

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

“Júlio de Mesquita Filho”

Instituto de Geociências e Ciências

Exatas Campus de Rio Claro

LUIZ HENRIQUE PEREIRA

ANÁLISE DE SENSIBILIDADE E PROPAGAÇÃO DE INCERTEZA
EM MODELOS HIDROSSEDIMENTOLÓGICOS: CONTRIBUIÇÃO
À MODELAGEM DE BACIAS HIDROGRÁFICAS

Tese de Doutorado apresentada ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas do Campus de Rio Claro, da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Geografia.

Orientador: Prof. Titular Sergio dos Anjos Ferreira Pinto

Rio Claro – SP
2016

LUIZ HENRIQUE PEREIRA

ANÁLISE DE SENSIBILIDADE E PROPAGAÇÃO DE INCERTEZA
EM MODELOS HIDROSSEDIMENTOLÓGICOS: CONTRIBUIÇÃO
À MODELAGEM DE BACIAS HIDROGRÁFICAS

Tese de Doutorado apresentada ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas do Campus de Rio Claro, da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Geografia.

Comissão Examinadora

Prof. Dr. Sergio dos Anjos Ferreira Pinto

IGCE/UNESP, Rio Claro - SP

Prof. Dr. Antônio Marcos Machado de Oliveira

IG/UFU, Uberlândia-MG

Prof. Dr. Rubens Hardt

Instituto do Carste, Belo Horizonte - MG.

Prof. Dr. Gilberto José Garcia

IGCE/UNESP, Rio Claro - SP

Prof. Dr. Rodrigo Braga Moruzzi

IGCE/UNESP, Rio Claro - SP

Resultado: Aprovado

Rio Claro, SP. 28 de outubro de 2016

Dedico àqueles que se desafiam a transcender as páginas dos trabalhos científicos, oferecendo suas convicções momentâneas à prova da vida real.

AGRADECIMENTO

Agradeço à minha família, que compartilhou o desafio da pesquisa ao longo destes anos, à minha esposa Camila, que me ensina todos os dias a ser uma pessoa melhor.

Ao Prof. e amigo Sergio, pelo companheirismo e incentivo ao longo de 13 anos de trabalho conjunto, aos meus amigos que contribuíram para o desenvolvimento da pesquisa, em especial Eder Spatti, um exemplo de dedicação e força de vontade, Edvânia Correa, Isabel Moraes que dedicaram anos com afinco em suas pesquisas, dando exemplo de seriedade profissional.

À FAPESP, pelo apoio ao desenvolvimento do projeto, referente ao processo nº
2013/13885-0.

RESUMO

Atenuar incertezas nos resultados de modelos dinâmicos que estimam a produção de sedimento na vertente e o transporte do material no canal fluvial torna-se fundamental quando se considera a premência de políticas territoriais em minimizar o risco de sub ou super exploração dos recursos naturais, bem como indicar a disponibilidade de água em bacias hidrográficas. A aplicação de modelos de simulação de processos ambientais tem sido amplamente favorecida pelo avanço das geotecnologias, em especial dos Sistemas de Informações Geográficas, que viabilizam a extração, tratamento, análise e integração de dados geoespaciais. No entanto, observa-se que pouca atenção tem sido dada à análise e avaliação dos fatores responsáveis pela discrepância entre estimativas e observações. Diante o exposto, este trabalho apresentou como principal objetivo caracterizar a variabilidade espacial da incerteza propagada pela aplicação dos modelos hidrossedimentológicos EUPS, MEUPS e REUPS, e indicar sua correlação espacial com características geomorfométricas da área em análise. As atividades foram desenvolvidas com o escopo teórico da modelagem de sistemas ambientais, e baseadas em técnicas de geoprocessamento e sensoriamento remoto. Os resultados obtidos demonstram que a sensibilidade dos parâmetros é específica para cada tipo de bacia modelada, sendo os Fatores C, P os mais sensíveis para bacia do Monjolo Grande, e os Fatores C e LS os mais sensíveis para a bacia do ribeirão Jacutinga. As incertezas possuem maior expressividade nas áreas predominantemente de solos arenosos, e há correlação significativa do grau de incerteza dos resultados dos modelos com as características geomorfológicas, sobretudo em áreas de vertentes côncavas.

Palavras Chave: Modelagem geoespacial. Geomorfometria. Modelos preditivos. Análise de Sensibilidade. Geotecnologias.

ABSTRACT

Lessening the uncertainties in the results from geospatial dynamic models, considering those that estimate the sediment production in the hillslope and the transportation of sediments over the river-channel, becomes essential when considering the current need to gather trustworthy quantitative information. In this sense, the contribution of hydro-sedimentological modeling is a significant part on the landscape planning phase, effectively composing the process of agricultural land management. The application of geospatial modeling has been widely benefited by the improvement on geotechnologies. However, its application has been applied indiscriminately from the procedures and methods for gathering entrance data. Differences in spatial scale of analysis, the characteristics of the geographical area of interest and the evaluation of the trustworthiness of the results are not taken into account. With these issues exposed this paper aimed to characterize the spatial variables and the uncertainties programed by the applications of the hydro-sedimentological models USLE, MUSLE e RUSLE. Indicating its spatial correlation with the geomorphometry characteristics of the analyzed areas it was possible to propose an objective criteria for the selection of the models based on the area's geomorphological characteristics searching to minimize the statistical uncertainties thus offering measurements of trustworthiness in the final results. The activities were developed with the theoretical scope of environmental systems modeling and based on geoprocessing and remote sensing techniques. Results gathered show that the sensitivity of the parameters is specific to each type of watershed that was modeled, C and P factors being the most sensitives for Monjolo Grande river basin (sandy soil), and C and LS factors were the most sensitives for Jacutinga river basin (clay soil). The uncertainties are more prominent in the areas where the soil is predominantly sandy. There was a significant correlation between the level of uncertainty and the results from the models with geomorphological characteristic, especially in concave hillslope areas.

Key-Word: Geospatial modeling. Geomorphometry. Predictive models. Sensitivity Analysis. Geotechnology.

RESUMO	v
ABSTRACT.....	vi
1. <i>MODELAGEM GEOESPACIAL DINÂMICA: A DISTÂNCIA ENTRE O PRAGMATISMO DO GEOPROCESSAMENTO E A EFETIVA APLICAÇÃO DOS RESULTADOS</i>	11
1.1. Modelagem hidrossedimentológica: Importância em conhecer as incertezas nos resultados de modelos preditivos de perda de água e solo	13
1.2. Hipóteses e objetivos da pesquisa.....	14
2. <i>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</i>	16
2.1. Modelagem de sistemas ambientais enquanto abordagem metodológica	16
2.2. Escala espacial de análise: Estratégias para aproximação entre simulação e realidade.....	18
2.3. Análise de incerteza e sensibilidade na aplicação de modelagem geoespacial	20
2.4. Modelos hidrossedimentológicos para a avaliação de produção e transporte de sedimentos: EUPS, MEUPS, REUPS	24
2.5. Dificuldade de comparação dos resultados entre trabalhos que abordam a modelagem hidrossedimentológica.....	29
3. <i>CARACTERIZAÇÃO DAS ÁREAS DE ESTUDO, E A RELEVÂNCIA NO CONTEXTO GEOMORFOLÓGICO REGIONAL</i>	32
3.1. Representatividade geomorfológica.....	33
3.2. Quadro Geológico-Geomorfológico regional.....	34
3.3. Unidades litoestratigráficas	35
3.4. Elementos geomorfológicos e estruturais da paisagem	39
3.5. Unidades pedológicas.....	40
3.6. Caracterização de elementos do clima:.....	41
3.7. Uso da terra e cobertura vegetal natural	42
4. <i>ABORDAGEM METODOLÓGICA</i>	44
4.1. Estruturação e implementação do banco de dados geográficos (BDG): Eliminação de incertezas posicional.....	46
4.2. Extração dos parâmetros da EUPS, MEUPS e RUSLE	54
4.3. Simulação de cenários: escala de análise, volume de chuva e modelos hidrossedimentológicos.....	67
4.4. Análise de sensibilidade e incerteza:	68
5. <i>DISCUSSÃO DOS RESULTADOS</i>.....	70
5.1. Retificação Cartográfica: precisão espacial para estruturação do Banco de Dados Geográficos.	70
5.2. Modelagem digital do terreno e refinamento pedológico	71
5.3. Variabilidade espacial da perda de solo, conforme aplicação dos modelos EUPS, MEUPS, REUPS	75

5.4. Análise de sensibilidade: As perturbações promovidas pelo conjunto de dados, métodos de integração e escala espacial de análise	80
5.5. Variabilidade espacial das incertezas.....	83
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	91
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	96

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Variabilidade da incerteza no resultado final da aplicação de modelos: Função da sensibilidade e Incerteza dos dados de entrada.	23
Figura 2: Espacialização dos artigos científicos referentes à modelagem de perda de solo e água, disponíveis na base de dados SCIELO, e publicados entre anos de 1990 e 2015. 141 trabalhos analisados: 93 Qualitativos, 48 Quantitativos; destes últimos 17 com Validação de dados em campo.	30
Figura 3: Localização das áreas de Estudo: Bacias Hidrográficas do Rio Monjolo Grande e Jacutinga.....	32
Figura 4: Coluna Litoestratigráfica da bacia do Paraná.	36
Figura 5: Províncias Geomorfológicas do estado de São Paulo segundo IPT (1981). Fonte: Modificado de Perinotto (2008).	39
Figura 6: Gráfico da distribuição anual das chuvas, com indicação de início e fim mais provável das estações. Média Mensal de chuvas para o município de Ipeúna e Rio Claro, no período de 1970 a 2004. Posto DAEE: prefixo D4-074.....	42
Figura 7: Procedimento de armazenamento de dados obtidos em campo e dados modelados por meio de geoprocessamento.....	45
Figura 8: Relação dos desenvolvimentos dos trabalhos de campo executados nas bacias hidrográficas do córrego Monjolo Grande e Jacutinga - SP.	46
Figura 9: Planejamento e execução do levantamento de dados GPS e correção geométrica dos pontos.	49
Figura 10: locais selecionados para coleta de Pontos de Controle.....	51
Figura 11: Esboço Fotopedológico das bacias do ribeirão Jacutinga e Monjolo Grande. Definição das topossequências e pontos de tradagem em áreas representativas.....	54
Figura 12: Curva IDF obtida para Rio Claro-SP.....	65
Figura 13: Simulação de cenários. Variação das escalas de análise (1:10.000 e 1:50.000) e volumes de chuva.	67
Figura 14: Organização dos conjuntos de dados para condução das simulações de cenários e análises de sensibilidade.....	67
Figura 15: Amostragem regular de pontos em ambiente SIG para extração de valores dos parâmetros contemplados nos modelos, e estimativas finais.	68
Figura 16: Regressão Geograficamente Ponderada como estratégia da determinação das incertezas nas estimativas dos modelos	69
Figura 17: A) Mapa hipsométrico. B) Classes de declividade	73
Figura 18 A) Classes pedológicas; B) Mapa de Uso da terra e cobertura vegetal	74
Figura 19: Comparação de valores totais de perda de solo conforme modelos e cenários de chuva	76
Figura 20: Variação dos totais de perda em função das diferentes escalas de análise. Resolução de 2 e 10m, equivalente as escalas de 1:10.000 e 1.50000, respectivamente.....	77
Figura 21: Espacialização das perdas de solo para os modelos EUPS.....	78
Figura 22: Espacialização das perdas de solo para os modelos REUPS	79
Figura 23: Espacialização das perdas de solo para os modelos MEUPS	79
Figura 24: Sensibilidade dos parâmetros, considerando a aplicação dos modelos EUPS, MEUPS e REUPS. *JC – bacia hidrográfica do Jacutinga; predominantemente argilosa *MG – bacia hidrográfica do Monjolo Grande, predominantemente arenosa.	80

Figura 25: Variação de sensibilidade dos parâmetros submetidos à diferentes resoluções de 2 e 10 metros (escalas de análise). Áreas da bacia do Monjolo Grande: a) REUPS – 02 e 10m; b) EUPS 02 e 10m c) MEUPS de 02 e 10m. bacia do Jacutinga: d) REUPS – 02 e 10m; e) EUPS 02 e 10m f) MEUPS de 02 e 10m.	82
Figura 26: Avaliação do comportamento dos parâmetros sob diferentes valores de erosividade da Chuva: a) EUPS b) REUPS, e de volume de chuva c) MEUPS – para os valores de média anual; média chuva, e média seca.	83
Figura 27: Avaliação de regressão geoespacial para os modelos simulados. A) EUPS; B) REUPS, C) MEUPS.	84
Figura 28: Gráfico dos Resíduos Vs. Valores Ajustados para os modelos EUPS, aplicados às bacias hidrográficas do Monjolo Grande e Jacutinga.	85
Figura 29: Gráfico dos Resíduos Vs. Valores Ajustados para os modelos REUPS, aplicados às bacias hidrográficas do Monjolo Grande e Jacutinga.	85
Figura 30: Gráfico dos Resíduos Vs. Valores Ajustados para os modelos MEUPS, aplicados às bacias hidrográficas do Monjolo Grande e Jacutinga.	86
Figura 31: Espacialização do grau de incerteza, resultante da aplicação do modelo EUPS.....	86
Figura 32: Espacialização do grau de incerteza, resultante da aplicação do modelo MEUPS. ...	87
Figura 33: Espacialização do grau de incerteza, resultante da aplicação do modelo REUPS. ...	87
Figura 34: Reunião dos pontos amostrais de maior incerteza, e correlação com atributos geomorfométricos por meio de consultas espaciais realizadas em banco de dados.	88
Figura 35: Grupos de variáveis geomorfológica, considerando informações de Elevação, e derivadas locais de 1º ordem, como declividade, Direção e Curvatura Vertical.....	89
Figura 36: Pontos de incerteza associados às classes de formas de relevo. Curvaturas Horizontal (Convergente, planar e divergente) e Vertical (côncava, retilínea e convexa), conforme metodologia proposta por Valeriano (2008).	90
Figura 37 Ordenamento da influência que cada parâmetro envolvido nos modelos EUPS, REUPS, e MEUPS exercem sobre as estimativas finais de sua aplicação. Hierarquização considerando as características de uma bacia predominantemente argilosa (bacia hidrográfica do ribeirão Jacutinga).	92
Figura 38: Ordenamento da influência que cada parâmetro envolvido nos modelos EUPS, REUPS, e MEUPS exercem sobre as estimativas finais de sua aplicação. Hierarquização considerando as características de uma bacia predominantemente arenosa (bacia hidrográfica do ribeirão Monjolo Grande).....	92
Figura 39: Comparação do comportamento geral da sensibilidade dos parâmetros, em função das características das áreas modeladas.....	93
Figura 40: Confiabilidade das estimativas dos modelos, representativa do grau de incerteza propagada aos resultados finais de sua aplicação, em função das características geomorfométricas das áreas de estudo.	93
Figura 41 Esquema de desenvolvimento do processo de modelagem ambiental. Especial atenção à saída de dados quantitativos. Espera-se que as incertezas se acumulem à cada etapa concluída.	95

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Termos contemplados nos modelos EUPS, REUPS, MEUPS, WEPP e SWAT	26
Tabela 2: Comparação entre os parâmetros envolvidos nos modelos de perda de solo EUPS e MEUPS e REUPS	27
Tabela 3: Comparação de elementos físicos, geomorfométricos e antrópicos entre as bacias hidrográficas.....	34
Tabela 4: Áreas relativas das formações geológicas de composição arenosa e argilosa na bacia do rio Corumbataí.	36
Tabela 5: Cartas topográficas utilizadas para vetorização das áreas.....	47
Tabela 6: Configurações e ajustes GPS.....	49
Tabela 7: Base de dados utilizada para o pós-processamento dos dados	52

Tabela 8: Mapas temáticos envolvidos na aquisição da variável contribuição de área.....	57
Tabela 9: Determinação do coeficiente angular (m)	57
Tabela 10: procedimentos técnicos adotados para detalhamento do mapa pedológico	58
Tabela 11: Valores para tolerância de perda (T) e erodibilidade (K) para os solos da bacia hidrográfica do ribeirão Monjolo Grande.	59
Tabela 12: Especificações das classes de uso da terra e cobertura vegetal	60
Tabela 13: definição dos valores do fator C para cada classe temática.....	61
Tabela 14: Definição dos intervalos de classe para os dados de declividade segundo proposta de EMBRAPA (1999) e Ramalho Filho e Beek (1995).....	62
Tabela 15: Valores de Curva Número que expressam a relação entre Solo/Uso e cobertura da Terra/manejo e condições de infiltração da água no solo.	64
Tabela 16: relação de mapas temáticos elaborados para a obtenção do mapa de escoamento superficial (Q)	65
Tabela 17: Síntese dos pontos de controle coletados em campo: Distribuição da precisão estimada para as posições corrigidas obtidas nas atividades de campo realizado nos dias	70
Tabela 18: Classes de solos e respectiva ocorrência na bacia hidrográfica do córrego Monjolo Grande.....	71
Tabela 19: Classes de solos e respectiva ocorrência na bacia hidrográfica do ribeirão Jacutinga	72
Tabela 20: Hierarquização da sensibilidade dos parâmetros dos modelos, aos conjunto de dados (arenoso - Monjolo Grande; argiloso - Jacutinga).....	81

1. MODELAGEM GEOESPACIAL DINÂMICA: A DISTÂNCIA ENTRE O PRAGMATISMO DO GEOPROCESSAMENTO E A EFETIVA APLICAÇÃO DOS RESULTADOS

Na área das Geociências, observa-se a tendência do atual paradigma da sustentabilidade em direcionar o avanço científico e tecnológico ao entendimento e monitoramento do meio físico terrestre, a fim de oferecer à sociedade condições para realizar intervenções ambientalmente sustentáveis no tempo e no espaço. Assim, procedimentos metodológicos, principalmente aqueles de orientação sistêmica, são desenvolvidos e aprimorados com o objetivo de modelar, analisar, e compreender os fenômenos que se processam no sistema terrestre, bem como descrever a interação e funcionalidade existente entre seus elementos componentes.

Em parte, para atender a estas necessidades de estudo, pode-se evidenciar o aperfeiçoamento das geotecnologias, mais especificamente, das técnicas de sensoriamento remoto e geoprocessamento no que concerne à aquisição, tratamento, análise e integração de dados geoespaciais. Tais tecnologias firmaram-se como ferramentas¹ fundamentais para desenvolvimento de estudos de cunho ambiental, e pertinentes em qualquer escala espacial de análise, seja ela local, regional ou global.

Sem discutir méritos políticos e éticos que permeiam o incentivo ao desenvolvimento técnico-científico, é relevante ressaltar que um de seus objetivos é fornecer meios e respostas às demandas sociais, o que Hey et, al. (2011) sugere como “o desenvolvimento da ciência por necessidade”. Contudo, apesar do vínculo necessário entre a produção do conhecimento científico e sociedade, nem sempre essa é plenamente atendida e beneficiada pelos resultados daquela. A velocidade com que as atuais tecnologias são absorvidas pelos trabalhos científicos, muitas vezes não é acompanhada por adequações epistemológicas e conceituais capazes de embasar corretamente os critérios metodológicos adotados. O resultado desta inadequação pode ser observado na dificuldade em implementar propostas eminentemente acadêmicas na resolução de problemas cotidianos, mesmo que estas propostas sejam de forte caráter pragmático, como normalmente são nos trabalhos que abordam o uso do geoprocessamento.

1 O Sensoriamento Remoto e o Geoprocessamento podem ser considerados uma área particular do conhecimento. Porém, nos estudos em que o objetivo é o monitoramento e o planejamento ambiental, estas ciências são aplicadas como um meio para aquisição e análise, por isso, consideradas aqui como ferramentas conforme Fussel et al. (1986).

Em síntese, a verdadeira motivação para a proposição deste trabalho é o questionamento sobre o distanciamento entre os resultados - quantitativos - de pesquisas obtidos por meio das técnicas de geoprocessamento com seu efetivo uso nas ações de gestão e intervenção territorial. Observa-se a necessidade de realizar uma avaliação crítica aos procedimentos metodológicos adotados no campo das geotecnologias, em que compreender os limites de suas aplicações é mais relevante do que explorar novas potencialidades.

Diante este contexto, propõe-se delimitar como campo de análise neste trabalho o processo de modelagem geoespacial do fenômeno de erosão laminar hídrica dos solos por meio dos modelos Equação Universal de Perdas de Solo (EUPS) e suas versões adaptadas: MEUPS e REUPS, respectivamente, Equação Universal de Perdas de Solo Modificada e Equação Universal de Perdas de Solo Revisada.

O motivo para escolha desses modelos especificamente, justifica-se pela diversidade da aplicabilidade dos resultados à resolução de diversas questões físico-ambientais; à representatividade numérica que assumem no universo das publicações científicas nos temas de perda de solo e água; pela lógica de integração de dados que pode ser conduzida abertamente em ambiente SIG (sem a necessidade de uso de modelo do tipo caixa-preta); e principalmente, todos os dados de entrada podem ser obtidos individualmente por meio de geoprocessamento, permitindo maior compreensão e controle dos dados, e não exigem conexão com banco de dados externos pré-formatados como ocorre em outros modelos, como WEPP - Water Erosion Prediction Project - e o modelo SWAT - Soil and Water Assessment Tool.

Largamente utilizados e publicados com maior intensidade a partir da década de 1990 (favorecidos pela difusão e popularização dos Sistemas de Informações Geográficas) constata-se², contraditoriamente, que estes modelos (EUPS, MEUPS e REUPS) têm sido pouco implementados como insumo nos processos operacionais de manejo das terras, produção agrícola ou estimativa de disponibilidade hídrica de bacias hidrográficas. Esta contradição reforça o questionamento quanto ao verdadeiro potencial pragmático da aplicação dos modelos hidrossedimentológicos no processo de gestão das

² Foram visitadas e consultadas médias e grandes empresas privadas de produção agrícola (Usinas sucroalcooleiras/bioenergia e soja); pequenos e médios fornecedores (produtores) de cana-de-açúcar, Instituições Públicas em nível Federal (Ministério do Meio Ambiente, Agência Nacional das Águas – ANA; Ministério da Agricultura, e Companhia de Desenvolvimento do Vale do rio São Francisco/CODEVASF), Organismos Internacionais (Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura – FAO/ONU), para conhecer os fluxos e processos do planejamento e operações agrícolas a fim de levantar a utilização de modelos de perda de solo e água.

terras, bem como sua capacidade em garantir intervenções precisas no meio físico, com base em seus resultados quantitativos estimados.

Admitindo esta dificuldade, é relevante compreender cientificamente as incertezas inerentes ao processo de modelagem, a fim de julgar se as conclusões das análises podem ser sustentadas.

1.1. Modelagem hidrossedimentológica: Importância em conhecer as incertezas nos resultados de modelos preditivos de perda de água e solo

Conhecer a incerteza nos resultados de modelos matemáticos que estimam a produção de sedimento na vertente, e/ou transporte de material sedimentar no canal fluvial, torna-se fundamental quando se considera a atual necessidade em se obter informações quantitativas confiáveis, de modo que a contribuição da modelagem hidrossedimentológica seja significativa para além da etapa de planejamento das terras, e componha efetivamente o processo de gestão do território agrícola, independente se público ou privado, mas que carecem de indicadores quantitativos precisos, capaz de minimizar o risco de sub ou super exploração dos recursos naturais.

Assim, os modelos hidrossedimentológicos ganham notoriedade diante a relevância do cenário agrícola nacional, onde coexistem paisagens distintas, caracterizadas por agricultura familiar e do agronegócio, mas que se tornam umas quando abordado temas como degradação do manto pedológico e disponibilidade hídrica, uma vez que o processo de erosão dos solos, independente de sua expressividade espacial, condiciona a perda de sua capacidade produtiva, promove a alteração das condições naturais dos recursos hídricos devido ao transporte de sedimentos e insumos agrícolas para os canais fluviais, resultando em processos de assoreamento dos corpos d'água, além dos impactos econômicos indiretos, como volumosos e recorrentes investimentos na tentativa de reparo e recuperação das áreas degradadas.

No entanto, é fundamental questionar se os modelos de produção e transporte de sedimentos estão sendo adequadamente manipulados em ambiente SIG. A - falsa - impressão de facilidade no uso das técnicas de geoprocessamento, em que se observa a aplicação indiscriminada dos mesmos procedimentos e métodos para aquisição dos dados de entrada, sem considerar diferenças de escala espacial de análise, características geográficas da área de interesse, e sem avaliar a confiabilidade dos resultados, podem expor estimativas distorcidas da realidade, consequentemente, desacreditando a

modelagem geoespacial de fenômenos terrestres como ferramenta útil à resolução de problemas práticos.

1.2.Hipóteses e objetivos da pesquisa

Diante a contextualização da problemática abordada, e com base no atual estado da arte sobre a análise de sensibilidade em modelos hidrossedimentológicos, pode-se definir as seguintes premissas:

1º Premissa - Modelos preditivos de perda de solo e água geram estimativas diferentes, conforme a complexidade de sua formulação;

2º Premissa - A propagação de incerteza que se estende aos resultados finais da aplicação de um modelo, e que excede àquela inerente a sua própria concepção, variará conforme o conjunto dos métodos adotados para a obtenção dos dados das variáveis envolvidas;

Assim, buscando contribuir diretamente com o processo de modelagem geoespacial em bacias hidrográficas, com o foco na efetiva utilização para o processo de gestão das terras, esta pesquisa propõe a seguinte hipótese:

Hipótese: A incerteza final presente na estimativa resultante do processo de modelagem, que indica a confiabilidade de sua aplicação, pode ser minimizada mediante escolha dos modelos e métodos de aquisição dos dados dos parâmetros de entrada, em função das características físicas do cenário observado e escala de análise.

1.2.1. Objetivo

Desta forma, apresenta-se como objetivo principal desta pesquisa caracterizar a variabilidade espacial da incerteza propagada pela aplicação dos modelos hidrossedimentológicos EUPS, MEUPS e REUPS, e indicar sua correlação espacial com características geomorfométricas da área em análise.

Espera-se assim que os resultados deste trabalho contribuam para proposição de critérios objetivos para escolha dos modelos hidrossedimentológicos, com base nas características geomorfológicas da área, a fim de minimizar a incerteza das estimativas, e oferecer uma medida de confiabilidade aos resultados finais.

Para sua consecução, apresentam-se os seguintes objetivos específicos:

1.2.2. Objetivos específicos

a) Analisar a variação da sensibilidade gerada pelo conjunto de dados dos parâmetros envolvidos nos modelos hidrossedimentológicos, considerando duas bacias hidrográficas fisiograficamente diferenciadas, e duas escalas de mapeamento (1:10.000 e 1:50.000 – resoluções matriciais de 2 e 10 metros respectivamente); **b)** Correlacionar a variabilidade espacial e magnitude da incerteza da predição dos modelos às características geomorfológicas da área modelada, por meio de descritores geomorfométricos locais.

No atual contexto de rápida evolução dos recursos tecnológicos e amplo uso da geoinformação, não é conveniente que a escolha dos modelos para predição de perda de solo e água seja justificada apenas em função da “facilidade de manipulação dos dados”, como se observa atualmente. É necessário medir as incertezas, explorar e conhecer as limitações, e buscar argumentos mensuráveis sobre o desempenho dos modelos, para assim propor possíveis melhorias dos procedimentos de aplicação da modelagem dinâmica por meio do geoprocessamento, e conhecer o limiar entre o risco e o êxito da aplicação de modelos no processo de gestão das terras agrícolas. Entende-se assim a necessidade em explorar alternativas e propor critérios objetivos para escolha dos modelos hidrossedimentológicos.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Em termos de referências bibliográficas, a condução do raciocínio sistêmico no decorrer de todo trabalho foi orientada principalmente por Christofolletti (1999), já o segmento analítico é orientado pelos trabalhos de Wischmeier e Smith (1978) e Willians (1975), dando especial atenção aos trabalhos que se dedicaram em aprimorar os métodos de obtenção de cada parâmetro contemplado nos modelos considerados, em ambiente SIG, destacando: Valeriano (2002a, 2002b, 2003, 2004, 2007, 2008) e Desmet e Govers (1996) para extração de informações geomorfológicas; Donzelli et al. (1992), Pinto (1991) e Lombardi Neto (1993), Correa (2015, 2016), e Moraes (2016) para os fatores C e K; e USDA (1972) para os fatores Q e qp. Tais referências e parâmetros são fundamentais para aplicação de todos os modelos propostos para análise.

Os procedimentos de campo, em especial aqueles empregados no mapeamento de solos e levantamento de dados por meio de GPS de precisão, foram orientados respectivamente por (EMBRAPA, 1999) e pelas normas de precisão cartográfica sugeridas pelo IBGE. No entanto, ressalta-se que os procedimentos de campo, apesar de fundamentais para a condução da pesquisa, não serão abordados em detalhes, uma vez que os métodos e procedimento são rigorosamente apresentados pelas bibliografias mencionadas.

2.1. Modelagem de sistemas ambientais enquanto abordagem metodológica

Compreender as potencialidades e limitações da modelagem de sistemas ambientais exige que, primeiramente, se retome o conceito de sistemas, especificamente na área das Geociências. Chorley (1962) introduziu o conceito de sistemas na Geomorfologia, e definiu-o como uma totalidade criada pela integração de um conjunto estruturado de partes componentes (síntese), cujas interrelações estruturais e funcionais criam uma inteireza que não se pode observar quando as partes componentes são analisadas individualmente (análise). Estes princípios foram aprofundados em diversas obras, sendo relevante destacar Chorley e Kennedy (1971); Strahler (1980) e Huggett (1985).

Ressalta-se desta definição a necessidade em selecionar, do meio físico, as partes componentes (elementos e atributos) capazes de descrever um dado fenômeno geográfico de modo organizado, estabelecendo um encadeamento lógico de *input / output* de matéria

e energia no sistema, determinando a relação e funcionalidade entre as partes componentes. Desta forma, Huggett (1985) ressalta que ao conceituar fenômenos naturais e/ou sociais como sistemas, e assumi-los como verdade científica, deve-se estar ciente da subjetividade existente devido o processo de seleção das variáveis responsáveis por sua descrição. Conforme Christofolletti (1999), distinguir um único sistema na multiplicidade de características e fenômenos da superfície terrestre é ato mental, cuja ação procura abstrair o referido sistema da realidade envolvente.

Rosenblueth e Wiener (1945) indicam que a abstração consiste em repor, por meio de modelo (sejam eles formais – matemáticos - ou materiais), a parcela do universo sob consideração, cuja estrutura seja similar, porém, mais simples. Assim, o estudo de sistemas pode ser feito por meio da utilização de modelos, que subsidiam o entendimento de como os sistemas funcionam (HUGGETT, 1985).

Na literatura encontram-se disponíveis diversas definições para modelos. No entanto, para esta pesquisa, mais do que uma definição formal, torna-se relevante destacar alguns conceitos, como aqueles apresentados por Lee (1973), que indica que um modelo é uma representação da realidade; uma tradução simplificada e generalizada do que se afigura como sendo as características mais importantes de uma situação do mundo real; uma abstração da realidade utilizada para se obter clareza conceitual, evidenciando que, qualquer modelo, por mais complexo que seja, sempre apresentará limitações derivadas de sua própria conceituação, assim como é inerente, também, à definição de sistemas.

Von Sperling (2007) pontua que modelos matemáticos são compostos por: a) uma estrutura teórica, representada por equações matemáticas; b) valores numéricos dos parâmetros (coeficientes) das equações e; c) dados de entrada e de saída.

Nesta linha de raciocínio, entende-se que a estrutura conceitual de um fenômeno que se processe no sistema terrestre, parametrizado e reduzido à lógica de uma equação matemática, expressa na forma de um modelo, constitui-se em um meio de operacionalização da análise sistêmica (CHORLEY e HAGGETT, 1971; CHRISTOFOLETTI, 1999), pode ser considerado como um segmento pragmático desta teoria aplicada à questão ambiental. Assim, compreende-se a modelagem de sistemas ambientais como segmento metodológico, pois abarca um conjunto organizado e estruturado de conceitos e procedimentos, capaz de fornecer condições necessárias para realizar análises de fenômenos geográficos de forma estática e/ou dinâmica; incluindo elementos e atributos com variabilidade espacial e/ou temporal.

Portanto, entende-se a modelagem de sistemas ambientais como uma abordagem relevante ao desenvolvimento do conhecimento científico, meio para a materialização das abstrações necessárias ao entendimento do mundo real.

Loucks e van Beek (2005) ressaltam que a utilidade de um modelo está diretamente relacionada à exatidão e confiabilidade de suas previsões. Uma vez que nenhum modelo matemático, por conceituação, tem a pretensão de abarcar a real complexidade dos fenômenos terrestres, concomitantemente, sabe-se que discrepâncias entre os valores por eles estimados e os observados são inevitáveis, assim, Beven e Binley (1992) afirmaram que todas as previsões estão submetidas a incertezas. Torna-se necessário então avaliar o erro (incerteza) que afetará as estimativas do processo de modelagem além daqueles já esperados em função da simplificação da realidade (Luis e Mchaughlin, 1992).

O'Neill (1971, apud JACOMINO, 1997) foi um dos pioneiros a considerar diretamente a contribuição de erros de estimativas associados aos modelos ecológicos. Desde então, os termos “incerteza”, “análise de sensibilidade” e “erros” vêm sendo aplicados ao estudo de modelagem de sistemas ambientais.

Estas considerações são fundamentais neste trabalho, pois parte-se do pressuposto que as incertezas dos resultados são inerentes à concepção dos modelos, assim, não admitimos que o aperfeiçoamento das técnicas e melhorias dos processos eliminaram as distorções da realidade modelada, mas que apenas sejam amenizadas.

2.2. Escala espacial de análise: Estratégias para aproximação entre simulação e realidade

Parte-se da premissa que o desenvolvimento de tecnologias implica em novas possibilidades de se abordar um problema conhecido. Mais especificamente, no âmbito deste trabalho, o aperfeiçoamento das geotecnologias permite que inúmeras análises sejam conduzidas em novas escalas. Hugget (1985), explanando sobre a abordagem sistêmica, atribui à diversidade escalar a ideia de níveis hierárquicos com que o pesquisador pode abordar a totalidade de um fenômeno.

A discussão a respeito do conceito de escala, enquanto estratégia epistemológica para interpretação da realidade, ganha relevância na medida em que a difusão das geotecnologias torna-se uma realidade no meio acadêmico, e com isso, abrem-se as possibilidades de objetivação e análise dos fenômenos geográficos. Castro (2003) salienta que os diversos níveis escalares em que um fenômeno pode ser apreendido exigem a

coerência entre o percebido e o concebido, ou seja, coerência entre o modo com que o fenômeno é observado e o conhecimento gerado, pois, segundo Lacoste (1988) diferenças de tamanho implicam em diferenças qualitativas e quantitativas dos fenômenos, ou como afirma Castro (2003), tão importante quanto saber que as coisas mudam com o tamanho, é saber como elas mudam, e quais os novos conteúdos em suas novas dimensões.

É neste contexto que cabe indagar sobre as mudanças que devem ser consideradas na objetivação de um fenômeno, quando imposto a ele diferentes escalas de abordagem.

Ao aplicar este raciocínio à teoria sistêmica, entende-se que o exercício de pensar o fenômeno em suas inúmeras escalas, conduz à relativização de suas partes (unidades). Como explicitado por Christofolletti (1999), em novo nível hierárquico, cada componente do todo possui características específicas, podendo ser consideradas como unidade, sendo também analisada como uma totalidade.

