

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE GEOTECNIA

ESTUDO INTEGRADO DAS CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICO-
GEOTÉCNICAS COM VISTA À AVALIAÇÃO DE RECARGA DE
AQUÍFERO: REGIÃO DE SÃO CARLOS-SP

v. 2

JÚNIO RENÉ TOLEDO FAGUNDES

Tese apresentada à Escola de Engenharia
de São Carlos da Universidade de São
Paulo, como parte dos requisitos para a
obtenção do título de Doutor em Ciências,
Programa de Pós Graduação em
Geotecnia.

ORIENTADOR: LÁZARO VALENTIN ZUQUETTE

SÃO CARLOS – SP
2010

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento
da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

F156e Fagundes, Júnio René Toledo
Estudo integrado das características geológico-geotécnicas com vista à avaliação de recarga de aquífero : região de São Carlos - SP / Júnio René Toledo Fagundes ; orientador Lázaro Valentin Zuquette. -- São Carlos, 2010.


Tese (Doutorado-Programa de Pós-Graduação e Área de Concentração em Geotecnia) -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2010.

1. Recarga de aquíferos. 2. Formação Botucatu.
3. Características geológico-geotécnicas. 4. São Carlos.
I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato(a): Engenheiro Civil JÚNIO RENÉ TOLEDO FAGUNDES.

Tese defendida e julgada em 06/12/2010 perante a Comissão Julgadora:



Prof. Titular **LAZARO VALENTIN ZUQUETTE** – (Orientador)
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

Aprovado



Prof^a. Dr^a. **VALERIA GUIMARÃES SILVESTRE RODRIGUES**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

APROVADO



Prof. Dr. **VAGNER ROBERTO ELIS**
(Instituto Astronômico e Geofísico/USP)

Aprovado



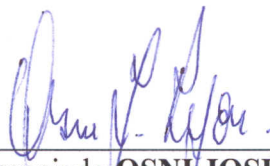
Prof. Dr. **HERALDO LUIZ GIACHETI**
(Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”/UNESP/campus de Bauru)

APROVADO

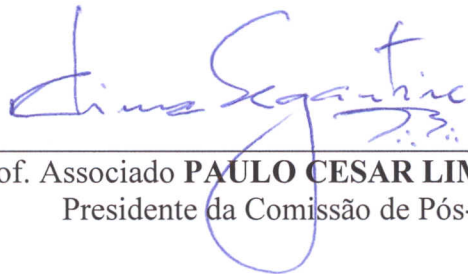


Dr^a. **DENISE BALESTRERO MENEZES**
(Progeo Engenharia)

aprovado



Prof. Associado **OSNI JOSÉ PEJON**
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em
Geotecnia



Prof. Associado **PAULO CESAR LIMA SEGANTINE**
Presidente da Comissão de Pós-Graduação

DEDICATÓRIA

Aos meus queridos pais, irmãos e avós.

AGRADECIMENTOS

*“No meio do caminho tinha uma pedra
tinha uma pedra no meio do caminho...”*

E como os obstáculos da vida nunca são superados sozinhos,

Agradeço a Deus, pela luz e proteção.

A toda minha família, pais e irmãos, pela educação que me proporcionaram, apoio, incentivo e carinho de sempre, mesmo à distância.

Ao Professor Lázaro Zuquette, pela orientação, ensinamentos e descontraída amizade ao longo do período de doutorado.

Ao Professor Vagner Roberto Elis, pelas contribuições nas análises geofísicas.

Ao Professor Karsten Jensen, pelo meu período sanduíche na Universidade de Copenhague.

Aos colegas contemporâneos de mapeamento, Alberto, Crisley, Marcilene, Miguel, Simone, Aline, Felipe, Thiago e Cláudia, pela amizade e descontração que sempre fizeram do nosso ambiente de trabalho um lugar agradável.

Aos técnicos José Luis, Oscar e Décio, pelas inúmeras assistências aos ensaios, e especialmente ao Sr. Antônio, pela sua bondade e dedicação.

Aos funcionários Maristela, Álvaro, Neiva, Herivelto e Toninho, por serem sempre solícitos frente aos nossos problemas.

Ao companheiro Ademair, pela força, amizade e alegria durante as atividades de campo.

Aos grandes amigos William e Aline, pela prazerosa e amistosa convivência durante o período em São Carlos.

Ao amigo Osvaldo, pela amizade, boas conversas, brincadeiras e churrascos, tornando a convivência em nosso prédio ainda mais agradável.

Aos demais amigos contemporâneos da Geotecnia que, direta ou indiretamente, contribuíram para esta minha caminhada, em especial ao Cléber, Rafaela, Fagner, Juliana Azoia, Fernando Jamal, Fernando Portelinha e Valéria.

Aos amigos Thiago e Paola pelas contribuições na etapa de formatação da tese.

Aos amigos de Ouro Preto, sempre presentes.

Ao Professor Adilson do Lago Leite, da UFOP, pelo incentivo na realização do meu doutorado na EESC/USP.

Aos colegas da UTFPR/Campo Mourão, pelo apoio na fase final do meu doutorado, em especial ao Professor Jorge Goes.

Ao CNPq e à CAPES, pela concessão das bolsas de doutorado e doutorado sanduíche.

A todos, deixo o meu muito obrigado, pois...

*“...Nunca me esquecerei desse acontecimento...
...Nunca me esquecerei que no meio do caminho
tinha uma pedra...”*

“Somos nós que fazemos a vida, como der ou puder ou quiser...
... Cantar, e cantar, e cantar,
a beleza de ser um eterno aprendiz...”
Gonzaguinha

RESUMO

FAGUNDES, J.R.T. **Estudo integrado das características geológico-geotécnicas com vista à avaliação de recarga de aquífero: região de São Carlos-SP.** 2010. 397 p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2010.

Esta tese apresenta um estudo da integração das características geológico-geotécnicas da região de São Carlos que condicionam o processo de recarga do aquífero constituído pelos arenitos da Formação Botucatu. Dentre as características avaliadas, destacam-se os parâmetros de condutividade hidráulica, de retenção de poluentes e de distribuição de poros, além das informações sobre a distribuição e ocorrência dos materiais geológicos, profundidade do nível de água, uso do solo e superfícies de difração hídrica. Tais informações foram obtidas a partir de trabalhos integrados de escritório, campo e laboratório, sendo os resultados gerados na forma de mapas considerados fundamentais para a elaboração de modelos destinados à avaliação de recarga. Foi também realizado na região monitoramento pluviográfico das chuvas, bem como dos níveis de água e de umidade da zona não saturada através de poços e tensiômetros, respectivamente. As informações integradas e os dados de monitoramento foram utilizados em simulações no programa Mike-She, que considerou os diferentes aspectos geológico-geotécnicos no estudo de avaliação das taxas de recarga. O estudo demonstrou a importância da variabilidade dos materiais geológicos, das características geológico-geotécnicas e da dinâmica das águas para a adequada avaliação das taxas de recarga de aquífero e de fluxo dos poluentes.

Palavras-chave: Recarga de aquíferos, Formação Botucatu, Características geológico-geotécnicas, São Carlos.

ABSTRACT

FAGUNDES, J.R.T. Integrated study of geological and geotechnical characteristics for aquifer recharge assessment: São Carlos-SP region. 2010. 397 p. Thesis (Doctorate) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2010.

This thesis presents an integrated study of the geological and geotechnical characteristics of São Carlos region which influence the recharge process of the aquifer composed of sandstones of the Botucatu Formation. Among the assessed characteristics, it can be distinguished the parameters of hydraulic conductivity, retention of pollutants and pore distribution, also information about the distribution and occurrence of the geologic materials, groundwater depth, land use and water diffraction surfaces. Such data were obtained from desk study, field and laboratory integrated works, with the results being generated in the form of maps considered fundamental to the development of models for recharge assessment. In the region, it was also conducted monitoring of rainfall, groundwater levels and water content of the unsaturated zone through pluviograph, monitoring wells and tensiometers, respectively. The integrated information and monitoring data were used in the Mike-She software simulations, which considered the different geological and geotechnical aspects in the study for assessment of the recharge rates. The study demonstrated the importance of variability of geological materials, geological and geotechnical characteristics and dynamics of water for the adequate assessment of the aquifer recharge and transport of pollutants.

Keywords: Aquifer recharge, Botucatu Formation, Geological and Geotechnical characteristics, São Carlos.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Ciclo hidrológico simplificado (Modificado de USGS: http://ga.water.usgs.gov/edu/watercycle.html)	41
Figura 2 – Diferença de aquíferos quanto à porosidade.....	43
Figura 3 – Características hidráulicas de um aquífero quanto ao confinamento.	43
Figura 4 – Fases constituintes dos materiais geológicos.....	44
Figura 5 – Forças nas moléculas de um líquido (Modificado de LIBARDI, 2005).	46
Figura 6 – (a) ascensão capilar em água; (b) depressão capilar em mercúrio (Modificado de LIBARDI, 2005)	47
Figura 7 – Retenção da água por agregados do solo após a drenagem (Modificado de LIBARDI, 2005).....	48
Figura 8 – Exemplo de curva de retenção destacando os diferentes trechos.....	50
Figura 9 – Fenômeno de histerese (Modificado de FREEZE e CHERRY, 1979).	50
Figura 10 - Comportamento típico dos solos em função da sucção: (a) arenoso; (b) siltoso; (c) argiloso. (Fonte: FREEZE e CHERRY, 1979)	52
Figura 11 – Permeâmetro do tipo Guelph.....	55
Figura 12 – Variação da capacidade de infiltração com o tempo durante um evento de chuva constante.....	60
Figura 13 – Zonas do processo de infiltração (Fonte: PALMA, 2004)	62
Figura 14 – Exemplo de um seepage meter (Fonte: http://www.connectedwater.gov.au/framework/seepage_design.html).	73
Figura 15 – Esquema da separação de fluxos em uma hidrógrafa (Fonte: PALMA, 2004).....	74
Figura 16 – Princípio do método do plano de fluxo zero (PFZ) (Modificado de KHALIL <i>et al.</i> , 2003).....	76
Figura 17 – Exemplos de sondas TDR (Fonte: JONES <i>et al.</i> , 2002).	79
Figura 18 – Esquema da instalação dos sensores FTDR (Modificado de DAHAN <i>et</i> <i>al.</i> , 2003).....	81
Figura 19 – Esquema de um tensiômetro.....	82
Figura 20 – Esquema de uma sonda de nêutrons (Fonte: ASSIS, 2008).	83

Figura 21 – Exemplo do monitoramento do lençol freático no tempo (Modificado de HEALY e COOK, 2002).....	85
Figura 22 – Mecanismos da dispersão mecânica: (a) gradiente de velocidades nos poros e (b) tortuosidade (Modificado de FREEZE e CHERRY, 1979).....	93
Figura 23 - Mecanismo da difusão molecular (Modificado de FREEZE e CHERRY, 1979).	94
Figura 24 – Efeito da tortuosidade do solo (Modificado de LEITE, 2001).	96
Figura 25 - Categorias e subgrupos de isothermas de sorção segundo Giles <i>et al.</i> (1974).	99
Figura 26 – Relação entre PCLZ, pH_0 , σ_p e concentração iônica (C).....	100
Figura 27 – Balanço de massa de um elemento infinitesimal de solo.	107
Figura 28 – Balanço de massa de soluto num elemento infinitesimal de solo.	109
Figura 29 – Eletrodo metálico usado pelo método da eletrorresistividade.	117
Figura 30 - Esquema das técnicas de investigação geoeletrica: a) Caminhamento Elétrico (CE); b) Sondagem Elétrica Vertical (SEV) (Fonte: FACHIN, 2007).....	119
Figura 31 - Curva de campo e modelo elétrico interpretado de SEV (Fonte: ELIS, 1999).	120
Figura 32 - Exemplo de modelo geológico-geofísico obtido através de CE (Fonte: ELIS, 1999).	121
Figura 33 – Fluxograma das etapas desenvolvidas.	125
Figura 34 – Detalhes da etapa de obtenção de dados.....	128
Figura 35 – Articulação das fotografias aéreas utilizadas (nomenclatura: faixa de vôo – número da foto).....	130
Figura 36 – Extração de amostras em trincheira escavada.	139
Figura 37 – Exemplo de um ensaio com infiltrômetro de duplo anel.	140
Figura 38 – Linhas de fluxo num ensaio com infiltrômetro de duplo anel.	140
Figura 39 – Curva de capacidade de infiltração.	141
Figura 40 – Esquema do ensaio com permeâmetro tipo Guelph modificado.	142
Figura 41 – Ensaio utilizando o permeâmetro Guelph modificado.	143
Figura 42 – Esquema de ensaio de infiltração em furo.	144
Figura 43 – Ensaio de infiltração em furo de sondagem a trado.	145
Figura 44 – Ensaio de infiltração de grandes dimensões – método do perfil instantâneo.....	146
Figura 45 – Aparato de laboratório dos ensaios de coluna.	152

Figura 46 – Esquema do ensaio de coluna.....	153
Figura 47 – Localização da área de estudo (em destaque).....	160
Figura 48 – Divisão das 22 UGRHs no Estado de São Paulo (Fonte: CETESB, 2007).....	161
Figura 49 – Hidrografia da área de estudo.	162
Figura 50 – Afloramento da Formação Botucatu no Estado de São Paulo.....	163
Figura 51 – Modelo hidrogeológico regional.....	163
Figura 52 - Relevo típico das partes onde não afloram os materiais geológicos da Formação Serra Geral.	165
Figura 53 - Relevo com o afloramento dos materiais geológicos da Formação Serra Geral.....	165
Figura 54 - Intercalações das diferentes litologias da Fm Itaqueri.....	166
Figura 55 - Corpo de diabásio e materiais inconsolidados residuais.....	167
Figura 56 - Arenitos silicificados da Formação Botucatu sobre os quais são desenvolvidos materiais inconsolidados arenosos com fragmentos.....	168
Figura 57 - Inflexão de relevo resultante dos pacotes de arenitos silicificados e dos sem cimento.	169
Figura 58 - Arenitos com diferentes graus de cimentação, pertencentes ao pacote de arenitos silicificados.....	170
Figura 59 - Detalhe do contato da Figura 58.	171
Figura 60 - Parte mais escura decorrente do fluxo de água pelas descontinuidades horizontalizadas.....	171
Figura 61 – Detalhe das descontinuidades.....	172
Figura 62 - Contato entre os arenitos medianamente cimentado e os poucos cimentados.	172
Figura 63 - Arenito pouco cimentado que ocupa a zona intermediária dos arenitos sem silicificação.....	173
Figura 64 - Detalhe do arenito pouco cimentado da Figura 63.....	173
Figura 65 - Exemplo de locais com ocorrência de aluviões.....	175
Figura 66 - Exemplo de locais com ocorrência de aluviões.....	175
Figura 67 - Exemplo de locais com ocorrência de aluviões.....	176
Figura 68 - Vista geral da área de ocorrência do Material Inconsolidado Retrabalhado colúvio Arenoso.....	176
Figura 69 - Foto do material inconsolidado retrabalhado do tipo colúvio arenoso..	177

