

VALTEIR VIEIRA MARQUES

**FRAGILIDADE AMBIENTAL ASSOCIADA À CONECTIVIDADE DO
ESCOAMENTO SUPERFICIAL INDIRETO NA BACIA DO RIO
PIRAJIBU-MIRIM, SOROCABA/SP**

Sorocaba
2017

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO em

*ciências
ambientais*

VALTEIR VIEIRA MARQUES

**FRAGILIDADE AMBIENTAL ASSOCIADA À CONECTIVIDADE DO
ESCOAMENTO SUPERFICIAL INDIRETO NA BACIA DO RIO
PIRAJIBU-MIRIM, SOROCABA/SP**

Dissertação apresentada como requisito para a obtenção do título de Mestre em Ciências Ambientais da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” na Área de Concentração “Geoprocessamento e modelagem matemática”.

Orientador: Prof. Dr. Roberto Wagner Lourenço

Sorocaba
2017

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO em

ciências
ambientais



Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca da Unesp
Instituto de Ciência e Tecnologia – Câmpus de Sorocaba

Marques, Valteir Vieira.

Fragilidade ambiental associada à conectividade do escoamento superficial indireto na bacia do Rio Pirajibu-Mirim, Sorocaba/SP / Valteir Vieira Marques, 2017.

104 f.: il.

Orientador: Roberto Wagner Lourenço.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho". Instituto de Ciência e Tecnologia (Câmpus de Sorocaba), 2017.

1. Bacias hidrográficas. 2. Escoamento. 3. Degradação ambiental. 4. Sorocaba-SP. I. Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho". Instituto de Ciência e Tecnologia (Câmpus de Sorocaba). II. Título.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Sorocaba

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: Fragilidade ambiental associada à conectividade do escoamento superficial indireto na bacia do Rio Pirajibu-Mirim, Sorocaba/SP

AUTOR: VALTEIR VIEIRA MARQUES

ORIENTADOR: ROBERTO WAGNER LOURENCO

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em CIÊNCIAS AMBIENTAIS, área: Diagnóstico, Tratamento e Recuperação Ambiental pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. ROBERTO WAGNER LOURENCO
Ciências Ambientais / UNESP Sorocaba

Prof. Dr. JOSÉ LUIZ ALBUQUERQUE FILHO
Centro de Tecnologias Geoambientais / IPT

Prof. Dr. NOBEL PENTEADO DE FREITAS
Engenharia Ambiental / Universidade de Sorocaba (UNISO)

Sorocaba, 03 de março de 2017

Dedico primeiramente a meus pais, João e Maria, que fizeram de tudo para que prosseguisse estudando ao fim do ensino médio, e assim me deram a oportunidade única de descobrir que um novo mundo existia além dos meus olhos naquele momento. A meu pai em especial, talvez nem tenha consciência disto, diante da sua simplicidade de agricultor. Mas foi ele que me introduziu nas ciências ambientais antes mesmo que eu a conhecesse. Com seus inúmeros questionamentos sobre a natureza, detalhadas observações para compreender como funcionava, e suas definições de forma simplista, mas quase sempre acertadas. E acima de tudo, da consciência de que dela fazemos parte, e somos dependentes.

Dedico aos grandes amores da minha vida, minha senhora Silvana, que a cada dia, dá mais brilho ao meu sol, e meus filhos, Isabelli e Leonardo, pelo imenso apoio, amor, e compreensão da minha ausência. Sem vocês, não haveria qualquer sentido em evoluir para ser um homem melhor.

Dedico a outro grande amor, minha irmã Viviane, pelo amor, amizade, apoio incondicional, exemplo, e por me fazer acreditar, que ainda é possível retomar a esse caminho tão desejado.

E não poderia deixar de dedicar a meu amigo Fabio Augusto, não fosse sua influência e persistência, nem teria iniciado esta jornada.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela vida maravilhosa, e por me fazer morada do Espírito Santo, cujos dons guiam meu norte.

Agradeço a todos os servidores da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” do Câmpus de Sorocaba, dos quais sinto orgulho de ter convivido neste período, pois sem exceção, além da competência e seriedade, dedicam-se com amor ao desempenho de suas funções, o que faz desta instituição merecedora de seu sucesso, e carregada de uma dignidade humana extraordinária.

Dentre estes, agradeço especialmente aos professores das disciplinas frequentadas no programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, cujos nomes faço questão de citar: Prof. Dr. Leonardo Fernandes Fraceto, Dr. André Henrique Rosa, Dr. Roberto Wagner Lourenço, Dr. Manuel Enrique Gamero Guandique, Dra. Melanie Kah (Universidade de Viena), Dra. Viviane Moschini Carlos, Dr. Marcelo Luiz Martins Pompêo (IB-USP), Dr. José Arnaldo Frutuoso Roveda, Dra. Sandra Regina Monteiro Masalskiene Roveda, Dra. Cidália Costa Fonte (Universidade de Coimbra), Dr. Ernesto Lopez-Baeza (Universidade de Valência), Dr. Francisco de Assis Cavallaro (IG-USP), Dr. Emerson Rodrigo Almeida (IAG-USP), Me. Wagner França Aquino (GPR Geofísica). Embora já eternizados na minha mente, para que fique também registrado nestas paginas que provavelmente irão durar mais que minhas memórias, que de cada um destes, além da valiosa transmissão de conhecimento de elevada competência, também recebi inspiração.

Ao Prof. Dr. Roberto Wagner Lourenço, também pela orientação, e acima de tudo pela paciência das minhas oscilações frente ao relevo acidentado que tive de percorrer.

Agradeço ao Conselho do Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, por conceder voto de confiança no compromisso reafirmado para a conclusão das obrigações assumidas com o programa, diante da solicitação de suspensão da matrícula durante o decorrer do mestrado.

Agradeço a todos os amigos que conheci durante esta trajetória na UNESP, e mesmo que sobre relevo acidentado, fizeram do caminho extremamente agradável. É difícil citar todos, mas sem a pretensão de reduzir o carinho pelos demais, não posso deixar de citar aqueles cuja convivência e ou apoio foram especiais: Fabíola, Vinícius, Darllan, Carlos Humberto, Jomil, Hélio, Alex, Francisco, Adriano, Maurício, Murilo, Sheila, Fábio, Claudia, Diego, Isaias, José Carlos e Elfany.

Agradeço a toda minha família, que não é pequena! E que de certa forma, de cada um, carrego um pouquinho no que sou.

Agradeço também os amigos criados nestes 17 anos em Sorocaba, que hoje é também minha família, e de uma forma ou outra me apoiaram intensamente nestes anos do mestrado.

Agradeço ao em breve “Eng.^o Quím.” Danilo André Garcia, pois somente com a sua eficiente ajuda no dia a dia profissional, fui capaz de me libertar das incansáveis noites de trabalho, convertendo-as na devida dedicação ao mestrado.

“[...] existe uma dicotomia total entre o poder e o conhecimento. Eu sou da área do conhecimento e da área dessa consciência, consciência que cada um adquiriu através de conhecimentos e sentimentalidades. Bom, nos países do Terceiro Mundo, na medida em que o processo histórico evoluiu, Independência, República etc., o poder começou a se tornar extremamente forte e só se baseia nas expectativas desse pedacinho menor, a pontinha, que representa as elites poderosas. O problema essencial é o fato de o poder estar quase totalmente desvinculado dos conhecimentos, adquirindo uma força monolítica que despreza o conhecimento. Isso é o que eu penso que seja ética: unir a ética do poder e a de todos os conhecedores.”

(AB’SÁBER, 2001 apud CORDEIRO, 2013)

MARQUES, V. V. **Fragilidade ambiental associada à conectividade do escoamento superficial indireto na bacia do Rio Pirajibu-Mirim, Sorocaba/SP.** 2016. 104 f., inclui 18 mapas, color., 59,4 cm x 84,1 cm. Escala 1:20.000. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais) – Campus Experimental de Sorocaba, UNESP – Univ. Estadual Paulista, Sorocaba, 2017.

RESUMO

A necessidade urgente da população humana especialmente nas ultimas quatro décadas, em buscar recursos para prover crescimento quantitativo e qualitativo, intensificou os processos de degradação ambiental. Para que ocorra desenvolvimento sustentável, deve haver o planejamento e gestão adequada do uso e ocupação do solo integrado com as condições físicas naturais de cada área. Entre os processos de degradação merece especial atenção a erosão do solo e a produção de sedimentos, pois limitam o próprio desenvolvimento da humanidade. Porém uma das grandes carências aos gestores e planejadores, está na deficiência de produtos cartográficos que identifiquem áreas prioritárias para contenção destes processos, bem como para restringir que áreas atualmente pouco vulneráveis venham a se tornar altamente vulneráveis por novos usos e ocupação. Os estudos de fragilidade ambiental, por sua característica sistêmica de integração dos ambientes naturais e das intervenções antrópicas têm sido indicados como uma boa referência para subsidiar o planejamento e gestão ambiental. Neste trabalho, foi integrado mapeamento de distância do escoamento superficial à metodologia da fragilidade empírica proposta por Ross (1994). O produto cartográfico final, por contemplar os efeitos do escoamento superficial, apresenta maior consistência hidrosedimentológica. O resultado final permite identificar facilmente as áreas prioritárias que merecem maior atenção para ações de controle e contenção de processos erosivos e produção de sedimentos. Fornece ainda, a devida ênfase aos impactos provocados por estruturas lineares, em especial o sistema viário, importante contribuinte na produção e transferência de sedimentos para as águas superficiais, o que não é possível apenas com o mapa de fragilidade emergente.

Palavras chaves: Sorocaba; Fragilidade ambiental; Bacias hidrográficas; Sistemas de informação geográfica; Conexão hidrológica e sedimentológica; Bacia Rio Pirajibu-Mirim.

MARQUES, V. V. **Environmental fragility associated with indirect surface runoff connectivity in the Pirajibu-Mirim River basin, Sorocaba/SP**. 2016. 104 f., includes 18 maps, col.illus., 59,4 cm x 84,1 cm. Scale 1:20.000. de lâms. Dissertation (Master's degree Environmental Science) – Câmpus Experimental de Sorocaba, UNESP – Univ. Estadual Paulista, Sorocaba, 2017.

ABSTRACT

The urgent need of the human population, especially in the last four decades, in seeking resources to provide its quantitative and qualitative growth, has intensified the processes of environmental degradation. Among these, erosion processes and sediment transport deserve special attention because they limit the very development of humanity. For sustainable development to occur there must be appropriate planning and management of land use and occupation integrated with the natural physical conditions of each area. However, one of the major shortcomings for managers and planners is the deficiency of cartographic products that identify priority areas for containment of degradation processes, as well as to restrict what currently vulnerable areas are becoming highly vulnerable by new uses and occupation. The studies of environmental fragility, due to its systemic characteristics of integration of natural environments and anthropic interventions have been indicated as a good reference to subsidize environmental planning and management. In this work, surface flow distance mapping was integrated with the methodology of empirical fragility proposed by Ross (1994). The final cartographic product, considering the effects of surface runoff, presents greater hydrosedimentological consistency. The final result allows to easily identify the priority areas that need greater attention for actions of control and containment of erosive processes and sediment production. It also provides due emphasis to the impacts caused by linear structures, especially the road system, an important contributor to the production and transfer of sediments to surface waters, which is not possible only with the map of emerging fragility.

Keywords: Sorocaba; Environmental fragility; Watersheds; Geographic Information Systems; Hydrological and sedimentological connection; Basin of the Pirajibu-Mirim river.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Mapa de localização da Bacia Hidrográfica do Rio Pirajibu-Mirim	29
Figura 2 – Fluxograma geral da pesquisa	33
Figura 3 – Fluxograma das bases de elaboração dos produtos cartográficos	34
Figura 4 – Carta base	49
Figura 5 – Hierarquia fluvial	51
Figura 6 – Perfil longitudinal do Rio Pirajibu-Mirim	53
Figura 7 – Carta hipsométrica	56
Figura 8 – Curva hipsométrica	57
Figura 9 – Carta de declividades	58
Figura 10 – Carta geológica (IG, 2009)	60
Figura 11 – Carta geológica retificada	62
Figura 12 – Carta de solos	64
Figura 13 – Ortofotomosaico	66
Figura 14 – Carta de uso do solo e cobertura vegetal	68
Figura 15 – Carta de distância do escoamento superficial à rede de drenagem estendida	71
Figura 16 – Carta de distância do escoamento superficial à rede hidrográfica.	73
Figura 17 – Carta de áreas diretamente e indiretamente conectadas	75
Figura 18 – Detalhes do sistema viário demonstrando diferenças de conexão ...	76
Figura 19 – Carta de classes de fragilidade das declividades	78
Figura 20 – Carta de fragilidade dos solos	80
Figura 21 – Carta de fragilidade potencial preliminar	82
Figura 22 – Carta de fragilidades do uso do solo e cobertura vegetal	84
Figura 23 – Carta de fragilidade emergente	85
Figura 24 – Carta de fragilidade emergente associada as áreas indiretamente conectadas	91

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classes de declividade representadas na carta de declividades elaborada	38
Tabela 2 – Fatores de peso adotado nas áreas indiretamente conectadas	47
Tabela 3 – Hierarquia fluvial da bacia ordenada segundo Strahler e Horton	52
Tabela 4 – Tabela de frequência de declividades	59
Tabela 5 – Representatividade das classes de solos no mapeamento da bacia.....	65
Tabela 6 – Representatividade das classes de uso do solo e cobertura vegetal	69
Tabela 7 – Área por classe de distância do escoamento superficial para a rede de drenagem estendida	70
Tabela 8 – Área por classe de distância do escoamento superficial para a rede hidrográfica	72
Tabela 9 – Áreas por tipo de conectividade, distância do escoamento e grau de fragilidade	74
Tabela 10 – Classes de fragilidade de declividades e suas respectivas áreas, adotando-se Ross (1994).	77
Tabela 11 – Classes de fragilidade de solos e suas respectivas áreas	79
Tabela 12 – Classes de fragilidade potencial da bacia e suas respectivas áreas, adotando-se Ross (1994).	81
Tabela 13 – Classes carta de fragilidades do uso do solo e cobertura vegetal	83
Tabela 14 – Classes de fragilidade emergente da área de estudo	86
Tabela 15 – Classes de fragilidade associada à conectividade indireta	89

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

APP	= Área de Preservação Permanente
CPRM	= Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
CSAN	= Coordenadora de Saneamento da SSRH
DAEE	= Departamento de Águas e Energia Elétrica
DAP	= Diâmetro à Altura do Peito
ecw	= <i>Enhanced Compression Wavelet</i>
EIA	= Estudo de Impacto Ambiental
EMBRAPA	= Empresa Brasileira de Pesquisas Agropecuárias
FAPESP	= Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo
FFLCH	= Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas
GPS	= <i>Global Positioning System</i>
IAC	= Instituto Agrônomo de Campinas
IBGE	= Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IG	= Instituto Geológico
IGC	= Instituto Geográfico e Cartográfico
IPT	= Instituto de Pesquisas Tecnológicas
MDE	= Modelo Digital de Elevação
MDS	= Mapeamento Digital de Solos
MDT	= Modelo Digital do Terreno
RGB	= <i>Red Green Blue</i>
RIMA	= Relatório de Impacto Ambiental
RL	= Reserva Legal
SIG	= Sistema de Informação Geográfica
SIRGAS	= Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas
SSRH	= Secretaria de Saneamento e Recursos Hídricos
UERJ	= Universidade do Estado do Rio de Janeiro
UHE	= Usina Hidrelétrica
USP	= Universidade de São Paulo
UTB's	= Unidades Territoriais Básicas
UTM	= <i>Universal Transverse Mercator</i>
ZGR	= Zona de Gestão Ripária
ZRR	= Zona de Reserva Ripária

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	17
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	21
3 OBJETIVOS.....	28
4 MATERIAIS E MÉTODOS.....	29
4.1 Materiais.....	29
4.1.1 Área de estudo.....	29
4.1.2 Base de dados.....	31
4.2 Métodos.....	32
4.2.1 Trabalhos de campo.....	35
4.2.2 Elaboração da base cartográfica.....	35
4.2.2.1 Informações de referência planialtimétrica.....	35
4.2.2.2 Construção do ortofotomosaico.....	36
4.2.2.3 Construção da carta geológica.....	36
4.2.2.4 Modelagem digital do relevo.....	37
4.2.2.5 Carta de declividade	38
4.2.2.6 Caracterização hidrográfica e morfométrica da bacia.....	38
4.2.2.7 Carta de solos.....	41
4.2.2.8 Carta de uso do solo e cobertura vegetal.....	43
4.2.2.9 Carta de distância do escoamento superficial à drenagem estendida	43
4.2.2.10 Carta de distância do escoamento superficial à rede hidrográfica	44
4.2.2.11 Carta de áreas diretamente e indiretamente conectadas	45
4.2.2.12 Carta de fragilidade potencial preliminar	45
4.2.2.13 Carta de fragilidade emergente.....	46
4.2.2.14 Carta de fragilidade emergente associada à conectividade indireta	46
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	48
5.1 Carta base digital e informações de referência planialtimétricas.....	48
5.2. Hidrografia e análise areal da bacia.....	50
5.2.1 Padrões de drenagem.....	50
5.2.2 Hierarquia fluvial.....	50

5.2.3 Declividade equivalente do canal principal (I_{eq}).....	52
5.2.4 Índice de sinuosidade (I_{sin})	53
5.2.5 Densidade de drenagem (Dd)	54
5.2.6 Extensão média do escoamento superficial (I)	54
5.2.7 Coeficiente de compacidade (Kc)	54
5.2.8 Fator de forma da bacia (Ff)	55
5.3 Modelagem digital do relevo	55
5.4 Declividade	57
5.5 Geologia	59
5.6 Solos	63
5.7 Ortofotomosaico	65
5.8 Uso do solo e cobertura vegetal	67
5.9 Distância do escoamento superficial à drenagem estendida	70
5.10 Distância do escoamento superficial à rede hidrográfica	72
5.11 Áreas diretamente e indiretamente conectadas	74
5.12 Fragilidade potencial preliminar	77
5.13 Fragilidade emergente	81
5.14 Fragilidade emergente associada à conectividade indireta	88
6 CONCLUSÕES	94
REFERÊNCIAS	96

APÊNDICES

- **APÊNDICE A – Carta base (escala 1:20.000)**
- **APÊNDICE B – Hierarquia fluvial (escala 1:20.000)**
- **APÊNDICE C – Carta hipsométrica (escala 1:20.000)**
- **APÊNDICE D – Carta de declividades (escala 1:20.000)**
- **APÊNDICE E – Carta geológica IG (escala 1:20.000)**
- **APÊNDICE F – Carta geológica retificada (escala 1:20.000)**
- **APÊNDICE G – Carta pedológica (escala 1:20.000)**
- **APÊNDICE H – Ortofotomosaico (escala 1:20.000)**
- **APÊNDICE I – Uso do solo e cobertura vegetal . (escala 1:20.000)**
- **APÊNDICE J – Distância do escoamento superficial à rede de drenagem estendida (escala 1:20.000)**

- **APÊNDICE K – Distância do escoamento superficial à rede hidrográfica (escala 1:20.000)**
- **APÊNDICE L – Áreas diretamente e indiretamente conectadas (escala 1:20.000)**
- **APÊNDICE M – Fragilidade das declividades (escala 1:20.000)**
- **APÊNDICE N – Fragilidade dos solos (escala 1:20.000)**
- **APÊNDICE O – Fragilidade potencial (escala 1:20.000)**
- **APÊNDICE P – Proteção do uso do solo e cobertura vegetal (escala 1:20.000)**
- **APÊNDICE Q – Fragilidade emergente (escala 1:20.000)**
- **APÊNDICE R – Fragilidade emergente associada às áreas indiretamente conectadas (escala 1:20.000)**

1 INTRODUÇÃO

Os constantes aumentos populacionais conduziram a uma intensificação na busca por recursos das mais distintas origens. Esta busca crescente levou as sociedades humanas a intervirem cada vez mais nos recursos naturais retirando o equilíbrio natural existente na maior parte dos ambientes (CARVALHO; DAVID, 2011).

A degradação do meio ambiente concentra-se em três grandes processos de desenvolvimento: um, caracterizado pela intensa e ampla utilização das terras para as atividades agropecuárias; outro, pelo crescimento das áreas urbanas acompanhado de uma crescente concentração das atividades industriais; e, o terceiro, pelo crescimento da exploração dos recursos naturais como base energética e de matérias-primas (ROSS, 2006a).

Para atender a demanda de alimentos da população crescente, a agricultura sofre uma verdadeira revolução durante o século XX, em especial nos países desenvolvidos. A seleção de plantas e animais mais produtivos, a simplificação e especialização dos sistemas naturais aplicados à exploração agropecuária, a introdução de tecnologia com alteração das condições de trabalho e produtividade, e a alteração das condições socioeconômicas com a reestruturação das áreas de propriedades e a transformação dos produtos do setor agropecuário pela indústria, marcam esta revolução resultando em um expressivo aumento da produtividade nunca registrado antes na agricultura (OLIVEIRA, 2009).

Por outro lado, a agricultura moderna descrita por este processo revolucionário, teve seu enfoque quase que exclusivamente em questões de ordem econômica, relevando os impactos gerados por esta transformação no ambiente, ou mais importante ainda, apresentando uma visão totalmente imediatista em relação às condições econômicas, quando deixa de observar o custo futuro destes impactos.

Os impactos provocados por este modelo agrícola com grande modificação das condições biológicas, ecológicas, ecossistêmicas e de trabalho, são dos mais variados, e alguns ainda impossíveis de se mensurar. Dos mais explícitos, está a contaminação dos rios e dos solos em decorrência do uso indiscriminado de defensivos agrícolas e fertilizantes, a perda de ecossistemas inteiros, a extinção da biodiversidade, e a ocorrência de intensos processos erosivos provocando tanto a

degradação dos solos pela perda das camadas produtivas, como dos recursos hídricos pelos processos de sedimentação posteriores (VEIGA, 2010).

Nos países em desenvolvimento a aplicação deste modelo agrícola, trouxe ainda mais prejuízos. A introdução do tecnicismo nas atividades agrícolas destes países embora tenha proporcionado desenvolvimento econômico, provocou alterações sociais, econômicas, culturais e ambientais muito mais impactantes (ROSS, 2006a).

No desenvolvimento urbano industrial, os processos de degradação embora mais pontuais, apresentam uma complexidade muito maior em função das inter-relações de diversidade socioeconômica e natural próprias de cada local. Embora os impactos ambientais nas áreas urbanas não possam ser considerados maiores do que os causados pelas atividades agropecuárias ou de mineração, são realçados pela concentração espacial com que ocorrem. Dados do IBGE (2010) revelaram que a população urbana atual do país corresponde a 84,36 %. É importante lembrar ainda, que os impactos decorrentes da pressão urbana transcendem seus limites.

O fator preponderante dos problemas urbanos decorre principalmente da ocupação extremamente acelerada nas últimas décadas, sem que fossem atendidas normas regulamentadoras de edificações e a estrutura fundiária urbana. Ou seja, estas gigantes ocupações irregulares não atendem a um planejamento ou gestão por parte das instituições públicas, que tentam criar soluções paliativas posteriormente à ocupação para os problemas gerados anteriormente (SANTORO, 2014).

Dentre as temáticas mais relevantes dos problemas ambientais urbanos, bastante corriqueiras aos profissionais que atuam nas áreas ambientais pode-se citar: as contaminações por produtos químicos de água e solo decorrente das atividades industriais e serviços; a ocupação irregular de áreas de preservação permanente e de risco com retirada indiscriminada da vegetação natural, sobretudo em várzeas e encostas íngremes que potencializam os problemas de erosão, sedimentação, enchentes, deslizamentos, perda de diversidade, comprometimento dos recursos hídricos entre outros; a impermeabilização extensiva do solo com aumentos de escoamento superficial e redução da infiltração para os aquíferos; as alterações da qualidade do ar em função das emissões de poluentes atmosféricas oriundos das atividades industriais e dos veículos automotores; a geração concentrada de resíduos sólidos sem disposição adequada, aliadas a programas de

reciclagem de baixa eficiência. Enfim, uma inúmera gama de processos de degradação com origem semelhantes ou distintas, e em geral extremamente complexas, que demandam avaliação integrada por especialistas de diversas áreas do conhecimento em ciências naturais e humanas e sociais. (MENDONÇA; CUNHA; LUIZ, 2016).

No que diz respeito aos impactos atribuídos às atividades de mineração, os principais estão relacionados a alterações do meio físico, biótico e antrópico. No meio físico, caracterizam-se pelos processos de alteração da erosão pela água, deposição de sedimentos ou partículas, inundação, escorregamento, movimento de bloco, movimento das águas e subsuperfície, escoamentos das águas em superfície, interações físico-químicas e bacterianas no solo e nas águas superficiais e subterrâneas, erosão eólica, circulação de partículas sólidas e gases na atmosfera, propagação de ondas sonoras e propagação de sismos. Para o meio biótico as alterações relacionam-se com o desenvolvimento da vegetação e da fauna. E por fim, no meio antrópico, entre os diversos processos, destacam-se alteração que impactam a saúde, em função de poluição sonora, atmosférica, hídrica e do solo (MECHI; SANCHES, 2010).

Embora as questões ambientais, tenham grande complexidade e envolvam inúmeras flagelações dos ambientes naturais e conseqüentemente das sociedades que neles vivem, estes não decorrem apenas do desenvolvimento e da explosão demográfica, mas boa parte dos problemas tem origem principalmente na falta de planejamento e gerenciamento adequado do desenvolvimento, ou ainda, na forma equivocada como é feita a gestão do território.

De fato, avalia-se que é muito difícil realizar o planejamento ambiental isolado do planejamento socioeconômico, uma vez que o meio ambiente, que engloba os recursos naturais, apresentam relações não apenas entre si, mas também com o próprio homem, de forma que, qualquer planejamento que priorize um em detrimento do outro será inadequado.

Por isso, a orientação do planejamento e execução de políticas de desenvolvimento sustentável, deve necessariamente contemplar no seu delineamento o conhecimento das diversas problemáticas que envolvem o meio ambiente com suas diferentes formas de integração respeitando-se as diferentes convicções analíticas nos campos das ciências sociais, econômicas e naturais (PHILIPPI JR. et al, 2013).

Embora as necessidades de planejamento e gestão sejam explícitas para se atingir um desenvolvimento sustentável, existe uma grande carência de informações para que ações concretas possam ser tomadas. Uma das deficiências é a produção de material cartográfico que possibilite melhor compreensão do meio ambiente e sua integração com as atividades humanas, objetivando identificar áreas prioritárias na adoção de medidas de proteção (SOUZA, 2014).

Esta demanda justifica o aperfeiçoamento de metodologias aplicadas em estudos integrados de condições naturais frente aos diversos usos do solo e cobertura vegetal, para que novos produtos cartográficos possam ser disponibilizados para aplicação no planejamento e gestão do espaço.

Nesta concepção, uma importante referência na literatura brasileira é a fragilidade empírica proposta por Ross (1994), que objetiva classificar a fragilidade ambiental, e tem sido aplicada desde então em diferentes áreas por diversos autores, apresentando resultados satisfatórios ao planejamento e gestão ambiental (NAKASHIMA, 1999, 2001; DONHA et al., 2006; BAHR; CARVALHO, 2012; ADAMI et al., 2012; RODRIGUES, SOUZA, 2013; GOUVEIA, et al., 2015).

Nesta metodologia, a combinação do grau de fragilidade de diferentes aspectos naturais, permite identificar preliminarmente o grau “fragilidade potencial”. Confrontados com as diferentes intervenções antrópicas do uso do solo e cobertura vegetal, é definida então o grau de “fragilidade emergente”. Permitindo de uma forma simples, analisar sistemicamente a fragilidade ambiental. No entanto, a metodologia não permite avaliar uma importante forma de intervenção antrópica, que é o sistema viário.

Porem, o sistema viário apresenta relevante importância na avaliação da fragilidade ambiental, seja devido às altas taxas de erosão verificadas para estas áreas, bem como pela sua capacidade de conectar as áreas sujeitas aos processos erosivos em função dos diferentes usos do solo e cobertura vegetal à rede hidrográfica.

Por isto, neste estudo foi aplicado sobre a metodologia de análise da fragilidade ambiental proposta por Ross (1994), dados que representassem efeitos da conexão hidrossedimentológica do sistema viário, buscando verificar os efeitos deste sobre a fragilidade ambiental emergente.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O referencial teórico aplicado neste trabalho está fundamentado na inter-relação sistêmica, entre componentes físicos ambientais dos sistemas naturais e o resultado das interações e interferências do homem nestes sistemas. Aplicado inicialmente na biologia, porém, rapidamente disseminado por diversas outras ciências, atingido fortemente suas concepções, e ajudando a estruturar novas ideias (BERTALANFFY, 1950 apud SOUZA, 2015).

No direcionamento dos conceitos de dinâmica elaboradas com o objetivo de identificação e classificação das áreas de fragilidade ambiental, duas delas se destacam na literatura, o modelo proposto por Crepani et al. (1996) que é baseado nas Unidades Territoriais Básicas – UTB's, e as propostas por Ross (1994) apoiada nos índices de dissecação do relevo e outra sobre as classes de declividade. No entanto observa-se nos trabalhos efetuados que a proposta de Crepani et al. (1996) mesmo que quase sempre citada, é menos frequentemente aplicada.

De qualquer forma, diversas pesquisas vêm sendo realizadas com o objetivo de refinar os conhecimentos sobre a fragilidade ambiental potencial e conseqüentemente das medidas preventivas que possam ser adotadas para o desenvolvimento sustentável diante da fragilidade ambiental emergente.

Rosa e Ross (1999) elaboram um dos primeiros estudos aplicando SIG na geração da carta de fragilidade, trabalhando em escala média, foi produzida duas cartas de fragilidades, uma utilizando os atributos de índices de dissecação do relevo, solos e cobertura vegetal, e outra mudando o atributo de índices de dissecação do relevo por declividade. Ambos os resultados finais se assemelham porem demonstram claramente as diferenças obtidas de cada procedimento, com resolução mais generalista quando utilizada a primeira e detalhista quando utilizada as declividades. Os autores concluem sobre a eficiência e rapidez da aplicação da técnica permitindo uma grande variedade de simulações, destacando para a época apenas a necessidade da criação de bases de dados confiáveis.

Nakashima (1999) aplicando a metodologia de Ross (1994) com algumas modificações, estudou a bacia do Rio Keller no norte do estado do Paraná em escala 1:50.000 considerando como atributos as relações de fragilidade relevo-solo e o uso e ocupação da terra. Posteriormente Nakashima (2001) validou a aplicabilidade do modelo fazendo a comprovação pela carta de processos erosivos,

análises de laboratório e ensaios de campo com penetrômetro e infiltrômetro de superfície e subsuperfície, comprovando a eficácia da carta de fragilidade ambiental.

Spörl e Ross (2004) em uma escala média de trabalho, realizaram uma análise comparativa de três metodologias; uma com base na proposta de Crepani et al. (1996) com referencia das UTB's e nas duas propostas de Ross (1994) obtidas uma pelo índice de dissecação do relevo e a outra apoiada nas classes de declividades. E embora ao final indiquem como principal vantagem dos modelos a rapidez dos resultados para subsidiar a tomada de decisões, evidenciam que todos apresentam certa deficiência relacionada à subjetividade dos pesos atribuídos a cada componente, o que explica inclusive a diferença dos resultados comparativos entre as metodologias.

Kawakubo et al. (2005) trabalhando em escala grande, utilizaram a metodologia proposta por Ross (1994) utilizando como dados de entrada os atributos solo, declividade e uso e ocupação da terra, gerando ao final a carta de fragilidade ambiental. Os autores destacam além da eficácia da metodologia aplicada à carta de fragilidade, os avanços na modelagem numérica do terreno e da álgebra de mapas em sua importância para se obter melhores resultados com dados já disponíveis.

Donha, Souza e Sugamoto (2006) em uma escala de detalhe e utilizando SIG, elaboraram a carta de fragilidade potencial e emergente do Centro de Estações Experimentais do Canguiri localizado na região metropolitana de Curitiba, PR, adaptando a metodologia de Ross (1994) onde incluíram na análise além dos atributos de declividade, solo e uso e ocupação da terra e a distância dos recursos hídricos. Concluindo ao final sobre as relações do maior grau de fragilidade nas proximidades dos cursos d'água, bem como da eficiência e agilidade do uso de SIG quando utilizados por profissionais qualificados neste tipo de avaliação.

Maganhotto, Santos e Oliveira Filho (2011), trabalhando em escala média a pequena, utilizaram a análise de fragilidade ambiental proposta por Ross (1994) na FLONA de Irati, PR. Obtendo ao final um predomínio de grau baixo de fragilidade tanto para a potencial como emergente, e que o grau de fragilidade muito alta se relacionava ao grau baixo de proteção. Também concluem que embora a metodologia possa orientar de forma eficiente o planejamento e a gestão de unidades de conservação, é recomendável a utilização de bases de dados em escalas maiores.

Gonçalves et al. (2011) em escala de análise pequena, estudaram a bacia do Rio Dourados que abrange cerca de 11 municípios no sul de Mato Grosso do Sul. Realizaram adaptações à metodologia proposta por Ross (1994) adicionando à análise fatores de erodibilidade dos solos, erosividade das chuvas e dados de geologia no intuito de obter maior diferenciação dos níveis de fragilidade.

Souza, Costa e Carvalho (2011) utilizando a metodologia de Ross (1994), executaram o estudo de fragilidade em escala pequena de análise sobre a Área de Influência Direta da UHE Belo Monte comparando-os posteriormente com os resultados do EIA/RIMA. Concluem, que embora ambos apresentem resultados similares, o EIA apresenta deficiência em relação a metodologia aplicada na pesquisa por não considerar os dados de uso e ocupação da terra como atributo para a obtenção dos níveis de fragilidade, e ainda recomendam que novas variáveis como clima, geologia e geomorfologia sejam inclusos como atributos em estudos futuros da área.

Adami et al. (2012) estudaram a bacia do Ribeirão do Pinhal na região de Limeira, SP em uma escala pequena de análise. Para a pesquisa foi utilizada a metodologia de Ross (1994) considerando como dados de entrada parâmetros de solo, declividade e uso e ocupação da terra. Diferencia-se principalmente pela utilização tabelas de composição das duas variáveis analisadas com grau de fragilidade predeterminadas. Ao final abordam a relevância da interferência dos dados de uso e ocupação da terra sobre o produto final que podem sofrer alterações significativas conforme as mudanças ocorridas sobre áreas de diferentes fragilidades naturais.

Bahr e Carvalho (2012) analisaram a fragilidade ambiental segundo a metodologia de Ross (1994) na bacia hidrográfica do Arroio Uvaral em área de expansão urbana do município de Telemaco Borba, PR. Segundo os autores, o estudo realizado em escala pequena levando em consideração tipo de solo, declividade e uso e ocupação da terra, obteve resultados satisfatórios para determinar a fragilidade potencial e emergente da bacia hidrográfica. No entanto, consideraram inadequada para avaliação de áreas urbanas, considerando a utilização de um peso único, e que na realidade existem variações dentro desta classe de uso e ocupação.

Fagundes e Queiroz Filho (2014) fazem uma adequada avaliação comparando uma mesma bacia por diferentes metodologias e diferentes escalas de

abordagem. Utiliza as metodologias propostas por Ross (1994) e Crepani et al. (2001) em escalas média e pequena. Conclui que a primeira proposta é mais sensível à mudança de escala, enquanto a segunda menos pela variação de escala e mais pela forma de cálculo das classes. Observa ainda que quanto maior a escala menor são as diferenças entre as metodologias, e vice-versa quando a escala é menor.

Bade, Rocha e Cunha (2014) estudaram em escala de detalhe a bacia do córrego Matilde Cuê no município de Marechal Candido Rondon, PR. Além da carta de fragilidade potencial e emergente produzida conforme a metodologia de Ross (1994) elaboraram também um mapeamento de solo detalhado com análise detalhada das vertentes estudadas sobre o mapeamentos produzidos, determinando os como de extrema importância tanto para a compreensão como para o planejamento racional do uso e ocupação.

Queiroz Junior et al. (2014) realizaram a caracterização da fragilidade ambiental da foz da bacia hidrográfica do Rio Claro, na região da Usina Hidrelétrica entre os municípios de São Simão e Caçu no estado de Goiás. Utilizando a proposta de Ross (1994) elaboraram os estudos em pequena escala incluindo na avaliação da fragilidade potencial os dados de solo, declividade e erosividade, e para a emergente foi combinada a fragilidade potencial com os dados de uso e ocupação da terra dos anos de 2009 e 2011. Ao final os autores evidenciam a eficácia da metodologia, e mesmo que em um período curto de avaliação denota a dinâmica ocorrida com as mudanças do uso e ocupação da terra em função da influência da construção da usina hidrelétrica.

Gouveia et al. (2015) aplicaram a metodologia proposta por Ross (1994) em uma escala pequena de trabalho, analisando a bacia do Rio Queima-Pé no sudoeste de Mato Grosso. Utilizando como variáveis índices de dissecação do relevo, solos, pluviosidade e uso da terra e cobertura vegetal obtiveram o mapa de fragilidade emergente. Ao final os autores descrevem as relações de fragilidade e suas possíveis alterações em função dos usos e ocupação da terra, destacando o quanto estas podem ser alteradas pela intervenção humana independente do grau de fragilidade potencial existente.

Bacani et al. (2015) avaliaram a fragilidade da bacia hidrográfica do alto Rio Coxim com base na proposta de Ross (1994) fazendo adaptações desta e da proposta de Crepani et al. (2001) na ponderação dos atributos de cada classe de

fragilidade. Em uma escala pequena de abordagem utilizaram como base declividade, solos, intensidade pluviométrica, riqueza da biodiversidade e uso da terra e cobertura vegetal. A pesquisa se destaca pela utilização da lógica fuzzy na soma algébrica de cada carta de fragilidade. Os autores concluem que os resultados apresentados constituíram em um importante modelo diagnóstico, determinando através deste algumas das principais diretrizes para o ordenamento do território constituído pela bacia hidrográfica.

Valle, Francelino e Pinheiro (2016) pesquisaram em escala média a bacia hidrográfica do Rio Aldeia Velha localizada em uma zona de transição do relevo montanhoso da Serra do Mar para a baixada litorânea na zona costeira do estado do Rio de Janeiro. A elaboração das cartas de fragilidade foi realizada em uma análise multicritérios adaptada das metodologias de Ross (1994), Crepani et al. (2001) e Jain e Goel (2002). O método proposto pelos autores assim como em outros trabalhos integra os dados de declividade, solos e pluviosidade na carta de fragilidade potencial, e da combinação desta com os dados de uso e cobertura da terra gerando a carta de fragilidade emergente. A principal diferenciação está nos pesos atribuídos a cada variável, obtidos de pesquisas bibliográficas e consulta a especialistas. Os resultados foram ainda validados com a sobreposição dos mapas produzidos com registros de processos erosivos na bacia hidrográfica. Ao final os autores concluíram que a metodologia obteve sucesso na representação das fragilidades potencial e emergente, bem como, esta última pode ser facilmente atualizada com a base de uso e cobertura da terra. Ressaltam ainda que embora a pontuação seja aplicada de forma qualitativa, o que pode resultar em limitações para algumas regiões, esta pode ser aplicada eficazmente na gestão de bacias fazendo-se a correção das ponderações e pontuações hierárquicas, e que o avanço destas ferramentas permite estabelecer diagnósticos adequados à fragilidade dos ambientes.

Meira, Sabonaro e Silva (2016) trabalhando em uma escala de detalhe em uma pequena propriedade rural no município de São Miguel Arcanjo, SP, aplicaram a metodologia de fragilidade ambiental proposta por Ross (1994), incluindo além da declividade, solos e uso e cobertura da terra os dados de legislação ambiental e áreas de gestão ripária com a carta de usos restritos, a qual contempla as Áreas de Preservação Permanente (APP), Reserva Legal (RL), Zona de Reserva Ripária (ZRR) e Zona de Gestão Ripária (ZGR), resultando ao final em uma carta de

adequabilidade ambiental. Os autores concluem que a metodologia aplicada considerando a fragilidade ambiental associada com a legislação é uma proposta eficiente e rápida de se determinar as áreas prioritárias para adequação ambiental, com vistas a preservação dos recursos hídricos e atendimento legal.

Cunha e Bacani (2016) estudaram a bacia do córrego do Come Onça no município de Águas Claras, MS. A bacia foi avaliada em pequena escala, adaptando-se várias metodologias como: Mecerjakov (1968), Ab'Saber (1969) Tricart (1977), Ross (1992, 1994, 2006b), Crepani et al. (2001), Cunha et al. (2013) e Bacani et al. (2015), onde a carta de fragilidade potencial foi obtido da ponderação dos atributos de declividade, solos, intensidade pluviométrica e importância da biodiversidade, posteriormente combinado com os dados de uso e ocupação da terra gerando então a carta de fragilidade ambiental. Os resultados permitem aos autores destacar a necessidade de planejamento em função de alterações da cobertura da terra substituída de pastagens para silvicultura. E ainda evidenciam a eficiente utilização das geotecnologias nas avaliações ambientais de bacias hidrográficas.

Em grande parte das aplicações se utiliza abordagens em pequena a média escala. E embora não muito bem detalhado por todos os autores, mapeamentos pedológicos, e até mesmo fontes de dados para elaboração de cartas clinográficas e de uso e ocupação do solo e cobertura vegetal em escala grande. O que constitui uma das maiores dificuldades da abordagem em escalas adequadas para pequenas a médias bacias de drenagem.

Quando se trabalha em escalas grandes, outra observação importante é o fato de que o mapeamento do uso e ocupação do solo e da cobertura vegetal, por mais detalhado que seja não afere ao sistema viário uma importância merecida, pois através do sistema viário significativas interferências devem ser atribuídas na fragilidade emergente. No entanto o simples mapeamento das feições viárias em formatos lineares ou mesmo quando a escala permite trabalhar com suas feições no formato poligonal considerando toda sua superfície espacial, não é suficiente para caracterizar a influencia na fragilidade emergente proporcionada por estas estruturas.