Assim, torna-se necessário que a acepção do termo escala supere a noção de representação cartográfica da superfície terrestre. No caso da Cartografia, a escala significa uma fração, razão matemática entre o real e a área representada (JOLY, 2003). A discussão conceitual que o termo escala encerra, principalmente em estudos de âmbito geográfico, requer apreendê-la, também, como uma estratégia de aproximação ou distanciamento do objeto (fenômeno) em estudo. Desta forma, o termo escala aqui admitido, pode ser aplicado tanto à área territorial que o fenômeno abrange (seu recorte espacial), como também empregado enquanto medida de aproximação do próprio fenômeno observado.

Diante as considerações expostas, pode-se conduzir a reflexão de que quando se aplica a um determinado fenômeno o mesmo procedimento metodológico em seus diferentes níveis escalares, corre-se o risco de desconsiderar elementos que possuam relativa importância. Como mencionado, considera-se relativa, pois, sua importância é determinada em função da escala em que o fenômeno está sendo apreendido.

Em resumo, entende-se que o fenômeno abordado terá seu grau de complexidade determinado em função do nível escalar proposto no estudo. Ou seja, o fenômeno pode ser apreendido de maneira mais abrangente, que será melhor compreendida sob a abordagem holística que, segundo Christofolletti (1999), significa que busca-se compreender a totalidade do fenômeno mais que suas partes componentes. Sua contrapartida encontra-se na abordagem analítica, a qual admite escalas mais particularizadas para se abordar o fenômeno, e conduz a estudos de maior detalhe, pois

nela o foco está na individualidade dos elementos componentes em cada nível hierárquico do fenômeno.

Considerando o “processo de erosão hídrica dos solos” como o fenômeno geográfico abordado neste trabalho, entende-se que a visão holística o contextualizará enquanto agente modelador do relevo (processo natural ou intensificado pela ação humana), e o incluirá em classes de análise como desmatamento, alteração de cobertura vegetal entre outras. Ou seja, essa abordagem fornecerá informações que não podem ser unicamente explicadas pelos elementos que a constituem em seus níveis hierárquicos inferiores, como solo, relevo, clima, e intervenções antrópicas. A estes níveis inferiores do fenômeno erosão, cabe à abordagem analítica conduzir a interpretação de cada uma das partes individualmente (solo, relevo, elementos climáticos), e permitir que se estabeleça a inter-relação entre elas.

Como exemplo, o modelo EUPS nada mais é que um encadeamento lógico das unidades (partes) que engendram, há um determinado nível escalar, o processo erosivo. Em níveis hierárquicos inferiores, poderia ser considerando pertinente, por exemplo, a química dos solos, a acidez das chuvas, estrutura físico-biológica das raízes dos componentes vegetais que não poderiam mais ser respondidos pela formulação da EUPS.

Conclui-se assim que se a reflexão referente à escala de análise do objeto em estudo (ponderando se a escala em que o fenômeno está sendo percebido é coerente com o conhecimento que se pretende conceber) anteceder às etapas dos procedimentos metodológicos diminuir-se-á a chance de que haja conflitos entre os resultados do trabalho e sua aplicação social.

Se a reflexão referente à escala espacial de análise é fundamental para que haja o ajuste conceitual entre realidade apreendida e o fenômeno representado, deve-se proceder com o mesmo critério em termos pragmáticos, para que os resultados obtidos no processo de modelagem sejam passíveis de análises críticas, viabilizando a avaliação de discrepâncias entre resultados estimados, e a realidade observada.

2.3. Análise de incerteza e sensibilidade na aplicação de modelagem geoespacial

A aplicação de modelos nos estudos de sistemas ambientais dinâmicos tem se intensificado concomitante à evolução e difusão dos recursos computacionais. Conforme indicam em Hey et al.(2011), os ambientes computacionais favorecem a manipulação de expressiva massa de dado e simplificam a aplicação e simulação dos modelos, no entanto, pouca atenção é direcionada aos processos fundamentais de verificação, calibração e

validação dos modelos. Consequentemente, pouco se questiona quanto a confiabilidade dos dados dos parâmetros de entrada, e na representatividade dos resultados obtidos (VON SPERLING, 2007).

Loucks e van Beek (2005), em publicação dedicada a oferecer diretrizes e suporte à sistemas de planejamento e gestão de recursos hídricos, destacam a necessidade de implementar técnicas de análise de sensibilidade e de incerteza para avaliação do desempenho de modelos dinâmicos, principalmente os preditivos, fornecendo informações gráficas e numéricas de situações alternativas para cenários futuros.

Tomovic e Vukobratovic (1972) definiram análise de incerteza como a investigação da influência da incerteza, isto é, a variância dos dados de um determinado parâmetro, na resposta do modelo, e análise de sensibilidade como sendo o estudo do efeito das variações dos parâmetros no comportamento da dinâmica em um sistema.

Von Sperling (2007) também aplicou a análise de incerteza em modelos hidrológicos, e destacou a vantagem de se obter resultados expressos em termos probabilísticos, permitindo adoção de medidas baseadas na indicação da probabilidade de seu sucesso considerando a análise de incerteza como um procedimento fundamental ao suporte para a interpretação dos resultados de simulação, e no direcionamento de medidas de ações interventivas no ambiente.

Entre os componentes responsáveis pela introdução de incerteza nos dados de entrada de um modelo, Bonamo e Cranwell (1988) e Von Sperling (2007) citam: erros na estimativa de um dado (inclui-se aqui as manipulações em ambiente SIG, ou até mesmo os valores de literatura, levantamentos, experimentos); erros na amostragem; erros na medição, calibração ou análise de laboratório; erros nas estimativas de dados de entrada futuros (no caso de modelos preditivos). É importante ainda ressaltar as considerações de Davis e Olague (1991), que afirmam que erros também podem ser resultantes da escolha de métodos utilizados para a solução das equações de interesse.

Desta forma, observa-se que, mesmo dados tradicionalmente não questionados em um modelo (como medições e resultados de análise), estão sujeitos, em maior ou menor grau, a um componente de incerteza.

Iman e Helton (1987) destacam que análises dos efeitos de incerteza dos dados de entrada em modelos preditivos, muitas vezes indicam que apenas alguns dos termos envolvidos contribuem significativamente na incerteza final do dado de saída (resultado). Concluiu-se neste caso, que para se obter resultados finais mais exatos e confiáveis, não se faz necessário aplicar o mesmo esforço na obtenção de todos os termos componentes

do modelo, mas sim, torna-se importante, a priori, analisar qual é a representatividade de cada um em sua formulação geral. Esta avaliação é feita por meio da análise de sensibilidade, e poderá indicar quão necessária é o esforço e precisão na determinação dos dados de uma dada variável, em relação às demais variáveis, e ao resultado final.

A análise de sensibilidade é a avaliação do quão a resposta de um modelo é influenciada por seus dados de entrada. Por meio dela, é indicado se a resposta do modelo é pouco ou muito influenciada pelos valores dos dados de uma determinada variável, ou coeficiente.

Caso a análise de sensibilidade demonstre que uma pequena variação no dado de entrada conduz à grande variação no resultado final, a conclusão é de que devem ser concentrados maiores esforços na determinação de tais dados.

A relação entre sensibilidade e incerteza foi formalizada por Doctor (1989, apud JACOMINI, 1997), caracterizando a variância da resposta “y” de um modelo (variável dependente), definida por uma relação entre os parâmetros $X_1 \dots X_k$, dependente do tempo t , é devido a incerteza e a sensibilidade dos valores de X_i ($i=1, \dots, k$).

A figura 1a apresentada por Loucks e van Beek (2005) demonstra, na aplicação de um modelo preditivo, a importância em se conhecer a relação entre sensibilidade e incerteza referente aos dados de entrada para a avaliação da incerteza propagada nos resultados finais. Observa-se que os dados de entrada com alta variabilidade de incerteza propagarão baixas incertezas ao resultado final, se associados a parâmetros de baixa sensibilidade no modelo. No entanto, se estes mesmos dados estiverem associados a um parâmetro de alta sensibilidade, o resultado final pode apresentar elevado grau de incerteza, e inviabilizar a sustentação dos resultados. Já a figura 1b demonstra a relevância em se realizar conjuntamente as análises mencionadas em modelos preditivos, pois destaca que a precisão das previsões será afetada pelo ajuste e calibração do modelo ao cenário de interesse.

Os trabalhos que abordam a análise de sensibilidade em modelos hidrossedimentológicos, indicam que, de modo geral, os modelos são sensíveis à qualidade dos dados de entrada referentes ao solo. Assim, a acurácia do modelo depende, em grande parte, dos parâmetros que descrevem as características relevantes da bacia hidrográfica e do quão representativos eles são (Adriolo et al., 2008).

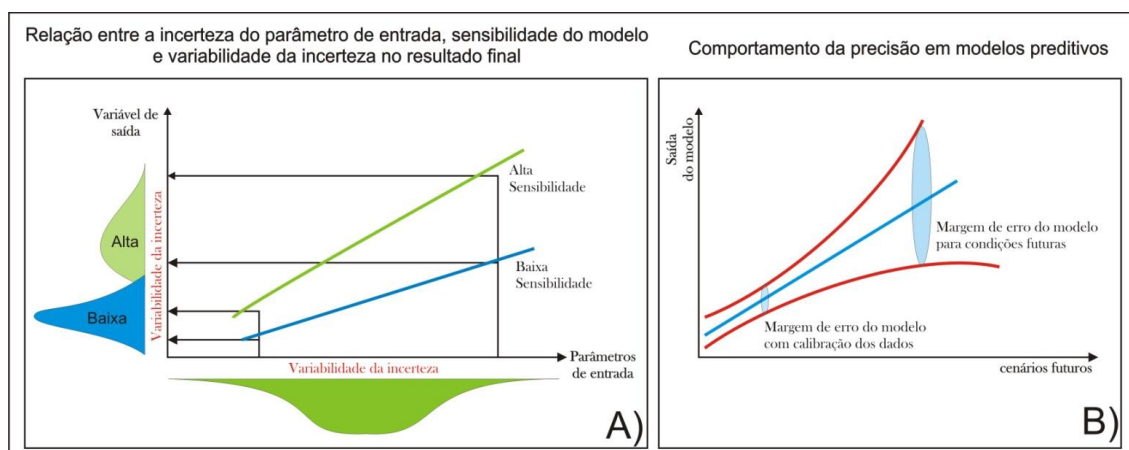


Figura 1: Variabilidade da incerteza no resultado final da aplicação de modelos: Função da sensibilidade e Incerteza dos dados de entrada.

Fonte: Modificado de Loucks e van Beek (2005).

Modelos mais desenvolvidos, como o SWAT, já trazem algoritmos para análise de sensibilidade, mas não permite a manipulação das estatísticas pelo operador. Os trabalhos desenvolvidos com estas extensões indicam que os resultados da aplicação são sensíveis a uma gama de variáveis de entrada relacionadas a vegetação, manejo e tipo dos solos, clima, aquífero, canal e reservatório (Adriolo et al., 2008; Jha, 2009; Reungsang et al., 2009; Jeong et al., 2010), com maior sensibilidade aos parâmetros relacionados com as propriedades físicas do solo, como densidade, condutividade hidráulica e, particularmente, capacidade de água disponível, além do número da curva, o qual se relaciona com o solo e a vegetação (Jha, 2009; Cibin et al., 2010).

Nestes trabalhos, a avaliação da sensibilidade é utilizada para a aquisição de parâmetros estatísticos para orientar a calibração do modelo (Cibin et al., 2010; Baltokoski et al., 2010).

Assim, pode-se concluir que é de extrema importância o cuidado na seleção/obtenção de valores representativos dos parâmetros, razão pela qual o conhecimento a respeito do sistema de interesse e da estrutura do modelo deve ser elevado. Considerando este fato, a presente pesquisa optou em selecionar modelos dinâmicos espaciais de perda de solo e transporte de sedimento já consagrados na literatura (EUPS, MEUPS, REUPS), pois possuem aplicações e bibliografias em diversos trabalhos, mas que carecem de análises mais precisas quanto a confiabilidade das estimativas, e como as incertezas variam em função dos cenários modelados, escalas analisadas e, principalmente, da escolha de métodos usados para a obtenção/ extração dos parâmetros em ambiente SIG, como indicado por Davis e Olague (1991).

2.4. Modelos hidrossedimentológicos para a avaliação de produção e transporte de sedimentos: EUPS, MEUPS, REUPS

A erosão acelerada do solo, conforme já enfatizado pelo USDA Soil Conservation Service (1948), é resultado do desequilíbrio ambiental, que se desencadeia num lapso de tempo a partir da modificação de algum componente da paisagem, em geral provocada pela atuação antrópica. Dentre as diversas formas de erosão do solo, a erosão resultante do escoamento superficial das águas pluviais é a que causa consequências mais graves à população.

É possível constatar, através da análise da literatura disponível, que a quantificação dos processos erosivos tem sido uma preocupação de inúmeros trabalhos, principalmente, de geógrafos, agrônomos e geólogos, em áreas específicas como geomorfologia e pedologia. Com ênfase a esta temática, diversas publicações estão disponíveis, e revisadas, desde a década de 1950.

Arnold e Srinivasan (1995) destacam que até o início da década de 1970 predominavam estimativas de perda de solos utilizando-se modelo derivado de equações empíricas, como o a consagrada EUPS (Equação Universal de Perda de Solo / Universal Soil Loss Equation – USLE) sistematizada por Wischmeier e Smith (1978) que, em sua formulação, combina os fatores condicionantes da erosão hídrica laminar do solo. A partir da EUPS, foram desenvolvidos modelos mais complexos, adaptados para diferentes condições geográficas, como a RUSLE (Revised Universal Soil Erosion Equation - RENARD et al., 1991), que converte os fatores da EUPS em subfatores, adequando melhor a equação às condições regionais e, particularmente, sazonais, em termos de uso da terra e cobertura vegetal.

Segundo Chaves (1991), a crescente preocupação com problemas de assoreamento e poluição de cursos d'água e de reservatórios, contribuiu para o desenvolvimento de modelos matemáticos com finalidade de prever, também, o aporte de sedimentos em pontos específicos de uma bacia hidrográfica. Assim, a partir das décadas de 1970 e 80, os esforços direcionaram-se a incorporar, aos modelos, a dinâmica do escoamento superficial das águas nas vertentes, podendo-se exemplificar a Modificação da Equação Universal de Perda de Solo – MEUPS (MUSLE - WILLIAMS, 1975), que contempla os mesmos fatores da EUPS, com exceção da erosividade das chuvas, substituída por fatores que envolvem os processos hidrológicos na bacia (fator runoff).

Na década de 1990, em meio às facilidades oferecidas pela difusão dos sistemas computacionais, agilizou-se o desenvolvimento de modelos com maior número de variáveis, incorporando em sua estruturação detalhes como avaliação da influência das formas de manejo e conservação dos solos, bem como flutuações de diversos elementos climáticos (diários, mensais e anuais) sobre os processos erosivos, como requer o modelo WEPP (Water Erosion Prediction Project – LAFLEN et al., 1991).

Minoti (2006) salienta que, na década em questão, houve o desenvolvimento de inúmeros modelos, envolvendo características ambientais específicas, e que posteriormente foram integrando-se em modelos mais complexos, como o SWAT (Soil and Water Assessment Tool, Arnold et al., 1998), que representa o resultado da incorporação de fatores de vários modelos desenvolvidos pelo Agricultural Research Service (ARS/USDA), caracterizando-se como uma evolução direta da junção dos simuladores SWRRB (Simulator for Water Resources in Rural Basins) (Williams et al., 1985, Arnold et al., 1990) com o ROTO (Routing Outputs to Outlet) (Arnold et al., 1995), além de modelos específicos como o CREAMS (Chemical, Runoff, and Erosion form Agricultural Management Systems - Knisel, 1980), GLEAMS (Ground Water Loading Effects on Agricultural Management Systems - Leonard et al., 1987), EPIC (Erosion-Productivity Impact Calculator - Williams et al., 1984). O SWAT tem sido continuamente aprimorado, resultando em novas versões como simulador, por exemplo, “ArcView Soil and Water Assessment Tool” – AVSWAT2000 (Neitsch et al., 2002). No entanto, o aprimorando destes modelos, criando interfaces integradas em sistemas de informações geográficas (SIGs), são predominantemente desenvolvidos e aprimorados em universidades norte americanas e canadenses, que possuem áreas de estudo com mais de 40 anos de monitoramento em campo. Assim, muitos dos coeficientes dos parâmetros são ajustados para as condições locais onde foram desenvolvidos, e não se aplicam inteiramente às condições tropicais, com altos volumes de chuva, diversidade de cobertura vegetal, e solos profundos. Aliado a isto, há a dificuldade em operacionalizar em SIG estes modelos com interface integrada de maneira correta, uma vez que são acoplados banco de dados externos pré-formatados, principalmente com informações de solo e clima, que exigem que sejam alterados para aplicação em cenários distintos. Como não há uma formalização científica destas alterações, e poucos trabalhos que se dedicam ao ajuste dos dados com equações robustas (que se apliquem em vários ambientes), não há proposição formal dos critérios de ajustes, e observa-se grande incompatibilidade entre os dados e resultados das pesquisas.

Como indicado, o desenvolvimento dos modelos preditivos, para estimativa da perda e transporte de sedimentos, tem ocorrido de forma integrada, de modo que as principais variáveis físicas de entrada (pedológicas, hidrológicas e geomorfológicas) são comuns entre eles, sendo diferenciados pelos coeficientes e a lógica da integração dos dados. A tabela 1 apresenta as variáveis contempladas em cada modelo mencionado, e que serão utilizados nesta pesquisa.

Tabela 1: Termos contemplados nos modelos EUPS, REUPS, MEUPS, WEPP e SWAT

Modelos	Variáveis de entrada						FONTE	
	Produção (Aporte) de sedimento na vertente							
	Pedológicas ^a	Hidrológicas ^b	Topográficas ^c	Antrópicas		Transporte de sedimento no canal fluvial ^{a ,b ,c}		
EUPS	K ¹	R ²	L ³	S ⁴	C ⁵	P ⁶	-	Wischmeier e Smith (1978)
REUPS	K ¹ _(cenários)	R ² _(cenários)	L ³	S ⁴	C ⁵ _(cenários)	P ⁶ _(cenários)	-	Renard et al. (1991)
MEUPS	K ¹	Runoff ⁷ _(cenários)	L ³	S ⁴	C ⁵	P ⁶	-	Williams (1975)
WEPP								Rawls e Foster (1987)
SWAT	-----		Erosão Fase terrestre		-----		V _{cp} ⁸ ; Conc _{sed} .max ⁹ ; Sed _{dep} ¹⁰ ; Sed _{out} ¹¹	Arnold et al. (1998)
¹ .Erodibilidade; ² .Erosividade; ³ . Extensão de vertente; ⁴ .Declividade; ⁵ .Uso e cobertura da terra; ⁶ .Práticas conservacionistas; ⁷ . Escoamento superficial direto; ⁸ . Vazão máxima do Canal; ⁹ . Concentração máxima do sedimento transportada; ¹⁰ . Qtd. de sedimento depositado; ¹¹ . Qtd. de sedimento no exutório.								

¹ Erodibilidade; ² Erosividade; ³ Extensão de vertente; ⁴ Declividade; ⁵ Uso e cobertura da terra; ⁶ Práticas conservacionistas; ⁷ Escoamento superficial direto; ⁸ Vazão máxima do Canal; ⁹ Concentração máxima de sedimento transportada; ¹⁰ Qtd. de sedimento depositado; ¹¹ Qtd. de sedimento no exutório.

Fonte: Adaptado de Wischmeier e Smith (1978); Renard (1991); Williams (1995); Rawls e Foster (1987) e Arnold (1998).

A quantificação dos processos erosivos tem sido uma preocupação de inúmeros trabalhos desde meados da década de 1950, com especial atenção às primeiras propostas para condução de análises combinadas, integrando os principais fatores condicionantes da erosão hídrica laminar dos solos, como Wischmeier e Smith (1962), e Williams (1975), respectivamente sintetizadas na Equação Universal de Perda de Solos (EUPS), Modificação da Equação Universal de Perda de Solos (MEUPS). Posteriormente, as pesquisas adicionais, experiências, históricos de dados e desenvolvimento de recursos computacionais sugeriram novas propostas de melhorias dos modelos, culminando com o desenvolvimento da Equação Universal de Perda de Solo Revisada (RUSLE). A RUSLE apresenta a mesma lógica de integração da EUPS, porém, apresenta detalhamento em fatores determinantes, que assumem variabilidade temporal, como fator de uso da terra e cobertura vegetal que assume coeficiente de crescimento (Renard, et al., 1997).

Desta forma, observa-se (tabela 2) que a EUPS e suas derivações compartilham a lógica de integração de dados, com detalhamentos de subfatores, com destaque aos aspectos hidrológicos e de cobertura vegetal.

Tabela 2: Comparação entre os parâmetros envolvidos nos modelos de perda de solo EUPS e MEUPS e REUPS

Modelo	Finalidade	Fatores Condicionantes					
		Hidrológico		Pedológico	Topográfico		Antrópicos
EUPS	A = Perda média de solo por ano ($T/ha\ ano^{-1}$)	R		K	L	S	C P
MEUPS	Y = Fornecimento de sedimentos em um evento chuvoso	Q	Qp	K	L	S	C P
REUPS	A = Perda média de solo por ano ($T/ha\ ano^{-1}$)	R _t		K	L	S	C _t P _t

Enquanto a EUPS estima a perda de solos baseado na força potencial exercida pela ação das chuvas (Fator R, erosividade), a MEUPS a substitui pela dinâmica dos processos hidrológicos (fator Q e qp) na fase terrestre, considerando elementos como a capacidade de escoamento superficial direto, e a REUPS incorpora a variabilidade temporal da capacidade de proteção do solo em função do estágio de desenvolvimento das culturas agrícolas e variações sazonais de coberturas nativas. Estas diferenças são fundamentais para a compreensão das finalidades das aplicações dos modelos. Enquanto a EUPS/REUPS estima perdas anuais, baseado nas características médias pluviométricas, a MEUPS simula a perda de solo para um determinado evento chuvoso.

Outro importante aspecto a ser salientado é o aperfeiçoamento das Geotecnologias, em especial o avanço das técnicas de geoprocessamento, sensoriamento remoto e de métodos de análise espacial e geoestatísticos, conduzindo o foco das pesquisas no início do século 21 à novas formas de obtenção e manipulação dos dados contemplados nos modelos, e não mais na seleção de novas variáveis ou no desenvolvimento de novos modelos. Os resultados deste esforço é que, atualmente, para cada variável considerada em um modelo, há opções de métodos de extração, em função dos objetivos, escala de análise e exatidão cartográfica pretendida.

Como exemplo pode-se mencionar a obtenção das variáveis L e S, respectivamente, extensão de vertente e declividade, cuja resultante é comumente intitulada de Fator Topográfico. Os trabalhos de Williams e Berndt (1976); Moore e Burch (1986); Desmet e Grovers (1996); Kinnell (2005) e Valeriano (2001, 2002a, 2002b, 2003, 2004, 2005) propõem a extração automatizada, em ambientes computacionais, dos dados das variáveis geomorfométricas, integrando informações obtidas por dados de sensoriamento remoto, SIG e modelagem, além de inserirem novos conceitos, como as

áreas de acúmulo de fluxo de drenagem, auxiliando a extração de informações topográficas.

Técnicas de levantamento de solos e seu mapeamento em meio digital, assim como a caracterização de seus constituintes orgânicos e inorgânicos, por meio de produtos multi e hiperspectrais de sensores remotos orbitais e aéreos, têm contribuído com o detalhamento de informações pedológicas obtidas por procedimentos convencionais. Entre propostas de mapeamento e caracterização de solos por sensoriamento remoto, destacam-se os trabalhos Formaggio e Galvão (2007), Galvão et al., (2007) e Demattê (2002, 2004a, 2004b, 2007). Pereira (2010) comenta que a generalização das estimativas de perda de solos será na ordem do detalhe apresentado pela carta pedológica. Desta forma, os esforços na extração e obtenção de dados geomorfométricos e hidrológicos podem ser descartados se o restante das informações temáticas que alimentam o modelo não fore compatíveis em termos de escala.

Além de informações do meio físico, informações a respeito do uso da terra e cobertura vegetal e práticas conservacionistas, que caracterizam a intervenção antrópica no ambiente, podem ser obtidos e detalhados por produtos de sensoriamento remoto a nível orbital e aéreo. Como exemplo, os trabalhos de Sanches et al., (2005) e Todt et al., (2006), que apresentam a capacidade de diferenciação de alvos vegetais e estágios de culturas agrícolas em imagens do satélite CBERS, Landsat, SPOT e GeoEye, bem como autores que propõe relações entre índice de vegetação, como o NDVI, para determinação dos valores de uso da terra e cobertura vegetal. Corrêa (2015) apresentou elevada correlação entre dados espectrais obtidos em campo e valores normalizados de índice de vegetação obtidos por sensores remotos. A obtenção do fator C derivado de índices de vegetação e demonstrado pela autora apresentou melhor desempenho do modelo de predição de perda de solos, uma vez que houve incremento da variabilidade dos dados de proteção da cobertura vegetal e maior representatividade frente às condições reais da área estudada.

Já variáveis hidrológicas, como o volume de escoamento superficial e vazão pico do escoamento superficial, para bacias hidrográficas, normalmente são os últimos a serem obtidos nas equações, pois a aquisição depende, indiretamente, de informações como geometria de vertente, uso e cobertura da terra, manejo de solo bem como suas características e condições de umidade (PEREIRA, 2010). Prusk et al., (2010), indicam inúmeros métodos para obtenção de valores de escoamento superficial, como Método Racional, Método Racional Modificado, Método do Número da Curva (SCS-USDA),

assim como diferentes procedimentos para determinação do tempo de concentração (T_c), período de retorno (T) entre outros.

2.5. Dificuldade de comparação dos resultados entre trabalhos que abordam a modelagem hidrossedimentológica

A avaliação dos trabalhos científicos publicados na temática de modelagem hidrossedimentológica pode evidenciar a dificuldade de comunicação entre pesquisadores, e adoção de métodos comuns para extração e síntese dos dados para um mesmo objetivo. Observa-se grande dificuldade em abordar discussões e análises comparativas entre pesquisas que contemplam modelagem dinâmica de processos erosivos, em especial as de cunho hidrossedimentológico, as quais envolvem grande quantidade de parâmetros, diversos procedimentos metodológicos para aquisição de seus dados, e exigem (teoricamente) dados quantitativos com unidades de medidas específicas. As maiores dificuldades expressam-se, principalmente, na comparação entre os valores finais de perda de solo obtidos. Inúmeros trabalhos, ao final da rotina de simulação de cenários, apresentam os valores de saída em natureza qualitativa (apesar dos modelos expressarem matematicamente as unidades desejadas), o que impede qualquer tipo de comparação criteriosa entre estudos de bacias hidrográficas, pois torna-se inviável a relativização das classes. Mas, mesmo aqueles que se propõe a apresentar objetivamente valores de perdas de solo em toneladas, não declaram os erros inerentes aos processos de modelagem, ou não ajustam as unidades ao ambiente SIG, ou resolução matricial dos planos de informação, e os valores apresentados podem ser distorcidos em termos de superestimativas. Assim, muitas vezes a falta de fidelidade e comprometimento com as formulações iniciais dos modelos, tem prejudicado significativamente a comunicação entre trabalhos acadêmicos. Em grande medida, observa-se que a visualização (espacialização) das informações da perda de solo se sobressaem em importância à mensuração dos valores apresentados nas classes temáticas. Dado o esforço para elaboração de diagnósticos de cada um dos fatores que descrevem o processo erosivo, pode-se entender que de modo geral há uma subutilização dos resultados obtidos, pois são restritos e aplicáveis apenas as áreas modeladas.

Para exemplificar este contexto, a figura 2 indicada a seguir, demonstra a espacialização dos trabalhos científicos, levantados na base de dados Scielo para o estado de São Paulo, e agrupados por unidades geomorfológicas similares em termos de sensibilidade aos fatores erosivos.

A princípio, espera-se que haja coerência entre valores de perda de solo e água, uma vez que compartilham a aplicação dos mesmos modelos geoespaciais, com referência aos seus autores originais correspondentes. No entanto, observou-se grande disparidade nos resultados, com áreas similares conforme descrição, mas com diferenças na perda total de solo em bacias de médio porte (aproximadamente 50ha) ordem dos milhares de toneladas, mesmo normalizando áreas e unidades declaradas nos resultados dos estudos, dificultando a adoção de padronização dos procedimentos.

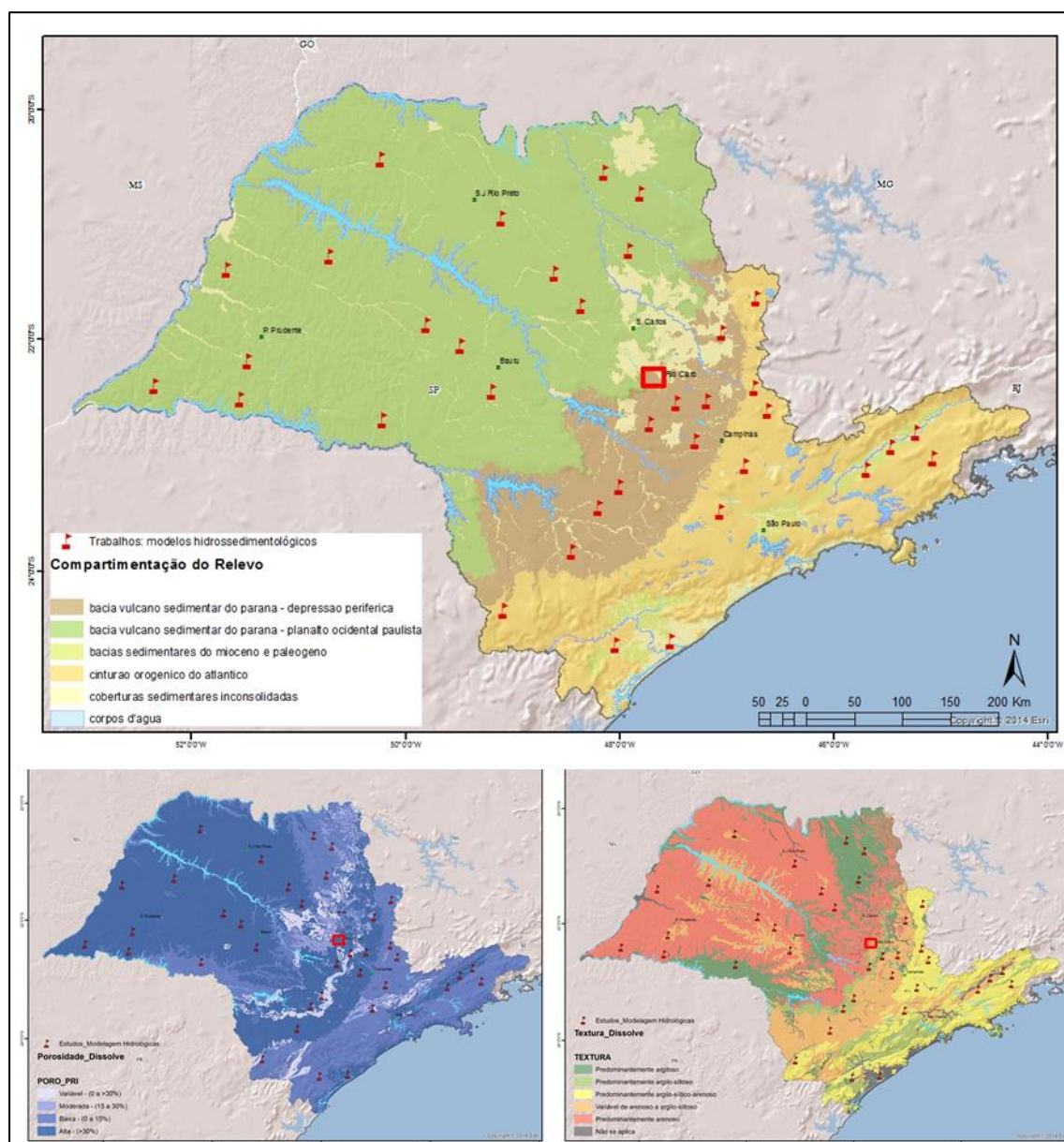


Figura 2: Espacialização dos artigos científicos referentes à modelagem de perda de solo e água, disponíveis na base de dados SCIELO, e publicados entre anos de 1990 e 2015. 141 trabalhos analisados: 93 Qualitativos, 48 Quantitativos; destes últimos 17 com Validação de dados em campo. Fonte: Dados da Pesquisa.

Indiretamente, deve-se constatar o esforço e dedicação que se exige para a obtenção dos resultados finais de perda de solo por erosão laminar hídrica. Ou seja, previamente, é necessário a realização de um diagnóstico e caracterização ambiental detalhado das áreas, bem como elaboração e/ou manutenção de mapeamentos de uso da terra e cobertura vegetal, dados pluvio e fluviométricos atualizados entre outros parâmetros, mapeamento com acurácia de unidades pedológicas, compreensão das técnicas de manejo adotadas nos sistemas agrícolas entre outros. Uma vez que não se pode determinar comparações entre os trabalhos, nem mesmo avaliações críticas dos resultados quantitativos, observa-se a inviabilidade de utilização destes trabalhos para direcionamento de políticas públicas, ou desenvolvimento de trabalhos para avaliação física das terras. Havendo a demanda pública neste sentido, provavelmente haverá necessidade de retrabalhos, e novos investimentos (tempo e recurso) para obtenção de dados consistentes e passíveis de avaliações, mesmo que a totalidade das publicações disponíveis sobre o tema recubra o território do estado de São Paulo, por exemplo. Assim, considerando tanta atenção e esforços direcionados à elaboração destes trabalhos, torna-se válido propor meios de promover as melhorias dos processos de modelagem, como por exemplo, incorporar nas metodologias apresentações do grau de incerteza que o mapa apresenta. A reflexão a respeito das melhorias operacionais, visando maior confiabilidade dos dados, indica a necessidade da consolidação de uma cultura da utilização de dados geográficos rigorosa, ganhando importância no atual momento de compartilhamento das informações, que exige o acompanhamento de metadados (dados sobre dados). Entre os temas que podem ser desdobrados neste debate, talvez o mais relevante seja a necessidade de adoção urgente de uma política de Infraestrutura de Dados Espaciais (IDE), implementada em níveis institucionais nas universidades e órgãos geradores de dados oficiais, em rigorosa sintonia com órgãos públicos responsáveis pela normalização cartográfica. Nestas orientações, a geoinformação precisa ser gerada segundo padrões e especificações técnicas, para possibilitar o compartilhamento, a interoperabilidade e a disseminação de dados.

3. CARACTERIZAÇÃO DAS ÁREAS DE ESTUDO, E A RELEVÂNCIA NO CONTEXTO GEOMORFOLÓGICO REGIONAL

As bacias hidrográficas dos ribeirões Monjolo Grande (Ipeúna-SP) e Jacutinga (Rio Claro-SP) selecionadas para o desenvolvimento desta pesquisa, inserem-se no contexto da bacia hidrográfica do rio Piracicaba (SP), especificamente sub-bacias do rio Corumbataí³ (Figura 3).