Figura 70 - Vista geral de área de ocorrência do material inconsolidado – colúvio areno-argiloso.	178
Figura 71 - Material inconsolidado retrabalhado arenoso sotoposto aos residuais finos. Separados pela linha de seixos e pedregulhos.	178
Figura 72 - Características da área de afloramento dos materiais inconsolidados residuais arenosos finos da Formação Itaqueri.	179
Figura 73 - Afloramento de materiais inconsolidados arenosos com finos rasos. ...	180
Figura 74 - Afloramento de Materiais inconsolidados residuais finos (parte mais avermelhada sotoposta aos materiais inconsolidados retrabalhados arenosos).	180
Figura 75 - Material Inconsolidado residual fino raso (silto argiloso) desenvolvido a partir de litologias da Formação Itaqueri.	181
Figura 76 - Materiais inconsolidados residuais silto argilosos rasos.	182
Figura 77 - Perfil de material inconsolidado residual argiloso da Formação Serra Geral.	182
Figura 78 - Zona de ocorrência de materiais inconsolidados residuais arenosos da FM. Botucatu.	183
Figura 79 - Perfil de material inconsolidado residual arenoso da Formação Botucatu.	183
Figura 80 - Aterro sanitário da cidade de São Carlos assentado diretamente sobre os materiais inconsolidados residuais arenosos da Formação Botucatu.	184
Figura 81 – Unidades de infiltração na área de estudo: unidades A, B, C, D, E, F, H, I, J e K.	189
Figura 82 – Esquema representativo das superfícies de difração hídrica presentes na área de estudo. Os números em algarismos romanos representam os materiais geológicos do Apêndice V.	190
Figura 83 – Curva de resistividade elétrica aparente de campo e modelo geológico-geoeletrico interpretado – SVP1.	193
Figura 84 – Curva de resistividade elétrica aparente de campo e modelo geológico-geoeletrico interpretado – SVP2.	194
Figura 85 – Curva de resistividade elétrica aparente de campo e modelo geológico-geoeletrico interpretado – SVP3.	194
Figura 86 – Curva de resistividade elétrica aparente de campo e modelo geológico-geoeletrico interpretado – SVP4.	195

Figura 87 – Curva de resistividade elétrica aparente de campo e modelo geológico-geoeletrico interpretado – SVP5.	195
Figura 88 – Curvas de resistividade elétrica aparente típicas das classes de profundidade: (a) 5 a 10m; (b) 15 a 20m; e (c) maior que 20m.	197
Figura 89 – Seção de resistividade elétrica 2D obtida a partir do caminhamento elétrico CE1.	200
Figura 90 - Seção de resistividade elétrica 2D obtida a partir do caminhamento elétrico CE2.	201
Figura 91 – Curva da capacidade potencial de infiltração dos materiais inconsolidados residuais da FM Itaqueri.	203
Figura 92 - Curva da capacidade potencial de infiltração dos materiais inconsolidados residuais da FM Botucatu.	204
Figura 93 - Curva da capacidade potencial de infiltração dos materiais inconsolidados retrabalhados colúvio arenoso.	206
Figura 94 – Abertura da trincheira em solo compactado.	209
Figura 95 – Perfil instantâneo: ensaio em andamento – infiltração em trincheira... ..	209
Figura 96 – Execução de tradagem para determinação de perfil de umidade.	210
Figura 97 – Extração de amostra indeformada com auxílio de tubo de PVC de parede rígida.	211
Figura 98 – Variação dos perfis de umidade no ensaio LB1.	212
Figura 99 - Perfil instantâneo: ensaio em andamento – infiltração utilizando simulador de chuva.	213
Figura 100 - Perfil instantâneo: ensaio em andamento – detalhes do arranjo de campo com o simulador de chuva e o conjunto de tensiômetros.	214
Figura 101 – Variação dos perfis de umidade no ensaio LIB2.	215
Figura 102 – Variação dos perfis de umidade no ensaio LIB3.	218
Figura 103 – Curvas de retenção dos materiais inconsolidados: a) Formação Itaqueri; b) Formação Botucatu.	225
Figura 104 – Distribuição dos poros nos materiais inconsolidados residuais da Formação Botucatu.	227
Figura 105 – Afloramento da Formação Botucatu e localização da área de estudo (Fonte: ZUQUETTE e PALMA, 2009).	234
Figura 106 - Fotografias dos materiais inconsolidados (1,6 mm x 1,2 mm): (a) local 1, (b) local 2, e (c) local 3.	235

Figura 107 - Resultados da análise térmica diferencial (ATD).	235
Figura 108 - Resultados da difração de raios X quando a amostra está: (a) em condições naturais, (b) tratada com etileno glicol, e (c) aquecida até 550°C.	236
Figura 109 - Resultados obtidos para pH_0 (ponto de carga zero) a partir de ensaios de titulação: (a) local 1, (b) local 2, e (c) local 3.	237
Figura 110 - pH (a, b, c) e Eh (d, e, f) iniciais e finais para os ensaios de equilíbrio em lote.	239
Figura 111 - Isotermas para o local 1. (a) S x Ce, (b) Kd x S, (c) log Kd x log S, (d) modelo de Freundlich, (e) modelo de Langmuir I, e (f) modelo de Langmuir II.	240
Figura 112 - Isotermas para o local 2. (a) S x Ce, (b) Kd x S, (c) log Kd x log S, (d) modelo de Freundlich, (e) modelo de Langmuir I, e (f) modelo de Langmuir II.	241
Figura 113 - Isotermas para o local 3. (a) S x Ce, (b) Kd x S, (c) log Kd x log S, (d) modelo de Freundlich, (e) modelo de Langmuir I, e (f) modelo de Langmuir II.	242
Figura 114 - Porcentagem de cada cátion que é sorvida pelos materiais inconsolidados para cada concentração inicial: (a) local 1, (b) local 2, e (c) local 3.	245
Figura 115 - Coeficiente de distribuição (Kd) de K^+ , Cu^{++} e Zn^{++} como uma função das concentrações iniciais dos cátions: (a) local 1, (b) local 2, e (c) local 3.	246
Figura 116 - Correlações de $C_{s,i,j}$ (cátion sorvido i na solução inicial por massa do substrato) contra $C_{p,i,j}$ (cátion potencialmente sorvível i na solução inicial por massa do substrato) para K^+ , Cu^{++} e Zn^{++}	247
Figura 117 – (a) montagem do equipamento; (b) execução da sondagem – percussão; (c) amostras retiradas; (d) detalhe da textura arenosa dos materiais. ...	250
Figura 118 - Depósito de água com qualidade adequada à realização do poço de monitoramento.	252
Figura 119 – (a) arranjo dos equipamentos para a sondagem rotativa; (b) perfuração a seco; (c) perfuração com fluido de perfuração; (d) coroa diamantada de perfuração de 4 pol. de diâmetro.	253
Figura 120 – (a) Colocação da tubulação; (b) embalagem do pré-filtro; (c) pré-filtro; (d) espaço anelar para preenchimento com o pré-filtro.	255
Figura 121 – (a) colocação da geomembrana; (b) colocação da pasta de silicone; (c) concretagem da base; (d) detalhe da válvula de pé; (e) limpeza do poço; (f) poço finalizado.	256
Figura 122 – Esquema construtivo final dos poços.	257

Figura 123 – Esquema de um conjunto de tensiômetros instalado.	258
Figura 124 – (a) submersão das pedras porosas dos tensiômetros e fluxo descendente; (b) aplicação de vácuo.	259
Figura 125 – (a) perfuração com trado espiral; (b) lama e introdução do tensiômetro; (c) execução de selo superficial; (d) conjunto de tensiômetros instalado.	261
Figura 126 – (a) detalhe do pluviógrafo; (b) pluviógrafo instalado em campo	264
Figura 127 - Análise de dupla massa (precipitações mensais acumuladas) – 8/2008 a 12/2009.....	267
Figura 128 – Eventos selecionados para as etapas de simulação.	271
Figura 129 – Medidor de nível de água.	274
Figura 130 – Variações de umidade registradas nos tensiômetros de 80, 150 e 250 cm de profundidade após o evento de 14/04/2009.....	278
Figura 131 – (a) variação do perfil de umidade com o tempo; (b) variação do perfil de potenciais totais.	278
Figura 132 – Variações de umidade registradas nos tensiômetros de 80, 150 e 250 cm de profundidade – eventos de 20/11 a 20/12/2009.....	279
Figura 133 – (a) variação do perfil de umidade com o tempo; (b) variação do perfil de potenciais totais.	279
Figura 134 – Distribuição dos eletrodos na trincheira de ensaio.	288
Figura 135 – Infiltração.	288
Figura 136 – Detalhe do espalhamento do NaCl no interior da trincheira.....	288
Figura 137 – Infiltração da solução salina.....	288
Figura 138 – Agitador mecânico.	289
Figura 139 – Redistribuição da água durante a etapa de infiltração de água – Local 1.....	294
Figura 140 – Variação da sucção ao longo do perfil – Local 1.	295
Figura 141 – Seções de resistividade elétrica relativas à etapa de infiltração com água (primeira etapa) – Local 1.....	297
Figura 142 – Variação da resistividade elétrica em profundidade relativa à infiltração de água – Local 1.	298
Figura 143 – Comparação entre as umidades de campo e aquelas oriundas da aplicação da lei de Archie para o primeiro tipo de ensaio – Local 1.	300
Figura 144 – Variação do perfil de umidades com o tempo para solução salina – Local 1.	301

Figura 145 – Variação da sucção ao longo do perfil para a solução salina – Local 1.	302
Figura 146 – Variação das concentrações de Na ⁺ em profundidade com o tempo – Local 1.....	303
Figura 147 – Variação da razão de massa de Na ⁺ e de massa de solo $RM_{Na/S}$ – Local 1.	304
Figura 148 - Seções de resistividade elétrica relativas à etapa de infiltração com solução salina – Local 1.	305
Figura 149 – Variação do perfil de resistividade elétrica em profundidade – Local 1.	306
Figura 150 – Comparação entre as unidades de campo e aquelas oriundas da aplicação da lei de Archie para a solução salina – Local 1.	308
Figura 151 – Redistribuição da água durante a etapa de infiltração de água – Local 2.	310
Figura 152 – Variação da sucção ao longo do perfil – Local 2.	311
Figura 153 – Seções de resistividade elétrica relativas à etapa de infiltração com água (primeira etapa) – Local 2.....	313
Figura 154 – Variação da resistividade elétrica em profundidade relativa à infiltração de água – Local 2.....	314
Figura 155 – Comparação entre as unidades de campo e aquelas oriundas da aplicação da lei de Archie para o primeiro tipo de ensaio – Local 2.....	316
Figura 156 – Variação do perfil de umidades com o tempo para solução salina – Local 2.....	317
Figura 157 – Variação da sucção ao longo do perfil para a solução salina – Local 2.	318
Figura 158 – Variação das concentrações de Na ⁺ em profundidade com o tempo – Local 2.....	319
Figura 159 – Variação da razão de massa de Na ⁺ e de massa de solo $RM_{Na/S}$ – Local 2.	320
Figura 160 - Seções de resistividade elétrica relativas à etapa de infiltração com solução salina – Local 2.	321
Figura 161 – Variação do perfil de resistividade elétrica em profundidade – Local 2.	322

Figura 162 – Comparação entre as umidades de campo e aquelas oriundas da aplicação da lei de Archie para a solução salina – Local 2.....	323
Figura 163 – Redistribuição da água durante a etapa de infiltração de água – Local 3.....	325
Figura 164 – Variação da sucção ao longo do perfil – Local 3.	326
Figura 165 – Seções de resistividade elétrica relativas à etapa de infiltração com água (primeira etapa) – Local 3.	328
Figura 166 – Variação da resistividade elétrica em profundidade relativa à infiltração de água – Local 3.	329
Figura 167 – Comparação entre as umidades de campo e aquelas oriundas da aplicação da lei de Archie para o primeiro tipo de ensaio – Local 3.	330
Figura 168 – Variação do perfil de umidades com o tempo para solução salina – Local 3.	331
Figura 169 – Variação da sucção ao longo do perfil para a solução salina.	332
Figura 170 – Variação das concentrações de Na ⁺ em profundidade com o tempo – Local 3.	333
Figura 171 – Variação da razão de massa de Na ⁺ e de massa de solo $RM_{Na/S}$ – Local 2.....	334
Figura 172 - Seções de resistividade elétrica relativas à etapa de infiltração com solução salina – Local 2.....	335
Figura 173 – Variação do perfil de resistividade elétrica em profundidade.....	336
Figura 174 – Comparação entre as umidades de campo e aquelas oriundas da aplicação da lei de Archie para a solução salina.	337
Figura 175 – Processos hidrológicos simulados no programa MIKE SHE (Modificado de GRAHAM e BUTTS, 2005).	339
Figura 176 – Bacia do córrego Vaçununga: localização e mapa topográfico (Fonte: ZUQUETTE <i>et al.</i> , 2006).....	343
Figura 177 – Mapa de materiais inconsolidados e perfil geológico da bacia do córrego Vaçununga (Fonte: ZUQUETTE <i>et al.</i> , 2006).	346
Figura 178 – Mapa de uso e ocupação do solo na bacia do córrego Vaçununga (Fonte: ZUQUETTE <i>et al.</i> , 2006).	347
Figura 179 – Comportamento da infiltração frente aos diferentes tipos de uso e condições (Fonte: ZUQUETTE <i>et al.</i> , 2006).	348
Figura 180 – Precipitação diária na bacia do córrego Vaçununga (2000 a 2001). .	351

Figura 181 – comparação entre as taxas de descarga medida e simulada no exutório da bacia.....	351
Figura 182 – Condição de carga hidráulica na bacia no estágio final da simulação (31/12/2001).....	352
Figura 183 – Exemplo das variações de umidade volumétrica em profundidade para uma única coluna do grid do modelo em local ocupado por cana de açúcar durante 2000 e 2001.	353
Figura 184 – Visualização da área selecionada para a simulação.....	355
Figura 185 – Variação do IAF adotada para a cana de açúcar.	359
Figura 186 – Perfis de umidades real (tradagens) e modelado após um tempo de 2:00 horas – Local 1.....	363
Figura 187 - Perfis de umidades real (tradagens) e modelado após um tempo de 17:30 horas – Local 1.....	364
Figura 188 – Distribuição dos tamanhos de poros obtida por porosimetria de intrusão de mercúrio – Local 1.....	365
Figura 189 - Perfis de umidades após 2:00 horas: introdução da modelagem dos macroporos – Local 1.....	368
Figura 190 - Perfis de umidades após 17:30 horas: introdução da modelagem dos macroporos – Local 1.....	368
Figura 191 - Perfis de umidades após 2:00 horas: introdução da modelagem dos macroporos – Local 2.....	369
Figura 192 - Perfis de umidades após 20:00 horas: introdução da modelagem dos macroporos – Local 2.....	370
Figura 193 - Perfis de umidades após 1:30 horas: introdução da modelagem dos macroporos – Local 3.....	370
Figura 194 - Perfis de umidades após 17:30 horas: introdução da modelagem dos macroporos – Local 3.....	371
Figura 195 - Perfis de umidades após 42:00 horas: introdução da modelagem dos macroporos – Local 3.....	371
Figura 196 – Variação de umidade volumétrica ao longo do perfil: (a) matriz, (b) macroporos e (c) total – Evento A.	373
Figura 197 - Variação de umidade ao longo do perfil: (a) matriz, (b) macroporos e (c) total – Evento B.	374

Figura 198 - Variação de umidade ao longo do perfil: (a) matriz, (b) macroporos e (c) total – Evento C1.	375
Figura 199 - Variação de umidade ao longo do perfil: (a) matriz, (b) macroporos e (c) total – Evento C2.	376

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Métodos de medida de sucção (Fonte: VILAR, 2006).....	51
Tabela 2 – Equações de ajuste das curvas de retenção e respectivos parâmetros de ajuste.....	52
Tabela 3 – Principais modelos de base empírica. I(t) – infiltração acumulada; i(t) – infiltração instantânea (Fonte: SILVA, 2009).....	67
Tabela 4 – Valores típicos dos coeficientes de dispersividade.....	94
Tabela 5 – Valores de coeficiente de difusão molecular em água livre para alguns íons, $D_0 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$, (Fonte: APPELO e POSTMA, 2005).....	95
Tabela 6 – Programas computacionais frequentemente usados para simulação de fluxo e de transporte de poluentes (continua).	112
Tabela 7 - Valores de resistividade elétrica de materiais conhecidos (Fonte: ORELLANA, 1972).....	117
Tabela 8 – Componentes e atributos analisados no trabalho.	127
Tabela 9 – Atributos relacionados ao substrato rochoso	132
Tabela 10 – Classes de classificação dos maciços rochosos.	134
Tabela 11 - Critérios para avaliação dos materiais inconsolidados em termos de massa e constituintes (Fonte: ZUQUETTE e GANDOLFI, 2004).....	135
Tabela 12 - Principais tipos de materiais inconsolidados retrabalhados quanto à heterogeneidade e descontinuidade (Fonte: ZUQUETTE e GANDOLFI, 2004).....	136
Tabela 13 - Principais variações dos Materiais inconsolidados residuais (continua).	136
Tabela 14 - Resumo das litologias encontradas na área de estudo.....	166
Tabela 15 – Materiais inconsolidados encontrados na área de estudo.....	174
Tabela 16 - Resumo das principais características geológico-geotécnicas dos materiais inconsolidados encontrados na área de estudo.....	185
Tabela 17 – Tipos de uso na área de estudo.	187
Tabela 18 – Condutividade hidráulica saturada K_{sat} por material inconsolidado através de ensaios em furo.	207
Tabela 19 - Índices físicos dos materiais inconsolidados em profundidade – Ensaio LB1.....	211

