

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS

**ANÁLISE DA GEOLOGIA, GEOMORFOLOGIA E SOLOS NO PROCESSO DE
EROSÃO POR VOÇOROCAS: BACIA DO TABOÃO, RS**

ANA CLAUDIA VIERO

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental.

Orientador: Prof.^a. Dr.^a. Nilza Maria dos Reis Castro

Banca Examinadora

Prof. Dr. Antonio José Teixeira Guerra	IG/UFRJ
Prof. Dr. Francisco Bragança	IPH/UFRGS
Prof. Dr. Roberto Verdum	IG/UFRGS
Prof. Msc. Alfonso Risso	IPH/UFRGS

Porto Alegre, maio de 2004

*Dedico este trabalho aos meus pais, melhores
exemplos de seres humanos e profissionais, e
ao Fernando, companheiro de todos os momentos.*

APRESENTAÇÃO

Este trabalho foi desenvolvido no Programa de Pós-Graduação Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental do Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, sob a orientação da Prof. Nilza Maria dos Reis Castro.

AGRADECIMENTOS

Muitas pessoas me auxiliaram nesta jornada. No entanto, gostaria de expressar meus sinceros agradecimentos especialmente:

À minha orientadora professora Nilza Maria dos Reis Castro, pela orientação dedicada e incondicional, apoio e amizade;

A meu “co-orientador” professor Alfonso Risso que, embora não possa receber formalmente esta atribuição, foi fundamental para a realização desta pesquisa além de ter sido um grande amigo;

Ao professor Nelson Luna Caicedo, pelas discussões sobre o processo erosivo e sua relação com a água subterrânea, e pelo incentivo ao longo de todo o trabalho;

Ao professor Joel Avruch Goldenfum, coordenador do Projeto Potiribu, pelas discussões e sugestões;

Aos professores do Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Carlos André Bulhões Mendes, Gustavo Merten, Olavo Pedrollo, Robin Clarke e Walter Collischon, pelas sugestões, pelo auxílio em solucionar várias dúvidas e pela indicação de novas alternativas para pesquisar o problema;

Ao professor Marcos Imerio Leão, pelo apoio, incentivo e amizade;

Aos professores Adelir Strieder, do Laboratório de Modelagem Geológica e Ambiental, da Escola de Engenharia da UFRGS, e Nelson Amoretti Lisboa, do Instituto de Geociências da UFRGS, respectivamente, pelas discussões sobre a formação das voçorocas *in loco* e pela amizade, e pela contribuição na análise do lineamentos;

Aos hidrotécnicos do IPH, especialmente Dalton Leão que foi fundamental na etapa de mapeamento das voçorocas;

Ao bolsista do Projeto Potiribu, Fernando Dornelles, pela digitalização do mapa de solos e pela elaboração de figuras;

Aos colegas do IPH, especialmente, Joana D’arc de Medeiros, pelo auxílio na geração dos atributos derivados do MNT e pela amizade, Nilson Teixeira de Oliveira, pelo auxílio no trabalho de campo e pela amizade, e Jean Paolo Gomes Minella, pelo incentivo e apoio;

Aos professores e funcionários do IPH, sempre atenciosos e dispostos a ajudar, especialmente, à Sra. Nadir Bueno Solari, secretária do Pós-Graduação.

A Marcelo Bastos pelo enquadramento do levantamento de solos da bacia no sistema de classificação de solos atual;

Às bibliotecárias Jussara Silva, do IPH, e Ana Lúcia Borges Fortes Coelho, da CPRM, pela dedicação na busca e revisão de referências, e pela amizade e gentileza;

Aos digitadores da CPRM Daniel Mottin Soares e Gualtério Souto Cássia (Dedé) pelo auxílio e dedicação na preparação das figuras e pela editoração;

Aos colegas da CPRM que sempre me incentivaram e foram muito amigos, especialmente: Andréa Germano, pela compreensão, principalmente, nas fases mais difíceis do “processo criativo” e liberação de horários de trabalho; Andréa Sander e Ricardo Cunha Lopes, pelas análises petrográficas; Carlos Iglesias, pelas “dicas” no *Idrisi* e no *Auto Cad*; Douglas Roberto Trainini, pelo auxílio na fotointerpretação, discussões sobre o processo erosivo e apoio; Marcos Alexandre de Freitas, pelas discussões sobre a hidrogeologia da área e suas repercussões na formação das voçorocas, além da compreensão na liberação de horários de trabalho e apoio; Paulo Henrique Ferreira, pela amizade, apoio e incentivo; Rosemary Hoff, pela amizade e dedicação em ensinar os “primeiros passos” no *Idrisi*; Valmor Justin, pela confecção das lâminas; Vitório Orlandi Filho, pela revisão do texto, discussões, amizade e estímulo, e Wilson Wildner, pelas discussões sobre a geologia da área de estudo, revisão do texto e incentivo permanente;