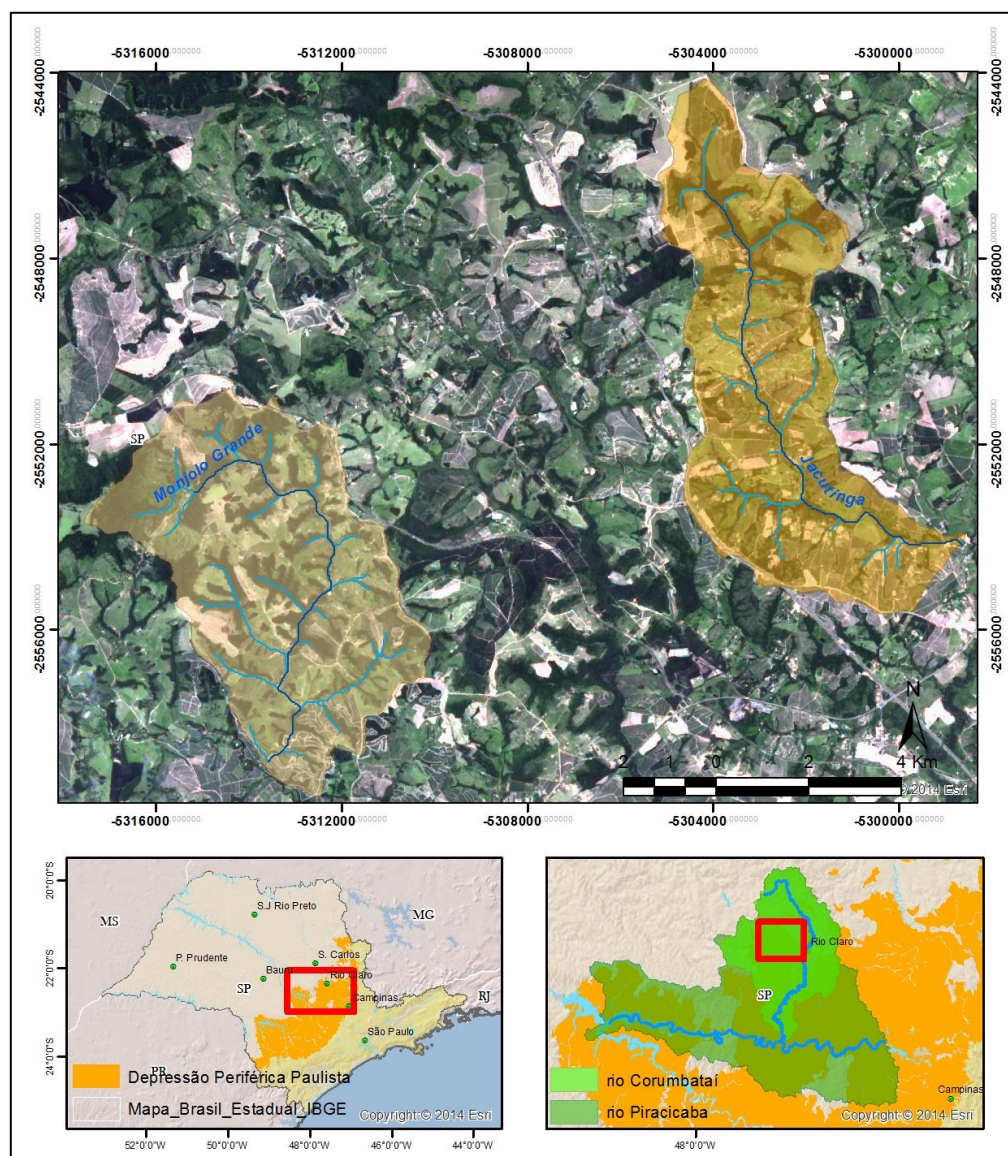


Figura 3: Localização das áreas de Estudo: Bacias Hidrográficas do Rio Monjolo Grande e Jacutinga.

³ responsável pelo abastecimento de água de 7 municípios, destacando Piracicaba e Rio Claro (SP), respectivamente com 380.000 e 200.000 habitantes (IBGE, 2014), além de contribuir diretamente com a manutenção da intensa atividade agrícola e mineradora na região.

Em termos geomorfológicos, as bacias em análise inserem-se na porção centro-oeste da Depressão Periférica Paulista. Autores destacam a forte influência tectônica na região, indicada principalmente por falhas litoestruturais que determinam o padrão de drenagem e a morfoescultura local, além de favorecer os processos erosivos devido à orientação e constituição das camadas rochosas, como indicam os estudos realizados na área.

Desta forma, apresenta-se nesta seção uma súmula da evolução geomorfológica regional, assim como a caracterização de elementos do meio físico das bacias em análise, indicando os aspectos geológicos, pedológicos, geomorfológicos e variáveis climáticas, a fim de evidenciar as relações sistêmicas entre os elementos, oferecer indicadores para compreensão da dinâmica do fenômeno erosivo nesta região, bem como auxiliar a interpretação dos resultados da aplicação dos modelos geoespaciais.

Para esta caracterização priorizou-se os trabalhos desenvolvidos em média escala cartográfica (até 1:100 000), com especial atenção às referências de Penteado (1968); Prado e Oliveira (1981); Facincane (1995 e 2000); Cunha (2001); Sousa (2002).

Deve-se ressaltar a importância em justificar a escolha das áreas de estudo, uma vez que os critérios utilizados ampliam o potencial de aplicação e avaliação dos modelos hidrossedimentológicos, pois caracterizam-se em bacias geograficamente representativas para porção da Depressão Periférica Paulista, apesar do pequeno porte, que na verdade contribui para maior controle dos dados.

3.1.Representatividade geomorfológica

As bacias dos ribeirões Monjolo Grande e Jacutinga foram estrategicamente selecionadas, de modo a individualizar duas unidades de análise similares em termos de área de drenagem, uso e cobertura da terra e distribuição de chuvas, mas com comportamentos hidrológicos distintos em sua fase terrestre, principalmente em função das características predominantes de arranjo, estrutura e textura dos solos. A síntese descritiva dos elementos físicos e biológicos das bacias estão indicadas na tabela 3.

Estes elementos devem ser levados em consideração, uma vez que 17% da área da Depressão Periférica Paulista apresenta predominância de textura arenosa, e 12% argilosa. Assim, as áreas em estudo ganham representatividade em função do potencial de reprodução destas discussões e dos procedimentos metodológicos adotados, favorecendo a comparação entre análises resultantes da aplicação de modelos

hidrossedimentológicos com outras áreas de mesma sensibilidade ambiental às ações de processos erosivos.

Tabela 3: Comparação de elementos físicos, geomorfométricos e antrópicos entre as bacias hidrográficas.

Elementos descritivos predominantes da paisagem	Bacia Hidrográfica	
	Monjolo Grande	Jacutinga
Geologia	Fm. Pirambóia (Arenito)	Fm. Corumbataí (Siltito e Argilito)
Solos	Neossolo Quartzarênico (Rq) e Latossolo Vermelho Amarelo (LA)	Argissolo Vermelho Amarelo (PVA)
Textura (Predominância)	Arenosa	Argilo-siltosa
Porosidade	Alta - (>30%)	Moderada (15 - 30%)
Densidade de drenagem	Média	Média
Uso e cobertura da terra	Predomínio de áreas de pastagem com presença de talhões de cana-de-açúcar	Predomínio de áreas de pastagem com presença de talhões de cana-de-açúcar
Geometria da bacia	Arredondada	Alongada
Área (ha) aproximada	2.800	2.860

FONTE: modificado de MORAES (2015), Correa (2015) e Spatti Jr. (2015) e PEIXOTO, 2010.

3.2. Quadro Geológico-Geomorfológico regional

A descrição geomorfológica da porção central da Depressão Periférica Paulista realizada por IPT (1981) indica dois tipos de feições de relevo dominantes: morrotes alongados e espigões, com interflúvios sem orientação preferencial, topos angulosos a achatados. As vertentes se apresentam ravinadas com perfis retilíneos côncavos e convexos, sendo a drenagem de média a alta densidade, com dominância de padrão dendrítico. Vales fechados, colinas médias e amplas, e topos aplainados. As vertentes com perfis convexos e retilíneos conectam-se com drenagem de média a baixa densidade, padrão sub-retângular, vales abertos e fechados, planícies aluviais interiores restritas e presença eventual de lagoas perenes ou intermitentes.

A morfoescultura da região está relacionada a soerguimentos e abatimentos caracterizados por pulsos tectônicos que modelaram toda região em seu lado oeste, ocasionando retomadas de erosão pelos principais canais fluviais, resultando no constante dissecação do relevo local (PENTEADO, 1968; SOARES, 1973; FACINCANI, 2000). As amplas movimentações verticais, em virtude dos processos modeladores, geraram

coluviamentos contínuos, o que resulta na abundância de depósitos de talus, desenvolvimento de fluxos de detritos e afloramentos de rocha sã nas regiões escarpadas (FÚLFARO e BARCELOS, 1989).

Os processos endógenos envolvidos na formação da Depressão Periférica Paulista caracterizam-se por pulsações tectônicas com diferentes ciclos de sedimentação e erosão (FÚLFARO e SUGUIO, 1968), influenciados pelas descontinuidades estruturais, que controlam tanto a drenagem como o relevo (FACINCANI, 2000). As direções ENE-WSW/NNW-SSE nas descontinuidades estruturais são preferenciais na região e podem ser visualizadas na atual drenagem, que pode ser dividida em dois sistemas ortogonais de fraturamento formando mosaicos retangulares onde a erosão diferencial age modelando as escarpas das serras (PENTEADO, 1968, e FACINCANI, 2000).

As principais descontinuidades estruturais na região da Bacia do rio Passa-Cinco apresentam direções preferenciais NE-SW, mas as direções preferenciais seguidas pelos principais afluentes deste rio são de direção predominante NW-SE (AMARAL & SOUZA, 1936 apud PENTEADO, 1968).

3.3.Unidades litoestratigráficas

Como indicado em Penteado (1968), as feições estruturais e a neotectônica na área de estudo são importantes condicionantes dos processos erosivos e do modelado do relevo local. Desta forma, não é possível desenvolver nenhuma análise geomorfológica sem considerar a estrutura geológica da área.

Considerando a área da bacia de drenagem do ribeirão Monjolo Grande e Jacutinga, observa-se, da base para o topo da bacia do Paraná, a presença das seguintes unidades litoestratigráficas conforme Perinotto (2008): Formação Corumbataí, Formação Pirambóia, Formação Botucatu, Formação Serra Geral e Formação Itaqueri. Estas Formações estão dispostas didaticamente na figura 4, indicada a seguir.

COLUNA ESTRATIGRÁFICA DA BACIA DO PARANÁ NA REGIÃO DE RIO CLARO/LIMEIRA/PIRACICABA (SP)								
ERA	PERÍODOS	GRUPO	FORMAÇÃO	LITOLOGIA	Espe. Aprox. (metros)	DESCRIÇÃO SUCINTA	AMBIENTE DE DEPOSIÇÃO	
CENOZOICA	QUATERNÁRIO		RIO CLARO		30	ARENITOS POUCO CONSOLIDADOS COM LENTES DE ARGILAS E NÍVEIS CONGLOMERÁTICOS NA BASE (Arenitos = reservatório de água subterrânea em poços rasos da região de Rio Claro)	CONTINENTAL: PLANÍCIE ALUVIAL E LACUSTRE. COLUVIÕES	
	TERCIÁRIO		ITAQUERI		100	ARENITOS CONGLOMERÁTICOS E ARENITOS SILICIFICADOS / FERRICRETES	CONTINENTAL: LEQUES ALUVIAIS, FLUVIAL E LACUSTRE	
MESOZOICA	CRETÁCEO	SÃO BENTO	SERRA GERAL		100	DERRAMES DE BASALTOS COM LENTES DE ARENITO NA BASE, DIQUES E SOLEIRAS DE DIABÁSIO (basalto e diabásio = matéria-prima para brias)	MAGMATISMO FISSURAL	
	JURÁSSICO		BOTUCATU		100	ARENITOS SEM SELECIONADOS COM GRÃOS BEM ARREDONDADOS E SEM ESFÉRICOS, POUCA ARGILA	Aqüífero Guarani	CONTINENTAL: DESÉRTICO
	TRIÁSSICO		PIRAMBÓIA		150	ARENITOS COM GRÃOS ARREDONDADOS E ESFÉRICOS, DIVERSOS NÍVEIS DE LAMITOS		CONTINENTAL: FLUVIAL E DESÉRTICO
				CORUMBATAÍ		100	SILTITOS CONTENDO LENTES DE ARENITOS FINOS ARGILITOS, SILTITOS, ARENITOS FINOS, NÍVEIS DE CALCÁRIOS DOLOMITICOS E COQUINAS (Argilitos = matéria-prima para a indústria cerâmica da região de Rio Claro)	CONTINENTAL: LACUSTRE TRANSICIONAL: PLANÍCIE DE MARÉ
PALEOZOICA	PERMIANO	PASSA DOIS	IRATI		40	FOLHELHOS, SILTITOS, FOLHELHOS PROBELTUMINOSOS, CALCÁRIOS DOLOMITICOS (Folhelhos de calcário na região de Itararé, Itararé e Piracicaba/Itararé)	TRANSICIONAL: LAGUNA MARINHO RASO: PLATAFORMA	
			TATUI		50	SILTITOS E SILTITOS ARENOSOS	TRANSICIONAL: PLANÍCIE COSTEIRA MARINHO RASO: PLATAFORMA	
			Grupo ITARARÉ (incluído no Estado de São Paulo)		900	ARENITOS, SILTITOS, VARVITOS E DIAMICTITOS (ALGUNS VERDADEIROS SILTITOS) (Arenitos = reservatórios de água subterrânea em poços profundos da região)	CONTINENTAL (GLACIAL): ALUVIAL - LEQUES E FLUVIAL; LACUSTRE TRANSICIONAL: DELTAS MARINHO (GLÁCIO-MARINHO): PLATAFORMAL	
	CARBONIFERO	ITARARÉ						
Pré-Cambriano			EMBASAMENTO			GRANITOS, MIGMATITOS, GNAISSES, XISTOS, QUARTZITOS		

Figura 4: Coluna Litoestratigráfica da bacia do Paraná.

Fonte: Perinotto (2008)

A tabela 4 apresenta com maior detalhamento as áreas representativas destas formações litológicas.

Tabela 4: Áreas relativas das formações geológicas de composição arenosa e argilosa na bacia do rio Corumbataí.

Ribeirão Monjolo Grande			
Formação Geológica	Grupo Mineral	Litologia	Área (%)
Formação Pirambóia	Silicato	Arenitos	68,55
Formação Corumbataí	Silicato + Carbonato	Argilito/Siltito	27,7
Formação Botucatu	Silicato	Arenitos	2,55
Ribeirão Jacutinga			
Formação Geológica	Grupo Mineral	Litologia	Área (%)
Formação Pirambóia	Silicato	Arenitos	36,8
Formação Corumbataí	Silicato + Carbonato	Argilito/Siltito	60,8
Formação Botucatu	Silicato	Arenitos	2,8

Fonte: Modificado de Perinotto (2008)

3.3.1. Formação Corumbataí

As rochas da Formação Corumbataí, de acordo com o mapa geológico elaborado por Sousa (2002), ocorrem ao longo de toda calha do ribeirão Monjolo Grande, sendo que ao sul do canal, próximo ao rio Passa-Cinco, encontra-se sua área de maior expressão.

Esta Formação é caracterizada pela presença de argilitos, siltitos arenosos e argilosos em sua porção média e superior (LANDIM, 1967). Apresentam-se finamente estratificados, compactos, de coloração que varia de vermelho amarelado a arroxeado. Apresentam disposição em acamamentos plano-parelelos, estratificação rítmica marcada por intercalações de arenitos calcificados. Quando alterados expõem-se com coloração amarela esverdeada e fraturas de aspecto pastilhado. Já na porção inferior da Formação Corumbataí, observa-se siltitos maciços de coloração cinza esverdeada a azulada, podendo haver presença de fósseis, como fragmentos atribuídos a escamas e dentes de peixes.

Segundo Sousa (2002) a Formação Corumbataí encontra-se em contato discordante com a Formação Pirambóia, indicando a ocorrência de falhas geológicas na área, em função da adjacência de formações originadas em épocas distintas.

3.3.2. Formação Pirambóia

A distribuição espacial da Formação Pirambóia é predominante na área de estudo, tendo suas melhores exposições ao norte da bacia, próximo aos canais formadores do ribeirão Monjolo Grande.

É caracterizada por arenito de granulação fina a média com coloração esbranquiçada, podendo variar também em matizes de vermelho e amarelo. Há intercalações de finas camadas de argilitos e siltitos. Sousa (2002) indica que no topo dessa Formação há presença de níveis conglomeráticos de espessuras milimétricas a centimétricas de granulometria fina a média, formado por quartzo, quartzito e minerais escuros.

As estratificações paralelas e cruzadas em arenitos são características dessa Formação, e podem variar de centimétricas a métricas.

Caetano-Chang (1997) aponta que a espessura da Formação Pirambóia é variável, chegando a atingir 270 metros em seções aflorantes na região de São Pedro e Ipeúna.

3.3.3. Formação Botucatu

Na área de estudo, a Formação Botucatu foi delimitada por Sousa (2002) nos degraus dos morros residuais presentes, capeando as rochas ígneas da Formação Serra Geral.

É constituída por arenitos bem selecionados, friáveis ou silicificados de coloração avermelhada, apresentando granulação média a fina e grãos foscas.

As estruturas sedimentares mais comuns são as estratificações cruzadas de grande porte, indicando deposições eólicas em ambiente desértico (IPT, 1981).

3.3.4. Formação Serra Geral

As rochas intrusivas básicas associadas à Formação Serra Geral são representadas por basaltos e diabásios que se desenvolvem na forma de diques e sills, além de derrames pouco espessos e subseqüentes.

Especificamente na área de estudo, essa Formação está claramente exposta nos morros residuais, condicionando suas feições geomorfológicas em relevo tabular (morro do Bizegueli) e piramidal (morro da Guarita), e apresentam típicas disjunções colunares e esfoliação esferoidal (acebolamento) no contato com os arenitos da Formação Botucatu ou Pirambóia.

Estas rochas apresentam-se com estruturas maciças, e coloração que varia de cinza escuro a preta, porém, quando alteradas apresentam cores amareladas.

3.3.5. Formação Itaqueri

Apresentam conglomerados polimíticos e diamictitos, sustentados por matrizes arenosas ou mesmo argilo arenosa, com grande presença de quartzo. Invariavelmente apresentam-se com cores avermelhadas e manchas brancas irregulares.

Segundo Facincani (1995), a distribuição desta unidade estratigráfica ocorre de forma isolada no noroeste do estado de São Paulo, predominantemente no topo das serras de São Pedro e Itaqueri, no entanto, no interior da bacia do ribeirão Monjolo Grande, apresenta-se pontualmente no topo do morro residual de relevo tabular (morro do Bizigueli), delineado pelas rochas básicas e arenitos silicificados das Formações Serra Geral e Botucatu respectivamente.

Facincane (1995) conclui que a combinação entre estratificações cruzadas e plano paralelas da Formação Pirambóia favorecem a ação dos processos erosivos, uma vez que a concentração de argilas expansivas nas áreas de estratificação plano-paralela

favorece a impermeabilização do horizonte, já o ângulo de mergulho das estratificações cruzadas conduz a descarga do material fino, promovendo os movimentos em massa.

3.4. Elementos geomorfológicos e estruturais da paisagem

De acordo com levantamento realizado pelo IPT (1981), a área de estudo insere-se na província geomorfológica denominada Depressão Periférica Paulista (figura 5), mais precisamente, segundo classificação de Almeida (1964), na porção centro oeste da zona do médio Tietê⁴.

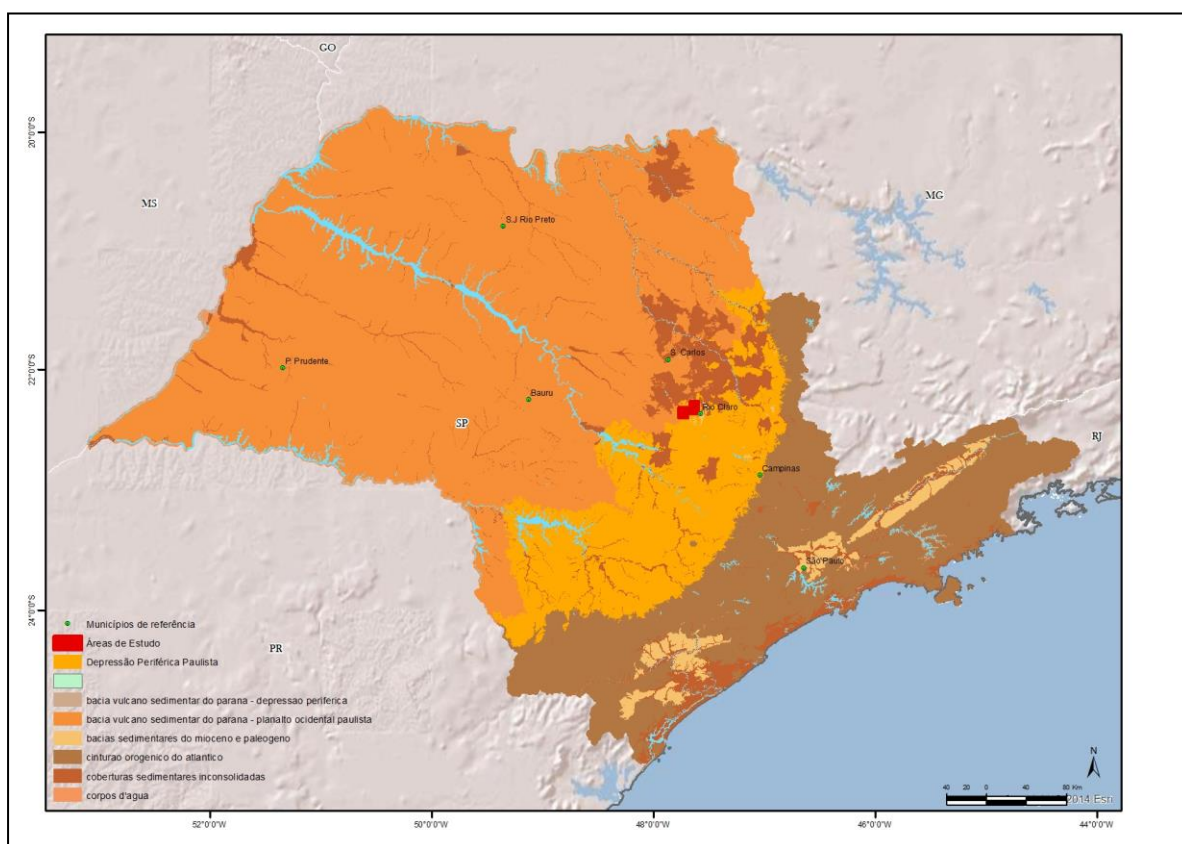


Figura 5: Províncias Geomorfológicas do estado de São Paulo segundo IPT (1981). Fonte: Modificado de Perinotto (2008).

Segundo o autor supra-citado, esta área apresenta relevo predominantemente formado por colinas baixas, de formas convexas suavizadas a retilínea, com topos aplainados e interflúvios com áreas de 1 a 4Km² separadas por vales jovens. Os desníveis da área não ultrapassam os 200 metros, com altitude variando entre 550m e 650m, sem planícies aluviais importantes.

⁴ Almeida (1964) divide a província geomorfológica da Depressão Periférica Paulista em três zonas distintas: I - Zona do Mogi-Guaçu ao norte; II - Zona do Médio Tietê ao centro; III - Zona do Paranapanema ao sul.

Entretanto, os desníveis topográficos mais significativos ocorrem à margem oriental do canal principal do Monjolo Grande, caracterizados por relevos residuais das escarpas festonadas de front da cuesta arenito-basáltica, com vertentes de alta declividade e drenagens entalhadas, constituindo formas de relevo localmente conhecidas sob a denominação de Morro do Bizigueli e Morro da Guarita, que se sobressaem na paisagem local. Segundo IPT (1981), estes residuais estão associados às camadas sedimentares mais resistentes à erosão ou onde afloram litologias vinculadas aos derrames basálticos, atingindo altitudes de quase 1000 m (IGC, 1979).

Ross e Moroz (1997), com base no trabalho de IPT (1981), classificaram o relevo paulista sob nova abordagem⁵, descrevendo que a região da bacia do ribeirão Monjolo Grande insere-se em uma área de formas muito dissecadas, com vales entalhados, associados a vales pouco entalhados, apresentando alta densidade de drenagem. Indicam também que são áreas sujeitas a fortes processos erosivos, com probabilidade de ocorrência de movimentos de massa e erosão linear com desenvolvimento de voçorocas, com um alto nível de fragilidade erosiva.

As características descritas nesta seção apontam, apesar de pequena diversidade geomorfológica, a presença de formas de relevo condicionadas tanto pela estrutura geológica, como pela atuação de agentes externos (típicos de regiões tropicais) responsáveis pela esculturação do relevo.

3.5.Unidades pedológicas

Associados aos siltitos e folhelhos da Formação Corumbataí, os processos pedogenéticos deram origem à Argissolos Vermelho-Amarelo (PV), definidos pelas unidades Serrinha e Santa Cruz. Verifica-se que estas unidades apresentam caráter abrupto entre o horizonte superficial e diagnóstico (Bt), evidenciando alto grau de suscetibilidade à erosão. Ainda sobre a Formação Corumbataí, a carta pedológica demonstra ocorrência de associações entre PV e solos Litólicos (RL).

Em contato discordante ao longo de toda Formação Corumbataí, encontra-se a Formação Pirambóia, de caráter arenítico, mas com alto teor de argila (FANCICANE, 1995). Assim, observa-se nessas áreas a presença de Argissolos da unidade Serrinha, de baixo gradiente textural (textura arenosa) e Argissolos em associação com Li de substrato

⁵ Neste trabalho, os autores consideraram que os processos tectônicos e climáticos são os responsáveis pela gênese das unidades morfoesculturais, que por sua vez, estão inseridas em unidades denominadas morfoestruturais.

arenítico. Ao norte e leste da bacia observa-se também a presença de Neossolos Quartzarênicos profundos (RQ), e associações de Li com substratos de sedimentos finos do Permiano e arenito da Formação Botucatu Pirambóia. Segundo Oliveira e Prado (1981) os solos Li apresentam pequena espessura e se constituem de material de grande imaturidade com elevados teores de minerais primários.

Nos setores de maior altitude, estabelecendo contato direto com a Formação Pirambóia, a Formação Botucatu compõe os degraus dos morros residuais na área, apresentando solos RL e associações de RL com distintos substratos, similares ao descritos anteriormente, ou substratos de basalto e diabásio nos setores de transição com a Serra geral (2001).

A Formação Serra Geral presente nos morros residuais, intercaladas com fácies areníticas (IPT, 1981) originaram solos Li, além de Nitossolo háplico (NX) com grande teor de argila.

Os materiais conglomeráticos mal selecionados da Formação Itaqueri desenvolveram sobre o topo aplainado do morro do Bizigueli Latossolo-Vermelho (LV), unidade Três Barras, de textura média argilosa.

As características geológicas e pedológicas estão sob condições de clima bastante úmido, com verões chuvosos e invernos secos, como descrito a seguir.

3.6.Caracterização de elementos do clima:

Considerando a distribuição das chuvas e as variações de temperatura ao longo do ano, as áreas das bacias dos ribeirão Monjolo-Grande e Jacutinga podem ser enquadrada no tipo CWa, conforme a classificação zonal de Köppen, podendo ser associado ao sub-tropical, com inverno seco e verão chuvoso (figura 6). A média anual da precipitação para a região das Cuestas, no alto curso apresenta índices de 1.450 mm, e as temperaturas anuais médias de 18,7°C. Já para as regiões do médio e baixo curso com menores altitudes, a precipitação média anual não ultrapassa 1.250 mm, apresentando temperatura média anual é de 20,5°C.

Os dados registrados no gráfico acima foram obtidos pelos registros online disponibilizados pelo DAEE para o posto de Ipeúna⁶ e Rio Claro (SP), próximos às bacias de estudo.

⁶ Dados do posto de Ipeúna (SP): **Prefixo:** D4-074 / **Bacia:** Corumbataí / **Altitude** (m):630/ **Latitude:** 22°26' **Longitude:** 47°43'. **Fonte:** DAEE - Sistema de Informações para o Gerenciamento de Recursos Hídricos do estado de São Paulo (SIGRH).

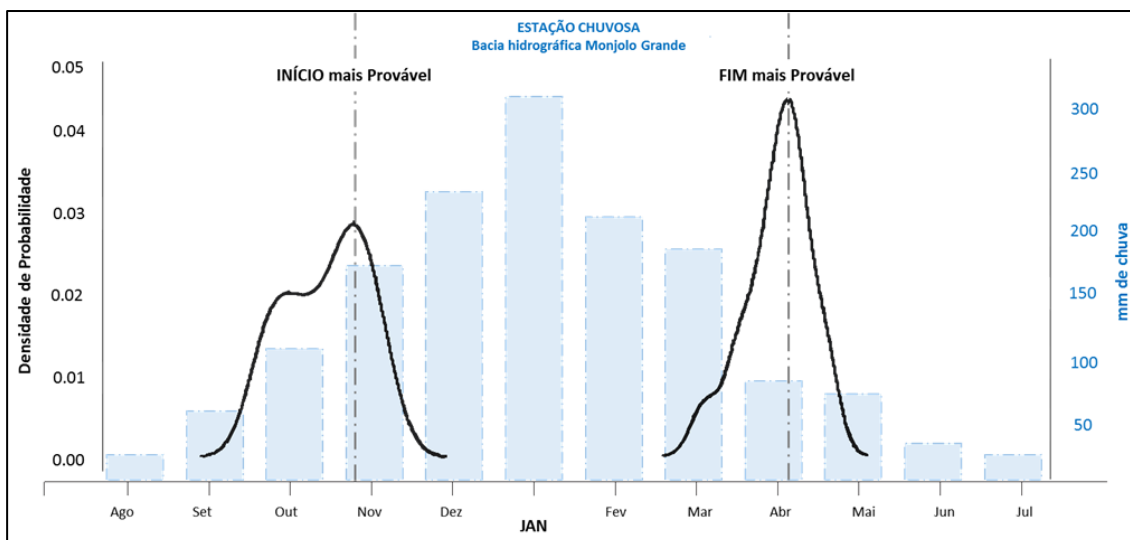


Figura 6: Gráfico da distribuição anual das chuvas, com indicação de início e fim mais provável das estações. Média Mensal de chuvas para o município de Ipeúna e Rio Claro, no período de 1970 a 2004. Posto DAEE: prefixo D4-074.

3.7. Uso da terra e cobertura vegetal natural

A exemplo do padrão de uso e cobertura da terra apresentado pela região nos últimos 50 anos, a área do ribeirão Monjolo Grande vem sendo submetida à intensa ocupação antrópica, com a incorporação de grandes áreas agrícolas em detrimento de matas de encosta, vegetação nativa e principalmente das áreas de cerrado, como já evidenciado em Koffler (1993) e Pereira e Pinto (2007) e Antonello et al. (2008).

O mapa de uso da terra e cobertura vegetal da bacia do rio Corumbataí-SP⁷ para o cenário de 2007, apresentado por Antonello et al. (2008), indica que a bacia de drenagem do ribeirão Monjolo Grande possui um caráter predominantemente agrícola, caracterizado por extensas áreas de pastagem intercaladas por glebas de cana-de-açúcar. A preservação da vegetação nativa restringe-se às áreas protegidas por lei, como aquelas que se encontram nas encostas com declives superiores à 45° (morros do Bizigueli e Guarita), além do mínimo de vegetação ciliar encontrada ao longo dos corpos d'água e a adjacências dos mananciais (PEREIRA E PINTO 2007).

Os autores supracitados afirmam que as áreas do bioma Cerrado presentes nessa área apresentaram um declínio contínuo e acentuado ao longo das últimas 50 décadas, configurando-se como a classe de cobertura vegetal que obteve maior amplitude de redução de área no período em questão. O cerrado sofreu forte pressão por conta da expansão das áreas de pastagem (setores oeste e norte da bacia). Posteriormente, o avanço da cana-de-açúcar determinou sua quase extinção. Pequenos fragmentos do bioma ainda

⁷ A área de drenagem do ribeirão Monjolo Grande configura-se em uma sub-bacia do rio Corumbataí-SP.

ocorrem no setor norte da área da bacia, próximo às áreas de nascente do ribeirão Monjolo Grande e Jacutinga, e no extremo oeste da região, próximo às cabeceiras do rio Passa-Cinco.

4. ABORDAGEM METODOLÓGICA

Um dos atuais desafios das pesquisas no contexto das ciências ambientais é o grande volume de dados digitais acumulados no decorrer do trabalho. Sabe-se que a atual capacidade de coleta e armazenamento de dados é superior ao potencial de análise, o que implica que a desorganização pode indicar a subutilização dos esforços e recursos aplicados no desenvolvimento das atividades, pois dificulta a integração e síntese, ocultando informações relevantes que podem ficar dispersas, além de comprometer o compartilhamento dos resultados. Neste sentido, métodos de estruturação de banco de dados são condições fundamentais da governança dos dados geoespaciais a fim de garantir a assertividade e confiabilidade das informações, e geração de novos conhecimentos.

Considerando o perfil desta pesquisa, caracterizado pelo agrupamento de uma diversidade de dados físico-ambientais, de diferentes naturezas, escalas, qualidade e atributos, obtidos de extensas rotinas de trabalhos de campo e das simulações dos cenários, adotou-se como diretriz a organização de dois bancos de dados complementares – “Dados Modelados” / “Dados Observados”, de modo que para cada grupo de variáveis modeladas haja um correspondente observado/coletado em campo. Os bancos de dados são integrados de modo que haja retroalimentação, sendo que os resultados da aplicação dos modelos sejam os mais representativos da realidade observada, com suas incertezas amenizadas e conhecidas, e sem a necessidade de proceder com o ajuste da predição dos modelos, pois a robustez é uma das sub-análises implícitas nesta proposta. Este exercício cíclico entre observações de campo/simulações de cenário promoveu a estruturação de um arcabouço conceitual, metodológico e de armazenamento de dados consistente, conforme indicado na figura 7.