Tabela 20 – Funções de condutividade hidráulica não saturada em profundidade segundo o método de Libardi <i>et al.</i> (1980) – Ensaio LB1.	212
Tabela 21 - Índices físicos dos materiais inconsolidados em profundidade – Ensaio LB2.	214
Tabela 22 – Funções de condutividade hidráulica não saturada em profundidade segundo o método de Libardi <i>et al.</i> (1980) – Ensaio LB2.	215
Tabela 23 – Resultado dos tensiômetros frente à simulação da chuva – Ensaio LB2.	216
Tabela 24 - Índices físicos dos materiais inconsolidados em profundidade – Ensaio LB3.	217
Tabela 25 – Funções de condutividade hidráulica não saturada em profundidade segundo o método de Libardi <i>et al.</i> (1980) – Ensaio LB3.	218
Tabela 26 – Caracterização física básica dos materiais inconsolidados da área de estudo.	219
Tabela 27 – Caracterização físico-química dos materiais estudados.	221
Tabela 28 – Parâmetros das curvas de retenção dos materiais segundo o modelo de van Genuchten (1980).	224
Tabela 29 – Distribuição granulométrica dos materiais inconsolidados residuais da Formação Botucatu.	227
Tabela 30 – Condutividade hidráulica saturada K_{sat} mediante ensaios em coluna.	228
Tabela 31 – Características físicas e físico-químicas dos materiais estudados.	234
Tabela 32 - Soluções utilizadas nos ensaios de equilíbrio em lote.	238
Tabela 33 - Parâmetros de sorção para os três materiais geológicos obtidos a partir dos modelos linear, Freundlich, Langmuir I e Langmuir II.	243
Tabela 34 – Localização e características dos poços de monitoramento tubulares.	258
Tabela 35 – Dados diários de precipitação (mm) – período de 02/2007 a 02/2010.	265
Tabela 36 – Precipitações mensais (mm).	266
Tabela 37 – Comparação entre registros pluviométricos do INMET e do pluviógrafo (mm).	267
Tabela 38 – Distribuição de freqüência - intervalos de classes de chuva diários. ...	268
Tabela 39 – Distribuição de freqüência - intervalos de classes de chuva em períodos horários.	268

Tabela 40 – Distribuição de freqüência - intervalos de classes de chuva em períodos de 10 minutos.....	269
Tabela 41 – Distribuição de freqüência - intervalos de classes de chuva em períodos de 5 minutos.....	269
Tabela 42 – Características dos eventos selecionados.	272
Tabela 43 - Localização e características dos poços.	273
Tabela 44 – Variação dos índices físicos dos materiais com a profundidade – Local 1.	293
Tabela 45 – Sequência de atividades para o ensaio de infiltração conjugado com geofísica – Local 1.	293
Tabela 46 – Funções de condutividade hidráulica não saturada em profundidade segundo o método de Libardi <i>et al.</i> (1980).....	296
Tabela 47 – Índices físicos dos materiais inconsolidados no Local 2.....	309
Tabela 48 – Sequência de atividades para o ensaio de infiltração conjugado com geofísica – Local 2.	309
Tabela 49 – Funções de condutividade hidráulica não saturada em profundidade segundo o método de Libardi <i>et al.</i> (1980) – Local 2.	311
Tabela 50 – Variação dos índices físicos dos materiais em profundidade – Local 3.	324
Tabela 51 – Sequência de atividades para o ensaio de infiltração conjugado com geofísica – Local 3.	324
Tabela 52 – Funções de condutividade hidráulica não saturada em profundidade segundo o método de Libardi <i>et al.</i> (1980) – Local 3.	327
Tabela 53 – Precipitação mensal entre 2000 e 2001 (mm).....	345
Tabela 54 – Parâmetros dos materiais inconsolidados considerando diferentes tipos de uso.	349
Tabela 55 – Discretização vertical utilizada na área selecionada.	356
Tabela 56 – Resultados da evapotranspiração de referência para 2009 (mm/dia).	358
Tabela 57 - Parâmetros da evapotranspiração real referentes aos tipos de uso do solo.....	359
Tabela 58 – Funções de condutividade hidráulica $K(\theta)$ das camadas simuladas – Local 1.....	363
Tabela 59 – Parâmetros de simulação adotados para as camadas do modelo.	367

Tabela 60 – Resumo dos parâmetros para modelagem validados pela calibração dos materiais inconsolidados para os Locais 1, 2 e 3. 372

SUMÁRIO

Capítulo 1 – Introdução.....	35
1.1 Objetivos gerais.....	36
1.2 Objetivos específicos	36
1.3 Justificativa.....	37
Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica.....	39
2.1 Ciclo hidrológico	40
2.2 Conceitos gerais em hidrogeologia	42
2.3 Fases constituintes dos materiais geológicos	44
2.4 Relações entre as fases	45
2.4.1 Tensão superficial.....	45
2.4.2 Capilaridade.....	46
2.4.3 Adsorção.....	47
2.5 Potenciais da água no material poroso	48
2.6 Retenção de água	49
2.6.1 Equações de ajuste para as curvas de retenção	52
2.7 Condutividade hidráulica	53
2.8 Métodos para determinação da condutividade hidráulica não saturada em campo	54
2.8.1 Permeâmetro Guelph.....	54
2.8.2 Perfil instantâneo	56
2.8.2.1 Método de umidade de Libardi <i>et al.</i> (1980).....	58
2.9 Infiltração.....	60
2.9.1 Classificação dos modelos de infiltração	63
2.9.1.1 Modelos de base teórica	63
Equação de Green-Ampt.....	63
Equação de Philip.....	65
Equação de Richards	66
2.9.1.2 Modelos de base empírica	66
2.10 Recarga.....	68
2.10.1 Estimativas de recarga	70

2.10.1.1	Balanço hídrico	71
2.10.1.2	Métodos de base física	72
	MÉTODOS FÍSICOS DE SUPERFÍCIE	72
	Medidor de fluxo de leito (seepage meter).....	72
	Descarga por fluxo de base	73
	MÉTODOS FÍSICOS APLICADOS À ZONA NÃO SATURADA.....	75
	Lisímetros	75
	Plano de fluxo zero (PFZ)	76
	Lei de Darcy	77
	MÉTODOS INDIRETOS PARA OBTENÇÃO DA UMIDADE VOLUMÉTRICA NA ZONA NÃO SATURADA.....	78
	Sensores TDR	78
	Sensores FTDR	80
	Tensiômetros	82
	Sonda de nêutrons.....	82
	MÉTODOS FÍSICOS APLICADOS À ZONA SATURADA	84
	Variação do nível de água	84
	Estimativa Darcyniana	85
2.10.1.3	Traçadores	86
	Traçadores químicos.....	88
	Traçadores isotópicos	88
2.10.1.4	Modelagens numéricas.....	89
2.11	Mecanismos de transporte de poluentes	90
2.11.1	Advecção	91
2.11.2	Dispersão hidrodinâmica.....	92
2.11.2.1	Dispersão mecânica	93
2.11.2.2	Difusão molecular	94
2.11.3	Coeficiente de retardamento	96
2.11.4	Sorção	97
2.11.4.1	Representação matemática das isotermas de sorção	101
	Condição para solução monocomponente.....	101
	Linear	101
	Freundlich	102
	Langmuir	102

Isoterma Langmuir de dois sítios.....	103
Condição para solução multicomponente.....	104
Modelo de Freundlich ampliado.....	105
2.12 Modelagem matemática	106
2.12.1 Modelagem de fluxo.....	107
2.12.2 Modelagem de transporte de poluente	109
2.12.2.1 Exemplos de programas utilizados em modelagem.....	112
MODFLOW.....	114
FEFLOW.....	114
MIKE SHE	115
2.13 Método da eletrorresistividade	115
2.13.1 Considerações gerais	115
2.13.2 Tipos de ensaios.....	117
2.13.2.1 Sondagem elétrica vertical (SEV).....	119
2.13.2.2 Caminhamento elétrico (CE).....	120
2.13.3 Aplicações	122
Capítulo 3 – Materiais e métodos.....	125
3.1 Etapa 1 – Revisão Bibliográfica.....	126
3.2 Etapa 2 – Definição dos atributos.....	126
3.3 Etapa 3 – Obtenção dos dados e geração dos documentos básicos.....	126
3.3.1 Delimitação da área de estudo	128
3.3.2 Trabalhos de escritório	129
3.3.2.1 Vetorização das cartas topográficas	129
3.3.2.2 Modelo Digital do Terreno (MDT).....	129
3.3.2.3 Ortoretificação e mosaico de fotos aéreas.....	130
3.3.2.4 Fotointerpretação	130
3.3.3 Trabalhos de campo	131
3.3.3.1 Investigação geofísica por eletrorresistividade.....	131
3.3.3.2 Substrato rochoso	131
3.3.3.3 Materiais inconsolidados	135
3.3.3.4 Amostragem.....	138
3.3.3.5 Ensaio de infiltração	139
Ensaio com infiltrômetro de duplo anel.....	139
Ensaio com permeâmetro de Guelph	141

Ensaio em furos de sondagem.....	144
Método do perfil instantâneo.....	145
3.3.3.6 Monitoramento.....	146
3.3.4 Trabalhos de laboratório.....	147
3.3.4.1 Ensaio de caracterização geotécnica básicos.....	147
3.3.4.2 Porosimetria por intrusão de mercúrio.....	148
3.3.4.3 Ensaio para a determinação dos parâmetros hidráulicos dos materiais inconsolidados.....	149
Curva de retenção de água.....	149
Rendimento específico S_y e capacidade de campo.....	150
Ensaio de colunas para determinação da condutividade hidráulica saturada	151
3.3.4.4 Ensaio de caracterização físico-química dos materiais inconsolidados	153
3.3.4.5 Ensaio de equilíbrio em lote (<i>Batch tests</i>).....	153
3.3.5 Documentos gerados.....	154
3.3.5.1 Carta de declividade.....	154
3.3.5.2 Mapa de substrato rochoso.....	154
3.3.5.3 Mapa de materiais inconsolidados.....	155
3.3.5.4 Mapa de documentação.....	155
3.3.5.5 Mapa de uso e ocupação do solo.....	155
3.3.5.6 Mapa das unidades de infiltração.....	155
3.3.5.7 Mapa de profundidade da zona saturada.....	156
3.3.5.8 Mapa das superfícies de difração hídrica.....	157
3.4 Etapa 4 – Integração dos dados e simulações.....	157
Capítulo 4 – Caracterização da área de estudo.....	159
4.1 Características gerais.....	159
4.1.1 Localização.....	159
4.1.2 Aspectos climáticos.....	160
4.1.3 Aspectos geológicos.....	161
4.1.4 Aspectos hidrológicos.....	161
4.1.5 Aspectos hidrogeológicos.....	162
4.2 Características dos materiais geológicos.....	164
4.2.1 Substrato rochoso.....	164

4.2.1.1	Formação Itaqueri	166
4.2.1.2	Formação Serra Geral.....	167
	Basaltos.....	167
	Diabásios.....	167
4.2.1.3	Formação Botucatu	168
4.2.2	Materiais inconsolidados.....	173
4.2.2.1	Retrabalhados	174
	Aluvião.....	174
	Colúvio arenoso.....	176
	Colúvio areno-argiloso.....	177
	Arenoso	178
4.2.2.2	Residuais	179
	RESIDUAIS DA FORMAÇÃO ITAQUERI.....	179
	Arenosos com finos	179
	Arenosos com finos rasos	179
	Finos (silto-argilosos).....	180
	Finos rasos.....	181
	RESIDUAIS DA FORMAÇÃO SERRA GERAL	181
	Silto argiloso raso	181
	Argiloso.....	182
	Argiloso raso.....	182
	RESIDUAIS DA FORMAÇÃO BOTUCATU	183
	Arenoso	183
	Arenoso raso	184
	Arenoso raso com fragmentos – Silicificado.....	184
4.3	Carta de declividade.....	186
4.4	Uso e ocupação do solo	186
4.5	Mapa das unidades de zoneamento quanto ao fluxo de água	187
4.6	Mapa das unidades de profundidade da zona saturada.....	189
4.7	Mapa das superfícies de difração hídrica.....	190
	Capítulo 5 – Resultados dos ensaios de campo e de laboratório.....	191
5.1	Ensaio de campo	191
5.1.1	Ensaio de geofísica de eletrorresistividade.....	191
5.1.1.1	Sondagens elétricas verticais (SEVs)	192

SEVs profundas (SVP).....	193
SEVs rasas (SEV).....	196
5.1.1.2 Caminhamento elétrico (CE)	198
5.1.2 Ensaio de infiltração	202
5.1.2.1 Duplo anel (DA)	202
Materiais inconsolidados residuais da Formação Itaqueri.....	202
Materiais inconsolidados residuais da Formação Botucatu	203
Materiais inconsolidado retrabalhado colúvio arenoso.....	205
5.1.2.2 Permeâmetro Guelph modificado	206
5.1.2.3 Ensaio em furo de trado.....	207
5.1.2.4 Ensaio do perfil instantâneo	208
LB1 – Material inconsolidado retrabalhado colúvio arenoso	208
LB2 – Material inconsolidado residual da Formação Itaqueri: uso de pastagem	213
LB3 – Material inconsolidado residual da Formação Itaqueri: terra arada ...	217
5.2 Resultados dos ensaios de laboratório	219
5.2.1 Índices físicos.....	219
5.2.2 Caracterização físico-química dos materiais inconsolidados	220
5.2.3 Curva de retenção: método do papel filtro	221
5.2.3.1 Extração das amostras	221
5.2.3.2 Execução do ensaio: técnica do papel filtro.....	222
5.2.3.3 Modelagem matemática dos resultados: curva de retenção.....	222
5.2.3.4 Correção com tradagem de campo	223
5.2.3.5 Modelagem com os resultados corrigidos e parâmetros finais	223
5.2.4 Porosimetria por intrusão de mercúrio	226
5.2.4.1 Relação com a distribuição granulométrica	227
5.2.5 Condutividade hidráulica saturada em colunas.....	228
5.3 Análise geral	228
Capítulo 6 – Ensaio de equilíbrio em lote (Batch tests)	231
6.1 Procedimentos de ensaio	231
6.2 Caracterização dos materiais inconsolidados.....	233
6.3 Caracterização das soluções multi-iônicas	238
6.4 Resultados e discussões	238
6.5 Análises parciais.....	248

