Modelo Teórico	Esférico	Exponencial	Gaussiano
Lag	220	379,4	220
Nº de lags	12	12	12
Anisotropia?	Não	Não	Não
Direção	Omnidirecional	Omnidirecional	Omnidirecional
Abertura	-	-	-
Alcance (a)	2.575,0	4.553,0	2.232,0
Efeito pepita (C₀)	49,7	36,2	79,3
Patamar (C+C₀)	268,58	335,21	271,84
Dependência espacial [C₀/(C+C₀) x100%	18,5% (Forte)	10,8% (Forte)	29,2% (Moderada)
Validação Cruzada			
Erro Médio (ME)	0,0768	0,2311	-0,0638
Erro Médio Quadrático (RMSE)	10,4611	10,2436	11,2581
Erro Padrão Médio (ASE)	10,2565	10,1884	10,5711
Erro Médio Normalizado (MSE)	0,0024	0,0122	-0,0062
Erro Médio Quadrático Normalizado (RMSSE)	1,0046	0,9991	1,0516

Fonte: Elaborado pela autora (2017).

A partir da Tabela 22 e tomando-se como base os critérios para seleção dos melhores modelos ajustados, conclui-se que dentre os três modelos teóricos simulados, o exponencial é o que apresenta o melhor ajuste aos dados empíricos.

A Figura 44 ilustra as imagens extraídas do *software* para a superfície variométrica e ajuste dos dados ao modelo exponencial escolhido.

Figura 44. Superfície variométrica e ajuste ao modelo exponencial - cota do impenetrável à percussão



Fonte: Elaborado pela autora (2017).

Os valores em azul e verde da superfície variométrica da Figura 44 indicam uma menor variabilidade dos dados na direção N-S e maior variabilidade na direção NE-SW, representada pelas cores laranja e vermelho.

No entanto, os variogramas simulados nestas direções não apresentaram diferenças significativas para o variograma omnidirecional, validando a utilização deste no modelo adotado.

Conforme exposto na seção 4.6, a representação da superfície do impenetrável à percussão em relação à profundidade partiu das cotas obtidas na krigagem ordinária e foram subtraídas das cotas do terreno. Novas interpolações para esta variável foram desenvolvidas através do interpolador Inverso Ponderado da Distância (IDW).

Os mapas da Figura 45 ilustram as estimativas do impenetrável em termos de cota (a), profundidade (c) e o desvio padrão das estimativas (b).

Através da Figura 45c, verifica-se que a profundidade do impenetrável é menor e se localiza mais próximo da superfície do terreno nas regiões em tons marrons, as quais não seguem uma tendência quanto à sua localização, pois ora estão em áreas de cotas mais baixas, ora em áreas de cotas elevadas. Nota-se, no entanto que no entorno das áreas com maior agrupamento de sondagens o impenetrável tende a ser mais raso que nas áreas com menos sondagens disponíveis.

As menores profundidades verificam-se nas regiões Leste e Norte da bacia, sobrepondo-se às unidades sedimentares identificadas como Solos de Mangue, Gleis e Aluviais.

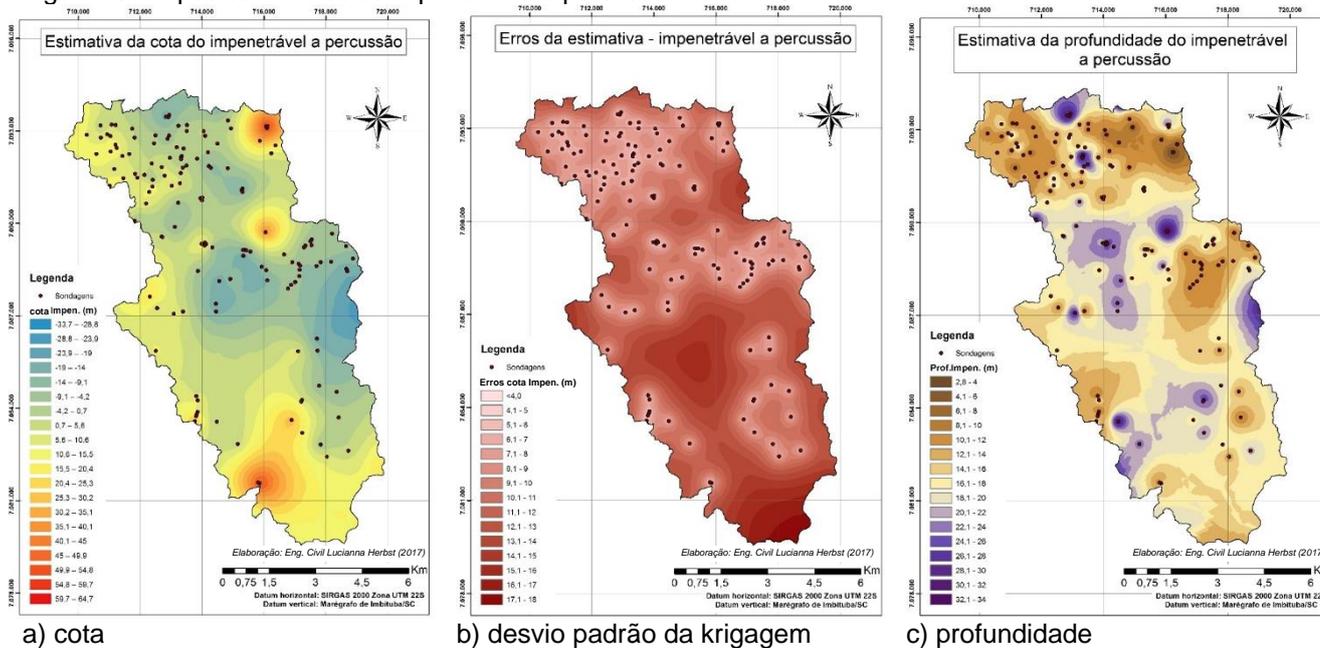
As maiores profundidades do impenetrável estão localizadas de forma heterogênea na bacia e concentram-se em áreas de cotas mais elevadas, sobrepondo-se às unidades residuais identificadas como Cambissolos, Podzólicos e Solos Litólicos. Tais observações corroboram com os resultados obtidos nas análises estatísticas.

A Figura 45a apresenta o mapa da cota do impenetrável à percussão, no qual verifica-se que a porção centro-leste possui as menores cotas de impenetrável, situadas abaixo do nível do mar.

Através da Figura 45b é possível notar que os erros associados às estimativas são maiores nas áreas mais escuras, menos densas de sondagens. As áreas que apresentam um agrupamento maior de sondagens no seu entorno indicam estimativas mais precisas, com menor desvio padrão, representadas pelas cores claras no mapa.

É importante destacar também que nas áreas de maiores altitudes o impenetrável encontra-se em uma profundidade intermediária, entre 15,0m e 20,0m.

Figura 45. Mapas estimativos do impenetrável à percussão na BHRC



Fonte: Elaborado pela autora (2017).

5.3.3 Estimativas de Isovalores N_{SPT} ao Longo da Profundidade

As análises foram desenvolvidas aplicando-se a técnica de krigagem ordinária aos dados das 284 sondagens selecionadas, iniciando-se a 2,0m de profundidade e finalizando a 20,0m. Procurou-se simular ajustes aos três variogramas teóricos que explicam a maioria dos fenômenos espaciais: esférico, exponencial e gaussiano. No entanto, o variograma gaussiano apresentou muitas discrepâncias e não foi possível a obtenção de bons resultados, válidos em termos de possibilidade de comparativo com os demais modelos. Assim, foram realizados ajustes apenas para os modelos esférico e exponencial.

Os comparativos foram realizados inicialmente para a profundidade de 2,0m. O melhor modelo de variograma teórico obtido para esta profundidade foi replicado nas profundidades 4, 6, 8, 10, 12, 15 e 20,0m por caracterizarem o mesmo fenômeno físico em um mesmo arranjo espacial.

Apesar de os mapas elaborados apresentarem os isovalores da resistência N_{SPT} a cada 2,0m de profundidade, é possível que os mapas das estimativas e seus erros sejam também desenvolvidos para qualquer profundidade desejada, conforme interesse.

A Tabela 23 apresenta o resumo dos principais parâmetros geoestatísticos e validação cruzada derivados das simulações realizadas com ajustes aos dois variogramas teóricos principais citados anteriormente.

Ressalta-se que inúmeras simulações foram realizadas variando-se os *lags* (espaçamento teórico entre as amostras), as direções e ângulos de abertura das varreduras, em condições de isotropia ou anisotropia. Entretanto, estão apresentados apenas os melhores resultados obtidos para cada modelo teórico. A comparação entre estes resultados condicionou a escolha do melhor ajuste que subsidiou as interpolações por krigagem ordinária.