À CPRM que possibilitou a realização deste curso através da liberação parcial do horário de trabalho e apoio financeiro para a pesquisa;

Ao CT-HIDRO/CNPQ pelo financiamento da pesquisa;

Aos componentes da banca por terem aceitado participar da etapa final deste trabalho;

À comunidade de Pejuçara e aos agricultores que permitiram nosso trabalho em suas propriedades, em especial ao Sr. Abílio Cadore e esposa;

À Dione Buseti e à minha querida e dedicada mãe pela revisão gramatical;

À minha família, pela compreensão, apoio e estímulo ao longo de todo este longo processo;

De forma mais do que especial, ao meu querido marido, que foi importante tanto tecnicamente, fazendo observações fundamentais para o entendimento do processo erosivo, como dando suporte emocional, sendo paciente, compreensivo e amoroso.

Muito obrigada a todos!!!

RESUMO

O fenômeno da erosão por voçorocas se manifesta amplamente na região do planalto basáltico sul-rio-grandense do qual a bacia do arroio Taboão é representativa. Com o objetivo de verificar fatores controladores deste processo foram realizadas 3 abordagens: identificação das relações entre as voçorocas e a geologia, geomorfologia e solos; análise da relevância das variáveis que representam esses temas e avaliação do controle conjunto destas variáveis. As variáveis escolhidas foram: lineamentos e litologias (geologia); declividade, curvatura das encostas no plano e no perfil, área de contribuição (geomorfologia) e tipos de solos.

Foram mapeadas e descritas 83 voçorocas distribuídas homoganeamente na área de estudo. Visando identificar as relações entre as voçorocas e cada uma das variáveis, os sete Planos de Informação (PIs) que as descrevem foram cruzados individualmente com o PI das voçorocas. A análise da relevância das variáveis no processo de voçorocamento demonstrou a seguinte ordem decrescente de importância: Solos > Lineamentos > Declividade > Curvatura no Perfil > Curvatura no Plano > Litologia > Área de Contribuição. O resultado para a variável área de contribuição pode indicar uma limitação da metodologia empregada.

O comportamento das variáveis em cada classe de risco de erosão demonstrou de que forma as mesmas controlam conjuntamente as voçorocas. Dentre as voçorocas mapeadas, 78% ocorrem sobre áreas com alto e muito alto risco de erosão. Analisou-se o comportamento das variáveis nas voçorocas situadas em áreas com muito baixo, baixo e moderado risco para tentar explicar o fato de não haver uma concordância total entre as voçorocas e as áreas com riscos de erosão mais elevados.

A geologia mostrou exercer um importante papel no desenvolvimento das voçorocas na área de estudo, tanto através dos lineamentos, principalmente aqueles com orientação NW, como através da presença de arenitos entre os derrames de basalto. Os arenitos mostraram-se especialmente significativos para explicar a ocorrência de voçorocas em áreas com muito baixo, baixo e moderado risco de erosão.

O controle da geomorfologia na ocorrência de voçorocas fica bastante claro ao identificar-se que 61% das voçorocas ocorrem em áreas com declividade superior à média da área de estudo. A grande amplitude de valores de área de contribuição, aliado ao fato desta variável ser a menos relevante no fenômeno erosivo, sugere que a mesma não é importante no desenvolvimento de voçorocas na área de estudo. As encostas com forma convergente no plano mostraram potencializar a erosão, estando presentes em 58,3% das superfícies ocupadas por voçorocas. Já a curvatura no perfil mostrou ser uma variável cujo comportamento não é determinante para a ocorrência de voçorocas.

O controle exercido pelos solos fica evidente ao se constatar que a integração de dados sem esta variável gera o pior resultado na tentativa de reprodução das voçorocas na área de estudo. Os solos das unidades de mapeamento Latossolo Vermelho distrófico (LVd) e Nitossolo Vermelho eutroférico (NVef) ocupam 36 e 35% das superfícies das voçorocas, respectivamente, embora cada unidade ocupe 28% da área da bacia do Taboão. Além disso, os solos da unidade NVef mostram um aumento considerável da sua superfície à medida que aumenta o risco de erosão, apesar de serem os mais frequentes nas voçorocas situadas em áreas com Baixo Risco.