Capítulo 7 – Instalação dos poços de monitoramento e dos tensiômetros.....	249
7.1 Poços de monitoramento tubulares.....	249
7.1.1 Seleção dos locais.....	249
7.1.2 Avaliação inicial.....	249
7.1.3 Perfuração.....	251
7.1.4 Colocação da tubulação, pré-filtro e filtro.....	254
7.1.5 Encerramento.....	254
7.1.6 Esquema construtivo geral dos poços.....	257
7.2 Tensiômetros.....	258
7.2.1 Calibração.....	259
7.2.2 Instalação.....	260
Capítulo 8 – Monitoramento.....	263
8.1 Dados de chuva.....	263
8.1.1 Informações gerais e dados preliminares.....	263
8.1.2 Estatística: distribuição de frequências.....	268
8.1.3 Seleção de eventos para simulação.....	270
8.2 Dados dos poços de monitoramento.....	272
8.2.1 Análise dos dados dos poços.....	274
8.3 Dados de tensiômetros.....	275
8.3.1 Análise dos dados dos tensiômetros.....	277
8.4 Análise geral do monitoramento.....	281
Capítulo 9 – Ensaio de infiltração com controle por eletrorresistividade.....	285
9.1 Procedimentos do ensaio.....	286
9.1.1 Extração de Na ⁺	289
9.1.2 Investigação geofísica - eletrorresistividade.....	290
9.2 Resultados.....	292
9.2.1 Local 1- Ensaio LB4.....	292
9.2.1.1 Primeiro tipo de ensaio.....	293
9.2.1.2 Segundo tipo de ensaio.....	301
9.2.2 Local 2 – Ensaio LB5.....	309
9.2.2.1 Primeiro tipo de ensaio.....	310
9.2.2.2 Segundo tipo de ensaio.....	317
9.2.3 Local 3 – Ensaio LB6.....	324
9.2.3.1 Primeiro tipo de ensaio.....	325

9.2.3.2 Segundo tipo de ensaio	331
9.3 Análises	338
Capítulo 10 – Modelagem no MIKE SHE	339
10.1 Evapotranspiração real (ET)	340
10.2 Caso 1 - Bacia do córrego Vaçununga	342
10.2.1 Características da área	343
10.2.2 Materiais e métodos	344
10.2.3 Dados de entrada	344
10.2.3.1 Discretização	345
10.2.3.2 Topografia	345
10.2.3.3 Dados de chuva	345
10.2.3.4 Cenário geológico	345
10.2.3.5 Uso do solo	347
10.2.3.6 Evapotranspiração de referência (E_r)	348
10.2.3.7 Condições saturadas e não saturadas dos materiais inconsolidados	349
10.2.3.8 Vazões em canais (descarga)	349
10.2.4 Validação	350
10.2.5 Resultados e discussão	350
10.3 Caso 2 – modelagem e simulações para a área de estudo	353
10.3.1 Definição da área (domínio)	354
10.3.2 Topografia	356
10.3.3 Discretização do domínio	356
10.3.4 Discretização de tempo (passo de tempo)	357
10.3.5 Dados de chuva	357
10.3.6 Evapotranspiração de referência (E_r)	357
10.3.7 Uso do solo	358
10.3.8 Características dos materiais geológicos	359
10.3.8.1 Zona saturada	360
10.3.8.2 Zona não saturada	361
10.3.9 Calibração das propriedades hidráulicas dos materiais inconsolidados	362
10.4 Resultados - eventos	372
10.5 Análise geral	378
Capítulo 11 – Conclusão	379
REFERÊNCIAS	383

APÊNDICE I – Mapa topográfico e mosaico de fotos

APÊNDICE II – Modelos Digital do Terreno (MDT)

APÊNDICE III – Carta de declividade

APÊNDICE IV – Mapa de substrato rochoso

APÊNDICE V – Mapa de materiais inconsolidados

APÊNDICE VI – Mapa de documentação

APÊNDICE VII – Mapa de uso e ocupação do solo

APÊNDICE VIII – Mapa das unidades de infiltração

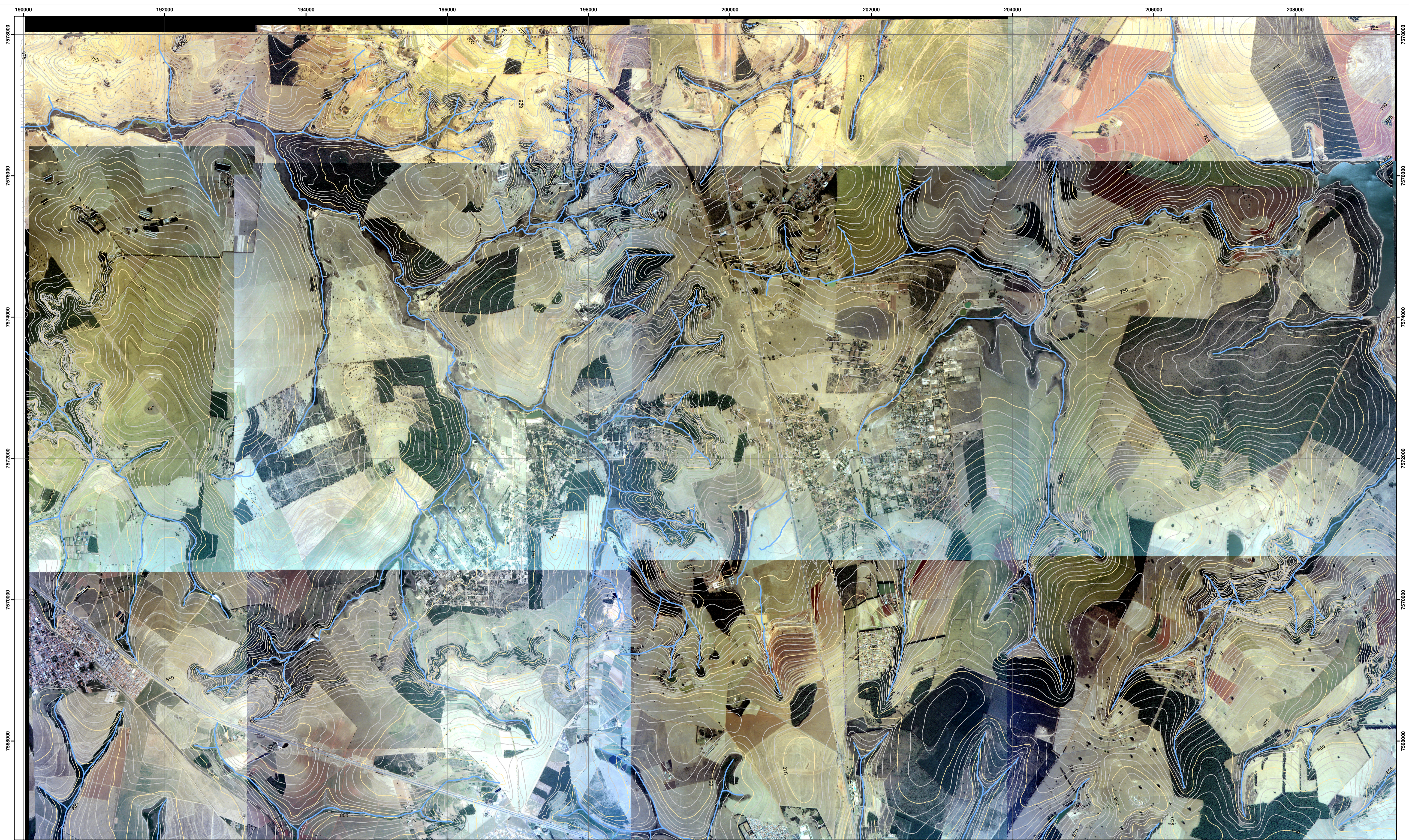
APÊNDICE IX – Mapa de profundidade da zona saturada


APÊNDICE X – Mapa das superfícies de difração hídrica

APÊNDICE XI – Perfis geológicos

APÊNDICE XII – Monitoramento dos níveis de água em poços




APÊNDICE XIII – Monitoramento das medidas dos tensiômetros





 0 500 1.000 Metros
 Escala: 1:24.701
 DATUM Horizontal: Córrego Alegre, MG
 DATUM Vertical: Imbituba, SC
 MC 45 - Zona UTM 23



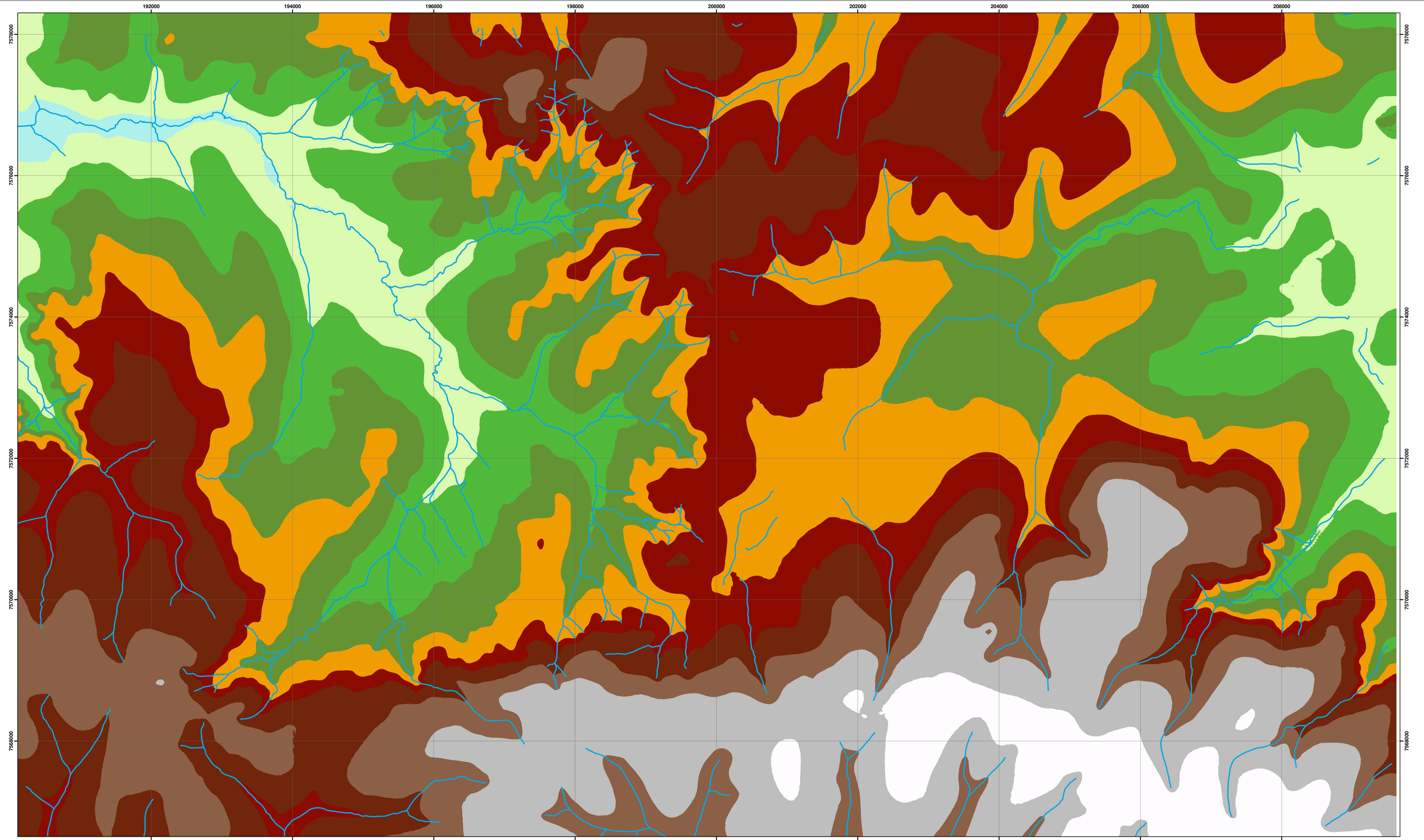
Legenda


-  Curvas de nível
-  Curvas de nível mestras
-  Drenagem

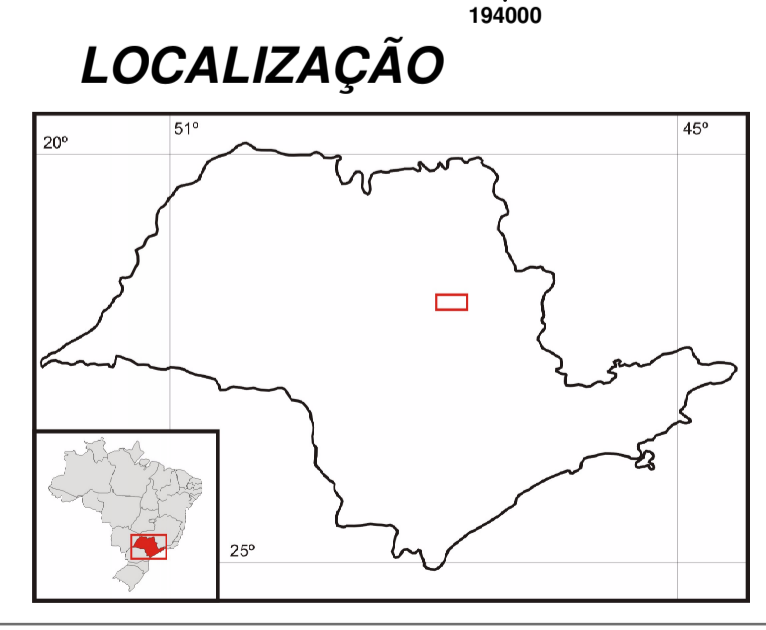
Espaçamento entre linhas: 5 m














UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO - USP
 Escola de Engenharia de São Carlos - EESC
 Departamento de Geotecnia
Mapa topográfico e mosaico de fotos
APÊNDICE I
 Autor: Júnio René Toledo Fagundes
 Orientador: Prof. Dr. Lázaro Valentin Zuquette




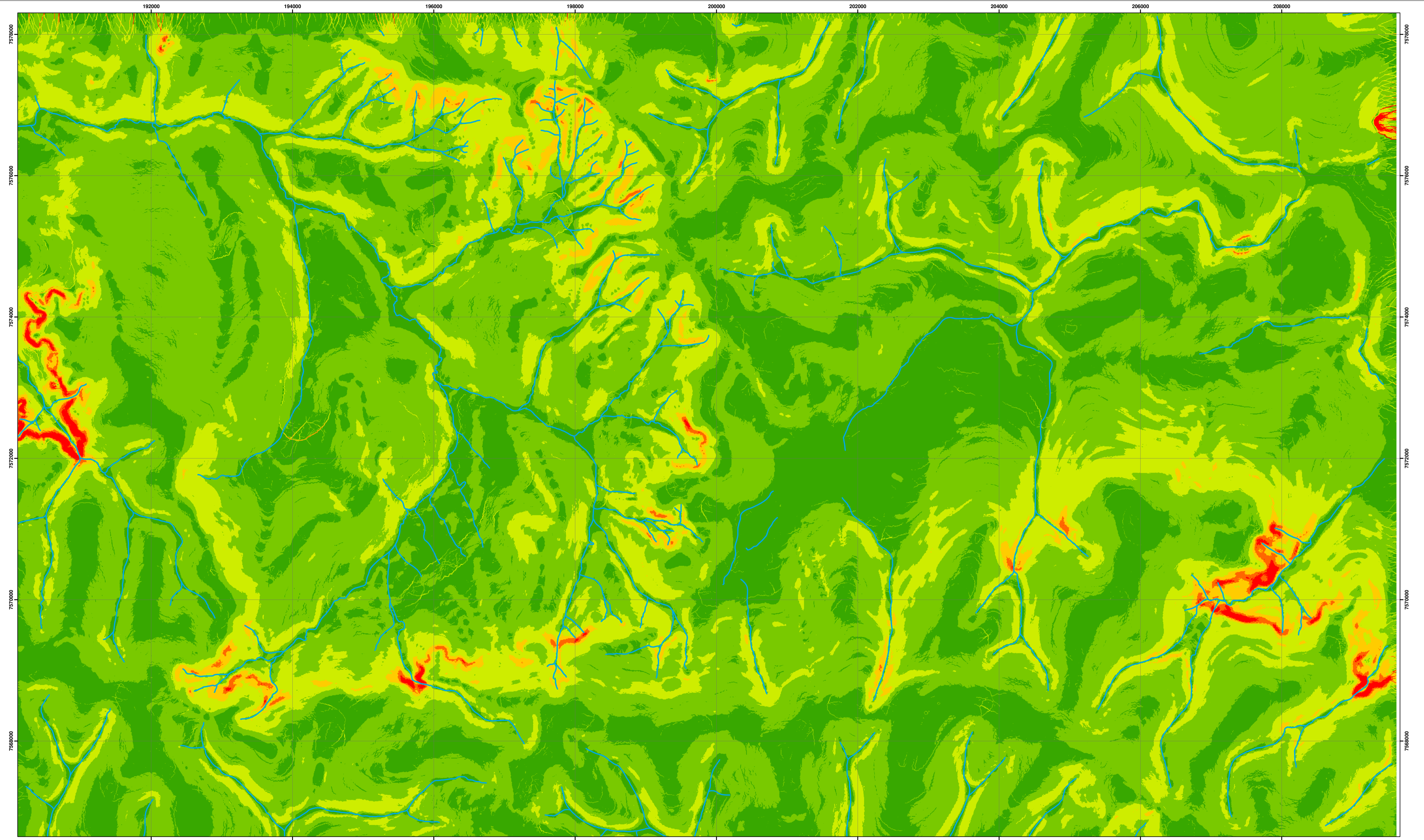

 0 500 1.000 Metros
 Escala: 1:24.701
 DATUM Horizontal: Córrego Alegre, MG
 DATUM Vertical: Imbituba, SC
 MC 45 - Zona UTM 23