Schultz (2013) faz um levantamento de alguns exemplos de trabalhos sobre proporção na contribuição de sedimentos em estradas não pavimentadas em bacias hidrográficas, indicando percentuais entre 24 e 82%.

A complexidade imposta por estruturas lineares como é o caso do sistema viário, faz com que seus problemas no âmbito da paisagem dificilmente sejam incorporados em modelos, tornando-os ainda muito pouco compreendidos (FIENER; AUERSWALD; VAN OOST, 2011).

Embora estradas não pavimentadas apresentem reduzida área superficial no contexto das bacias hidrográficas, sua expressiva contribuição da produção de sedimentos não está vinculada apenas às altas taxas de erosão geralmente verificadas em sua própria superfície, mas também na sua capacidade de conexão à rede de drenagem (ZIEGLER; GIAMBELLUCA, 1997; ALDER et al, 2015).

Neste sentido, a elaboração de metodologias para indicar o grau de fragilidade na paisagem incluindo o sistema viário demonstra-se importante, elevando o conhecimento do efeito destas estruturas para que o planejamento e gerenciamento ambiental possam considera-las.

Alder et al. (2015) apresentou para toda a área agrícola da Suíça, uma metodologia simplificada para se estabelecer a probabilidade de conexão entre as áreas sujeitas à erosão e as águas superficiais. A metodologia considera a distância de fluxo de cada parcela até a rede drenagem estendida, onde é considerada além da rede hidrográfica as estradas e talwegues que podem realizar a conexão do escoamento superficial à rede hidrográfica, e posteriormente combina estes dados com um mapa de risco de erosão, resultando em um mapa de classificação relativa da vulnerabilidade dos efeitos da erosão fora das áreas erodidas (ALDER et al, 2015).

Diversos atributos apresentam relações com a conectividade hidrológica. No entanto, a distância do escoamento superficial com a rede de drenagem, em função de suas relações espaciais intrínsecas, faz com que este atributo apresente alta sensibilidade hidrológica (LOOS; ELSENBEEER, 2011). Desta forma, a distância entre uma área provável de erosão e o sistema de drenagem também representa um bom indicador de conectividade dos sedimentos (VIGIAK et al., 2012).

Neste estudo, foi aplicada metodologia semelhante para a elaboração do mapa de distância do escoamento superficial à rede de drenagem estendida. Posteriormente, os dados das áreas indiretamente conectadas através do sistema viário, foram combinados com um mapa de fragilidade emergente, objetivando qualificar adequadamente a fragilidade ambiental emergente, integrada dos efeitos do sistema viário na paisagem.

3 OBJETIVOS

O objetivo principal desta pesquisa é caracterizar e diagnosticar o território da bacia hidrográfica do Rio Pirajibu-Mirim e elaborar a carta de fragilidade ambiental, considerando-se a conectividade do escoamento superficial e com vistas ao planejamento e gestão ambiental, em especial sobre os recursos hídricos superficiais.

Para alcançar o objetivo principal da pesquisa, necessário se fez que fossem alcançados, também os seguintes objetivos específicos:

- Elaboração de um banco de dados cartográfico contendo as informações de bases planialtimétricas e temáticas na escala da bacia;
- Mapeamento do uso do solo e cobertura vegetal atualizado em escala 1:10.000;
- Elaboração de mapeamento digital dos tipos de solo em escala 1:20.000;
- Inserção de parâmetros morfométricos à metodologia de fragilidade ambiental empírica para possibilitar análise adequada de estruturas lineares na paisagem, em especial do sistema viário; e
- Identificação de áreas prioritárias para subsidiar o planejamento e gestão da bacia hidrográfica.

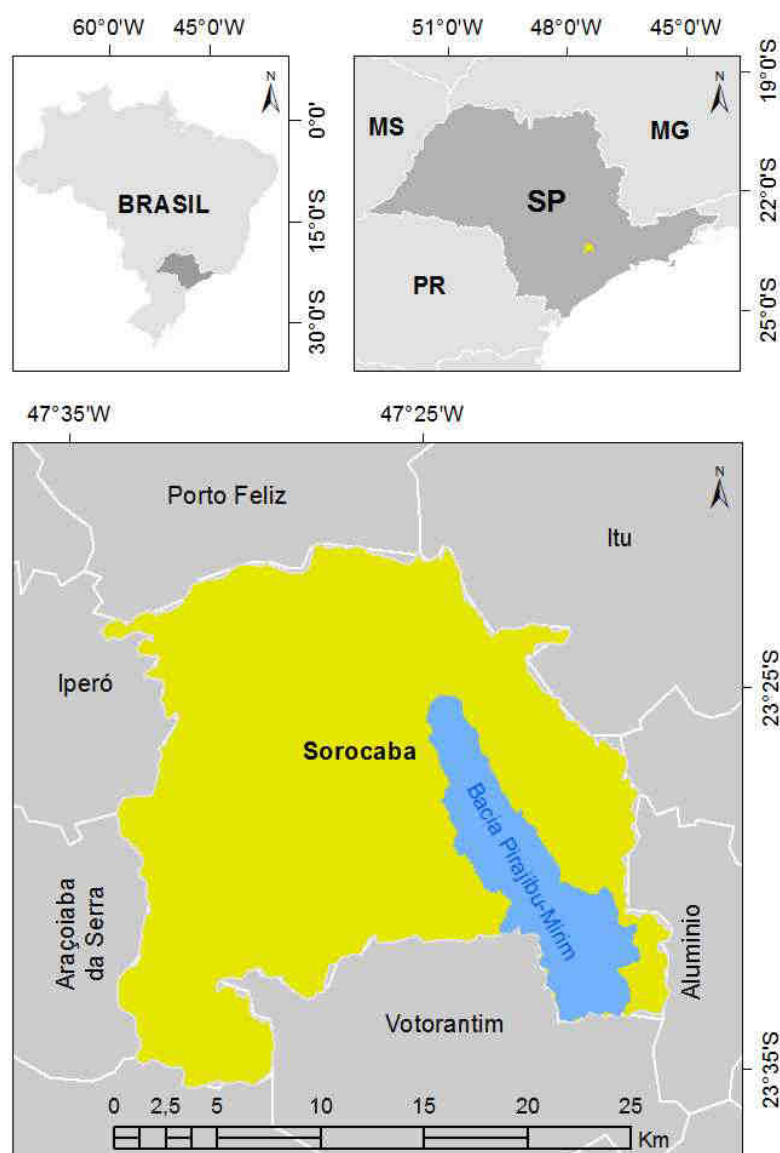
4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Materiais

4.1.1 Área de estudo

A Bacia Hidrográfica do Rio Pirajibu-Mirim está localizada na região sudeste do município de Sorocaba, SP, que por sua vez, localiza-se a oeste da capital do Estado de São Paulo (Figura 1).

Figura 1 – Mapa de localização da Bacia Hidrográfica do Rio Pirajibu-Mirim



Fonte: autoria própria.

A bacia hidrográfica em estudo possui uma área de 55,35 km² correspondendo a cerca 12% da área total do município de Sorocaba. Suas cabeceiras se iniciam na divisa sudeste de Sorocaba com o município de Votorantim nos altos da Serra de São Francisco, prosseguindo de forma alongada na orientação SSW a NNO até desaguar na margem esquerda do Rio Pirajibu.

Em relação à geologia apresenta uma variação significativa na litologia, apresentando rochas cristalinas pré-cambrianas e metassedimentares no médio e alto trecho da bacia, alterando para rochas sedimentares do cenozóico na baixa bacia, e ocorrência de sedimentos quaternários aluvionares nos fundos de vales do médio curso do rio até a sua foz.

A geomorfologia condicionada pelo contexto geológico, cujo arcabouço cristalino frente a diferença de resistência litológica com os sedimentos da borda da Bacia Sedimentar do Paraná, e ainda influenciados pelos processos endógenos, propiciou a formação da Depressão Periférica, a qual então, apresenta interferência nítida nas condições climáticas, destacadamente pelos efeitos orográficos, e que consequentemente em conjunto com os demais componentes abióticos se traduzem em interferência também na vegetação natural.

A vegetação por influencia destes componentes e processos acima descritos era caracterizada por uma zona de tensão ecológica entre a Floresta Ombrófila Densa e as Savanas distribuídas em polígonos menores na paisagem anterior a ocupação antrópica mais intensa, que hoje encontra-se bastante alterados ou até mesmo degradados.

Em relação à ocupação antrópica, por apresentar um relevo acidentado, sobretudo nos trechos médio alto e alto da bacia, apresenta baixa ocupação antrópica, mantendo alguns importantes remanescentes de vegetação nativa. Porém a parte que representa o trecho médio e baixo da bacia sofre clara pressão de ocupação pela expansão urbana, com o avanço de áreas residenciais de diferentes padrões sociais.

O trecho baixo da bacia possui importante distrito industrial, apresentando grande diversidade de segmentos industriais em sua composição, porém ocupando predominantemente os interflúvios das bordas em direção as áreas externas da bacia.

A média e baixa bacia é atravessada pelas Rodovias Raposo Tavares, Doutor Celso Charuri e Senador José Ermírio de Moraes (Castelinho).

Além disso, a bacia se destaca pela importância na captação de água para consumo humano, que corresponde à vazão de 180 l/s. Esta vazão atual contribui com 7,5 % do abastecimento do município de Sorocaba (SSRH/CSAN, 2011).

4.1.2 Base de dados

Para a elaboração dos estudos foram utilizados computadores e *Softwares* necessários ao desenvolvimento da pesquisa, tais como:

- AutoCad Map 2010;
- ArcMap 10.0;
- SAGA GIS 3.0.0; e
- Excel.

Os seguintes equipamentos e materiais cartográficos analógicos e digitais foram também utilizados:

- Estereoscópio de espelho com magnificação de 1,2 X, modelo Geoscope da Stereo Aids;
- Imagens de Satélite Landsat;
- Folhas topográficas do IGC na escala 1:10.000;
- Folhas topográficas do IBGE na escala 1:50.000;
- Arquivos digitais no formato *shapfile* e *raster* do banco de dados de São Paulo, obtidos pelo endereço do DATAGEO na internet;
- Arquivos digitais no formato *shapfile* do Plano Diretor Ambiental da Prefeitura Municipal de Sorocaba (PMS, 2011);
- Mapa geológico do estado de São Paulo na escala 1:500.000 elaborado pelo IPT (ALMEIDA et al., 1981b);
- Mapa geológico do estado de São Paulo na escala 1:250.000 elaborado pelo convênio DAEE/UNESP (LANDIM et al., 1984);
- Mapa geológico do município de Sorocaba na escala 1:50.000 elaborado pelo IG (TEIXEIRA et al., 2009);
- Mapa geomorfológico do Estado de São Paulo, na escala 1:750.000, elaborado pelo IPT (PONÇANO et al., 1981b);

- Mapa geomorfológico do Estado de São Paulo, na escala 1:500.000, elaborado pela coparticipação FFLCH-USP/IPT/FAPESP (ROSS; MOROZ, 1997b);
- Fotos aéreas executadas pela Aerofoto Natividade S. A. em sobrevoo no ano de 1962, na escala 1:35.000;
- Fotos aéreas executadas pela Terra Foto S.A. em sobrevoo no ano de 1983, na escala 1:10.000; e
- Ortofotomosaico do município de Sorocaba, obtida da base de dados SIG disponibilizada pelo IPT, referente a sobrevoo do ano de 2010/2011, na escala 1:25.000 (IPT, 2013).

Nas atividades de campo além da carta base elaborada em gabinete, foi utilizado:

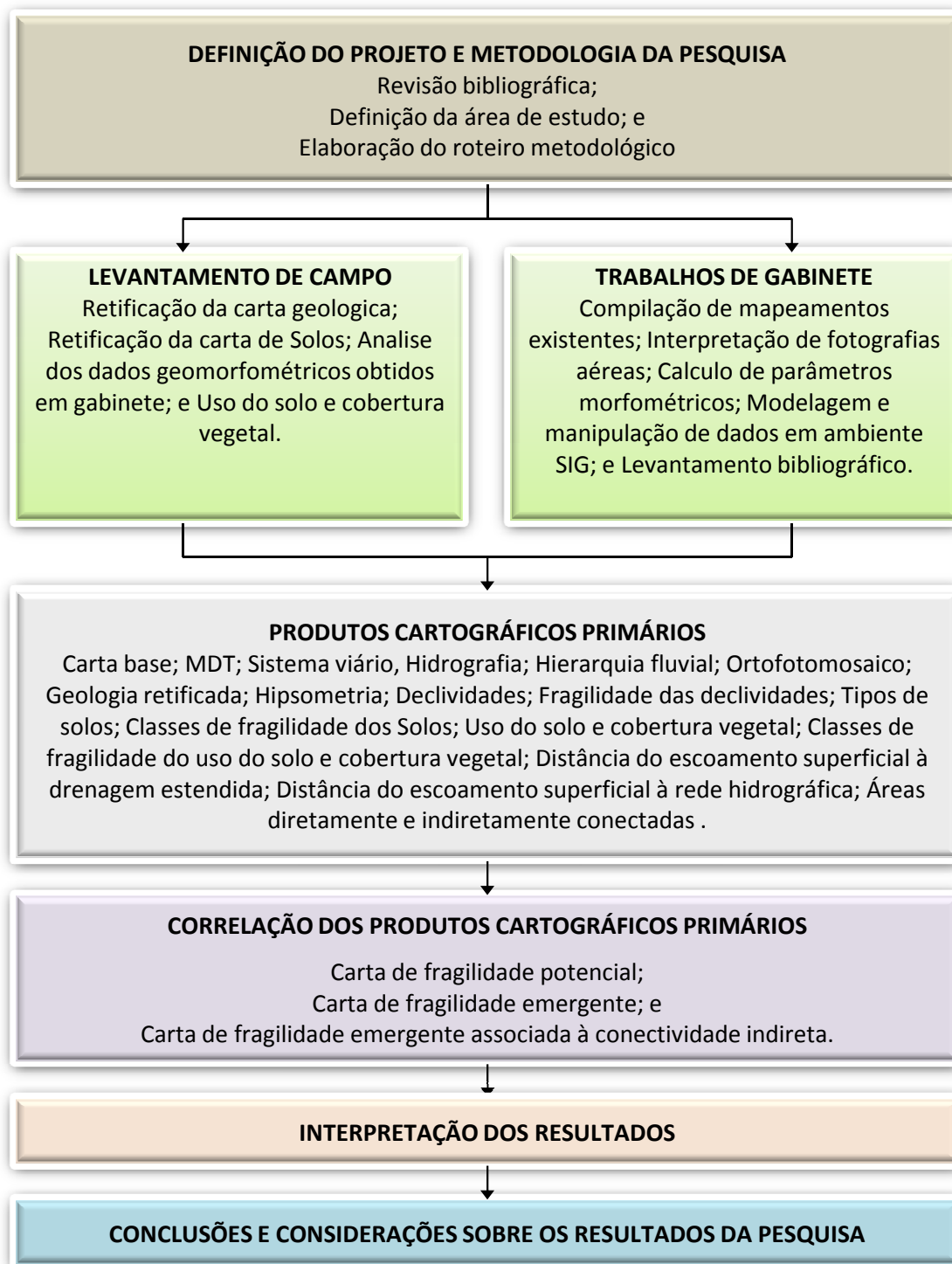
- GPS da marca Garmin 45 XL;
- Máquina fotográfica;
- Bussola;
- Trena;
- Martelo geológico;
- Lupa de bolso, 30x;
- Régua metálica pequena;
- Trena;
- Prancheta;
- Pá; e
- Enxada.

4.2 Métodos

A pesquisa foi desenvolvida com base na “Análise empírica da fragilidade dos ambientes naturais e antropizados” segundo a proposta metodológica de Ross (1994), e o fluxograma geral é apresentando na Figura 2.

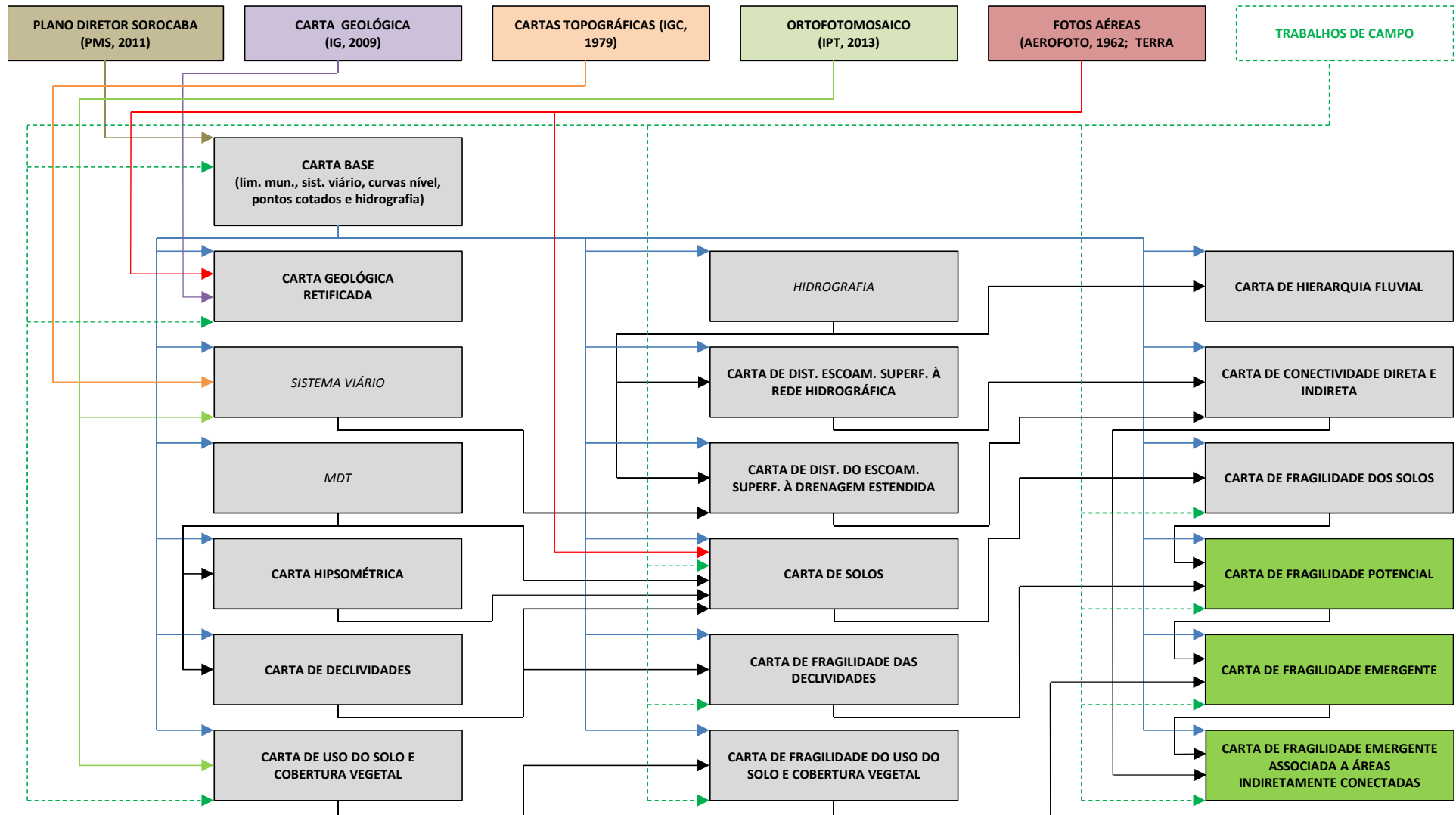
A Figura 3 apresenta em detalhe o fluxograma das bases de elaboração dos produtos cartográficos.

Figura 2 - Fluxograma geral da pesquisa.



Fonte: autoria própria.

Figura 3 - Fluxograma das bases de elaboração dos produtos cartográficos.



Fonte: autoria própria.

4.2.1 Trabalhos de campo

As atividades de campo foram desenvolvidas entre outubro de 2015 e novembro de 2016, visando melhorar a definição dos conhecimentos sobre os aspectos físicos da bacia, bem como identificar detalhadamente através das observações, mesmo que de forma apenas qualitativa, a melhor correspondência em pesos que cada componente do meio físico exerce sobre a fragilidade ambiental da bacia.

Nos pontos observados foram registradas principalmente as informações de litologia para validação da carta geológica existente, e quando possível pedologia, geomorfologia, uso e ocupação do solo e cobertura vegetal e ainda detalhes sobre processos erosivos existentes.

Para cada ponto foram obtidas as coordenadas geográficas e anotadas em uma caderneta de campo o número do ponto e as informações pertinentes, totalizando 168 pontos registrados.

4.2.2 Elaboração da base cartográfica

4.2.2.1 Informações de referência planialtimétrica

A construção da carta base digital foi elaborada a partir da exportação dos arquivos de curvas de nível e drenagem em formato *dwg* gerados no AutoCad Map 2000 (AUTODESK, 2001) para o ArcMap 10.0 (ESRI, 2012), onde foram convertidos em arquivos *shapfile*. Em seguida foi delimitada a área da bacia hidrográfica.

Foi gerado o banco de dados do sistema viário contendo os vetores de algumas vias e estradas das cartas topográficas de 1:10.000 do IGC (1979a, 1979b, 1979c, 1979d, 1979e, 1979e), e posteriormente retificadas utilizando o ortofotomosaico montado com fotografias aéreas obtido junto ao IPT (2013) organizados no ArcMap 10.0.

O sistema de coordenadas adotado tanto na carta base como em todas as demais cartas da pesquisa, foi o *Universal Transverse Mercator* (UTM), tendo como referência o Datum Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas (SIRGAS2000).

4.2.2.2 Construção do ortofotomosaico

Este produto foi elaborado apenas realizando o recorte da área da bacia hidrográfica com a ferramenta *Extract by mask* do ArcMap 10.0. O material utilizado foi elaborado pelo IPT (2013) para todo o município de Sorocaba utilizando ortofotos de 2010/2011, e encontra-se disponível no endereço eletrônico da CPRM <http://www.cprm.gov.br/publique/Gestao-Territorial/Geologia-de-Engenharia-e-Riscos-Geologicos/Cartas-de-Suscetibilidade-a-Movimentos-Gravitacionais-de-Massa-e-Inundacoes-3507.html#saopaulo>, podendo ser baixado dentro de uma base SIG diretamente no formato *raster* em extensão *Enhanced Compression Wavelet* (ecw).

4.2.2.3 Construção da carta geológica

A carta com o tema geologia foi elaborada por meio da extração das informações referentes a área de estudo da base cartográfica obtida do IG (TEIXEIRA et al., 2009) “Mapa Geológico do Município de Sorocaba” que pode ser adquirida no endereço eletrônico <http://igeologico.sp.gov.br/publicacoes/livros-e-colecoes/livros-e-audiolivros/> em formato digital. O mapa geológico foi inserido no visualizador ArcMap 10.0, e em seguida georreferenciado pelo sistema *Universal Transverse Mercator* (UTM) *Datum SIRGAS2000*, o que possibilitou inserir os limites da área de estudo. Em seguida foi gerada uma legenda de cores para cada uma das litologias que foram vetorizadas na forma de polígonos na extensão *shapfile*.

Eventuais retificações litológicas e correções para ajustamento da escala e das coordenadas foi realizada por meio do levantamento de campo e quando necessárias novas edições foram feitas até se obter o produto final.

Alem disso, foram realizadas fotointerpretações por meio de estereoscopia, para a obtenção de limites entre as unidades, como no caso referente aos sedimentos Quaternários dos fundos de vale e antigos terraços, os quais apresentam superfície caracteristicamente plana, facilmente observada através da estereoscopia. Também em outras situações pontuais foram utilizadas para auxílio na delimitação das unidades através de análise dos padrões geomorfológicos, estruturais, das características da drenagem, ou ainda pelas variações de tonalidade, textura e vegetação (ARCANJO, 2011). As fotos aéreas de 1962 e 1983

auxiliaram em muitas situações, cujo avanço intensificado da ocupação humana ocultou informações nas atuais fotos ou imagens de satélite.

O levantamento de campo desta etapa contemplou a observação em 168 pontos registrados em campo com o auxílio de um GPS, nos quais foram observadas as informações pertinentes à litologia para posterior análise conjunta com os dados de fotointerpretação e produção da carta geológica retificada.

4.2.2.4 Modelagem digital do relevo

Foi construído um modelo digital de elevação (MDE) para análise do relevo (VALERIANO, 2008; EL-SHEIMY; VALEO; HABIB, 2008) a partir das curvas de nível e pontos cotados para a área da bacia.

Foi utilizada a técnica de processamento *Topo to Raster* (SALGADO; FORMAGGIO; RUDORFF, 2011), do módulo de ferramentas *Spatial Analyst Tools* no *software* ArcMap 10.0. Foi gerada uma imagem *raster* de matriz de resolução de 5 x 5 m de cada pixel.

A partir do MDE foram geradas informações primárias com o objetivo de representar a geomorfometria da topografia do relevo (MOORE et al, 1993), tais como, a carta hipsométrica e a carta de declividades.

A carta hipsométrica apresentada no item 5.3, foi elaborada através do ArcMap 10.0 no módulo de ferramenta *Spatial Analyst Tools*, ferramenta *reclassify* aplicada e *zonal statistics* considerando as cotas inferiores e superiores respectivamente de 556 m e 1.027,00 m obtidas segundo a variação altimétrica do relevo da área de estudo. As classes foram estratificadas em intervalos altimétricos de 40 metros.

A elevação mediana foi obtida pela análise visual do próprio gráfico gerado na interseção da curva com o eixo x a 50%. Quanto a elevação média foi obtida pela equação abaixo conforme Villela e Mattos (1975).

$$E = \frac{\sum ea}{A} \quad (1)$$

Onde: E = elevação média;

e = elevação média duas curvas de nível consecutivas;

a = área entre as curvas de nível;

A = área total.

4.2.2.5 Carta de declividade

Ainda sobre o MDT como plano de informação base, foi gerada a carta de declividades automaticamente utilizando a ferramenta *Spatial Analyst Tools* do *software* ArcMap 10.0 conforme a divisão das classes que melhor representasse este atributo (Tabela 1). Posteriormente estas foram reclassificadas para a metodologia aplicada à carta de fragilidade agrupando as duas primeiras classes da Tabela 1 em uma única classe.

Tabela 1 – Classes de declividade representadas na carta de declividades elaborada.

Atributo	Classe de declividade
1	< 3%
2	3 a 6%
3	6 a 12%
4	12 a 20%
5	20 a 30%
6	> 30%

4.2.2.6 Caracterização hidrográfica e morfométrica da bacia

Nesta etapa foram feitas edições na rede hidrográfica e corrigidas eventuais distorções em relação a erros topológicos oriundos da base existente.

Com o *software* Hidroflow 1.0 (LABGIS-UERJ) foram realizadas correções automáticas dos fluxos da rede de drenagem, bem como gerada automaticamente a classificação do sistema seguindo as ordens dos canais proposta por Strahler (1952) e Shreve (1966 apud CHRISTOFOLETTI, 1974).

Uma vez classificado segundo a ordem de hierarquia proposta por Strahler, o plano de informação foi exportado para a extensão dwg, e no AutoCad Map 2010 foi reeditado para se obter também a classificação segundo Horton (1945). Depois de editado, foi novamente importado no ambiente do ArcMap 10.0 para edição final e elaboração das cartas respectivas, bem como obtenção dos resultados quantitativos

de ambas as metodologias. Sobre a carta de drenagem já classificada conforme a sua hierarquia, foi realizada uma análise qualitativa dos padrões de drenagem e sua descrição de acordo a compartimentação observada.

A partir dos dados quantitativos obtidos da rede hidrográfica e da carta base, foram realizados alguns cálculos relativos aos parâmetros morfométricos de análises lineares da rede de drenagem e de área da bacia hidrográfica, e então aspectos morfológicos com as suas respectivas influencias foram analisados.

Dentre os parâmetros obtidos, esta a declividade equivalente do canal principal que expressa as relações de diferença máxima de altitude entre o ponto de origem e a foz, os quais influenciam diretamente em questões importantes como velocidade da água e consequentemente em processos de erosão e sedimentação no canal. Foi obtida através da equação 2.

$$I_{eq} = \left[\frac{\sum L_i}{\sum \frac{L_i}{\sqrt{J_i}}} \right]^2 \quad (2)$$

Onde: I_{eq} = declividade equivalente do canal principal (m/km);

L_i = distância de cada trecho do talvegue (km);

J_i = declividade de cada trecho talvegue (m).

O índice de sinuosidade indica a sinuosidade do canal, embora seja um parâmetro adimensional, pode se dizer que quanto mais próximo da unidade, mais retilíneo será o rio, e maior será a velocidade do escoamento tendo em vista que o fluxo d'água encontrará menor resistência. Foi obtido através da equação 3.

$$I_{sin} = \frac{L}{L_r} \quad (3)$$

Onde: I_{sin} = índice de sinuosidade (adimensional);

L = comprimento do rio principal (km);

L_r = comprimento em linha reta da nascente à foz (km).

A densidade de drenagem obtida da equação 4, é o resultado obtido da divisão da extensão total dos canais em função da área da bacia, e indica o quanto esta é bem ou mal drenada, implicando ainda na relação com as superfícies de contribuição uma vez que se relaciona inversamente à extensão do escoamento superficial.

$$Dd = \frac{L_n}{A} \quad (4)$$

Onde: Dd = densidade de drenagem (km km^{-2});

L_n = comprimento total dos canais (km);

A = área da bacia (km^2).

A extensão média do escoamento superficial dada pela equação 5 apresentada a seguir, indica basicamente o valor médio do quanto a água que cai sobre a bacia deverá percorrer até atingir um canal qualquer.

$$l = \frac{A}{4.L_n} \quad (5)$$

Onde: l = extensão média do escoamento superficial (km);

A = área da bacia (km^2);

L_n = comprimento total dos canais (km).

O coeficiente de compacidade indica o grau de certa forma a relação de circunferência da bacia, permitindo avaliações sobre a possibilidade de contribuição dos afluentes de forma mais rápida em função do formato da bacia, o que implica diretamente nas questões de cheias. Este coeficiente foi obtido da equação 6.

$$Kc = 0,28 \cdot \frac{P}{\sqrt{A}} \quad (6)$$

Onde: Kc = coeficiente de compacidade (adimensional);

P = perímetro da bacia (km);

A = área da bacia (km²).

O fator de forma calculado pela equação 7 permite uma avaliação semelhante ao do coeficiente de compacidade, no entanto este expressa a relação entre a largura da bacia e o seu comprimento.

$$Kf = \frac{A}{L^2} \quad (7)$$

Onde: Kf = fator de forma da bacia (adimensional);

A = área da bacia (km²);

L = comprimento do rio principal (km).

4.2.2.7 Carta de solos

A carta de solos foi inicialmente compilada da carta do IAC na escala 1:500.000, a qual define toda a área da bacia, como Argissolos Vermelho-Amarelos, distribuídos em três unidades mapeadas, constituídas pelos tipos PVA20, PVA55 e PVA115, que correspondem respectivamente às classes da legenda a seguir descritas (OLIVEIRA et al., 1999):

- a) PVA20 - Argissolos Vermelhos-Amarelos distróficos, A moderado, textura média/argilosa, em relevo ondulado e suave ondulado;
- b) PVA55 - Argissolos Vermelhos-Amarelos distróficos, textura argilosa e média/argilosa, fase não rochosa e rochosa, relevo forte ondulado + Latossolos Vermelhos-Amarelos distróficos, textura argilosa em relevo forte ondulado e montanhoso ambos A moderado;
- c) PVA115 - Argissolos Vermelhos-Amarelos distróficos e eutróficos, ambos A moderado, textura argilosa cascalhenta, fase não rochosa e rochosa, relevo ondulado e forte ondulado.

No entanto, devido a grande diferença de escalas o mapa se mostrou inadequado para aplicação na área da bacia. Desta forma, com o objetivo de melhorar a representação da carta de solos, e permitir sua utilização na metodologia para elaboração da carta de fragilidade, foi realizado um mapeamento através de técnica de Mapeamento Digital de Solos (MDS). A metodologia escolhida para o MDS foi a proposta por Hermuche et al. (2002) com base na morfometria.

A proposta metodológica é fundamentada na espacialização das classes de solo em função de suas relações com as variações morfométricas que ocorrem nas sequencias das vertentes. A metodologia foi elaborada para a execução de mapeamentos preliminares com base em ferramentas SIG, com o objetivo de subsidiar os trabalhos de campo, agilizando os levantamentos com impacto na redução de custos e melhorias de precisão (HERMUCHE et al., 2002).

Os procedimentos consistem no uso do MDE do relevo (MDT) e cartas de fatores topográficos derivadas deste, como declividade, aspecto e área de contribuição. As composições são realizadas combinando três dos produtos cartográficos, cada um associado a uma das cores primárias, vermelho, verde e azul, ou *red green blue* (RGB), o resultado visual das composições coloridas realçam em uma única imagem uma complexidade sistêmica de várias informações ao mesmo tempo, permitindo já de início correlações de individualização das classes de solo (HERMUCHE et al., 2002; SILVA; ALVES; RODRIGUES, 2013).

O resultado inicial contribui na visualização das diferentes classes, as quais foram posteriormente definidas pelas análises estatística dos histogramas de frequência do MDT e declividades, cujos pontos de ruptura nos histogramas, aliados obviamente ao conhecimento pedológico servem para inferir os limites entre as diferentes classes de solos.

A composição e análise dos histogramas individuais foram realizadas através dos conjuntos de ferramentas *Raster* do módulo *Data Management Tools* também do *software* ArcMap 10.0. Ainda, através da ferramenta *From Raster* no módulo *Conversion Tools* as imagens *raster* reclassificadas conforme as análises dos histogramas, foram convertidas para polígonos, podendo então ser manipuladas para correções e ajustes finais da carta.

4.2.2.8 Carta de uso do solo e cobertura vegetal

O mapeamento do uso do solo e cobertura vegetal foi realizado utilizando as ortofotos em formato digital resultante do sobrevoo de 2010/2011, onde se procedeu com a edição vetorial delimitando cada polígono formado pelos diferentes tipos de usos, gerando ao final o plano de informação contendo os diversos usos do solo e cobertura vegetal na escala adequada a este trabalho.

O mapeamento destas classes através da análise dos padrões feita visualmente, embora permita um nível de detalhamento muito maior principalmente no que se refere ao uso, é bastante subjetiva, pois depende da interpretação e do conhecimento técnico do analista.

Desta forma, para ratificações e correções de interpretação, antes do início da digitalização dos polígonos de cada classe determinada na base digital, foram realizadas observações em campo, para uma melhor descrição dos tipos de uso do solo e cobertura vegetal.

4.2.2.9 Carta de distância do escoamento superficial à drenagem estendida

Para elaborar a carta de distância do escoamento superficial para a drenagem estendida, foi utilizado como base o MDE e a rede de drenagem estendida, composta dos *layers* de rede hidrográfica, ruas e estradas sem pavimentação, ruas e estradas pavimentadas, trilhas e carreadores, ferrovia, e algumas valas e drenos artificiais.

O MDE foi aprimorado com a ferramenta *Fill Sinks XXL* (Wang & Liu), uma versão básica dos algoritmos existentes no SAGA GIS 3.0.0 (CIMMERY, 2010), proposto por Wang e Liu (2006) objetivando identificar e preencher depressões superficiais em MDE, no entanto garantindo uma inclinação mínima descendente no percurso de escoamento de fluxo e, portanto mais adequado para aplicações em modelos hidrológicos. A rede hidrográfica estendida também passou por processamento sendo convertida para o formato *raster* com a ferramenta *Shapes to Grid* também no SAGA GIS 3.0.0. Posteriormente ambas os *raster* foram editados com a ferramenta *Extract by Mask* no ArcMap 10.0 para eliminar os dados das áreas de espelhos d'água, para que estas não fossem inclusas nos cálculos do escoamento de fluxo superficial.

Posteriormente com a ferramenta do SAGA-GIS 3.0.0 denominada *Overland flow distance to channel network*, foi produzida a carta de distância de fluxo para a rede de drenagem. Esta ferramenta possibilita a entrada de três diferentes tipos de dados: pixels válidos com os dados de altitude do MDE, pixels com os dados da rede de drenagem para onde as águas de cada célula válida escoam, e os pixels sem dados representando barreiras sem escoamento superficial (ALDER et al, 2014). A *raster* resultante, diferentemente de uma simples distância euclidiana, calcula para cada célula válida se o escoamento superficial pode atingir a rede de drenagem.

Ao final no ArcMap 10.0 o *raster* foi reclassificado utilizando o algoritmo *geometrical interval* o qual permite uma apresentação cartograficamente eficiente pelo aspecto de compreensão visual do resultado. Este algoritmo desenvolvido especificamente para a representação de dados contínuos minimiza a soma dos quadrados do número de elementos de cada classe, garantindo que cada intervalo representado tenha aproximadamente o mesmo número de valores com cada classe, e consequentemente intervalos mais consistentes (ESRI, 2012). Porém para uma melhor apresentação, os valores foram aproximados para intervalos próximos inteiros. O produto final foi reclassificado em 5 intervalos considerando o grau de fragilidade em relação à proximidade da rede de drenagem estendida, atribuindo valor 1 para áreas com maiores distâncias de menor fragilidade em relação à concentração do escoamento superficial até 5 para áreas mais próximas, e consequentemente com fragilidade mais elevada.

4.2.2.10 Carta de distância do escoamento superficial à rede hidrográfica

Os procedimentos utilizados para produzir a carta do escoamento superficial da rede hidrográfica são idênticos aos procedimentos do item anterior 4.2.2.9. No entanto esta carta tem como base apenas o MDE e a rede hidrográfica.

Ao final o *raster* elaborado representa a distância de escoamento superficial apenas para a rede hidrográfica.

A reclassificação deste *raster* foi realizada manualmente para os mesmos intervalos obtidos pela reclassificação da carta de distância do escoamento superficial de drenagem estendida, objetivando a comparação entre as cartas produzidas.

4.2.2.11 Carta de áreas diretamente e indiretamente conectadas

A carta de áreas diretamente e indiretamente conectadas pelo escoamento superficial foi elaborada pela combinação das cartas produzidas nos itens 4.2.2.9 e 4.2.2.10.

Para combinar ambos *rasters* foi utilizado a ferramenta *Bitwise Xor* disponível no conjunto *Spatial Analyst* do ArcMap 10.0. Embora o resultado *raster* da combinação apresente algumas poucas falhas, estas são facilmente percebidas nos locais onde o algoritmo não consegue diferenciar perfeitamente as áreas. Convertendo o *raster* para polígono as poucas áreas de conflito podem ser rapidamente editadas com a ajuda da sobreposição do layer de curvas de nível, e posteriormente convertidas para o formato *raster* novamente.

As divisões produzidas entre as áreas diretamente conectadas e indiretamente servem de mascara para separar os *rasters* preparados nos itens 4.2.2.9 e 4.2.2.10.

Ao final esta carta foi reclassificada para o grau de fragilidade associado à distância do escoamento superficial com a rede de drenagem estendida, dividida em áreas diretamente e indiretamente conectadas, com pesos de 1 a 5 respectivamente para os intervalos mais distantes até os intervalos mais próximos.

4.2.2.12 Carta de fragilidade potencial preliminar

A carta de fragilidade potencial preliminar foi elaborada a partir do cruzamento das cartas preliminarmente elaboradas nos itens 4.2.2.5 e 4.2.2.7, reclassificadas em valores de atributos estabelecidos para cada classe de fragilidade em relação às classes discriminantes dos produtos temáticos.

A geração da carta de fragilidade potencial foi realizada no ArcMap 10.0 por meio da sobreposição ponderada utilizando a ferramenta *Weighted Overlay* do conjunto *Spatial Analyst* (ESRI, 2012). O modelo aplicado realiza uma álgebra de dados cruzando as informações de cada *raster*, onde cada célula é representada por uma escala de valores. A soma dos respectivos valores de cada *raster* multiplicada pela sua influencia é representada em uma nova carta, reclassificada automaticamente para uma nova escala com os valores arredondados para os

números inteiros mais próximos. A porcentagem de influência para a carta de declividade foi estipulada em 80% e para a carta de solos 20%.

Em seguida, esta carta foi editada transformando-a em um produto temático com classes em categorias hierárquicas, conforme o seu nível de fragilidade potencial.

4.2.2.13 Carta de fragilidade emergente

A carta de fragilidade emergente foi obtida a partir da sobreposição das cartas elaboradas nos itens 4.2.2.8 e 4.2.2.12. O método de análise é o mesmo descrito em 4.2.2.12 utilizado para a geração da carta de fragilidade potencial.

Embora a metodologia proposta por Ross (1994) apresente um quadro com a classificação hierárquica dos graus de proteção do solo para alguns tipos de cobertura vegetal, fica explícito também que existe grande subjetividade na determinação destas classes, bem como da importância das observações de campo na atribuição das mesmas. Na ponderação para elaboração da carta de fragilidades do uso do solo e cobertura vegetal foram realizadas algumas adaptações, qualificadas principalmente em função das observações de campo realizadas na área de estudo. A porcentagem de influência de cada *raster* foi estimada em 50%.

4.2.2.14 Carta de fragilidade emergente associada à conectividade indireta

A carta de fragilidade associada ao escoamento superficial das áreas indiretamente conectadas foi elaborada utilizando como base a carta de fragilidade emergente resultante do item 4.2.2.13 sobreposta da carta de áreas indiretamente conectadas elaborada no item 4.2.2.11.

No pressuposto de que quanto maior a distância do escoamento superficial com a rede de drenagem diminui a probabilidade de conectividade, os valores da carta de fragilidade emergente e da carta de distância do escoamento superficial das áreas indiretamente conectadas foram multiplicados por pesos em função de cada classe de distância de escoamento superficial, objetivando assim manter uma coerência para que os pixels a montante localizados mais distantes da rede de drenagem estendida não apresentassem probabilidade de conexão maior do que os pixels imediatamente às margens da drenagem estendida. Este pressuposto assume

que áreas mais próximas da rede de drenagem apresentam maior risco de conexão do escoamento superficial, enquanto áreas mais distantes a possibilidade diminui à medida que o escoamento pode ser retardado em barreiras de escoamento ou mesmo infiltrado em pequenas depressões ao longo do caminho, necessitando assim de precipitações intensas e com longos períodos de retorno para atingir a rede hidrográfica. (HEATHWAITE; QUINN; HEWETT, 2005; ALDER et al 2015).