Tabela 23. Parâmetros geoestatísticos e validação cruzada dos modelos simulados - variável resistência N_{SPT} ao longo da profundidade

Profundidade	H=2m	H=2m	H=4m	H=6m	H=8m	H=10m	H=12m	H=15m	H=20m
Modelo Teórico	Esfér.	Expon.							
Lag	220	220	423	78	107	455	129	130	95
Nº de lags	12	12	12	12	12	12	12	12	12
Anisotropia?	Não								
Direção	Omni.								
Abertura	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Alcance (a)	1.316,0	2.124,0	5.076,0	939,0	1.287,0	3.783,0	1.551,0	1.559,0	1.143,0
Efeito pepita (C_0)	9,75	9,90	32,66	51,30	71,12	137,27	185,81	176,45	112,16
Patamar ($C+C_0$)	21,59	22,76	82,13	81,78	141,58	229,60	332,74	306,24	206,59
Dependência espacial [$C_0/(C+C_0)$ x100%	45,2% (Moder.)	43,5% (Moder.)	39,8% (Moder.)	62,7% (Moder.)	50,2% (Moder.)	59,8% (Moder.)	55,8% (Moder.)	57,6% (Moder.)	54,3% (Moder.)
Validação Cruzada									
Erro Médio (ME)	0,0518	0,0256	0,0081	-0,0504	0,0068	0,0558	0,1504	0,0757	-0,0974

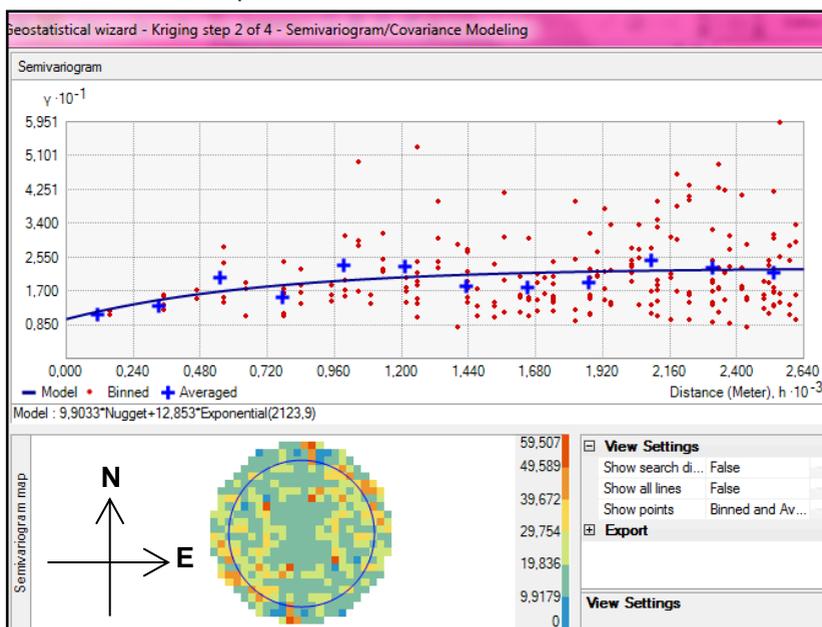
Profundidade	H=2m	H=2m	H=4m	H=6m	H=8m	H=10m	H=12m	H=15m	H=20m
Erro Médio Quadrático (RMSE)	4,2914	4,2874	7,9459	9,3046	11,8328	14,3983	17,4778	16,7209	13,2736
Erro Padrão Médio (ASE)	4,0213	4,0913	6,9106	8,9013	11,0196	13,4349	17,0112	16,4182	13,6742
Erro Médio Normalizado (MSE)	0,0086	0,0023	0,0014	-0,0065	0,0004	0,0052	0,0068	0,0037	-0,0059
Erro Médio Quadrático Normalizado (RMSSE)	1,0699	1,0511	1,1483	1,0449	1,0691	1,0649	1,0283	1,0148	0,9704

Fonte: Elaborado pela autora (2017).

A partir da Tabela 23 e tomando-se como base os critérios para seleção dos melhores modelos ajustados, conclui-se que dentre os dois modelos teóricos simulados, o exponencial é o que apresenta o melhor ajuste aos dados empíricos.

Devido à representatividade dos dados, a Figura 46 ilustra a superfície variométrica e ajuste dos dados ao modelo exponencial escolhido apenas para a profundidade de 2,0m.

Figura 46. Superfície variométrica e ajuste ao modelo exponencial - resistência N_{SPT} na profundidade 2,0m.



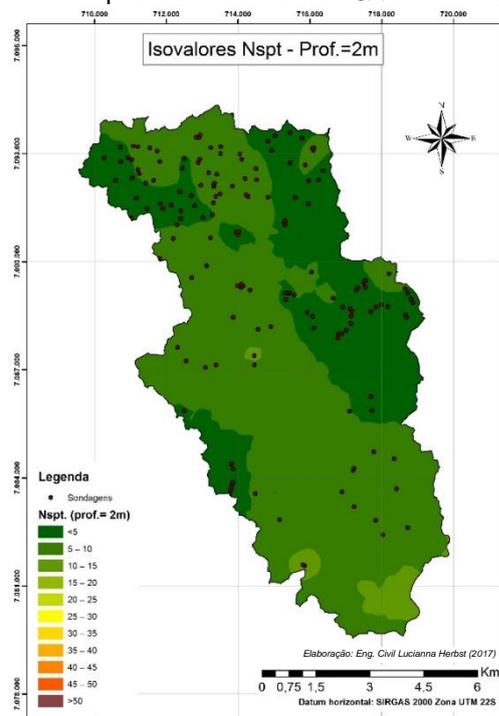
Fonte: Elaborado pela autora (2017).

Os valores em azul e verde da superfície variométrica da Figura 46 indicam uma menor variabilidade dos dados na direção N-S e maior variabilidade na direção E-W, representada pelas cores laranja e vermelho.

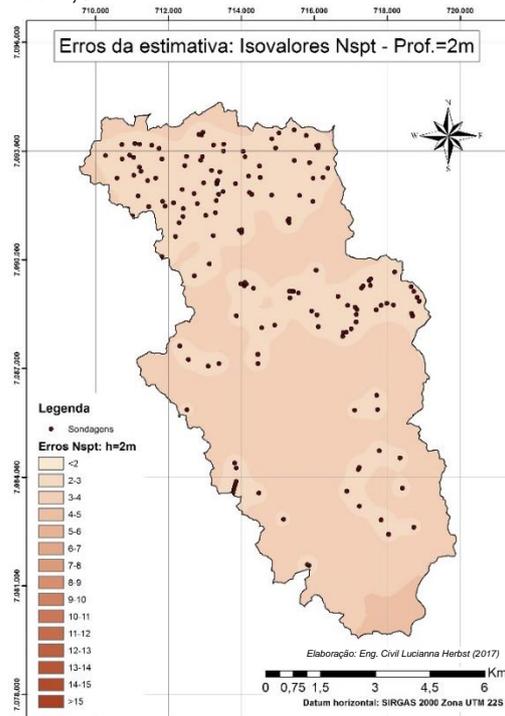
No entanto, os variogramas simulados nestas direções não apresentaram diferenças significativas para o variograma omnidirecional, validando a utilização deste no modelo adotado.

Os mapas apresentados nas Figuras 47 a 54 ilustram as estimativas de isovalores N_{SPT} associadas ao seu respectivo desvio padrão.

Figura 47. Mapas estimativos do N_{SPT} na BHRC na profundidade 2,0m

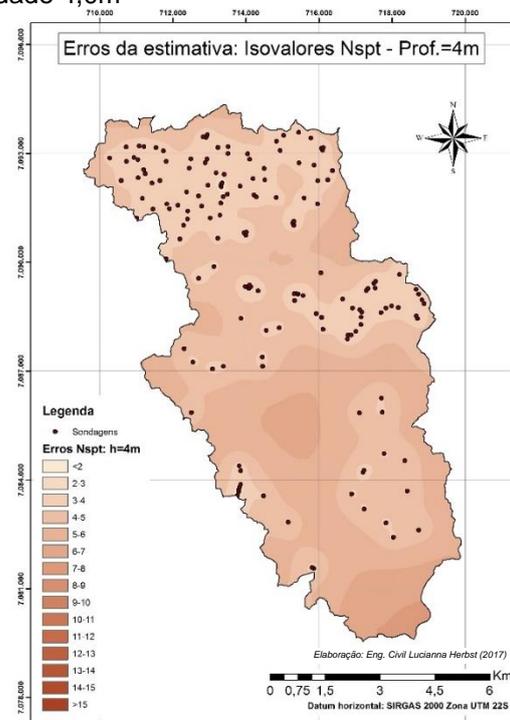
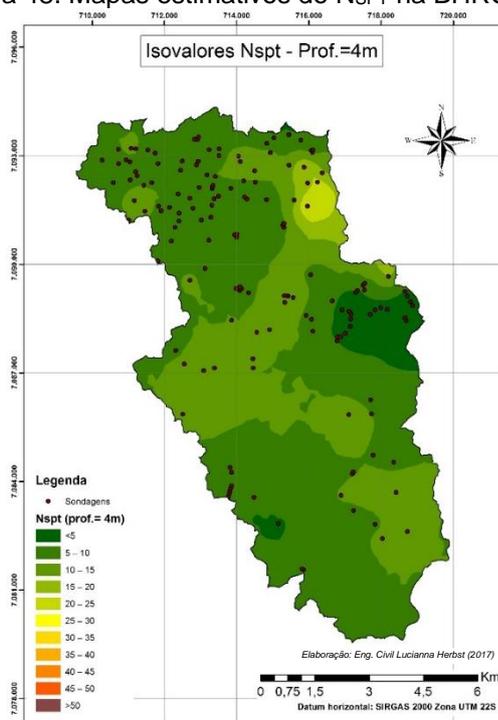


a) estimativa
Fonte: Elaborado pela autora (2017).



b) desvio padrão da krigagem

Figura 48. Mapas estimativos do N_{SPT} na BHRC na profundidade 4,0m

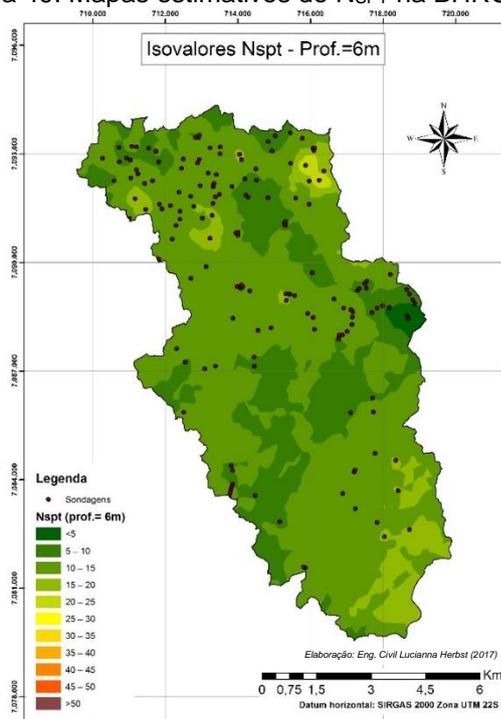


a) estimativa

Fonte: Elaborado pela autora (2017).