Legenda
Classes de altitude (m)

 Drenagem	 775,1 - 800
 659,9 - 675	 800,1 - 825
 675,1 - 700	 825,1 - 850
 700,1 - 725	 850,1 - 875
 725,1 - 750	 875,1 - 912,1
 750,1 - 775	

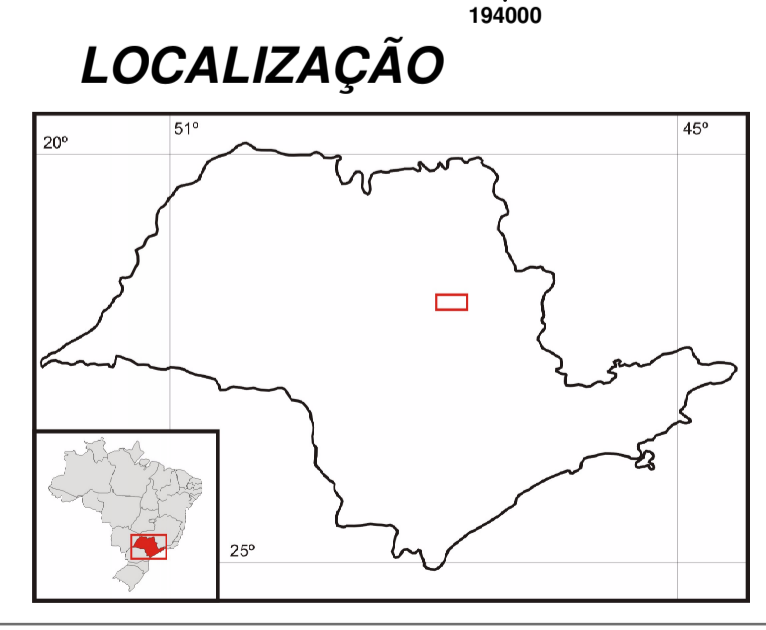

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO - USP
 Escola de Engenharia de São Carlos - EESC
 Departamento de Geotecnia
Modelo Digital do Terreno (MDT)
APÊNDICE II
 Autor: Júnio René Toledo Fagundes
 Orientador: Prof. Dr. Lázaro Valentin Zuquette



0 500 1.000 Metros


Escala: 1:24.701

DATUM Horizontal: Córrego Alegre, MG
DATUM Vertical: Imbituba, SC
MC 45 - Zona UTM 23



Legenda
Classes de declividade (°)

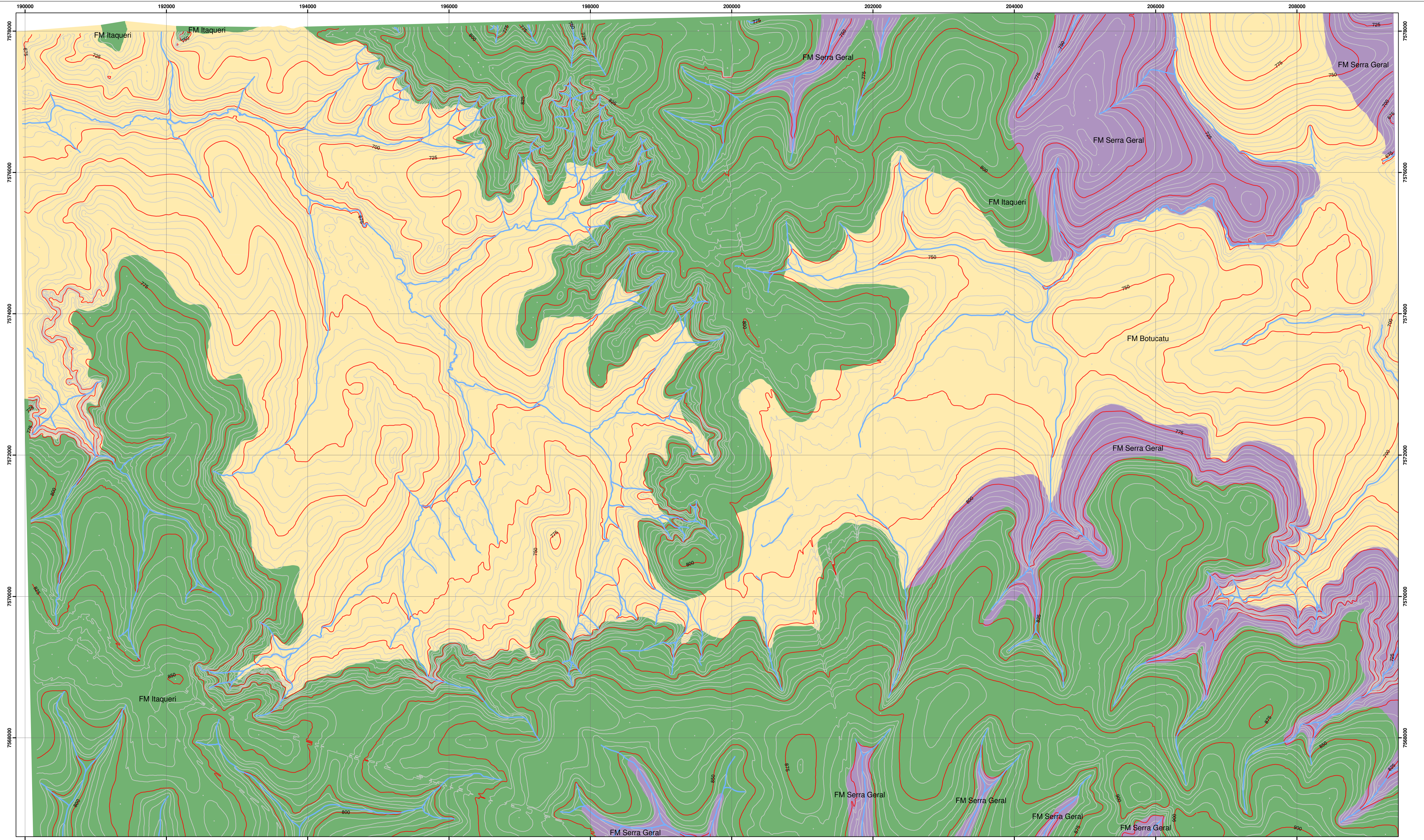
	Drenagem
	0 - 2
	2,01 - 5
	5,01 - 10
	10,1 - 15
	15,1 - 20
	20,1 - 45

 UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO - USP
Escola de Engenharia de São Carlos - EESC
Departamento de Geotecnia

Carta de declividade

APÊNDICE III

Autor: Júnio René Toledo Fagundes
Orientador: Prof. Dr. Lázaro Valentin Zuquette



LOCALIZAÇÃO

Escala: 1:24.701

DATUM Horizontal: Córrego Alegre, MG
 DATUM Vertical: Imbituba, SC
 MC 45 - Zona UTM 23

Legenda

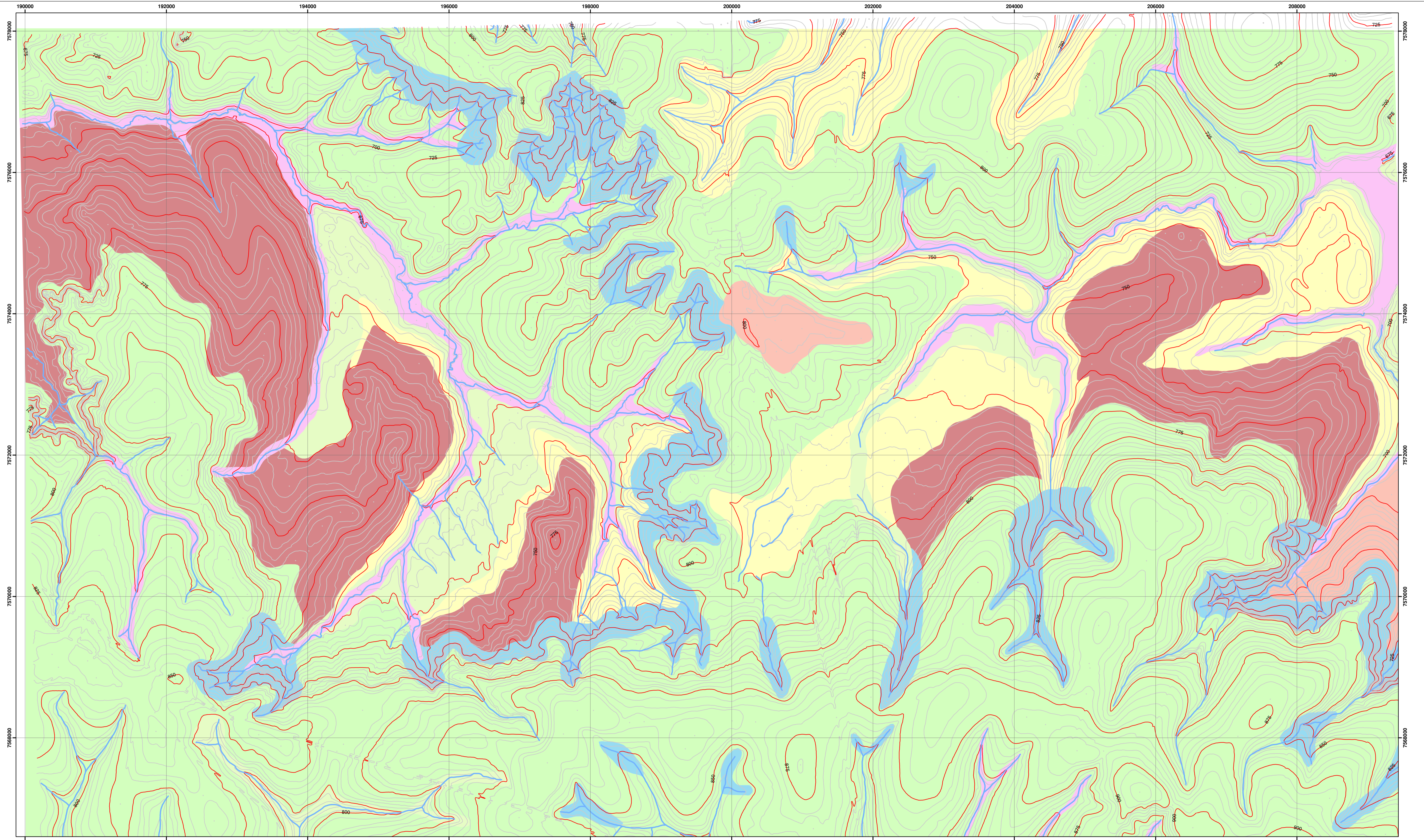
	Drenagem	Substrato Rochoso
	Curvas de nível mestras	
	Curvas de nível	

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO - USP
 Escola de Engenharia de São Carlos - EESC
 Departamento de Geotecnia

Mapa de substrato rochoso

APÊNDICE IV

Autor: Júnio René Toledo Fagundes
Orientador: Prof. Dr. Lázaro Valentin Zuquette



LOCALIZAÇÃO

Escala: 1:24.701

DATUM Horizontal: Córrego Alegre, MG
 DATUM Vertical: Imbituba, SC
 MC 45 - Zona UTM 23

Legenda

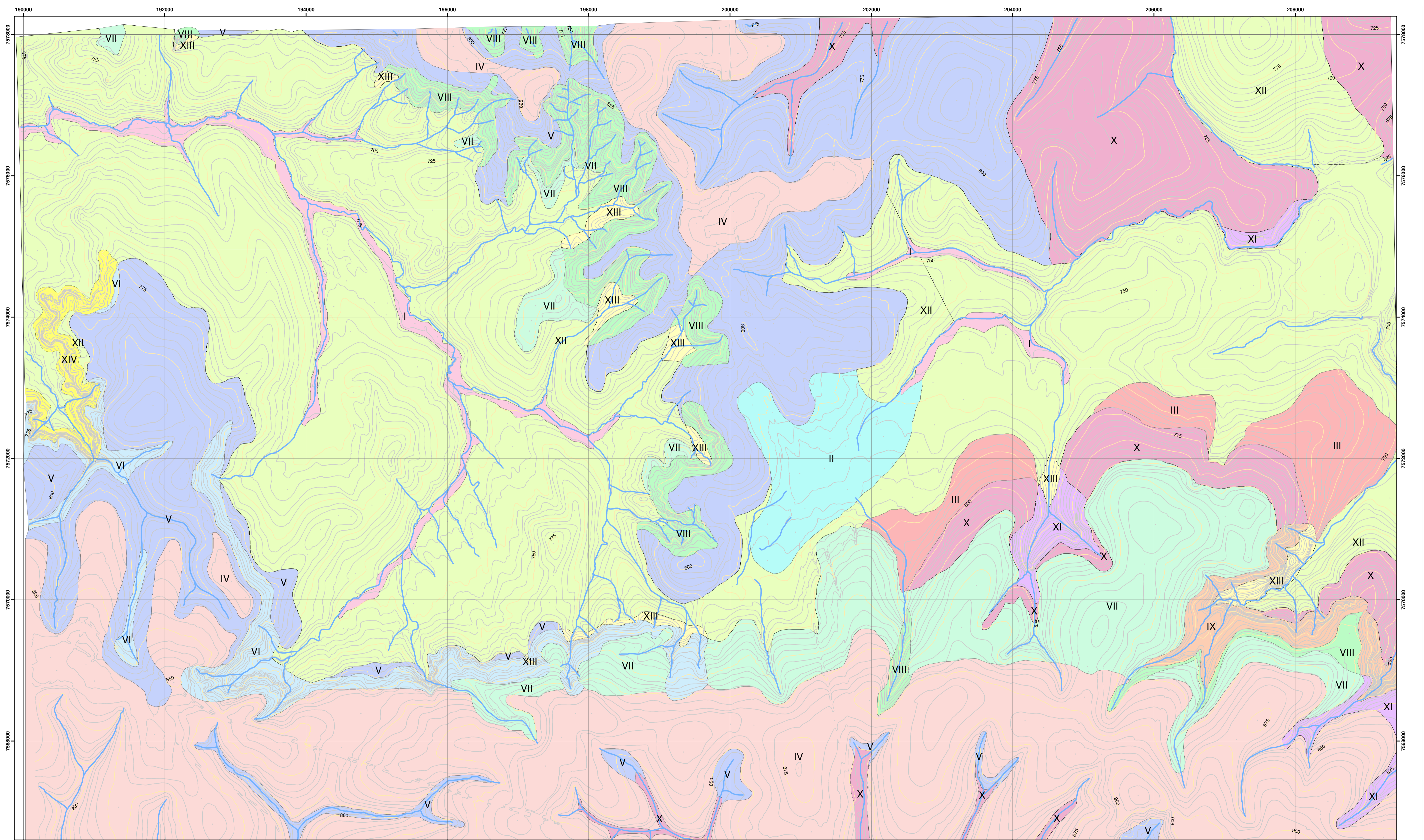
Drenagem	< 2
Curvas de nível mestras	2 - 5
Curvas de nível	5 - 10
Classes de profundidade (m)	10 - 15
Area de descarga	15-20
	> 20