A metodologia utilizada demonstrou ser uma ferramenta eficiente para identificação dos fatores controladores e para o zoneamento da erosão por voçorocas, fato comprovado pela elevada concordância espacial das voçorocas com as áreas com alto e muito alto risco (78%). No entanto, apesar deste resultado satisfatório, a ausência de concordância total pode indicar que as variáveis escolhidas não são as únicas a controlar este fenômeno de erosão linear na área de estudo.

ABSTRACT

The phenomenon of gully erosion, of which the Taboão creek basin is representative, is widely seen in the Rio Grande do Sul basaltic plateau region. Three approaches were used in order to look at the factors controlling this process: identification of the relationships between the gullies and geology, geomorphology and soils; relevance analysis of the variables that represent these issues and evaluation of the joint control of these variables. The variables chosen were: lineaments and lithologies (geology); slope, plan and profile curvature, contribution area (geomorphology) and types of soil.

Eighty-three gullies homogeneously distributed throughout the study area were mapped and described. In order to identify the relations between gullies and each of the variables, the seven Information Plans (IPs) that describe them were individually cross-matched with the IP of the gullies. The relevance analysis of the variables in the gully formation process presented the following decreasing order of importance: Soils > Lineaments > Slope > Profile Curvature > Plan Curvature > Lithology > Contribution Area. The result for the contribution area may suggest a restriction of the methodology.

The behavior of variables in each class of risk of erosion showed how they control the gullies together. Among the gullies mapped, 78% occur over areas at high and very high risk of erosion. The behavior of variables in the gullies located in areas at very low, low and moderate risk was analyzed to try to explain the fact that no complete agreement exists between the gullies and the areas at higher risk of erosion.

The geology proved to play an important role in the development of gullies in the study area, both through the lineaments, especially those in an NW direction, and through the presence of sandstones between the basalt flows. The sandstones proved especially significant to explain the occurrence of gullies in areas at a very low, low and moderate risk of erosion.

The control of geomorphology in the occurrence of gullies becomes quite clear when it is found that 61% of the gullies occur in areas with slope greater than the average of the study area. The great range of values from contribution areas, together with the fact that this variable is the least relevant in the erosive phenomenon, suggests that it is not important in the development of gullies in this area. The slopes with a convergent form on the plane potentiated the erosion, and are present in 58.3% of the surfaces occupied by gullies. On the other hand, the profile curvature proved to be a variable whose behavior is not a determining factor for gully occurrence.

The control exerted by soils is clear when it is observed that data integration without this variable generates the worst result in the attempt to reproduce gullies in the study area.

The soils of the LVd and NVef mapping units take up 36 and 35% of the gully surfaces, respectively, although each unit takes up 28% of the Taboão basin area. Furthermore, the soils in the NVef unit show a considerable increase in its surface, insofar as the risk of erosion is increased, although they are the most frequent in gullies located in low Risk areas.

The methodology used was an effective tool to identify controlling factors and to zone erosion caused by gullies, a fact confirmed by the high spatial agreement between gullies and areas at high and very high risk (78%). However, despite this satisfactory result, the lack of full agreement may indicate that the variables chosen are not the only ones to control the gully erosion in the study area.