Embora em parte das áreas diretamente conectadas a distância de escoamento superficial é considerada relevante, alguns testes realizados não foram satisfatórios em função dos aspectos observados em campo. Esta situação se deve ao fato de que boa parte das áreas diretamente conectadas apresenta cobertura vegetal desempenhando o papel de barreiras de escoamento superficial. Assim, no processo de generalização estas áreas foram mantidas conforme os resultados obtidos da Carta de Fragilidade Emergente.

A elaboração desta carta foi realizada no ArcMap 10.0 por meio da ferramenta *Raster Calculator* do conjunto *Spatial Analyst* (ESRI, 2012). Nesta ferramenta cada pixel de acordo com sua localização no intervalo de distância da rede de drenagem estendida para as áreas indiretamente conectadas foi multiplicado pelos respectivos pesos da sua classe de fragilidade emergente e da própria classe de distância do escoamento. O resultado final da soma dos produtos varia de 1 a 5 que correspondem respectivamente aos valores já classificados de fragilidades variando de muito fraca, fraca, média, forte e muito forte.

Tabela 2 – Fatores de peso adotado nas áreas indiretamente conectadas.

Classe de distância de fluxo	Fator de multiplicação das classes de distância de fluxo	Fator de multiplicação das classes de fragilidade emergente
1	0,50	0,50
2	0,60	0,40
3	0,70	0,30
4	0,80	0,20
5	0,90	0,10

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Carta base digital e informações de referência planialtimétricas

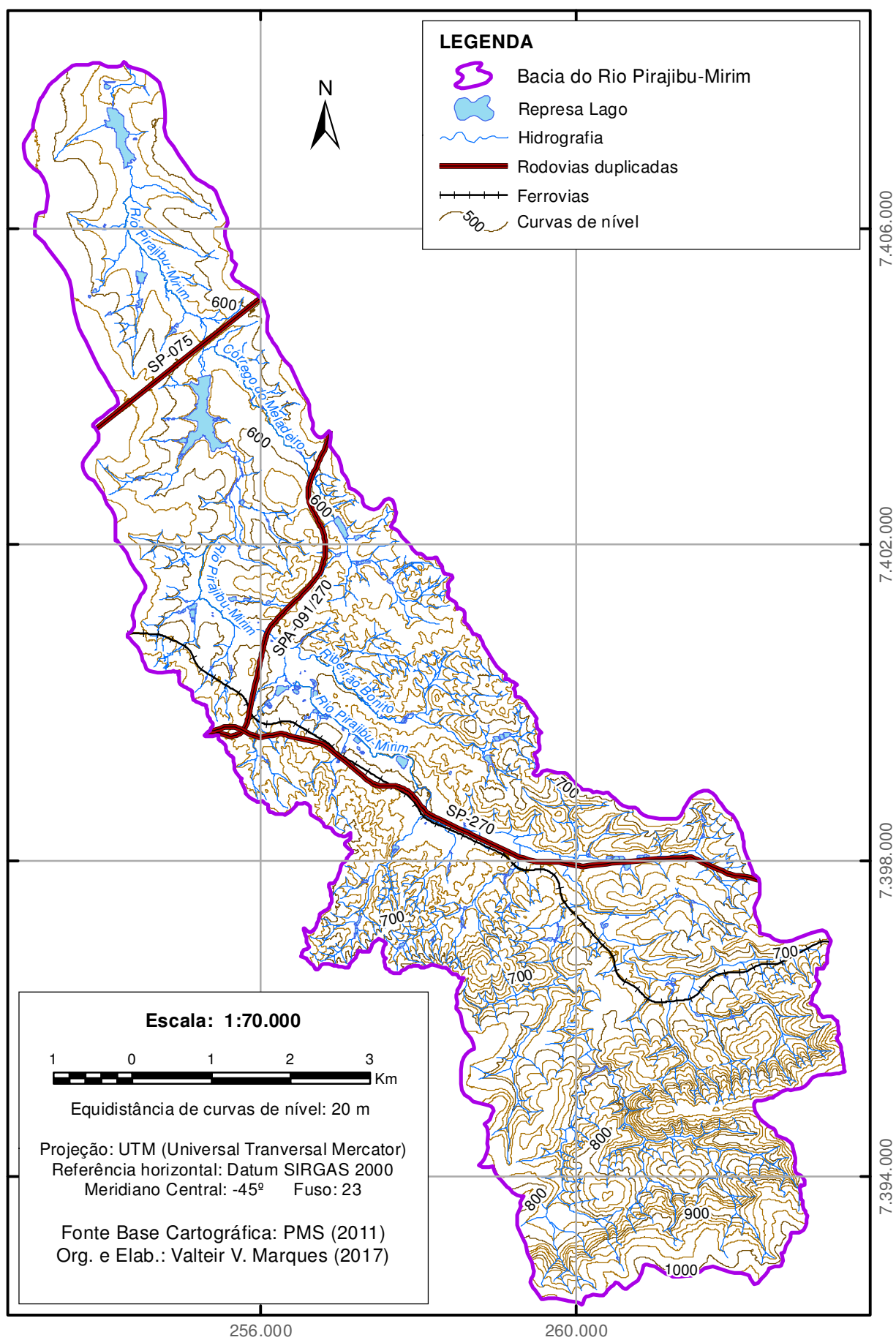
A Figura 4 mostra a carta base digital e informações de referência planialtimétricas composta dos dados compilados tendo como base as cartas topográficas e trabalho de campo.

A carta base apresentando as curvas de nível, rede hidrográfica e sistema viário, permitem constatar que o relevo apresenta grandes variações altimétricas e um intervalo reduzido entre as curvas de nível na média e alta bacia podendo já ser inferido declividades mais elevadas para estes trechos, enquanto na baixa bacia nota-se maior espaçamento entre as curvas inferindo declividades menores.

Em conjunto com as curvas de nível, a rede de drenagem através de seus padrões e distribuição revela em parte o contexto geomorfológico e permite algumas deduções sobre o contexto geológico antes mesmo dos trabalhos de campo, onde se nota nitidamente o controle estrutural da litologia através da orientação e ângulos de bifurcação.

Através do sistema viário embora com limitações, já se nota a distribuição da área urbanizada concentrando-se vias pavimentadas localizadas nos distritos do Éden e Brigadeiro Tobias, enquanto as estradas vicinais e caminhos não pavimentados se distribuem por toda a bacia inclusive nas áreas de relevo mais acidentado.

Figura 4 - Carta base



5.2 Hidrografia e análise areal da bacia

5.2.1 Padrões de drenagem

A partir da Carta Base Digital contendo as informações de referência planialtimétricas, tais como, hidrografia foi realizado um estudo dos parâmetros hidrológicos, relacionados às características hidrológicas da bacia.

A bacia apresenta características diversificadas, com estreita relação com os diversos tipos litológicos, sendo os padrões de drenagem variando de treliça a dendrítica, e em alguns locais, com padrão subparalelo (CHISTOFOLETTI, 1974).

O padrão treliça se destaca sobremaneira na área dos metassedimentos do Grupo São Roque, onde acompanha os padrões de foliação e fraturamento das rochas, destacadamente sobre os metarritmitos, onde a alta foliação e alternância rítmica entre camadas de metassiltitos e filitos intercalados com metarenitos de resistência diferenciada condicionam este padrão. No corpo dos metarenitos mais ao norte da área entre o granito Sorocaba e os sedimentos do Subgrupo Itararé, esta área é mais dissecada, e apresenta declividades menores com um padrão de drenagem variando de treliça a dendrítica subparalela.

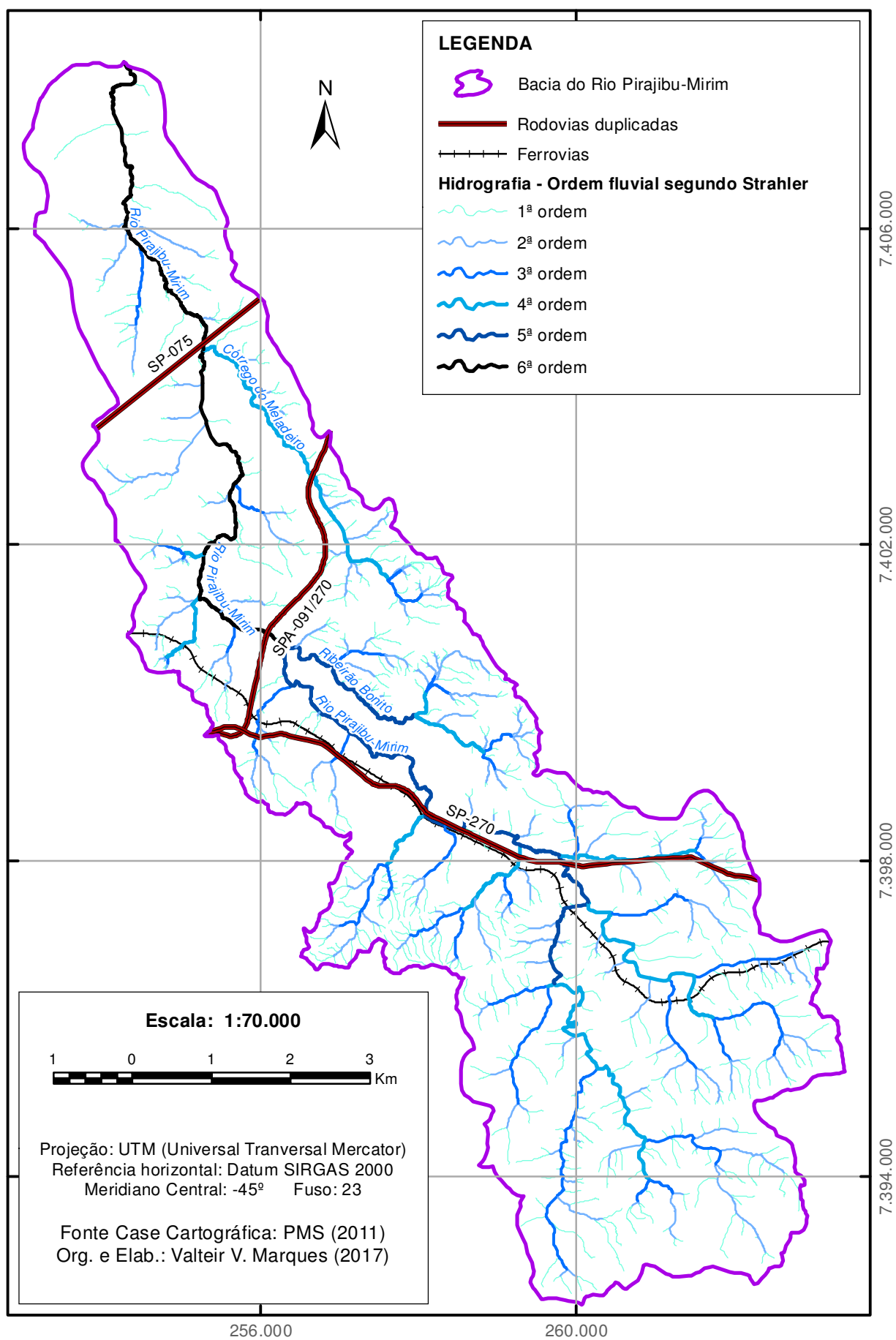
Quanto ao padrão dendrítico destaca-se na área do maciço Sorocaba, sobremaneira nas cotas acima dos 610 m, abaixo destas cotas em declividades menos acentuadas, sobre áreas de colúvio e nas planícies fluviais, apresentam alguns poucos canais coletores que drenam os afluentes para o canal do Rio Pirajibu, ou diretamente para o Ribeirão Bonito e alto trecho do Córrego do Meladeiro na porção norte do granito.

A área que registra o padrão dendrítico subparalelo, é marcante na baixa bacia onde afloram os sedimentos do Subgrupo Itararé, e embora apresentem certa orientação linear é difícil afirmar que possuam algum controle estrutural.

5.2.2 Hierarquia fluvial

A hierarquia fluvial determinada segundo Strahler (1952) indicam para o Rio Pirajibu-Mirim uma ordem de 6º grau (Figura 5).

Figura 5 - Hierarquia fluvial



Na Tabela 3 encontram-se detalhados os dados obtidos referentes à hierarquia fluvial, como quantidade de segmentos, comprimento médio e comprimento total conforme a ordem efetuada segundo Strahler (1952) e Horton (1945).

Tabela 3 – Hierarquia fluvial da bacia ordenada segundo Strahler e Horton.

Ordem	Quant. de se segmentos		Compr. médio dos segmentos (km)		Compr. total da ordem (km)	
	Strahler	Horton	Strahler	Horton	Strahler	Horton
1	642	488	0,198	0,198	127,13	96,58
2	158	123	0,321	0,482	50,69	59,23
3	37	28	0,708	1,185	26,21	33,17
4	10	11	1,884	2,509	18,84	27,60
5	2	1	5,371	2,546	10,74	2,55
6	1	1	10,134	24,616	10,13	24,62

Destaca-se dos trabalhos de campo, que boa parte dos canais de 1ª ordem, e em alguns casos 2ª, tratam-se de cursos d'água intermitentes, ou ainda em alguns casos podendo estes cursos ser considerados efêmeros.

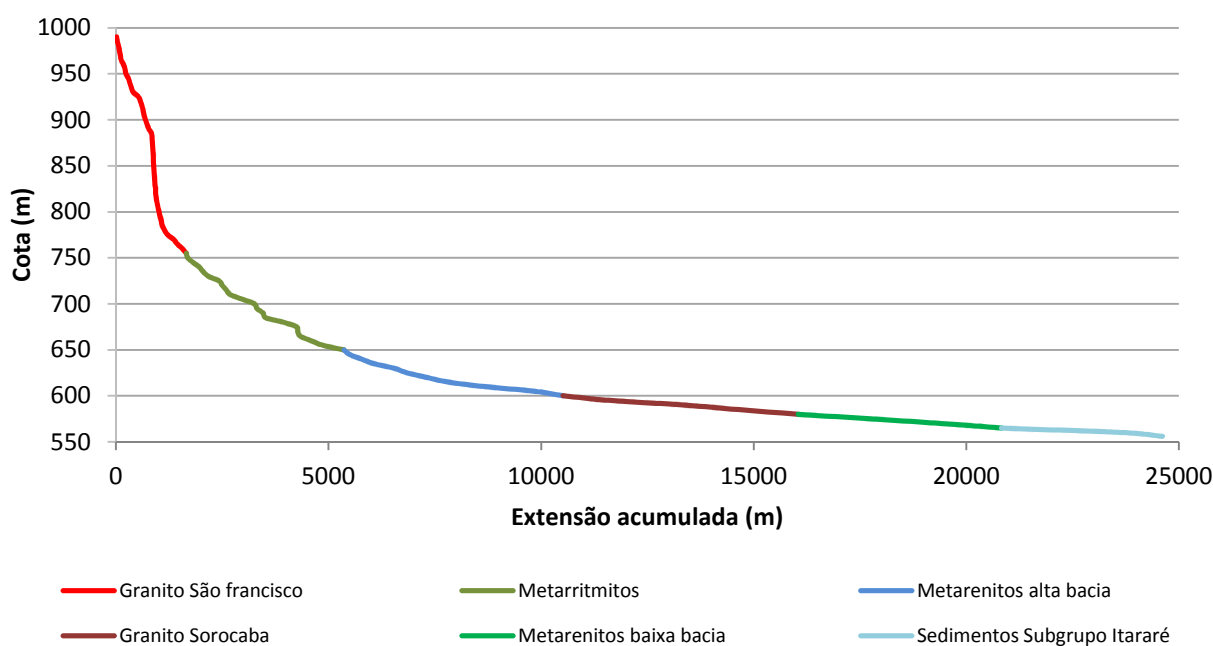
5.2.3 Declividade equivalente do canal principal (I_{eq})

A declividade equivalente do canal do Rio Pirajibu-Mirim é de 0,0048 m/m ou 4,88 m/km, apresentando declividades máximas por segmento entre cotas de 0,917 m/m e mínimas de 0,002 m/m.

No perfil longitudinal apresentado na Figura 6 são observadas declividades mais acentuadas no trecho de montante suavizando no trecho médio e jusante, expondo nítidas diferenças respectivas a cada compartimento litológico que condicionam uma morfologia diferenciada do canal. No trecho da nascente até a cota de 760m que compreende o maciço granítico São Francisco apresenta altas declividades com média de 0,3178 m/m, com uma ruptura marcante entre as cotas de 860 e 845 m chegando a atingir declividade de 0,9170 m/m. No trecho dos metarritmitos entre as cotas de 760 e 655 m, também com declividade acentuada, média de 0,0561 m/m, apresenta perfil levemente côncavo com várias rupturas que destacam o caráter diferenciado de resistência da rocha, bem como o seu encaixe nas estruturas (fraturas), de forma que varia de declividades baixas da ordem de

0,0118 m/m a 0,2305 m/m. Deste ultimo trecho para a transição com os metarenitos forma um perfil convexo entre as cotas de 655 e 645, passando a perfil côncavo no trecho que compreende os metarenitos, apresentando declividades mais acentuadas na parte montante que chegam a 0,0377 m/m e ao final no contato com o maciço Sorocaba declividade suave da ordem de 0,0043 m/m. Na transição deste ultimo para o maciço Sorocaba e nas litologias a jusante formada por metarenitos e pelos sedimentos do Subgrupo Itararé quase não há alteração das declividades, pois se apresenta levemente côncavo com declividades médias de 0,0047 m/m no granito, e 0,0033 m/m nos demais.

Figura 6 – Perfil longitudinal do Rio Pirajibu-Mirim.



Fonte: autoria própria.

5.2.4 Índice de sinuosidade (I_{sin})

O índice de sinuosidade do Rio Pirajibu-Mirim, da ordem de 42,94 %, pode ser classificado como sinuoso (MANSIKKANIEMI, 1970 apud SILVA; NEVES; VENDRUSCULO, 2014). Este índice apresenta forte relação com o escoamento da água no canal, quanto mais sinuoso menor será a velocidade de escoamento, o que facilita os processos de acúmulo de sedimentos e o consequente assoreamento.

5.2.5 Densidade de drenagem (Dd)

O canal do Rio Pirajibu-Mirim apresenta uma extensão total de 24,62 km, e quando somadas todas as ordens de canais, a rede de drenagem soma quase 244 km de extensão. Considerando a área da bacia de 55,35 km², se obtém uma densidade de 4,40 km/km², a qual pode ser considerada alta segundo Vilela e Matos (1975). No entanto verifica-se que esta densidade não é uniforme em toda a bacia, o que é reflexo da litologia. Observando a carta geológica (Figura 11), fica muito claro que a rede de drenagem é mais densa sobre as áreas do embasamento quando comparadas às áreas dos sedimentos Paleozóicos. Embora ocorra exceção no trecho médio da bacia sobre o Maciço Sorocaba e o corpo de metarenitos a norte deste, onde o vale do Rio Pirajibu-Mirim é mais amplo e com declividades menores refletindo em uma densidade de drenagem inferior as outras áreas do embasamento, bem como no topo da serra de São Francisco que se estende em superfícies aplainadas para além do divisor de águas da bacia.

5.2.6 Extensão média do escoamento superficial (l)

A extensão média do escoamento superficial indica a distância média que a água da chuva que cai sobre a bacia irá encontrar para chegar ao leito de um canal, lembrando que este valor é a média para toda a bacia, havendo variação conforme a densidade de drenagem existente em cada setor, pois quanto menor a densidade de drenagem maior será a superfície de contribuição, e maior será o percurso para o deflúvio atingir um canal. Os valores resultantes para a bacia como um todo foram de 0,057 km ou 56,77 m. Os quais devem variar significativamente em função das diferenças de densidade de drenagem já expressas em item anterior.

5.2.7 Coeficiente de compacidade (Kc)

A bacia apresenta coeficiente de compacidade de 1,94. Este valor que basicamente expressa uma forma de bacia distante de um círculo, quadrado ou oval, se aproximando mais de um retângulo ou triângulo, o que indica que quando da ocorrência de chuvas intensas, haverá pouca possibilidade de enchentes dado ao

retardamento do escoamento das chuvas. No entanto vale lembrar que em algumas sub-bacias dos afluentes estas condições podem ser totalmente diferenciadas.

5.2.8 Fator de forma da bacia (Ff)

O fator de forma que expressa a relação entre a largura média da bacia em função do eixo longitudinal desta, apresenta implicações semelhantes ao coeficiente de compacidade, indicando quando existem maiores possibilidades de ocorrência de cheias. No caso da bacia do Rio Pirajibu-Mirim o valor encontrado foi de 0,09, o qual indica baixa possibilidade de ocorrência de inundações, pois nesta a contribuição de cada afluente ocorre de forma distribuída em um formato alongado o que diminui a concentração do deflúvio concentrado como ocorre em bacias circulares.

5.3 Modelagem digital do relevo

Tendo também como base a Carta Base Digital, foi realizada a modelagem do relevo. A Figura 7 apresenta a Carta Hipsométrica elaborada segundo o descrito no item 4.2.1.4.

A Figura 7 foi elaborada com equidistância de 40 m a partir da cota de 550 m obtendo-se 12 divisões até a cota de 1.030 m. A carta mostra uma grande predominância da amplitude topográfica entre as cotas de 590 e 670 m.

Para uma melhor compreensão e análise da variação topográfica foi elaborada ainda a curva hipsométrica para a área da bacia (Figura 8).

Através da Figura 8 se observa mais claramente que a amplitude topográfica da bacia é alta, equivalente a 471 m, este fato indica alta probabilidade de ocorrer variações climáticas entre a parte montante e jusante da bacia. Segundo Villela e Mattos (1975), estas variações podem influenciar tanto sobre as precipitações como nas perdas por evaporação e transpiração, influenciando assim diretamente sobre o deflúvio médio. Além disso, pode-se afirmar que a bacia apresenta características geologicamente maduras, marcada pela disposição e a diminuição das altitudes em função do desgaste erosivo. Este fato é marcante na curva hipsométrica, pela forma de distribuição das frequências acumuladas, e a proximidade entre a altitude média e mediana (LINSLEY et al., 1975 apud BORSATO; MARTONI, 2004).

Figura 7 - Carta hipsométrica

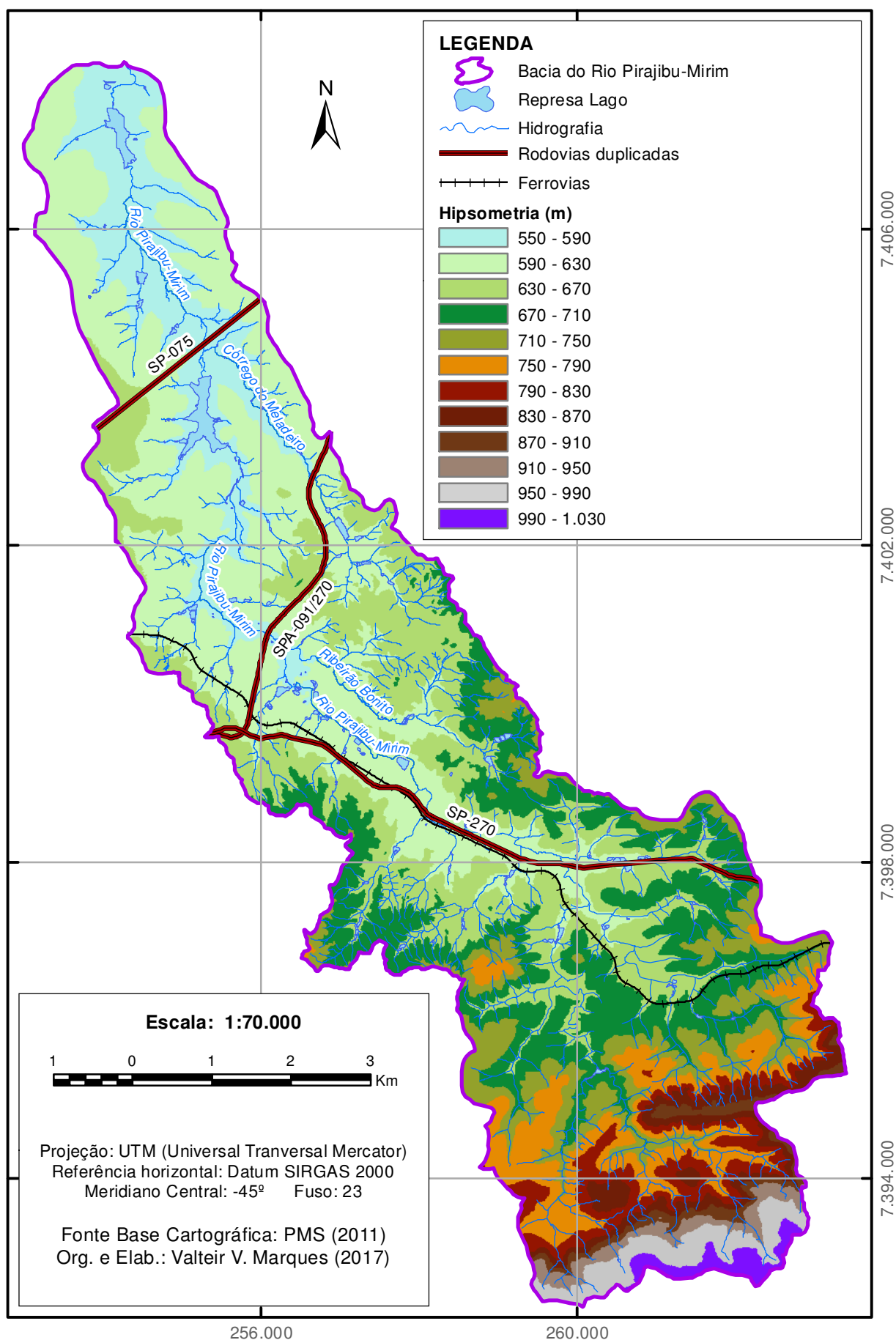
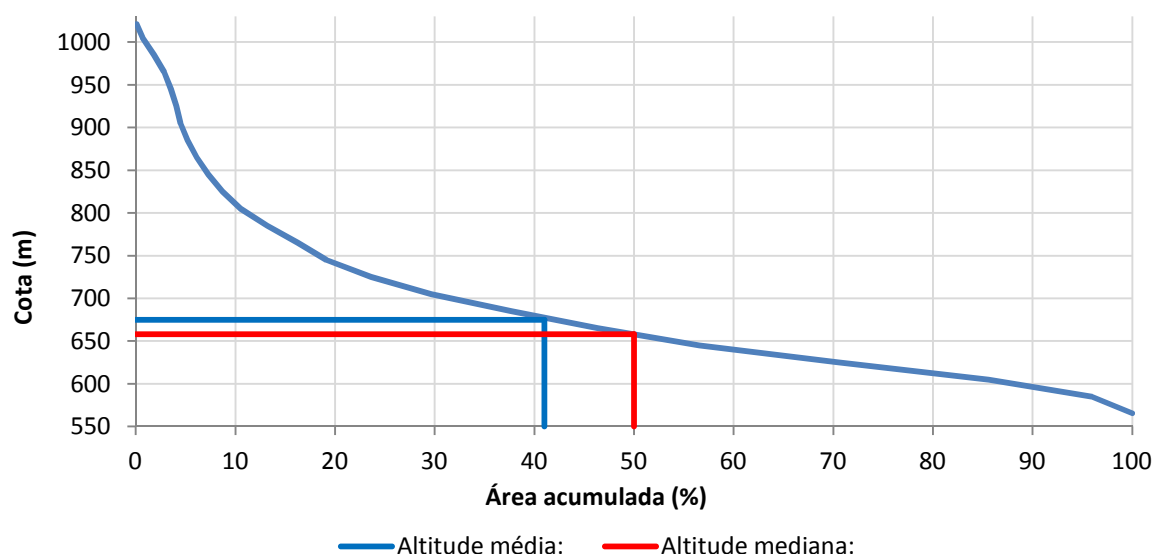


Figura 8 – Curva hipsométrica

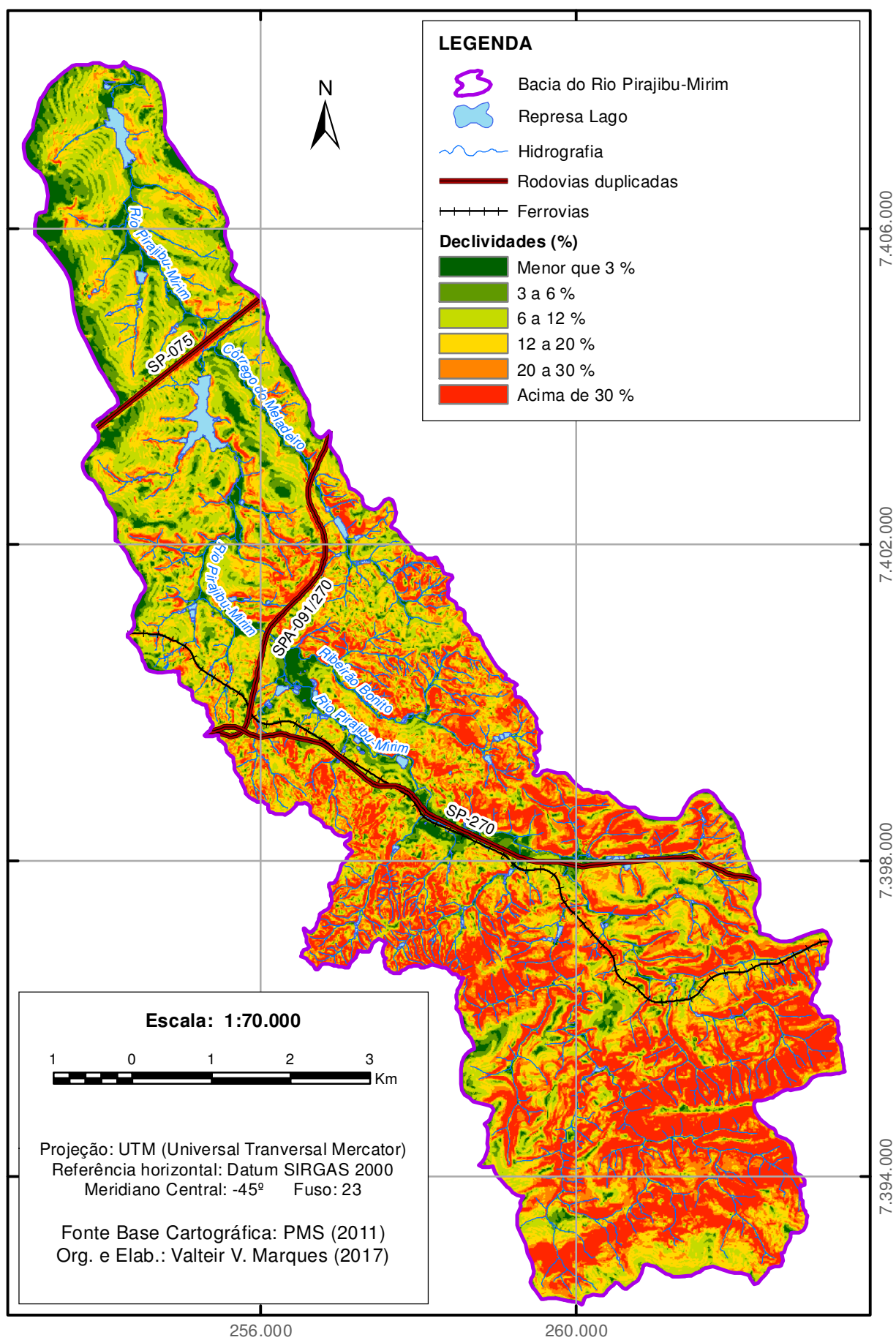
5.4 Declividade

A carta de declividades derivada do MDE é apresentada na Figura 9 com a finalidade de representar os aspectos de compartimentação geomorfológica da bacia.

Podem ser observadas ao analisar a Figura 9 que as declividades menores da ordem de 0 a 12% predominam no setor norte da bacia, onde se encontram os sedimentos do Subgrupo Itararé, percebendo ainda discreta transição para os metassedimentos onde embora ainda predominem declividades de até 12%, nos vales mais entalhados nota-se frequentemente declividades de 12 a 30 % e mais próximos à rede hidrográfica frequentemente superior a 30%.

Em direção a montante, nas áreas ocupadas pelas rochas graníticas do maciço Sorocaba e em metarenitos do Grupo São Roque, observa-se um predomínio de declividades médias a altas 12 a 30%, atingindo frequentemente declividades superiores a 30%, exceção apenas para as faixas marginais ao canal do Rio Pirajibu-Mirim onde são verificados relevos mais suaves e com declividades entre 0 a 12% em áreas recobertas às vezes por solos coluviais, bem como em alguns topos de divisores aplainados nas áreas dos metarenitos onde ocorrem latossolos.

Figura 9 - Carta de declividades



No setor sul a montante da bacia, onde se encontram os metarritmitos e as rochas graníticas do maciço São Francisco, observa-se relevo extremamente acidentado, com declividades acima dos 30% predominando nas bordas do planalto, onde se encontra um conjunto de morros denominados Serra de São Francisco e Serra de Inhaíba. Enquanto nos interflúvios predominam declividades um pouco mais baixas da ordem de 6 a 20% e em algumas poucas exceções apresenta valores entre 3 e 6%.

A Tabela 4 apresenta as frequências das declividades de acordo com seu grau de inclinação.

Tabela 4 – Tabela de frequência de declividades.

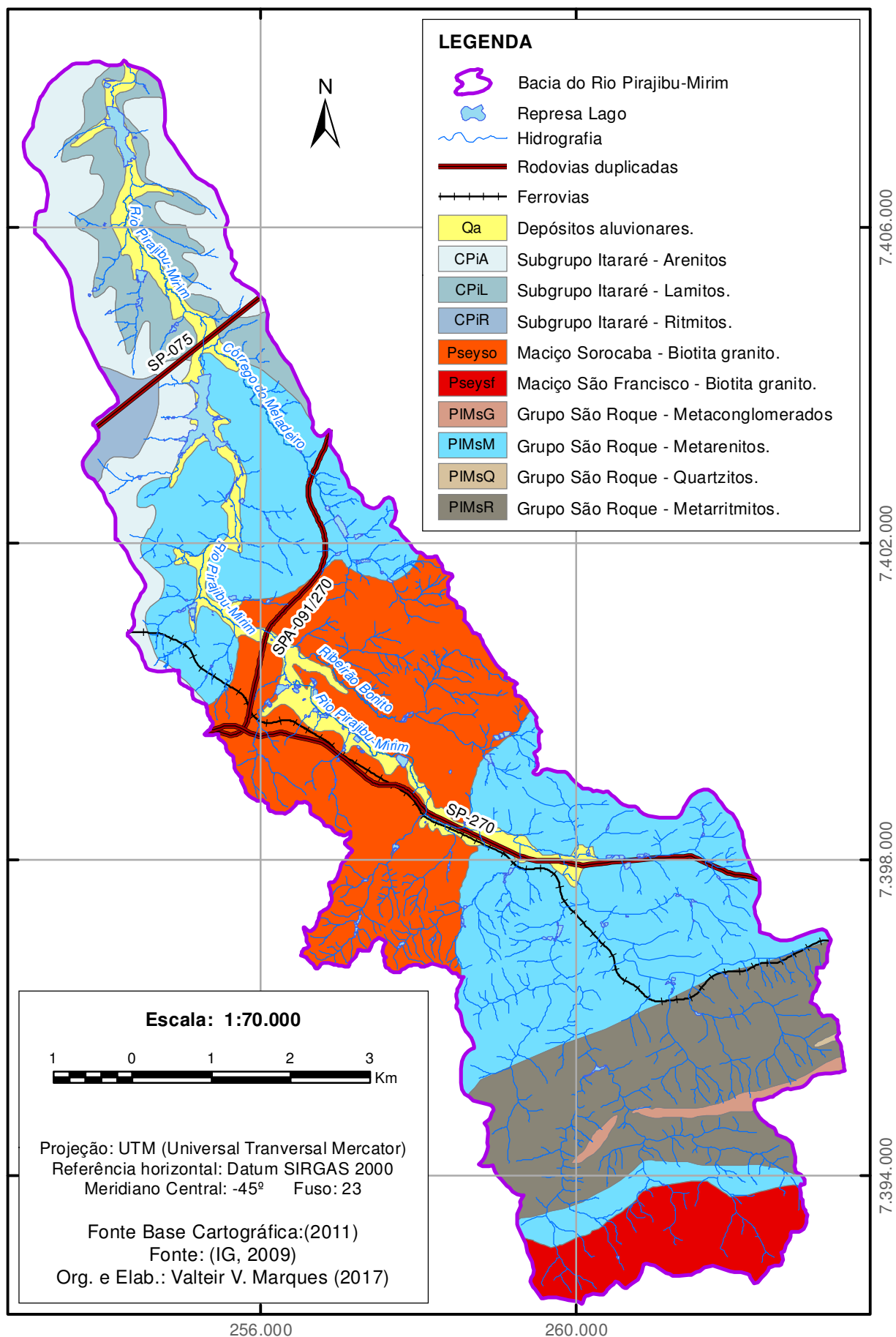
Classe (%)	Área (km ²)		Frequência (%)	
	Intervalo	Acumulado	Intervalo	Acumulado
< 3	3,76	3,76	6,79	6,79
3 a 6	5,03	8,79	9,09	15,88
6 a 12	11,74	20,53	21,21	37,10
12 a 20	12,55	33,08	22,67	59,77
20 a 30	9,20	42,28	16,61	76,38
> 30	13,07	55,35	23,62	100,00

De forma geral, pode ser observado que existe uma predominância na bacia de declividades muito elevadas, apresentando a maior frequência para declividades acima dos 30% correspondente a 23,62% da área total da bacia, apresentando ainda frequências muito próximas para as classes de 12 a 20%, 6 a 12% e 20 a 30%, com as respectivas frequências de 22,67, 21,21 e 16,61%, e com menores representações as classes entre 3 a 6% e menor que 3% com frequências respectivas de 9,09 e 6,79%.

5.5 Geologia

Para a geração da carta geológica foi inicialmente como descrito no item 4.2.2.3 sobreposta a área da bacia sobre o Mapa do Instituto Geológico em escala 1:50.000. Em seguida foi vetorizado as feições que coincidiu com a área de estudo e gerada a carta de Geologia da Bacia Hidrográfica do Rio Pirajibu-Mirim (Figura 10).

Figura 10 - Carta geológica (IG, 2009)



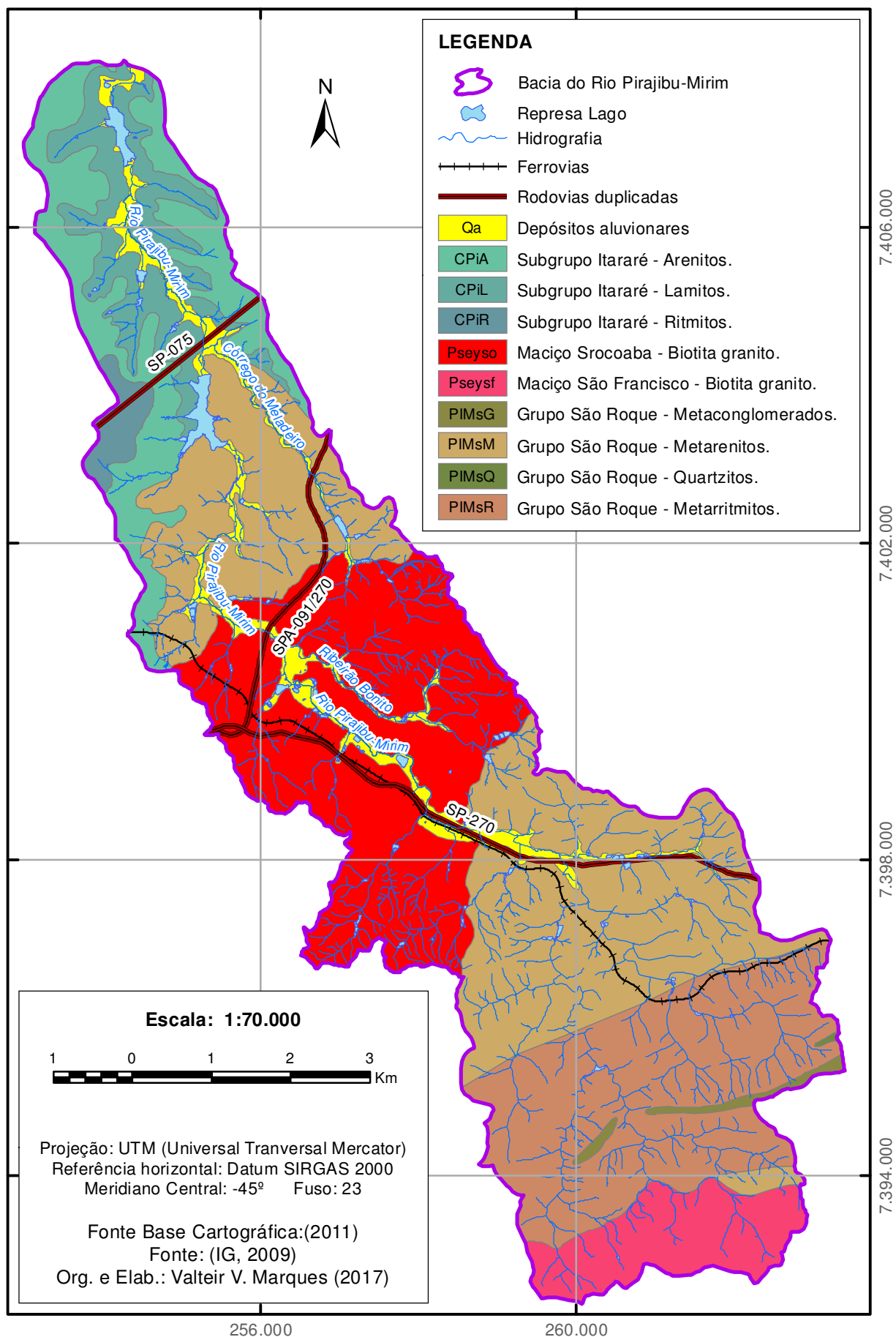
A figura 10 apresenta boa correlação com o levantamento de campo, sendo feito apenas algumas correções em relação à delimitação de algumas das unidades, devido principalmente à escala diferenciada de trabalho, produzindo ao final a carta apresentada na Figura 11.