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO - USP
 Escola de Engenharia de São Carlos - EESC
 Departamento de Geotecnia

Mapa de profundidade da zona saturada

APÊNDICE IX

Autor: Júnio René Toledo Fagundes
Orientador: Prof. Dr. Lázaro Valentin Zuquette



Escala: 1:24.701

DATUM Horizontal: Córrego Alegre, MG

DATUM Vertical: Imbituba, SC

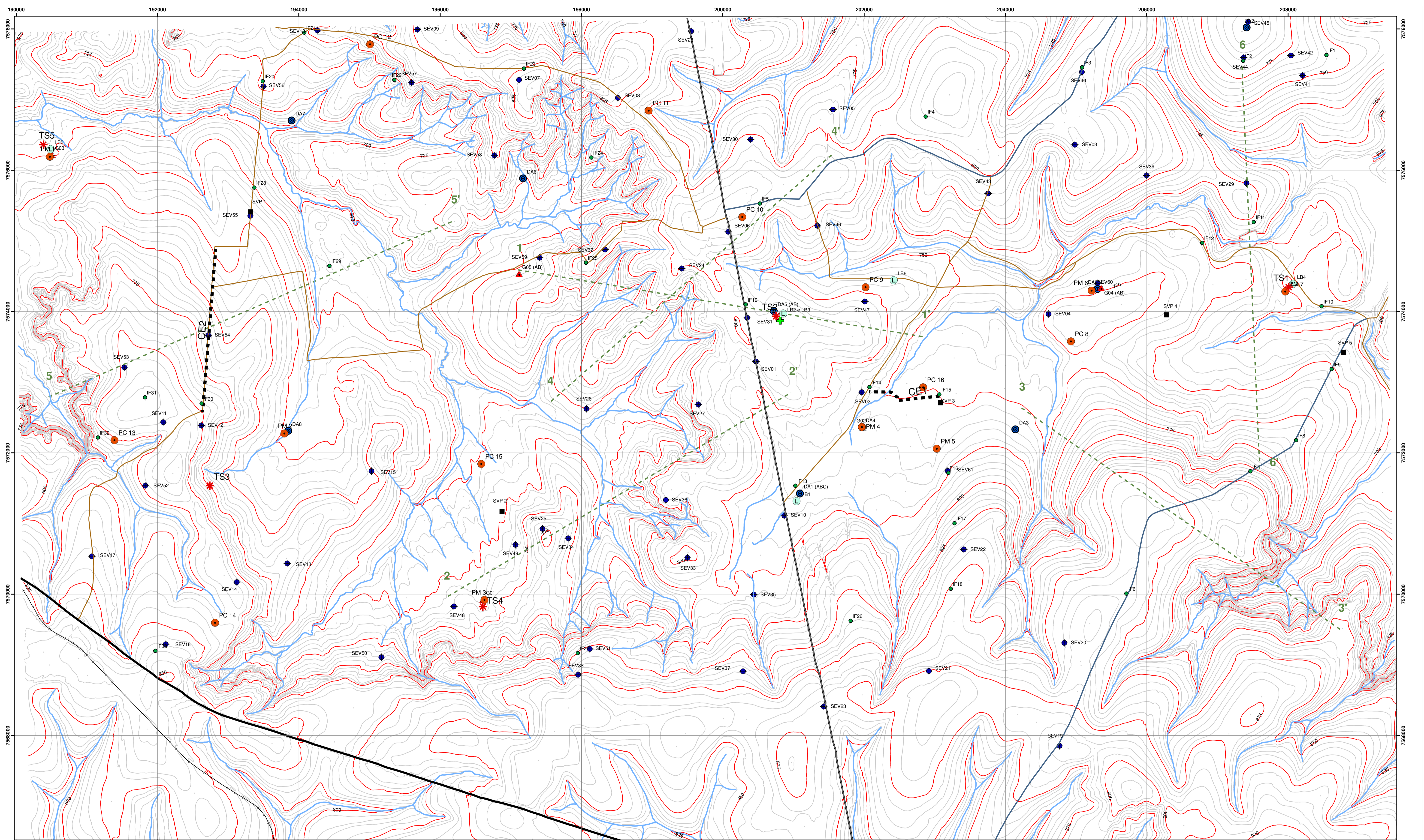
MC 45 - Zona UTM 23



Legenda

Curvas de nível	III - RT Colúvio areno-argiloso	X - RS FM SG Argiloso
Curvas de nível mestras	IV - RT Arenoso	XI - RS FM SG Argiloso raso
Drenagem	IX - RS FM SG Silto-argiloso raso	XII - RS FM BO Arenoso
Materiais Inconsolidados	V - RS FM IT Arenosos c/ finos	XIII - RS FM BO Arenoso raso
I - RT Aluvião	VI - RS FM IT Arenosos c/ finos rasos	XIV - FM BO Silicificado
II - RT Colúvio arenoso	VII - RS FM IT Finos	
	VIII - RS FM IT Finos rasos	

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO - USP
Escola de Engenharia de São Carlos - EESC
Departamento de Geotecnia
Mapa de materiais inconsolidados
APÊNDICE V
Autor: Júnio René Toledo Fagundes
Orientador: Prof. Dr. Lázaro Valentin Zuquette



Escala: 1:24.701

 DATUM Horizontal: Córrego Alegre, MG

 DATUM Vertical: Imbituba, SC

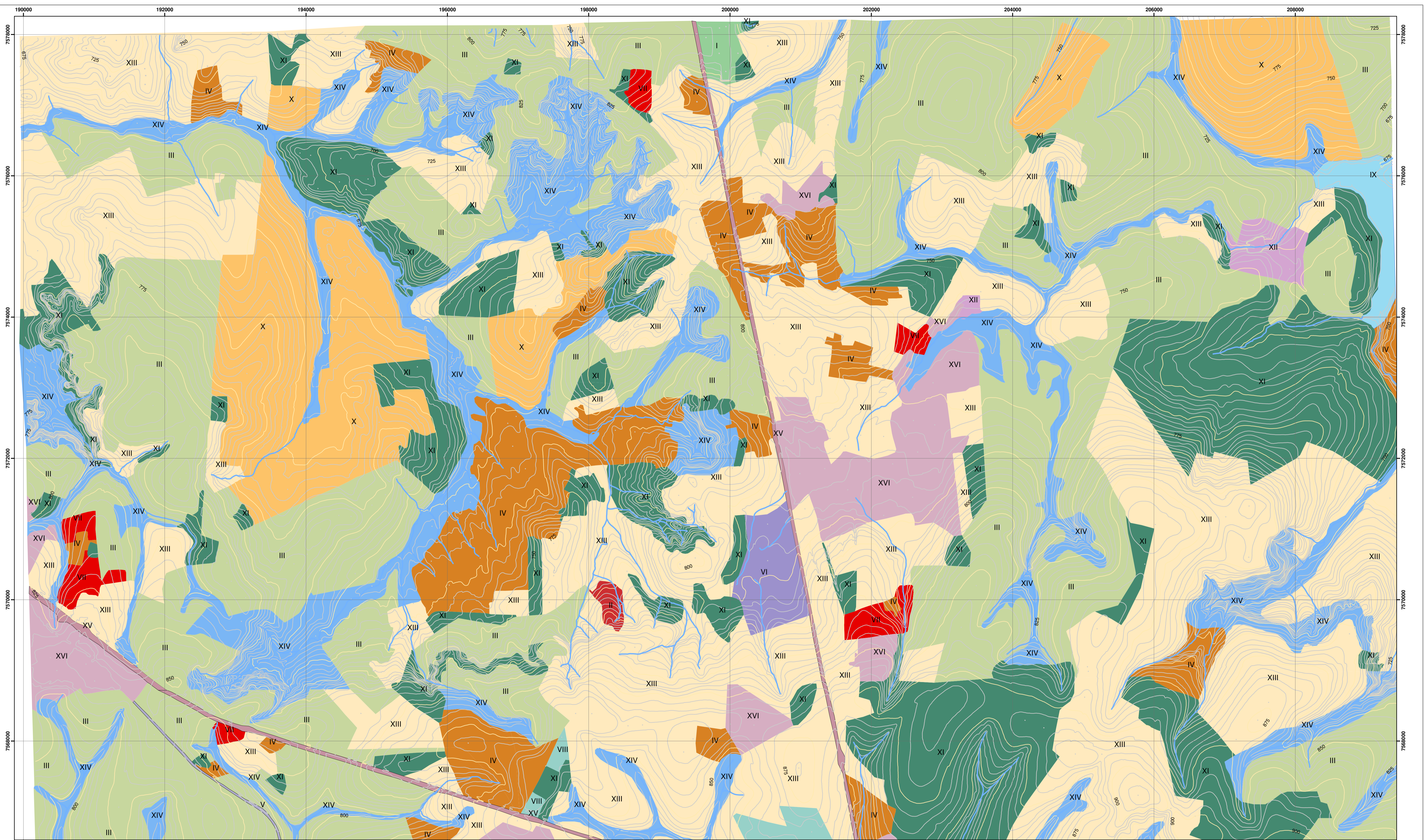
 MC 45 - Zona UTM 23



Legenda

— Curvas de nível	+	Pluviôgrafo
— Curvas de nível mestras	●	Poços de monitoramento (PM ou PC)
— Drenagem	✳	Tensiometro
— Seções geológicas	●	Duplo Anel (DA)
Estradas	▲	Guelph (G)
— Estrada de terra	●	Infiltração em furo (IF)
— Estrada asfaltada	●	Libardi (LB)
— Rodovia SP-310	■	SEV profunda (SVP)
— Rodovia SP-318	◆	SEV
— Ferrovia	■	Caminhamento elétrico (CE)

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO - USP
Escola de Engenharia de São Carlos - EESC
Departamento de Geotecnia
Mapa de documentação
APÊNDICE VI
Autor: Júnio René Toledo Fagundes
Orientador: Prof. Dr. Lázaro Valentin Zuquette



Escala: 1:24.701

 DATUM Horizontal: Córrego Alegre, MG

 DATUM Vertical: Imbituba, SC

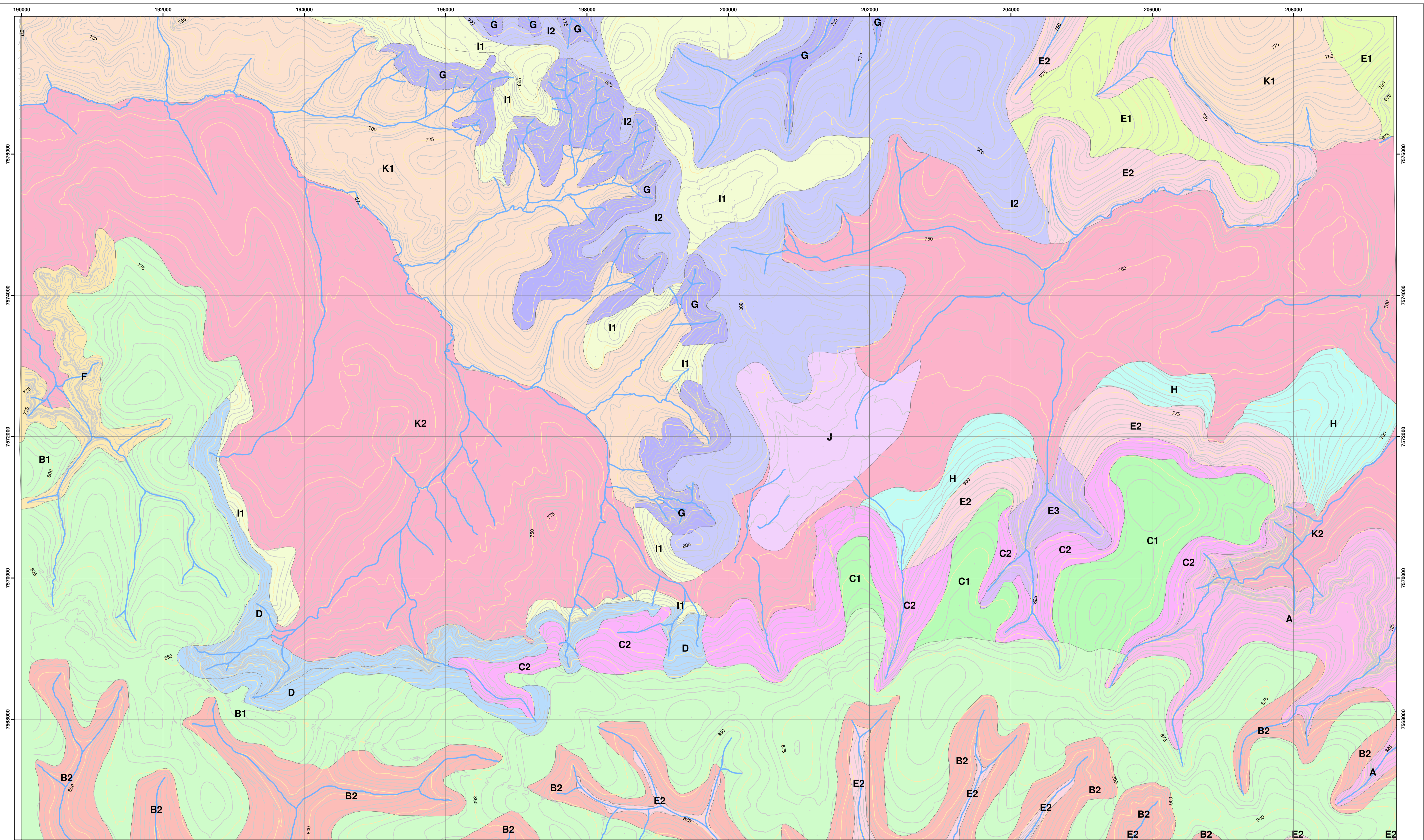
 MC 45 - Zona UTM 23



Legenda

— Curvas de nível	IV - Chácara	XI - Mata
— Curvas de nível mestras	V - Ferrovia	XII - Mineração
— Drenagem	VI - Golfe	XIII - Pasto
USO E OCUPAÇÃO DO SOLO	VII - Hortaliças	XIV - Pasto e água
I - Aeroporto	VIII - Industrial	XV - Rodovia
II - Aterro sanitário	IX - Lago	XVI - Urbano
III - Cana	X - Laranja	

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO - USP
 Escola de Engenharia de São Carlos - EESC
 Departamento de Geotecnia
Mapa de uso e ocupação do solo
APÊNDICE VII
 Autor: Júnio René Toledo Fagundes
 Orientador: Prof. Dr. Lázaro Valentin Zuquette