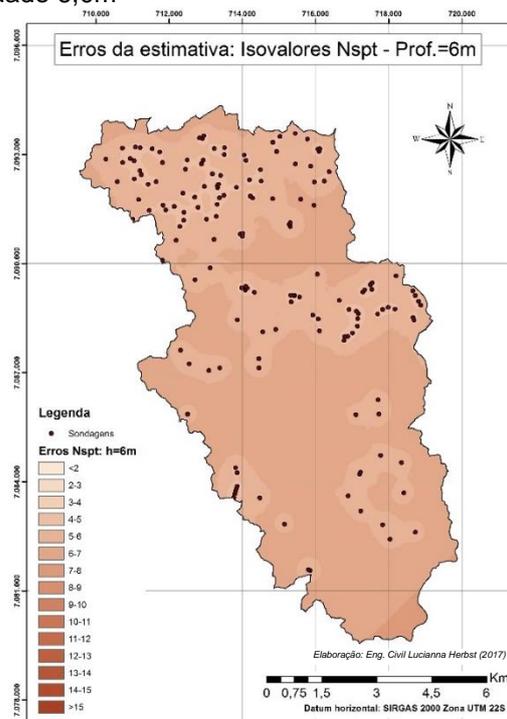
b) desvio padrão da krigagem

Figura 49. Mapas estimativos do N_{SPT} na BHRC na profundidade 6,0m



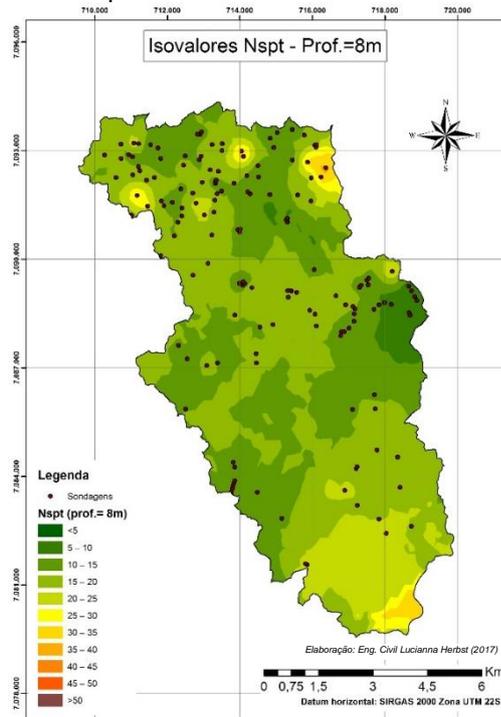
a) estimativa

Fonte: Elaborado pela autora (2017).



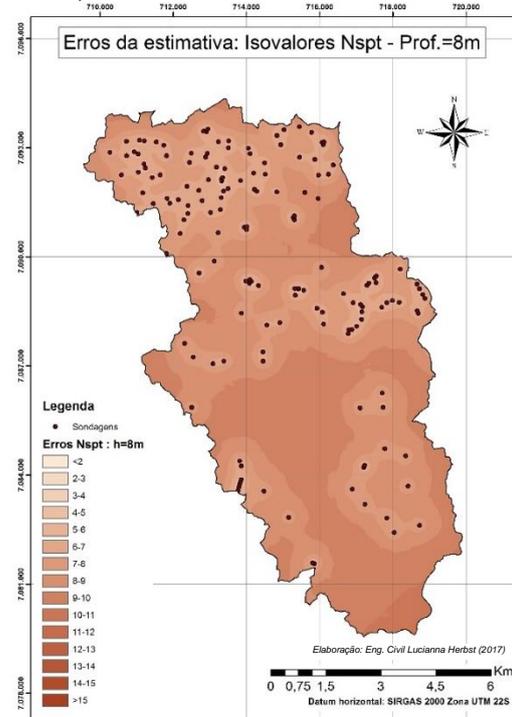
b) desvio padrão da krigagem

Figura 50. Mapas estimativos do N_{SPT} na BHRC na profundidade 8,0m



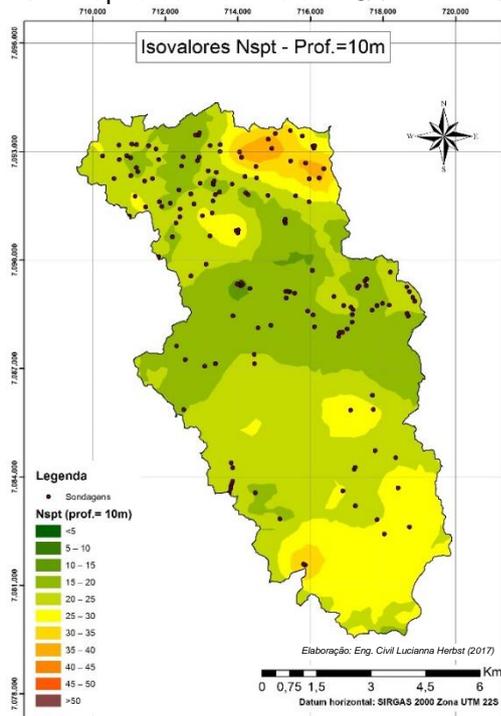
a) estimativa

Fonte: Elaborado pela autora (2017).

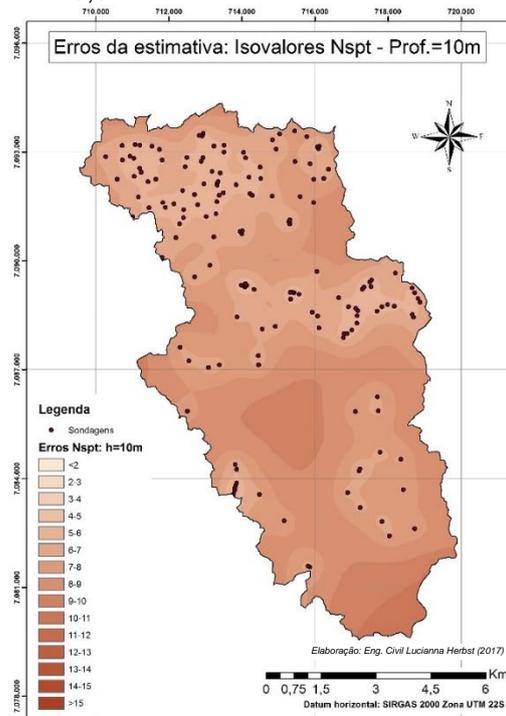


b) desvio padrão da krigagem

Figura 51. Mapas estimativos do N_{SPT} na BHRC na profundidade 10,0m

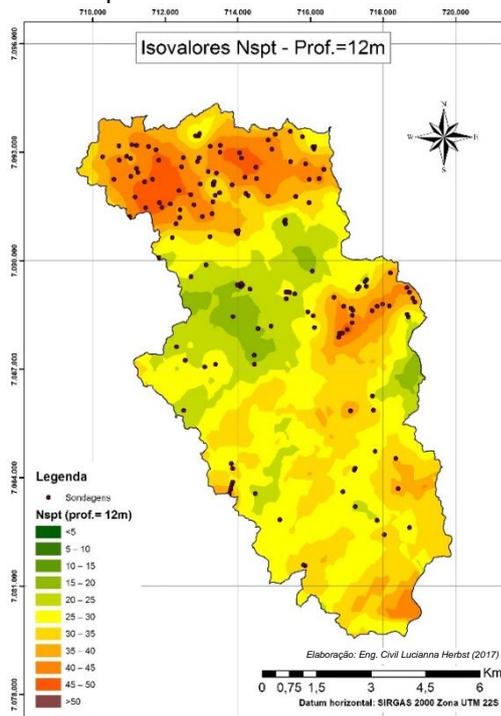


a) estimativa
Fonte: Elaborado pela autora (2017).

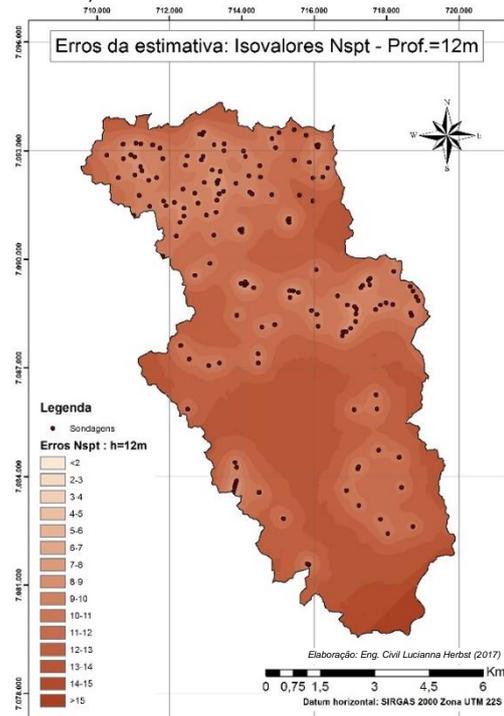


b) desvio padrão da krigagem

Figura 52. Mapas estimativos do N_{SPT} na BHRC na profundidade 12,0m

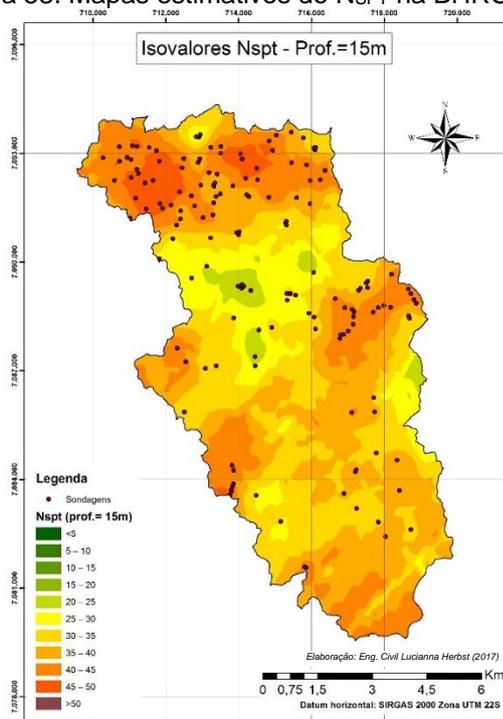


a) estimativa
Fonte: Elaborado pela autora (2017).