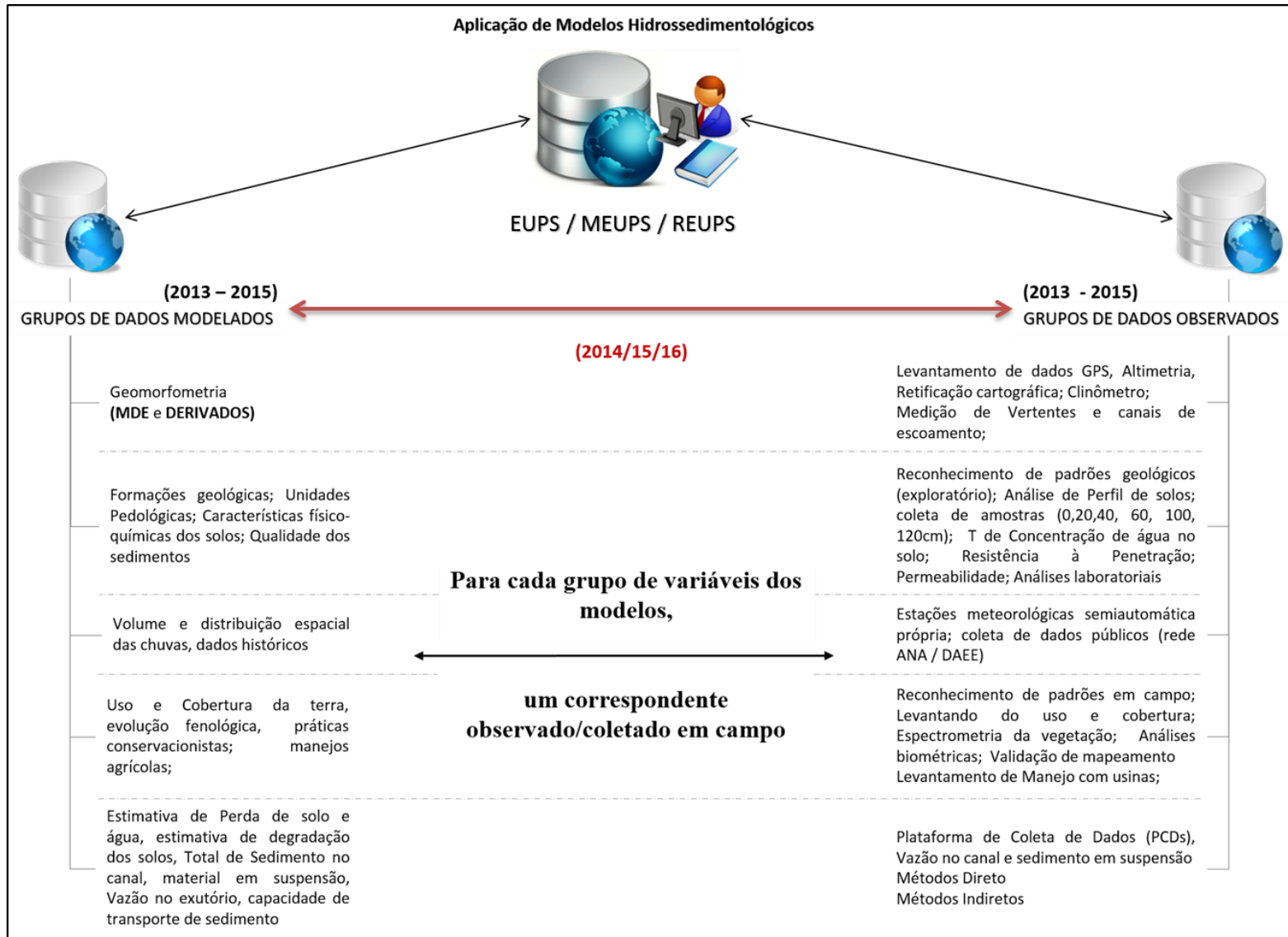


Figura 7: Procedimento de armazenamento de dados obtidos em campo e dados modelados por meio de geoprocessamento.

Importante salientar que todas as análises de campo, para monitoramento e obtenção dos dados hidrossedimentológicos foram realizadas em conjunto com outros pesquisadores envolvidos com as mesmas bacias hidrográficas aqui apresentadas. Assim, não serão contemplados neste trabalho o detalhamento da obtenção dos fatores em campo, pois há trabalhos dedicados especificamente à estas etapas, que podem ser consultados em Spatti Jr. (2015), Correa (2016) e Moraes (2016). A figura 8 indica os trabalhos e autores responsáveis, que abordam exclusivamente cada um dos parâmetros.

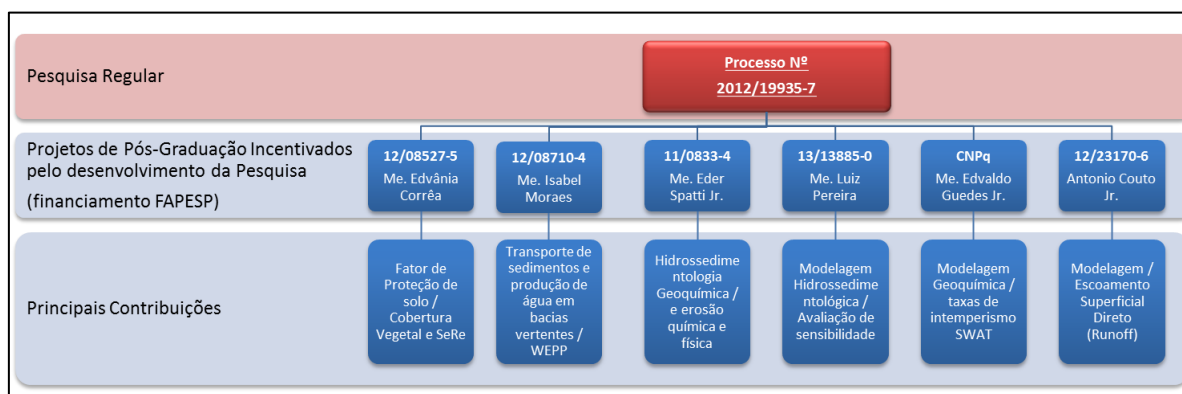


Figura 8: Relação dos desenvolvimentos dos trabalhos de campo executados nas bacias hidrográficas do córrego Monjolo Grande e Jacutinga - SP.

4.1. Estruturação e implementação do banco de dados geográficos (BDG):

Eliminação de incertezas posicional

4.1.1. Base Planialtimétrica

Para a elaboração das bases cartográficas das bacias hidrográficas do ribeirão Monjolo Grande e Jacutinga, foram utilizadas as folhas das cartas topográficas indicadas na tabela 5.

A construção da base cartográfica é a primeira e mais demorada etapa para o desenvolvimento de trabalhos baseados em geoprocessamento (MINOTI, 2006). Jolly (2001) lembra que os resultados finais obtidos num trabalho cartográfico (temático ou de síntese) jamais serão mais precisos que os dados de base iniciais de um projeto. Desta forma, entende-se que é fundamental o cuidado com o processo de digitalização dos dados analógicos (ou até mesmo prévia avaliação daqueles que já se encontram em meio digital), e minúcia nas etapas de vetorização das informações planialtimétricas (X;Y;Z) básicas.

Bacia Hidrográfica	NOME DA CARTA	ESCALA	FONTE	ANO
Ribeirão Jacutinga	SF-23-Y-A-I-4-NO-B	1:10.000	IGC	1979
	SF-23-Y-A-I-4-NO-D	1:10.000	IGC	1979
	SF-23-Y-A-I-4-NO-F	1:10.000	IGC	1979
	SF-23-Y-A-I-4-NE-C	1:10.000	IGC	1979
	SF-23-Y-A-I-4-NE-E	1:10.000	IGC	1979
Ribeirão Monjolo Grande	SF-23-Y-A-I-3-NE-D	1:10.000	IGC	1979
	SF-23-Y-A-I-3-NE-F	1:10.000	IGC	1979
	SF-23-Y-A-I-3-SE-B	1:10.000	IGC	1979
	SF-23-Y-A-I-3-NO-C	1:10.000	IGC	1979
	SF-23-Y-A-I-3-NO-E	1:10.000	IGC	1979
	SF-23-Y-A-I-3-SO-A	1:10.000	IGC	1979

Tabela 5: Cartas topográficas utilizadas para vetorização das áreas

Como parâmetro de ajuste para o georreferenciamento, utilizou-se o conceito de Erro Admissível (ou Tolerável - Et) descrito em IBGE (1999), no qual assume que a menor grandeza (M) medida no terreno capaz de ser representada cartograficamente, equivale a 1/5 de milímetro da escala considerada, ou seja (equação 1):

$$Et = 0,0002 * M \text{ (valores em metros)} \quad (1)$$

Fixado esse limite, determinou-se que o Et do georreferenciamento para todas as folhas das cartas topográficas, de escala 1:10.000, é de, no máximo, 2m.

$$Et = 0,0002 * 10000$$

$$Et = 2m$$

Apesar da precisão obtida no georreferenciamento das cartas topográficas, observa-se que os procedimentos adotados na digitalização de mapas analógicos condicionam diversas distorções às informações espaciais, de modo que haja alteração no arranjo (X,Y) dos dados, e alterações da geometria dos elementos representados.

Considera-se que estes erros resultam do acúmulo de imprecisões existentes nos procedimentos de digitalização, como, por exemplo: a) Irregularidades no mecanismo de digitalização; b) Imprecisão no georreferenciamento; c) Imprecisão na vetorização dos arquivos digitais. Para minimizar as incertezas derivadas das imprecisões mencionadas, foi dada especial atenção à retificação cartográfica (tópico 4.1.3).

4.1.2. Vetorização das Cartas

Visando obter modelos numéricos do terreno precisos e com geometrias de superfície suavizadas para atender à escala de trabalho, tomou-se o cuidado para evitar a generalização do número de vértices criado durante a edição vetorial das feições espaciais representadas por linha, como as curvas de nível e a hidrografia.

Neste sentido, é importante destacar que a edição generalizada destas feições interfere negativamente no processo de interpolação dos valores (independente do método de interpolação aplicado), comprometendo as áreas curvas, tornando-as excessivamente angulosas e retilíneas, resultando, por exemplo, em relevos de estrutura piramidal, com grande quantidade de arestas e planos geométricos, além de quebras de formas de relevo inexistentes. Consequentemente, importantes parâmetros derivados são afetados.

4.1.3. Retificação da Base Cartográfica

O componente de erro mais explorado, que é motivo de preocupação constante tanto em Cartografia como em Geoprocessamento, é a incerteza quanto à localização. A exatidão de posicionamento é dada pelo erro na posição ou na localização, com relação ao sistema de referência da base de dados, com pontos bem definidos. Assim, foi estabelecido procedimento para realizar a retificação dos produtos cartográficos de base, referente ao recobrimento das bacias hidrográficas, com base em dados GPS de precisão (pós-processados) obtidos em campo, conforme figura 9.

Com base na imagem orbital IKONOS (1m), foram extraídas informações como vicinais; carregadores centrais em áreas de canal; áreas urbanas e bairros rurais, para evidenciar as possibilidades de acesso e determinação dos Pontos de controle. Com base nestas informações, também foram determinados todos os pontos de coleta de amostras de solo e outros dados do meio físico. A figura 10 indica os padrões geométricos adotados como critério para seleção de feições na imagem e coletada em campo.

As configurações do receptor GPS foram ajustadas conforme especificações indicadas pela ABNT, NBR 13133 (1994) para obtenção da precisão desejada (tabela 6).

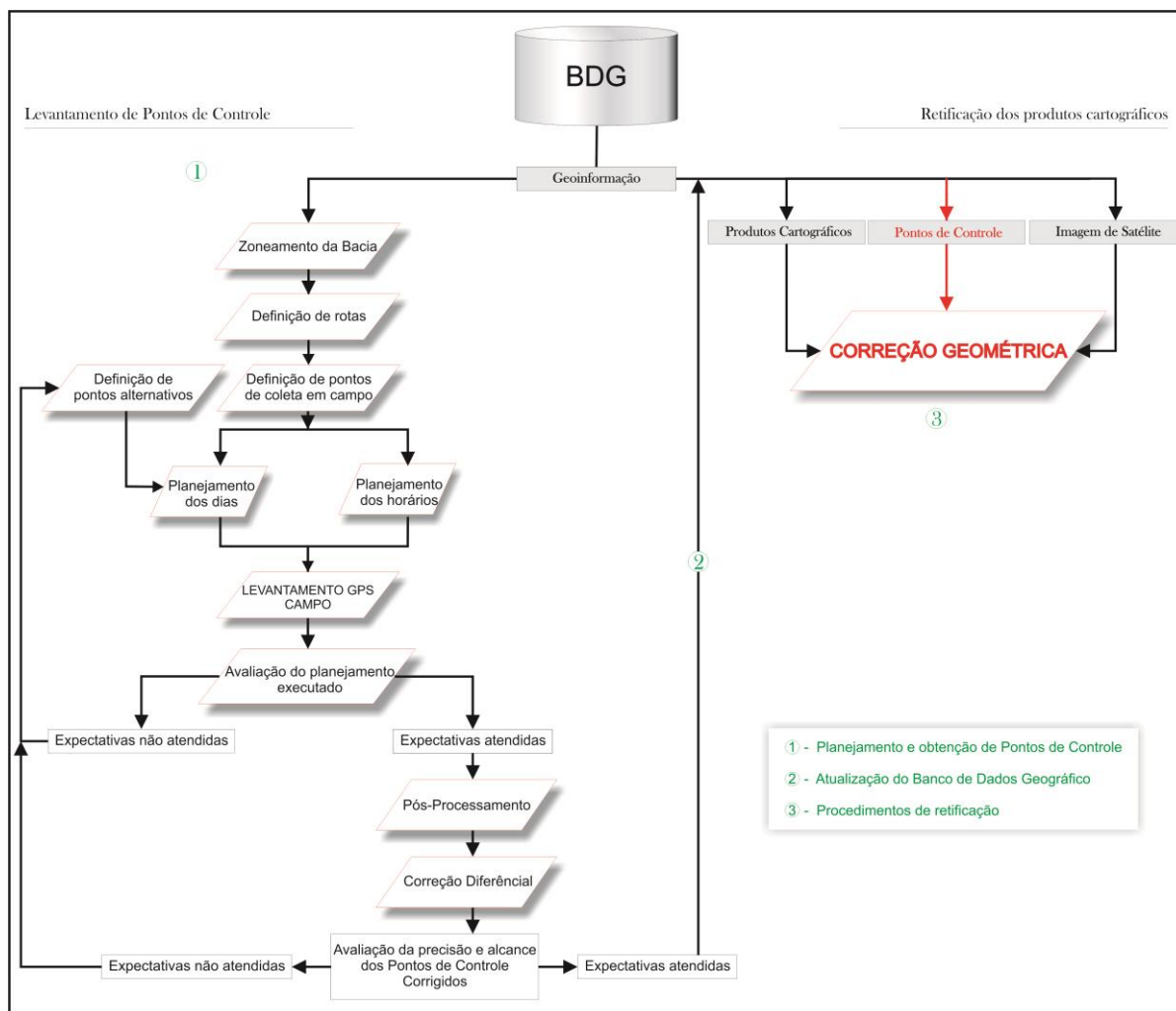


Figura 9: Planejamento e execução do levantamento de dados GPS e correção geométrica dos pontos.
Fonte: Autor

Tabela 6: Configurações e ajustes GPS

Configurações de registro	Características
Altura da antena	1,5m
Intervalo de registro	5 seg.
Configurações de GPS	Características
Máx. PDOP	6,0
Mín. SNR	39,0
Máscara de elevação	25°
Filtro	Ativado apenas em áreas com obstruções para coleta de dados
Sistemas de Coordenadas	Características
Sistema	UTM
Fuso	23S
Datum	WGS-84
Referência de Altitude	Elipsoíde (HAE)
Unidades	Características
Distância	Metros
Lat/Long	Graus/Minutos/Segundos

Fonte: Adaptado de ABNT, NBR 13133 (1994)

Entre os fatores já comumente adotados, destaca-se a restrição para o registro de dados dos satélites que estejam inferiores à 25° de elevação (máscara de elevação) entre a antena e a linha do horizonte, pois é fundamental para garantir a qualidade dos dados, diminuindo a possibilidade de registro de ruídos. Deve-se dar importância ao tempo estático para coleta dos pontos. Observou-se que 90 segundos estático garante elevada precisão do pós-processamento dos dados, mesmo em dias de elevada presença de nuvens, e /ou presença de árvores de grande porte no entorno da área de interesse.

Imagens

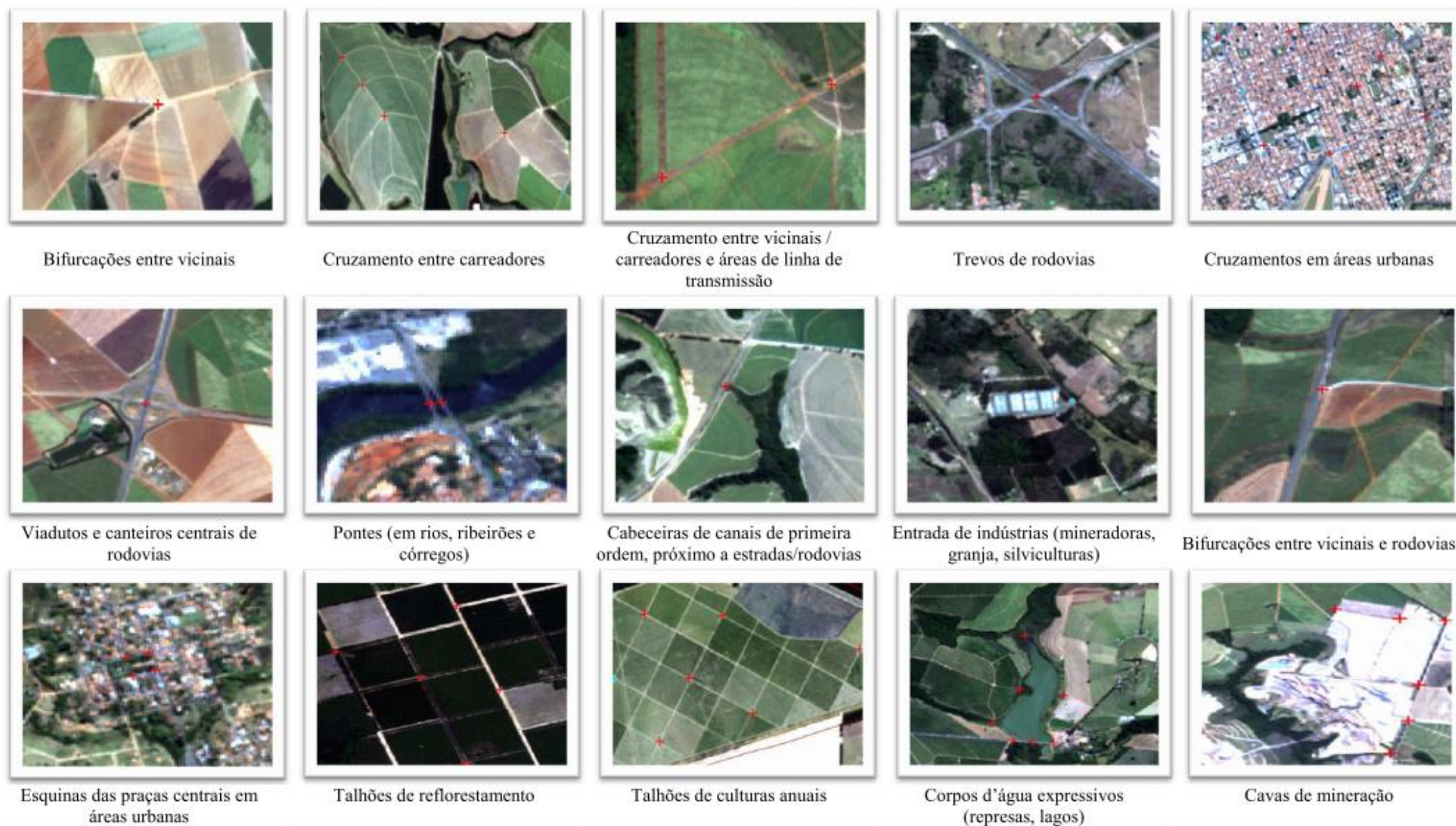


Figura 10: locais selecionados para coleta de Pontos de Controle.

O ajuste para precisão desejado foi obtido pelo pós-processamento dos dados, com o método da correção diferencial, no qual recupera-se os dados registrados no mesmo dia e horário por um receptor/antena fixa, denominado de Base (como os GPS da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo – RBMC/IBGE, ou aqueles de instituições privadas).

Os dados obtidos em campo foram transferidos e armazenados no Banco de Dados Geográfico para avaliação e correção por meio do software GPS Pathfinder Office. Em ambiente SIG, os dados coletados foram comparados ao planejamento inicial, e programando pontos de revisita quando pré-requisitos como quantidade de pontos, distribuição, ou precisão não foram atingidos.

Para realizar a correção diferencial das coordenadas obtidas em campo, utilizou-se duas bases de dados

- SCNet / Santiago&Cintra – Estações particulares;
- RBMC / IBGE – Estação de referência em São Paulo – SP (Poli-USP);

Deu-se preferência aos dados da base SCNet pela proximidade entre a Base e o Rover (< 50Km em qualquer ponto da bacia), o que permite maior cobertura e precisão dos dados pós-processamento. Quando os dados desta base não foram disponibilizados para os dias e horários de interesse, utilizou-se a base RBMC/IBGE. A relação dos dados utilizados para os dias de coleta em campo está indicada na tabela 7.

Tabela 7: Base de dados utilizada para o pós-processamento dos dados

Base de dados utilizada para Pós-Processamento dos dados	
GPS	Base de dados Fixa
Data de campo	
17/12/2013	RBMC/IBGE
18/12/2013	SCNet/Santiago&Cintra
19/12/2013	SCNet/Santiago&Cintra
20/12/2013	RBMC/IBGE
Data de campo	Base de dados Fixa
20/02/2014	RBMC/IBGE
05/05/2014	SCNet/Santiago&Cintra
17/07/2014	SCNet/Santiago&Cintra
18/08/2014	RBMC/IBGE

4.1.4. Levantamento de Solos e Esboço Fotopedológico

Conforme destacado em Pereira (2010) na modelagem de perda de solos, os valores para área de estudo serão tão precisos quanto for o grau de detalhe apresentado pela carta pedológica. Desta forma, os esforços na extração e obtenção dos outros parâmetros de entrada envolvidos nos modelos podem ser descartados se o mapeamento pedológico não acompanhar a mesmo detalhamento de informações, pois haverá generalização das estimativas de perda, na ordem da maior escala cartográfica utilizada. Está generalização não está associada diretamente à sensibilidade dos modelos, mas sim à resolução matricial destas informações. Como será demonstrado adiante, a partir da carta pedológica derivam-se inúmeros outros fatores, justificando a degradação desta informação.

Desta forma, especial atenção foi dada a obtenção destes dados e informações. Tendo como fundamentação metodológica as técnicas de fotopedologia amplamente divulgadas, e apoiando-se principalmente na proposta por Amaral (1972), e classificação das unidades pedológicas mapeadas, conforme Demattê (2010), foram obtidos os primeiros esboços fotopedológicos das áreas de estudo. Com o apoio da base cartográfica (1:10.000 – IGC/SP, 1979), e dos trabalhos de levantamento de solos realizados por Oliveira e Prado (1984), determinou-se primeiramente 6 unidades fotopedológicas e suas respectivas classes de solo: Unidade I – Neossolo Litólico, Unidade II – Neossolo Quartzarênico, Unidade III – Neossolo Câmbico, Unidade IV – Argissolo Vermelho Amarelo, Unidade V – Latossolo Vermelho Amarelo e Unidade VI – Depósitos Fluviais+Gleissolo.

Sobre a base cartográfica, foram identificadas topossequências representativas para análise, bem como os pontos de tradagem para a verificação das unidades fotopedológicas. Ressalta-se que as atividades de campo para levantamento de informações nas duas bacias para refinar o limite e caracterização das unidades pedológicas foram constantes.

Foram definidas 4 topossequências por bacia, totalizando 24 pontos de tradagem (figura 11) As amostras foram coletadas a cada 20 cm até a profundidade de 1 m. Seguindo os procedimentos de Embrapa (1999), realizou-se análise visual, textural e granulométrica das amostras. A análise granulométrica foi realizada pelo método da pipeta (EMBRAPA, 1997), no Laboratório de Geoquímica Ambiental – LAGEA/IGCE/UNESP - Rio Claro (SP). A análise química das amostras de superfície visou a obtenção dos valores de PH, matéria orgânica, N total, K, Na, Ca, Mg, P, CTC, saturação de bases, Al e Fe, feita pelo Laboratório de Ciências Agrárias/Solos -

FZEA/USP – Pirassununga (SP). Todas as análises indicadas são utilizadas para determinação da classificação das unidades pedológicas.

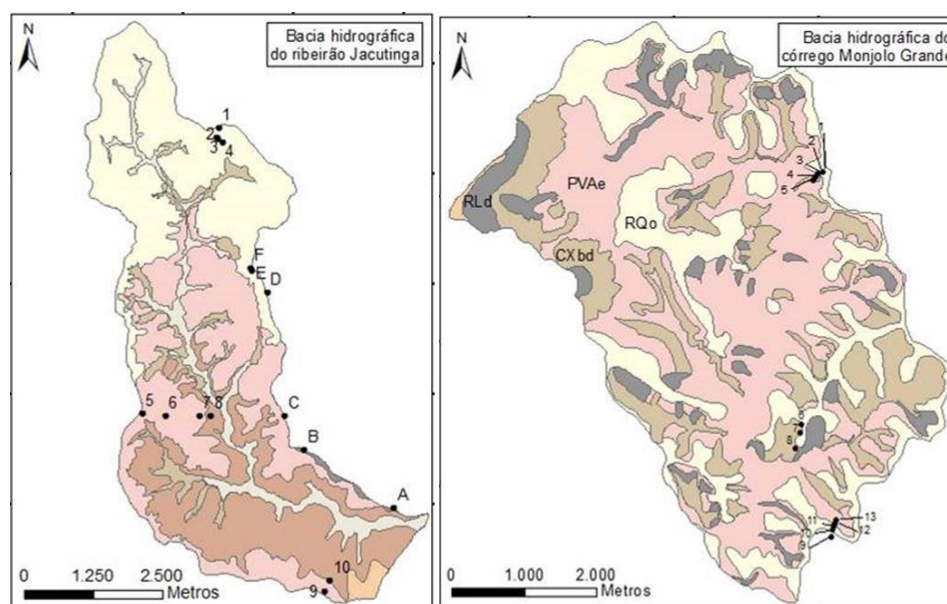


Figura 11: Esboço Fotopedológico das bacias do ribeirão Jacutinga e Monjolo Grande. Definição das topossequências e pontos de tradagem em áreas representativas.

Fonte: Correa et al. (2016).

4.2. Extração dos parâmetros da EUPS, MEUPS e RUSLE

As questões inerentes ao problema da escala de análise, já discutidas no tópico 2.2, condicionaram fortemente os procedimentos adotados na extração de cada fator contemplado na modelagem. Em especial, o artigo realizado por Chaves (1991) sobre a sensibilidade global dos parâmetros da equação, no qual conclui que o fator topográfico (LS) é o de maior sensibilidade relativa ($S_r < 0,5$), foi decisivo para se determinar que a extensão de vertente (L) e a declividade (S) deveriam ter os valores o mais detalhados possível, para que sua influência se igualasse aos outros fatores no resultado final, uma vez que as observações de campo e a bibliografia disponível para a área da bacia, apontam que as condições de relevo peculiares da área de estudo interferem fortemente no processo de erosão superficial dos solos. Desta forma, reforça-se a importância em avaliar diferentes procedimentos de extração de dados do fator topográfico que possibilitassem modelar a vertente em sua complexidade, mapeando as áreas de concavidade e convexidade para uma mesma topossequência. Consequentemente, o fator K (erodibilidade para cada unidade pedológica) também se caracteriza como elemento determinante, uma vez que as formações Piramboia e Botucatu contribuem com o

material arenoso no solo, e as abruptas rupturas de declive permitem a acumulação de argila, o que exigiu o detalhamento do mapa pedológico existente.

Conforme apresentado na tabela 2, os modelos EUPS, MEUPS e REUPS compartilham em grande parte os mesmos parâmetros, mudando a lógica de combinação dos dados. As equações 2, 3 e 4 descrevem detalhadamente os modelos.

$$\text{(EUPS)} \quad A = R \cdot K \cdot [0,00984 (L^{0,63} \cdot S^{1,18})] \cdot C \cdot P \quad (2)$$

$$\text{(MEUPS)} \quad Y = [89,6 (Q \cdot qp)^{0,56}] \cdot K \cdot [0,00984 (L^{0,63} \cdot S^{1,18})] \cdot C \cdot P \quad (3)$$

$$\text{(RUSLE)} \quad A = R_t \cdot K \cdot [0,00984 (L^{0,63} \cdot S^{1,18})] \cdot C_t \cdot P \quad (4)$$

Em que:

R – fator R, é função da erosividade da chuva, isto é do poder erosivo das chuvas, obtido a partir de formulação que inclui energia cinética das chuva e sua intensidade (MJmm/ ha.h); **R_t** corresponde à sazonalidade das chuvas; **Q** = volume de escoamento superficial (m³); **qp** = vazão pico do escoamento superficial (m³/s); **K**= erodibilidade do solo (t/ha); **L** = extensão de vertente (m) **S** = declividade (m/m = %); **C** = uso da terra / cobertura vegetal/manejo (adimensional); **C_t** = Subfator de crescimento da vegetação **P** = práticas de conservação (adimensional).

A seguir são indicados os procedimentos adotados para obtenção de cada uma das variáveis em ambiente SIG

4.2.1. Fator Topográfico (LS)

Com adaptações às condições brasileiras, Bertoni e Lombardi Neto (1994) ajustaram a proposta inicial de Wichmeier e Smith (1978), e reapresentaram o cálculo de Williams (1975), conforme indicado a seguir (equação 5):

$$LS = 0,00984 * (L^{0,63}) * (S^{1,18}) \quad (5)$$

Definiu-se, analogamente, extensão de vertente como o conceito de rampa descrito por Christofolletti (1980), em que representa a porção da vertente onde há o predomínio de transporte de material, compreendida entre o início da primeira quebra de relevo, a partir da área do divisor, e o início da secção da vertente onde a dinâmica deposicional é mais expressiva.

Desta forma, foi adotada a abordagem proposta por Valeriano (2003) para extração dos divisores de água; Desmet e Govers (1996) para o cálculo da extensão de vertente, e com trabalho de campo para mapeamento das áreas de deposição ao longo do canal principal. Estas etapas estão detalhadas a seguir:

4.2.2. Identificação das áreas de deposição no nível de base da bacia

Assim como as áreas aplainadas dos divisores, foram também delimitadas as áreas onde predominam a dinâmica deposicional, como as várzeas, os leitos maiores, ou mesmo as alças de meandros onde o volume de material depositado é maior que o de material retirado.

Uma vez que estas áreas não podem ser extraídas por produtos de sensoriamento remoto quando na presença de mata-galeria, foi realizado um caminhamento pelo canal principal do ribeirão Monjolo Grande e Jacutinga, com GPS de precisão, por toda sua extensão.

Em observações de campo, além das áreas de deposição sedimentar; foram também mapeadas soleiras (rupturas no canal); áreas de forte controle estrutural como cotovelos; áreas de confluência, condições de preservação da mata ciliar, uso da terra no entorno, divisões de propriedades rurais e informações gerais de contexto.

4.2.3. Determinação da extensão de vertente (L)

Como já mencionado, o cálculo da extensão da vertente foi obtido a partir da proposta de Desmet e Govers (1996), por ser o modelo que pode melhor representar as variações da geometria das vertentes. A proposta de Desmet e Govers (1996) é indicada pela seguinte formulação (equação 6):

$$L_{i,j} = \frac{(A_{i,j-in} + D^2)^{m+1} - (A_{i,j})^{m+1}}{(D^{m+2}) * (X_{i,j})^m * (22.13^m)} \quad (6)$$

Em que:

$L_{i,j}$	Fator de comprimento de vertente de uma célula com coordenadas (i, j);
$A_{i,j-in}$	Área de contribuição de uma célula com coordenadas (i, j) (m^2)
D	Tamanho da grade de células (m);
$X_{i,j}$	Valor da direção do fluxo
m	Coeficiente Angular que assume os valores:

O mapa da área de contribuição ($A_{i,j-in}$) foi obtido a partir da modelagem hidrológica disponível no SIG ArcGis, representada pelo mapa de fluxo acumulado. Este, por sua vez, é obtido da direção do fluxo, que é derivado do MDE (tabela 8).

Tabela 8: Mapas temáticos envolvidos na aquisição da variável contribuição de área.

Produto	Mapas Temáticos envolvidos	Unidade de medida
$(A_{i,j-in})$	(1-) MDE	Pixel
	(2-) Direção de Fluxo	Pixel
	(3-) Fluxo Acumulado	Pixel

Fonte: modificado de Desmet e Govers (1996)

O valor de $A_{i,j}$ é expresso em m^2 pois representa o produto do mapa de fluxo acumulado pela área do pixel ($2m^2$).

Já os valores de m (coeficiente angular), foram obtidos conforme Silva (2003), da seguinte forma (tabela 9):

Tabela 9: Determinação do coeficiente angular (m)

Produto	ETAPAS		
m	1ª – Mapa de declividade em (%) (s)	2ª – reclassificação	3ª – definição dos valores de m
	$s < 1$	1	0,2
	$1 > s < 3$	2	0,3
	$3 > s < 5$	3	0,4
	$s > 5$	4	0,5

Fonte: modificado de Silva (2003)

4.2.4. Determinação do fator de declividade (S)

Desmet e Govers (1996) comentam que para o cálculo do fator S, pode ser mantida a equação apresentada por Wischmeier e Smith (1978), como (equação 7):

$$S = 0,00654s^2 + 0,0456s + 0,065 \quad (7)$$

4.2.5. Determinação e obtenção dos dados do fator de erodibilidade do solo (K)

Juntamente com o fator topográfico, nesta pesquisa foi dada especial atenção à determinação dos dados de erodibilidade do solo. Como o mapa pedológico disponível

para a área da bacia apresenta escala de publicação de 1:100.000 (Prado e Oliveira, 1981), optou-se por realizar o refinamento dos limites das classes pedológicas por meio de técnicas de sensoriamento remoto e coleta de amostras em campo de modo a compatibilizar as escalas, e assim permitir maior precisão e variabilidade de informações no resultado da estimativa do aporte de sedimentos.

Desta forma, os procedimentos de detalhamento das unidades pedológicas e levantamento dos limites, tiveram quatro etapas bem definidas, como indicado na tabela 10.

Tabela 10: procedimentos técnicos adotados para detalhamento do mapa pedológico

ETAPAS	Procedimentos	Principais materiais utilizados
1 ^a	Descrição do meio físico e definição da legenda do esboço fotopedológico.	Bibliografia; observações de campo; suporte de MNT
2 ^a	Esboço fotopedológico	Produtos de sensoriamento remoto (fotografias aéreas e imagens orbitais)
3 ^a	Coleta de amostras em campo	GPS; Trado, formulários de campo,
4 ^a	Correção e finalização do esboço fotopedológico	Sistemas de informações Geográficas

Fonte: Dados da pesquisa

A primeira etapa consistiu na análise e descrição detalhada das características do meio físico, principalmente da rede hidrográfica e configuração geomorfológica. Realizou-se análise da bibliografia e dos documentos cartográficos de base, juntamente com as informações dos MNTs, como o mapa de classes de declividade. Nesta etapa foram definidas as possíveis unidades pedológicas que ocorrem na área de estudo, determinando a legenda inicial do esboço fotopedológico com base no Sistema Brasileiros de Classificação de Solos (EMBRAPA, 1999).

A segunda etapa consiste nos procedimentos de fotointerpretação, e elaboração preliminar do esboço fotopedológico. As técnicas para realização desta atividade são largamente difundidas desde a década de 1930, e consistem basicamente no processo de diferenciação e delimitação de unidades com base nos diferentes padrões fisiográficos observados. A metodologia empregada pode ser consultada em Ricci e Petri, 1965; Fiore e Soares, 1976; Oliveira e Brito, 2007.

Assim, a extração dos dados das unidades pedológicas foi obtidas por meio de procedimentos convencionais de fotointerpretação (pares estereoscópicos e elaboração de

overlays) com fotografias aéreas verticais apresentadas em níveis de cinza, de escala aproximada 1:25.000 (23x23cm). As fotografias utilizadas referem-se ao aerolevante realizado no ano de 1962 pela empresa Terra Foto S.A.

Finalizado o primeiro esboço fotopedológico, estabeleceu-se ainda em laboratório, diversos perfis de topossequência a fim de precisar os limites previamente traçados no overlay. A coleta de amostras de solo em campo seguiu rigorosamente os procedimentos estabelecidos por Embrapa (1996), assim como a realização de análises visuais e de textura durante a coleta, com diversas observações registradas em formulário.