Escala: 1:24.701

 DATUM Horizontal: Córrego Alegre, MG

 DATUM Vertical: Imbituba, SC

 MC 45 - Zona UTM 23



Legenda

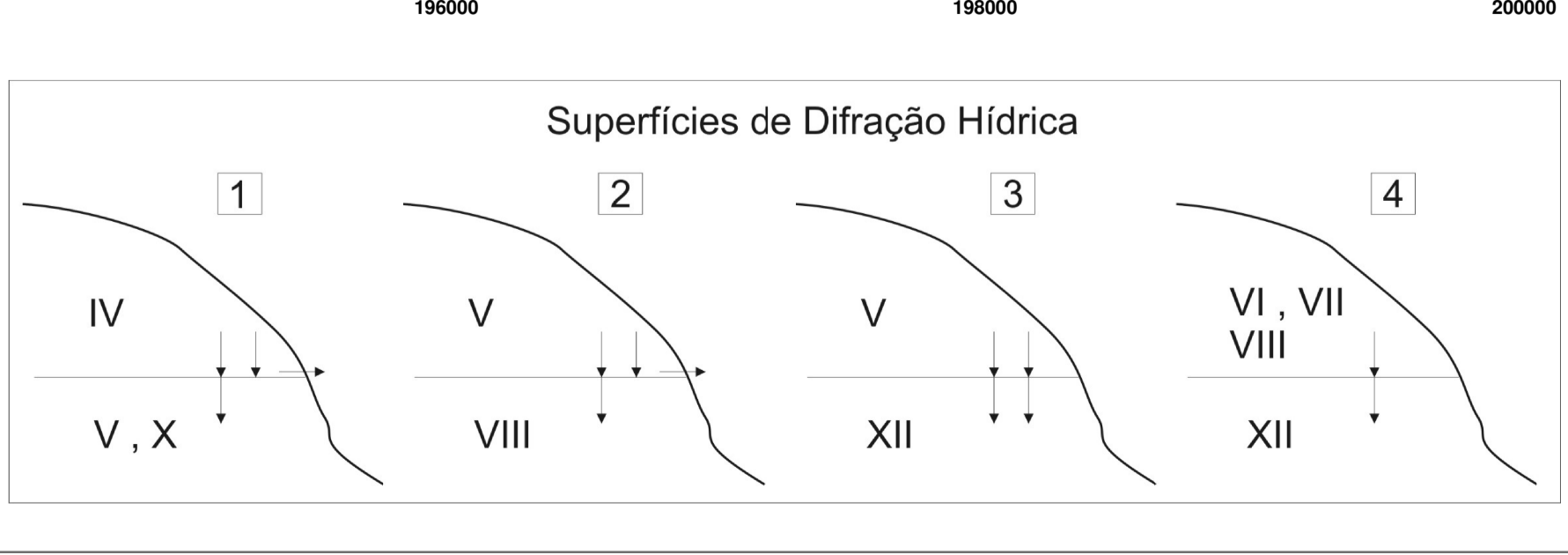
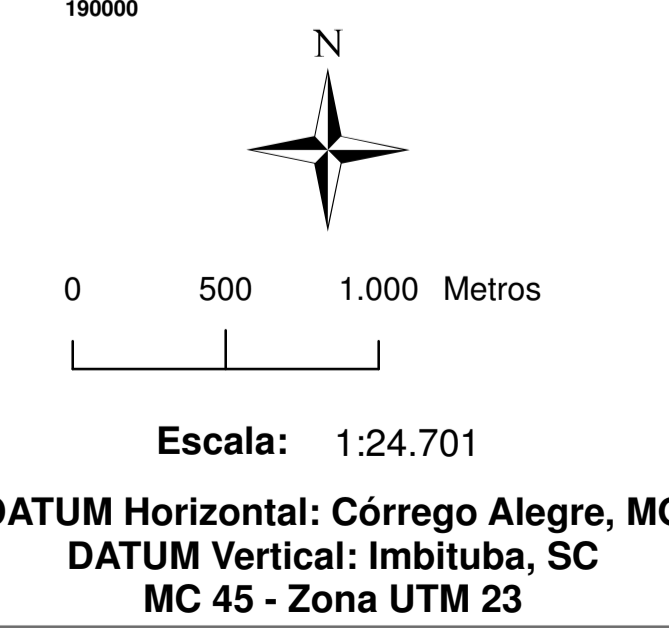
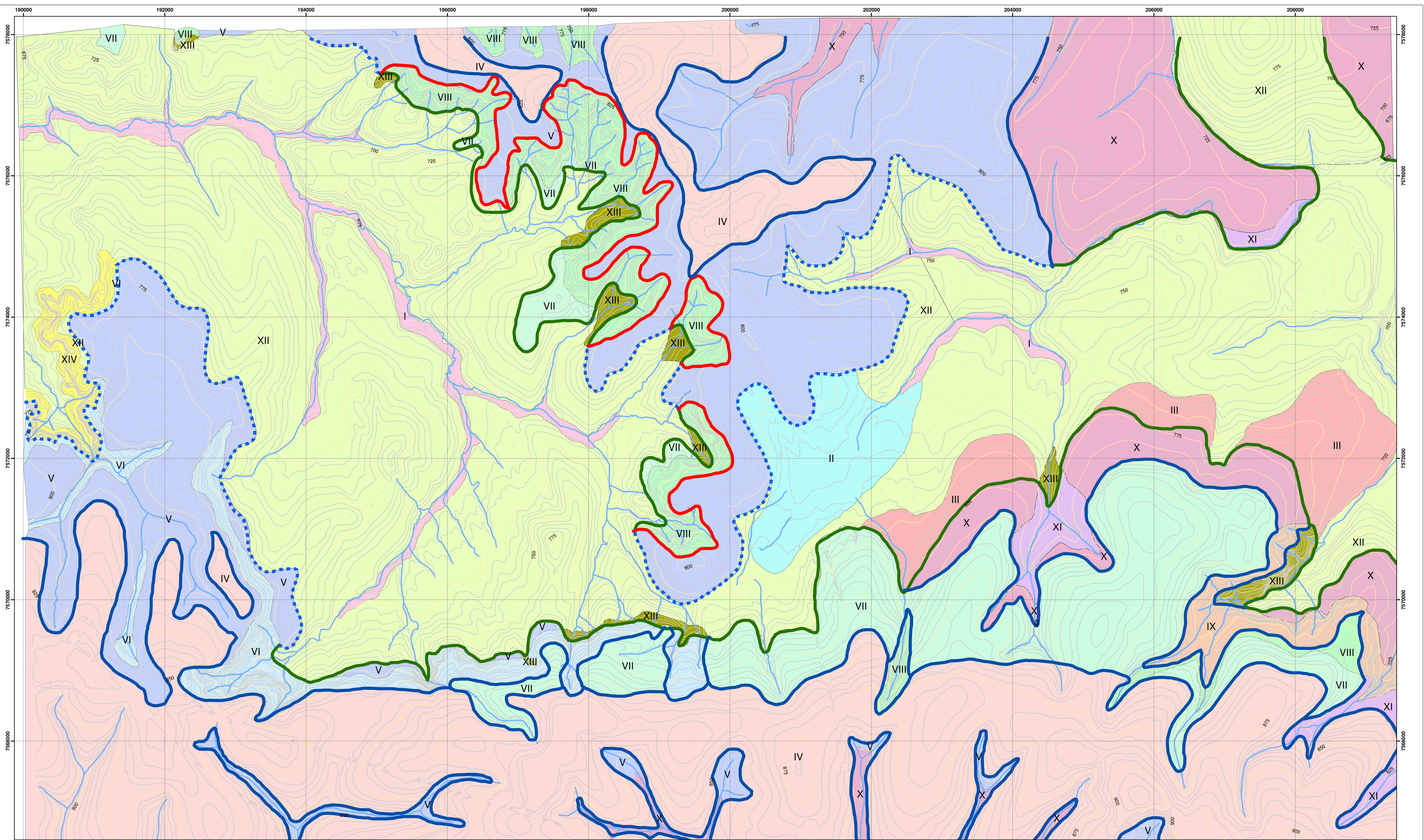
—	Curvas de nível	■	C2	■	H
—	Curvas de nível mestras	■	D	■	I1
—	Drenagem	■	E1	■	I2
Unidades de infiltração		■	E2	■	J
■	A	■	E3	■	K1
■	B1	■	F	■	K2
■	B2	■	G		
■	C1				

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO - USP
 Escola de Engenharia de São Carlos - EESC
 Departamento de Geotecnia

Mapa das unidades de infiltração

APÊNDICE VIII

Autor: Júnio René Toledo Fagundes
 Orientador: Prof. Dr. Lázaro Valentin Zuquette



Legenda

Superfície de difração hídrica	Materiais Inconsolidados
1	I - RT Aluvião
2	II - RT Colúvio arenoso
3	III - RT Colúvio areno-argiloso
4	IV - RT Arenoso
Curvas de nível	IX - RS FM SG Silto-argiloso raso
Curvas de nível mestras	V - RS FM IT Arenosos c/ finos
Drenagem	VI - RS FM IT Arenosos c/ finos rasos
	VII - RS FM IT Finos
	VIII - RS FM IT Finos rasos
	X - RS FM SG Argiloso
	XI - RS FM SG Argiloso raso
	XII - RS FM BO Arenoso
	XIII - RS FM BO Arenoso raso
	XIV - FM BO Silicificado

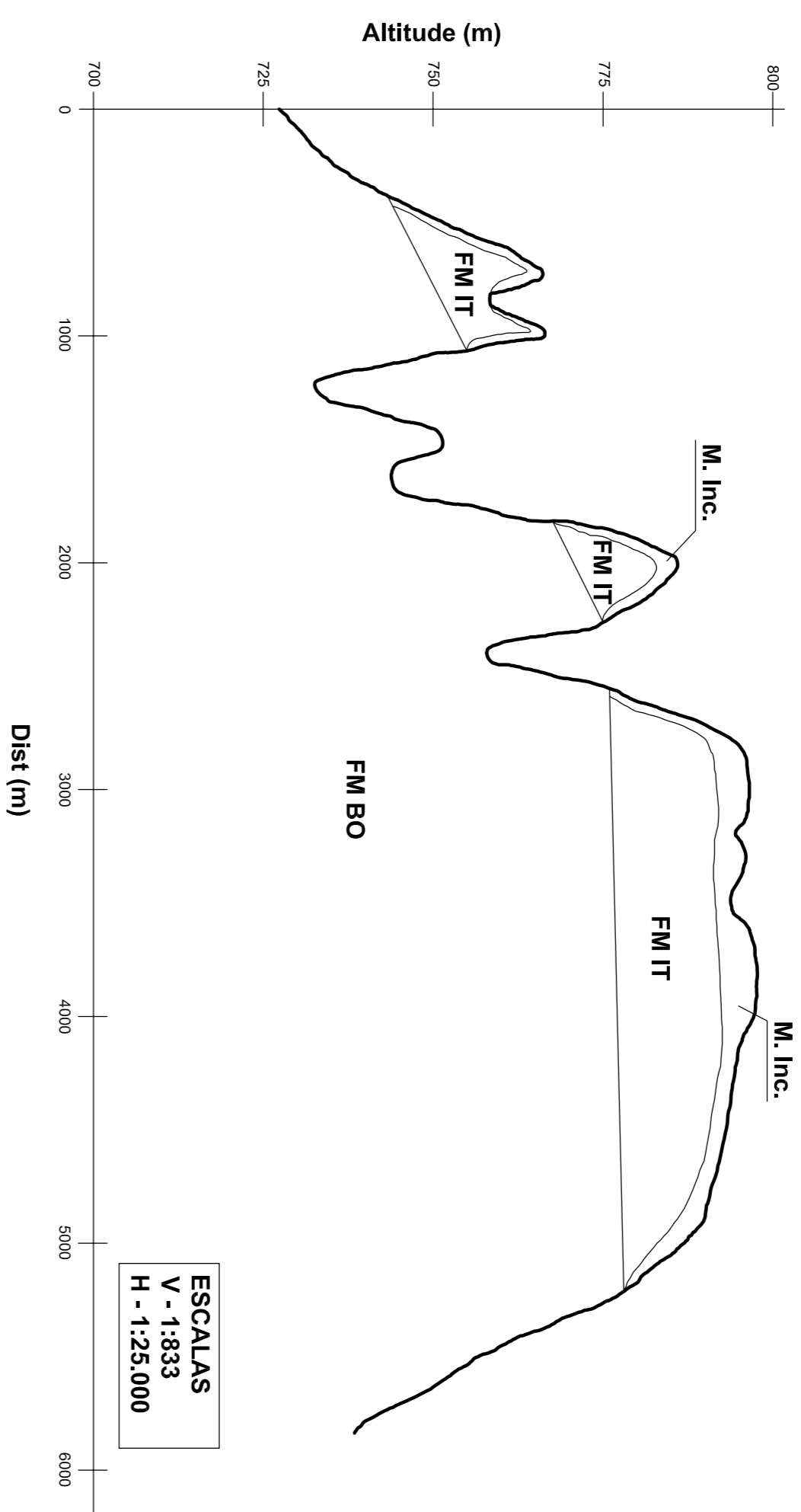
UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO - USP
Escola de Engenharia de São Carlos - EESC
Departamento de Geotecnia