Foram encontrados em campo três locais com diferenças significativas onde foram redefinidos os limites das áreas mapeadas. Uma delas esta no contato do maciço Sorocaba (PSeyso) e a unidade de predominância dos metarenitos do Grupo São Roque (PIMsM) ao norte deste, sendo que a área mais significativa, é encontrada na borda norte do polígono formado pelo maciço Sorocaba, especialmente na porção noroeste, em uma faixa que se estende da margem esquerda do canal do Pirajibu-Mirim até o divisor da bacia, onde afloram em um pequeno topo, grandes matacões de granito em meio a uma área verde. Ainda através das ruas que atravessam as duas unidades é possível verificar facilmente o contato diferente do estabelecido no mapeamento anterior.

Outra diferença também foi levantada na unidade representada pelos sedimentos quaternários inconsolidados de depósitos aluviais e terraços, que compreendem os fundos de vale do próprio Pirajibu-Mirim e de alguns de seus afluentes principais, como o Córrego do Meladeiro e o Ribeirão Bonito, ambos situados na margem direita do Pirajibu-Mirim. Em termos quantitativos a diferença desta unidade não é tão significativa, representando uma diminuição de pouco mais de 7% equivalente a uma área de 0,23 km². No entanto em função da escala de trabalho diferenciada, as faixas mapeadas apresentam formato mais delgado ocupando áreas menores em extensão lateral nas margens do próprio Pirajibu-Mirim, porém permitindo uma melhor representação prolongando o mapeamento em direção à montante dos afluentes citados, o que não foi possível na escala menor de trabalho do mapeamento do Instituto Geológico.

Por ultimo, o corpo formado pelos metarenitos do Grupo São Roque no contato com o granito São Francisco, também foi significativamente alterado no mapeamento, uma vez que nos pontos de observação em campo, e nas avaliações de fotogeologia, foi verificada a continuidade dos metarenitos nestas áreas não havendo prolongamento da faixa de metarenitos como no mapeamento anterior. No entanto é importante ressaltar, que a avaliação em campo desta área é bastante prejudicada pelo recobrimento de espesso colúvio na base da Serra.

Figura 11 - Carta geológica retificada



5.6 Solos

A Carta de Solos elaborada conforme descrito no item 4.2.2.7 é apresentada na Figura 12.

As visitas de campo, com os levantamentos preliminares de geologia, geomorfologia e demais aspectos físicos, foram efetivas nas observações dos pontos de ruptura nos histogramas de declividade e MDT utilizados para inferir a delimitação entre as classes de solos.

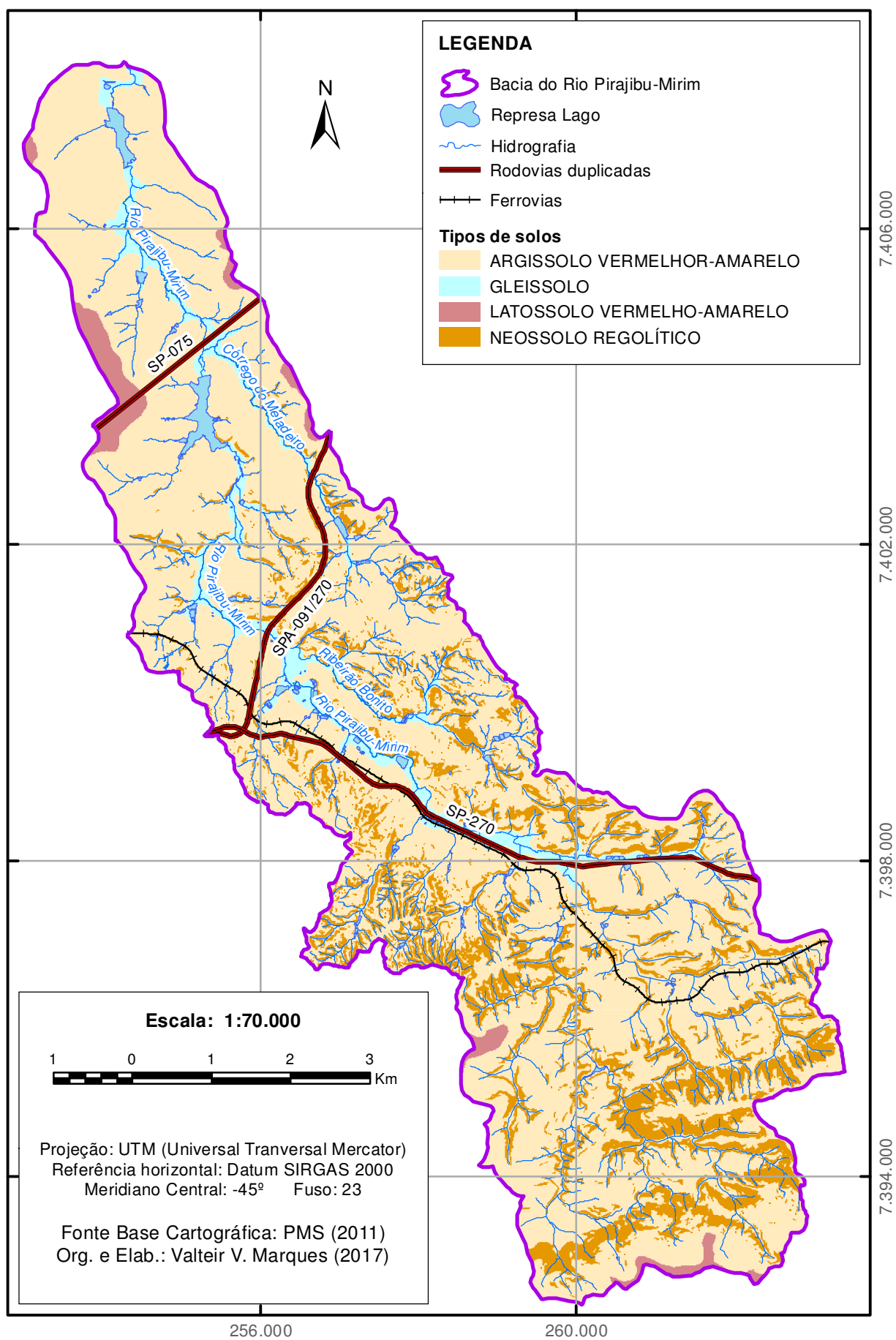
Na carta de solos apresentada na Figura 12 nota-se que os argissolos se distribuem por toda a bacia, porem dominando a baixa e média bacia e áreas de menores declividades na alta bacia. Em sua área de abrangência é verificada a predominância de relevos ondulados a fortemente ondulados, e se relacionam principalmente a declividades situadas entre 6 e 20 %. Embora estas áreas tenham sido classificadas em função da predominância dos argissolos, nota-se também em alguns locais a presença de cambissolos, principalmente nas regiões de relevos fortemente ondulados, com declividades e densidade de drenagem mais elevadas.

Quanto aos neossolos ocupam as áreas de maiores declividades, geralmente superiores a 20%, que estão distribuídas predominantemente na alta bacia e em alguns setores da média bacia. Estes solos são pouco desenvolvidos e de espessura incipiente, aflorando em alguns poucos locais a própria rocha matriz. Embora verificada ocorrência tanto de neossolos litólicos como regolíticos, em função da baixa profundidade e alta declividade onde ocorrem, ambos apresentam elevado potencial erosivo e consequentemente fragilidade muito elevada.

Quanto aos gleissolos ocupam as áreas de várzea equivalente aos sedimentos quaternários que ocupam as planícies do Rio Pirajibu-Mirim e alguns de seus afluentes principais, embora para esta classe se admita que possam ocorrer também presença de neossolos flúvicos, ambos apresentarem atributos de fragilidade iguais, não interferindo na metodologia fragilidade potencial.

Os latossolos encontram-se distribuídos predominantemente nos topos divisores de declividades suaves na baixa bacia sobre os sedimentos do Subgrupo Itararé, e em menor proporção em alguns trechos de topos aplainados da área do embasamento cristalino. Bem desenvolvidos e profundos, são naturalmente bem drenados apresentando baixo potencial erosivo, no entanto quando cortados em obras demonstram-se tão suscetíveis a erodibilidade quanto os demais.

Figura 12 - Carta pedológica



Embora não tenha sido realizada uma validação pormenorizada do mapeamento de solos elaborado da compilação da carta elaborado pelo IAC (OLIVEIRA, 1999) em escala 1:500.000, e sua retificação com base na metodologia apresentada no item 4.2.2.7, o levantamento de campo preliminar demonstrou boa correlação dos resultados obtidos. A Tabela 5 mostra o quantitativo das classes da área de estudo.

Tabela 5 – Representatividade das classes de solos no mapeamento da bacia

Classes de solos	Área (km²)	Cobertura da bacia (%)
Argissolos	42,42	76,65
Neossolos	8,91	16,09
Gleissolos	2,84	5,13
Latosolos	1,18	2,13
Totais	55,35	100,00

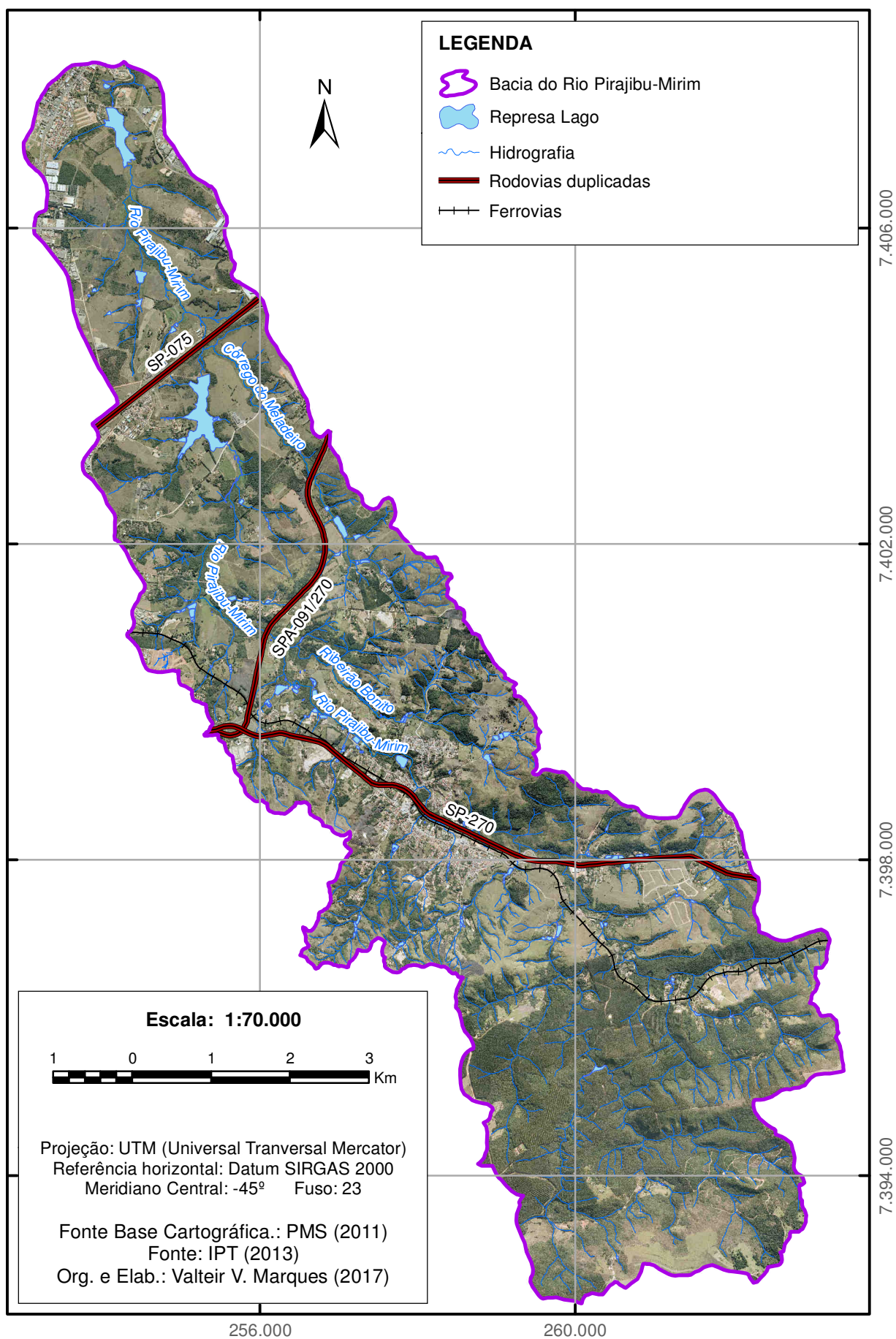
É importante relatar que os podzólicos definidos na proposta de Ross (1994), equivalem atualmente aos argissolos, segundo o atual Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (EMBRAPA, 2006).

5.7 Ortofotomosaico

A Figura 13 mostra o ortofotomosaico elaborado das fotografias aéreas conforme descrito no item 4.2.2.2 da metodologia.

Na Figura 13 é possível observar os padrões de uso do solo e da cobertura vegetal onde pode ser notado que a urbanização mais densa ocorre apenas na média bacia margeando a Rodovia Raposo Tavares no Distrito de Brigadeiro Tobias e em pequena parte da baixa bacia na região do Éden. Na média bacia ainda é observado o avanço da urbanização com a implantação de loteamentos. Também se nota claramente a predominância das áreas de pastagem distribuídas por toda a baixa e média bacia, e ainda em partes da alta bacia. A vegetação arbórea caracterizada por formações nativas e áreas de reflorestamento, embora distribuída em pequenos fragmentos por toda a bacia, na alta bacia é predominante.

Figura 13 - Ortofotomosaico



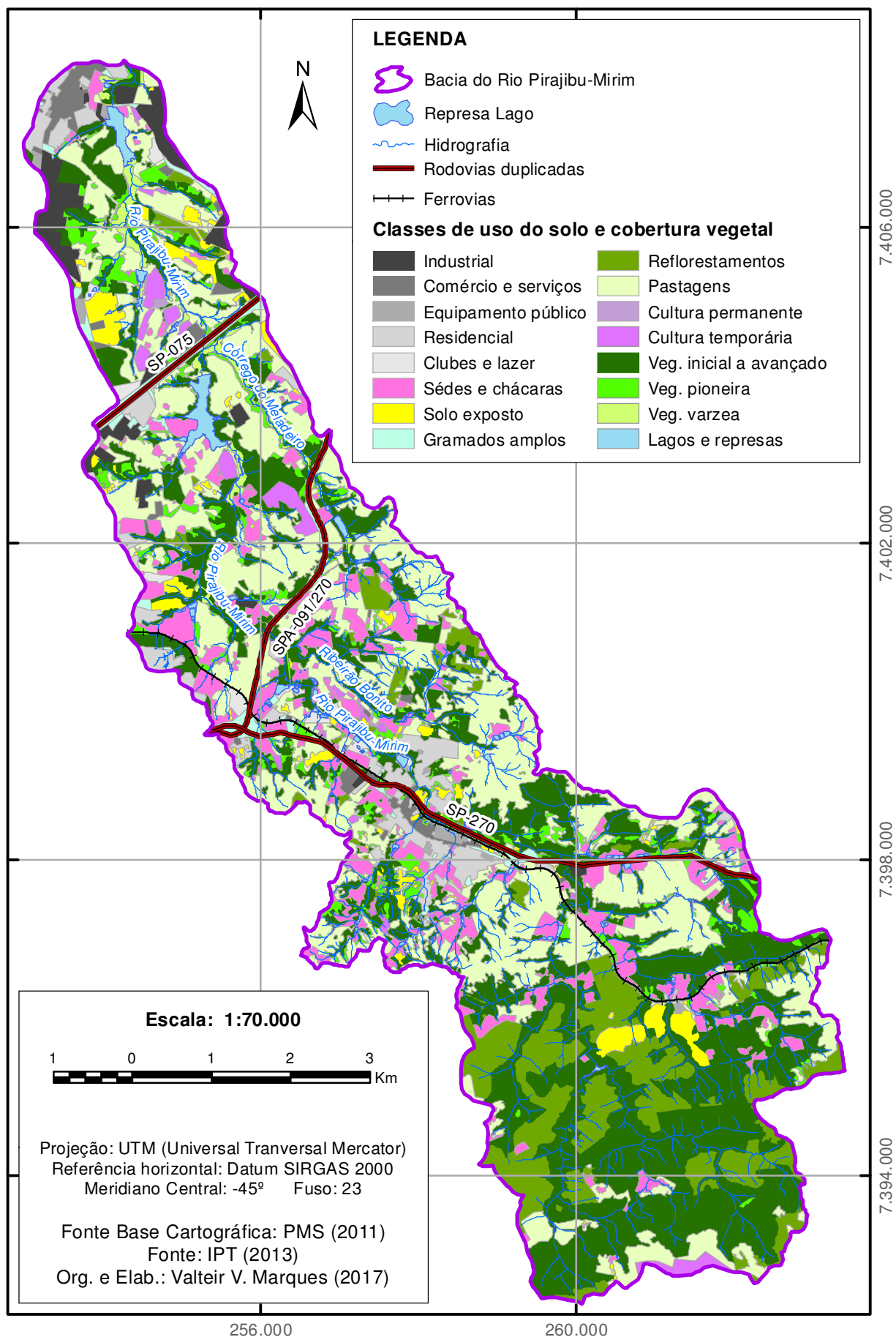
5.8 Uso do solo e cobertura vegetal

A Carta de Uso do Solo e Cobertura Vegetal é mostrada na Figura 14 elaborada segundo o discriminado no item 4.2.2.8.

Devido as históricas intervenções humanas a área apresenta forte alteração antrópica, principalmente nos setores de centro para o Norte da bacia, embora na sua parte Sul apresente áreas cobertas por vegetação nativa. Como foi observado em campo, esses fragmentos florestais, apresentam-se na sua maioria em estágio inicial a médio de regeneração com DAP, presença de epífitas, e serrapilheira bastante variável tanto entre fragmentos como no interior dos mesmos. Entre as espécies verificadas estão, *Gochnatia polymorpha* (cambará), *Anadenanthera falcata* (angico-do-cerrado), *Luehea grandiflora* (açoita-cavalo-graúdo), *Stryphnodendron adstringens* (barbatimão), *Casearia sylvestris* (cafezinho), *Bauhinia forficata* (pata-de-vaca), *Bauhinia longifolia* (pata-de-vaca), *Vochysia tucanorum* (fruta-de-tucano), *Psidium rufum* (araçá-roxo), *Didymopanax macrocarpum* (mandioquinha-do-cerrado); *Diospyrus hispida* (caqui-do-cerrado), *Peschiera fuchsiaefolia* (leiteiro), *Zanthoxylum rhoifolium* (mamica-de-porca), *Cecropia* sp (embaúba), *Kielmeyera rubriflora* (rosa-do-cerrado), *Cupania vernalis* (arco-de-peneira), *Rapanea guianensis* (capororoca), *Croton floribundus* (capixingui), *Machaerium aculeatum* (jacarandá-bico-de-pato), *Casearia sylvestris* (cafezinho), *Guazuma ulmifolia* (mutambo), *Piptocarpha rotundifolia* (candeia), *Trichilia pallida* (baga-de-morcego), *Machaerium villosum* (jacarandá-paulista), *Syagrus romanzoffiana* (jerivá), *Piptadenia gonoacantha* (pau-jacaré), *Helicteres* sp (rosca), *Lithraea molleoides* (aroeira-brava), *Cordia sellowiana* (chá-de-bugre), *Cordia trichotoma* (louro), entre outras não identificadas.

Tendo em vista as diferentes datas, entre o produto digital e as visitas em campo, foram verificadas algumas inconsistências principalmente sobre áreas de solo exposto recentes, referentes a implantação de empreendimentos em andamento, onde foi observado que se destacavam problemas de erosão e assoreamento dos corpos hídricos nas proximidades. Para estas áreas de solo exposto mais expressivas, foi realizado um detalhamento sobre imagens de satélites mais recentes do ano de 2015, obtidas através do *software* Google Earth Pro, para as quais após o georreferenciamento foi realizada a edição vetorial diretamente no monitor.

Figura 14 - Uso do solo e cobertura vegetal



No mapeamento as fisionomias em diferentes estágios de regeneração foram agrupados em uma única classe de uso, exceto a vegetação em estágio pioneiro com cobertura herbácea arbustiva, que se distingue das demais.

A Tabela 6 mostra as 18 classes distintas, discriminadas com suas respectivas áreas na bacia.

Tabela 6 – Representatividade das classes de uso do solo e cobertura vegetal.

Classe de uso do solo e cobertura vegetal	Área (km²)	Cobertura da bacia (%)
Vegetação nativa de estágio inicial a avançado	17,01	30,74
Pastagens	15,17	27,40
Reflorestamentos	5,45	9,85
Sede de propriedades rurais e chácaras	4,91	8,86
Vegetação em estágio pioneiro	2,96	5,34
Residenciais	1,84	3,32
Solo exposto	1,62	2,94
Gramado em área urbana e margem de rodovias	1,54	2,77
Industriais	1,22	2,20
Vegetação de várzeas	0,87	1,57
Comércios e serviços	0,84	1,51
Culturas temporárias	0,81	1,46
Espelhos d'água	0,55	0,99
Clubes e áreas de lazer	0,36	0,65
Equipamentos públicos	0,20	0,36
Culturas permanentes	0,02	0,04
Totais	55,35	100%

Como pode ser observada na Tabela 6, a vegetação nativa de estágio inicial a avançado, somados a reflorestamentos, vegetação em estágio pioneiro, vegetação de várzeas e espelhos d'água totalizam 48,49 %, porém as demais áreas com total de 51,51% estão relacionadas ao uso da terra com ações antrópicas mais intensas.

Os dados mostrados na tabela 6 demonstram que em termos de cobertura do solo, a bacia apresenta quase metade de sua área com classes que apresentam boa proteção em relação à fragilidade. No entanto, os reflorestamentos por estarem localizados principalmente em áreas de altas declividades, e pelo fato de em sua maioria não apresentarem qualquer pratica conservacionista, foram classificados com grau médio de proteção.

5.9 Distância do escoamento superficial à drenagem estendida

A Figura 15 apresenta a Carta de Distância do Escoamento Superficial à Drenagem Estendida elaborada conforme os procedimentos do item 4.2.2.9.

A carta produzida foi reclassificada para distâncias do escoamento superficial em relação à rede de drenagem nos seguintes intervalos: inferior a 10, 10 a 40, 40 a 135, 135 a 640 e superiores a 640 m, apresentando cada intervalo as respectivas áreas demonstradas na Tabela 7.

Na carta foram considerados como barreiras ao escoamento superficial apenas os espelhos d'água, para as quais não foi processado o cálculo de distância do escoamento superficial.

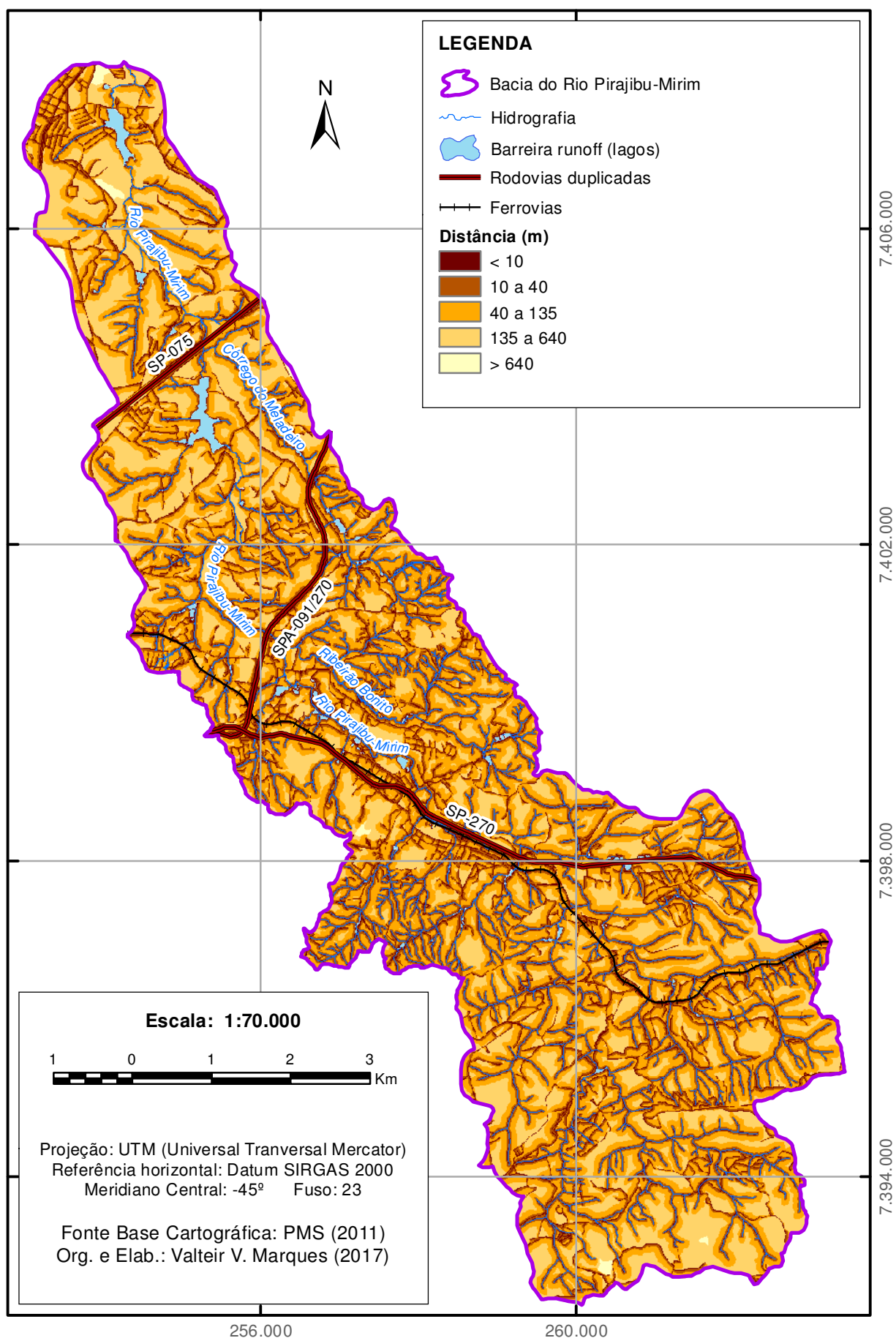
Tabela 7 – Área por classe de distância do escoamento para a rede de drenagem estendida.

Classes de intervalo de distância (m)	Área (km²)	Cobertura da bacia (%)
< 10	6,43	11,62
10 a 40	12,40	22,40
40 a 135	22,52	40,69
135 a 640	13,26	23,96
> 640	0,19	0,35
Áreas não conectadas (lagos)	0,55	0,99
Totais	55,35	100,00

A carta resultante aborda de uma forma simples a distância do escoamento superficial em cada pixel para a rede de drenagem estendida onde está inclusa a rede hidrográfica adicionada das estradas, valos e ferrovia por onde o escoamento superficial pode ser concentrado durante as precipitações, intensificando processos erosivos, bem como facilitando a conexão no transporte de sedimentos e poluentes.

Através da Tabela 7 é possível observar a predominância da distância do escoamento superficial para o intervalo de 40 a 134 m com 40,69 % do total da bacia, seguido por intervalos de 135 a 640 m, com 23,96 %, 10 a 40 m com 22,40 % e inferiores a 10 m com 11,62 %, e com apenas 0,35 % áreas superiores a 640 m. Estes valores representam o resultado de uma densa rede de hidrográfica conforme caracterizado no item 5.2.5 aliado a uma rede de drenagem estendida também extremamente densa.

Figura 15 - Distância do escoamento superficial à rede de drenagem estendida



5.10 Distância do escoamento superficial à rede hidrográfica

A Figura 16 apresenta a Carta de Distância do Escoamento Superficial à Rede Hidrográfica elaborada conforme os procedimentos do item 4.2.2.10.

Esta carta foi reclassificada para as mesmas distâncias do escoamento superficial em relação à rede de drenagem estendida, apresentando cada intervalo as respectivas áreas demonstradas na Tabela 8.

Tabela 8 – Área por classe de distância do escoamento para a rede hidrográfica

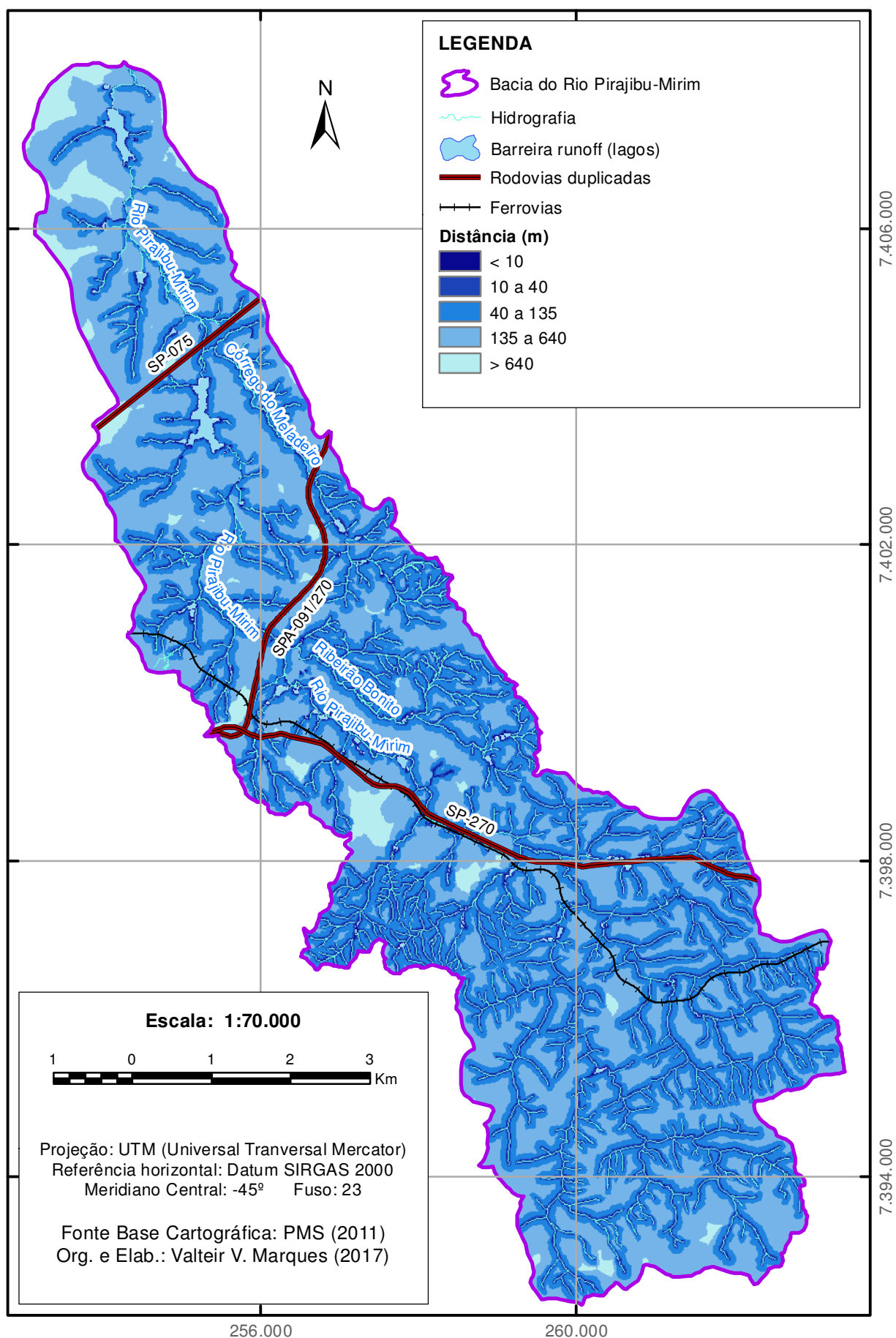
Classes de intervalo de distância (m)	Área (km²)	Cobertura da bacia (%)
< 10	3,10	5,60
10 a 40	8,20	14,82
40 a 135	18,95	34,24
135 a 640	22,66	40,94
> 640	1,89	3,41
Áreas não conectadas (lagos)	0,55	0,99
Totais	55,35	100,00

Na Tabela 8 verifica-se a predominância da distância do escoamento superficial para o intervalo de 135 a 640 m com 40,94 % do total da bacia, seguido pelos intervalos 40 a 135 m, com 34,24 %, 10 a 40 m com 14,82 %, inferiores a 10 m com 5,60 %, e com apenas 3,41 % as áreas superiores a 640 m.

Embora a densa rede hidrográfica proporcione significativa parte da bacia em classes de distância mais próximas, comparando os dados apresentados na Tabela 7 com os dados da Tabela 8, é observado um grande acréscimo para os intervalos de menores distâncias do escoamento superficial proporcionado pelo acréscimo do sistema viário à rede de drenagem.

A carta de distância do escoamento superficial para a rede hidrográfica apresenta redução de área para os três menores intervalos de distância da ordem de 6 a pouco mais de 7,5 %, e acréscimo de cerca de 17 % para o intervalo de 135 a 640 e 3 % para o intervalo acima de 640 m. O que demonstra muito bem a relevância dos sistema viário sobre a vulnerabilidade do risco de intensificação nos processos erosivos e no transporte de sedimentos para a rede hidrográfica, facilitado pela rede de drenagem estendida.

Figura 16 - Distância do escoamento superficial à rede hidrográfica



5.11 Áreas diretamente e indiretamente conectadas

A Carta de Áreas Diretamente e Indiretamente Conectadas elaborada segundo os procedimentos do item 4.2.2.11 já reclassificada de acordo com o grau de fragilidade atribuído à distância do escoamento superficial é apresentada na Figura 17.

Esta carta produto da combinação entre as cartas apresentadas nos itens 5.9 e 5.10, distingue a conectividade em relação ao escoamento superficial que pode atingir a rede hidrográfica de forma direta ou indireta. Na tabela 9 é apresentada a relação das áreas em relação ao tipo de conectividade do escoamento superficial e seus respectivos intervalos com o grau de fragilidade atribuído.

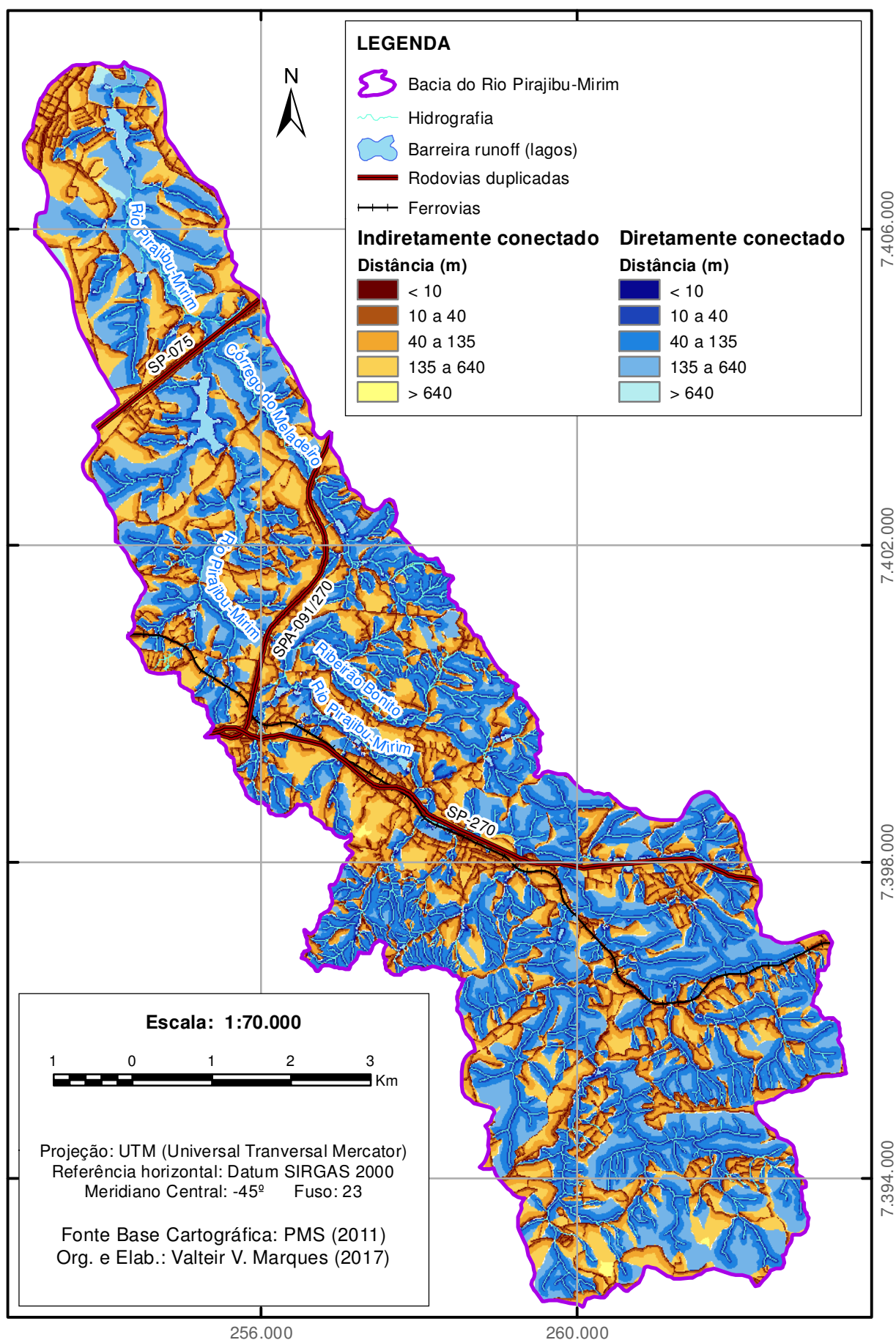
Tabela 9 – Áreas por tipo de conectividade, distância do escoamento e grau de fragilidade.

Conexão	Distância do escoamento (m)	Área (km²)	Cobertura da bacia (%)
Diretamente conectadas	< 10	3,04	5,48
	10 a 40	7,34	13,26
	40 a 135	13,44	24,29
	135 a 640	7,51	13,56
	> 640	0,11	0,19
Subtotal áreas diretamente conectadas		31,43	56,78
Indiretamente conectadas	< 10	3,39	6,13
	10 a 40	5,06	9,14
	40 a 135	9,08	16,40
	135 a 640	5,75	10,40
	> 640	0,09	0,16
Subtotal áreas indiretamente conectadas		23,37	42,23
Áreas não conectadas (lagos)		0,55	0,99
Totais		55,35	100,00

Na tabela 9 se observa que 42,22 % da bacia é representada por áreas indiretamente conectadas, nas quais o escoamento superficial concentra-se no sistema viário antes de atingir a rede hidrográfica. Este fato se deve a alta densidade de sistema viário associado à alta irregularidade topográfica.

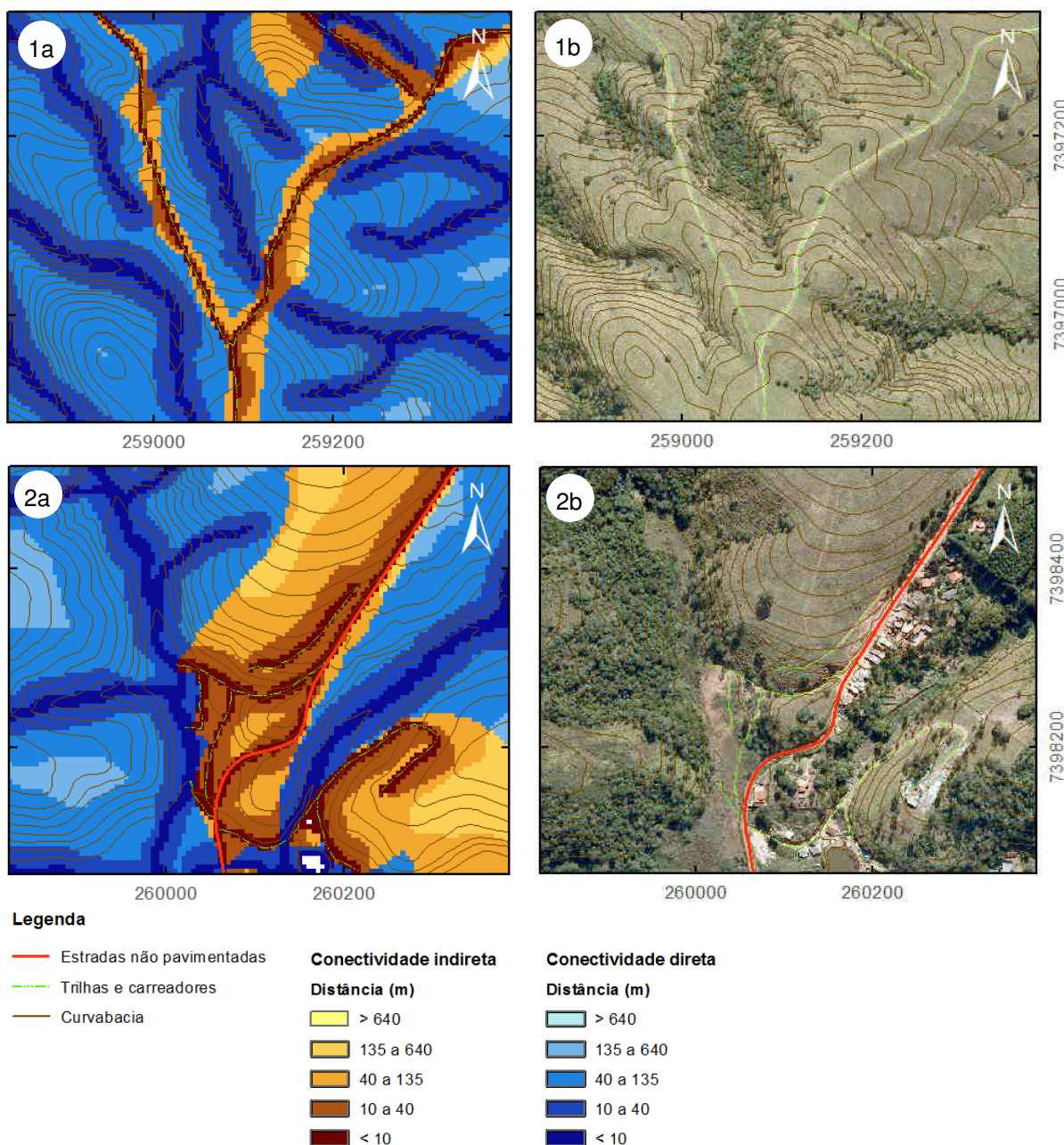
Fato importante de ser observado neste produto cartográfico é a influência do posicionamento das estradas em relação ao relevo e o impacto proporcionado pela falta de planejamento na execução das estradas.