SUMÁRIO

1 – INTRODUÇÃO.....	01
1.1 – Justificativas.....	01
1.2 – Objetivos.....	02
2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	04
2.1 – Erosão.....	04
2.1.1 – Erosão e Formação de Redes de Drenagem.....	04
2.1.2 –Fatores Controladores da Erosão Hídrica.....	05
2.1.3 –Formas de Erosão.....	13
2.2 – Técnicas Auxiliares.....	18
2.2.1 – Identificação dos Lineamentos.....	18
2.2.2 – Sistema de Informações Geográficas.....	19
2.2.2.1 – Técnicas de Análise Geográfica.....	20
2.2.2.2 – Modelo Numérico do Terreno.....	28
2.2.2.3 – Atributos Derivados do MNT.....	29
3 – METODOLOGIA	36
3.1 – Aquisição de Dados.....	36
3.1.1 – Mapeamento das Voçorocas.....	36
3.1.2 – Caracterização das Variáveis Controladoras da Erosão por Voçorocas.....	38
3.1.2.1 – Geologia.....	39
3.1.2.2 – Geomorfologia.....	40
3.1.2.3 – Solos.....	43
3.2 – Integração dos Dados Através de Técnicas de Geoprocessamento.....	44
3.2.1 - Relação entre Voçorocas e Geologia, Geomorfologia e Solos.....	44
3.2.2 – Controle da Geologia, Geomorfologia e Solos na Erosão por Voçorocas.....	45
3.2.2.1 - Definição das Amostras para Integração dos Dados.....	46
3.2.2.2 – Relevância de cada Variável na Erosão por Voçorocas.....	47
3.2.2.3 – Zoneamento do Risco Potencial à Erosão por Voçorocas.....	47
3.3 - Validação dos Resultados.....	48
4 – DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	50
4.1 – Clima.....	51
4.2 – Vegetação.....	52
4.3 – Uso do Solo.....	53
4.4 – Geologia.....	55
4.4.1 – Geologia Regional.....	55
4.4.2 – Geologia Estrutural.....	57
4.5 – Geomorfologia.....	58
4.6 – Solos.....	64
4.7 – O Problema da Erosão na Bacia do Taboão.....	68
5 – RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	70
5.1 – Mapeamento das Voçorocas.....	70
5.2 – Comportamento de Geologia, Geomorfologia e Solos na Formação de Voçorocas.....	78
5.2.1 - Geologia e Voçorocas.....	78
5.2.2 - Geomorfologia e Voçorocas.....	87
5.2.3 – Solos e Voçorocas.....	90
5.3 – Controle da Geologia, Geomorfologia e Solos na Erosão por Voçorocas.....	93
5.3.1 – Definição das Amostras para Integração de Dados.....	93
5.3.2 – Relevância de cada Variável na Erosão por Voçorocas.....	95
5.3.3 – Zoneamento de Risco Potencial à Erosão por Voçorocas.....	98

SUMÁRIO (continuação)

5.3.3.1 – Caracterização das Classes de Risco Potencial à Erosão por Voçorocas.....	98
5.3.3.2 – Relação entre Voçorocas e Zoneamento de Risco Potencial à Erosão.....	105
6 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	111
6.1 – Conclusões.....	111
6.2 – Recomendações.....	116
7 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	119

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Formas tridimensionais das encostas (Fonte: Dikau, 1989, p. 57).....	30
Figura 2.2 – Matriz de elevação 3 x 3 (Fonte: Zevenbergen e Thorne, 1987, p.48).....	32
Figura 4.1 – Mapa de localização da bacia do arroio Taboão.....	50
Figura 4.2 – Precipitações médias na bacia do Taboão, entre 1990 e 2001 (Fonte: Medeiros, 2004, p. 34).....	52
Figura 4.3 – Modelo numérico do terreno na bacia do Taboão.....	60
Figura 4.4 – Declividade na bacia do Taboão.....	61
Figura 4.5 – Formas das encostas no perfil, na bacia do Taboão.....	62
Figura 4.6 – Formas das encostas no plano, na bacia do Taboão.....	63
Figura 4.7 – Solos na bacia do Taboão.....	65
Figura 5.1 – Localização das voçorocas na bacia do Taboão.....	72
Figura 5.2 – Voçoroca ativa situada no extremo oeste da bacia, nº 79.....	73
Figura 5.3 – Voçoroca estabilizada situada no noroeste da bacia, nº 78.....	73
Figura 5.4 – Relação entre área da bacia de contribuição e profundidade das voçorocas.	73
Figura 5.5 – Relação entre área da bacia de contribuição e comprimento das voçorocas.	74
Figura 5.6 - Relação entre área da bacia de contribuição e área das voçorocas.....	74
Figura 5.7 – Diques de arenito cortando rocha vulcânica, ravina nº 84.....	79
Figura 5.8 – Esboço geológico da bacia do Taboão.....	81
Figura 5.9 – Surgência de água em fratura com direção N 20 W, voçoroca nº 60.....	82
Figura 5.10 – Mapa de Lineamentos da bacia do Taboão.....	84
Figura 5.11 – Frequência dos lineamentos na bacia do Taboão.....	85
Figura 5.12 – Ilustração do Aquífero Serra Geral (Fonte: Freitas <i>et al.</i> , 2000).....	86
Figura 5.13 – Relação entre área e declividade média da bacia de contribuição.....	88
Figura 5.14 – Risco de erosão por voçorocas na bacia do Taboão.....	99