Com as observações e com os registros levantados em campo e esboço fotopedológico atualizado, foi acrescido ao BDG e às informações referente a cobertura pedológica da área de estudo.

Importante salientar que o mapeamento se restringiu ao 2ª nível categórico (subordem) definido por Embrapa (1999).

Com a legenda do mapa pedológico definida, foi possível determinar os valores de erodibilidade (K) e tolerância a perda de solos (T), conforme tabelas disponíveis em Donzeli et al. (1992), Mannigel et al. (2002) e Silva (2005), conforme indicado na tabela 11.

Tabela 11: Valores para tolerância de perda (T) e erodibilidade (K) para os solos da bacia hidrográfica do ribeirão Monjolo Grande.

Unidade de solo		Fatores	
		Tolerância (T) (MJ.mm/ha.h)	Erodibilidade (K) (t/ha)
RU	Neossolo Flúvico	-	-
LV	Latossolo Vermelho	14.2	0.0133
RQ	Neossolo Quartzarênico	10.2	0.022
Cx	Cambissolo	3.67	0.035
PV	Argissolo Vermelho	9.1	0.0438
RL	Neossolo Litólico	4.2	0.049

Fonte: Adaptado de Donzeli et al. (1992), Embrapa (1999), Mannigel et al. (2002) e Silva (2005)

Os valores de Tolerância a perda de solo não integram diretamente o cálculo final dos modelos, contudo, esses valores servem para avaliar se a perda está dentro de limites quantitativos toleráveis, uma vez que a erosão é um processo natural.

4.2.6. Obtenção dos dados para determinação do fator de uso da terra e cobertura vegetal natural (C)

Para determinação do fator de uso da terra, primeiramente foram indicadas as classes temáticas presentes na área da bacia, como indicado em Anderson et al., (1976), assim como a caracterização fitofisionômica de cada classe a fim de facilitar as análises dos resultados e diminuir a subjetividade no procedimento de fotointerpretação e delimitação dos alvos.

Para caracterização das classes temáticas foram analisadas as características espectrais de atributos dos alvos, com especial atenção às formas, padrões texturais, cor e arranjo dos elementos. As técnicas de fotointerpretação foram realizadas conforme indicado em Miler e Muller (1961), Avery (1962), Ray, (1963), Ricci e Petri, (1965), Anderson (1979), Lillesand e Kifer (1979).

A seguir, na Tabela 12, estão indicadas e caracterizadas as classes temáticas definidas para o mapeamento segundo Anderson (1979) e Donzeli et al. (1986).

Tabela 12: Especificações das classes de uso da terra e cobertura vegetal

Classes temáticas de uso da terra	Aspectos fitofisionômicos
Mata Natural	Formação Vegetal inteiramente dominada por árvores de estrutura complexa, apresentando grande riqueza de espécies. Possui três estratos, classificados em relação à seu porte: estrato superior, intermediário e inferior, variando de 3 a 20 metros de altura. Dentro desta classe também incluiu-se as vegetações consideradas naturais, como as matas ciliares e as matas de encosta.
Silvicultura	São formações disciplinadas e homogêneas quanto a sua essência, plantadas de forma condensada para suprimento industrial, e em talhões isolados para consumo interno dos estabelecimentos rurais.
Cana-de-açúcar	Geralmente em grandes áreas, apresentam formas regulares. Possuem talhões bem definidos e carregadores de pequeno espaçamento, o cultivo da cana de açúcar ganha destaque por ser o principal produto agrícola da região de Piracicaba. De maneira que os aerolevantamentos são realizados durante vários meses do ano, uma mesma coleção de fotos pode conter diferentes fases do desenvolvimento da cana, que vai desde seu brotamento até sua fase de corte. Diferentes estágios do mesmo alvo manifestarão diferentes respostas espectrais.
Pastagem	Este tipo de área caracteriza-se por uma cobertura graminóide e herbácea, em sua maior parte, artificiais. Observa-se a ausência de árvores. São áreas de topografia suave e seus limites normalmente são curvilíneos.
Pasto degradado	São Campos com pequenas árvores e arbustos esparsos, disseminados num substrato graminóide, geralmente barba-de-bode e capim gordura.

	Sua vegetação arbustiva de porte atrofiado pode atingir até 3 metros de altura.
Áreas Industriais	Tais feições antrópicas de ocupação apresentam características bastante particulares e conspícuas nas imagens.
Solo exposto	Áreas ausente de qualquer formação vegetal, em que se evidencie unicamente a exposição de solo. Inclui-se nessa classe as áreas também aquelas destinadas ao preparo agrícola.

Fonte: Anderson (1979) e Donzeli et al. (1986).

Definidas as classes, foram atribuídos os valores do fator C, conforme indicado em Donzeli et al. (1992), Pinto (1991) e Formaggio et al. (1996), e Correa (2015), conforme tabela 13.

Tabela 13: definição dos valores do fator C para cada classe temática

Classes temáticas de uso da terra	Valores do fator C
Área Urbana	0
Mata natural	0,0001
Pastagem	0,005
Silvicultura	0,0158
Pasto degradado	0,03
Cana-de-açúcar	0,05
Solo exposto	1

Fonte: Donzeli et al. (1992) e Formaggio et al. (1996), Correa (2015)

Para determinação da proteção média da vegetação, considerando os diferentes estágios de desenvolvimento fenológico, e conseqüentemente, as diferentes capacidades de proteção ao solo, conforme necessidade do modelo REUPS (fator Cr), utilizou-se a proposta de Correa (2015), que estabelece correlação entre os valores de NDVI de imagens orbitais com valores do fator C.

4.2.7. Determinação do fator de práticas conservacionistas (P)

Com o intuito de detalhar os valores das práticas conservacionistas (fator P) de acordo com as condições de relevo presente em cada propriedade rural levantada, optou-se por utilizar o modelo de cálculo dos valores desenvolvido por Wishmeier e Smith (1978) e ajustado por Bertoni e Lombardi Neto (1990) (equação 8).

$$P = 0.69947 - 0.08991 * s + 0.01184 * s^2 - 0.000335 * s^3 \quad (8)$$

Em que:

s = Classes de declividade (%)

As classes de declividade foram definidas segundo as propostas metodológicas de EMBRAPA (1999) e Ramalho Filho e Beek (1995), os quais definiram os intervalos das classes, respectivamente, segundo a ocorrência de unidades pedológicas e segundo o grau de limitação ao desenvolvimento de culturas agrícolas por suscetibilidade à erosão.

Desta forma apresenta-se a seguir a tabela 14 com as classes de declividade, e os valores obtidos para P:

Tabela 14: Definição dos intervalos de classe para os dados de declividade segundo proposta de EMBRAPA (1999) e Ramalho Filho e Beek (1995)

Classes de Declividade (%)	Relevo (EMBRAPA, 1999)	Grau de limitação ao cultivo agrícola (RAMALHO FILHO e BEEK, 1995)	Valores obtidos para o fator P
0 a 3	Plano	Nulo (N)	0,24
3 a 8	Suave ondulado	Ligeiro (L)	0,27
8 a 13	Ondulado	Moderado (M)	0,51
13 a 20		Forte (F)	0,57
20 a 45	Forte ondulado	Muito Forte (MF)	0,62
45 a 100	Montanhoso	Extremamente forte	0,67
> 100	Escarpado		0,80

Fonte: Embrapa (1999), Minotte (2006), Ramalho Filho e Beek (1995) e Minoti (2006)

Assim, o mapa do fator práticas conservacionistas foi derivado do mapa de classes de declividade.

Contudo, a experiência em campo indica que a adoção de práticas conservacionistas não é garantidora de manejos eficientes em termos de conservação de água e solo, uma vez que a implementação inadequada das técnicas (aterros mal alocados, curvas de nível subdimensionadas, subsolagens em camadas próximo à superfície) podem comprometer o ambiente físico favorecendo a intensificação de processos erosivos.

Desta forma, deve-se chamar atenção para que o reconhecimento e mapeamento dos elementos sinteticamente agrupados como “práticas conservacionistas”, e convencionalmente mapeados por meio de técnicas de fotointerpretação (seja em produtos derivados de sensores a bordo de plataformas aéreas ou orbitais), sejam complementados com informações adicionais obtidas em campo.

4.2.8. Determinação dos fatores hidrológicos: escoamento superficial (runoff)

De acordo com Williams (1975), pode-se determinar o fator Q e qp pela seguinte relação (9):

$$\text{Runoff} = 89,6 * (Q * qp)^{0,56} \quad (9)$$

Estes parâmetros são os últimos a serem obtidos na equação, pois sua aquisição depende, indiretamente, de informações como extensão de vertente, declividade, uso e cobertura da terra, manejo e tipo de solo.

4.2.9. Fator (Q)

O volume de escoamento superficial, (Q_{runoff}) foi calculado através do método de abstração (USDA-SCS, 1973), como indicado em Williams (1975), Chaves (1991) e Lombardi Neto et al. (1994), por meio da equação 10.

$$Q_{i,j} = \frac{(Im - 0,2Sa)^2}{(Im + 0,08Sa)} \quad (10)$$

Em que:

$Q_{i,j}$	Volume do escoamento superficial em uma célula com coordenadas (i, j), para um determinado evento chuvoso (mm)
Im	Quantidade máxima do volume de precipitação em 1 hora (mm)
Sa	Parâmetro de retenção da água pelas características de superfície do terreno.

O Parâmetro de retenção (Sa) segundo (Genovez, 1993) varia em função de: (a) relação solo / uso / manejo / declividade; (b) com o tempo, em função do conteúdo de água no solo. Desta forma, este parâmetro é derivado do índice número da curva (CN) desenvolvido pelo USDA-SCS (Soil Conservation Service, 1972), em que seus valores variam de 0 a 100, correspondendo respectivamente de uma cobertura permeável, até uma cobertura totalmente impermeável.

Assim, apresentam-se a seguir o cálculo para determinação dos valores de Sa (8), e a tabela 12 com os índices de CN, que relacionam as classes de solo obtidas para a área da bacia, com as classes de uso da terra e cobertura vegetal extraídas. Os valores foram obtidos para cada pixel.

$$Sa = 254 \left(\frac{100}{CN} - 1 \right) \quad (8)$$

Tabela 15: Valores de Curva Número que expressam a relação entre Solo/Uso e cobertura da Terra/manejo e condições de infiltração da água no solo.

Unidades pedológicas presente na bacia do ribeirão Monjolo Grande (Grupo Hidrológico)				
CLASSES DE USO DA TERRA	RQ / Depósitos Arenosos (A)	LV (B)	PV (D)	RI e Cx (E)
Cana-de- açúcar	50	60	75	83
Pastagem	59	67	81	86
Pastagem degradada	60	66	82	87
Mata Nativa	18	25	58	70
Silvicultura	25	36	64	75
Solo Exposto	25	80	92	95
Área urbana	100	100	100	100

Valores de CN extraídos de Setzer e Porto (1979) e Lombardi Neto et al. (1989). As letras (A); (B); (C), (D) e (E), representam os grupamentos hidrológicos dos solos, divididos segundo propriedades físicas e suas taxas de infiltração.

Já a Intensidade Média de Precipitação (I_m), segundo Genovez (1993), é considerada a máxima média observada num intervalo de tempo de recorrência, obtida pela seguinte equação (11).

$$I_m = \frac{K \cdot (T)^a}{(t+b)^b} \quad (11)$$

Em que:

T = Período de retorno, em anos

t = Duração da precipitação, (min)

K, a, b, c = parâmetros relativos a localidade, conhecidos como parâmetros da equação Intensidade, Duração e Frequência da precipitação.

O tempo de retorno considerado para a determinação do I_m da bacia hidrográfica foi de 30 anos. Este valor é opcionalmente obtido, pois pode ser representado por qualquer quantidade de chuva (mm) que o pesquisador opte em modelar. Contudo, baseou-se no IDF ajustado para Rio Claro-SP e região, obtido por Moruzzi e Oliveira (2009), conforme figura 12.

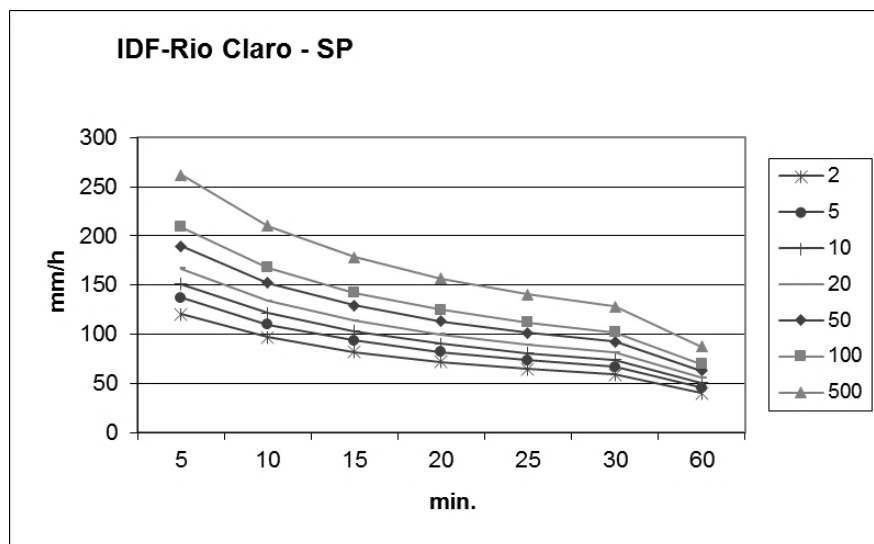


Figura 12: Curva IDF obtida para Rio Claro-SP.
Fonte Moruzzi e Oliveira (2009).

De posse dos valores e índices apresentados, obtiveram-se os seguintes mapas (tabela 16):

Tabela 16: relação de mapas temáticos elaborados para a obtenção do mapa de escoamento superficial (Q)

Produto	Mapas Temáticos envolvidos	Unidade de medida
(Q _{i,j})	(1-) CN	-
	(2-) Sa	-
	(3-) Im	Mm/hr

4.2.10. Fator (qp)

A vazão pico (qp) representa a vazão máxima que ocorre com um dado evento de chuva. Configura-se como um indicador da força erosiva das chuvas intensas e é usada no cálculo da perda de sedimentos (GENOVEZ, 1993), e foi elaborada pelo USDA-SCS (1973) com a seguinte formulação (12):

$$q_p = 0,0028 * A * \frac{Q}{T_c} \quad (12)$$

Em que:

qp _{i,j}	Vazão Pico derivada de um hidrograma triangular hipotético, (m ³ /s)
Q	Volume do escoamento Superficial (mm)
A	Área da bacia hidrográfica (ha) - (considerou-se a área do pixel)
Tc	Tempo de concentração da bacia (hr)

A determinação do Tc pode ser obtida, segundo Genovez (1993) pela seguinte equação (11):

$$T_c = \frac{L^{0,8} * (\frac{1000}{CN} - 9)^{0,7}}{1900 * S} \quad (13)$$

Em que

$T_{c,i,j}$	Tempo de concentração da bacia (hr)
$L_{i,j}$	Extensão de vertente (m)
CN	Valores do índice Número da Curva
S	Grau de Declividade (%)

Aquino (2008) indica que o tempo de concentração representa o tempo que a água precipitada na parte superior de cada pixel levará para chegar à saída deste mesmo pixel e começar a contribuir para o pixel seguinte.

4.2.11. Fator R

Os valores de Erosividade (Fator R) foram determinados com base nos dados pluviométricos históricos disponíveis na estação meteorológica de Rio Claro /CEAPLA/IGCE/UNESP, considerando a média histórica de registros, conforme equações a seguir.

$$EI_{\text{mensal}} = 67.355 * (r^2/P)^{0.85}$$

Em que:

EI_{mensal} = é a erosividade média anual (MJ.mm/ha -¹hano)

r = precipitação média mensal (mm)

P = precipitação média acumulada anual (mm)

$$R = \sum EI_{\text{mensais}} \quad (14)$$

Para considerar a variabilidade anual da capacidade erosiva das chuvas, segmentou-se as análises em três períodos distintos, conforme o padrão sazonal de distribuição de chuvas. Desta forma, buscou-se avaliar a influência do total de chuva na resposta do modelo.

R_{anual} – Dados de chuva em um ano hidrológico típico; (valor de R – 7.800 MJ.mm/ha -¹hano);

R_{chuva} – Dados de chuva observados para um ano atípico, com chuvas extremas, (anomalias positivas - Valor de R – 10.300 MJ.mm/ha -¹hano));

R_{seca} – Dados de chuva para um ano hidrológico atípico, com anomalias negativas de precipitação; (Valor de R – 2.500 MJ.mm/ha -¹hano).

4.3. Simulação de cenários: escala de análise, volume de chuva e modelos hidrossedimentológicos

A fim de avaliar a influência da escala de análise na sensibilidade do conjunto de dados e nos resultados das estimativas, foram simulados diferentes cenários, variando a resolução espacial e volume de chuva, conforme indicado na figura 13.

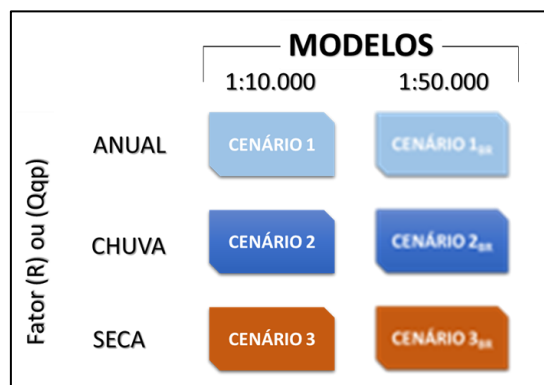


Figura 13: Simulação de cenários. Variação das escalas de análise (1:10.000 e 1:50.000) e volumes de chuva.

Fonte: Autor

Desta forma, cada bacia hidrográfica, entendida como um conjunto de dado individualizado (figura 14), foi submetida à aplicação dos modelos, fornecendo registros para as combinações “Bacia x Escala x Chuva” em 36 cenários simulados.

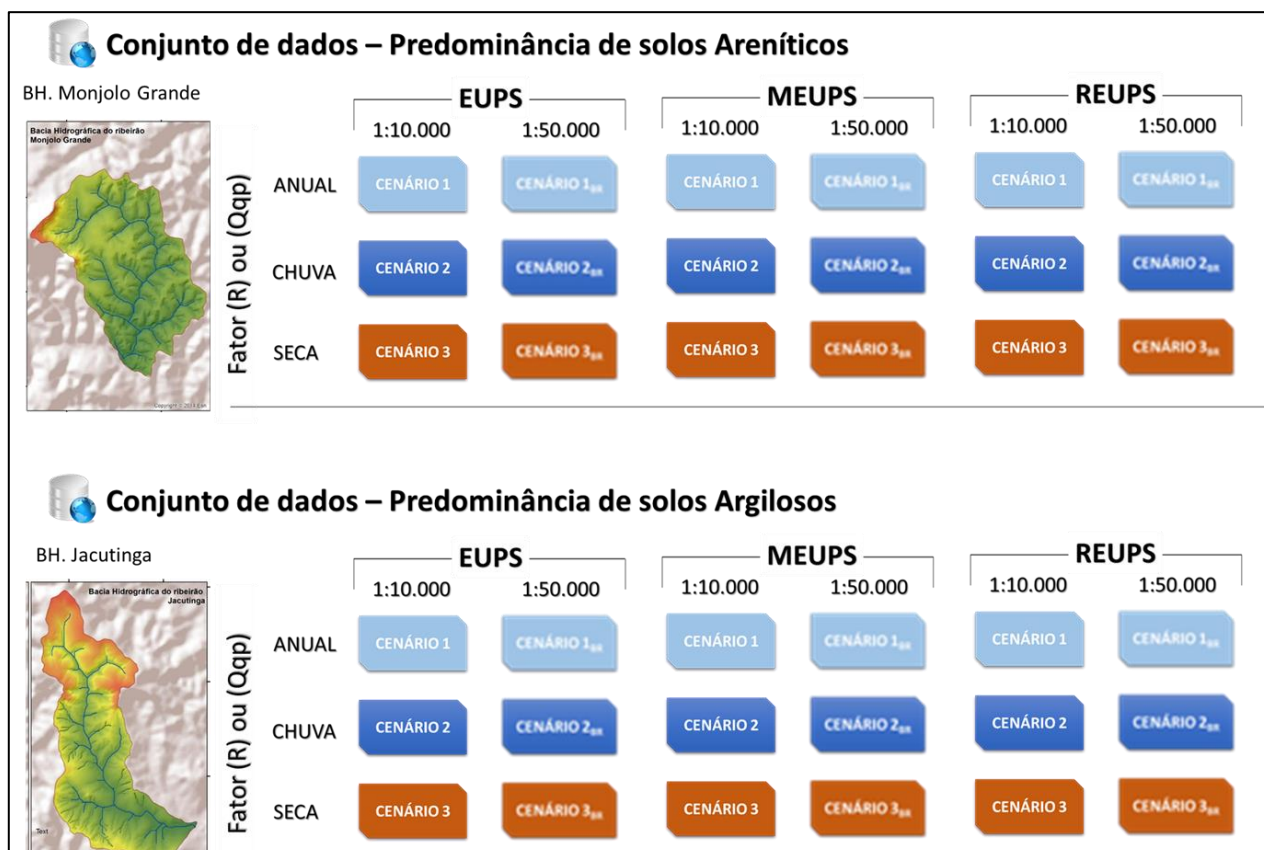


Figura 14: Organização dos conjuntos de dados para condução das simulações de cenários e análises de sensibilidade.

Posteriormente, definiu-se uma grade regular de pontos amostrais, com espaçamento de 30 X 30m, para extração dos valores, e realização das estatísticas. Assim, para cada um dos pontos, definiu-se suas coordenadas X, Y, e atribuiu um campo de atributo para armazenar os valores de cada um dos parâmetros envolvidos nos modelos, bem como os valores totais de perda de solo para o mesmo ponto (Figura 15).

Desta forma, cada ponto amostral contém o registro da descrição numérica dos atributos que condicionaram o valor final de perda de solo para cada um dos modelos. Ou seja, em uma tabela armazenou-se a variabilidade de valores da variável dependente (EUPS, MEUPS, REUPS), e de suas variáveis explicativas para posterior condução das análises de sensibilidade e incerteza.

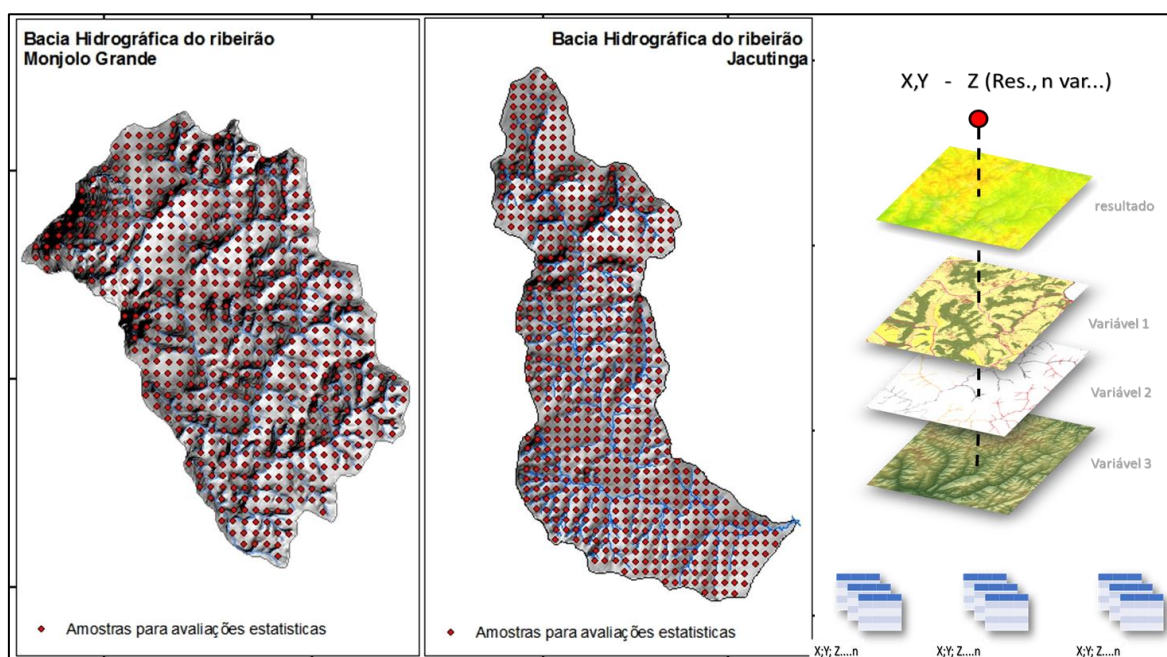


Figura 15: Amostragem regular de pontos em ambiente SIG para extração de valores dos parâmetros contemplados nos modelos, e estimativas finais.

Fonte: Autor

4.4. Análise de sensibilidade e incerteza:

A análise de sensibilidade para os modelos foi realizada conforme apresentado por Evangelista e Freitas (2006) e Silva (2009), em que cada parâmetro de entrada é variado individualmente, enquanto os outros são mantidos constantes. Para isso, adotou-se o Índice de Sensibilidade Relativa (IS) conforme demonstrado na equação 15.

$$IS = \frac{\frac{R_1 - R_2}{R_{12}}}{\frac{I_1 - I_2}{I_{12}}} \quad (15)$$

em que:

IS - índice de sensibilidade do modelo aos parâmetros de entrada; R1 - resultado obtido com o modelo para o menor valor de entrada; R2 - resultado obtido com o modelo para o maior valor de entrada; R12 - a média dos resultados obtidos com o menor e o maior valor de entrada; I1 - o menor valor de entrada; I2 - o maior valor de entrada e I12 - média dos valores de entrada.

A tabela de análise considerou a reunião de N possibilidades de combinações dos condicionantes físicos e hidrológicos à erosão, conforme variabilidade espacial do terreno modelado, além de considerar as variações de escala espacial (resolução matricial), e variabilidade de 3 cenários de chuva (a – anual; c – chuve; s – seco). Os valores de chuva foram os únicos considerados homogêneos na aplicação do modelo. Todos os valores foram normalizados como porcentagem de influência, para que se estabelecesse uma relação de magnitude entre as variáveis, modelos, escalas e cenários de chuva. Quanto maior o índice obtido, mais sensível ao parâmetro será o modelo.

Assim, a análise de sensibilidade foi baseada no estudo dos parâmetros e variáveis de entrada dos modelos considerados, a fim de indicar aqueles que, quando modificados, influenciam de maneira significativa os resultados finais.

Após o entendimento do comportamento da sensibilidade, e considerando que cada parâmetro contribui com um grau de incerteza no resultado final do modelo, aplicou-se modelos geoestatísticos de Regressão Geograficamente Ponderada (GWR), a fim de obter valores de referência (ajustados), e avaliar o grau de distanciamento dos valores preditos (figura 16). Maior distanciamento entre valores preditos e ajustados indicam maiores incertezas. A condução desta análise foi realizada conforme indicado em; Reungsang et al., (2009) e Jeong et al., (2010).

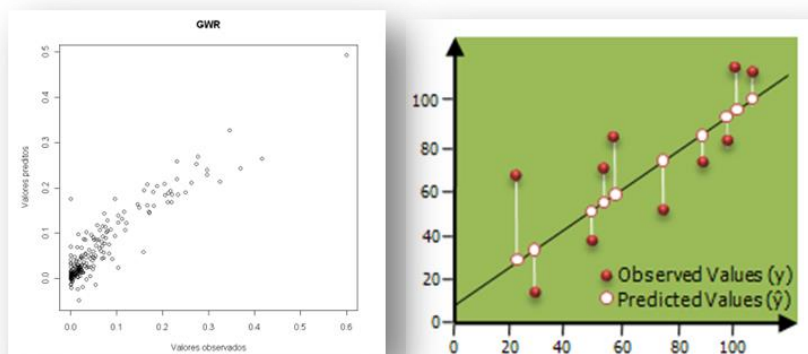


Figura 16: Regressão Geograficamente Ponderada como estratégia da determinação das incertezas nas estimativas dos modelos

5. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

5.1.Retificação Cartográfica: precisão espacial para estruturação do Banco de Dados Geográficos.

Conforme os procedimentos descritos no item “4.1.3” para realização das atividades de coleta dos pontos de controle em campo, e pós-processamento (correção diferencial), apresenta-se na tabela 17 a distribuição do percentual dos pontos coletados em função da precisão obtida. Vale destacar que os pontos obtidos pelo método absoluto cinemático também foram considerados, justificando assim a elevada quantidade de pontos corrigidos (aproximadamente 80.000 posições).

Tabela 17: Síntese dos pontos de controle coletados em campo: Distribuição da precisão estimada para as posições corrigidas obtidas nas atividades de campo realizado nos dias

Precisão	Pontos absolutos	Porcentagem
		%
0 – 15 cm	-	-
15 – 30 cm	-	-
30 – 50 cm	-	-
0,5 – 1,0 m	8.687	10,9
1,0 – 2,0 m	50.849	48,7
2,0 – 5,0 m	18.092	28,5
> 5,0 m	1.993	2,28

Total de posições corrigidas: 79.621

Os dados com precisão igual ou superior a 5m (2,3%) podem ser justificados por pontos coletados próximo a corpos d’água expressivos; grande cobertura de nuvens no instante do registro e coleta de pontos em horários em que as geometrias dos satélites não favoreciam PDOPs adequados. Estes fatores condicionam o efeito de multicaminhamento dos sinais de satélite, e refletem na menor precisão na coleta de informações terrestres.

Os dados coletados entre 0,5 e 1m (11%), e 1 a 2m (48%) podem ser considerados coletas realizadas em situações ótimas, já que as configurações do receptor GPS utilizado garantem precisão entre 3 e 5m (28,5%).

O planejamento prévio dos dias e horários, e tempo de permanência (estático) para registro do sinal foram os principais fatores para a elevada precisão dos resultados obtidos. Vale destacar que as orientações indicadas por IBGE (1999) em relação ao erro tolerável (e adotados para desenvolvimento deste trabalho) exclui para retificação

cartográfica o uso dos dados com precisão inferior à 2m. Desta forma, foram disponibilizados aproximadamente 60.000 pontos de controle.

Todos os pontos de controle foram inseridos no banco de dados, e auxiliaram no processo de georreferenciamento das cartas topográficas e ortorectificação de produtos de sensoriamento remoto, garantindo grande precisão geométrica e posicional a todos os mapas geomorfométricos derivados das cartas topográficas das bacias hidrográficas.

Com ampla nuvem de pontos de controle, todas as informações são rigorosamente co-registradas. Este procedimento garante que a análise dos cruzamentos de dados não se submeta a erros de sobreposição, condicionando falsos resultados, que poderiam mascarar a sensibilidade ou incerteza.

5.2. Modelagem digital do terreno e refinamento pedológico

Na bacia hidrográfica do córrego Monjolo Grande tem-se a ocorrência de cinco principais classes de solos, conforme indicada na tabela 18, e espacializado na figura 18a.

Tabela 18: Classes de solos e respectiva ocorrência na bacia hidrográfica do córrego Monjolo Grande

Classes pedológicas	Área (Km²)	Área (%)
Argissolo Vermelho Amarelo distrófico, A moderado, textura franco arenosa, relevo ondulado /forte ondulado.	12,75	43,98
Latossolo Vermelho amarelo, distrófico, A moderado, textura franco, relevo suave ondulado.	0,09	0,32
Neossolo Litólico, distrófico, A moderado, textura franco argilo arenosa, relevo forte ondulado a montanhoso.	2,44	8,42
Neossolo Quartzarênico órtico , distrófico, A moderado, relevo suave ondulado/ondulado.	7,30	25,17
Cambissolo háplico ,distrófico, A moderado, textura franco argilo arenosa, relevo forte ondulado.	6,41	22,11
Total	28,00	100,00

Os Argissolos Vermelhos Amarelos, ocorrentes em 43,98% da área de estudo, são verificadas, predominantemente, nas áreas de média e baixa vertente, cujos formatos são, predominantemente, convexos e retilíneos, com orientação de fluxo divergente. Tais unidades de solo são ocorrentes em relevo de ondulado a forte ondulado, cujas classes de declividade variam de 13 a 45%. Nas áreas dos topos de interflúvios, localizadas em relevo plano a ondulado (declividades variando de 0 a 20%) e com topos marcadamente convexos e de fluxo divergente, há o predomínio de solos profundos, de textura arenosa, associados à classe dos Neossolos Quartzarênicos. Nos afluentes de 3ª ordem, localizados na média e baixa bacia, os quais apresentam controle estrutural representado por ângulos

de confluência do tipo “reto”, no sentido W-E e E-W, tem-se a presença de Neossolos Litólicos com substrato sedimentar exposto nas margens dos canais.

A tabela 19 apresenta as principais classes pedológicas identificadas para a bacia do ribeirão Jacutinga.

Tabela 19: Classes de solos e respectiva ocorrência na bacia hidrográfica do ribeirão Jacutinga

Classes pedológicas	Área (Km²)	Área (%)
Neossolo Quartzarênico órtico, Ta distrófico, A moderado, relevo suave ondulado a ondulado	8,81	30,41
Argissolo Vermelho Amarelo, Ta eutrófico/distrófico, textura franco argilo arenosa a argilosa, A moderado, relevo suave ondulado	8,38	28,94
Neossolo Flúvico , Tb distrófico, textura argilosa, relevo plano/suave ondulado	2,52	8,69
Neossolo Litólico, distrófico/eutrófico, A moderado, textura franco argilo arenosa, relevo ondulado a forte ondulado	0,12	0,42
Cambissolo háplico, Ta distrófico/eutrófico, típico, A moderado, textura franco argilo arenosa relevo ondulado a forte ondulado	8,81	30,41
Latossolo Vermelho Amarelo, distrófico, textura franco argilo arenosa, relevo suave ondulado	0,33	1,13
Total	28,00	100

Os Argissolos Vermelhos Amarelos, ocorrentes em 29% da área de estudo, estão localizados nas áreas de alta, média e baixa vertentes coincidentes com a ocorrência de relevo suave ondulado a ondulado.