Figura 17 - Áreas diretamente e indiretamente conectadas



Na figura 18 são apresentados dois recortes de áreas da bacia com estradas posicionadas no topo divisor entre sub-bacias e estrada em meia encosta onde pode ser observada em detalhe a diferença entre extensão da conectividade de escoamento superficial associada para ambos os posicionamentos topográficos.

Figura 18 – Detalhes do sistema viário demonstrando diferenças de conexão.



1a) Carreador interno em fazenda situado em topo divisor com mínima conectividade. 1b) foto aérea da área 1a. 2a) Estrada Municipal São Roquinho situada em meia encosta demonstrando extensa área de conexão. 2b) Foto aérea recobrimdo a mesma área na estrada São Roquinho.

5.12 Fragilidade potencial preliminar

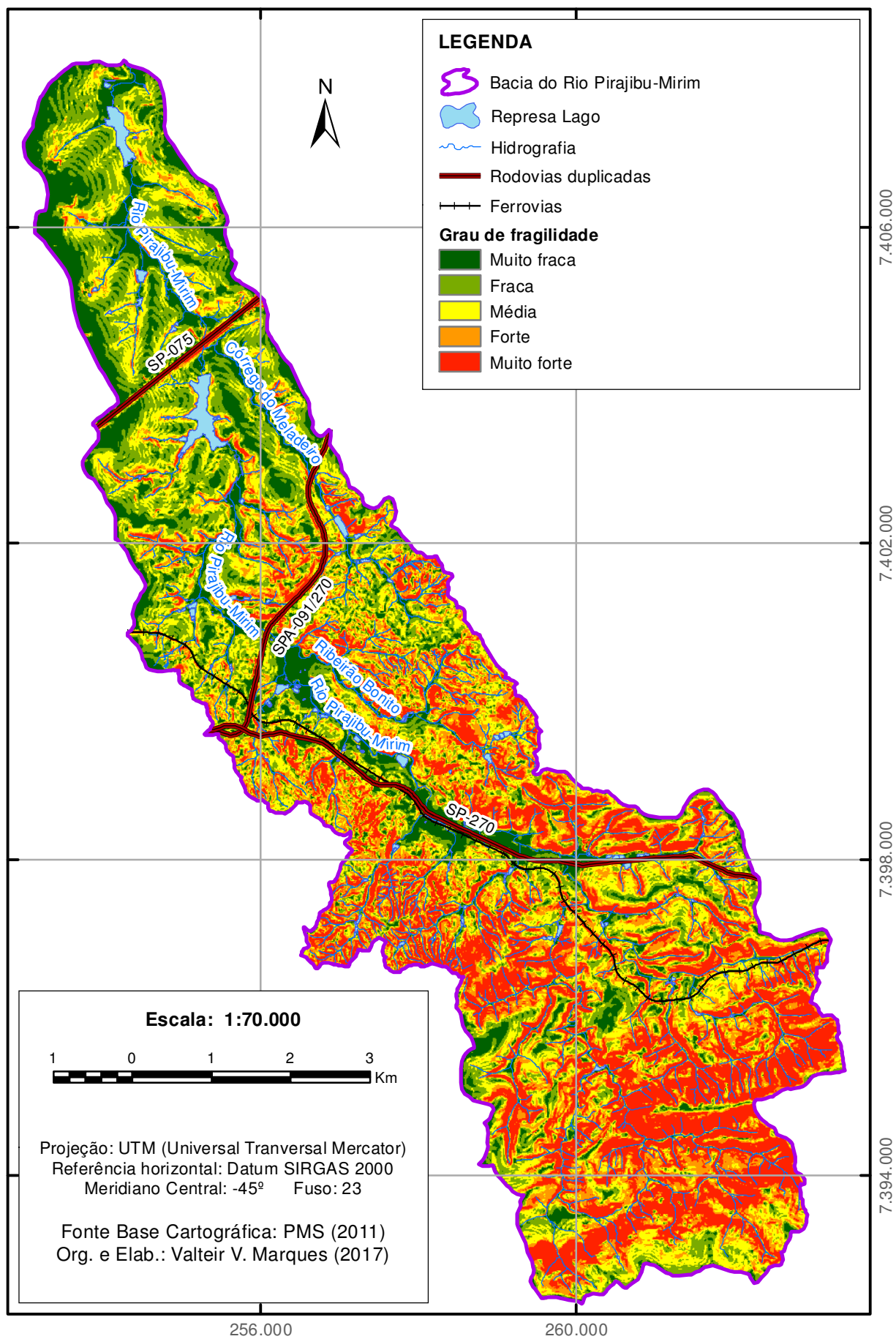
É apresentada como produto preliminar a Carta de Fragilidade Potencial construída a partir do cruzamento da Carta de Declividade com a Carta de Solos. Para o seu desenvolvimento inicialmente a Carta de Declividade foi reclassificada segundo a Tabela 10, onde os intervalos entre 0 - 3% e 3 - 6% foram reclassificados agrupando-os em uma única classe, para adaptar-se a metodologia proposta (ROSS, 1994). Segundo o autor a análise de fragilidade de ambientes com escala elevada, devem utilizar intervalos referentes aos estudos de capacidade de Uso/Aptidão Agrícola, associados aos limites críticos na geotecnia, permitindo assim, melhor representação dos processos erosivos e dos riscos de escorregamentos e deslizamentos, e ainda das áreas sujeitas à inundação. A Tabela 10 Mostra as classes definidas de declividade para a fragilidade potencial da área de estudo.

Tabela 10 – Classes de fragilidade de declividades e suas respectivas áreas, adotando-se Ross (1994).

Atributo	Grau de fragilidade	Decliv. (%)	Área (km ²)	Área (%)
1	Muito fraca	< 6%	8,79	15,88
2	Fraca	6 a 12%	11,74	21,21
3	Média	12 a 20%	12,55	22,67
4	Forte	20 a 30%	9,20	16,61
5	Muito Forte	> 30%	13,07	23,62

Os dados quantitativos da representação das classes de declividades apresentados na Tabela 10, demonstram a predominância de classes de grau de fragilidade muito forte, e ainda alta proporcionalidade para as classes média e alta, evidenciando a propensão da bacia a fortes processos erosivos. A Figura 19 mostra a Carta de Classes de Fragilidade de Declividades segundo Ross (1994).

Figura 19 - Carta de classes de fragilidade das declividades



É importante destacar, que as áreas com grau de fragilidade muito fraca e fraca estão concentradas na porção jusante da bacia na área dos sedimentos do Subgrupo Itararé, onde o relevo é destacadamente mais suave. Nas áreas representadas pelo embasamento cristalino, a exceção ocorre apenas para os metassedimentos situados na baixa bacia no contato com as rochas sedimentares, onde os interflúvios são caracteristicamente mais dissecados apresentando declividades menores. Em todo o restante da área ocupada pelo embasamento cristalino as declividades predominantes variam de forte a muito forte com exceções mais eventuais em estreitas faixas dos interflúvios e algumas faixas marginais à rede hidrográfica.

O mesmo procedimento foi adotado para a Carta de Solos, onde a determinação dos pesos dos respectivos atributos segundo Ross (1994) e Amaral e Ross (2009) resultou em apenas 3 classes conforme apresentando na Tabela 11.

Tabela 11 – Classes de fragilidade de solos e suas respectivas áreas.

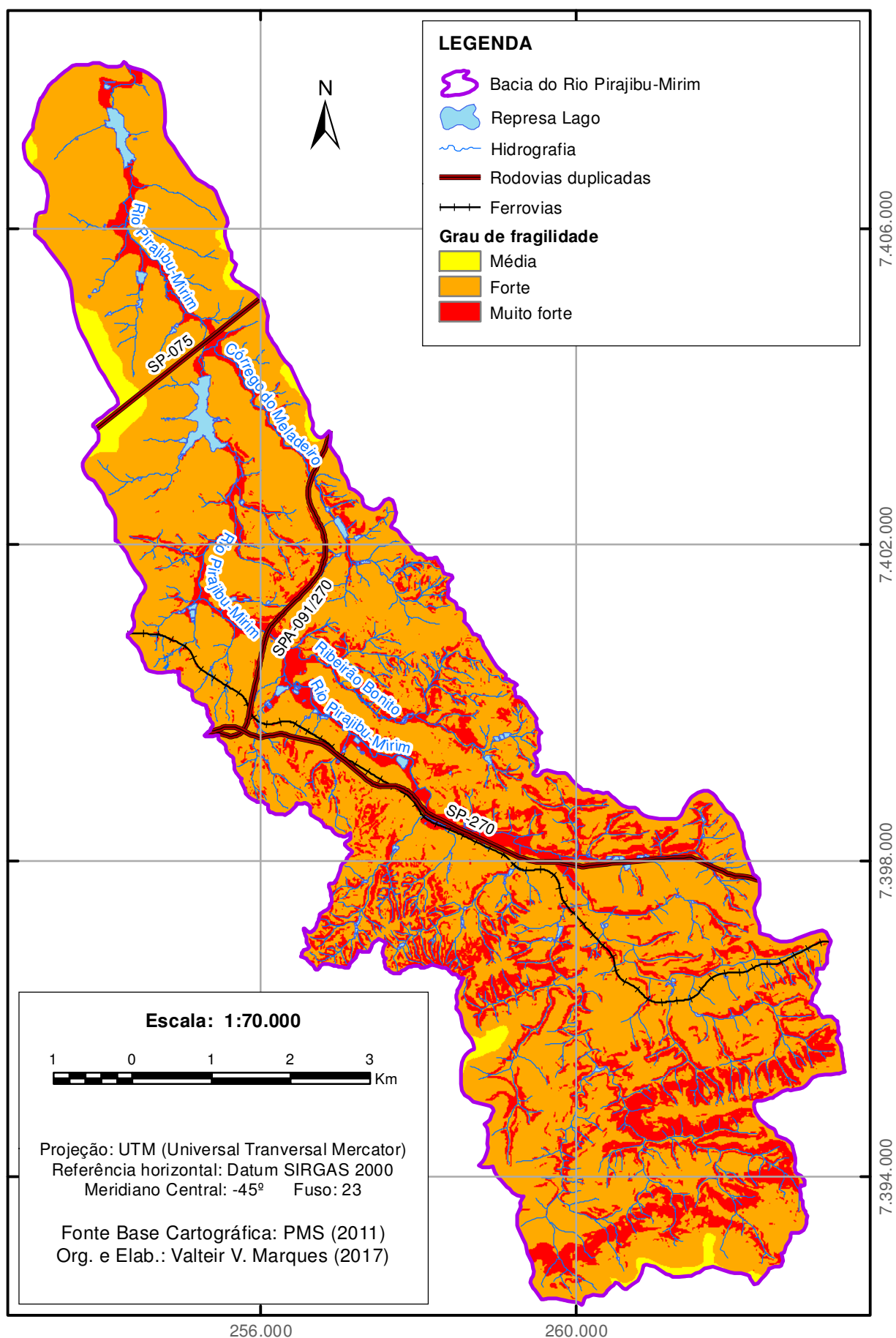
Atributo	Grau de fragilidade	Solo	Área (km²)	Área (%)
1	Muito fraca	Sem ocorrência	0	0
2	Fraca	Sem ocorrência	0	0
3	Média	Latossolos	1,18	2,13
4	Forte	Argissolos	42,42	76,65
5	Muito Forte	Neossolos + Gleissolos	11,75	21,22

Fonte: Adaptado de Ross (1994); Amaral e Ross (2009).

A Tabela 11 demonstra uma predominância de classes de fragilidade de solo forte, seguidas por muito forte, e apenas uma pequena área representada pelos latossolos que enquadrada em classe média, não havendo ocorrências de grau de fragilidade muito fraca e fraca. Este fato chama a atenção para os problemas possíveis sobre as características dos solos locais, devendo ser essencialmente abordado em qualquer projeto, planejamento ou gerenciamento da bacia. A Figura 20 mostra a Carta de Classes de Fragilidade dos Solos

Em seguida foi obtido da composição da Carta de Fragilidades dos Solos pela Carta de Declividades a Carta de Fragilidade Potencial Preliminar.

Figura 20 - Carta de classes de fragilidade dos solos



A Figura 21 referente a Carta de Fragilidade Potencial Preliminar mostra predominância de áreas com fragilidades fraca com 34,81% do total da bacia, distribuídas principalmente na parte baixa da bacia. Entretanto é possível observar também elevadas porcentagens de classes média a forte distribuídas na parte média e alta bacia, onde o relevo acidentado associado a solos pouco profundos e facilmente erodíveis, qualificam o alto potencial de degradação dessas áreas.

Os quantitativos da área de estudo para as fragilidades potenciais são mostradas na Tabela 12.

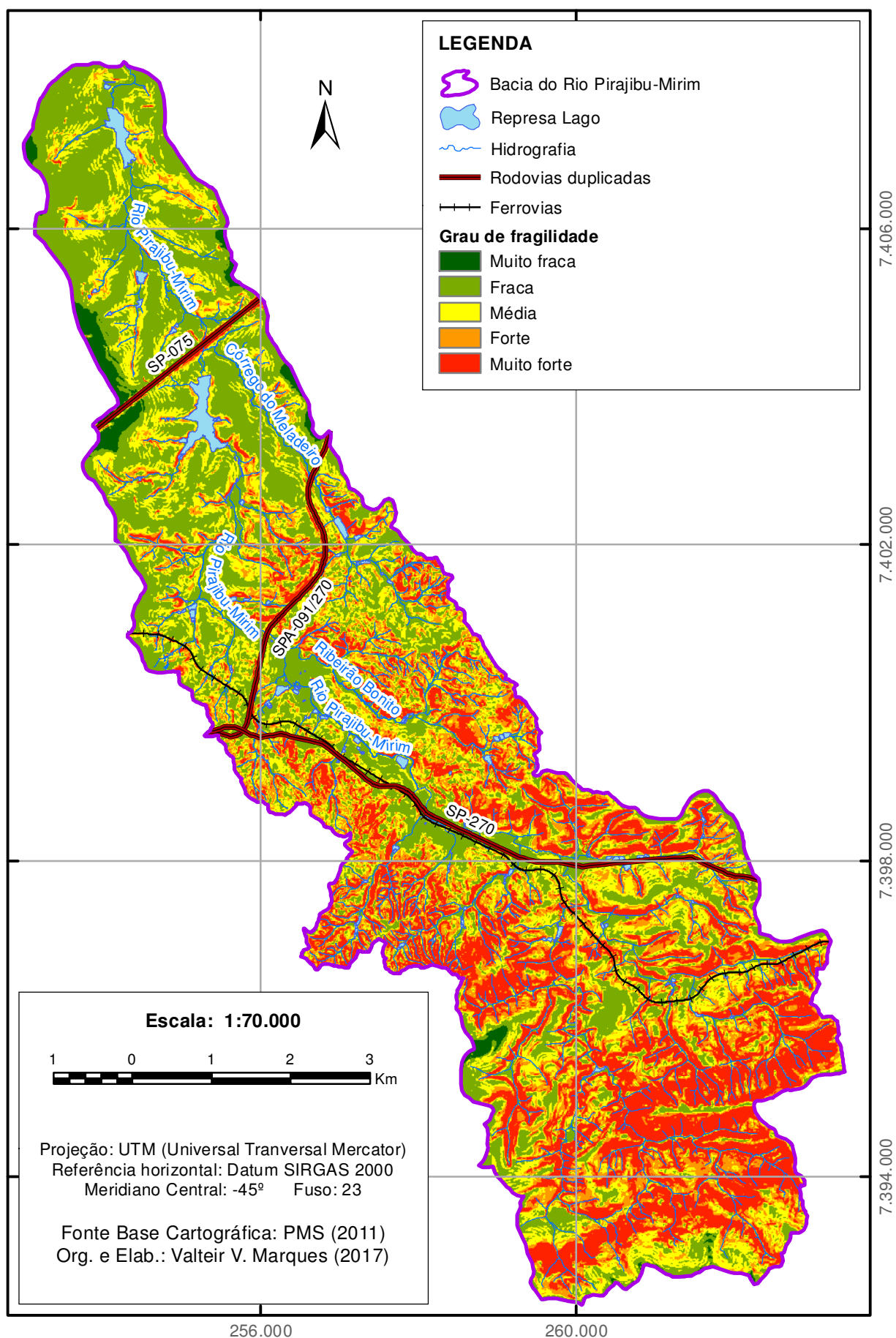
Tabela 12 – Classes de fragilidade potencial preliminar da bacia e suas respectivas áreas, adotando-se Ross (1994).

Atributo	Grau de fragilidade	Área (km ²)	Área (%)
1	Muito fraca	0,78	1,42
2	Fraca	19,27	34,81
3	Média	13,03	23,54
4	Forte	9,20	16,61
5	Muito Forte	13,07	23,62

Embora o resultado obtido na Carta de Fragilidade Potencial Preliminar evidencie uma maior proporção da classe fraca, as classes média, forte e muito forte totalizam uma área aproximada de 64% da bacia, qualificando bem a fragilidade resultante do relevo predominantemente acidentado sobreposto por solos frequentemente rasos com características erosivas extremamente vulneráveis.

Quando se avalia a fragilidade potencial da bacia do Rio Pirajibu-Mirim, é observada boa distribuição percentual das classes de fragilidade fraca, média, forte e muito forte relativamente bem distribuídos, com exceção apenas para a classe muito fraca que é pouco representativa. Entretanto como pode ser observado na Figura 21, a distribuição espacial apresenta grande variação, pois a classe fraca está situada predominantemente na média a baixa bacia, onde mesmo com a presença de solos com grau de fragilidade forte, declividades menores proporcionam esta condição. Enquanto na transição da média até a alta bacia predominam as classes forte e muito forte em função de suas características naturais proporcionadas por declividades elevadas e solos rasos muito suscetíveis aos processos erosivos.

Figura 21 - Carta de fragilidade potencial



5.13 Fragilidade emergente

O primeiro produto obtido nesta etapa compreendeu a Carta de Fragilidades do Uso do Solo e Cobertura Vegetal (Figura 22), que foi reclassificada e quantificada segundo a Tabela 13.

Tabela 13 – Classes da carta de fragilidades do uso do solo e cobertura vegetal

Atributo	Grau de proteção	Tipo de Uso do Solo e Cobertura Vegetal	Área total (km ²)	Área total (%)
5	Muito fraca	Residencial, solo exposto, industrial, comércio e serviços e equipamentos públicos.	5,71	10,32
4	Fraca	Sede de propriedades rurais e chácaras, clubes e áreas de lazer e culturas temporárias.	5,29	9,55
3	Média	Pastagens, reflorestamentos, gramados em áreas urbanas e margens de estradas, e culturas permanentes.	22,96	41,49
2	Forte	Vegetação em estagio pioneiro.	2,96	5,34
1	Muito Forte	Vegetação nativa em estagio inicial a avançado, áreas de várzea, e espelhos d'água.	18,43	33,30

Fonte: Adaptado de Ross (1994).

A Tabela 13 apresenta uma predominância para o grau de proteção variando de médio a muito forte caracterizado pela predominância de uso e cobertura de ambientes rurais. Embora 41,49% da bacia é ocupado por pastagens, reflorestamentos, gramados e culturas permanentes que caracterizam um grau de médio de proteção, a bacia conta ainda com 5,34% e 33,30% de áreas com grau forte a muito forte de proteção, resultante de áreas preservadas de vegetação nativa em estágio pioneiro a avançado, e ainda extensas áreas de várzea que ocupam as margens dos principais canais da rede hidrográfica.

Pouco menos de 20% da bacia é ocupado por áreas com características de urbanização que minimizam o grau de proteção da superfície, sendo que quase metade destes 20 % é representado por áreas de baixa densidade urbana.

Ainda, nesta etapa de trabalho é apresentada a Carta de Fragilidades Emergente (Figura 23) elaborada da sobreposição da Carta de Fragilidade Potencial Preliminar (Figura 21) pela Carta de Fragilidade do Uso do Solo e Cobertura Vegetal (Figura 22).

Figura 22 - Carta de fragilidade do uso do solo e cobertura vegetal

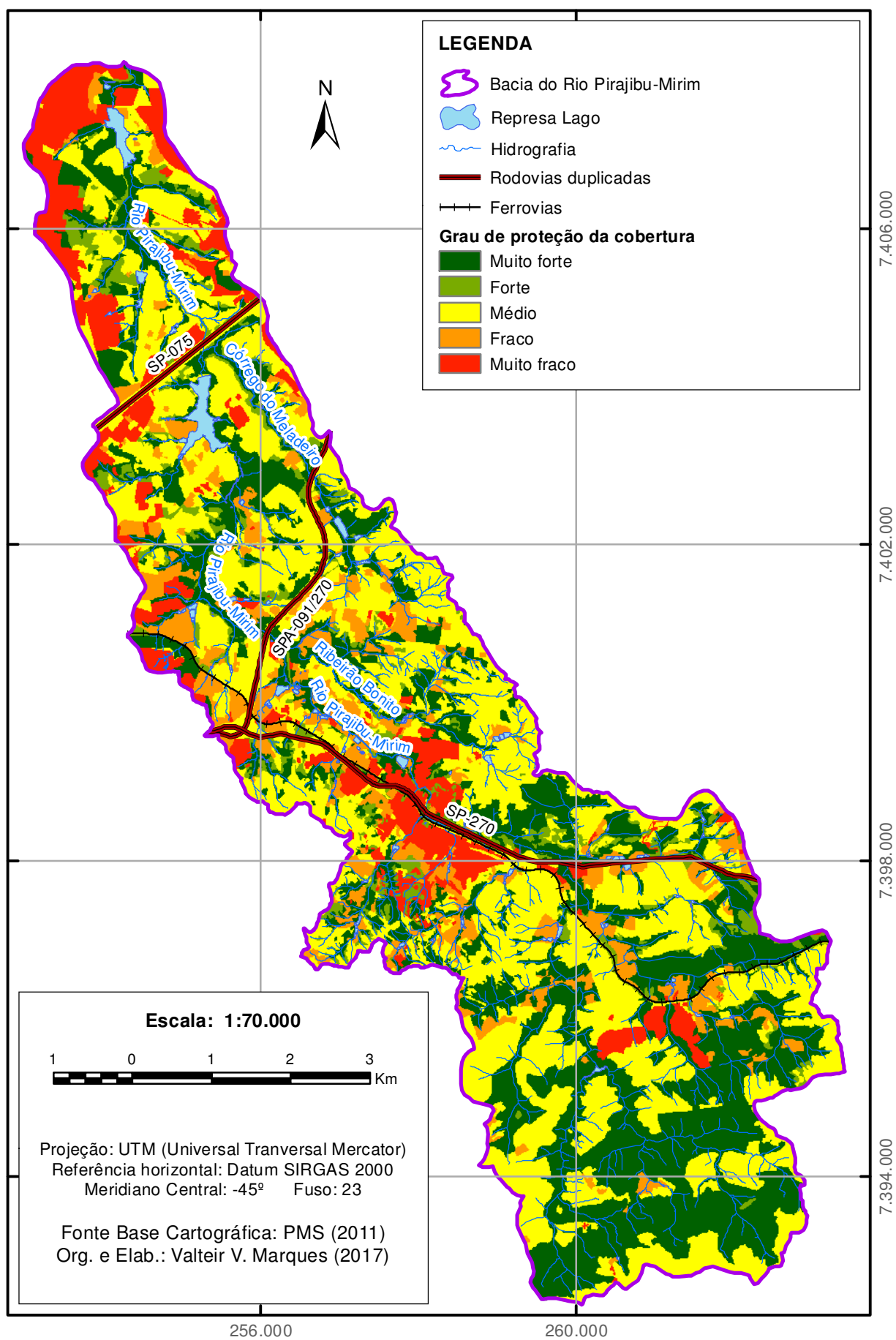
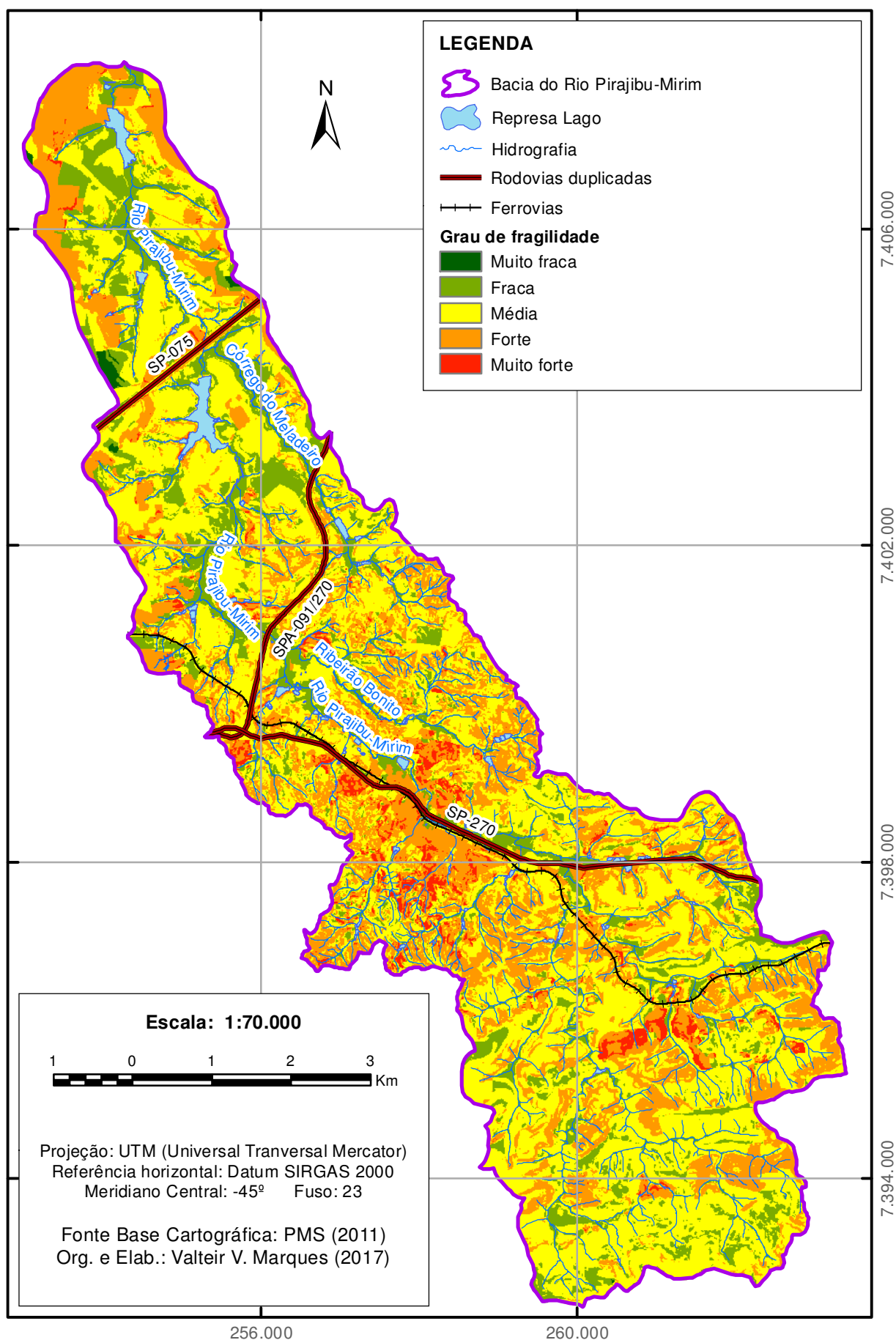


Figura 23 - Carta de fragilidade emergente



A Tabela 14 referente às classes de fragilidade emergente expõe que o predomínio de áreas classificadas é de média fragilidade, correspondendo a 52,42%, seguida pelas classes forte com 28,67% e fraca com 16,19%, e com pouca representatividade as classes muito fraca e muito forte, correspondendo apenas a 0,22 e 2,50%.

Tabela 14 – Classes de fragilidade emergente da área de estudo

Atributo	Grau de fragilidade	Área (km ²)	Área (%)
1	Muito fraca	0,12	0,22
2	Fraca	8,96	16,19
3	Média	29,02	52,42
4	Forte	15,87	28,67
5	Muito Forte	1,39	2,50

A Carta de Fragilidade Emergente é condizente com o que foi observado em campo, demonstrando que os setores com declividade muito fraca, solos bem desenvolvidos e bem drenados, associados ainda à proteção do solo por cobertura vegetal arbórea se qualificam em grau de fragilidade muito fraca, o que ocorre apenas em pequena área da baixa bacia.

A classe fraca, embora muitas vezes com presença de solos de fragilidade mais alta, representa muito bem as áreas de declividades muito fraca a fraca que apresentam boa cobertura vegetal, e ocorre distribuídas por toda a bacia, ocupando principalmente as planícies de inundação com vegetação de várzea, e setores de média a alta vertente em áreas de vegetação nativa.

A classe média predominante na bacia, também apresenta ampla distribuição, e dominam os setores de média a alta vertente com declividades fraca a média, ocupando inclusive boa parte dos interflúvios das sub-bacias, outra característica marcante destas áreas, é a cobertura do solo dominada pela vegetação herbácea das pastagens, e os argissolos que dominam a pedologia da área.

Na classe forte ficam evidentes as áreas de ocupação urbana mesmo que localizadas em declividades fracas, bem como áreas de solo exposto em declividades média a fraca, ou ainda áreas de neossolos combinados a declividades forte e com cobertura classificada em fragilidade média.

A classe muito forte, pouco representativa na totalidade da bacia, indica áreas de solos pouco desenvolvidos e de espessura incipiente em declividades forte a muito forte com cobertura do solo classificada em média a baixa proteção.

De uma forma geral, a carta de fragilidade emergente demonstra com eficiência a alteração da fragilidade ocasionada pela intervenção humana.

As áreas de fragilidade muito fraca decrescem de 1,42% para 0,22 % em função da mudança da cobertura vegetal nas regiões do latossolos, única área que apresenta este grau muito fraco de fragilidade, restando apenas uma pequena área onde a cobertura por vegetação nativa mantém esta classe.

A classe fraca decresce de 34,81% para 16,19%, este decréscimo é extremamente influenciado pelas pastagens instaladas nas áreas de média a baixa vertente na baixa bacia em região dos arenitos do Subgrupo Itararé, onde predomina a distribuição desta classe na carta de fragilidade potencial. Como remanescente desta classe permanecem predominantemente as áreas ocupadas por vegetação nativa e várzeas nos fundos de vale, e ainda em menor proporção áreas de encostas menos íngremes ou interflúvios aplainados geralmente protegidos por vegetação nativa.

A classe média aumenta de 23,54% para 52,42%, influenciada por um complexo mosaico de uso do solo e cobertura vegetal, onde a forte influência da classe média de proteção da carta de fragilidade de uso do solo e cobertura vegetal reduz significativamente a classe forte da fragilidade potencial preliminar.

A classe forte também é aumentada de 16,61% para 28,67%, reflexo também da influencia do grau de proteção sobre áreas classificadas como muito forte na carta de fragilidade potencial preliminar.

Por fim a classe muito forte decresce drasticamente de 23,62% para apenas 2,50%, em função do alto grau de proteção da vegetação nativa nas áreas de declividade muito forte, permanecendo nesta classe poucas áreas caracterizadas por solos expostos ou de alta densidade urbana sobrepostos em relevo extremamente acidentado.

A interpretação da fragilidade do uso do solo e cobertura vegetal foi fundamental na compreensão das alterações antrópicas ocorridas na bacia, e como essa organização espacial influencia nas alterações da fragilidade potencial. No entanto, nota-se que para a bacia em estudo a abordagem metodológica, não foi capaz de indicar a interferência do sistema viário, o qual merece maior atenção na representação das fragilidades emergentes em função da intensidade dos impactos associados verificados em campo, em especial sobre os processos erosivos e transporte de sedimentos.

Embora não seja uma regra, mas muito coerente com os processos de ocupação humana, quando se sobrepõe o mapa de fragilidade potencial com o mapa de fragilidade do uso do solo e cobertura vegetal, grande parte destas áreas tem uma inversão do grau de fragilidade. Pois nas áreas de fragilidade potencial elevada a ocupação humana tende a ser menos intensa, em razão da própria dificuldade de ocupação destas áreas muitas vezes de difícil acesso, refletindo no fato de que muitas vezes, estas são as únicas áreas com remanescentes de vegetação nativa, e conseqüentemente reduzindo o grau de fragilidade emergente. Por outro lado, quando a fragilidade potencial apresenta menor grau, a ocupação antrópica é facilitada, proporcionando uma ocupação antrópica mais intensa, elevando o grau de fragilidade emergente resultante para estas áreas.

Na bacia do Rio Pirajibu-Mirim o fato acima descrito é claramente percebido quando se compara o mapa de fragilidade potencial e o mapa de fragilidade emergente. As áreas de forte a muito forte grau de fragilidade potencial na média a alta bacia são atenuadas passando a apresentar um grau de fragilidade emergente menor, enquanto as áreas de baixa fragilidade potencial entre a média e baixa bacia são elevadas em função da ocupação antrópica mais intensa. Em razão disto o mapa de fragilidade emergente apresenta uma predominância da classe de fragilidade média distribuída de forma relativamente homogênea no espaço da bacia.

5.14 Fragilidade emergente associada à conectividade indireta

Com o objetivo de melhor representar a influência das estradas sobre a fragilidade emergente, foi produzida a Carta de Fragilidade Associada à Conectividade Indireta elaborada segundo os procedimentos do item 4.2.2.14, e apresentada na Figura 24.

A carta elaborada, produto da combinação entre as cartas apresentadas nos itens 5.11 e 5.13, modifica o grau de fragilidade emergente em função da conectividade indireta ocasionada principalmente pelo sistema viário. A relação das áreas de cobertura para cada grau de fragilidade é apresentada na Tabela 15.

Tabela 15 – Classes de fragilidade associada à conectividade indireta

Atributo	Grau de fragilidade	Área (km ²)	Área (%)
1	Muito fraca	0,04	0,06
2	Fraca	7,76	14,02
3	Média	27,26	49,24
4	Forte	18,15	32,79
5	Muito Forte	2,15	3,89

Comparando a Tabela 15 com a Tabela 14, se observa significativo aumento das classes forte e muito forte, com proporcional redução das classes muito fraca, fraca e média.

A classe de fragilidade muito fraca já pouco significativa no mapa de fragilidade emergente é reduzida de 0,22% para apenas 0,06%, pois mesmo se tratando de áreas com relevo extremamente suave, solos profundos e bem drenados e com vegetação nativa, em função da proximidade com sistemas viários sua fragilidade é elevada devido ao significativo aumento no risco de processos erosivos e principalmente transporte de sedimentos, passando à classes de fragilidade baixa ou média em função da distância do sistema viário.

A classe fraca também decresce de 16,19% para 14,02%. A redução ocorre distribuída por toda a bacia, onde o sistema viário atravessa ou margeia as áreas de vegetação nativa em planícies nas margens dos canais, interflúvios, ou ainda em encostas pouco íngremes, elevando o grau de fragilidade pela influencia da conexão do escoamento superficial indireto proporcionado pelo sistema viário.

A classe média é a que sofre maior alteração em relação à redução de área, com redução de 52,42% para 49,24%. Esta redução é proporcionada pela grande proporção de áreas com médio grau de fragilidade emergente atravessada pelo sistema viário. Estas áreas predominantemente ocupadas por pastagens quando atravessadas pela drenagem estendida tem significativa faixa na lateral ascendente modificada de grau médio para grau forte de fragilidade.

Em contrapartida ao decréscimo das demais classes, a classe forte e muito forte são elevadas quando considerada a conectividade indireta proporcionada pelo sistema de drenagem estendida.

A classe forte é elevada de 28,67% para 32,79%, embora outras áreas também são modificadas, este acréscimo se dá principalmente pela influência do intervalo de distância do escoamento superficial entre 10 e 40 metros margeando o

sistema viário em áreas classificadas como grau de fragilidade médio no mapa de fragilidade emergente.

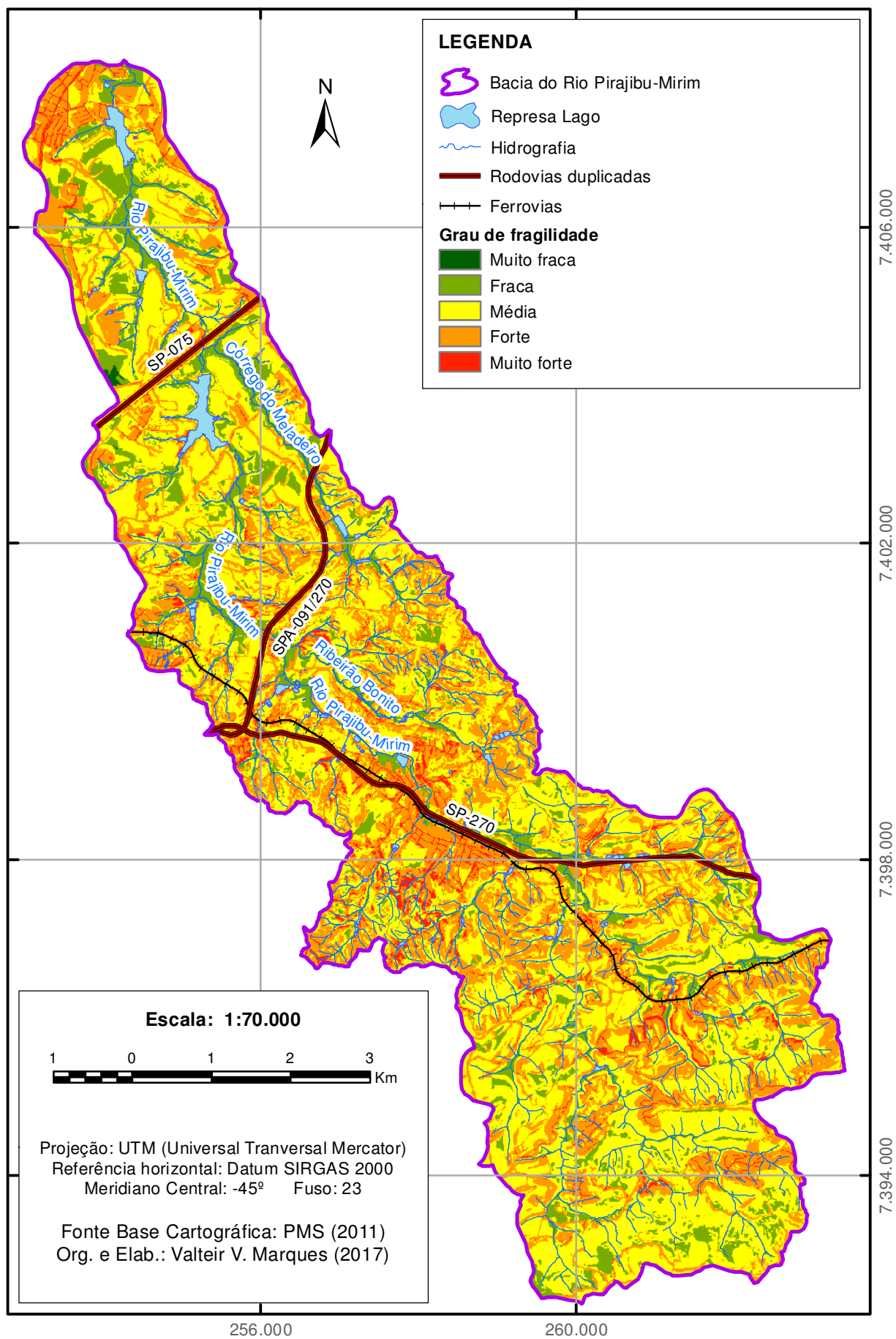
A classe muito forte passa de 2,50% para 3,89% influenciada sobretudo pelo intervalo de distância do escoamento superficial menor que 10 m no mapa de conectividade indireta sobreposto sobre áreas de fragilidade consideradas forte no mapa de fragilidade emergente.

Importante destaque deve ser dado ao fato de que embora estas duas classes recebam significativo acréscimo de áreas, em muitos locais do mapa de fragilidade emergente, as classes forte e muito forte, são reduzidas para grau de fragilidade menor em função da grande distância do escoamento superficial em relação ao sistema de drenagem estendida, ocorrendo uma nova inversão de fragilidades assim como no produto anterior. Este fato atribuído ao pressuposto de que quanto mais distante esta o escoamento superficial menor é a probabilidade de que este venha atingir o sistema de drenagem, consequentemente reduzindo o risco de que os efeitos dos processos erosivos e de transporte de sedimentos possam atingir as águas superficiais. Assim, embora áreas ascendentes mais próximas da drenagem estendida recebem incremento no grau de fragilidade, outras áreas distantes são atenuadas reduzindo o grau de fragilidade emergente. Ficando evidente que a significância do sistema viário vai além da diferença percentual obtida entre as classes de fragilidade.