Mapa das superfícies de difração hídrica

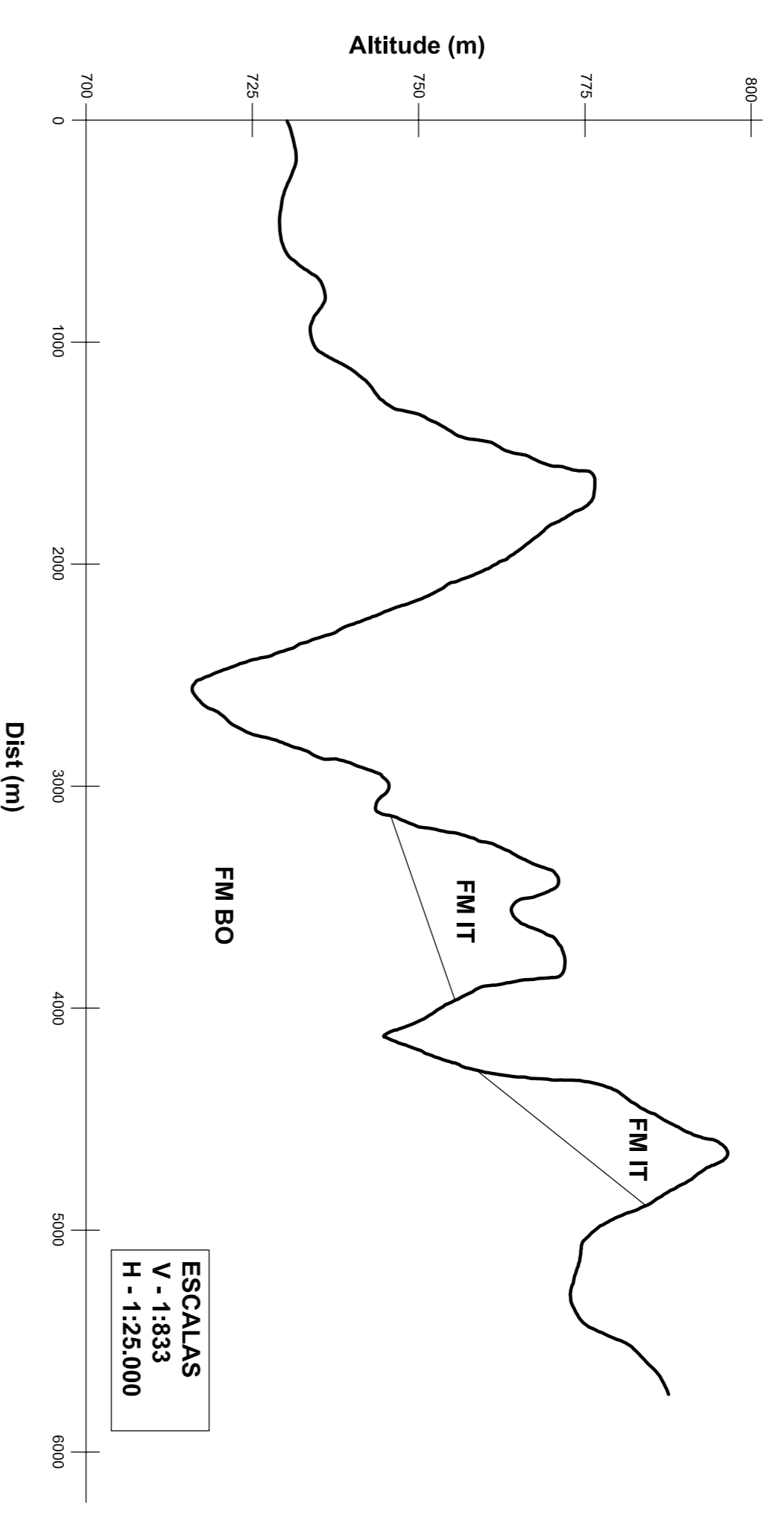
APÊNDICE X

Autor: Júnio René Toledo Fagundes
Orientador: Prof. Dr. Lázaro Valentin Zuquette

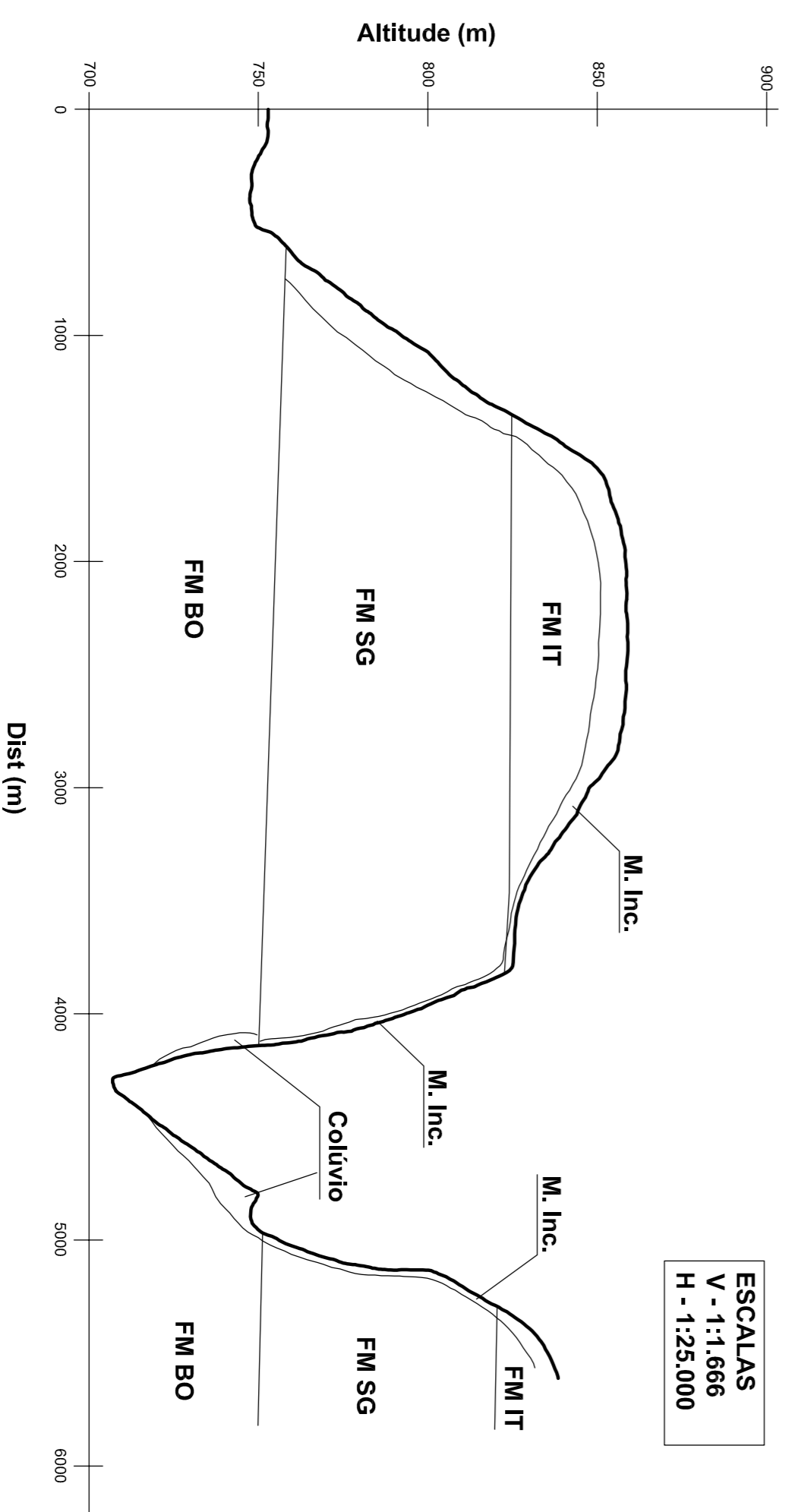
APÉNDICE XI - Perfil 1 - 1'



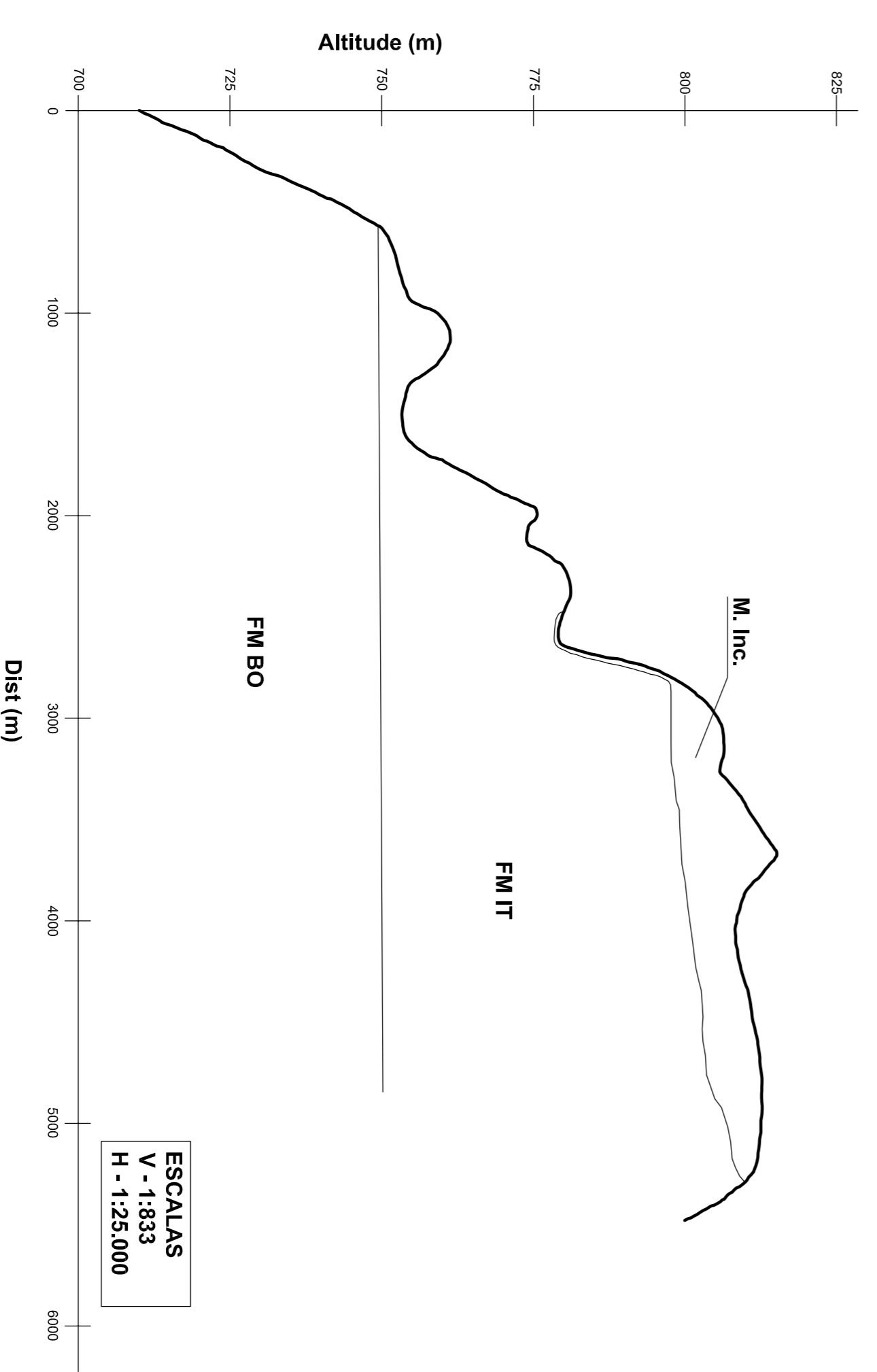
APÉNDICE XI - Perfil 2 - 2'



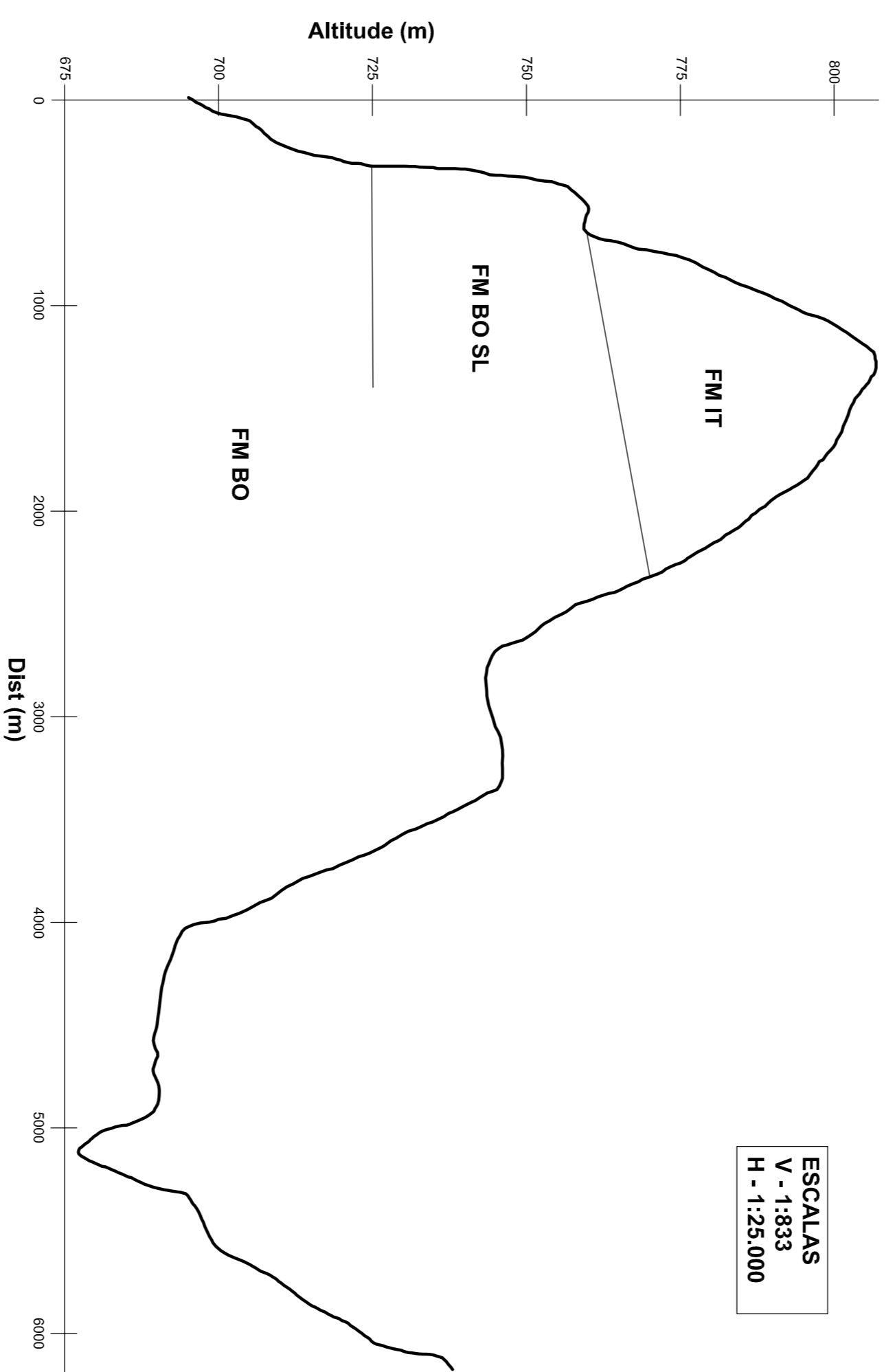
APÉNDICE XI - Perfil 3 - 3'



APÉNDICE XI - Perfil 4 - 4'

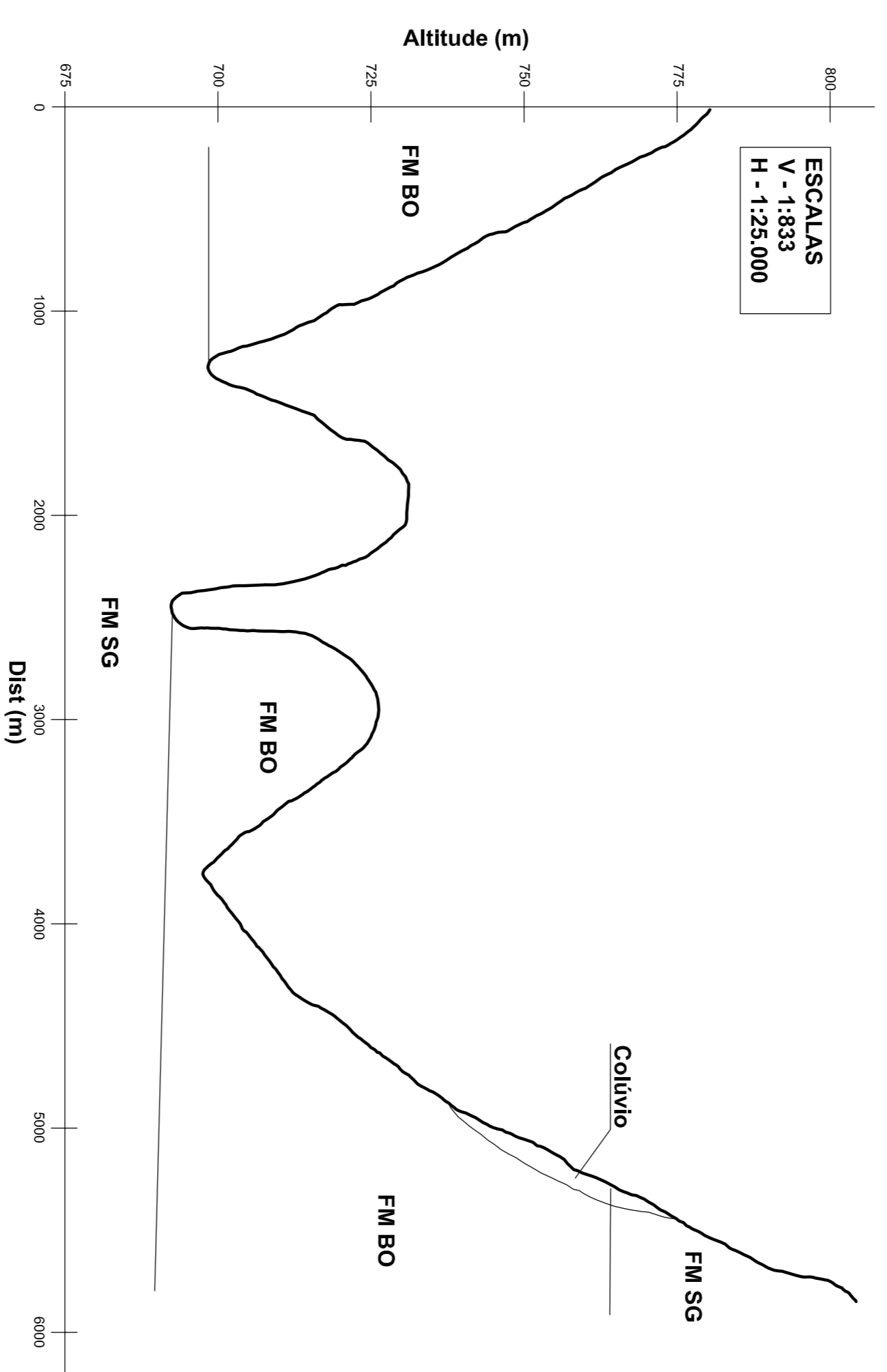


APÊNDICE XI - Perfil 5 - 5'



ESCALAS
V - 1:833
H - 1:25,000

APÊNDICE XI - Perfil 6 - 6'



ESCALAS
V - 1:833
H - 1:25,000