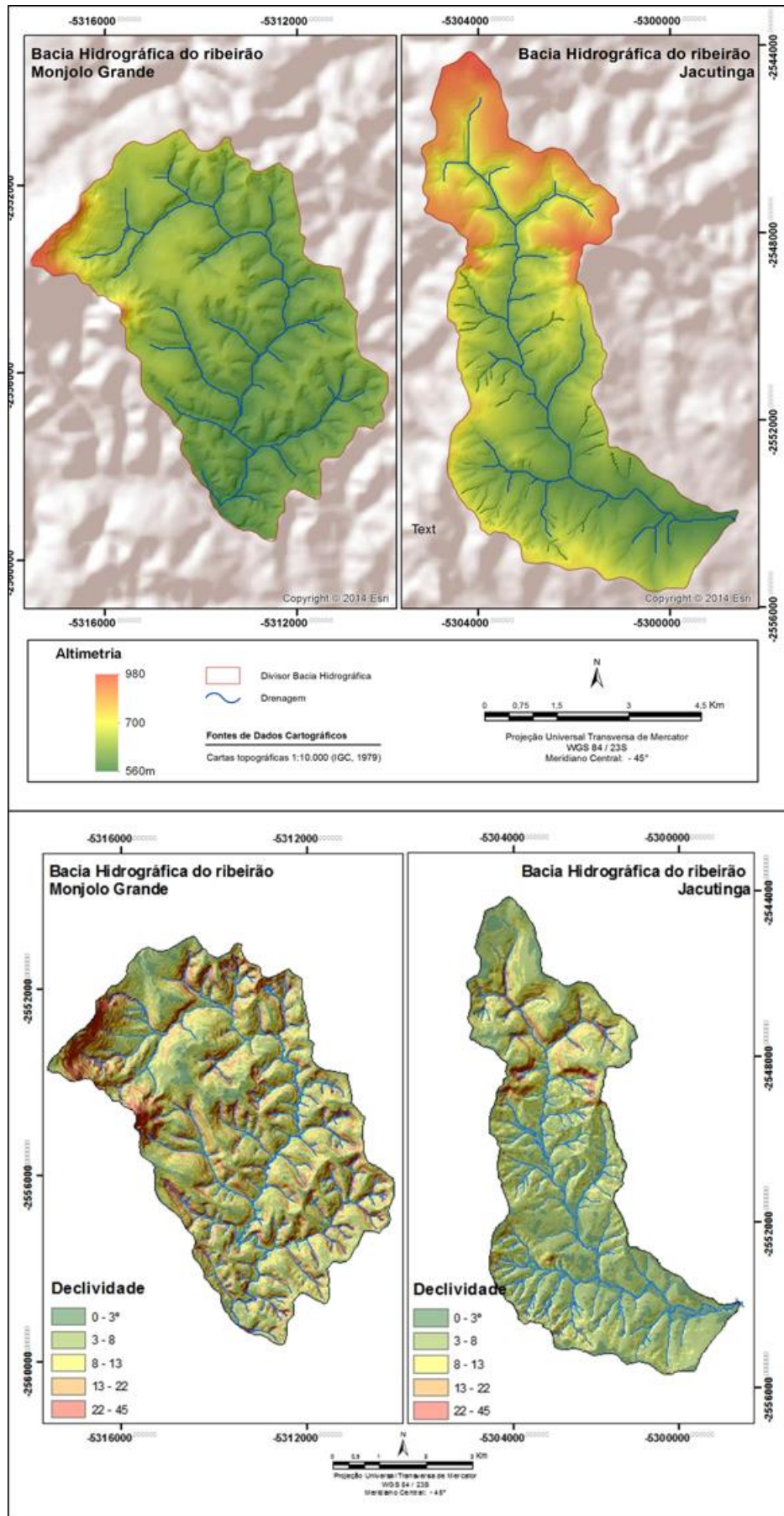


Figura 17: A) Mapa hipsométrico. B) Classes de declividade

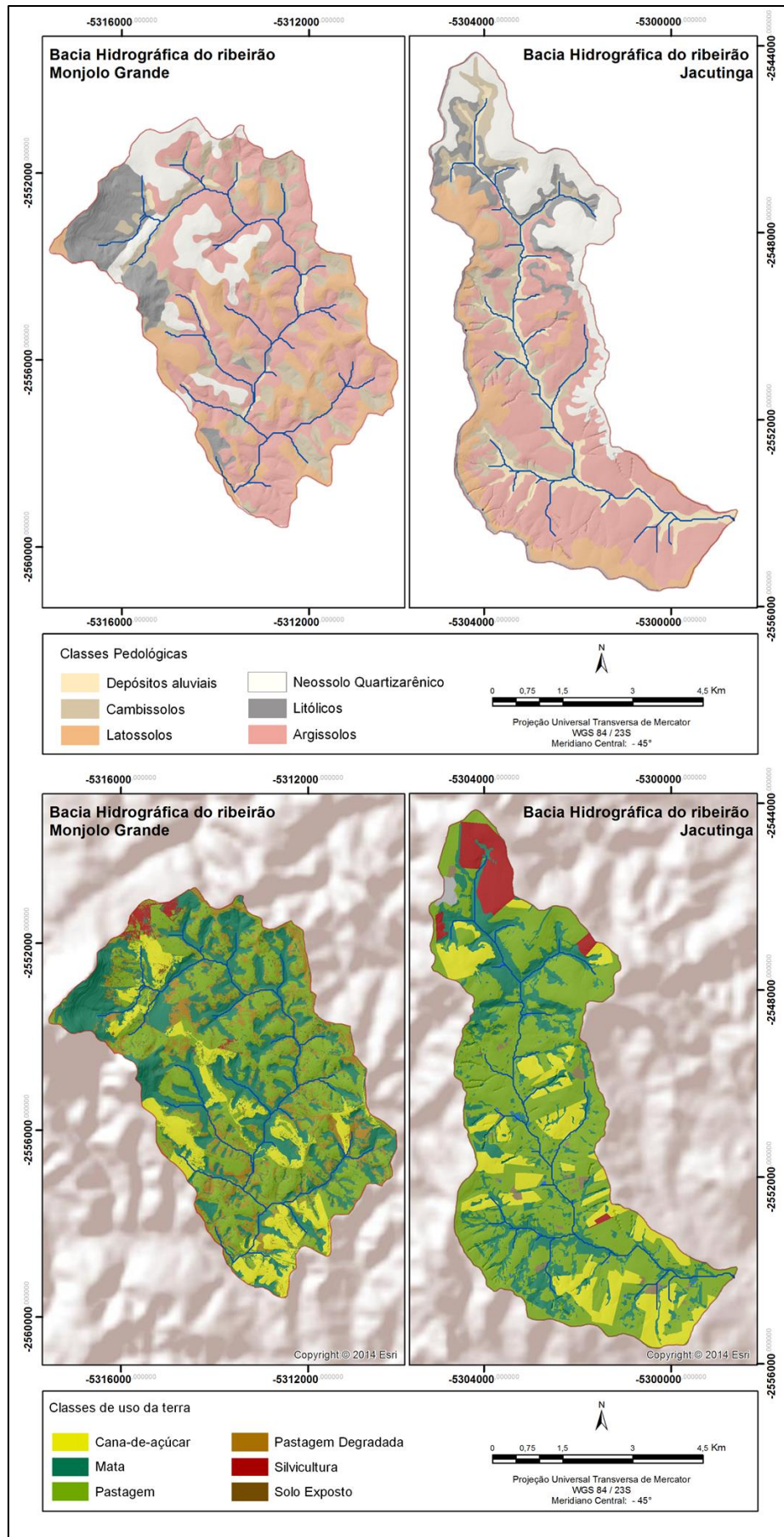


Figura 18 A) Classes pedológicas; B) Mapa de Uso da terra e cobertura vegetal

Tem-se a ocorrência destas unidades nas áreas da Formação Corumbataí, coincidentes com os limites de transição com a Formação Pirambóia. Devido aos materiais de origem (argilitos e arenitos), tais unidades apresentaram classes texturais variando de franco argilo arenosa (alto curso) a argilosa (médio e baixo curso). Tais unidades apresentaram a existência de mudança textural abrupta entre os horizontes E e B, significativo de horizonte B textural, baixa e média saturação por bases (valores variando de 11% a 67%) indicativos de distrofia e eutrofia.

Em associação com os arenitos da Formação Pirambóia, localizados no alto curso da bacia hidrográfica do ribeirão Jacutinga, tem-se a ocorrência de Neossolos Quartzarênicos profundos.

5.3. Variabilidade espacial da perda de solo, conforme aplicação dos modelos EUPS, MEUPS, REUPS

Conforme discutido inicialmente, há um grande número de publicações que se dedicam à integração dos dados conforme lógica dos modelos EUPS, REUPS e EUPS, bem como apresentação dos seus parâmetros individualmente. Não é o objetivo deste trabalho realizar a caracterização de cada um dos elementos dos termos componentes, mas sim, avaliar a qualidade e comportamento dos dados, entender como se combinam, com qual intensidade e qual influência exercem nos resultados finais. Assim, será apresentado uma breve descrição dos totais de perda de solo para as bacias estudadas, conforme variação da aplicação dos modelos, resolução espacial, chuva e erosividade das chuvas.

A figura 19 apresenta uma comparação dos totais de perda de solo estimado entre as bacias hidrográficas, conforme variação dos valores de chuva (Média anual, Média chuva – considerando um ano de anomalias positivas; e Média seca – considerando um ano de anomalias negativas), bem como a comparação dos resultados entre modelos.

Todos os modelos apresentaram comportamentos semelhantes no sentido de estimar maiores valores de perda de solo para a bacia do Monjolo Grande (predominantemente arenosa, e declividades acentuadas), em relação às perdas para a bacia do ribeirão Jacutinga, que apresenta maiores teores de argila e relevo suave, com desníveis menos acentuados, conforme figura 17 a e b. Os valores de perda também foram coerentes com o aumento dos valores de chuva, com exceção da REUPS que apresentou redução dos valores de perda de solo com aumento das chuvas simuladas, em relação à média Anual.

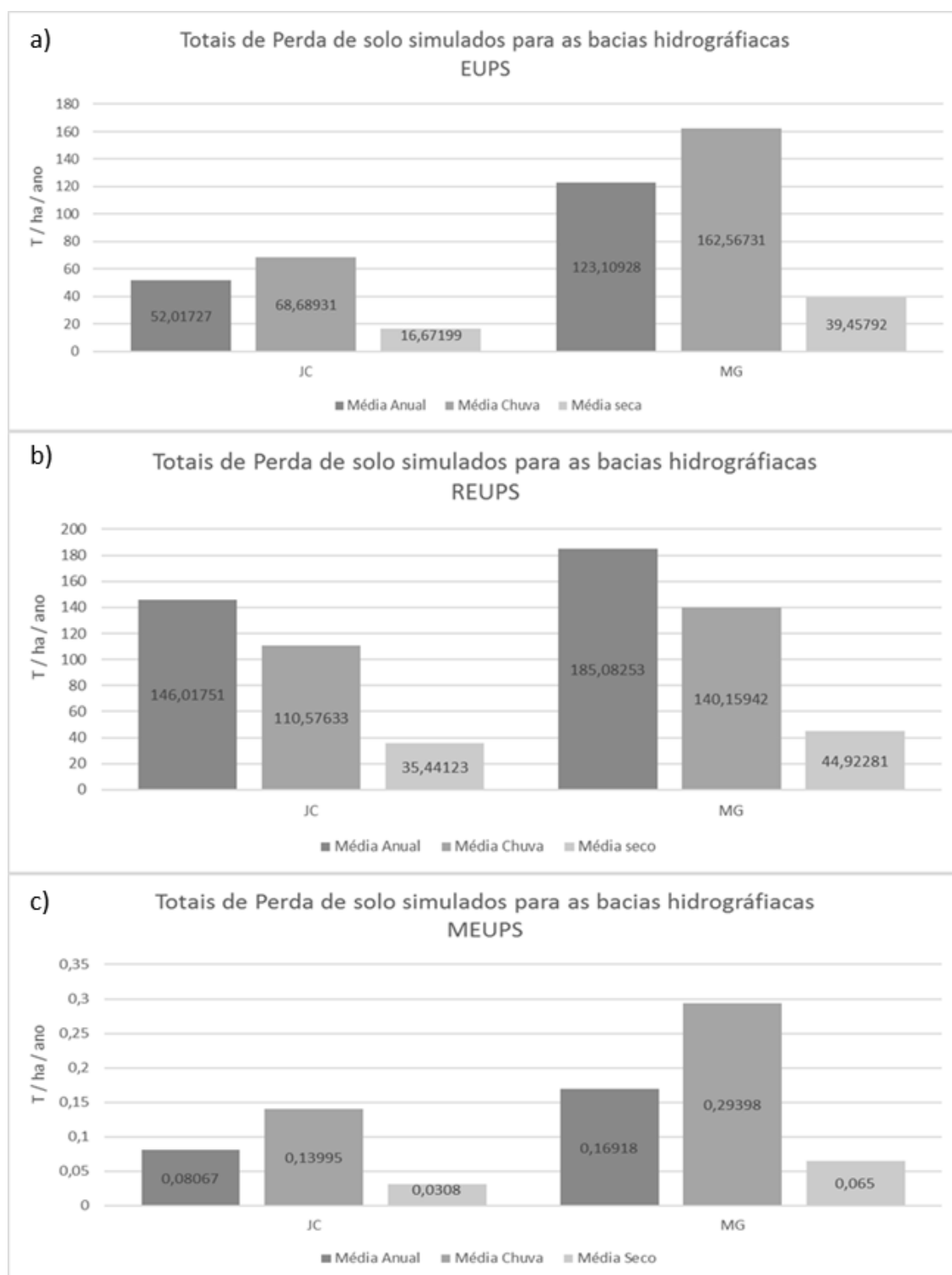


Figura 19: Comparação de valores totais de perda de solo conforme modelos e cenários de chuva

De modo geral, a REUPS apresenta valores mais elevados de perda em relação à EUPS, bem como uma menor diferença dos totais entre as bacias hidrográficas. A EUPS apresentou diferenças significativas entre as perdas da bacia Monjolo Grande e Jacutinga, e observa-se uma proporcionalidade nas diferenças de perda se comparado à simulação da MEUPS.

A figura 20 indica as diferenças dos totais de perda de solo decorrente da degradação das informações dos parâmetros, no intuito de simular a redução da escala de análise, e consequente generalização.

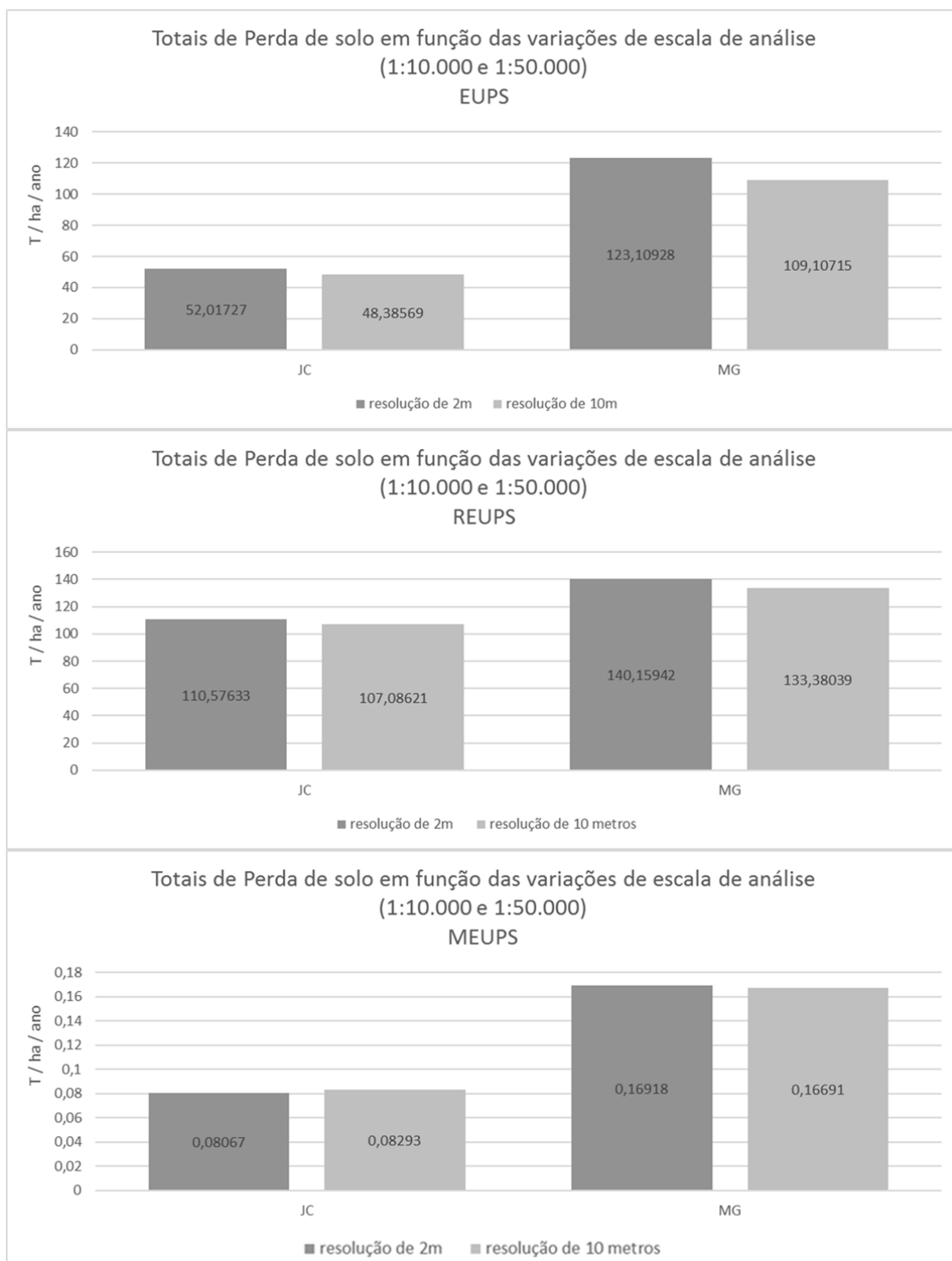


Figura 20: Variação dos totais de perda em função das diferentes escalas de análise. Resolução de 2 e 10m, equivalente as escalas de 1:10.000 e 1:50.000, respectivamente

Observa-se que há reduções dos totais estimados no sentido da perda de resolução (2 para 10 metros de resolução). As áreas do Monjolo Grande mostraram-se mais sensíveis às mudanças de resolução, apresentando diferenças mais significativas nos valores totais estimados, principalmente nos resultados da aplicação do modelo EUPS.

As figuras 21, 22 e 23 apresentam a espacialização das perdas de solo, considerando a aplicação dos modelos, para um cenário de média anual de chuva, e escala de 1:10.000 (2x2m de resolução).

De modo geral, pode-se observar que os contatos entre as classes de perda de solo permanecem similares entre os modelos, mas diferem na forma de distribuição dos valores, que podem ser mais abruptos, como observado para a MEUPS (figura 23), ou transições de valores mais suavizadas, como na EUPS (figura 21).

A EUPS e REUPS apresentaram maior variabilidade das classes de perda pela área das bacias, mais distribuídas espacialmente, enquanto que a REUPS tende a intensificar o volume de perda em áreas de topografia suavizada.

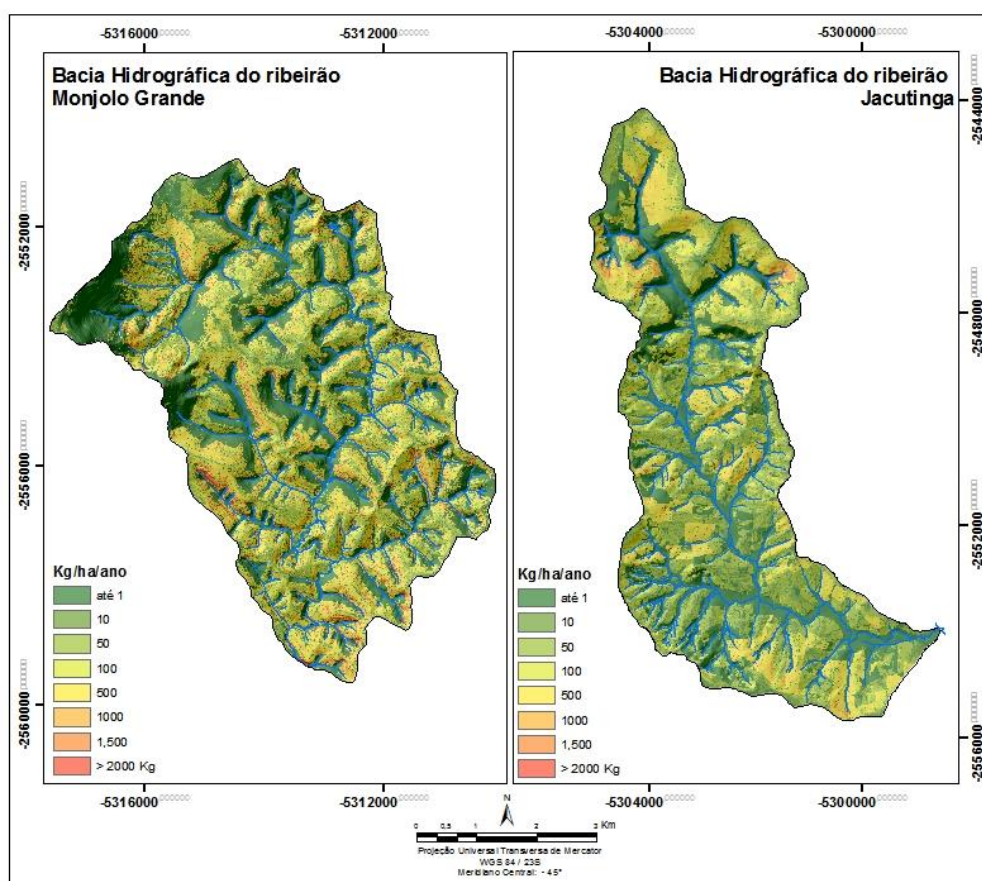


Figura 21: Espacialização das perdas de solo para os modelos EUPS

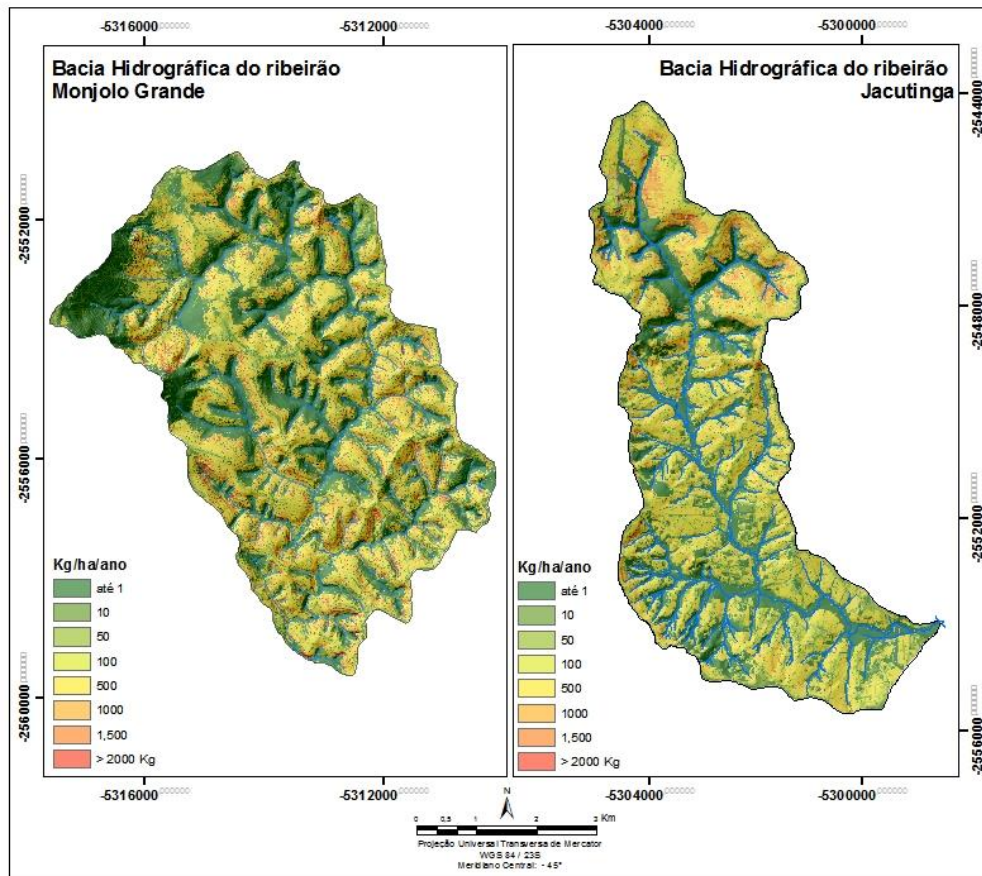


Figura 22: Espacialização das perdas de solo para os modelos REUPS

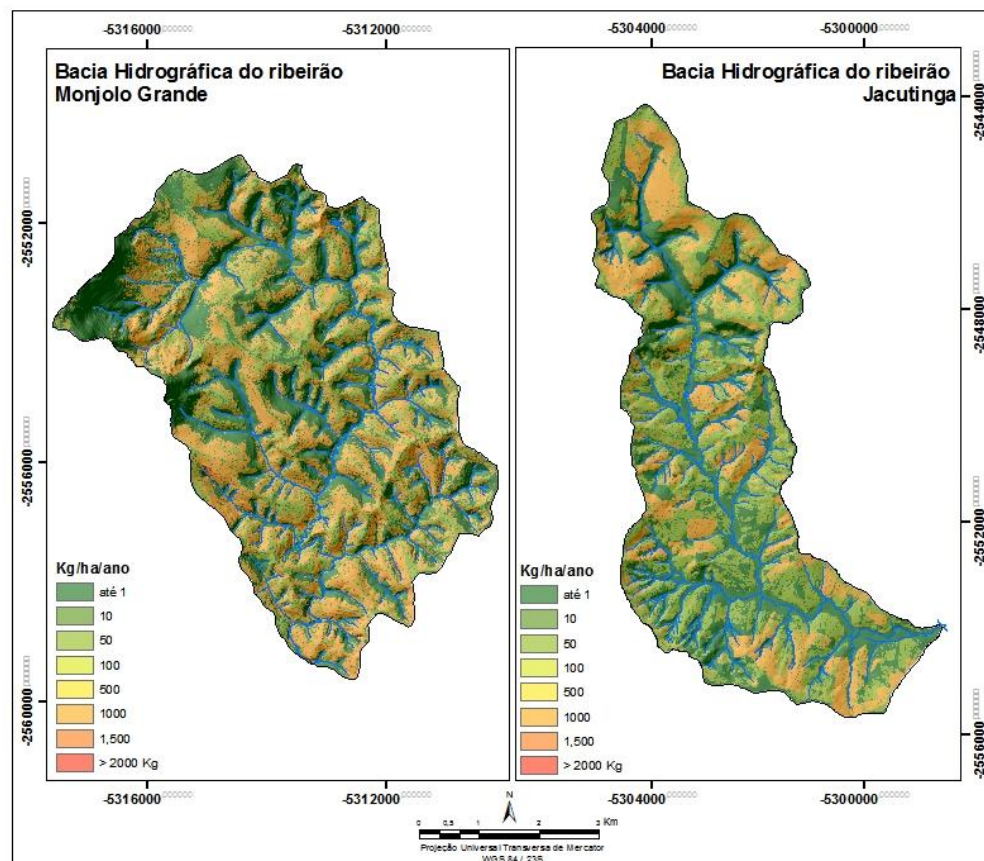


Figura 23: Espacialização das perdas de solo para os modelos MEUPS

Para o modelo MEUPS pode-se notar que, predominantemente, as classes de perda especializadas são opostas, representados pelos extremos das escalas, com pouca expressão de valores intermediários. Os limites das diferenças de perda são bem definidos pelas informações de uso da terra e cobertura vegetal.

5.4. Análise de sensibilidade: As perturbações promovidas pelo conjunto de dados, métodos de integração e escala espacial de análise

Conforme descrito nos tópicos “4.3” e “4.4”, o índice de sensibilidade relativa foi obtido a partir da análise do banco de dados dos 36 cenários modelados. A figura 24 representa a variação da sensibilidade de cada parâmetro, em função da área modelada (conjunto de dados), e do tipo do modelo aplicado.

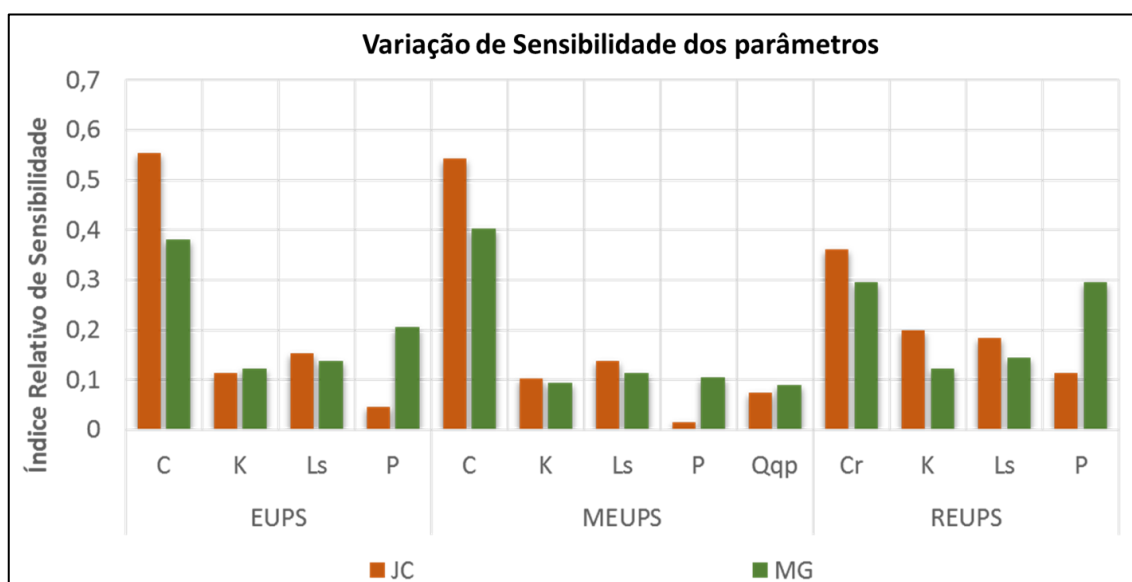


Figura 24: Sensibilidade dos parâmetros, considerando a aplicação dos modelos EUPS, MEUPS e REUPS. *JC – bacia hidrográfica do Jacutinga; predominantemente argilosa *MG – bacia hidrográfica do Monjolo Grande, predominantemente arenosa.

Assim, é possível demonstrar que não apenas em quais parâmetros ocorrem variações de sensibilidade, mas também em qual intensidade elas se manifestam. Observa-se que a sensibilidade dos parâmetros é específica para cada tipo de bacia modelada, ou seja, é fortemente definida pelo conjunto de dados que compõe a análise. Para salientar a diferença no comportamento da sensibilidade dos parâmetros entre os modelos, e de cada um dos modelos em relação ao conjunto de dados modelado, apresenta-se na tabela 20 um ordenamento dos parâmetros no sentido da maior para menor influência, separados de acordo com sua intensidade (representado

ilustrativamente por um sinal de “ > ” maior intensidade, e um sinal de “ ~ ” para sugerir intensidades similares).

Tabela 20: Hierarquização da sensibilidade dos parâmetros dos modelos, aos conjunto de dados (arenoso - Monjolo Grande; argiloso - Jacutinga).

	B. H. Jacutinga	B. H. Monjolo Grande
EUPS	C >>>>> LS >> K >> P	C >>> P > LS > K
REUPS	Cr >> K ~ LS > P	Cr ~ P > LS ~ K
MEUPS	C >>>>> LS > K > Qqp >> P	C >>> LS > K ~ Qqp > > p

Fonte: Dados da pesquisa

Todos os modelos, independente da bacia em que foram aplicados, apresenta o Fator C (uso da terra e cobertura vegetal) como o parâmetro de maior sensibilidade. Nota-se apenas uma pequena alteração na intensidade da sensibilidade deste fator no modelo REUPS, e na MEUPS para as áreas de predomínio arenoso.

Para a bacia do monjolo grande, o fator P - práticas conservacionistas e o Fator LS apresentaram a segunda maior influência no resultado final, enquanto que a erodibilidade dos solos (Fator K) foi mais significativa para as áreas de predomínio de solo argiloso, juntamente com o Fator LS.

Para a bacia do ribeirão Jacutinga, observa-se um padrão no comportamento da distribuição da intensidade da sensibilidade de cada variável, principalmente entre os modelos EUPS e MEUPS. Já para o modelo REUPS, há uma redução da sensibilidade do Fator Cr, e incremento da participação dos outros fatores na composição final do resultado.

De maneira oposta, para a bacia do Monjolo Grande não há proporcionalidade no padrão de comportamento da sensibilidade entre os modelos. Salienta-se a elevada sensibilidade do fator de práticas conservacionistas (P) em áreas predominantemente de solos arenosos, principalmente no modelo REUPS.

A sensibilidade elevada entre todos os parâmetros no modelo REUPS, justifica os valores estimados de perda de solo superiores ao modelo EUPS observados anteriormente (figura 21 e 22), uma vez que todos os termos participam significativamente da composição do resultado final.

Quando analisado a mesma combinação de parâmetros e valores, mas submetidos à diferentes escalas de análise (resoluções espaciais de 2 e 10 metros), conforme indicado na figura 25, observa-se que, de modo geral, há uma atenuação da intensidade da sensibilidade, mas, mantendo-se o ordenamento entre os termos envolvidos. Destaca-se algumas alterações mais significativas, como a diminuição da intensidade da sensibilidade do Fator LS/EUPS com o aumento de resolução apenas para as áreas de predominância de solos arenosos, e o aumento de sensibilidade para o fator C nos modelos EUPS (Jacutinga) e MEUPS (Jacutinga e Monjolo Grande) com o aumento da generalização.

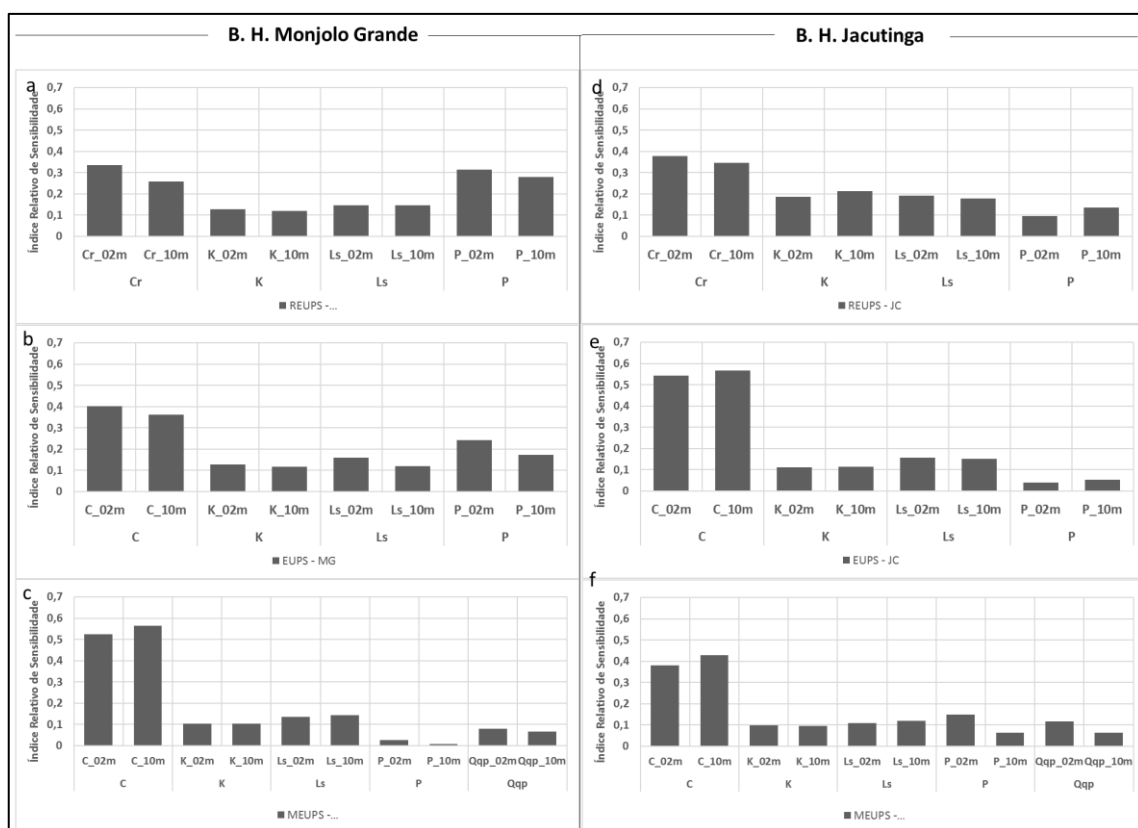


Figura 25: Variação de sensibilidade dos parâmetros submetidos à diferentes resoluções de 2 e 10 metros (escalas de análise). Áreas da bacia do Monjolo Grande: a) REUPS – 02 e 10m; b) EUPS 02 e 10m c) MEUPS de 02 e 10m. bacia do Jacutinga: d) REUPS – 02 e 10m; e) EUPS 02 e 10m f) MEUPS de 02 e 10m.