A carta final produzida permite identificar diversos pontos de fragilidade acentuada, apresentando ainda maior coerência do ponto de vista de conectividade dos processos erosivos para cada área analisada e do risco na produção de sedimentos que podem ser transferidos para as águas superficiais.

Na alta bacia onde são encontradas extensas áreas de reflorestamento e importantes fragmentos de vegetação nativa, o sistema viário representado por estradas e caminhos internos de propriedades particulares é destacado com grau forte e muito forte de fragilidade, evidenciando a necessidade de medidas restritivas ou no mínimo de orientação aos proprietários de áreas particulares para a redução do impacto observado. Ações como a redução de área superficial com a eliminação de caminhos desnecessários, mantendo-se apenas os caminhos com condições topográficas mais adequadas, podem reduzir muito a produção de sedimentos destas áreas (DALIR; NAGHDI e GHOLAMI, 2014).

Figura 24 - Carta de fragilidade emergente associada a áreas indiretamente conectadas



Em campo se observa principalmente na média e alta bacia que a expansão urbana exerce forte pressão para ocupação de áreas que em grande parte não são propícias de acordo com o mapa de fragilidade.

Toma-se como exemplo o distrito de Brigadeiro Tobias, que embora localizado em uma área relativamente de baixa fragilidade potencial em sua área mais antiga, avança ao sul, em áreas com solo e declividades extremamente desfavoráveis, inclusive por condições geotécnicas.

Na Av. Francisco Roldão Sanches, há um loteamento de alto padrão em implantação, cuja área no mapa de fragilidade é determinada com grau de fragilidade variando de forte a muito forte, e os efeitos das obras são facilmente perceptíveis em campo através do assoreamento da rede hidrográfica nas proximidades.

A carta de fragilidade produzida também evidencia a necessidade urgente de maior atenção a grande quantidade de chácaras existentes principalmente na média e alta bacia. Embora a reduzida taxa de impermeabilização destas áreas possa sugerir que os impactos sejam menores, a exposição e movimentação de solo intensificam os processos erosivos atuando como significativas áreas fontes na produção de sedimentos. As fragilidades identificadas na carta em grande parte corroboram com as observações de campo, no entanto a heterogeneidade do estágio de implantação, bem como os cuidados adotados na proteção do solo, pode implicar em variações do risco atinente a estas áreas como fontes produtoras de sedimentos demandando validações de campo.

A principal diferenciação da carta se relaciona ao sistema viário, pois permite identificar o grau de fragilidade proporcionado pela sobreposição de informações de solo, declividade, uso e ocupação do solo e cobertura vegetal com a distância do escoamento superficial à drenagem estendida, classificando mais adequadamente o sistema viário e suas margens ascendentes. O sistema viário não apenas contribui com a produção de sedimentos de sua própria área, como pode realizar a conexão indireta das áreas ascendentes, interceptando e facilitando a transferência de sedimentos para as águas superficiais.

Cabe ainda destacar, que comparando os resultados finais obtidos com as observações de campo, se verifica algumas limitações da metodologia aplicada. Uma das principais limitações é para as áreas urbanas, onde a complexidade dos

processos erosivos e de transporte de sedimentos envolvidos não permite de forma tão simples determinar o grau de fragilidade.

Outra limitação notada no mapa final está relacionada às áreas diretamente conectadas, embora a sobreposição deste mapa com o mapa de fragilidade emergente não apresentou coerência devido à excessiva elevação do grau de fragilidade em áreas muito bem protegidas pela cobertura vegetal, nota-se que significativa parte da rede hidrográfica principalmente quando se trata dos canais de primeira ordem, são muitas vezes talvegues apenas com escoamento efêmero e totalmente desprovidos de vegetação nativa por não se enquadrarem na legislação de Áreas de Preservação Permanente (APP). Desta forma estas áreas poderiam ser classificadas mais adequadamente se fosse aplicada a sobreposição considerando a distância do escoamento superficial ao sistema de drenagem.

Finalmente, destaca-se que as vias de fluxo determinam a concentração do fluxo e da área de drenagem interferindo no escoamento superficial, na erosão e na sedimentação, de forma que um MDE de resolução grosseira em escala pequena não é suficiente para modelar adequadamente estruturas lineares como o sistema viário (HÖLZEL e DIEKKRÜGER, 2014). Embora um *raster* da drenagem estendida tenha sido utilizado para determinar estruturas lineares possíveis de concentração de fluxo, para que as áreas de drenagem fossem modeladas adequadamente foi utilizado um MDE com a resolução de 5 m. A utilização da metodologia em escalas menores demanda cautela.

6 CONCLUSÕES

Pelo fato de considerar a distância do escoamento superficial, cuja relação espacial intrínseca com a rede de drenagem o coloca como um atributo de alta sensibilidade hidrológica, o produto cartográfico resultante demonstra ser mais adequado para a classificação de fragilidade ambiental. Ao considerar os efeitos do escoamento superficial sobre a fragilidade emergente, a metodologia agrega na análise da fragilidade ambiental, relações de conexão hidrossedimentológica.

O mapa de fragilidade produzido não quantifica a perda de sedimentos ou os efeitos de degradação correlatos. No entanto fornece uma visão adequada do risco associado da combinação de diversos parâmetros físicos naturais e antrópicos na diversidade da paisagem, identificando com boa precisão os diversos graus de fragilidade encontrados para cada área da bacia.

Considerando a carência de dados cartográficos desta natureza, a metodologia aqui aplicada é relativamente simples comparada à utilização de modelos quantitativos, e embora forneça apenas dados qualitativos, o produto gerado permite em termos de gerenciamento da área, identificar facilmente os locais que devem receber atenção e prioridade para a contenção dos processos erosivos e de produção de sedimentos. A replicação pode ser facilmente realizada para outras áreas, requerendo apenas um detalhado reconhecimento de campo, para que a atribuição dos pesos utilizados para cada parâmetro na simulação em SIG seja coerente com a realidade observada.

A bacia demonstra sérios problemas de degradação frente à pressão da expansão urbana desordenada, bem como clara necessidade de medidas de contenção de processos erosivos do sistema viário, os quais foram devidamente realçados com a metodologia aplicada, e que não eram constatados no mapa de fragilidade emergente.

Os resultados obtidos no presente trabalho podem fornecer subsídios aos gestores municipais, bem como ao Comitê de Bacia Hidrográfica dos Rios Sorocaba e Médio Tietê, para a adoção de medidas de proteção na bacia hidrográfica do Rio Pirajibu-Mirim, dada a sua relevância ambiental com a presença de alguns dos principais remanescentes florestais do município de Sorocaba, e pela contribuição como fonte de abastecimento de água para consumo humano.

Por fim, é necessário evidenciar o caráter tecnológico do trabalho demonstrado no uso das técnicas de geoprocessamento, que de forma eficiente, ágil e confiável possibilita uma grande quantidade de simulações aumentando ou diminuindo o peso da interferência relativa dos diversos atributos analisados, permitindo que em comparação aos trabalhos de campo possam ser obtidos resultados satisfatórios à identificação das áreas criticamente vulneráveis.

REFERÊNCIAS

AB'SABER, A. A. Um conceito de geomorfologia a serviço das pesquisas sobre o Quaternário. **Geomorfologia**, São Paulo, n. 18, p. 1-23, 1969.

ADAMI, S. F. et al. Environmental fragility and susceptibility mapping using geographic information systems: applications on Ribeirão do Pinhal watershed (Limeira, State of São Paulo). **Acta Scientiarum**, Maringá, PR, v. 34, n. 4, p. 433-440, oct./dec., 2012.

ALDER et al. A high-resolution map of direct and indirect connectivity of erosion risk áreas to surface waters in Switzerland: A risk assessment tool for planning and policy-making. **Land Use Policy Journal**, v 48, p. 236-249, 2015, Disponível em <<http://dx.doi.org.ez87.periodicos.capes.gov.br/10.1016/j.landusepol.2015.06.001>> Acessado em: 10 jun. 2016.

ALMEIDA F. F. M, et al. **Mapa Geológico do Estado de São Paulo** – Monografias 6. Nota Explicativa. São Paulo. Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT. v. 1, n. 1184, 1981a, 126 p.

ALMEIDA F. F. M, et al. **Mapa Geológico do Estado de São Paulo** – Monografias 6. São Paulo. Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT. v. 2, n. 1184, 1981b. Escala 1: 500.000.

AMARAL, R.; ROSS, J. L. S. As Unidades Ecodinâmicas na Análise da Fragilidade Ambiental do Parque Estadual do morro do Diabo e entorno, Teodoro Sampaio – SP. **GEOUSP**, n.26, p.59-78, 2009.

ARCANJO, J. B. A. **Fotogeologia**: conceitos, métodos e aplicações. Salvador: CPRM/SGB, 2011. 144 p.

AUTODESK. **AutoCAD Land Development (Release 2i)**. Autodesk, Inc., 2001.

BACANI, V. M. et al. Sensoriamento remoto e SIG aplicados à avaliação da fragilidade ambiental de bacia hidrográfica. **Mercator**, Fortaleza, v. 14, n. 2, p. 119-135, mai./ago. 2015. Disponível em <<http://www.mercator.ufc.br/index.php/mercator/article/view/1651/591>>. Acessado em 1 abr. 2016.

BADE, M. R.; ROCHA, A. S.; CUNHA, J. E. Mapeamento da fragilidade ambiental na bacia hidrográfica do córrego Matilde Cuê, Marechal Cândido Rondon – PR. **Revista Geografar**, Curitiba, PR, v. 9, n. 2, p. 62-83, dez. 2014. Disponível em

<<http://revistas.ufpr.br/geografar/article/view/38004/24477>>. Acessado em: 14 dez. 2015.

BAHR, G. C.; CARVALHO, S. M. Identificação da fragilidade ambiental da bacia hidrográfica do arroio Uvaranal, como subsídio ao projeto de expansão urbana de Telêmaco Borba – PR. **RA' E GA**, Curitiba, PR, v. 26, p. 157-181, 2012. Disponível em < <http://revistas.ufpr.br/raega/article/view/30155>>. Acessado em: 06 jan. 2016.

BERTRAND, G. Paisagem e geografia física global - Esboço metodológico. Tradução por O. Cruz. **Caderno de Ciências da Terra**, São Paulo, n.º 13, p. 1-27. 1971. Título original: Paysage et géographie physique globale. Esquisse méthodologique.

BORSATO, F. H.; MARTONI, A. M. Estudo da fisiografia das bacias hidrográficas urbanas no Município de Maringá, Estado do Paraná. **Acta Scientiarum**, Maringá, v. 26, n. 2, p. 273-285, 2004.

CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia**, São Paulo: Edgard Blucher, 1974. 149 p.

CHRISTOFOLETTI, A. **Modelagem de Sistemas Ambientais**, São Paulo: Edgard Blucher, 1999. 236 p.

CARVALHO, A.; DAVID, C. Políticas públicas para o campo e desenvolvimento rural sustentável. **GeoUERJ**, v. 1, n. 22, 2011.

CIMMERY, V. **User guide for SAGA, Vol. 1**, 2010. 372 p. Disponível em <https://ufpr.dl.sourceforge.net/project/saga-gis/SAGA%20-%20Documentation/SAGA%20-%20User%20Guide/SAGA_User_Guide_Vol1_Cimmetry_version_2.0.5_20100823.pdf> Acessado em 6 jun.2016.

CREPANI, E. et al. **Curso de Sensoriamento Remoto Aplicado ao Zoneamento Ecológico-Econômico**. INPE, São José dos Campos, 1996. 24 p.

CREPANI, E. et al. **Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento Aplicados ao Zoneamento Ecológico-Econômico e ao Ordenamento Territorial** (INPE-8454-RPQ/722), INPE, São José dos Campos, 2001. 123 p.

CUNHA, E. R. et al. Caracterização da fragilidade potencial da Área de Proteção Ambiental (APA) Municipal das Nascentes do Rio Apa: uma adaptação

Metodológica. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 16., 2013, Foz do Iguaçu, **Anais ... INPE**, 2013. p. 4201-4208.

CUNHA, E. R.; BACANI, V. M. Caracterização da fragilidade ambiental da bacia hidrográfica do Córrego Come Onça, Água Clara, MS, **Acta geográfica**, Boa Vista, v. 10, n. 22, p. 193-205, jan./abr. 2016. Disponível em < <http://revista.ufrb.br/index.php/actageo/article/view/2456/1935>>. Acessado em 31 mai. 2016.

DALIR, P.; NAGHDI, R.; GHOLAMI, V. Modelling of forest road sediment in the northern forest of Iran - Lomir Watershed. **Journal of Forest Science**, v. 60, n. 3, p. 109-114, 2014.

DONHA, A. G.; SOUZA, L. C. P.; SUGAMOSTO, M. L. Determinação da fragilidade ambiental utilizando técnicas de suporte à decisão e SIG. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.10, n. 1, p. 175-181, 2006.

EL-SHEIMY, N.; VALEO, C.; HABIB, A. **Digital Terrain Modeling : Acquisition, Manipulation and Applications**, Boston: Artech House, 2005. 257 p.

EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA . Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2 ed. Rio de Janeiro, 2006. 306 p.

ESRI – Environmental Systems Research Institute, **ArcGIS for Desktop**. Versão 10.1. Redlands:ESRI, 2012.

FAGUNDES, M. G.; QUEIROZ FILHO, A. P. A variação de escalas nas metodologias de fragilidade e vulnerabilidade na bacia hidrográfica do Rio Jundiá/SP. **Boletim Goiano de Geografia**, Goiania, GO, v. 34, n. 3, p. 585-605, 2014.

FIENER, P.; AUERSWALD, K.; VAN OOST, K. Spatio-temporal patterns in land use and management affecting surface runoff response of agricultural catchments – a review. **Earth-Science Reviews**, v. 106, p. 92-104, 2011.

GOUVEIA, R. G. L. et al.. Análise da fragilidade ambiental na bacia do rio Queima-Pé, Tangará da Serra, MT. **Pesquisa em geociências**, Porto Alegre, RS, v.42, n. 2, p. 131-140, mai./ago. 2015.

GONÇALVES, G. G. G. et al. Determinação da fragilidade ambiental de bacias hidrográficas. **Floresta**, Curitiba, PR, v. 41, n. 4, p. 797-808, out./dez. 2011

HEATHWAITE, A. L.; QUINN, P. F.; HEWETT, C. J. M. Modelling and managing critical source areas of diffuse pollution from agricultural land using flow connectivity simulation. **Journal of Hydrology**, v. 304, 2005. p. 446-461. Disponível em <<http://dx.doi.org.ez87.periodicos.capes.gov.br/10.1016/j.jhydrol.2004.07.043>> Acessado em: 10 jun. 2016.

HERMUCHE, P. M. et al. **Morfometria como suporte para elaboração de mapas pedológicos**: I. Bacias hidrográficas assimétricas. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2002. 25 p.

HÖLZEL, H.; DIEKKRÜGER, B. Predicting the impact of linear landscape elements on surface runoff, soil erosion, and sedimentation in the Wahnbach catchment, Germany. **Hydrological Processes**, v. 26, p. 1642-1654, 2011. Disponível em <[doi:10.1002/hyp.8282](https://doi.org/10.1002/hyp.8282)> Acessado em: 12 jun. 2016.

HORTON, R. E. Erosional development of stream and their drainage basins: Hydrophysical approach to quantitative morphology. **Bulletin of the Geological Society of America**. [S.l.], v. 56, p. 275-370, 1945.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **CENSO DEMOGRÁFICO 2010**. Características da população e dos domicílios: resultados do universo. Rio de Janeiro/RJ: IBGE, 2011. Acompanha 1 CD-ROM.

IGC – INTITUTO GEOGRÁFICO E CARTOGRÁFICO, **Folha 089/093 Éden – SF-23-Y-C-II-3-SO-D**. São Paulo:IGC, 1979a. Escala 1:10.000.

IGC – INTITUTO GEOGRÁFICO E CARTOGRÁFICO, **Folha 090/093 Sorocaba II – SF-23-Y-C-II-3-SO-F**. São Paulo:IGC, 1979b. Escala 1:10.000.

IGC – INTITUTO GEOGRÁFICO E CARTOGRÁFICO, **Folha Brigadeiro Tobias I – SF-23-Y-C-II-3-SE-E**. São Paulo:IGC, 1979c. Escala 1:10.000.

IGC – INTITUTO GEOGRÁFICO E CARTOGRÁFICO, **Folha Votorantim I – SF-23-Y-C-V-1-NO-B**. São Paulo:IGC, 1979d. Escala 1:10.000.

IGC – INTITUTO GEOGRÁFICO E CARTOGRÁFICO, **Folha Brigadeiro Tobias II – SF-23-Y-C-V-1-NE-A**. São Paulo:IGC, 1979e. Escala 1:10.000.

IGC – INTITUTO GEOGRÁFICO E CARTOGRÁFICO, **Folha Fazenda Santa Maria – SF-23-Y-C-V-1-NE-C**. São Paulo:IGC, 1979f. Escala 1:10.000.

IPT - INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Carta de suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa e inundações** – Município de Sorocaba. Revisão 3, [S.l.]: CPRM, 2013. Disponível em < <http://www.cprm.gov.br/publique/Gestao-Territorial/Geologia-de-Engenharia-e-Riscos-Geologicos/Cartas-de-Suscetibilidade-a-Movimentos-Gravitacionais-de-Massa-e-Inundacoes-3507.html#saopaulo>>. Acessado em: 22 jan. 2016.

JAIN, S. K.; GOEL, M. K. Assessing the vulnerability to soil erosion of the Ukai Dam catchments using remote sensing and GIS, **Hydrological Sciences Journal**, v. 47, n. 1, p. 31-40, feb. 2002, Disponível em < <http://dx.doi.org/10.1080/02626660209492905>> Acessado em: 6 jun. 2016.

KAWAKUBO, F. S. et al. Caracterização empírica da fragilidade ambiental utilizando geoprocessamento. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 12., 2005, Goiânia, **Anais ... INPE**, 2005. p. 2203-2210.

LANDIM, P. M. B. **Mapa Geológico do Estado de São Paulo**: Folha de São Paulo (SF-23-Y-A). Rio Claro, DAEE/UNESP, 1984. Escala 1:250.000

LOOS, M.; ELSENBEEER, H. Topographic controls on overland flow generation in a forest – An ensemble tree approach, **Journal of Hydrology**, v. 409, p. 94-103, 2011, Disponível em < <http://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.08.002>> Acessado em: 6 jun. 2016.

MAGANHOTTO, R. F.; SANTOS, L. J. C.; OLIVEIRA FILHO, P. C. Análise da fragilidade ambiental como suporte ao planejamento do ecoturismo em unidades de conservação: Estudo de caso FLONA de Irati-PR. **Floresta**, Curitiba, PR, v. 41, n. 2, p. 231-242, abr./jun. 2011.

MECERJAKOV, J. P. Les concepts de morphostructure et de morphosculpture, un nouvel instrument de l'analyse géomorphologique. In: **Annales de Géographie**, t. 77, n. 428, p. 539-552, 1968. Disponível em: < http://www.persee.fr/doc/geo_0003-4010_1968_num_77_423_15733> Acessado em: 14 out. 2015.

MECHI, A.; SANCHES, D. L. **Estudos Avançados**. São Paulo, v. 24, n. 68, 2010, p. 209-220.

MEIRA, R. T.; SABONARO, D. Z.; SILVA, D. C. C. Elaboração da carta de adequabilidade ambiental de uma pequena propriedade rural no município de São Miguel Arcanjo, São Paulo, utilizando técnicas de geoprocessamento. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 21, n. 1, p. 77-84, jan./mar. 2016.

Disponível em <<http://dx.doi.org/10.1590/S1413-41520201600100133687>>
Acessado em: 6 jun. 2016.

MENDONÇA, F.; CUNHA, F. C. A; LUIZ, G. C. Problemática socioambiental urbana. **Revista da Anpege**, v. 12, n. 18, p. 331-352, 2016.

MOORE, I. D. et al. Soil attribute prediction using terrain analysis. **Soil Science Society of America Journal**. v. 57, p. 443-452, 1993.

NAKASHIMA, M. S. R. **Análise dos processos erosivos e de fragilidade ambiental na Bacia do Rio Keller-PR**. 1999. Tese (Doutorado em Geografia Física) – Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.

NAKASHIMA, M. S. R. Carta de fragilidade ambiental da bacia do rio Keller, Estado do Paraná: subsídio ao estudo dos processos erosivos. **Acta Scientiarum**. Maringá, v. 23, n. 6, p. 1547-1560, 2001.

OLIVEIRA, G. L. T. Uma descrição agroecológica da crise atual. **Revista NERA**. Presidente Prudente, v. 12, n. 15, p. 66-87, 2009.

OLIVEIRA, J. B. et al. **Mapa pedológico do Estado de São Paulo**. Campinas: Instituto Agrônomo, 1999. Escala 1:500.000. Acompanha uma legenda expandida.

PHILIPPI JR. A. et al. Desenvolvimento sustentável, interdisciplinaridade e ciências ambientais. **Revista Brasileira de Pós-Graduação**, Brasília, v. 10, n. 21, p. 509-533, 2013.

PMS - PREFEITURA MUNICIPAL DE SOROCABA. **Plano Diretor Ambiental de Sorocaba**. 2011.

PONÇANO, W. L. et al. **Mapa geomorfológico do Estado de São Paulo – Monografias 5. Nota explicativa**. São Paulo. Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT. 1981a. v. 1, n. 1183, 126 p.

PONÇANO, W. L. et al. **Mapa geomorfológico do Estado de São Paulo – Monografias 5**. São Paulo. Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT. 1981b. v. 2, n. 1183, Escala 1: 1.000.000.

QUEIROZ JUNIOR, V. S. et al.. Uso de geotecnologias na caracterização da fragilidade ambiental da Bacia da UHE Foz do Rio Claro (GO), **GeoFocus**, Barcelona, n. 15, p 193-212, 2014, Disponível em: <<http://www.geofocus.org/index.php/geofocus/article/view/413>>. Acessado em: 14 dez. 2015.

ROSA, M. R.; ROSS, J. L. Aplicação de SIG na geração de cartas de fragilidade. **Revista do Departamento de Geografia**, São Paulo/SP, DG-FFLCH-USP, n. 13, 1999. p. 77-106.

ROSS, J. L. S. O Registro Cartográfico dos Fatos Geomórficos e a Questão da Taxonomia do Relevo. **Revista do Departamento de Geografia**, São Paulo/SP, n.6, 1992. p. 17-30.

ROSS, J. L. S. Análise empírica da fragilidade dos ambientes naturais e antropizados. **Revista do Departamento de Geografia**, São Paulo/SP, DG-FFLCH-USP, n. 8, 1994. p. 63-74.

ROSS, J. L. S.; MOROZ, I. C. **Mapa geomorfológico do estado de São Paulo**. São Paulo/SP: FFLCH-USP/IPT/FAPESP, v. 1, 1997a.

ROSS, J. L. S.; MOROZ, I. C. **Mapa geomorfológico do estado de São Paulo**. São Paulo/SP: FFLCH-USP/IPT/FAPESP, v. 2, 1997b. Escala 1:500.000

ROSS, J. L. S. Geomorfologia aplicada aos EIAs-RIMAs. In: GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B. (Org.). **Geomorfologia e meio ambiente**. 6. ed. Rio de Janeiro/RJ: Bertrand Brasil, cap. 6, 2006a, p. 291-336

ROSS, J. L. S. **Ecogeografia do Brasil**: subsídios para planejamento ambiental. São Paulo/SP: Oficina dos textos, 2006b. 208 p.

SANTORO, P. F. Perímetro urbano flexível, urbanização sob demanda incompleta: o papel do Estado frente ao desafio do planejamento da expansão urbana. **Revista Brasileira de Estudos Urbanos e Regionais**, v. 16, n. 1, p. 169-187, 2014.

SALGADO, M. P. G.; FORMAGGIO, A. R.; RUDORFF, B. F. T. **Comparação entre Métodos para Geração de Modelos Digitais de Elevação a Partir de Dados Cartográficos**. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 15. (SBSR), 2011, Curitiba. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2011. 1 DVD. p. 8880-8887.

SCHULTZ, G. B. **Avaliação do processo de produção de sedimentos em um trecho de estrada não pavimentada**. 2013. Dissertação (Mestrado em Ciências da Terra) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

SECRETARIA DE SANEAMENTO E RECURSOS HÍDRICOS DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Plano Municipal Integrado de Saneamento Básico**. Sorocaba: Prefeitura Municipal de Sorocaba: SSRH/CSAN, 2013. 176 p. Disponível em: <<http://www.saaesorocaba.com.br/arquivos/pmsb.pdf>>. Acessado em: 21 jun. 2016.

SILVA, I. C. O.; ALVES, R. E.; RODRIGUES, T. L. Análise de variáveis morfométricas extraídas a partir de imagem SRTM para elaboração de mapa pedológico. **Geoambiente on-line**, Jataí/GO, n. 20, p. 137-151. jan.-jun. 2013. Disponível em: <<https://revistas.ufg.br/geoambiente/article/view/26093/15041>> Acessado em: 02 jun. 2016.

SILVA, J. S. V.; NEVES, S. M. A. S.; VENDRUSCULO, L. G. Caracterização ambiental da unidade de planejamento e gerenciamento do Rio Amambá. **Revista GeoPantanal**. Corumbá, n. 16, p. 21-35. jan./jun. 2014.

SOUZA, G. O. C. Uso da cartografia no setor público: Geoprocessamento como tomada de decisão. **Revista do Departamento de Geografia**, São Paulo, p. 180-202, aug. 2014. ISSN 2236-2878. Disponível em: <[HTTP://www.periodicos.usp.br/rdg/article/view/85553](http://www.periodicos.usp.br/rdg/article/view/85553)>. Acessado em: 11 jun. 2016.

SOUZA, B. S. P. A geografia e a análise da natureza. **Revista GeoAmazônia**. Belém, v. 3, n. 5, p. 18-34. 2015

SOUZA, M. M.; COSTA, L. H.; CARVALHO, D. A. S. Utilização de ferramentas de geoprocessamento para mapear as fragilidades ambientais na área de influência direta da UHE de Belo Monte, no Estado do Pará. **Espaço Plural**, Marechal Cândido Rondon, PR, n. 25, 2011. P. 73-85

SPÖRL, C.; ROSS, J. L. S. Análise comparativa da fragilidade ambiental com aplicação de três modelos. **GEOUSP – Espaço e Tempo**, São Paulo, n. 15, p. 39-49, 2004.

STRAHLER, A. N. Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topography. **Bulletin of the Geological Society of America**. [S.l.], v. 63, p. 1117-1142, 1952.

TAUK-TORNISIELO, S. M. et al. Análise Ambiental : Os Princípios da Interdisciplinaridade. In: TAUK-TORNISIELO, S. M. et al. (Org.). **Análise Ambiental - Estratégias e Ações**. São Paulo: UNESP, 1995. p. 9-12.

TEIXEIRA, A. L. et al. **Publicação em mídia eletrônica das cartas geológicas executadas pelo Instituto Geológico (SMA/SP) para subsidiar a ocupação e uso do meio físico na região de entre Sorocaba e Campinas**: Mapeamento geológico da Folha Sorocaba (SP) – Relatório técnico. São Paulo: Instituto Geológico – IG. 2009. 73 p. Escala 1: 50.000. Disponível em: < [http://igeologico.sp.gov.br/publicacoes/ livros-e-colecoes/livros-e-audiolivros/](http://igeologico.sp.gov.br/publicacoes/livros-e-colecoes/livros-e-audiolivros/)>. Acessado em: 26 jan. 2016.

TRICART, J. **Ecodinâmica**. Rio de Janeiro: IBGE – SUPREN, 1977. 91 p.

VALERIANO, M. M. Dados Topográficos. In: FLORENZANO, T. G. (Org.). **Geomorfologia : Conceitos e Tecnologia Atuais**. São Paulo: Oficina de Textos, 2008. p. 72-104.

VALLE, I. C.; FRANCELINO, M. R.; PINHEIRO, H. S. K. Mapeamento da fragilidade ambiental na bacia do Rio Aldeia Velha, RJ. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, RJ, v. 23, n. 2, p. 295-308, 2016. Disponível em: <<http://www.floram.org/articles/view/id/56f3f7885ce02a935f000004>>. Acessado em: 6 jun. 2016.

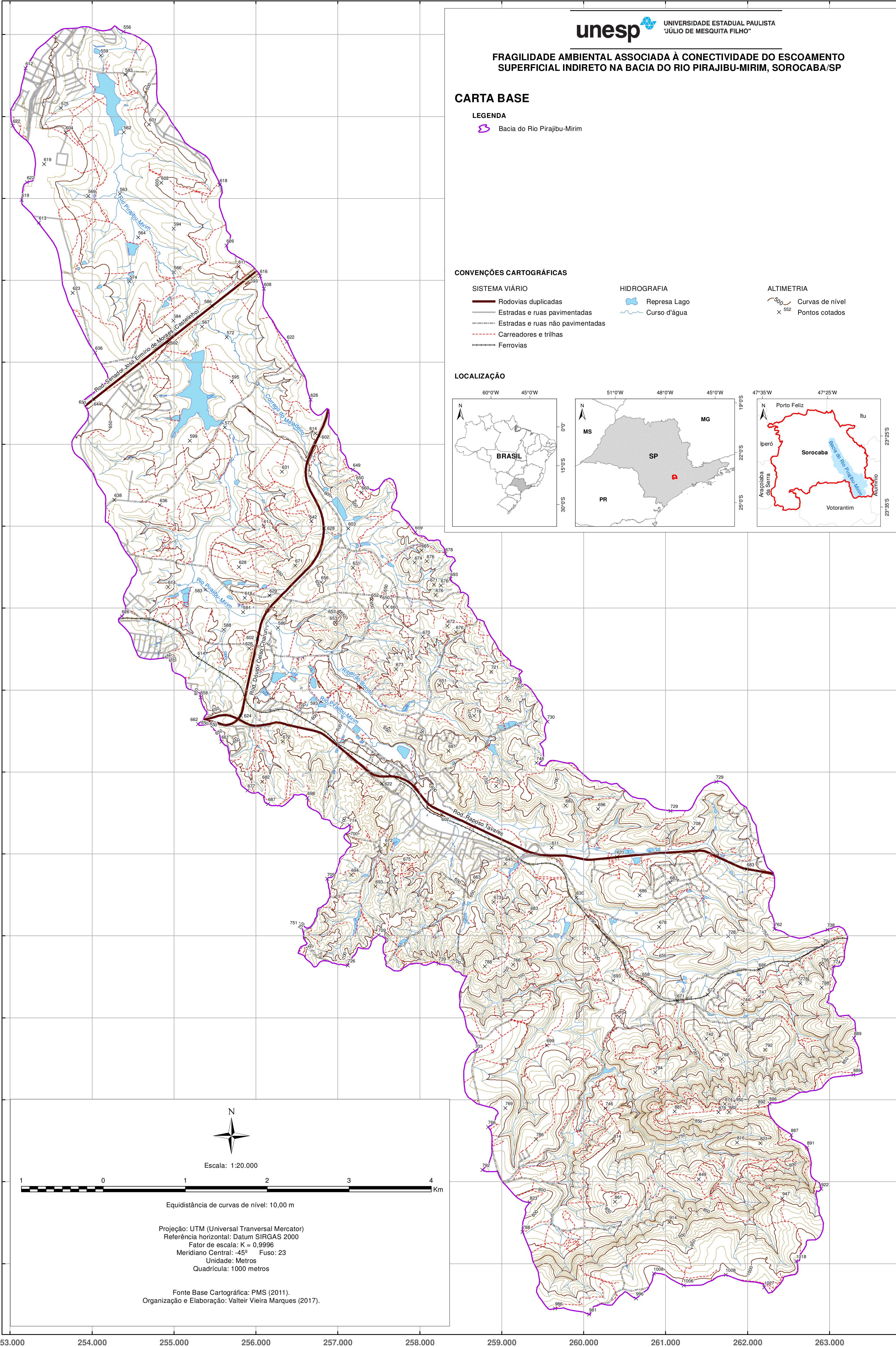
VEIGA, J. E. Indicadores de Sustentabilidade. **Estudos Avançados**. São Paulo, v. 24, n. 68, 2010, p. 39-52.

VILLELA, S. M.; MATTOS, A. **Hidrologia aplicada**. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1975. 245 p.

WANG, L.; LIU, H. An efficient method for identifying and filling surface depressions in digital elevation models for hydrologic analysis and modelling. **International Journal of Geographical Information Science**, v. 20, n. 2. p. 193-213, 2006.

ZIEGLER, A. D.; GIAMBELLUCA, T. W. Importance of rural roads as source areas for runoff in mountainous areas of northern Thailand. *Journal of Hydrology*. v. 196, p. 204-229. 1997.

ZIMMERMANN, B. et al. Connectivity of overland flow by drainage network expansion in a rain Forest catchment. **Water Resources Research**, v. 50, n. 2, p. 1457-1473, 2014. Disponível em: <doi: 10.1002/2012WR012660> Acessado em: 10 jun. 2016



FRAGILIDADE AMBIENTAL ASSOCIADA À CONECTIVIDADE DO ESCOAMENTO SUPERFICIAL INDIRETO NA BACIA DO RIO PIRAJIBU-MIRIM, SOROCABA/SP

HIERARQUIA FLUVIAL

LEGENDA

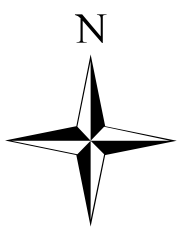
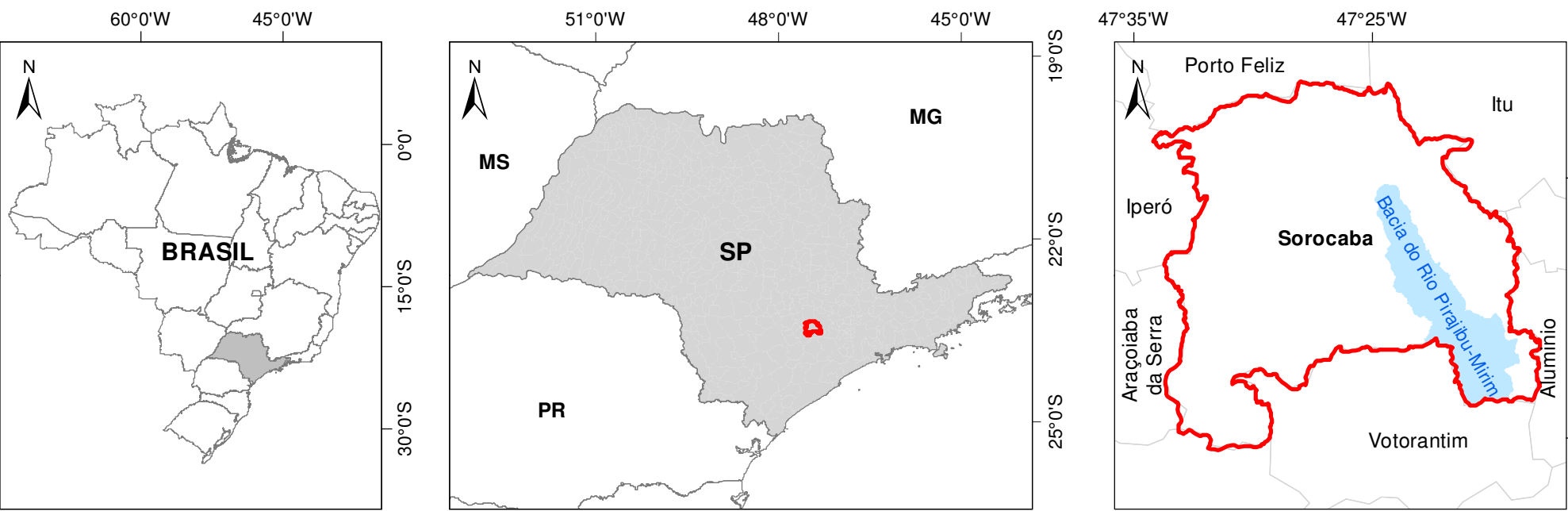
- Bacia do Rio Pirajibu-Mirim
- Hidrografia - Ordem fluvial segundo Strahler (1952)
- 1ª ordem
- 2ª ordem
- 3ª ordem
- 4ª ordem
- 5ª ordem
- 6ª ordem

CONVENÇÕES CARTOGRÁFICAS

SISTEMA VIÁRIO

- Rodovias duplicadas
- Estradas e ruas pavimentadas
- Ferrovias

LOCALIZAÇÃO

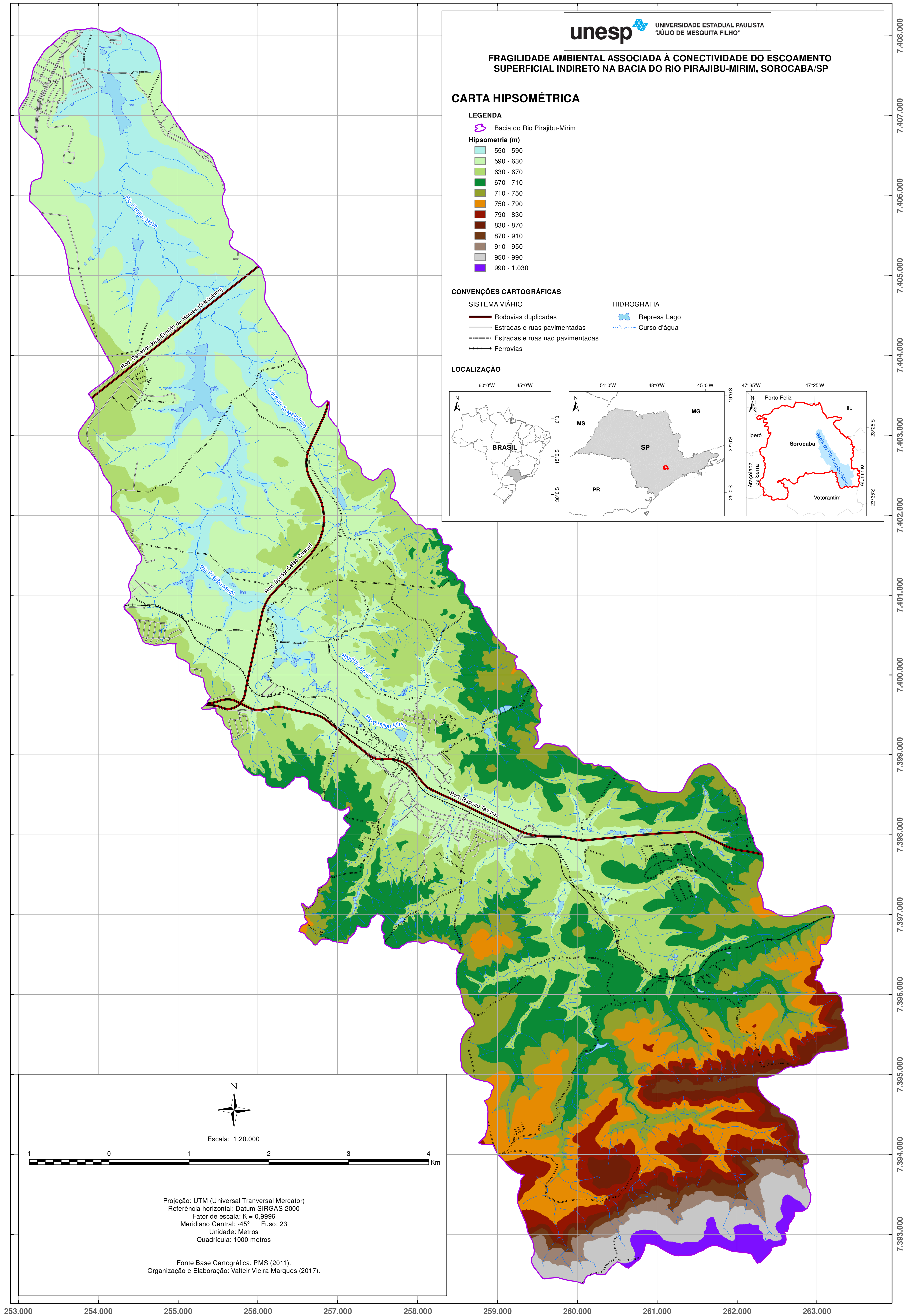


Escala: 1:20.000



Projeção: UTM (Universal Transversal Mercator)
Referência horizontal: Datum SIRGAS 2000
Fator de escala: K = 0,9996
Meridiano Central: -45° Fuso: 23
Unidade: Metros
Quadrícula: 1000 metros

Fonte Base Cartográfica: PMS (2011).
Organização e Elaboração: Valteir Vieira Marques (2017).