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Classes de Lineamentos.....	40
Tabela 3.2 – Relação entre raio de curvatura e as curvaturas no perfil e no plano.....	41
Tabela 3.3 - Classes de curvaturas no perfil e no plano.....	42
Tabela 3.4 – Identificadores das classes de solo.....	43
Tabela 3.5 – Risco potencial de erosão em função da probabilidade de ocorrência de voçoroca.....	48
Tabela 4.1 – Uso do solo na bacia do Taboão.....	54
Tabela 4.2 – Curvaturas das encostas no perfil e no plano.....	59
Tabela 5.1 – Dimensões das voçorocas na bacia do Taboão.....	71
Tabela 5.2 – Declividade (%) nas voçorocas com <i>piping</i>	76
Tabela 5.3 – Declividade (%) nas voçorocas e nas bacias de contribuição.....	87
Tabela 5.4 – Área de contribuição (m ²) nas voçorocas.....	88
Tabela 5.5 – Formas das encostas nas voçorocas.....	89
Tabela 5.6 – Solos nas voçorocas e nas suas bacias de contribuição.....	90
Tabela 5.7 – Resultados dos histogramas gerados pelo teste das amostras (%).....	94
Tabela 5.8 – Relevância de cada variável no desenvolvimento das voçorocas.....	95
Tabela 5.9 – Comparação de resultados das integrações.....	97
Tabela 5.10 – Risco potencial de erosão na bacia do Taboão.....	97
Tabela 5.11 - Declividade e área de contribuição nas classes de risco de erosão.....	100
Tabela 5.12 – Frequência das curvaturas no plano e no perfil nas classes de risco de erosão.....	100
Tabela 5.13 – Relação entre risco de erosão por voçorocas e litologia e lineamentos (%).....	101
Tabela 5.14 - Relação entre risco de erosão por voçorocas e as direções dos lineamentos (%).....	102
Tabela 5.15 – Relação entre risco de erosão por voçorocas e solos (%).....	102
Tabela 5.16 – Relação entre voçorocas e risco de erosão.....	105
Tabela 5.17 – Relação entre as voçorocas por risco e as dimensões, área de contribuição e declividade	105
Tabela 5.18 - Concentração do ES (%) nas voçorocas por risco de erosão.....	106
Tabela 5.19 – Relação entre voçorocas por risco de erosão e curvaturas (%).....	107
Tabela 5.20 – Relação entre voçorocas por risco e litologia e lineamentos (%).....	107
Tabela 5.21 – Relação entre voçorocas por risco e solos (%).....	108

1 – INTRODUÇÃO

1.1 – Justificativas

Apesar da importância que os solos possuem para a existência da vida na superfície terrestre, tem-se dado pouca atenção a este recurso natural no que diz respeito à sua utilização e conservação.

A erosão vem gerando ao longo do tempo pesados prejuízos para a sociedade através da perda de solo fértil e do assoreamento dos cursos d'água, da contaminação das águas superficiais e subterrâneas com fertilizantes e agrotóxicos utilizados nas lavouras, da redução das áreas disponíveis para cultivo, da degradação de áreas urbanas ou em urbanização, e de investimentos públicos em obras de infra-estrutura.

No Estado de São Paulo, por exemplo, estima-se que 80% das terras cultivadas apresentem processos erosivos além dos limites de recuperação natural do solo e que existam três mil voçorocas cujas obras corretivas necessárias para estabilização comprometeriam 20% do orçamento estadual (São Paulo, 1990).

Na superfície terrestre se desenvolve um quadro extremamente dinâmico de formação de solos a partir da alteração das rochas e da atuação de processos pedogenéticos, comandados por agentes físicos, químicos e orgânicos. A formação dos solos é contrabalançada pelo processo de erosão que remove os constituintes do solo, sobretudo pela ação da água, e contribui para a formação da paisagem.

Este quadro reflete um certo equilíbrio na natureza, e a erosão é, neste caso, considerada natural. No entanto, este equilíbrio pode ser rompido por uma aceleração da erosão que, por ser mais veloz que os processos de formação de solos, não permite a regeneração dos mesmos e resulta na degradação do ambiente e em prejuízos para o homem. O uso do solo pelo homem, sobretudo quando de forma inadequada, através do desmatamento, do cultivo do solo, da implantação de estradas, criação e expansão de áreas urbanas, é o fator decisivo na aceleração dos processos erosivos.