Importante demonstrar que os volumes de chuva simulados não alteram a ordem de sensibilidade dos parâmetros, nem mesmo a intensidade da influência com que cada parâmetro contribui para composição das previsões. A figura 26 apresenta a sensibilidade dos parâmetros, agrupados sob diferentes condições de erodibilidade das chuvas (EUPS e REUPS), e volumes de chuva (MEUPS).

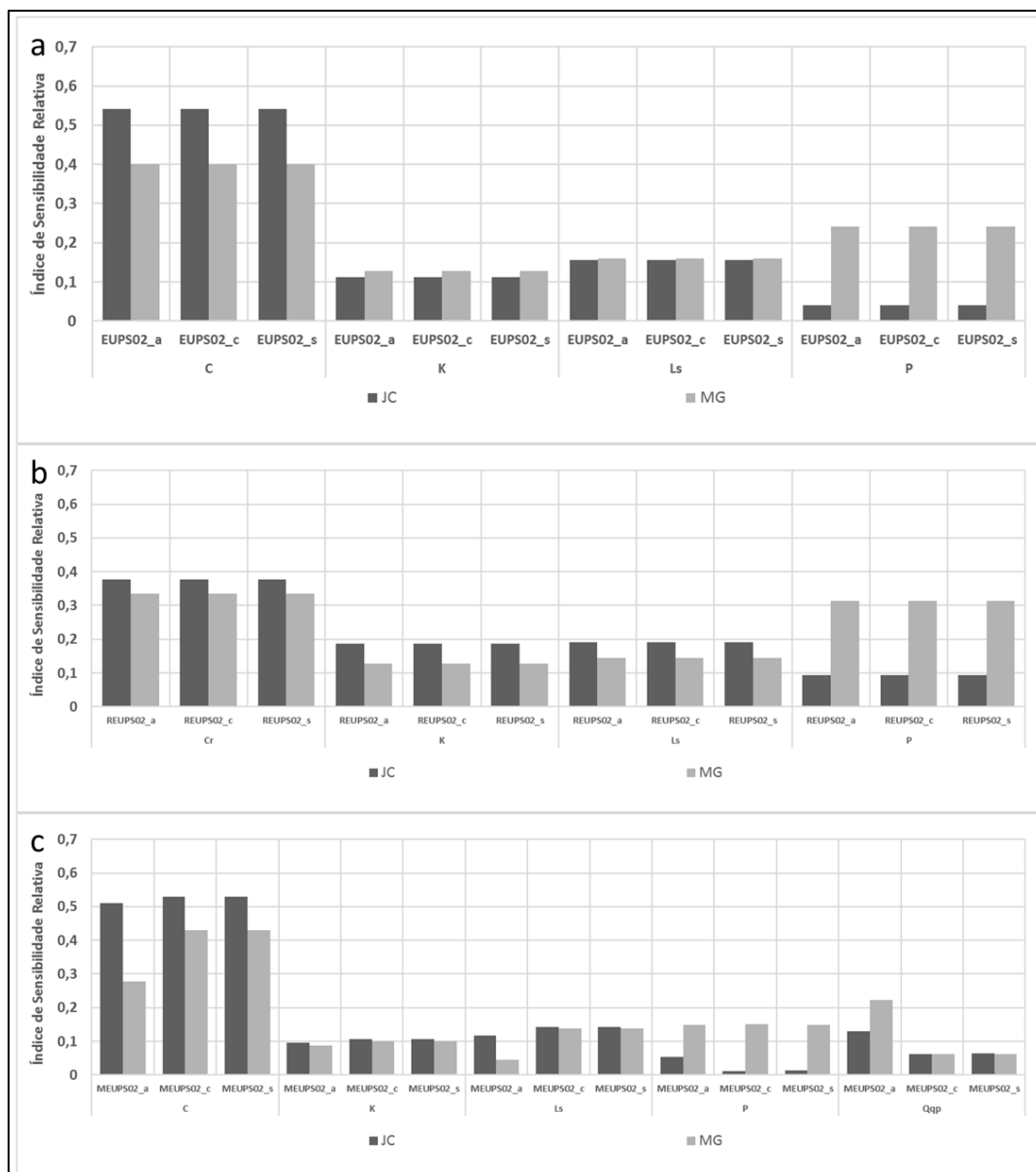


Figura 26: Avaliação do comportamento dos parâmetros sob diferentes valores de erosividade da Chuva: a) EUPS b) REUPS, e de volume de chuva c) MEUPS – para os valores de média anual; média chuva, e média seca.

5.5. Variabilidade espacial das incertezas

Tendo analisado a influência que cada parâmetro exerce na composição do resultado final do modelo, deve-se responder como as incertezas estão distribuídas no espaço. As incertezas não são uma medida de erro absoluto, ou seja, não se apresenta a discrepância de valores estimados com os valores observados, mas sim, uma medida de desvio do quanto um ponto estimado se distancia de valor de referência esperado.

5.5.1. Diagnóstico das incertezas para o modelo EUPS, REUPS e MEUPS

Para avaliar a incerteza dos valores no resultado final, avaliou-se a qualidade da dispersão dos parâmetros obtida na aplicação dos modelos, e posteriormente foram analisados os resíduos, como mencionado anteriormente.

As correlações entre cada uma das variáveis explicativas dos modelos (figura 27) apresentam forte coerência com a análise de sensibilidade dos parâmetros observados na figura 24. Pela distribuição da dispersão apresentada na figura 27, é possível observar a diferença entre os valores de parâmetros obtidos pela literatura (poucos valores, e empilhados no eixo x), e aqueles extraídos por técnicas de geoprocessamento (dispersos com maior variabilidade de valores).

A análise dos resíduos (figura 28, 29 e 30) indica que todos os modelos apresentaram uma estrutura satisfatória em termos de valores preditos (estimados), que pode ser observado pela distribuição dos pontos aproximados sobre uma reta de referência. No entanto, todos os modelos apresentaram valores residuais intermediários, e conjuntos de valores extremamente dispersos, que representam valores estimados muito distantes da referência esperada. A análise desta distribuição é indicativa do grau de incerteza que cada modelo apresenta em suas estimativas, e a sua espacialização (Figuras 31, 32 e 33) indica onde elas ocorrem.

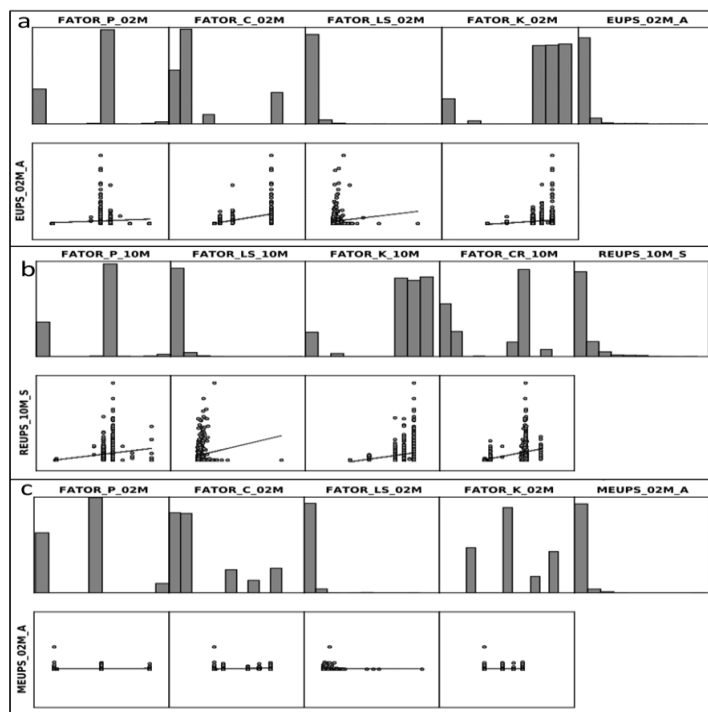


Figura 27: Avaliação de regressão geoespacial para os modelos simulados. A) EUPS; B) REUPS, C) MEUPS.

Observa-se que há uma forte coerência espacial entre os pontos de maior incerteza, ou seja, um agrupamento regionalizado dos valores que se distanciam do valor

de referência esperado, variando em maior ou menor área e grau de acordo com os modelos.

Todos os modelos indicaram elevada incerteza nas áreas de cabeceira do ribeirão Jacutinga, e nos divisores dos morros residuais da bacia do Monjolo Grande. O Modelo REUPS apresentou as incertezas mais significativas e distribuídas no espaço, seguido da MEUPS, e por fim, a EUPS com melhor desempenho em termos de valores preditos.

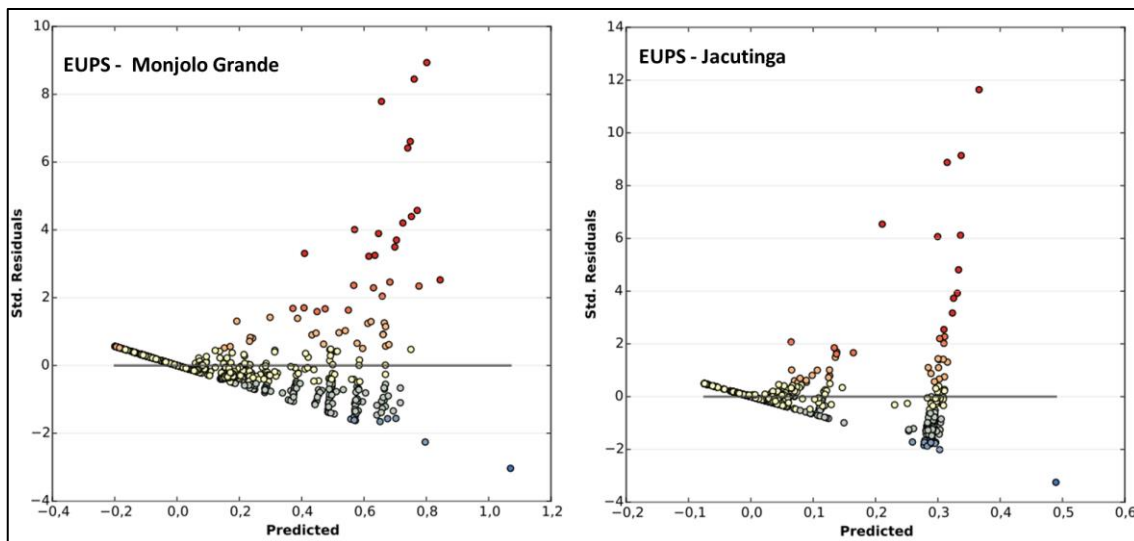


Figura 28: Gráfico dos Resíduos Vs. Valores Ajustados para os modelos EUPS, aplicados às bacias hidrográficas do Monjolo Grande e Jacutinga.

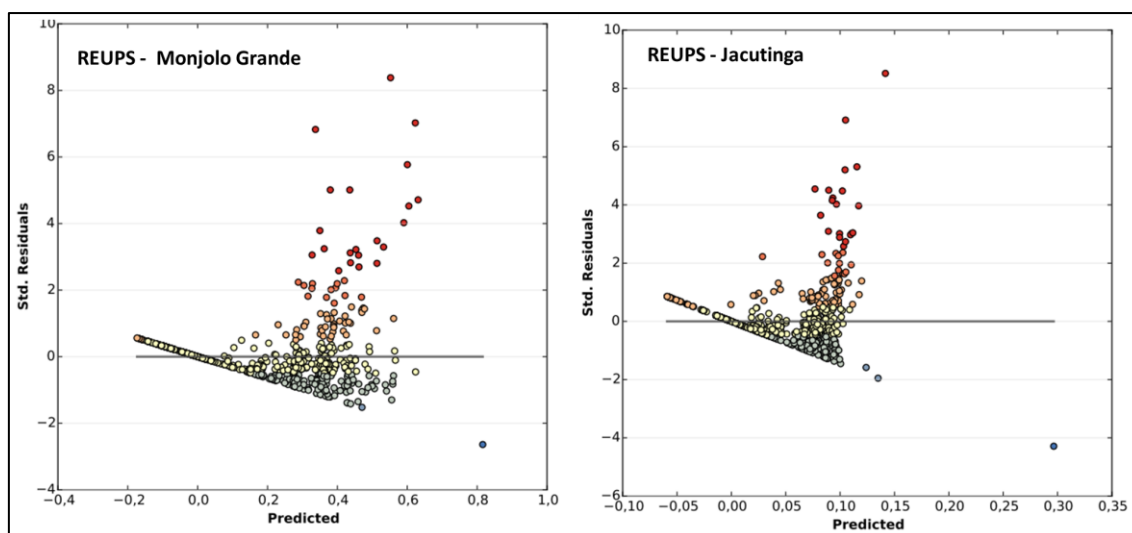


Figura 29: Gráfico dos Resíduos Vs. Valores Ajustados para os modelos REUPS, aplicados às bacias hidrográficas do Monjolo Grande e Jacutinga.

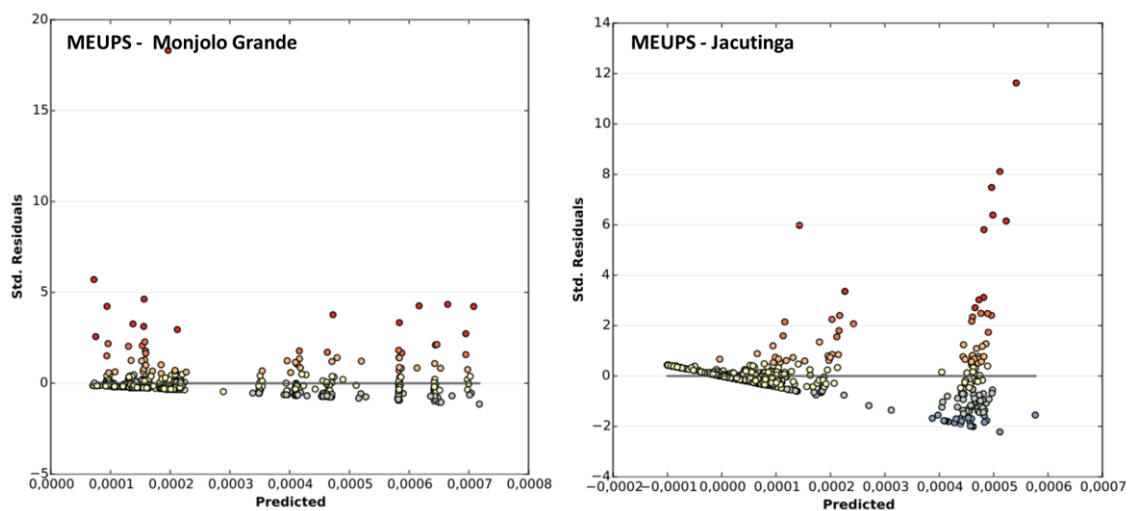


Figura 30: Gráfico dos Resíduos Vs. Valores Ajustados para os modelos MEUPS, aplicados às bacias hidrográficas do Monjolo Grande e Jacutinga.

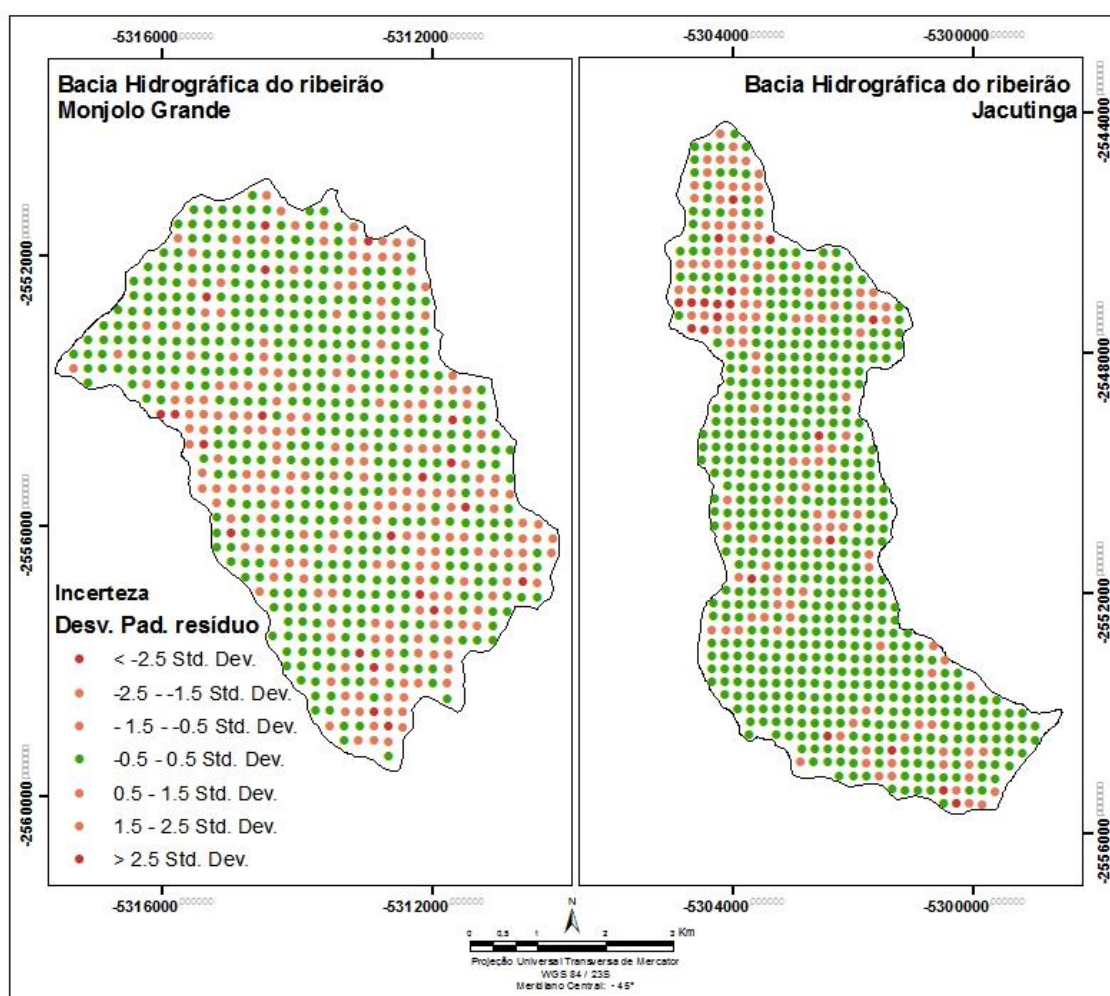


Figura 31: Espacialização do grau de incerteza, resultante da aplicação do modelo EUPS.

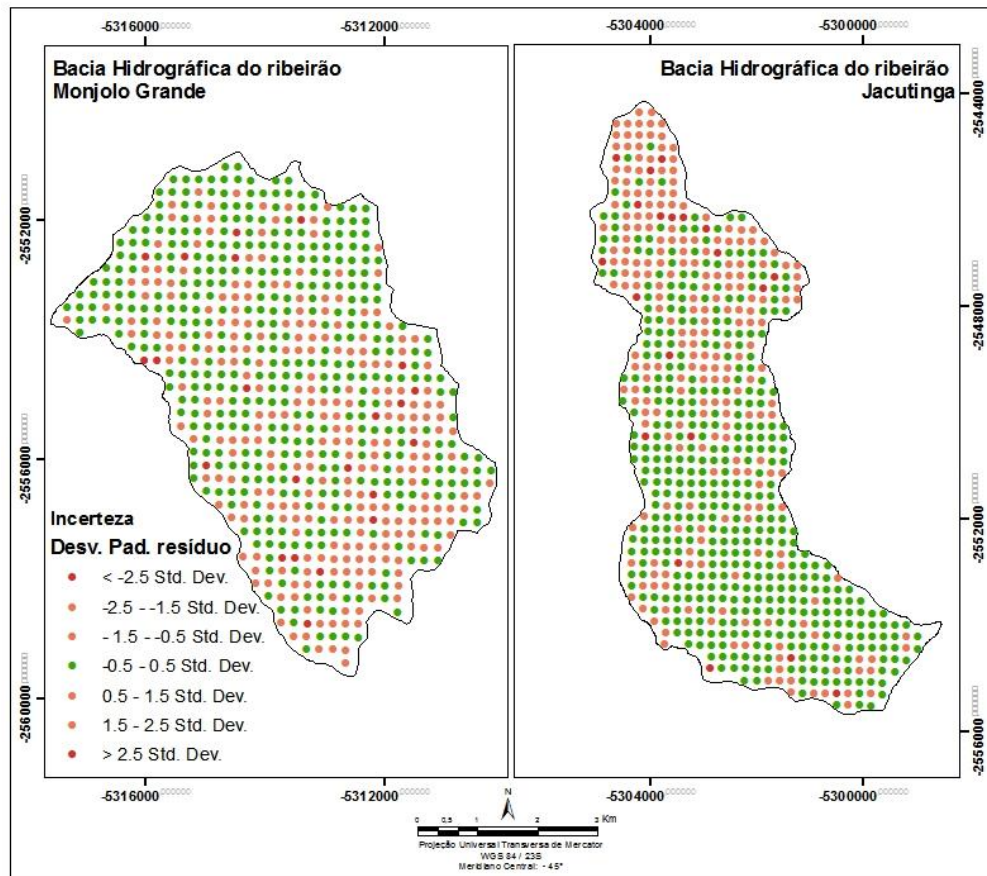


Figura 33: Espacialização do grau de incentive, resultante da aplicação do modelo REUPS.

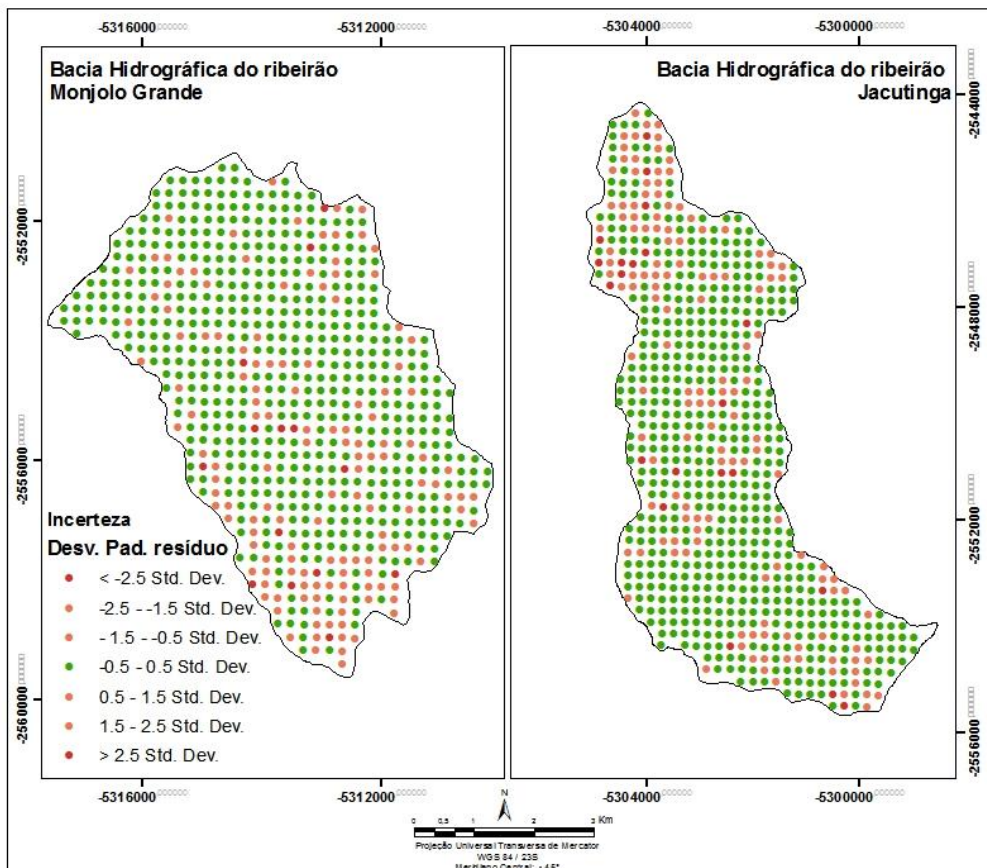


Figura 32: Espacialização do grau de incentive, resultante da aplicação do modelo MEUPS.

5.5.2. Correlação da Incerteza com descritores geomorfométricos

A figura 34 esboça o procedimento adotado para determinação da correlação das áreas de incerteza (pontos amostrais) com atributos geomorfométricos das áreas de estudo.

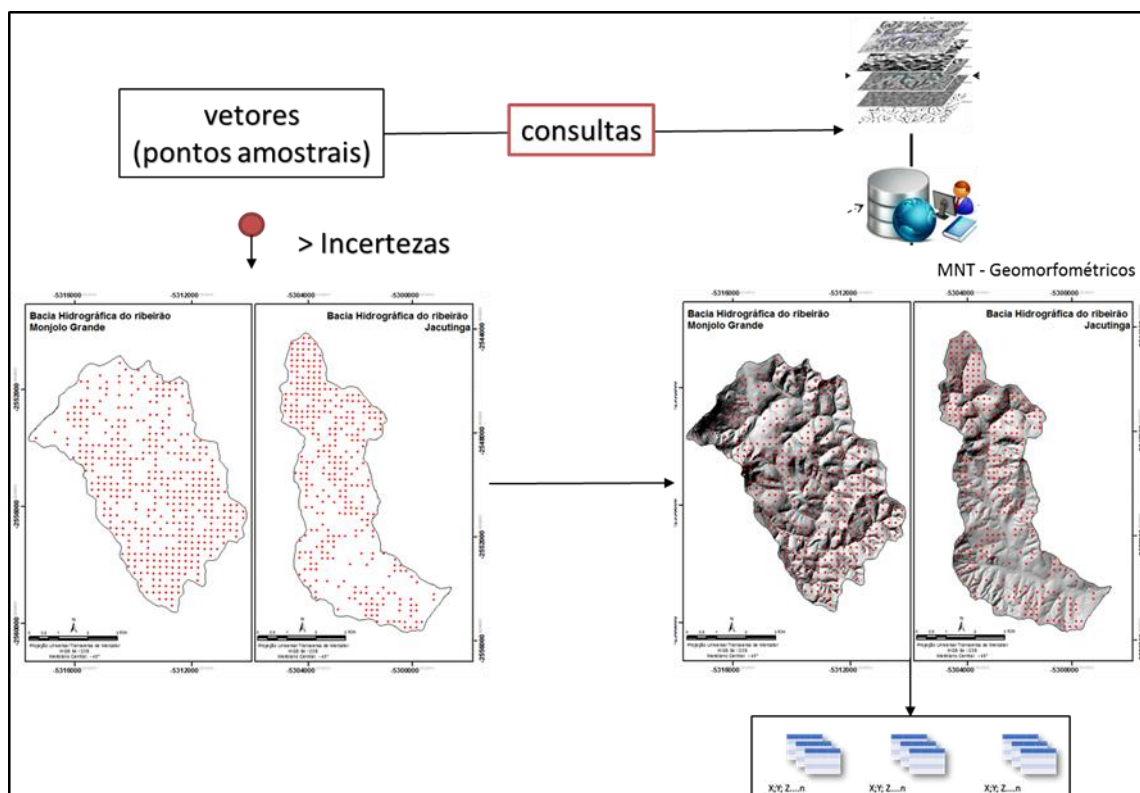


Figura 34: Reunião dos pontos amostrais de maior incerteza, e correlação com atributos geomorfométricos por meio de consultas espaciais realizadas em banco de dados.

Fonte: Autor

A figura 35 indica a relação entre os locais onde as incertezas mais significativas ocorreram, decorrentes da aplicação dos modelos, com características de descritores geomorfométricos predominantes. Encontrou-se três padrões que descrevem os cenários imediatamente vizinhos aos pontos amostrais de elevadas incertezas.

O “grupo A” é sinteticamente caracterizado por grande variabilidade de valores de elevação em curtos espaços e afastado da origem do gráfico, o que indica as áreas residuais, consequentemente declividades altas, e relevo muito movimentado (várias direções de vertente), com curvaturas bem distribuídas entre plana, côncava e convexa.

O “grupo B”, apresenta valores menos distribuídos no histograma de frequência, com valores de elevação mais próximo da origem das distribuições (560m) mas com

declividades acentuadas, e direção de vertentes bem marcadas, em direções opostas, também com grande variação nos padrões de curvatura vertical.

As áreas que não apresentaram incertezas, possuem pouca variabilidade de valores de elevação, e homogeneidade na geometria de relevo.

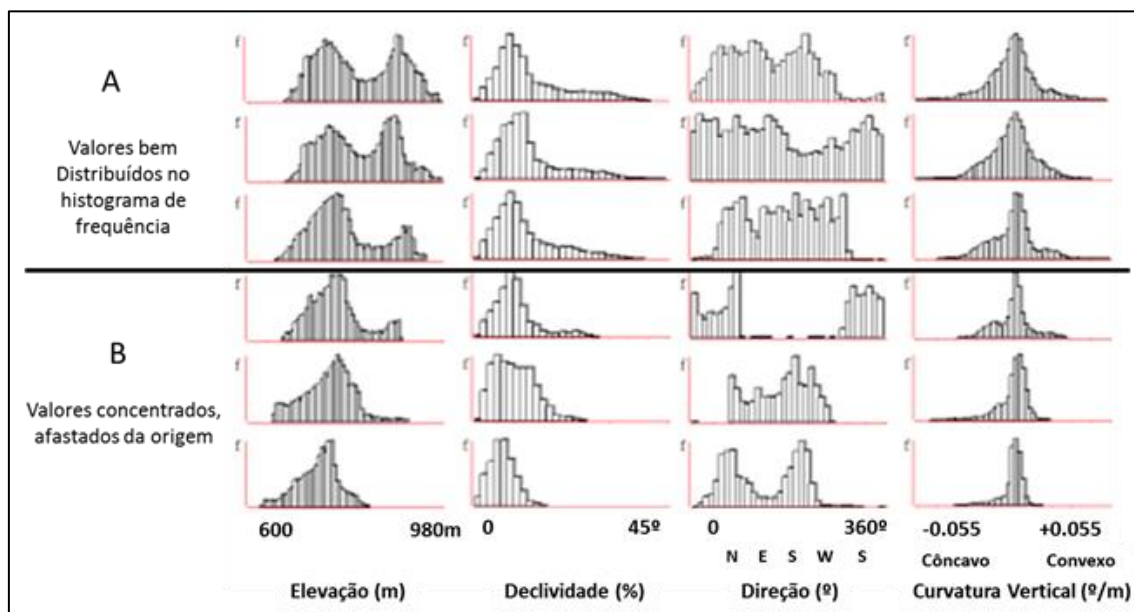


Figura 35: Grupos de variáveis geomorfométrica, considerando informações de Elevação, e derivadas locais de 1º ordem, como declividade, Direção e Curvatura Vertical.

Desta forma, analisando os gráficos de distribuição e frequência das ocorrências de valores para cada um dos descritores geomorfométricos, e considerando a lógica geográfica de manifestação em que eles ocorrem, observa-se que o descritor mais coerente para indicar locais que tendem à maiores incertezas nas predições dos modelos é a curvatura de relevo, uma vez que expressa fisiografias únicas. A figura 36 apresenta a correlação entre os pontos de incerteza, e o mapa de forma de relevo para as áreas das bacias hidrográficas, que combinam informações de curvatura vertical e curvatura horizontal, conforme Valeriano (2008).

A sobreposição das informações (figura 36) evidencia a relação espacial entre os pontos de incerteza e a forma de relevo convergente, principalmente de características côncavas, que comportam 67% dos pontos de elevada incerteza. Estas áreas foram seguidas por vertentes divergente, com 21 %, e as áreas planas contendo menores incertezas.

Estas informações são importantes para o planejamento de trabalhos específicos, que exigem coleta de pontos de controle em campo. Desta forma, as áreas que tendem à

maiores incertezas no processo de modelagem podem ser utilizadas como critérios de prioridade para adensamento de amostras.

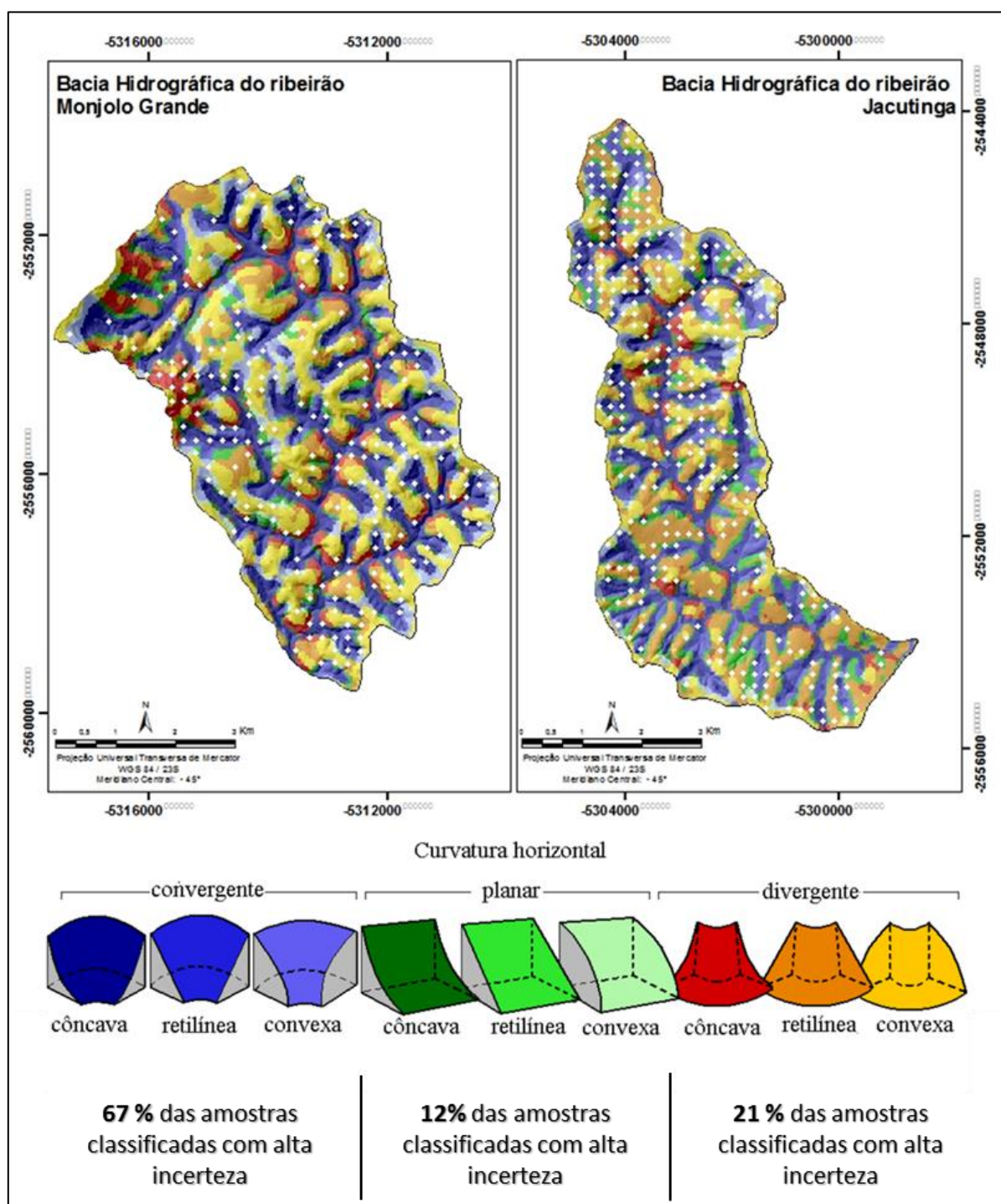


Figura 36: Pontos de incerteza associados às classes de formas de relevo. Curvaturas Horizontal (Convergente, planar e divergente) e Vertical (cônica, retilínea e convexa), conforme metodologia proposta por Valeriano (2008).