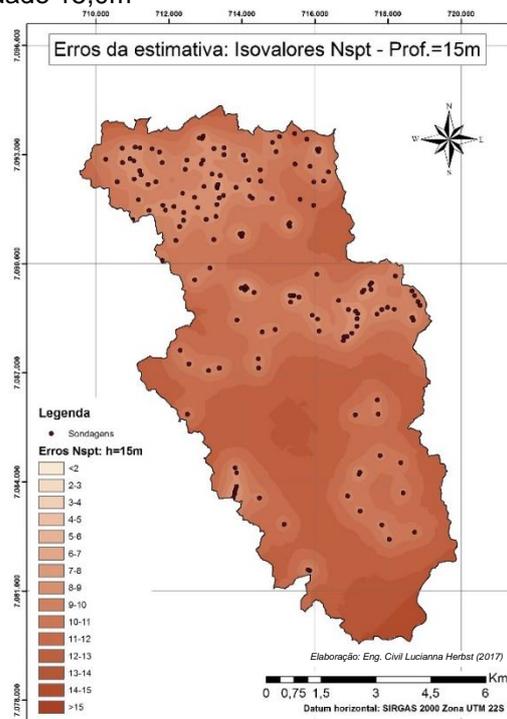
b) desvio padrão da krigagem

Figura 53. Mapas estimativos do N_{SPT} na BHRC na profundidade 15,0m



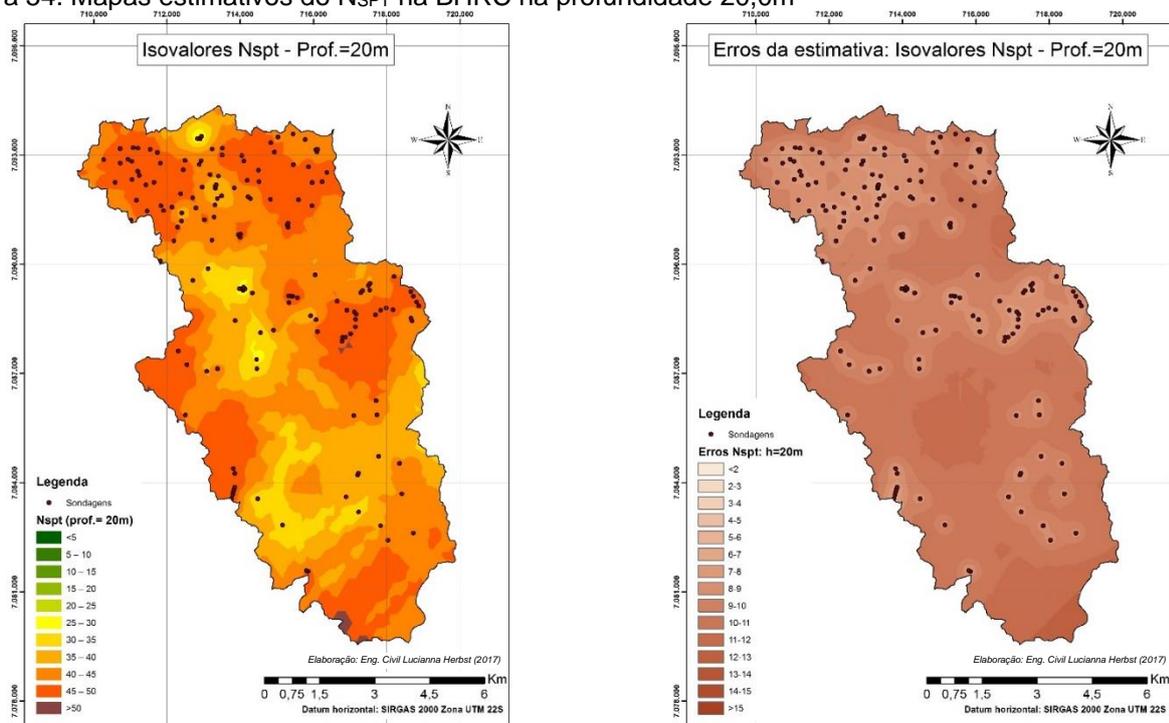
a) estimativa

Fonte: Elaborado pela autora (2017).



b) desvio padrão da krigagem

Figura 54. Mapas estimativos do N_{SPT} na BHRC na profundidade 20,0m



a) estimativa

Fonte: Elaborado pela autora (2017).

b) desvio padrão da krigagem

É possível perceber, por análise visual da Figura 47, que a 2,0m de profundidade há predominância de baixos valores do N_{SPT} em toda a área da BHRC, em geral menores que 10 golpes, e que os menores valores se concentram na porção Leste da bacia, nas proximidades com a Baía da Babitonga e foz do Rio Cachoeira. Os erros associados às estimativas variam entre 2 e 5 golpes, conforme densidade de sondagens no entorno (maiores erros associados a menor densidade de pontos amostrais).

Na profundidade 4,0m, de maneira geral houve um acréscimo da resistência N_{SPT} com o avanço da profundidade, visualmente observado na Figura 48. Apenas uma pequena área da porção Sul da bacia apresentou valores menores do N_{SPT} a 4,0m em relação aos valores observados para 2,0m de profundidade. Os menores valores de resistência continuam concentrados na porção Leste da bacia, nas proximidades com a Baía da Babitonga, em área de ocorrência de Solos de Mangue. A porção Nordeste da bacia apresentou a primeira área a apresentar valores mais altos para esta profundidade, entre 15 e 25 golpes.

A 6,0m e a 8,0 de profundidade, conforme contraste visual da Figura 49 e Figura 50, é possível perceber o avanço da resistência N_{SPT} em toda a área da bacia. Poucas e pequenas áreas apresentaram um decréscimo de valores, em geral associadas a depósitos confinados de solos tipo Glei. As porções Norte e Nordeste da bacia apresentam os valores mais altos de resistência nestas profundidades, entre 15 e 40 golpes, associadas a áreas de altitudes mais elevadas e presença de solos residuais. A porção Sul começou a apresentar áreas com resistência acima de 20 golpes. Os valores mínimos de N_{SPT} equivalem à faixa entre 5 e 10 golpes, na profundidade 8,0m.

Nas profundidades 10,0m e 12,0m observa-se ainda a ocorrência do acréscimo da resistência N_{SPT} com o avanço da profundidade, conforme observado nas Figura 51 e Figura 52. Este acréscimo se dá entre as bordas externas limítrofes da bacia em direção às áreas centrais. As porções Norte e Leste da bacia apresentam os valores mais altos de resistência a 12,0m de profundidade, entre 30 e 50 golpes.

Uma estabilização de elevados valores do N_{SPT} se inicia a 15,0m, conforme análise visual da Figura 53, e avança de forma linear entre as áreas externas da bacia, de cotas mais elevadas, em direção às áreas centrais, de cotas mais baixas e relevo plano até a profundidade 20,0m. A última área a apresentar aumento na resistência do solo, em termos de N_{SPT} , é a região Centro-Oeste, com valores que evoluem da faixa de 20 a 25 golpes para valores entre 35 e 40 golpes na profundidade 20,0m.

De forma geral, é notável o crescimento das áreas com maior N_{SPT} conforme há o avanço em profundidade. Este comportamento do ganho de resistência do solo com o aumento da profundidade é esperado para solos residuais. Os solos sedimentares podem apresentar valores variáveis devido às possíveis intercalações de camadas no solo, tais como a presença de lentes arenosas e de cascalhos.

Os solos de menores resistências reduzem sua participação nas camadas mais profundas a partir de 12,0m, até o momento em que não são mais observados na BHRC.

5.3.4 Resumos Geoestatísticos dos Mapas Temáticos

As Tabelas 24, 25 e 26 apresentam os resumos das principais informações extraídas da manipulação dos *rasters* das krigagens que originaram os mapas de estimativas apresentados anteriormente, correlacionando-as com as unidades geológicas, pedológicas e geotécnicas da BHRC. A Figura 55 ilustra o perfil da resistência N_{SPT} ao longo da profundidade nas unidades geotécnicas.

Tais dados auxiliaram na caracterização das unidades geotécnicas da BHRC e elaboração dos perfis estratigráficos das mesmas, a serem apresentados na seção 5.4.

Tabela 24. Resumo da análise geoestatística *versus* mapa geológico

Unidade geológica	Prof. média impenetrável (m)	Prof. média NA (m)
A4PP2gla	16,6	6,3
A4PP2la	16,9	6,7
Q2a	16,5	4,9
Q2ma	15,1	2,7
Q2pm	16,8	1,8

Fonte: Elaborado pela autora (2017).

Tabela 25. Resumo da análise geoestatística *versus* mapa pedológico

Unidade pedológica	Prof. média impenetrável (m)	Prof. média NA (m)
CXa1	13,8	3,4
CXd1	17,2	6,9
CXd2	21,2	4,3
CXd4	15,3	2,6
CXd8	22,7	15,8
CYd+GXd	16,3	4,8
GXd1	15,8	5,3
Mg	15,0	2,2
NVdf1	16,7	14,2
PAd1	16,7	7,0
PAd3	17,0	3,9
PAd6	20,8	4,2
PAd8	14,2	4,9
RLd4	16,3	5,7
RQg3	27,5	1,4