FRAGILIDADE AMBIENTAL ASSOCIADA À CONECTIVIDADE DO ESCOAMENTO
SUPERFICIAL INDIRETO NA BACIA DO RIO PIRAJIBU-MIRIM, SOROCABA/SP

CARTA DE DECLIVIDADES

LEGENDA

 Bacia do Rio Pirajibu-Mirim

Declividades (%)

-  Menor que 3 %
-  3 a 6 %
-  6 a 12 %
-  12 a 20 %
-  20 a 30 %
-  Acima de 30 %

CONVENÇÕES CARTOGRÁFICAS

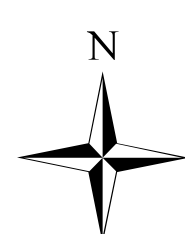
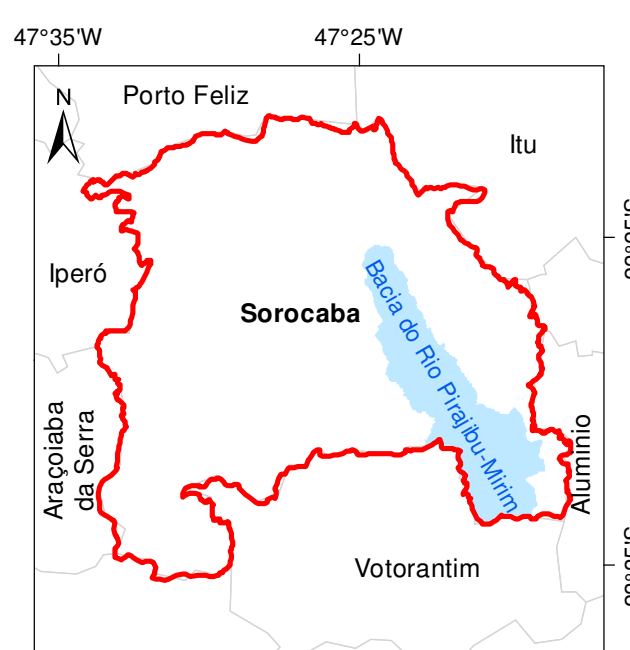
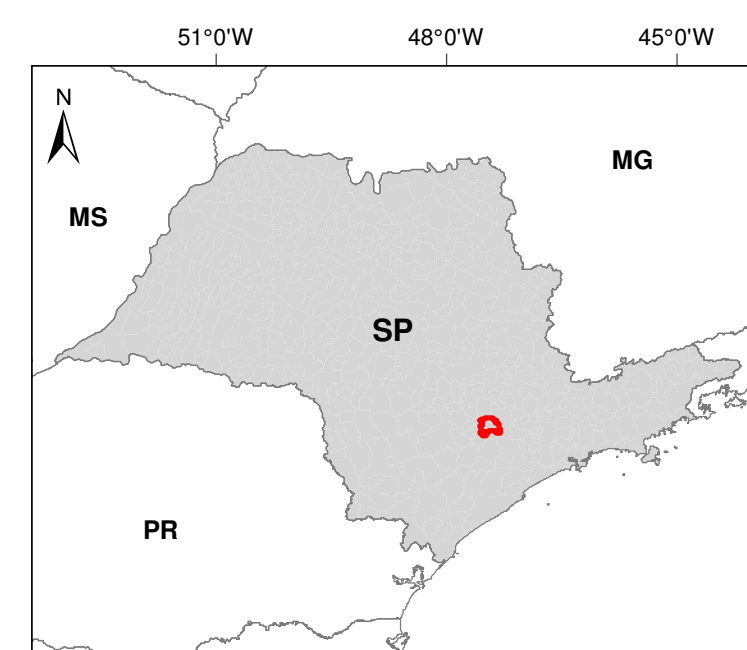
SISTEMA VIÁRIO

-  Rodovias duplicadas
-  Estradas e ruas pavimentadas
-  Estradas e ruas não pavimentadas
-  Ferrovias

HIDROGRAFIA

-  Represa Lago
-  Curso d'água

LOCALIZAÇÃO

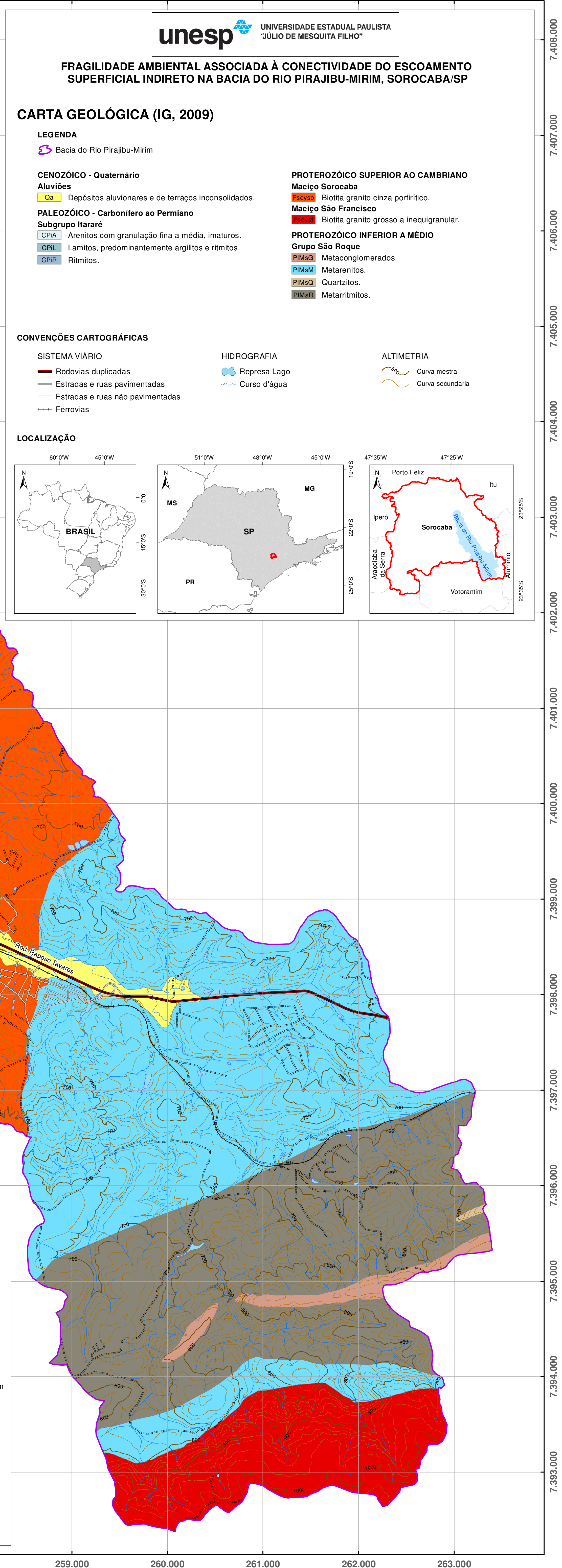
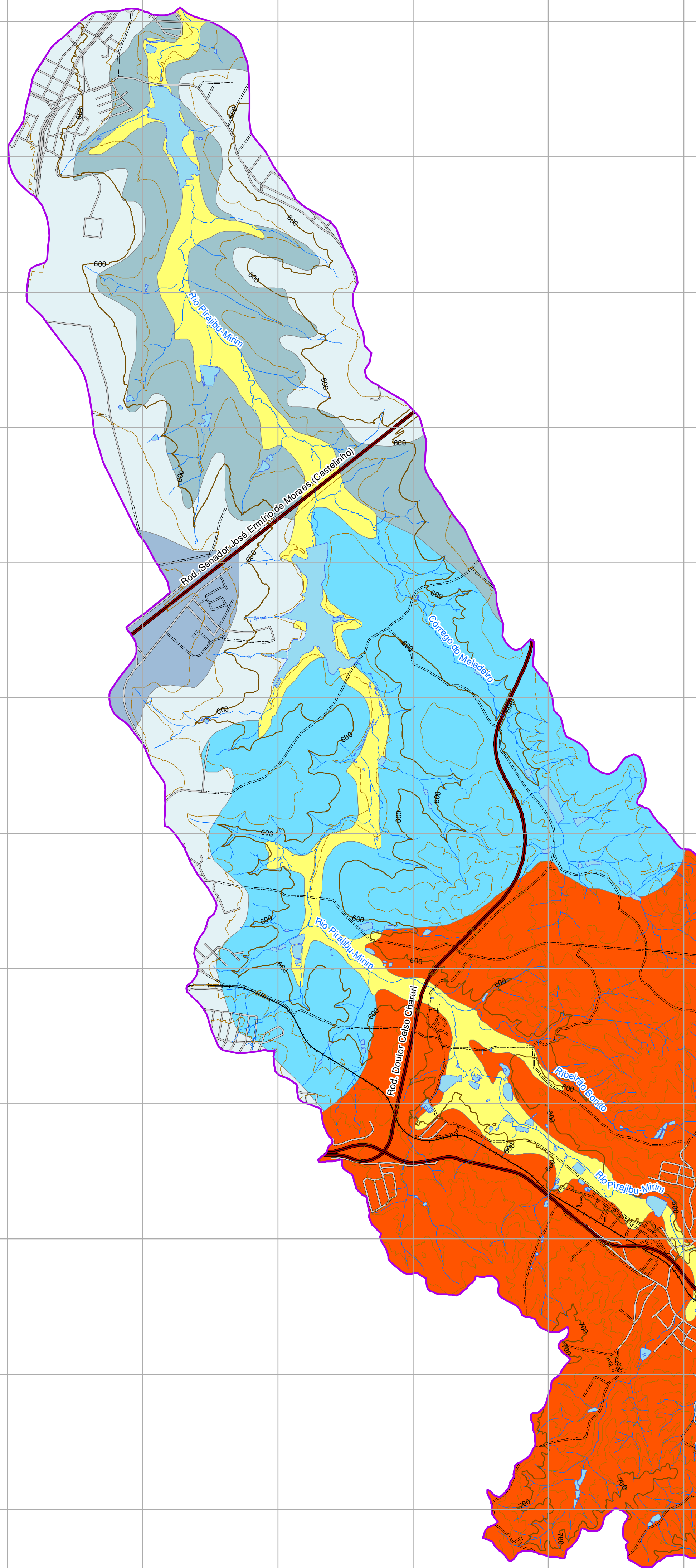


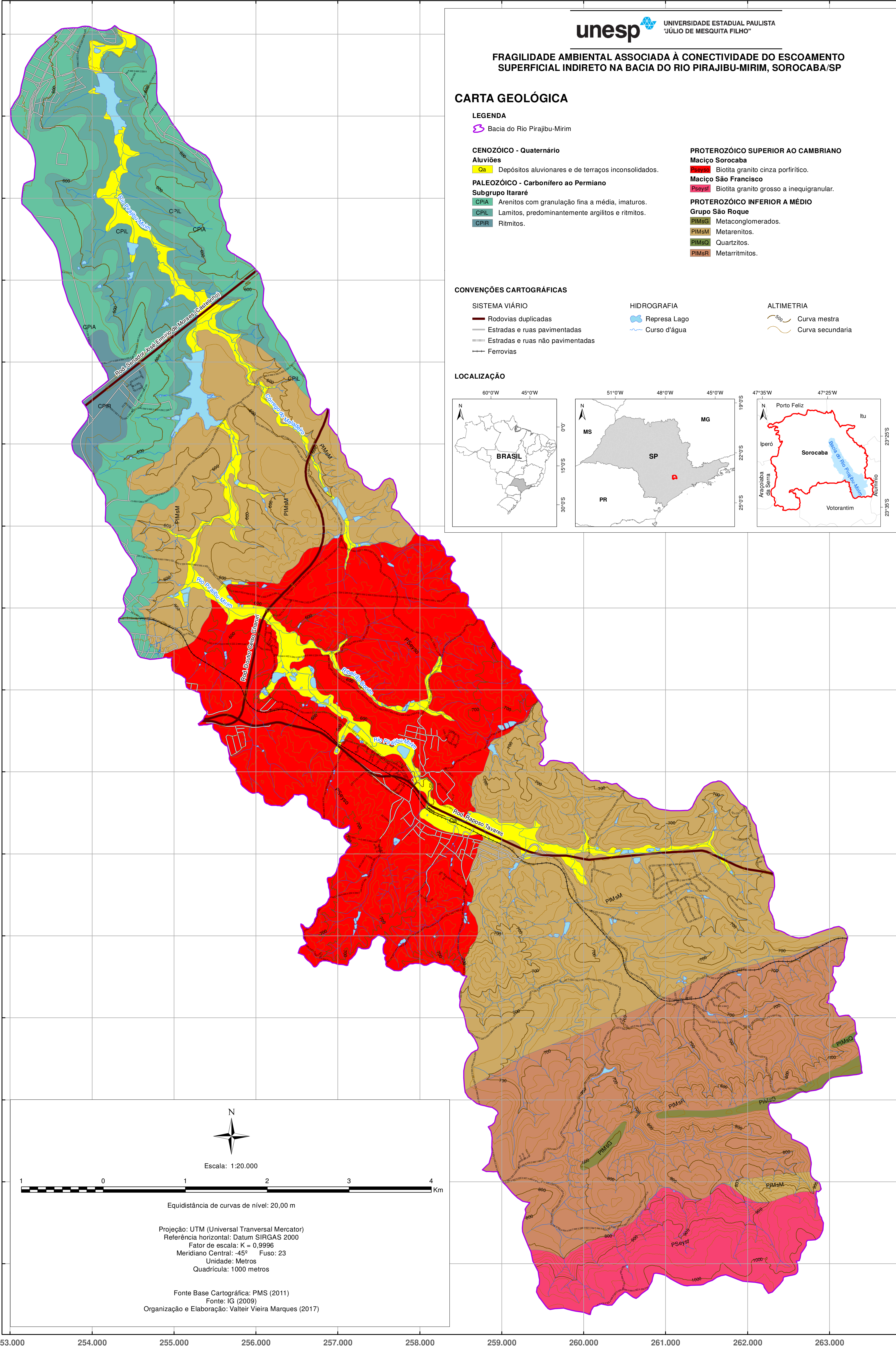
Escala: 1:20.000



Projeção: UTM (Universal Transversal Mercator)
Referência horizontal: Datum SIRGAS 2000
Fator de escala: K = 0,9996
Meridiano Central: -45° Fuso: 23
Unidade: Metros
Quadrícula: 1000 metros

Fonte Base Cartográfica: PMS (2011).
Organização e Elaboração: Valteir Vieira Marques (2017).





FRAGILIDADE AMBIENTAL ASSOCIADA À CONECTIVIDADE DO ESCOAMENTO
SUPERFICIAL INDIRETO NA BACIA DO RIO PIRAJIBU-MIRIM, SOROCABA/SP

CARTA GEOLÓGICA

LEGENDA

 Bacia do Rio Pirajibu-Mirim

CENOZÓICO - Quaternário

Aluviões

 **Qa** Depósitos aluvionares e de terraços inconsolidados.

PALEOZÓICO - Carbonífero ao Permiano

Subgrupo Itararé

 **CPIA** Arenitos com granulação fina a média, imaturos.
 **CPIL** Lamitos, predominantemente argilitos e ritmitos.
 **CPIR** Ritmitos.

PROTEROZÓICO SUPERIOR AO CAMBRIANO

Maciço Sorocaba

 **Pseysto** Biotita granito cinza porfíritico.

Maciço São Francisco

 **Pseystf** Biotita granito grosso a inequigranular.

PROTEROZÓICO INFERIOR A MÉDIO

Grupo São Roque

 **PIMsG** Metaconglomerados.
 **PIMsM** Metarenitos.
 **PIMsQ** Quartzitos.
 **PIMsR** Metarritmitos.

CONVENÇÕES CARTOGRÁFICAS

SISTEMA VIÁRIO

 Rodovias duplicadas
 Estradas e ruas pavimentadas
 Estradas e ruas não pavimentadas
 Ferrovias

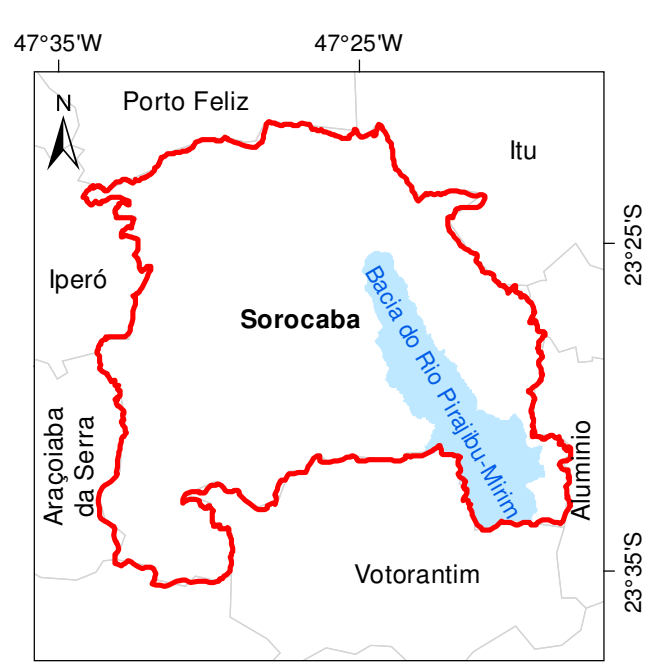
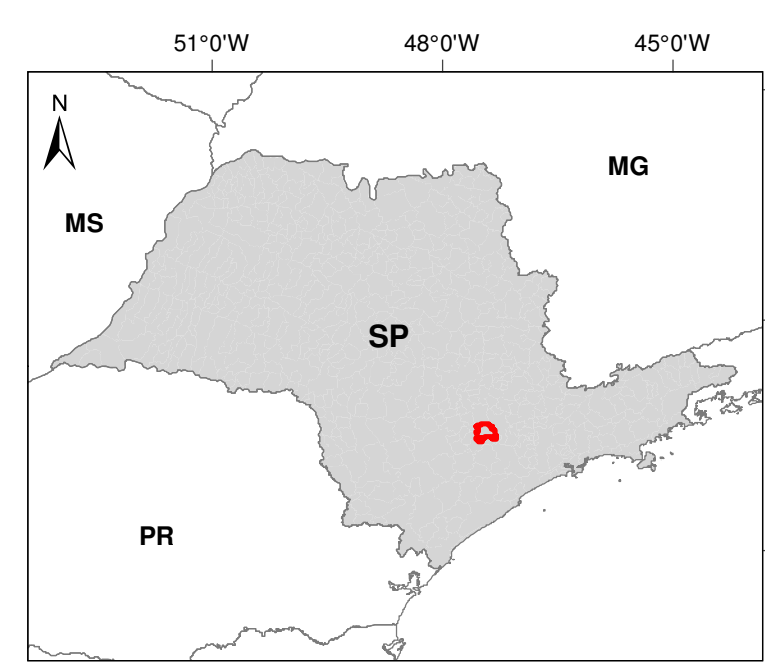
HIDROGRAFIA

 Represa Lago
 Curso d'água

ALTIMETRIA

 **500** Curva mestra
 Curva secundaria

LOCALIZAÇÃO



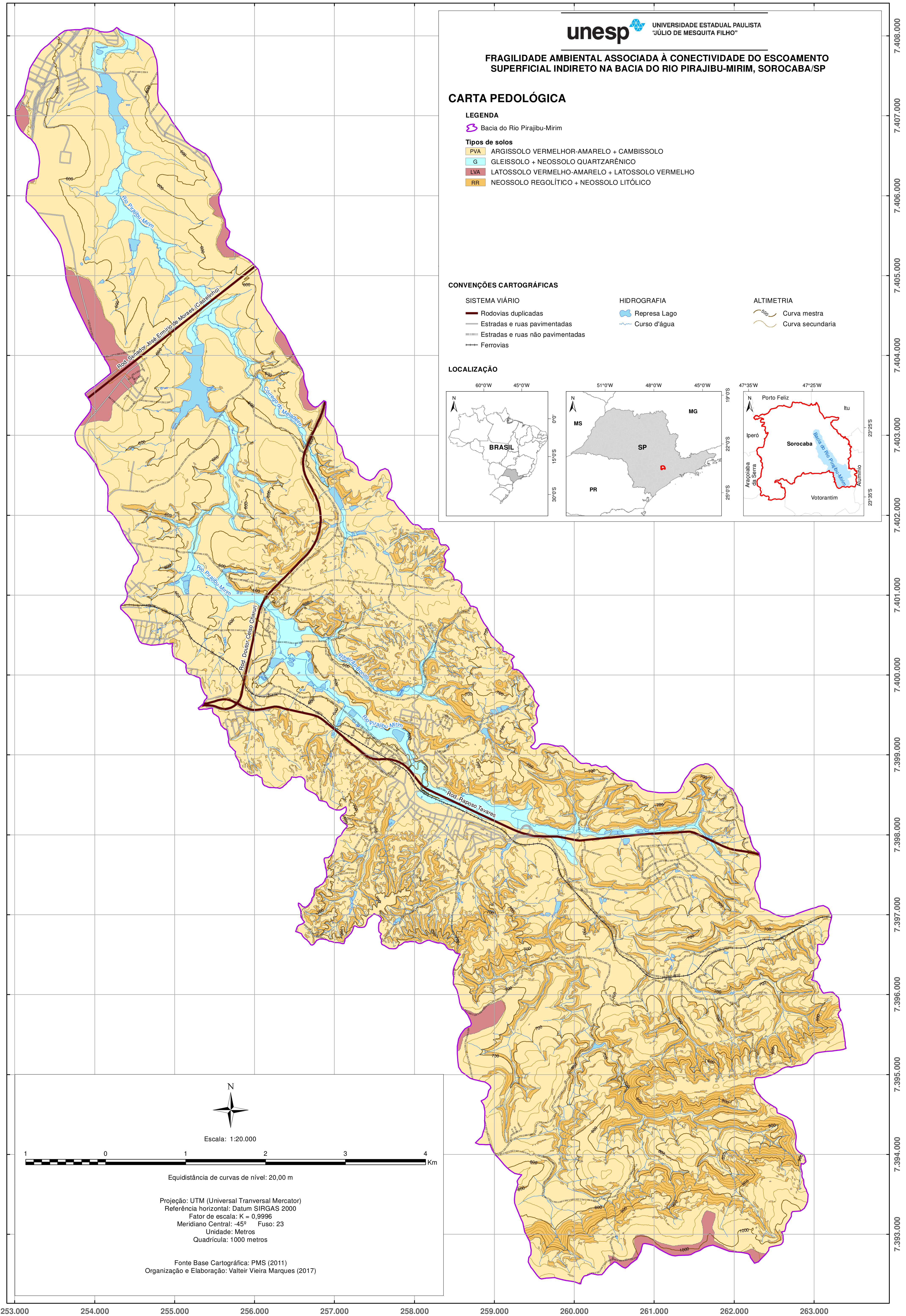
Escala: 1:20.000

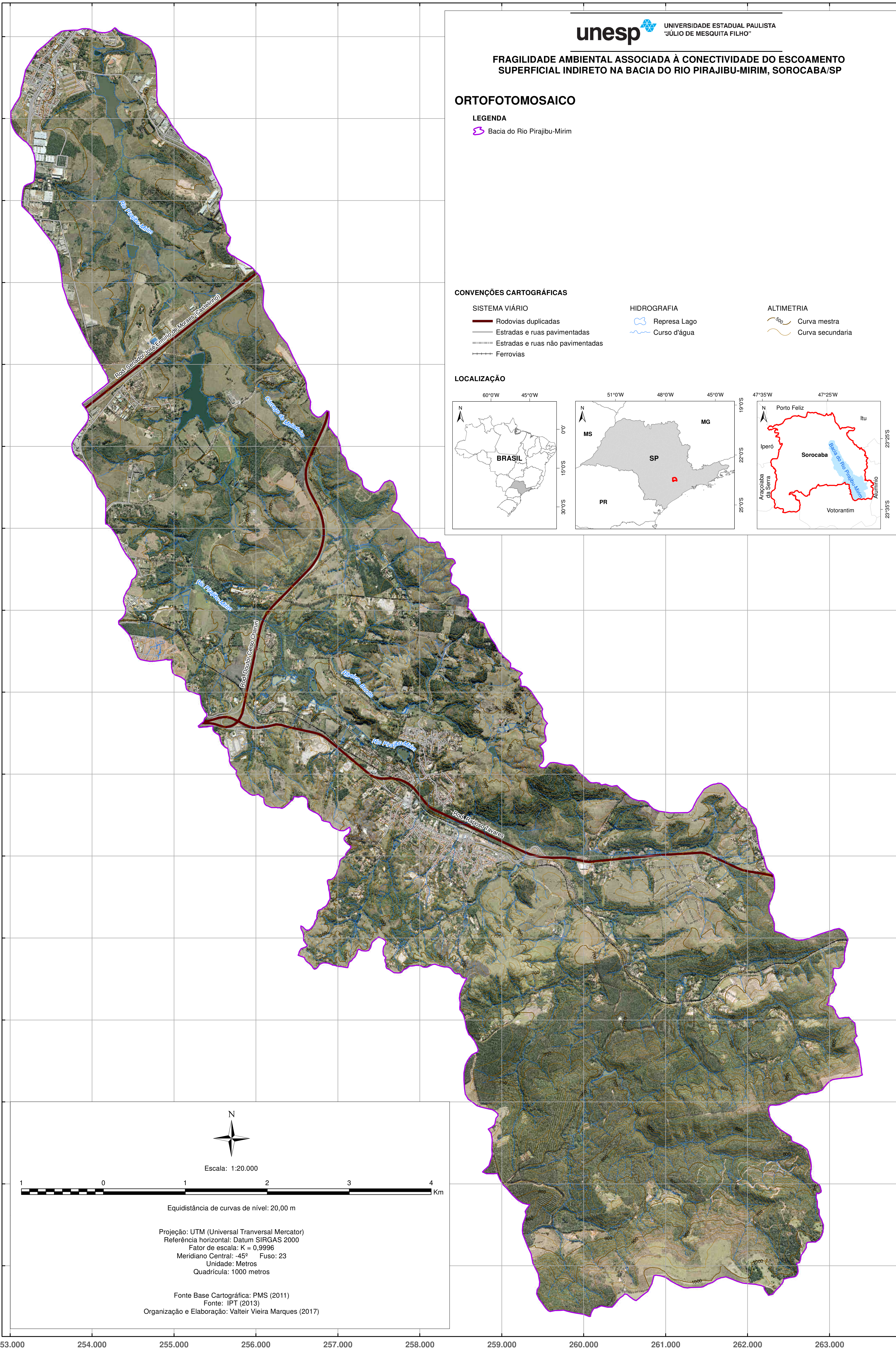


Equidistância de curvas de nível: 20,00 m

Projeção: UTM (Universal Transversal Mercator)
Referência horizontal: Datum SIRGAS 2000
Fator de escala: K = 0,9996
Meridiano Central: -45° Fuso: 23
Unidade: Metros
Quadrícula: 1000 metros

Fonte Base Cartográfica: PMS (2011)
Fonte: IG (2009)
Organização e Elaboração: Valteir Vieira Marques (2017)





FRAGILIDADE AMBIENTAL ASSOCIADA À CONECTIVIDADE DO ESCOAMENTO SUPERFICIAL INDIRETO NA BACIA DO RIO PIRAJIBU-MIRIM, SOROCABA/SP

ORTOFOTOMOSAICO

LEGENDA

Bacia do Rio Pirajibu-Mirim

CONVENÇÕES CARTOGRÁFICAS

SISTEMA VIÁRIO

- Rodovias duplicadas
- Estradas e ruas pavimentadas
- Estradas e ruas não pavimentadas
- Ferrovias

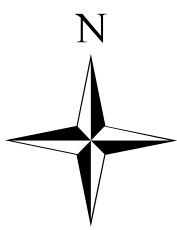
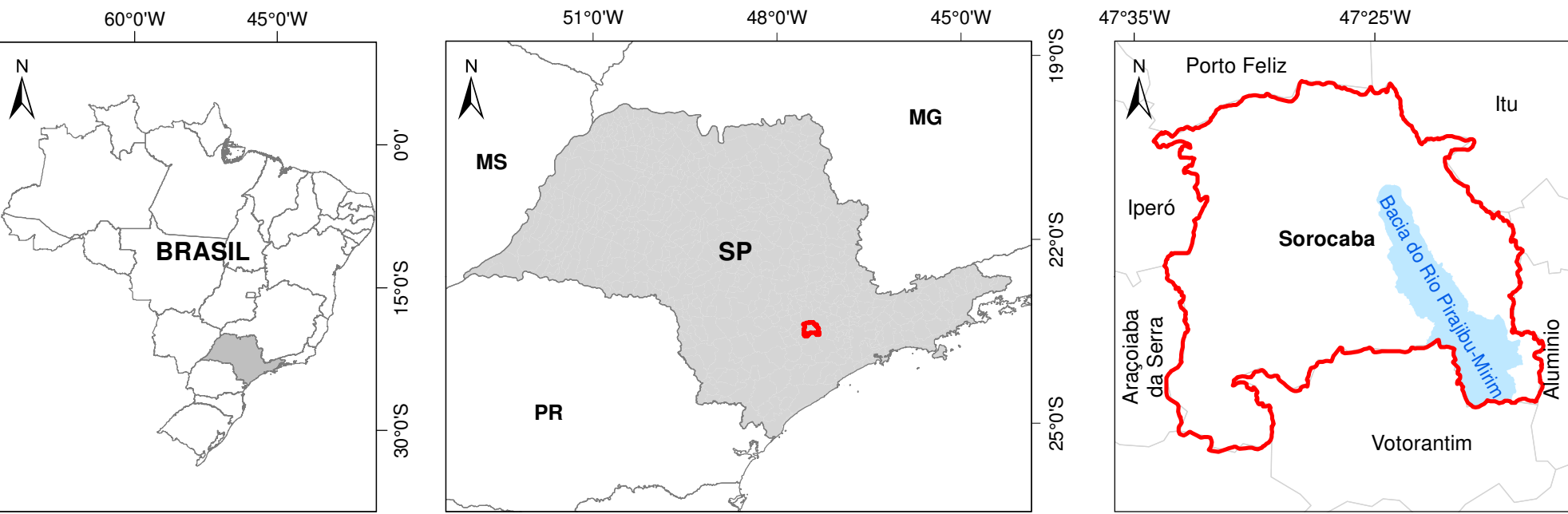
HIDROGRAFIA

- Represa Lago
- Curso d'água

ALTIMETRIA

- Curva mestra
- Curva secundaria

LOCALIZAÇÃO



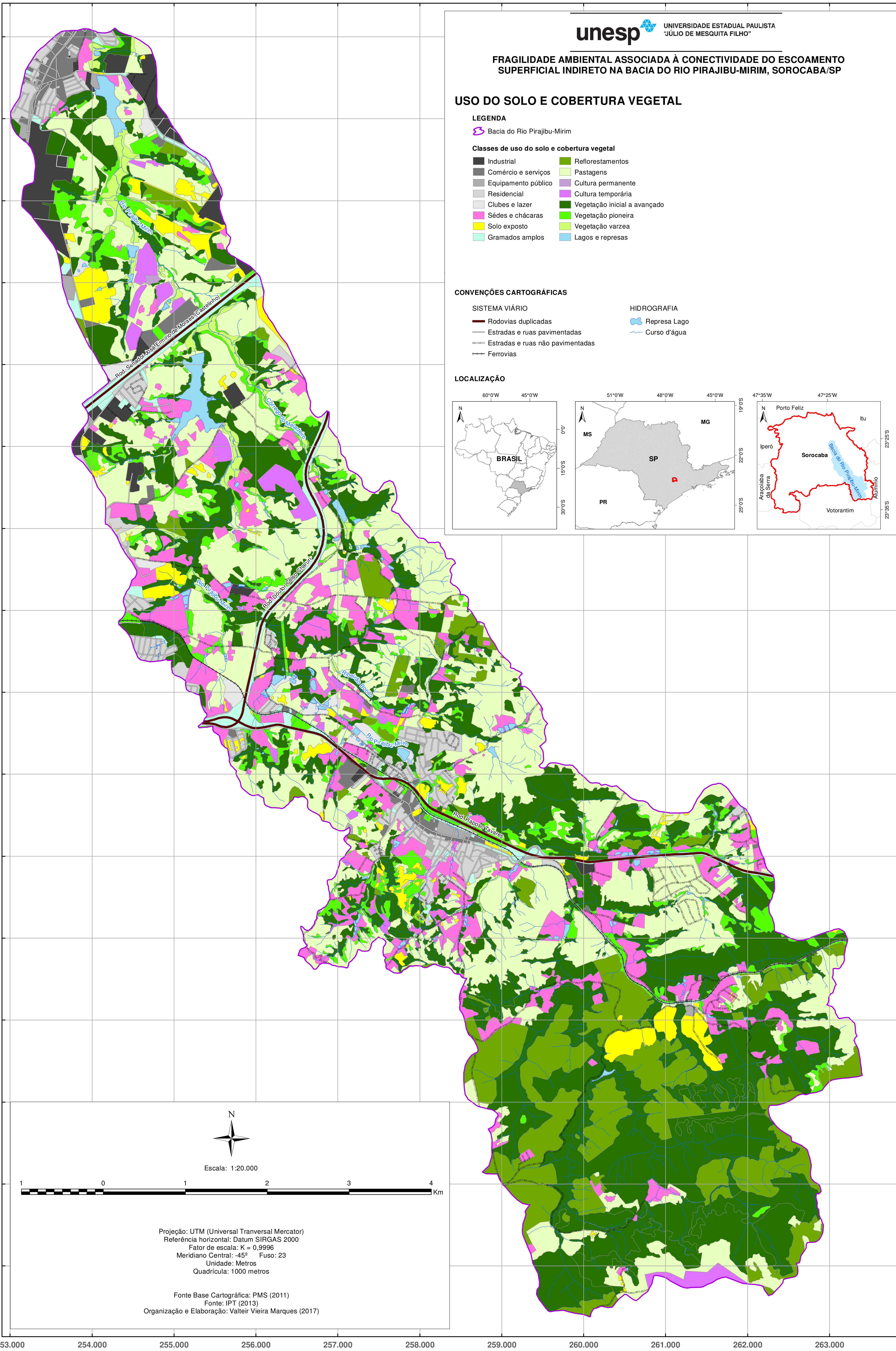
Escala: 1:20.000



Equidistância de curvas de nível: 20,00 m

Projeção: UTM (Universal Transversal Mercator)
Referência horizontal: Datum SIRGAS 2000
Fator de escala: K = 0,9996
Meridiano Central: -45º Fuso: 23
Unidade: Metros
Quadrícula: 1000 metros

Fonte Base Cartográfica: PMS (2011)
Fonte: IPT (2013)
Organização e Elaboração: Valteir Vieira Marques (2017)



FRAGILIDADE AMBIENTAL ASSOCIADA À CONECTIVIDADE DO ESCOAMENTO SUPERFICIAL INDIRETO NA BACIA DO RIO PIRAJIBU-MIRIM, SOROCABA/SP

USO DO SOLO E COBERTURA VEGETAL

LEGENDA

Bacia do Rio Pirajibu-Mirim

Classes de uso do solo e cobertura vegetal

- Industrial

Comércio e serviços

Equipamento público

Residencial

Clubes e lazer

Sédes e chácaras

Solo exposto

Gramados amplos
- Reflorestamentos

Pastagens

Cultura permanente

Cultura temporária

Vegetação inicial a avançado

Vegetação pioneira

Vegetação varzea

Lagos e represas

CONVENÇÕES CARTOGRÁFICAS

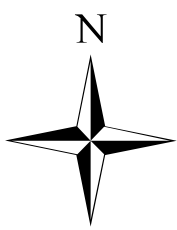
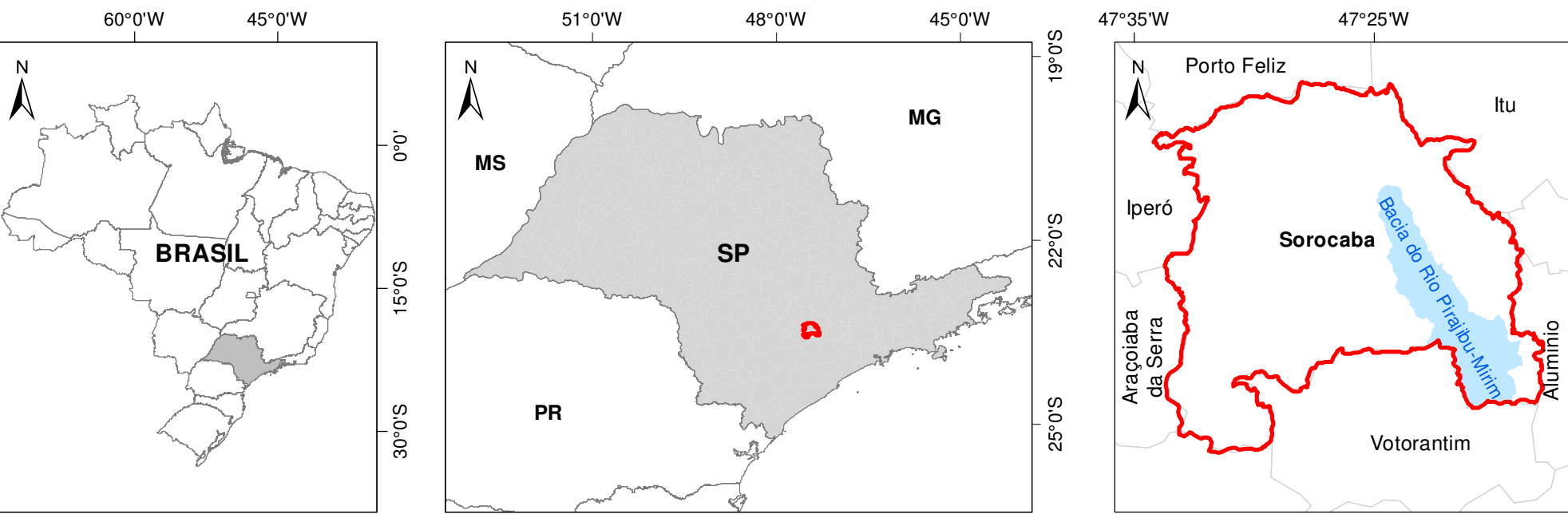
SISTEMA VIÁRIO

- Rodovias duplicadas
- Estradas e ruas pavimentadas
- Estradas e ruas não pavimentadas
- Ferrovias