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

As bacias do ribeirão Monjolo Grande e Jacutinga foram estrategicamente selecionadas, de modo a individualizar duas unidades de análise similares em termos de área de drenagem, uso e cobertura da terra e distribuição de chuvas, mas com comportamentos hidrológicos distintos em sua fase terrestre, principalmente em função das características predominantes de arranjo, estrutura e textura dos solos e litologia. Estes elementos devem ser levados em consideração, uma vez que sintetizam o ambiente fisiográfico típico da Depressão Periférica Paulista, região com destacada atuação agrícola no estado de São Paulo. Assim, as áreas em estudo ganham representatividade em função do potencial de reprodução destas discussões e dos procedimentos metodológicos adotados, favorecendo a comparação entre análises resultantes da aplicação de modelos hidrossedimentológicos com outras áreas de mesma sensibilidade ambiental às ações de processos erosivos.

A análise de sensibilidade relativa indicou que o comportamento dos modelos EUPS, REUPS, e MEUPS é totalmente dependente do conjunto de dados analisado, ou seja, é específica para cada tipo de área modelada. Em síntese, as figuras 37 e 38 indicam a hierarquização da sensibilidade dos parâmetros para os modelos mencionados, em função das bacias hidrográficas analisadas.

De modo geral, a sensibilidade dos parâmetros sugere que os maiores esforços devam ser aplicados no mapeamento de uso da terra e cobertura vegetal (Fator C), e na determinação de seus valores. Isso evidencia que a contribuição dos métodos que se propõe a detalhar as variações da qualidade e sanidade da vegetação, como as metodologias de correlação entre valores de NDVI e Fator C, devam ser mais exploradas para práticas no processo de modelagem, à exemplo do trabalho de Correa (2015).

Evidencia-se também a necessidade de detalhamento do mapa pedológico, principalmente em áreas de predominância arenosa, juntamente com o reconhecimento das práticas conservacionistas. Essa em especial, necessita de novas abordagens para seu reconhecimento, pois os valores e métodos utilizados não correspondem mais aos atuais manejos empregados, principalmente com o advento da agricultura de precisão. Já as áreas de predominância argilosa mostraram-se extremamente sensíveis às variações da extensão da vertente e declividade (Fator topográfico).

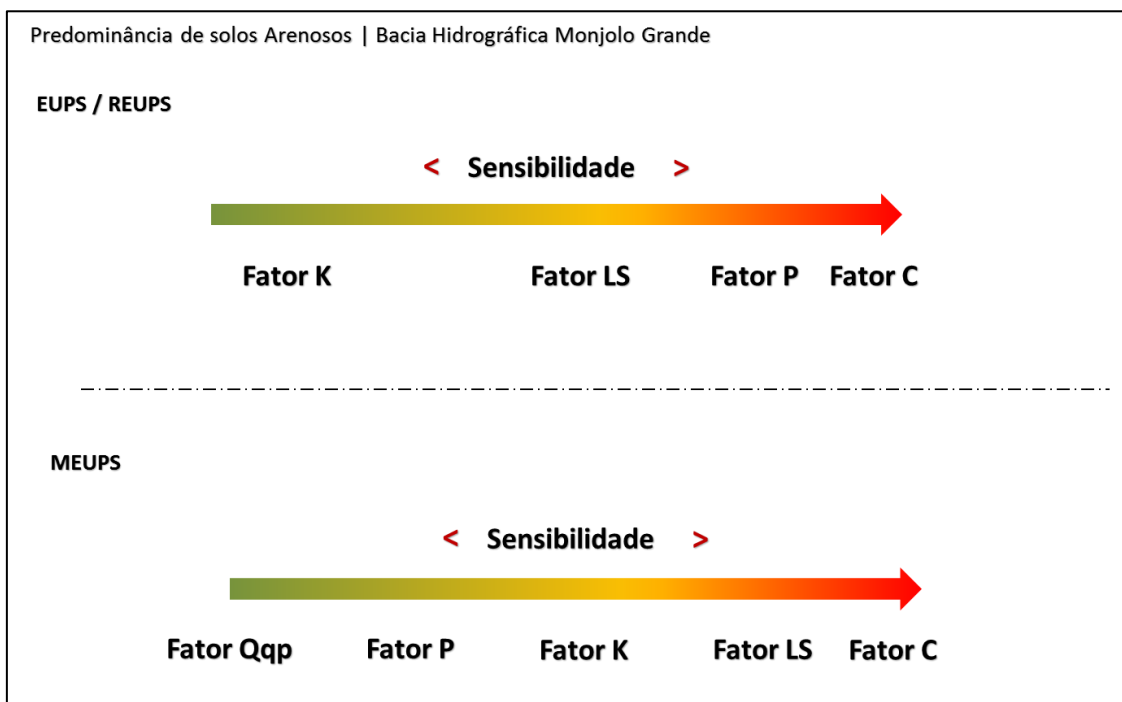


Figura 38: Ordenamento da influência que cada parâmetro envolvido nos modelos EUPS, REUPS, e MEUPS exercem sobre as estimativas finais de sua aplicação. Hierarquização considerando as características de uma bacia predominantemente arenosa (bacia hidrográfica do ribeirão Monjolo Grande).

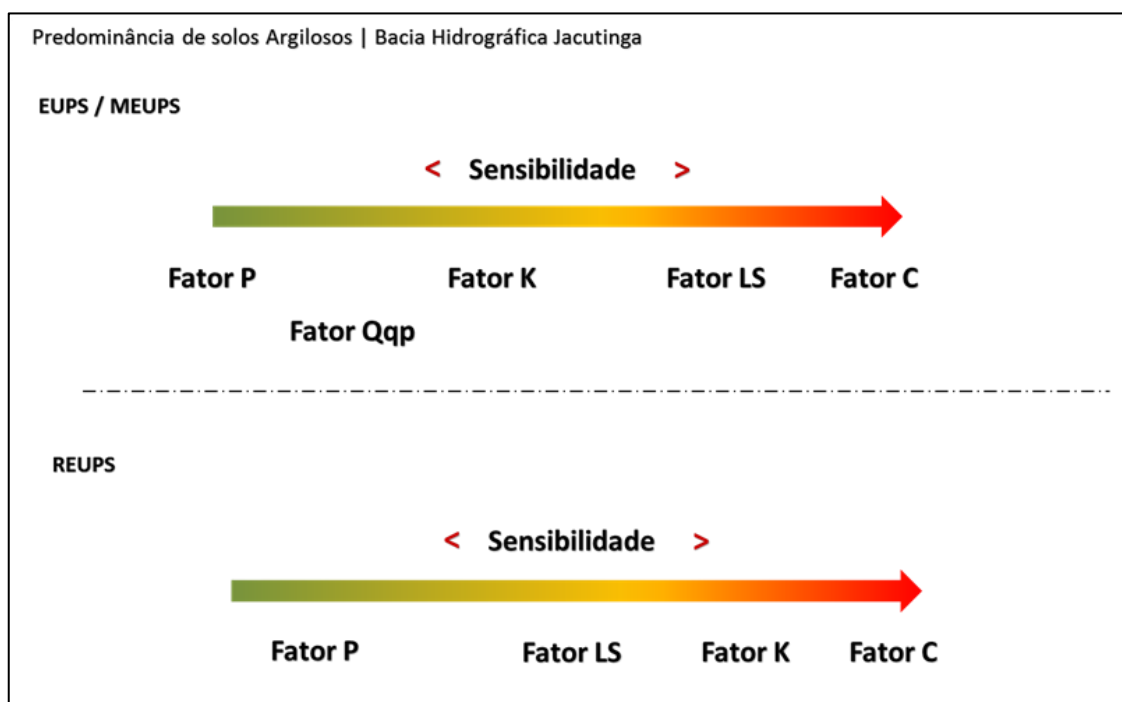


Figura 37 Ordenamento da influência que cada parâmetro envolvido nos modelos EUPS, REUPS, e MEUPS exercem sobre as estimativas finais de sua aplicação. Hierarquização considerando as características de uma bacia predominantemente argilosa (bacia hidrográfica do ribeirão Jacutinga).

Por fim, a figura 39 sintetiza a comparação do comportamento geral dos parâmetros, em função das características das áreas modeladas.

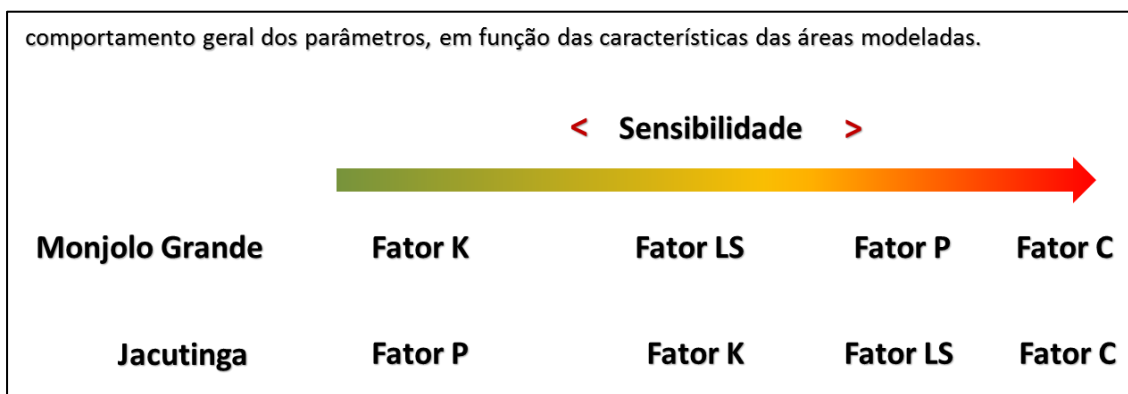


Figura 39: Comparação do comportamento geral da sensibilidade dos parâmetros, em função das características das áreas modeladas.

A análise de sensibilidade não foi influenciada pelo maior ou menor nível de generalização das bacias (resolução espacial), nem mesmo pelas diferenças nos volumes de chuva simulados. No entanto, importante ressaltar que a sensibilidade dos parâmetros foi variável em cada parcela analisada, isto é, para cada conjunto e variabilidade de dados, há uma sensibilidade específica. Desta forma, se as análises forem subdivididas em subbacias, cada subbacias assumirá um novo padrão de sensibilidade, mas respeitando as variações entre os grupos de solos predominantemente arenosos, ou argilosos.

A propagação de incerteza dos modelos, relacionadas diretamente com a intensidade de sensibilidade dos parâmetros, mostraram-se mais acentuadas em áreas de vertentes convergentes, e com as menores incertezas expressas nas áreas planas (figura 40).

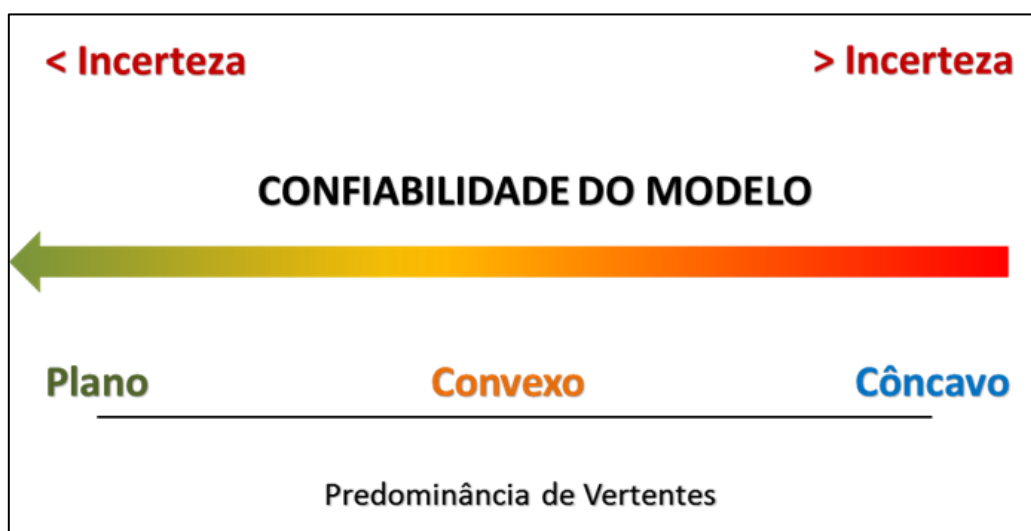


Figura 40: Confiabilidade das estimativas dos modelos, representativa do grau de incerteza propagada aos resultados finais de sua aplicação, em função das características geomorfométricas das áreas de estudo.

Pode-se entender que o mapeamento geomorfológico prévio das áreas a serem modeladas, pode ser um bom indicador da necessidade de maiores atenções nas coletas de campo, além de sugerir os locais prioritários para levantamento e detalhamento. Da mesma forma, o mapeamento e reconhecimento das características físicas das áreas são bons indicadores para determinar quais fatores dos modelos devem ser destinadas maiores atenções e esforços, e isso inclui a escolha do método de extração de dados a ser adotado em ambiente SIG.

Por fim, considerando os resultados das análises para as áreas da bacia do Monjolo Grande e Jacutinga, pode-se concluir que:

- As variações de sensibilidade dos parâmetros são significativas para o conjunto de dados, e pouco significativas para a escala de análise;
- A sensibilidade dos parâmetros não se altera em função do volume de chuva | Erosividade da chuva simulado ou do fator de escoamento superficial direto;
- As maiores incertezas das estimativas dos modelos se manifestam espacialmente em vertentes de predominância côncava, independente do modelo aplicado, e do conjunto de dados analisado;

Retomando a hipótese proposta na pesquisa, conclui-se que as características físicas da área e a escala de análise, a priori, não são bons indicadores para escolha do melhor modelo (EUPS, REUPS, MEUPS), mas, podem sugerir os melhores métodos de obtenção de dados das variáveis, em função da sensibilidade relativa do conjunto de dados.

Assim, a incerteza final presente na estimativa resultante do processo de modelagem, pode ser minimizada mediante escolha dos modelos e métodos de aquisição dos dados dos parâmetros de entrada, em função das características físicas do cenário observado, mas não é influenciada diretamente pelo nível de generalização das informações. A degradação das informações (no sentido de alteração das escalas de análise) impacta sobre o total dos valores estimados, aumentando ou diminuindo o erro da estimativa, mas não alterando a incerteza dos resultados.

Outra discussão que se mostra relevante, é o questionamento quanto à finalidade de aplicação dos resultados, pois pode-se sugerir que os esforços nas escolhas de procedimentos, modelos e métodos específicos só terão relevância na pretensão de se

obter resultados quantitativos. A figura 41 apresenta um fluxograma simplificado do processo da modelagem ambiental, e o sentido da propagação e acúmulo de incerteza.

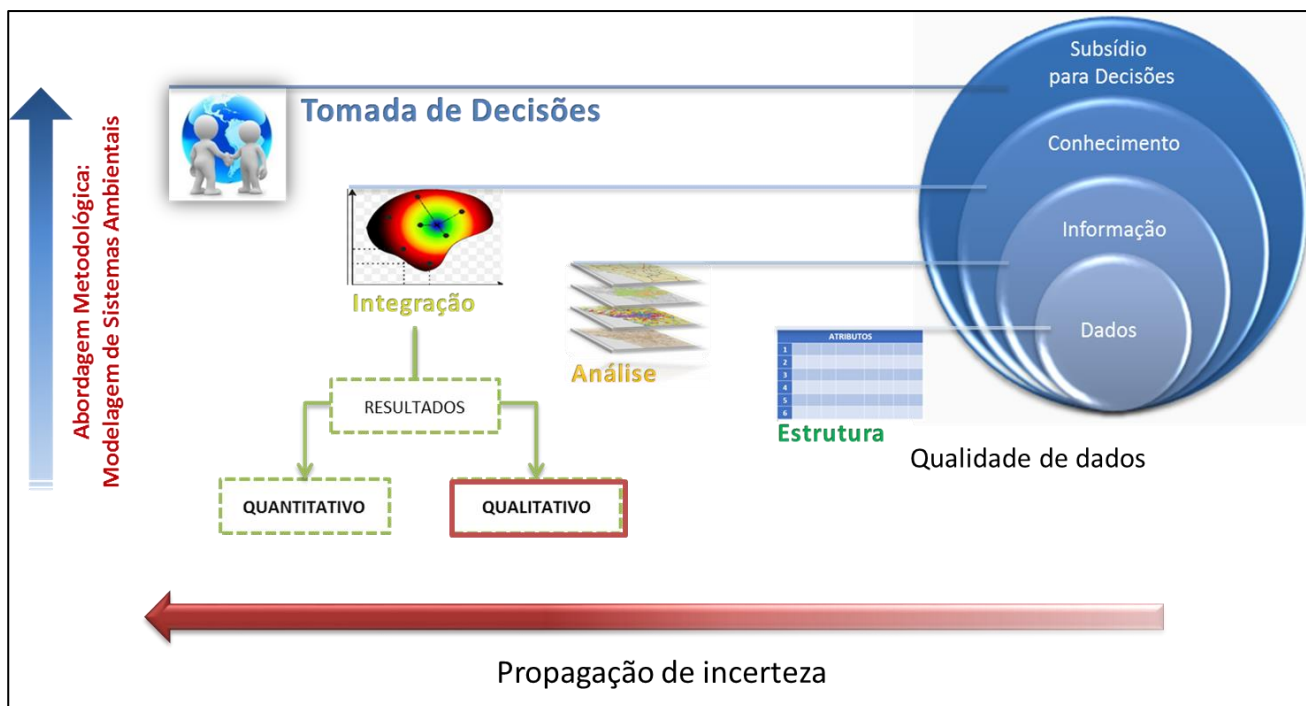


Figura 41 Esquema de desenvolvimento do processo de modelagem ambiental. Especial atenção à saída de dados quantitativos. Espera-se que as incertezas se acumulem à cada etapa concluída.
Fonte: Autor.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADRIOLO, M.V.; SANTOS, I.; GIBERTONI, R.C. & CAMARGO, A.S.G. Calibração do modelo SWAT para a produção e transporte de sedimentos. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PEQUENAS E MÉDIAS CENTRAIS HIDRELÉTRICAS, 6., Belo Horizonte, 2008. Anais... Belo Horizonte, 2008.
- ALMEIDA, F. F. M. Fundamentos Geológicos do Relevo Paulista. **Boletim IGC**, São Paulo, n. 41, p. 169-263, 1964.
- AMERICAN SOCIETY OF PHOTOGRAMMETRY. **Manual of Photogrammetry**. Falls Church, Virginia, 1950.
- ARNOLD, J.G. WILLIAMS, J.R.; MAIDMENT, D.R. Continuous-time water and sediment routing models for large basins. **Hydrological Engineering**, 121, p.171-183, 1995.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Execução de levantamento topográfico, NBR 13133 Rio de Janeiro, 1994.
- BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do solo**. 3. ed. São Paulo: Editora Ícone, 1993.
- BEVEN, K; BINGLEY, A.M. The future of distributed models: model calibration and uncertainty prediction: **Hydrological process**, 6, 279-298. 1992.
- BONAMO, E.J.; CRANWELL, D. Treatment of Uncertainties in the Performance Assessment of Geologic High Level Radioactive Waste Repositories. **Mathematical Geology**. 20 (5), 1988.
- CEAPLA – Centro de análise e Planejamento Ambiental. Atlas ambiental da bacia do rio Corumbataí. Rio Claro, CEAPLA/IGCE/Unesp, 2011. [Acessado em 04 2011]. Disponível em: <http://ceapla2.rc.unesp.br/atlas/>
- CHAVEZ, H.M.L. Análise Global da sensibilidade dos parâmetros da equação universal de perda de solo modificada (MUSLE). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 15:345-350, 1991.
- CHORLEY, R.J. and KENNEDY, B. **A Physical Geography. A systems approach**. Prentice Hall int. Inc., Londres. 1971.
- CHORLEY, R.J. Geomorphology and general systems theory. **U.S. Geology Survey**. Prof. Paper (500-B):1-10. 1962.
- CHRISTOFOLETTI, A. **Modelagem de Sistemas Ambientais**. E. Blücher, São Paulo. 1999.
- CORREA, E. A.; MORAES, I.C.; LUPINACCI, C.M; PINTO, S.A.F. Perdas de solo por erosão hídrica em cambissolos sob cultivo de cana-de-açúcar no estado de São Paulo. Trabalho submetido para a Revista Mercator (Revista de Geografia da Universidade Federal do Ceará), em 26/10/2015;

CORREA, E. A.; MORAES, I.C.; LUPINACCI, C.M; PINTO, S.A.F. Soil losses in sugarcane cultivation in subtropical environment (Brazil). Artigo submetido para a revista *Earth Surface Processes and Landforms* em 26/10/2015.

CORREA, E.A.; MORAES, I.C.; COUTO JR., A.A.; PINTO, S.A.F. Perdas de solo em pastagens naturais no centro leste paulista. Natal: XXXV Congresso Brasileiro de Ciências do Solo. Anais..., 2015. Viçosa-MG: Sociedade Brasileira de Ciências do Solo. 4 p. Disponível em: <<http://www.eventossolos.org.br/cbcs2015/>>.

CORREA, E.A.; MORAES, I.C.; LUPINACCI, C.M; PINTO, S.A.F. Influência do desenvolvimento vegetal da cana-de-açúcar no processo de erosão hídrica em diferentes condições físico-químicas de solos. Trabalho submetido para a *Revista Brasileira de Geomorfologia*, em 27/03/2015;

CORREA, E.A.; MORAES, I.C.; PINTO, S.A.F. Estimativa da erodibilidade e tolerância de perdas de solo na região do centro leste paulista. Rio Claro, *Revista Geociências* (São Paulo Online). ISSN 1980-900X. Aceito para publicação em: 01 jul. 2015.148.

CORREA, E.A.; MORAES, I.C.; PINTO, S.A.F.; DEMATTÊ, J.A.M. Relação entre a resposta espectral e os diferentes constituintes de solos arenosos e argilosos. João Pessoa: XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. Anais..., 2015. 149- 156 p. Disponível em: <<http://www.dsr.inpe.br/sbsr2015/files/p0034.pdf>>.

DAVIS, P.A.; OLAGUE, N.E. Treatment of Modeling Uncertainties in Total Safety Assessments. In: **Proceedings of the International Conference on Probabilistic Safety Assessment and Management (PSAM)**: Elsevier, 1991.

DEMATTE, J. A. M. . Characterization and discrimination of soils by their reflected eletromagnetic energy. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 37, p. 1445-1458, 2002.

DEMATTE, J. A. M. ; GALDOS, Marcelo Valadares ; GUIMARÃES, Rodrigo Vellardo ; GENÚ, Aline Marques ; NANNI, Marcos Rafael ; ZULU, Jurandir . Quantification of tropical soil attributes from ETM+/Landsat-7. **International Journal of Remote Sensing**, v. 24, p. 257-275, 2007.

DEMATTE, J. A. M. ; MARCONDES, André ; SIMÕES, Maurício dos Santos . Metodologia para reconhecimento de três solos por sensores: laboratorial e orbital. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa - MG, v. 28, n. 5, p. 877-889, 2004a.

DEMATTE, J. A. M. et al. Comportamento espectral de um latossolo amarelo coeso argissólico em função de seu uso e manejo. **Magistra**, Cruz das Almas, v. 16, n. 2, p. 105-112, 2004b.

DESMET, P. J. J.; G. GOVERS. A GIS procedure for automatically calculating the USLE LS factor on topographically complex landscape units. **Journal of Soil and Water Conservation**, 51 (5): 427-433. 1996.

DOCTOR, P.G. Sensitivity and Uncertainty Analyses for Performance Assessment Modeling. **Engennering Geology**, 26: 411- 429. 1989.

DONZELI, P.L.; VALÉRIO FILHO, M.; PINTO, S.A.F.; NOGUEIRA, F.P.; ROTTA, C.L.; LOMBARDI NETO, F. Técnicas de sensoriamento remoto aplicadas ao diagnóstico básico para o planejamento e monitoramento de microbacias hidrográficas. Campinas: **Documentos IAC**,v. 29, p. 91-119,1992.

EUNGSANG, P.; KANWAR, R.S.; JHA, M.; GASSMAN, P.W.; AHMAD, K. & SALEH, A. Calibration and validation of SWAT for the upper Maquoketa River Watershed. *Intern. J. Agric. Eng.*, 16:35-48, 2009.

FUSSEL, J; RUNDQUIST, D; HARRINGTON, J A. On defining remote sensing. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v52, n.9, p. 1507-1511. 1986.

GALVAO, L. S. ; FORMAGGIO, A. R. ; COUTO, E. G. ; ROBERTS, D. A. Estudo das relações entre tipos de solos, alteração, mineralogia e topografia por sensoriamento remoto hiperespectral. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 8, 2007, Florianópolis (SC). ... São José dos Campos (SP) : INPE/MCT , 2007. p. 6453-6460.

HEY, T.; TANSLEY, S.; TOLLE, K. **The fourth paradigm: data-intensive scientific discovery**. Washington. Microsoft Research, 2009.

HUGGETT, R. J. **Earth surface systems**. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 1985.

IBIN R.; SUDHEER, K.P. & CHAUBEY, I. Sensitivity and identifiability of stream flow generation parameters of the SWAT model *Hydrol. Process*. 2010. Published online in Wiley InterScience (www.interscience.wiley.com) DOI: 10.1002/hyp.7568. p.1133-1
CORREA, E.A.; MORAES, I.C.; PEREIRA, L.H.; PINTO, S.A.F. Fotopedologia e Sistemas de Informação Geográfica integrados na caracterização e mapeamento de solos. Maringá, *Boletim de Geografia – UEM*. ISSN 0102-5198. Aceito para publicação em: 11 dez. 2015.

IMAN, R.L.; HELTON, J. An Investigation of Uncertainty and sensitivity Analysis for Computer Models. **Risk Analysis**, 8 (1): 71 -90, 1987.

JACOMINO, V. M. F. **Implementação de uma metodologia para avaliação das incertezas associadas às previsões feitas por um modelo de transporte de sedimentos e poluentes em bacias hidrográficas**. São Paulo, Tese de Doutorado: Instituto de Pesquisa Energéticas e Nucleares – IPEN. 1997.

JENSEN, J. **Sensoriamento Remoto do Ambiente: Uma Perspectiva em Recursos Terrestres**: Trad. EPIPHANIO J. C. N. et. al, São José dos Campos: Parêntese, 2009.

JEONG, J.; KANNAN, N.; ARNOLD, J.; GLICK, R.; GOSSELINK, L. & SRINIVASAN, R. Development and integration of sub-hourly rainfall-runoff modeling capability within a watershed model. *Water Res Manage*, 2010. DOI 10.1007/s11269-010-9670-4.

JHA, M.; ARNOLD, J.G.; GASSMAN, P.W.; GIORGI, F. & GU, R. Climate change sensitivity assessment on Upper Mississippi River Basin streamflows using SWAT. *J. Am. Water Res. Assoc.* 42:997-1016. 2006.

KINNELL, P.I.A. Alternative approaches for determining the USLE-M slope length factor for grid cells. **Soil Science Society of America Journal**. N. 69, p. 674–680, 2005.

LAFLEN, J. M.; L. J. LANE; G. R. FOSTER. WEPP: A new generation of erosion prediction technology. **Journal of Soil and Water Conservation**. 46 (1): 34-38. 1991.

LEE, C. **Models in planning. An introduction to the use of quantitative models in planning**. Oxford. Pergamon Press. 1973.

LEPSCH, I.F.; BELLINAZZI JR., R.; BERTOLINI, D.; ESPÍNDOLA, C.R. **Manual para levantamento utilitário do meio físico e classificação de terras no sistema de capacidade de uso**. 4ª aproximação, 2ª imp. rev. Campinas: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1991.

LOUCKS, D. P.; VAN BEEK, E. **Water Resources Systems Planning and Management**. Paris: UNESCO, 2005.

LUIS, S.J.; MCHAUGHLIN, D.A. A Stochastic Approach to Model Validation. **Advances in Water Resources**. 15: 15-32, 1992.

MACHADO, R.E. **Simulação de escoamento e de produção de sedimentos em uma microbacia hidrográfica utilizando técnicas de modelagem e geoprocessamento**. 2002, 152 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura Luiz Queiroz – ESALQ/ USP, Piracicaba, 2002.

MANNIGEL, A. R.; CARVALHO M. DE P.; MORETI, D.; MEDEIROS, L. R. Fator erodibilidade e tolerância de perda dos solos do estado de São Paulo. **Revista Acta Scientiarum**, v.24, n.5, p.1335-1340, 2002.

MARCHIORO, E. **Modelagem hidrossedimentológica na bacia do córrego Santa Maria: Subsídios à Aplicação de Práticas de Conservação de Água e solo no Noroeste Fluminense**. Rio de Janeiro. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Geografia/UFRJ. 2008.

MINOTI, R. T. **Abordagens qualitativas e quantitativas de microbacias hidrográficas e áreas alagáveis de um compartimento do médio Mogi-Superior/SP**. São Carlos. Tese de Doutorado: Escola de Engenharia de São Carlos/USP. 2006.

MOORE, I.D., BURCH, G.J. Physical basis of the length-slope factor in the Universal Soil Loss Equation. **Soil Science Society of America Journal** 50 (5). 1294–1298. 1986

MORAES, I.C.; CORREA, E.A.; COUTO JR., A.A.; PINTO, S.A.F. Análise das perdas de solo em parcelas experimentais em pastagem no centro leste paulista. Natal: XXXV Congresso Brasileiro de Ciências do Solo. Anais..., 2015. Viçosa-MG: Sociedade Brasileira de Ciências do Solo. 4 p. Disponível em: <<http://www.eventossilos.org.br/cbcs2015/>>.

MORAES, I.C.; CORREA, E.A.; PINTO, S.A.F. Uso de tecnologias de informação geográfica no mapeamento de formas de vertente em pequena bacia hidrográfica (Rio Claro/SP/Brasil). Havana: XV Encontro dos geógrafos da América Latina. Anais..., 2015. 6 p. Disponível em: <<http://www.xv-egal-cuba.com/index.php?module=default/principal>>.

MORUZZI, R.B.; OLIVEIRA, S.C. Relação entre intensidade, duração e frequência de chuvas em Rio Claro, SP: métodos e aplicação. Teoria e Prática da Engenharia Civil, v.9, n.13, p.59-68, 2009

NEITSH, S.L.; ARNOLD, J.G.; KINIRY, J.R.; KING, K.W. **Soil and water assesment tool – theoretical documentation**: Version 2000. Temple, blackland Research Center, texas Agricultural experiment Station, 2002.

PEREIRA, L.H. **Caracterização da erosão hídrica laminar do solo em bacia hidrográfica com base na malha fundiária, por meio de sensoriamento remoto**,

geoprocessamento e modelagem. Rio Claro, SP: UNESP, 2010. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós- Graduação em Geografia, UNESP, Rio Claro, 2010.

PINTO, S. A. F. **Sensoriamento Remoto e integração de dados aplicados no estudo da erosão de solos:** contribuição metodológica. 1991. 147 f. Tese (Doutorado em Geografia) - Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1991.

PINTO, S. A. F. **Utilização de técnicas de sensoriamento remoto para a caracterização de erosão do solo no SW do estado de São Paulo. 1983..** (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, São José dos Campos, 1983

PINTO,S.A.F. **Contribuição metodológica para análise de indicadores da erosão do solo utilizando técnicas de sensoriamento remoto, geoprocessamento e modelo predictivo.**1996, 136 f. Tese (Livre Docência) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 1996.

PRUSKI, F. F. et al . **Escoamento Superficial.** 2 ed. Viçosa: UFV, 2010.

RENARD, K.G.; FOSTER, G.R; WEESIES, G.A; PORTER, J.P. Revised Universal soil loss equation. **Journaul of soil and water Conservation**, 46, n3, p.30-33, 1991.

ROSENBLUETH, A. e WIENER, N. The Role of Models in Science. **Philosophy of Science.**12: 316-321, 1945.

SANCHES, I. A. ; EPIPHANIO, J. C. N. ; FORMAGGIO, A. R. . Culturas agrícolas em imagens multitemporais do satélite Landsat. **Agricultura em São Paulo**, São Paulo (SP), v. 52, n. 01, p. 83-96, 2005.

STRAHLER, A. N. Systems theory in physical geography.**Physical Geography.** 1, 1-27. 1980.

TODT, V. ; RUBERT, C. ; SILVA, J. D. S. ; FORMAGGIO, A. R. ; SHIMABUKURO, Y. E. Classificador adaptativo para o reconhecimento de alvos em imagens CCD/CBERS. RBC. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 58, p. 293-303, 2006.

TOMOVIC, R. ; VUKOBRATOVIC, M. **Modern Analytic and Computational Methods in Science and Mathematics.** American Elsevier Publishing Company, Inc. , New York, 1972.

U.S.D.A. Soil Conservation Service. **Guide for soil conservation surveys.** Washington, 1948.

VALERIANO, M. M. Mapeamento do comprimento de rampa em microbacias com sistemas de informação geográfica. **Acta Scientiarum** (UEM), Maringá - PR, v. 24, n. 5, p. 1541-1551, 2002a.

VALERIANO, M. M. Modelo digital de elevação com dados SRTM disponíveis para a América do Sul. São José dos Campos, SP: INPE: Coordenação de Ensino, Documentação e Programas Especiais (INPE-10550-RPQ/756). 72p. 2004.

VALERIANO, M. M. Modelo digital de variáveis morfométricas com dados SRTM para o território nacional: o projeto TOPODATA. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 12, 2005, Goiânia -GO. **Anais ...** São José dos Campos - SP : INPE,2005. p. 1-8.

VALERIANO, M. M. Programação do cálculo da declividade em SIG pelo método de vetores ortogonais. **Espaço e Geografia (UnB)**, Brasília-DF, v. 5, n. 1, p. 69-85, 2002b.

VALERIANO, M. M.. Mapeamento da declividade em microbacias com sistemas de informação geográfica. Revista **Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande- PB, v. 7, n. 2, p. 303-310, 2003.

VALERIANO, M. M.; MORAES, J. F. L. Extração de rede de drenagem e divisores por processamento digital de dados topográficos. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 10. 2001, Foz do Iguaçu. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2001. 1CD. p. 1-8.

Von Sperling, M. **Estudos e modelagem da qualidade da água de rios**. Belo Horizonte (MG): Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – DESA/UFGM. 2007.

WILLIAMS, J.R. Sediment yield prediction with universal equation using runoff energy factor. In: **Present and perspective technology for predicting sediment yields and sources**. US Dept of Agriculture Publ. ARS-540, p. 244-252, 1975.

WILLIAMS, J.R.; H.D.BERNDT. Determining the universal soil loss equation's length-slope factor for watersheds. In: **Erosion and solid matter transport in inland waters**. IAHS-AISH publication. 122. pp 217-225. 1976

WISCHMEIER, W. H.; SMITH, D. D. **Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning**. Agriculture Handbook n.537. Washington: US Department of Agriculture, 1978.

WISCHMEIER, W. H.; SMITH, D. D. Rainfall energy and its relationships to soil loss. **Transactions of the American Geophysical Union**, Washington, v. 39, p. 285-291, 1958.