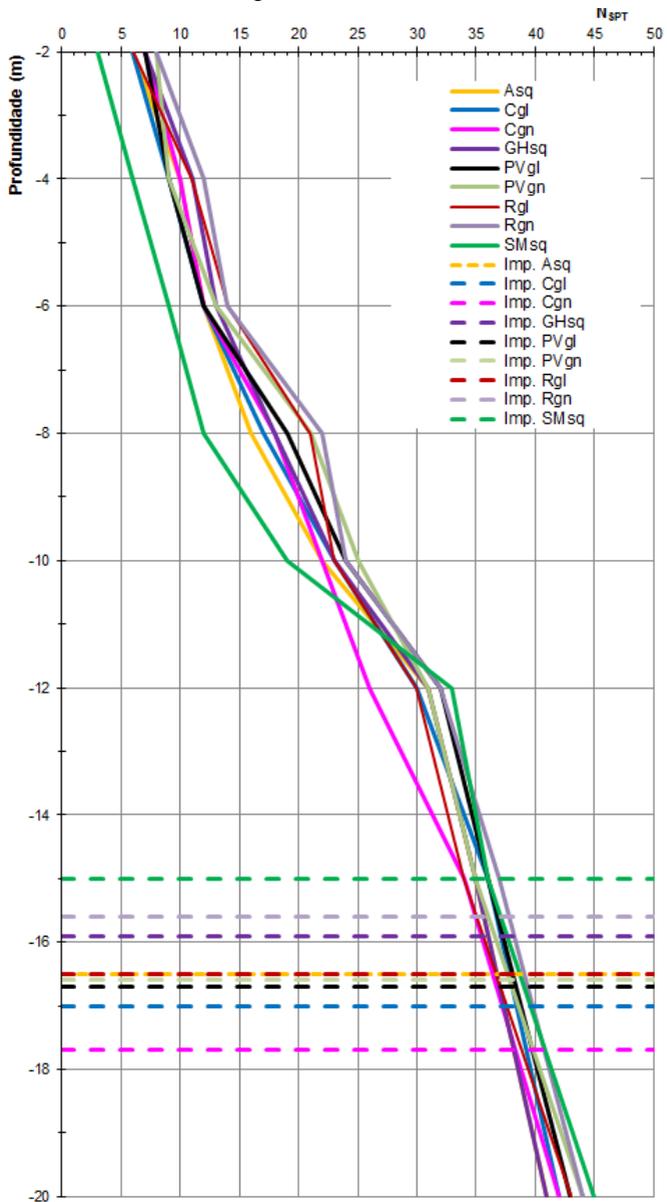
Fonte: Elaborado pela autora (2017).

Tabela 26. Resumo da análise geoestatística *versus* mapa geotécnico

Unidade geotécnica	Asq	Cgl	Cgn	GHsq	PVgl	PVgn	Rgl	Rgn	SMSq
Descrição	Solo Aluvial subst. sed. quat.	Cambiss. subst. granulito	Cambiss. subst. gnaissé	Solo Glei subst. sed. quat.	Podzólico Vermelho-Amarelo subst. granulito	Podzólico Vermelho-Amarelo subst. gnaissé	Solo Litólico subst. granulito	Solo Litólico subst. gnaissé	Solos de Mangue subst. sed. quat.
Prof. média impenetrável (m)	16,5	17	17,7	15,9	16,7	16,6	16,5	15,6	15
Prof. média NA (m)	4,9	6,7	7,1	5,4	7	6,5	5,8	5,6	2,2
N_{SPT} médio									
Prof.=2m	6	6	7	7	7	8	6	8	3
Prof.=4m	10	9	10	11	9	9	11	12	6
Prof.=6m	12	12	12	13	12	13	14	14	9
Prof.=8m	16	17	18	18	19	21	21	22	12
Prof.=10m	22	23	22	23	24	25	23	24	19
Prof.=12m	31	30	26	31	32	31	30	32	33
Prof.=15m	35	36	34	35	36	35	34	37	36
Prof.=20m	41	42	42	41	43	44	43	44	45

Fonte: Elaborado pela autora (2017).

Figura 55. Perfil geostatístico da resistência N_{SPT} versus profundidade nas unidades geotécnicas



Fonte: Elaborado pela autora (2017).

Verificou-se que as estimativas quanto à profundidade do nível d'água não se mostraram coerentes com os resultados indicados pela estatística clássica. Assim, confrontou-se o mapa de estimativas com o nível d'água informado nos boletins das sondagens SPT da área, de forma a realizar uma validação independente dos dados. Notou-se uma razoável majoração nas profundidades estimadas para o nível d'água, possivelmente devido à irregularidade da distribuição espacial dos dados e a não consideração da sazonalidade (período secos *versus* períodos chuvosos) nas interpolações.

Quanto às estimativas referentes à profundidade do impenetrável, observaram-se pequenas discrepâncias em relação às médias obtidas através da estatística clássica.

Em relação à resistência N_{SPT} dos solos ao longo da profundidade, os valores estimados pela geoestatística se mostraram corroboraram com os verificados pela estatística clássica.

5.4 DESCRIÇÃO DAS UNIDADES GEOTÉCNICAS E PERFIS ESTRATIGRÁFICOS GENÉRICOS

Através das informações extraídas das análises geoestatísticas e propriedades físicas dos solos observados em campo, bem como através da experiência prática da autora em diversos estudos realizados na área da BHRC, foram elaborados perfis genéricos representativos das unidades geotécnicas em termos de profundidade do nível d'água, profundidade do impenetrável à percussão e resistência N_{SPT} ao longo da profundidade.

Tais interpretações visam à aplicação prática e de linguagem acessível do mapeamento geotécnico à realidade do engenheiro, pois derivam da associação entre a pedologia e a geologia da área com as tradicionais informações obtidas em sondagens SPT e que permitem extrair dados essenciais para caracterização básica dos universos geotécnicos da BHRC, tal qual exposto por Thiesen (2016).

As estimativas geradas através da aplicação das ferramentas geoestatísticas proporcionou que todas as unidades geotécnicas pudessem ser caracterizadas, por mais que nem todas apresentassem uma boa quantidade de sondagens representando-as conforme exposto na Tabela 20, em que se tem apenas 1 sondagem sobreposta à unidade geotécnica Cgl, 2 sondagens na unidade GHsq, 3 sondagens na unidade Rgl e 4 sondagens na unidade PVgl.

5.4.1 Solos Litólicos Rgn/Rgl (Substrato Gnaisse/Granulito)

Os solos destas unidades semelhantes caracterizam-se por não apresentar o horizonte B, com sequência de horizontes A/C/R ou A/R, o que possui relação direta com o relevo forte ondulado (entre 31 e 35% de declividade) e altitudes médias entre 86,0m e 118,0m.

São solos bem drenados e ocorrem associados a afloramentos rochosos. A cor dominante é vermelho amarelado, com textura argilosa cascalhenta. Deste modo, tal configuração denota um cenário onde os riscos de erosão e de deslizamentos são significativos.

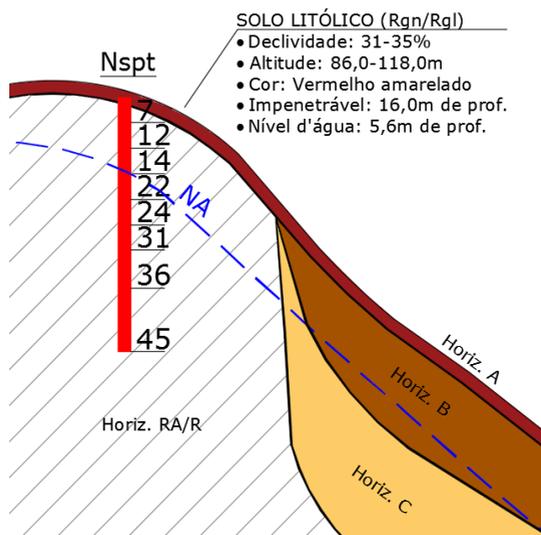
Na BHRC, os solos destas unidades são observados na zona sul (bairro Itinga) e em porções das zonas leste e nordeste (bairros Boa Vista, Saguazu, Iriú e Bom Retiro).

A profundidade média do impenetrável à percussão verifica-se a 16,0m e o nível d'água médio, a 5,6m.

Quanto à resistência N_{SPT} , esta é crescente com a profundidade e apresenta valores entre 7-14 golpes até 6,0m; 14-24 entre 6,0m e 10,0m e 24-44 golpes entre 10,0m e 20,0m de profundidade.

A Figura 56 ilustra o perfil estratigráfico típico das unidades Rgn e Rgl.

Figura 56. Perfil estratigráfico genérico dos Solos Litólicos Rgn/Rgl (substrato gnaisse/granulito)



Fonte: Elaborado pela autora (2017).

5.4.2 Solos Podzólicos Vermelho-Amarelos PVgn/PVgl (Subst. Gnaisse/Granulito)

Os solos destas unidades são semelhantes, minerais, não hidromórficos, bem drenados, não pedregosos e/ou rochosos, medianamente profundos e visualiza-se na área de estudo uma sequência típica de horizontes A/Bt/C. Na BHRC, ocorrem predominantemente em locais de meia encosta, de relevo fortemente ondulado (aproximadamente 25% de declividade) e em altitudes médias entre 79,0m e 98,0m.

A cor dominante é bruno amarelada, e a experiência prática em estudos realizados nestas unidades aponta para solos siltsos nos horizontes B e C. No entanto, o horizonte B normalmente apresenta-se mais argiloso que o horizonte C.

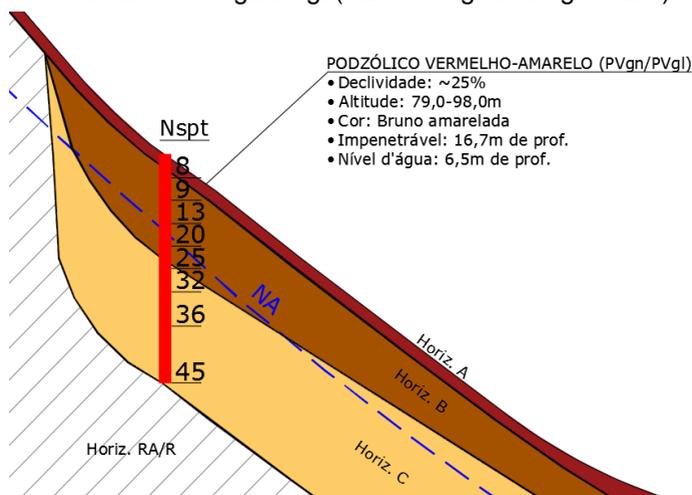
A presença de um gradiente textural associado ao relevo fortemente ondulado sugere uma alta suscetibilidade à erosão deste solo.

Na BHRC, os solos destas unidades são observados em cotas mais baixas adjacentes aos Solos Litólicos das zonas Sul, Leste e Nordeste, bem como em diversas outras pequenas porções localizadas nas zonas Sudeste, Sudoeste, Noroeste e Norte.