HIDROGRAFIA

- Represa Lago
- Curso d'água

LOCALIZAÇÃO

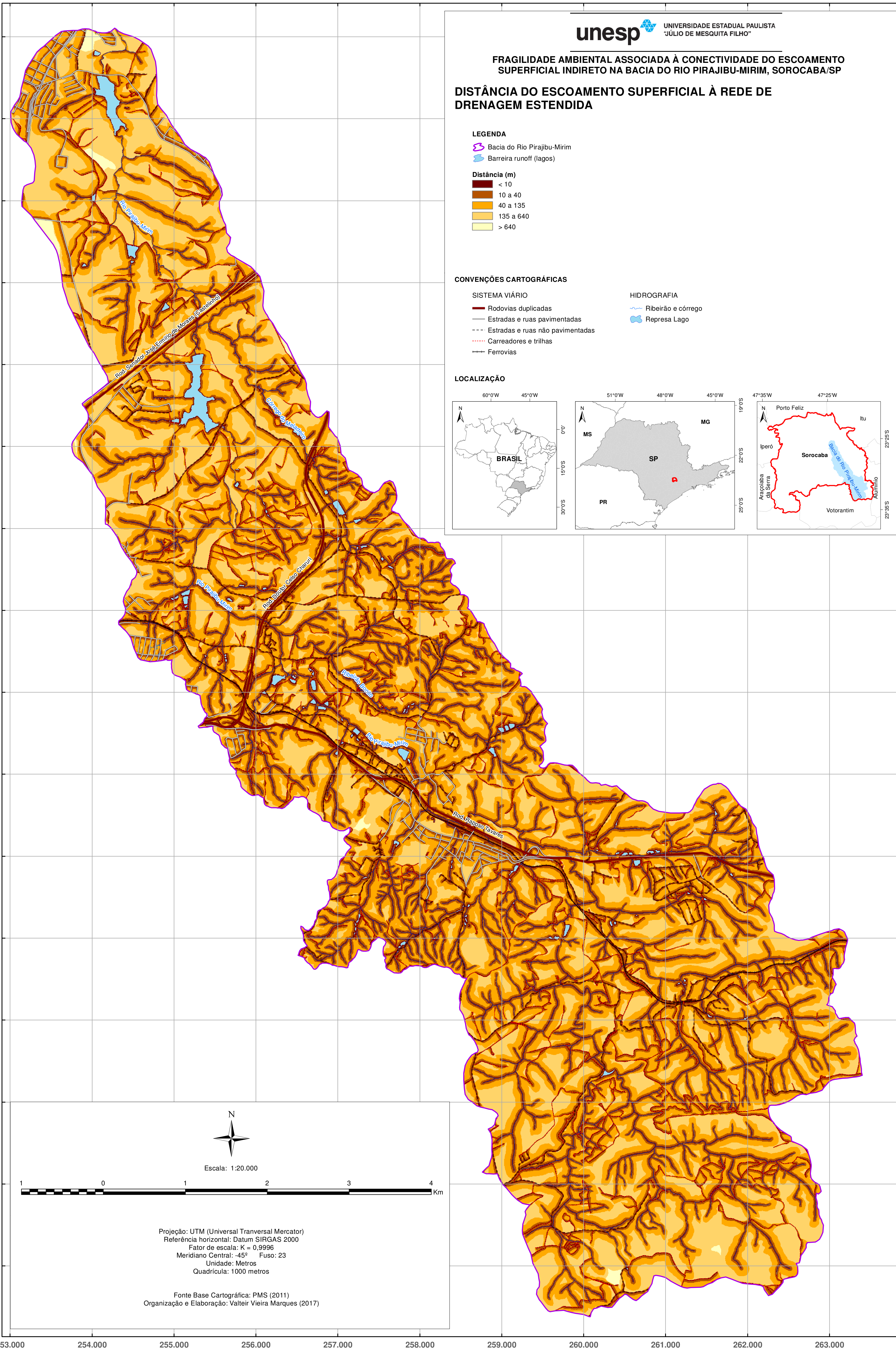


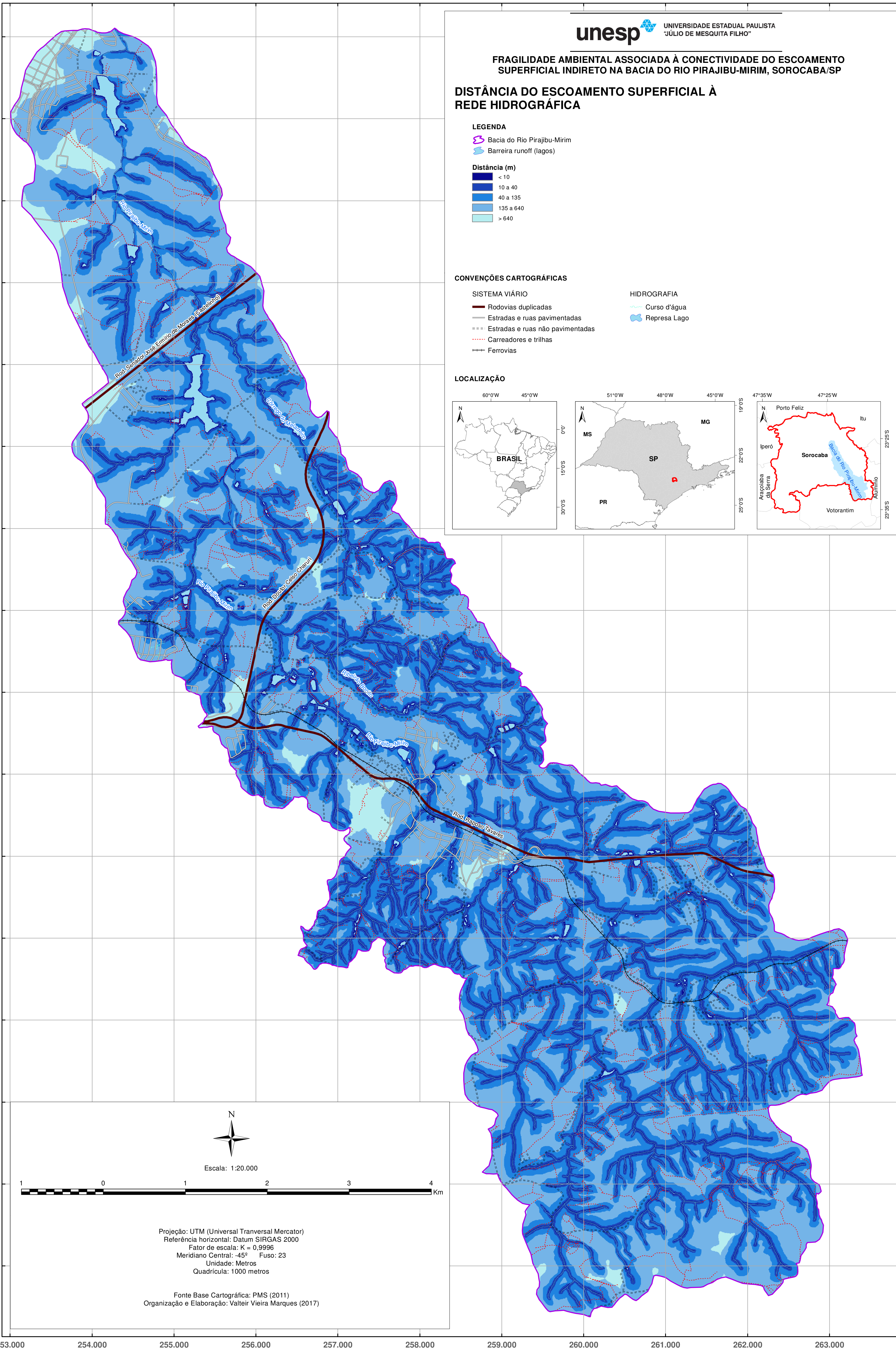
Escala: 1:20.000

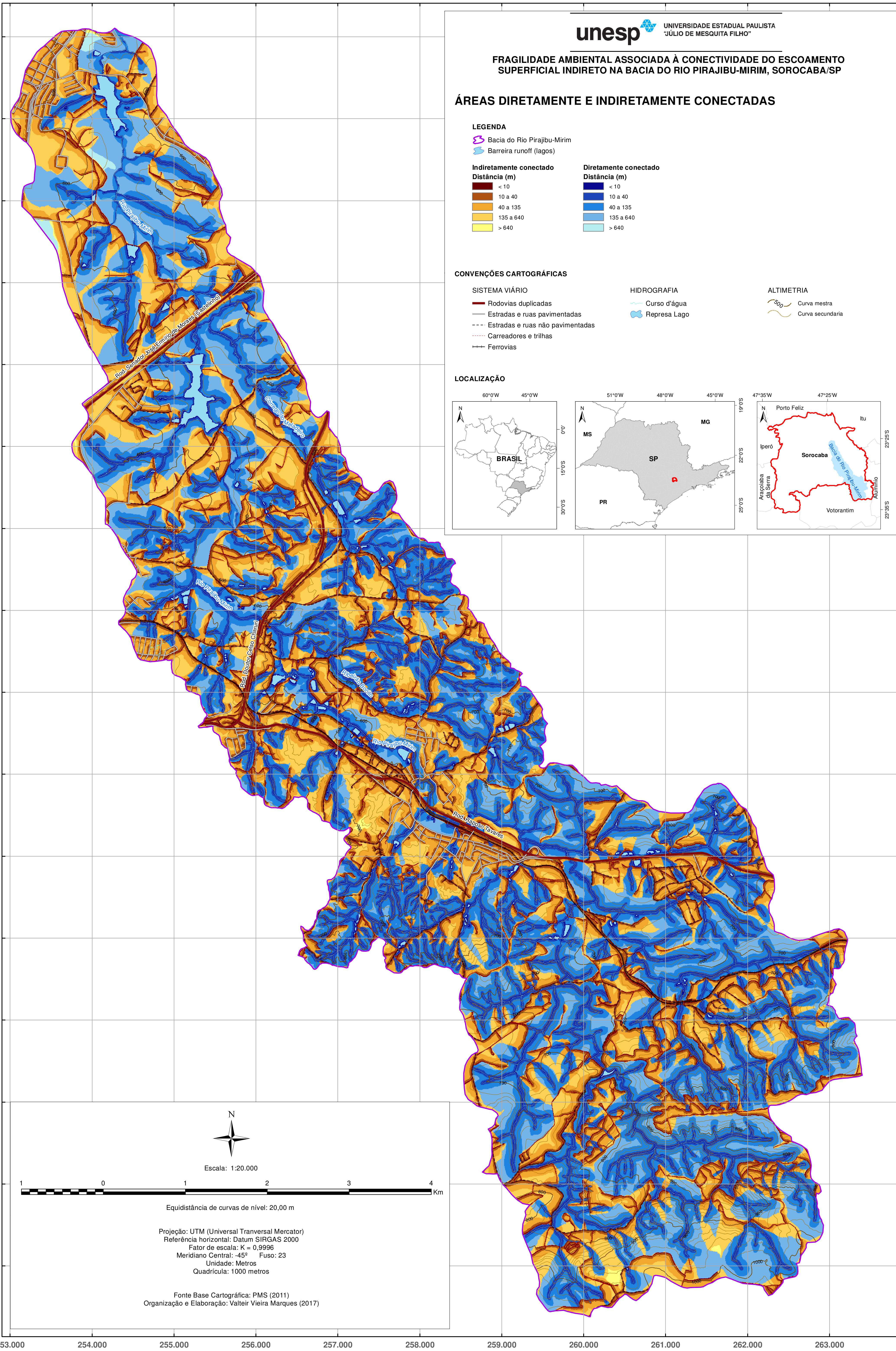


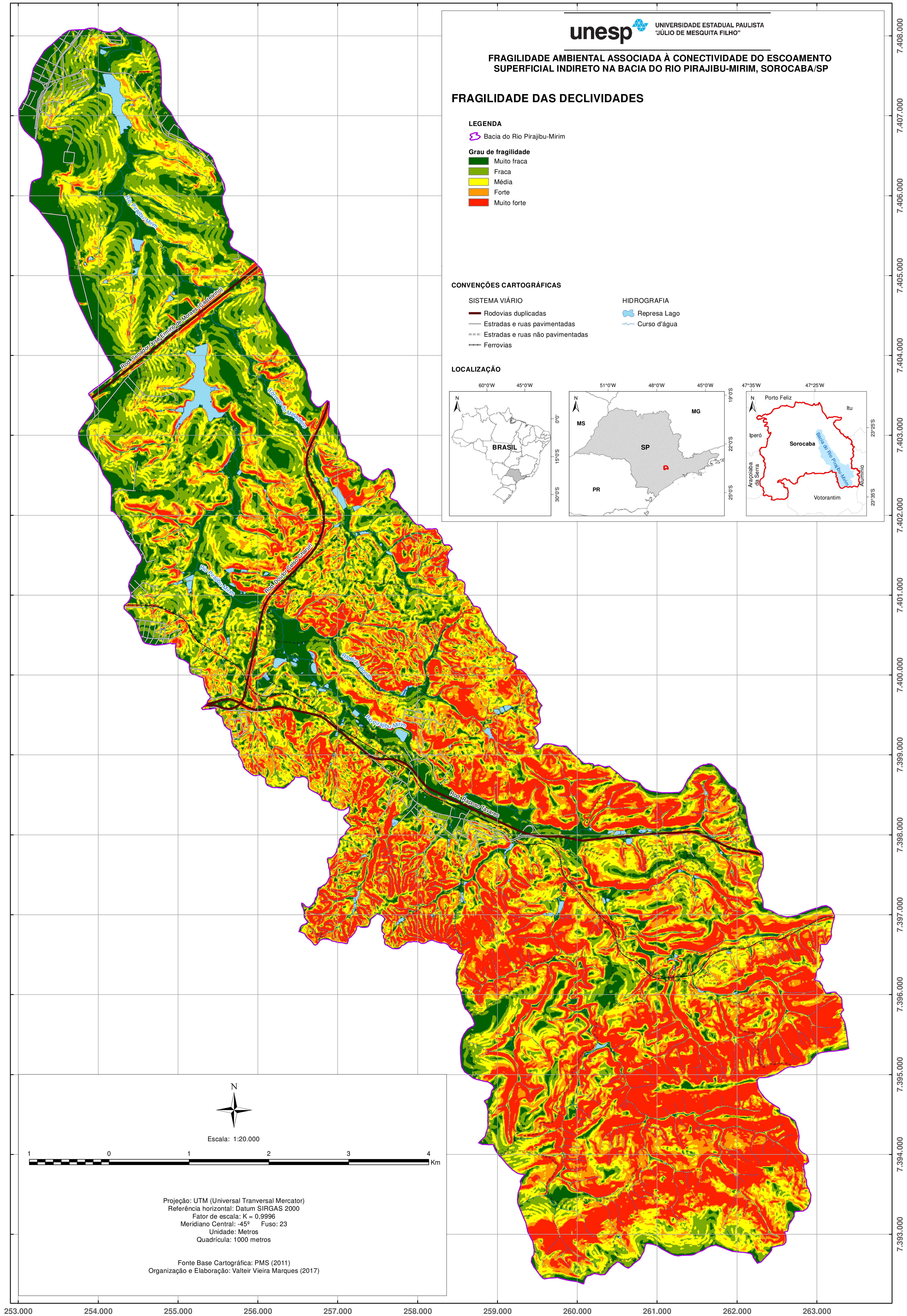
Projeção: UTM (Universal Transversal Mercator)
Referência horizontal: Datum SIRGAS 2000
Fator de escala: K = 0,9996
Meridiano Central: -45° Fuso: 23
Unidade: Metros
Quadrícula: 1000 metros

Fonte Base Cartográfica: PMS (2011)
Fonte: IPT (2013)
Organização e Elaboração: Valteir Vieira Marques (2017)









FRAGILIDADE AMBIENTAL ASSOCIADA À CONECTIVIDADE DO ESCOAMENTO
SUPERFICIAL INDIRETO NA BACIA DO RIO PIRAJIBU-MIRIM, SOROCABA/SP

FRAGILIDADE DOS SOLOS

LEGENDA

 Bacia do Rio Pirajibu-Mirim

Grau de fragilidade

 Média

 Forte

 Muito forte

CONVENÇÕES CARTOGRÁFICAS

SISTEMA VIÁRIO

 Rodovias duplicadas

 Estradas e ruas pavimentadas

 Estradas e ruas não pavimentadas

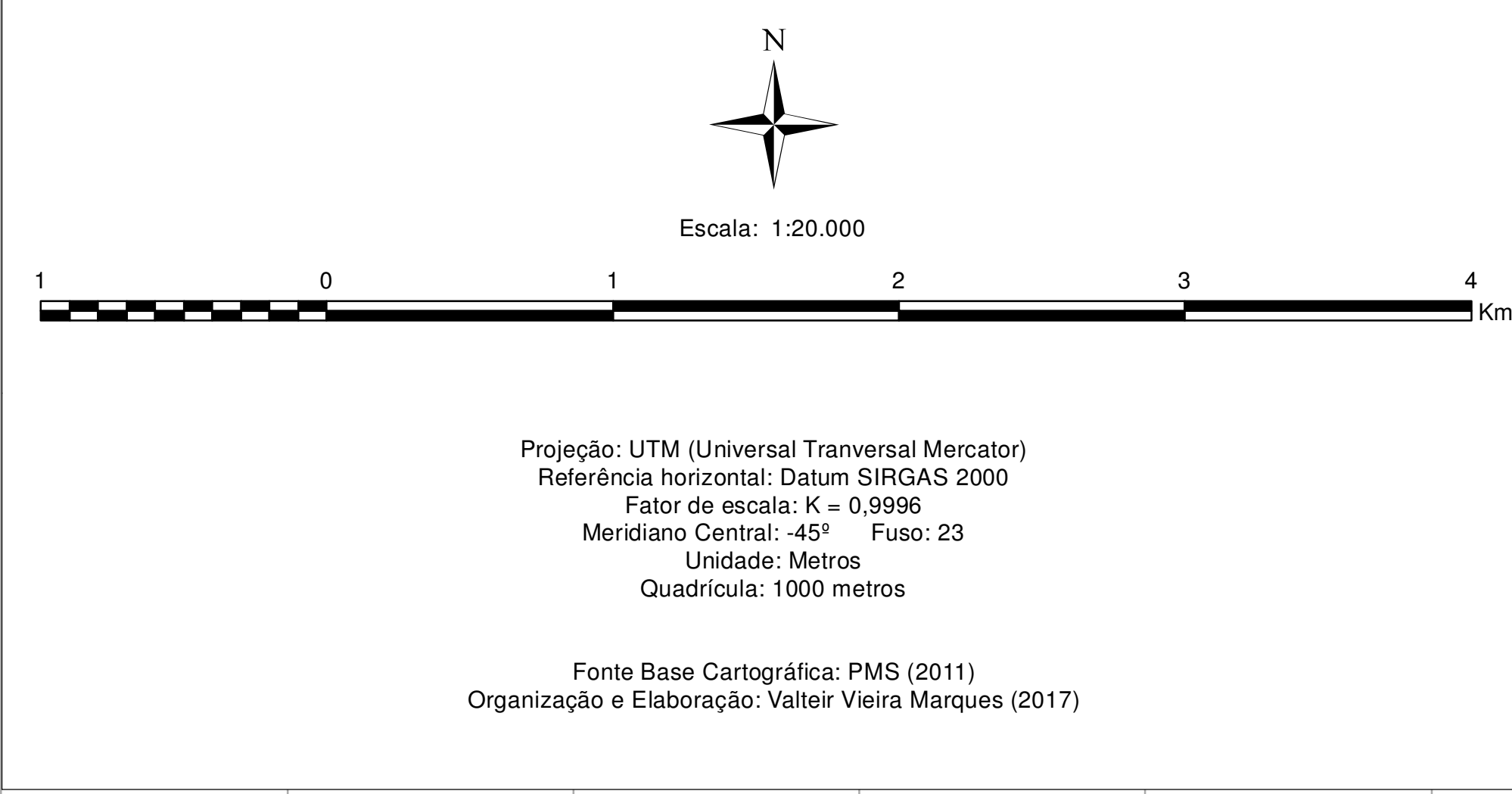
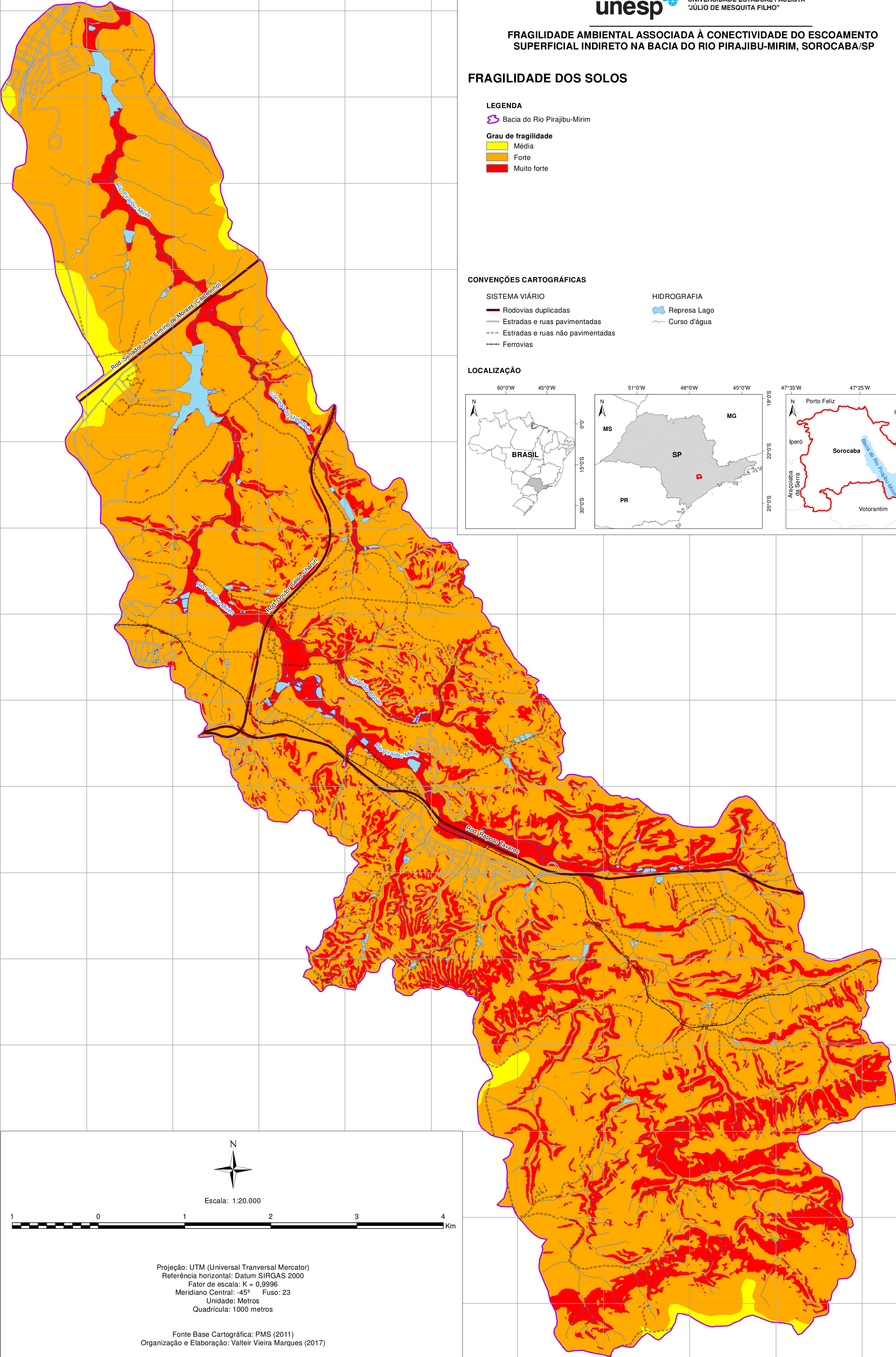
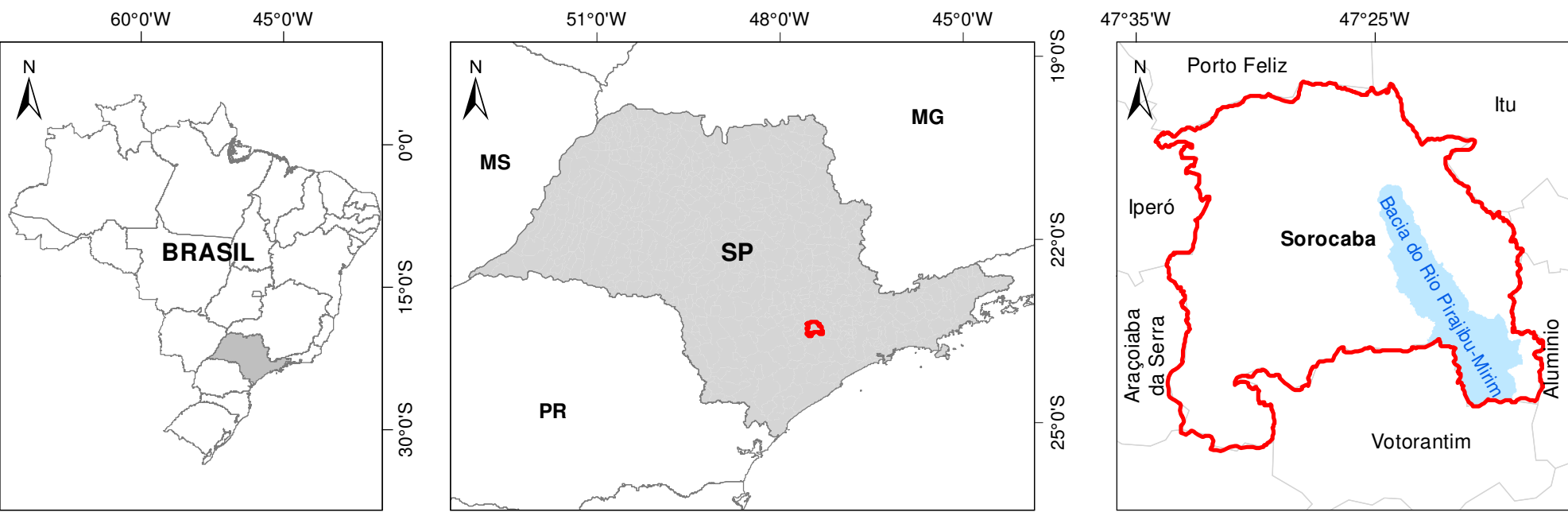
 Ferrovias

HIDROGRAFIA

 Represa Lago

 Curso d'água

LOCALIZAÇÃO



FRAGILIDADE AMBIENTAL ASSOCIADA À CONECTIVIDADE DO ESCOAMENTO
SUPERFICIAL INDIRETO NA BACIA DO RIO PIRAJIBU-MIRIM, SOROCABA/SP

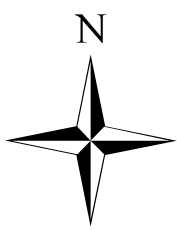
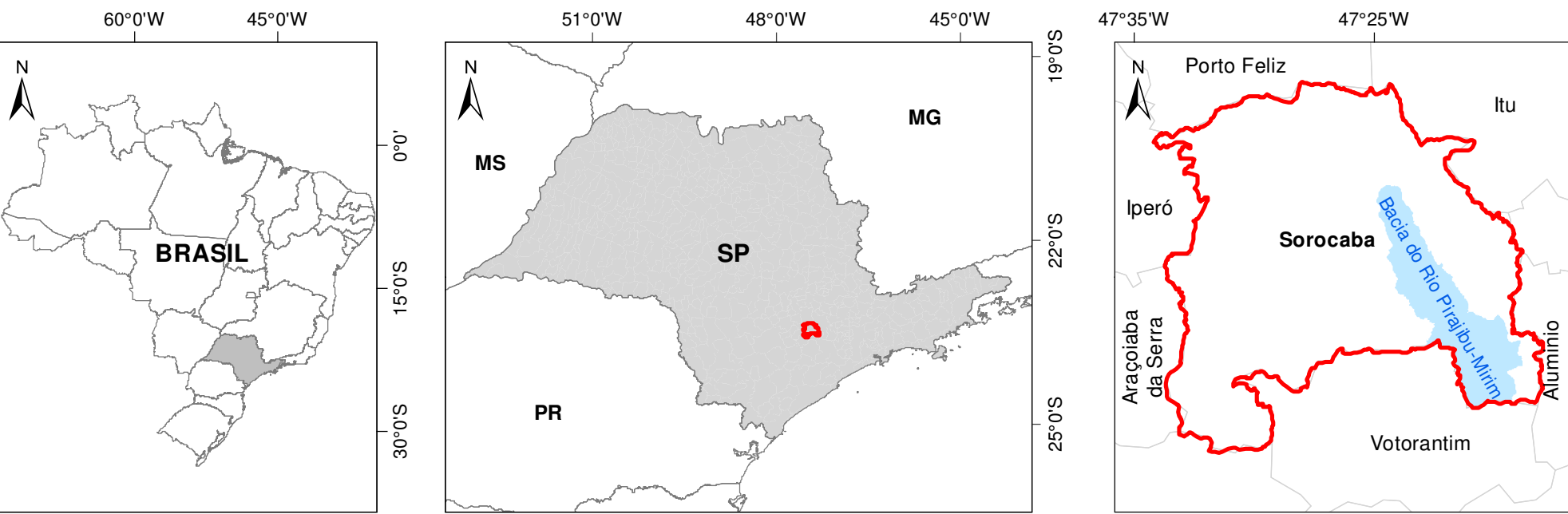
FRAGILIDADE POTENCIAL

- LEGENDA**
-  Bacia do Rio Pirajibu-Mirim
- Grau de fragilidade**
-  Muito fraca
 -  Fraca
 -  Média
 -  Forte
 -  Muito forte

CONVENÇÕES CARTOGRÁFICAS

- SISTEMA VIÁRIO**
-  Rodovias duplicadas
 -  Estradas e ruas pavimentadas
 -  Estradas e ruas não pavimentadas
 -  Ferrovias
- HIDROGRAFIA**
-  Represa Lago
 -  Curso d'água

LOCALIZAÇÃO

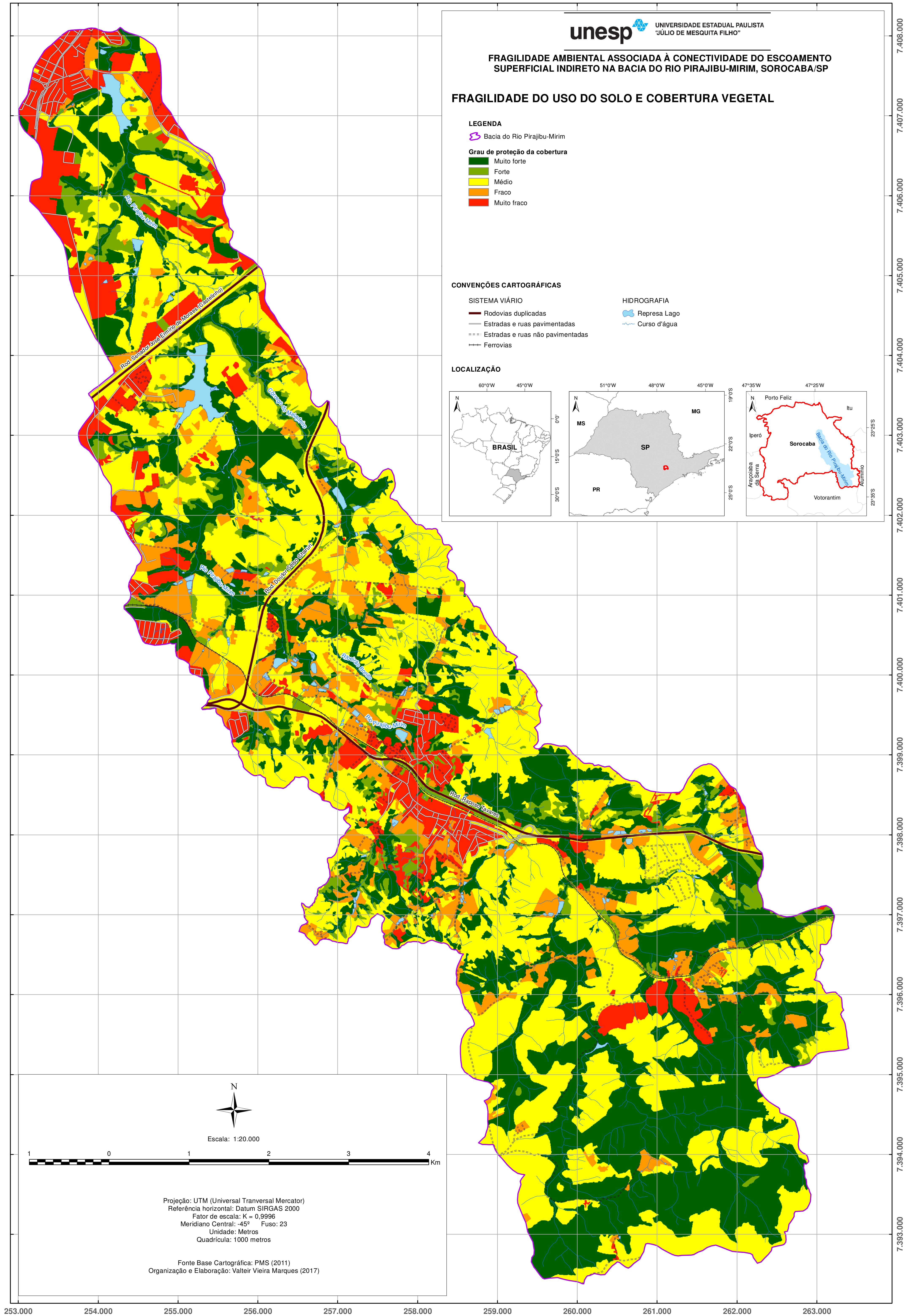


Escala: 1:20.000



Projeção: UTM (Universal Transversal Mercator)
Referência horizontal: Datum SIRGAS 2000
Fator de escala: K = 0,9996
Meridiano Central: -45° Fuso: 23
Unidade: Metros
Quadrícula: 1000 metros

Fonte Base Cartográfica: PMS (2011)
Organização e Elaboração: Valteir Vieira Marques (2017)



FRAGILIDADE AMBIENTAL ASSOCIADA À CONECTIVIDADE DO ESCOAMENTO SUPERFICIAL INDIRETO NA BACIA DO RIO PIRAJIBU-MIRIM, SOROCABA/SP

FRAGILIDADE EMERGENTE

LEGENDA

 Bacia do Rio Pirajibu-Mirim

Grau de fragilidade

-  Muito fraca
-  Fraca
-  Média
-  Forte
-  Muito forte

CONVENÇÕES CARTOGRÁFICAS

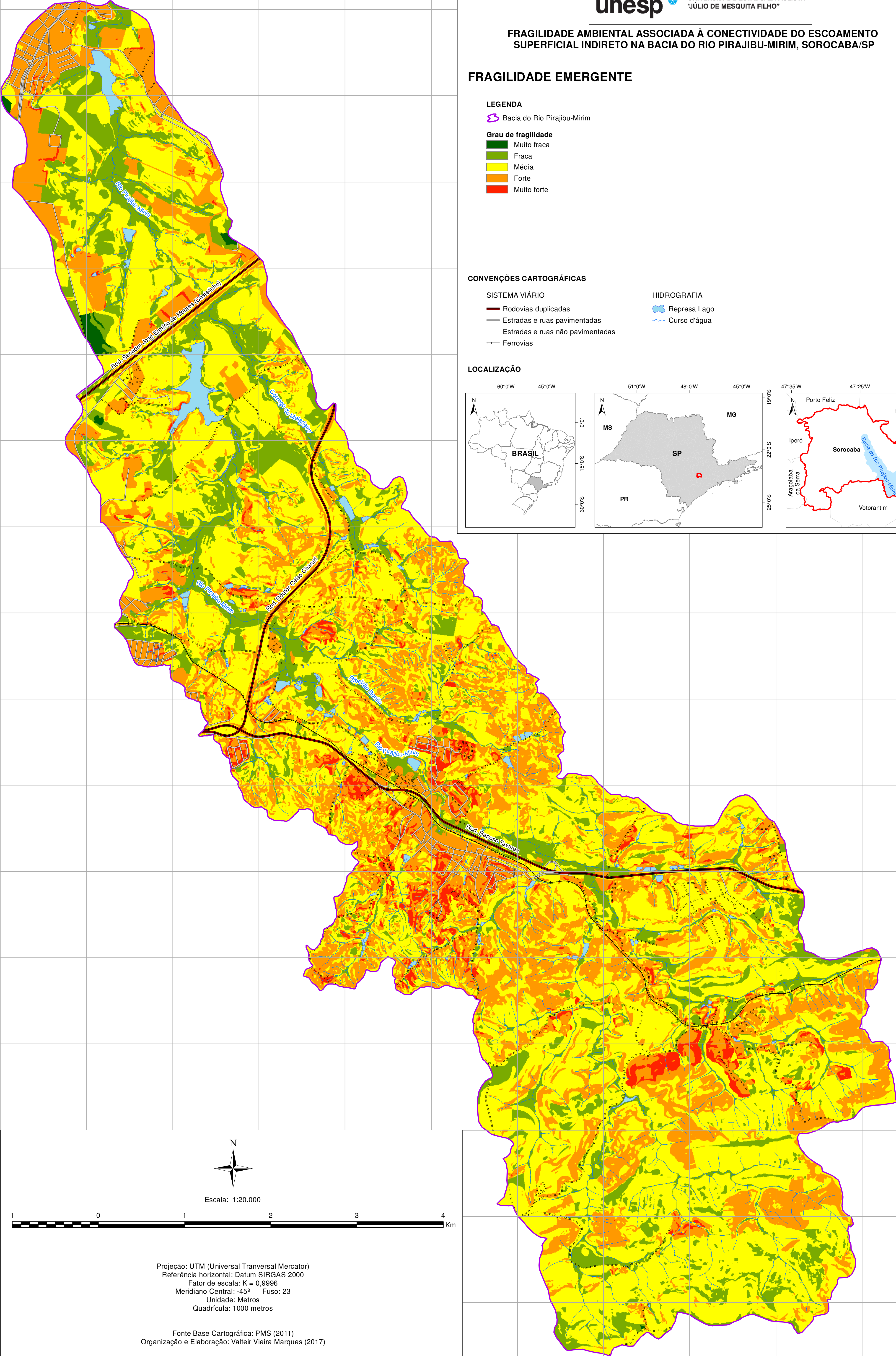
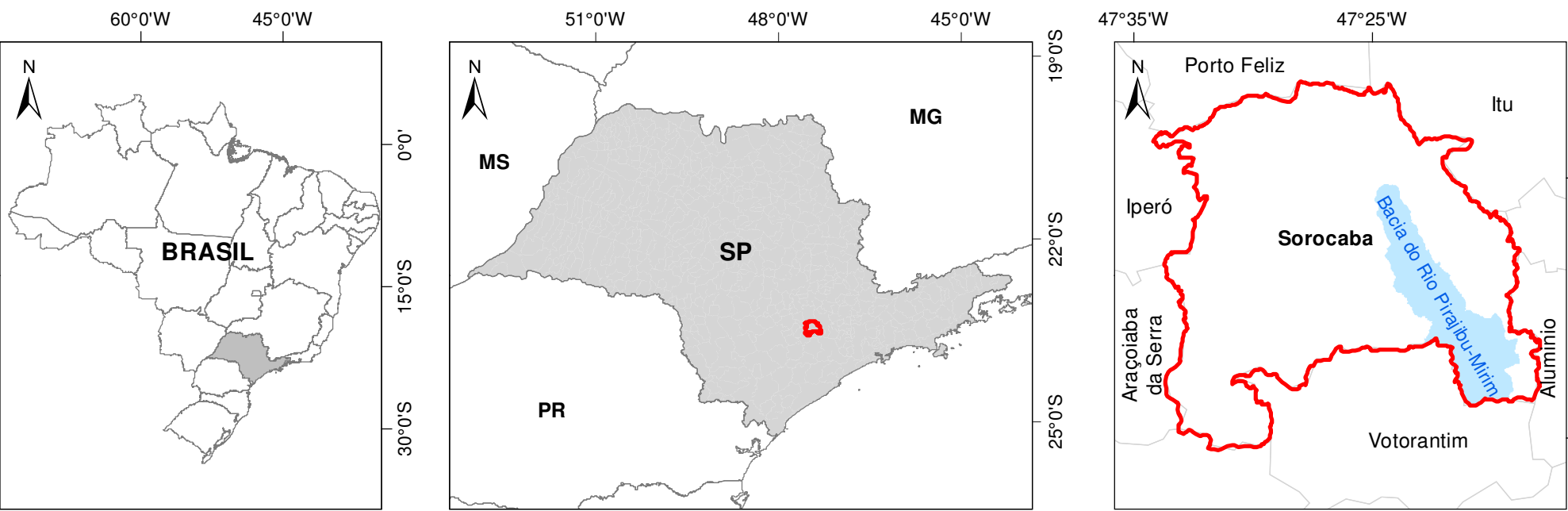
SISTEMA VIÁRIO

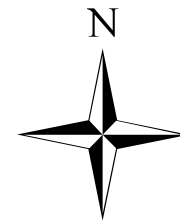
-  Rodovias duplicadas
-  Estradas e ruas pavimentadas
-  Estradas e ruas não pavimentadas
-  Ferrovias

HIDROGRAFIA

-  Represa Lago
-  Curso d'água

LOCALIZAÇÃO



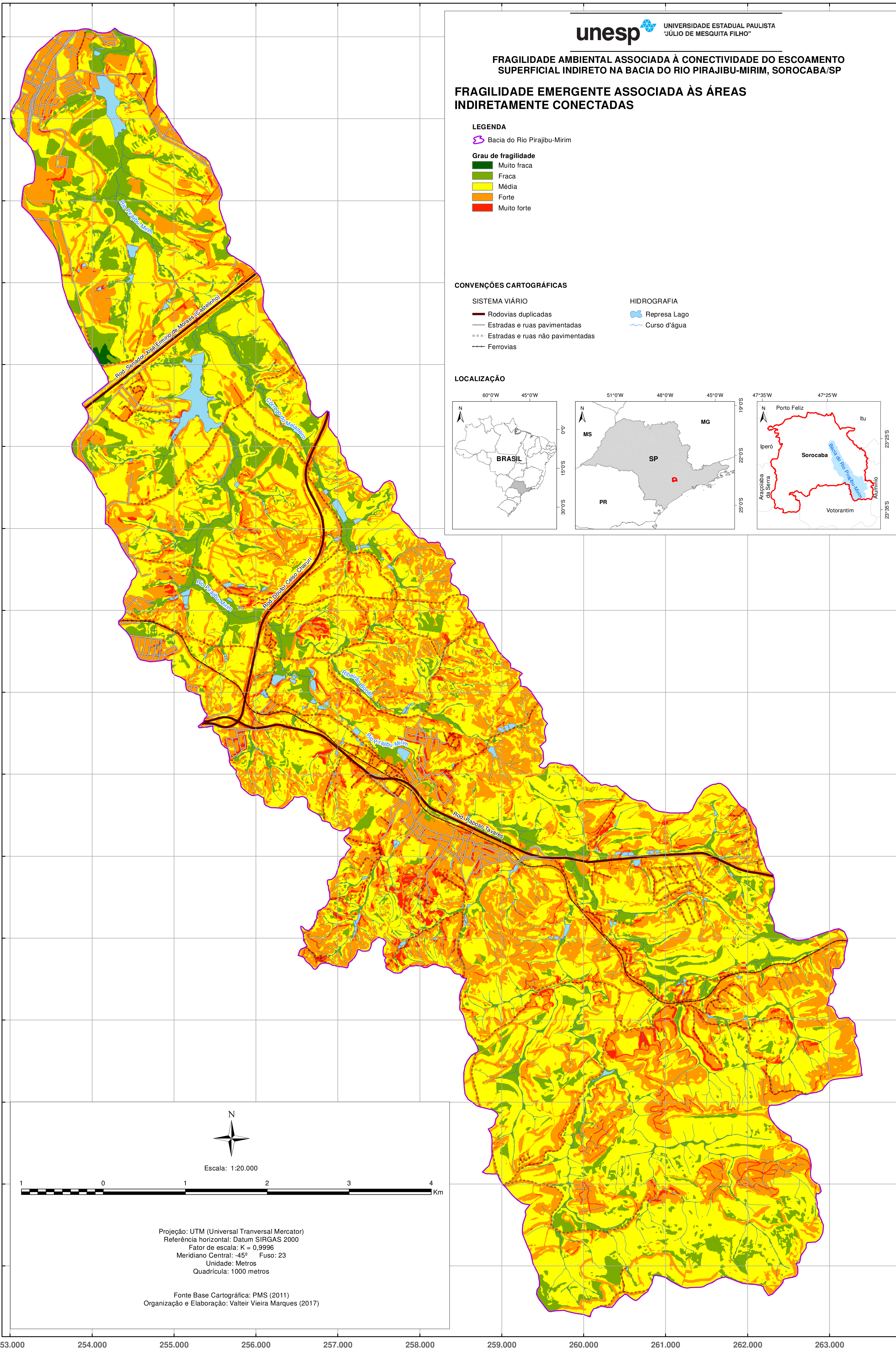


Escala: 1:20.000



Projeção: UTM (Universal Transversal Mercator)
Referência horizontal: Datum SIRGAS 2000
Fator de escala: K = 0,9996
Meridiano Central: -45° Fuso: 23
Unidade: Metros
Quadrícula: 1000 metros

Fonte Base Cartográfica: PMS (2011)
Organização e Elaboração: Valteir Vieira Marques (2017)



FRAGILIDADE AMBIENTAL ASSOCIADA À CONECTIVIDADE DO ESCOAMENTO SUPERFICIAL INDIRETO NA BACIA DO RIO PIRAJIBU-MIRIM, SOROCABA/SP

FRAGILIDADE EMERGENTE ASSOCIADA ÀS ÁREAS INDIRETAMENTE CONECTADAS

LEGENDA

Bacia do Rio Pirajibu-Mirim

Grau de fragilidade

- Muito fraca
- Fraca
- Média
- Forte
- Muito forte

CONVENÇÕES CARTOGRÁFICAS

SISTEMA VIÁRIO

- Rodovias duplicadas
- Estradas e ruas pavimentadas
- Estradas e ruas não pavimentadas
- Ferrovias

HIDROGRAFIA

- Represa Lago
- Curso d'água

LOCALIZAÇÃO

60°0'W 45°0'W

30°0'S 0°0' 15°0'S

BRASIL

51°0'W 48°0'W 45°0'W

19°0'S 22°0'S 25°0'S

MS MG SP PR

47°35'W 47°25'W

23°35'S 23°25'S

Porto Feliz Itu Votorantim Almirante

Sorocaba

Bacia do Rio Pirajibu-Mirim

N

Escala: 1:20.000

1 0 1 2 3 4 Km

Projeção: UTM (Universal Transversal Mercator)
Referência horizontal: Datum SIRGAS 2000
Fator de escala: K = 0,9996
Meridiano Central: -45° Fuso: 23
Unidade: Metros
Quadrícula: 1000 metros

Fonte Base Cartográfica: PMS (2011)
Organização e Elaboração: Valteir Vieira Marques (2017)