A profundidade média do impenetrável à percussão verifica-se a 16,7m e o nível d'água médio, a 6,5m. Quanto à resistência N_{SPT} , esta é crescente com a profundidade e apresenta valores entre 8-13 golpes até 6,0m; 13-25 entre 6,0m e 10,0m e 25-44 golpes entre 10,0m e 20,0m de profundidade.

A Figura 57 ilustra o perfil estratigráfico típico das unidades PVgn e PVgl.

Figura 57. Perfil estratigráfico genérico dos Solos Podzólicos Vermelho-Amarelos PVgn/PVgl (substrato gnaisse/granulito)



Fonte: Elaborado pela autora (2017).

5.4.3 Cambissolos Cgn/Cgl (Substrato Gnaisse/Granulito)

Estas unidades muito se assemelham aos Solos Podzólicos pois também se localizam a meia encosta, em relevo fortemente ondulado (aproximadamente 23% de declividade, menos acentuada que nos Podzólicos) e em altitudes médias entre 81,0m

e 86,0m. A principal diferença para os Podzólicos é que nos Cambissolos o horizonte B é menos evoluído, apresentando espessuras menores.

São solos minerais, não hidromórficos, bem drenados, não pedregosos e/ou rochosos, pouco profundos a profundos e verifica-se comumente na área a sequência de horizontes A/Bi/C. Morfologicamente são solos jovens, com desenvolvimento pedogenético em evolução e por isso denominados de solos com horizonte B incipiente (horizonte Bi).

Os Cambissolos de substrato granulito (Cgl) predominam como os solos residuais mais representativos na BHRC e se destacam como a transição para os solos sedimentares presentes nas cotas mais baixas.

Os Cambissolos de substrato gnaiss (Cgn) são esparsos e, quando ocorrem, localizam-se sempre nas maiores altitudes verificadas na área da BHRC, a exemplo da zona Sul e pequenas porções da zona Oeste. Destacam-se, em geral, como a transição entre os Solos Podzólicos e os Cambissolos de substrato granulito.

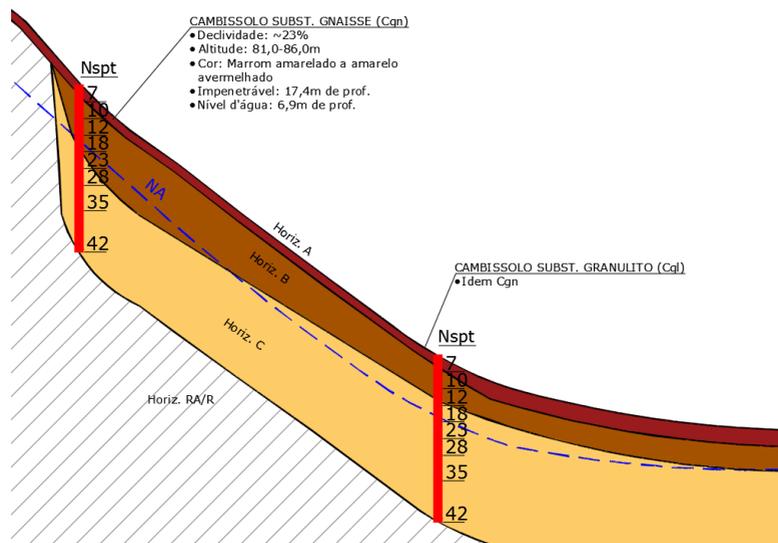
A cor marrom-amarelada é comum nos horizontes próximos à superfície e, à medida que se aprofunda no perfil, dominam as cores amarelo avermelhadas.

A profundidade média do impenetrável à percussão verifica-se a 17,4m e o nível d'água médio, a 6,9m.

Quanto à resistência N_{SPT} , esta é crescente com a profundidade e apresenta valores entre 7-12 golpes até 6,0m; 12-23 entre 6,0m e 10,0m e 23-42 golpes entre 10,0m e 20,0m de profundidade.

A Figura 58 ilustra o perfil estratigráfico típico das unidades Cgn e Cgl.

Figura 58. Perfil estratigráfico genérico dos Cambissolos Cgn/Cgl (substrato gnaisse/granulito)



Fonte: Elaborado pela autora (2017).

5.4.4 Solos Aluviais Asq (Substrato Sedimentos Quaternários)

Os Solos Aluviais na BHRC se referem a uma cobertura pedológica bastante descaracterizada pela ação antrópica. Apresentam-se medianamente profundos verifica-se comumente na área a sequência de horizontes A/Bi/C.

Na BHRC, ocorrem nas áreas de relevo plano a suavemente ondulado (em média 5% de declividade) e em altitudes baixas, entre 1,0m e 38,0m (média de 11,0m).

A textura geralmente é argilo-siltosa. Normalmente são visualizadas cores claras e acinzentadas nos horizontes superficiais, seguidas por camadas de cores quentes como o marrom avermelhado.

É comum encontrar-se camadas superficiais com características de gleização. A área apresenta riscos constantes de inundação.

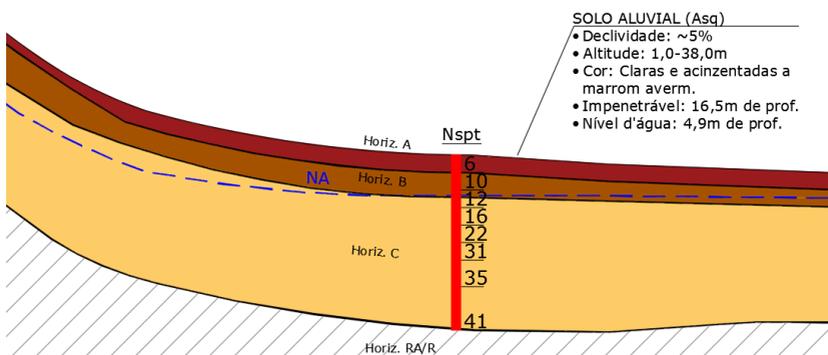
Nas bases de encostas, podem ser encontrados solos de comportamento residual sobrepostos aos sedimentos quaternários de seu substrato, originados da movimentação dos solos residuais nas áreas mais altas e que sofreram processos de instabilidades.

A profundidade média do impenetrável à percussão verifica-se a 16,5m e o nível d'água médio, a 4,9m.

Quanto à resistência N_{SPT} , esta é crescente com a profundidade e apresenta valores entre 6-12 golpes até 6,0m; 12-22 entre 6,0m e 10,0m e 22-41 golpes entre 10,0m e 20,0m de profundidade.

A Figura 59 ilustra o perfil estratigráfico típico da unidade Asq.

Figura 59. Perfil estratigráfico genérico dos Solos Aluviais Asq (substrato sedimentos quaternários)



Fonte: Elaborado pela autora (2017).

5.4.5 Solo Gleí GHsq (Substrato Sedimentos Quaternários)

Os solos tipo Gleí são minerais, hidromórficos e muito mal drenados.

Na BHRC, ocorrem nas áreas de relevo plano (em média 2% de declividade) e em altitudes baixas, entre 4,0m e 16,0m (média de 8,0m).

Verifica-se a predominância de cores cinza e cinza escura, podendo apresentar mosqueados com tons marrons ou amarelados.

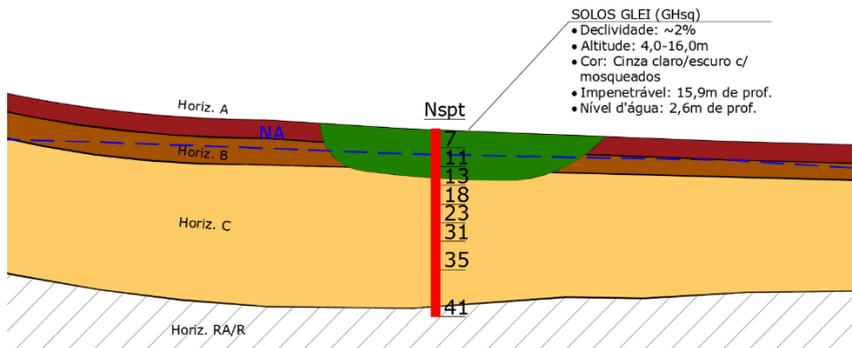
A textura é argilosa, de consistência bastante plástica quando saturados. É comum encontrarem-se algumas áreas com solos de textura arenosa.

A profundidade média do impenetrável à percussão verifica-se a 15,9m e o nível d'água médio, a 5,4m. Ressalta-se que este valor é discrepante em relação ao valor médio obtido pela estatística clássica, que indica profundidade média de 2,6m.

A resistência N_{SPT} é crescente com a profundidade e apresenta valores entre 7-13 golpes até 6,0m; 13-23 entre 6,0m e 10,0m e 23-41 golpes entre 10,0m e 20,0m de profundidade.

A Figura 60 ilustra o perfil estratigráfico típico da unidade GHsq.

Figura 60. Perfil estratigráfico genérico do Solo Gleí GHsq (substrato sedimentos quaternários)



Fonte: Elaborado pela autora (2017).

5.4.6 Solos de Mangue SMSq (Substrato Sedimentos Quaternários)

Os manguezais dentro da BHRC têm ocorrência na região estuarina da Baía da Babitonga, próximo à foz do Rio Cachoeira.

Ocorrem em relevo plano (em média 0,9% de declividade), de altitudes baixas, entre 0,0m e 10,0m (média de 1,8m), em condições de má drenagem, constantemente úmido ou alagado e possuem grande salinidade pois estão diretamente ligados aos efeitos das marés.

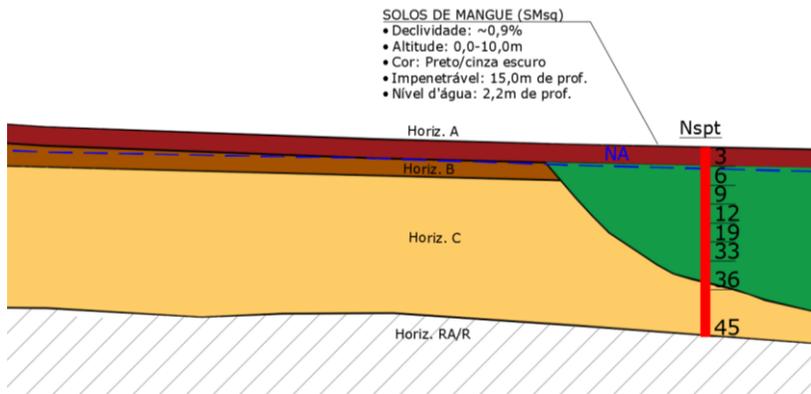
Verifica-se a predominância de cores que tendem ao preto e cinza escuro, de consistência “pastosa”.

A profundidade média do impenetrável à percussão verifica-se a 15,0m e o nível d'água médio, a 2,2m.

Quanto à resistência N_{SPT} , apresenta valores baixos nas camadas iniciais (3-6 golpes até 5,0m) e é crescente com a profundidade, com valores entre 6-19 golpes entre 5,0m e 10,0m e 19-45 golpes entre 10,0m e 20,0m.

A Figura 61 ilustra o perfil estratigráfico típico da unidade SMSq.

Figura 61. Perfil estratigráfico genérico dos Solos de Mangue SMSq (substrato sedimentos quaternários)



Fonte: Elaborado pela autora (2017).

6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA ESTUDOS FUTUROS

Este capítulo apresenta as conclusões do trabalho quanto aos resultados obtidos e sua relação com os objetivos propostos, bem como apresenta sugestões para continuidade do tema em possíveis estudos posteriores.

6.1 PRINCIPAIS CONCLUSÕES

As atividades desenvolvidas ao longo da pesquisa possibilitaram a confecção de mapas de estimativas das profundidades do nível d'água e do impenetrável à percussão e também da resistência N_{SPT} dos solos ao longo de sua profundidade na área da bacia hidrográfica do Rio Cachoeira, município de Joinville/SC. Tais estimativas foram associadas à quantificação e espacialização de seus erros, possibilitadas através da execução de interpolações geoestatísticas pelo método da krigagem ordinária em dados provenientes de 284 boletins de sondagens SPT oriundos de um banco de dados total com 700 furos de sondagens SPT realizadas na área, georreferenciados e estruturados em um software SIG. Este banco de dados geológico-geotécnicos permitiu uma melhor compreensão do relevo e da geotecnia da área de estudo.

A execução das rotinas geoestatísticas através de ferramentas disponibilizadas no *software* SIG utilizado mostrou-se de caráter prático e eficiente, pois permitiu que todas as operações fossem realizadas de maneira relativamente rápida e integradas ao banco de dados e mapas temáticos, sem que se tornasse necessária a utilização de outros *softwares* associados para finalização das etapas pertinentes ao processo de modelagem geoestatística. Não se objetivou nesta pesquisa a realização de um trabalho puramente geoestatístico, com aprofundamentos no método, contudo as análises realizadas no software, além de concisas, não desrespeitaram os parâmetros básicos do método utilizado.

Os mapas com as estimativas citadas anteriormente foram relacionados ao mapa geotécnico da área, elaborado através da metodologia de mapeamento proposta por Davison Dias (1995), a qual consiste na confecção de um mapa de unidades geotécnicas

obtidas através do cruzamento de informações provenientes dos mapas geológico e pedológico da área de estudo. Tais unidades foram ajustadas através de informações do relevo como altimetria e declividade, de forma a refinar os seus limites geográficos e melhorar o nível de detalhamento das mesmas. A aplicação desta metodologia forneceu bons resultados em termos de comparação entre o mapeamento elaborado e dados de campo, resultando na definição de 9 unidades geotécnicas na área: Asq (Solo Aluvial de substrato sedimentos quaternários), Cgl (Cambissolo de substrato granulito), Cgn (Cambissolo de substrato gnaisse), GHsq (Solo Glei de substrato sedimentos quaternários), PVgl (Podzólico Vermelho-Amarelo de substrato granulito), PVgn (Podzólico Vermelho-Amarelo de substrato gnaisse), Rgl (Solo Litólico de substrato granulito), Rgn (Solo Litólico de substrato gnaisse) e SMSq (Solos de Mangue de substrato sedimentos quaternários).

A associação entre as estimativas obtidas com a geoestatística e o mapeamento geológico, pedológico e geotécnico da área permitiu a elaboração da descrição e representação gráfica dos perfis estratigráficos genéricos das unidades geotécnicas obtidas. Informações como cota do terreno e declividade médias, profundidade do nível d'água, profundidade do impenetrável à percussão e comportamento da resistência N_{SPT} dos solos foram características extraídas dos mapeamentos e das sondagens SPT e associadas a cada uma das unidades geotécnicas.

Por meio dos resultados obtidos, algumas características da BHRC puderam ser extraídas, como:

- A predominância de solos sedimentares na BHRC em relação à ocorrência de solos residuais;
- Os Solos Litólicos são as unidades que se localizam nas áreas mais altas e acidentadas da bacia (relevo fortemente ondulado), enquanto que os Solos de Mangue são as unidades localizadas nas áreas mais baixas e planas. Os Cambissolos e Podzólicos Vermelho-Amarelos se intercalam em relação à sua distribuição altimétrica;

- Referente à superfície do nível d'água, em 30% da área da BHRC ocorrem valores até 3,0m de profundidade, em 50% da área há valores até 5,0m e 93% com valores até 10,0m de profundidade. As menores profundidades verificam-se nas regiões Leste e Norte da bacia, sobrepondo-se às unidades sedimentares identificadas como Solos de Mangue, Glei e Aluviais. Ressalta-se que o banco de dados elaborado não segmentou as análises em termos de sazonalidade (períodos secos *versus* períodos chuvosos);
- Acerca da superfície do impenetrável à percussão, há ocorrência de 32% da área da BHRC com impenetrável localizado até 15,0m de profundidade, 55% da área até 17,0m e 91% com impenetrável até 21,0m de profundidade. O intervalo de maior ocorrência de profundidade do impenetrável é entre 16,0m e 20,0m (aproximadamente 54% da área). As menores profundidades do impenetrável verificam-se nas regiões Leste e Norte da bacia, sobrepondo-se às unidades sedimentares identificadas como Solos de Mangue, Glei e Aluviais;
- Os mapas de isovalores de resistência N_{SPT} indicam que os menores índices se concentram na porção Leste da BHRC e há um constante ganho de resistência com o aumento da profundidade, independente da unidade geotécnica. Os solos de menores resistências reduzem suas ocorrências a partir de 12,0m de profundidade, até o momento em que não são mais observados na BHRC.

De maneira geral as estimativas se mostraram satisfatórias, apresentando erros menores nas regiões com maior densidade de sondagens e erros mais significativos nas regiões com poucos dados amostrais. No entanto, verificou-se que as estimativas quanto à profundidade do nível d'água não se mostraram coerentes com os resultados indicados pela estatística clássica. Notou-se que a modelagem geoestatística majorou as profundidades estimadas para o nível d'água, possivelmente

devido à irregularidade da distribuição espacial dos dados e a não consideração da sazonalidade (período secos *versus* períodos chuvosos) nas interpolações. As estimativas referentes à profundidade do impenetrável e à resistência N_{SPT} dos solos ao longo da profundidade corroboraram com os verificados pela estatística clássica.

Assim, conclui-se que o método da krigagem ordinária mostrou-se eficiente quando aplicado ao banco de dados de sondagens SPT na BHRC objetivando a confecção de mapas de estimativas. No entanto, as incertezas poderiam ser minimizadas na ocasião de um incremento na quantidade de sondagens deste banco de dados e na possibilidade de uma distribuição espacial mais regular dos furos na área de estudo.

O mapeamento geotécnico elaborado possibilita a extração de dados geotécnicos direcionados a diversas finalidades de uso no âmbito do planejamento territorial e obras de engenharia na região de Joinville/SC e subsidia tomadas de decisão por parte dos gestores municipais e demais interessados.

Enfatiza-se que, devido à variabilidade espacial natural das propriedades dos solos, a necessidade de sondagens pontuais não pode ser descartada. Os mapas de estimativas obtidos nesta pesquisa são orientativos e não substituem a necessidade de realização de campanhas de investigação geotécnica pontuais, tal qual reforçado por Zuquette (1993).

6.2 SUGESTÕES PARA ESTUDOS FUTUROS

A continuidade da pesquisa poderá ser orientada nos seguintes itens:

- Considerar a sazonalidade de períodos secos e chuvosos nos dados das sondagens SPT voltada às análises da superfície do nível d'água;
- Realizar análises pontuais em regiões mais densas de sondagens SPT a fim de aprimorar as análises, reduzindo os erros associados às estimativas e, conseqüentemente, a precisão dos mapas gerados;

- Verificar a normalidade dos dados para possibilitar a elaboração de mapas de probabilidades, por exemplo, de manchas de ocorrência de solos moles ($N_{SPT} < 5$);
- Aplicar o método geoestatístico da cokrigagem verificando a potencialidade do mesmo na geração dos mapas de estimativas combinando os dados com uma variável secundária como a superfície topográfica da área em estudo;
- Correlacionar os valores de estimativas do N_{SPT} obtidos nesta pesquisa com formulações e parâmetros de resistência e capacidade de suporte do solo utilizados na geotecnia para utilização em projetos básicos/preliminares;
- Executar ensaios de caracterização geotécnica (laboratório e campo), de resistência ao cisalhamento e de compressibilidade nas unidades geotécnicas mapeadas, com atualização do banco de dados;
- Correlacionar unidades geotécnicas e a ocorrência de escorregamentos para previsão de áreas de risco;
- Elaborar o mapeamento geotécnico de todo o município de Joinville/SC, correlacionando com as características das unidades geotécnicas mapeadas nesta pesquisa.

REFERÊNCIAS

ABITANTE, E. **Proposta metodológica de mapeamento geotécnico com uso de pedologia em solos tropicais visando obras rodoviárias**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina. 1997.

ANDRIOTTI, J.L.S. **Fundamentos de estatística e geoestatística**. São Leopoldo: Unisinos. 2003.

AZIMUTE Consultoria e Projetos de Engenharia. Acervo de sondagens.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6484: Solo - Sondagens de simples reconhecimento com SPT - Método de ensaio**. Rio de Janeiro. 2001.

BASTOS, C.A.B. **Caracterização geotécnica dos solos oriundos de rochas graníticas do município de Porto Alegre**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 1991.

BEZERRA, J.E. **Aplicação de técnicas geoestatísticas no processo de otimização de projetos de fundações estaqueadas**. Tese de doutorado. Universidade de Brasília. 2014.

CAMARGO, E.C.G. **Geoestatística: fundamentos e aplicações**. Material do curso de geoprocessamento para projetos ambientais do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. 1988. Disponível em <http://www.dpi.inpe.br/gilberto/tutoriais/gis_ambiente/>

CAMBARDELLA, C.A.; MOORMAN, T.B.; NOVAK, J.M.; PARKIN, T.B.; KARLEN, D.L.; TURCO, R.F., KORNOPKA, A.E. **Fieldscale Variability of Soils Properties in Central Iowa Soils**. Soil. Sci. Soc. Am. J., V.58, p.1501-1511, 1994.

CARVALHO, M.S.; PINA, M. F.; SANTOS, S.M. **Conceitos básicos de informação geográfica aplicados à saúde**. Rede Interagencial de Informações para a Saúde (RIPSA). Brasília. 2000.

CHRIST, C.E. **Mapeamento de áreas suscetíveis ao colapso na bacia hidrográfica da Lagoa da Conceição**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina. 2014.

PRM - SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. **Carta geológica SG.22-Z-B Folha Joinville**. Escala 1:250.000. Programa Geologia do Brasil. 2011.

DAVISON DIAS, R. **Proposta de metodologia de definição de carta geotécnica básica em regiões tropicais e subtropicais**. In: Revista do Instituto Geológico. São Paulo, p.51-55, 1995.

DUARTE, S.B. **Utilização de Sistema de Informações Geográficas na análise do meio físico e do uso do solo na Lagoa da Conceição - Florianópolis**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina. 1999.

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília. 1999.

FOLLE, D. **O estudo geostatístico de sondagens SPT para geração de mapas auxiliares em obras de engenharia**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2002.

FONTELES, H.R.N. **Caracterização geotécnica do subsolo da porção nordeste do município de Fortaleza (CE) com base em geoestatística**. Dissertação de mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. 2003.

FUNDAÇÃO IPPUJ. **Joinville cidade em dados 2015**. Prefeitura Municipal de Joinville. 2015a.

FUNDAÇÃO IPPUJ. **Joinville bairro a bairro 2015**. Prefeitura Municipal de Joinville. 2015b.

GEOFORMA Engenharia Ltda. Acervo de sondagens.

GUARESI, C.M. **Modelo de banco de dados geotécnicos vinculados a um Sistema de Informações Georeferenciadas**

da grande Florianópolis. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina. 2004.

HARTMANN, L.A.; SILVA, L.C.; ORLANDI, Fo. V. **O Complexo granulítico de Santa Catarina - Descrição e implicações genéticas.** In: Acta Geológica Leopoldensia. 1979. p.93-112.

HIGASHI, R.A.R. **Utilização de um SIG no desenvolvimento de um banco de dados geotécnicos do norte do estado do Rio Grande do Sul.** Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina. 2002.

HIGASHI, R.A.R. **Metodologia de uso e ocupação dos solos de cidades costeiras brasileiras através de SIG com base no comportamento geotécnico e ambiental.** Tese de doutorado. Universidade Federal de Santa Catarina. 2006.

JOHNSTON, K.; VER HOEF, J.M.; KRIVORUCHKO, K.; LUCAS, N. **Using ArcGis Geostatistical Analyst.** Esri New York. 2001.

KAUL, P.F.T.; TEIXEIRA, W. **Archean and Early Proterozoic Complexes of Santa Catarina, Paraná and São Paulo States, South-Southeastern, Brazil: an outline of their geological evolution.** In: Rev. Bras. Geoc. 1982. p. 172-182.

KOBIYAMA, M.; CHECCHIA, T.; SILVA, R.V.; SCHRÖDER, P.H.; GRANDO, Â.; REGINATTO, G.M.P. **Papel da comunidade e da universidade no gerenciamento de desastres naturais.** In: I Simpósio Brasileiro de Desastres Naturais, Florianópolis. 2004. p.834-846.

KOBIYAMA, M.; MENDONÇA, M.; MORENO, D.A.; MARCELINO, I.P.V.O.; MARCELINO, E.V.; GONÇALVES, E.F.; BRAZETTI, L.L.P.; GOERL, R.F.; MOLLERI, G.; RUDORFF, F. **Prevenção de desastres naturais: Conceitos básicos.** Curitiba: Organic Trading. 2006.

LANDIM, P.M.B. **Sobre geoestatística e mapas.** Terræ Didatica. 2006. p.19-33.

LIMA JUNIOR, C. O. **Mapeamento geotécnico do município de Florianópolis em meio digital visando o Sistema de Informações Geográficas.** Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina. 1997.

MACIEL FILHO, C.L. **Introdução à geologia de engenharia.** Brasília: UFSM/CPRM. 1997.

MAFRA JÚNIOR, C.S. **Elaboração do mapa preliminar de unidades geotécnicas do município de Brusque associado a um banco de dados geotécnico em ambiente de SIG.** Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina. 2007.

MAGUIRE, D.J.; GOODCHILD, M.F.; RHIND, D. **Geographical information systems: Principles and applications.** Longman Scientific & Technical. 1991.

MATHERON, G. **Principles of geostatistics.** Economic Geology, 58. 1963. p.1246-1266.

MIRANDA, T.C. **Mapeamento das unidades geotécnicas e desenvolvimento de um sistema de informações geográficas para área de abrangência da rodovia BR-101/RS.** Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2008.

OLIVEIRA, F.S.S. **Diagnóstico e banco de dados das propriedades geotécnicas da duplicação do lote 4 da BR-470/SC com auxílio de um SIG.** Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina. 2015.

ORLANDINI, R. **Estudo do comportamento geomecânico de perfis típicos de solos do município de Novo Hamburgo visando ao mapeamento geotécnico.** Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 1991.

PEJON, O.J.; ZUQUETTE, L.V. **Mapeamento geotécnico regional na escala 1:100.000 - Considerações metodológicas.** In: Revista do Instituto Geológico. São Paulo, p.23-29, 1995.

PINHEIRO, R.J.B. **Estudo do comportamento geomecânico de perfis oriundos de rochas sedimentares da Formação Rosário do Sul**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 1991.

QUARESMA, A.R.; DÉCOURT, L.; QUARESMA FILHO, A.R.; ALMEIDA, M.S.S. **Investigações geotécnicas**. In: Fundações: Teoria e Prática. São Paulo: PINI. 1998. Cap. 3, p.119-162.

RAMIREZ, M.R. **Sistemas gerenciadores de bancos de dados para geoprocessamento**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro. 1994.

REGINATTO, G.M.P. **Caracterização de movimentos de massa na bacia hidrográfica do Rio Cunha, Rio dos Cedros-SC, com ênfase em escorregamentos translacionais**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina. 2013.

SANTOS, G.T. **Integração de informações pedológicas, geológicas e geotécnicas aplicadas ao uso do solo urbano em obras de engenharia**. Tese de doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 1997.

SBROGLIA, R.M. **Mapeamento geotécnico e das áreas suscetíveis a deslizamentos na microbacia do Ribeirão Baú, Ilhota/SC**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina. 2015.

SCHNAID, F.; ODEBRECHT, E. **Ensaio de campo e suas aplicações à engenharia de fundações**. São Paulo: Oficina de Textos. 2ª edição. 2012.

SOARES, W.C. **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. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. 2011.

SILVA, D.D. **Uso de Sistema de Informação Geográfica no cadastro geotécnico de sondagens SPT na bacia do Itacorubi**.

Trabalho de conclusão de curso. Universidade Federal de Santa Catarina. 2000.

SILVA, D.F. **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. 2008.

SILVA, L.C.; BORTOLUZZI, C.A. **Mapa geológico do Estado de Santa Catarina Escala 1:500.000: texto explicativo.** Florianópolis: DNPM - 11° Distrito. 1987.

SILVA, L.C.; DIAS, A.A. **Os segmentos mediano e setentrional do escudo catarinense: 11 - Organização e evolução geotectônica.** In: Acta Geológica Leopoldensia. 1981. p. 235-265.

STURARO, J.R. **Mapeamento geoestatístico de propriedades geológico-geotécnicas obtidas de sondagens de simples reconhecimento.** Dissertação de mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. 1994.

STURARO, J.R. **Apostila de geoestatística.** 2015. Disponível em <<http://igce.rc.unesp.br/Home/Departamentos47/geologiaaplicada/apostila-basica.pdf>>

TALAMINI NETO, E. **Caracterização geotécnica do subsolo de Curitiba para o planejamento de ocupação do espaço subterrâneo.** Dissertação de mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. 2001.

THIESEN, S. **Aplicação de ferramenta SIG para mapeamento geotécnico e cartas de aptidão para fundação a partir de ensaios SPT - Um estudo de caso em Blumenau/SC.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina. 2016.

UBERTI, A.A.A. **Boletim técnico do levantamento da cobertura pedológica e da aptidão agrícola das terras da bacia hidrográfica do Rio Cachoeira.** Prefeitura Municipal de Joinville. 2011.

VALENTE, A.L.S. **Integração de dados por meio de geoprocessamento, para elaboração de mapas geotécnicos, análise do meio físico e suas interações com a mancha urbana.** Tese de doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 1999.

YAMAMOTO, J.K.; LANDIM, P.M.B. **Geoestatística: conceitos e aplicações.** São Paulo: Oficina de Textos. 2013.

ZUQUETTE, L.V. **Importância do mapeamento geotécnico no uso e ocupação do meio físico: fundamentos e guia para elaboração.** Tese (Livre Docência). Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. 1993.

ZUQUETTE, L.V.; GANDOLFI, N. **Cartografia geotécnica.** São Paulo: Oficina de Textos. 2004.

APÊNDICE A: HISTOGRAMAS DAS VARIÁVEIS ANALISADAS