Entre os diferentes processos erosivos, as voçorocas constituem o estágio mais avançado e complexo de erosão, com um poder destrutivo local superior ao dos demais (São Paulo, *op.cit.*). Isto se deve à variedade de processos observados nas voçorocas, como erosão superficial, erosão interna promovida por *pipings*, além de escorregamentos e desmoronamentos das paredes laterais.

A bacia do arroio Taboão, objeto deste estudo, apresenta a agricultura como principal uso do solo. O desenvolvimento da agricultura na região trouxe consigo vários problemas de erosão, especialmente, sob a forma de ravinas e voçorocas.

Medidas para remediar o problema foram adotadas pelos agricultores, entre as quais a construção de terraços nos locais onde as declividades eram superiores a 5%. Embora tenham mostrado resultado na redução da erosão laminar, tais medidas tiveram efeito negativo com relação à erosão linear. A água acumulada nos terraços, ao escoar de forma concentrada junto às estradas, aos limites de propriedade e junto aos talwegues, especialmente durante eventos pluviométricos extremos, provocou na intensificação deste tipo específico de erosão.

A partir da década de 90, o cultivo através de plantio direto sem terraceamento começa a ser introduzido por alguns agricultores incentivados pela Federação Brasileira de Plantio Direto, por cooperativas agrícolas e por instituições de pesquisa. Esta prática de cultivo, hoje disseminada em toda a região, vem resultando em uma significativa diminuição da erosão e de perda de solo, embora persistam na bacia do Taboão inúmeras feições erosivas, principalmente sob a forma de voçorocas.

A recuperação de áreas degradadas e o combate ao problema da erosão requerem o reconhecimento das áreas mais suscetíveis à erosão, bem como à elaboração de projetos de controle da erosão antrópica, nos quais esteja prevista a adoção de medidas preventivas e de práticas de ocupação do solo mais adequadas. Isto só será possível se forem identificados os fatores naturais e antrópicos que controlam a formação e evolução dos processos erosivos e se forem conhecidas as suas características que determinam a ocorrência destes fenômenos.

1.2 – Objetivos

O objetivo geral desta dissertação é verificar se a geologia, através de lineamentos e litologias, os solos e a geomorfologia, através da declividade do terreno, das curvaturas das encostas no plano e no perfil, e da área de contribuição, controlam o fenômeno de erosão por voçorocas na bacia hidrográfica do Taboão, situada no noroeste do Rio Grande do Sul. Embora se reconheça a importância do uso do solo no processo erosivo, este fator controlador foi somente identificado em cada feição erosiva mapeada.

Os objetivos específicos compreendem

- identificar padrões de comportamento destas variáveis associados à ocorrência de voçorocas;
- identificar o controle exercido por cada variável, relativamente às demais, no desenvolvimento de voçorocas;

- gerar um mapa de risco de erosão por voçorocas que permita a identificação de locais mais suscetíveis à erosão e a adoção de medidas preventivas;

- testar a utilização de técnicas de análise espacial como ferramenta para integração de informações necessárias ao entendimento do fenômeno de erosão por voçorocas.

2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 – Erosão

Entende-se por erosão o processo de “desagregação e remoção de partículas do solo ou de fragmentos e partículas de rochas, pela ação combinada da gravidade com a água, vento, gelo e/ou organismos (plantas e animais)”(Salomão e Iwasa, 1995).

A erosão hídrica ou erosão do solo pela água, segundo Cooke e Doornkamp (1990), envolve dois importantes eventos seqüenciais: a desagregação de partículas provocada notadamente pela erosão do impacto das gotas da chuva na superfície do solo e o seu subsequente transporte principalmente através da erosão por escoamento superficial.

Em geral, distinguem-se duas formas de abordagem para os processos erosivos: uma que considera a erosão “natural” ou “geológica”, que se desenvolve em condições de equilíbrio com a formação do solo, e outra que trata da erosão “acelerada” ou “antrópica”, cuja intensidade, sendo superior à da formação do solo, não permite a sua recuperação natural (Salomão e Iwasa, *op. cit.*).

2.1.1 – Erosão e Formação de Redes de Drenagem

Segundo De Wiest (1967), Playfair reconheceu há mais de um século, que os rios são capazes de entalhar mesmo os vales mais profundos. Juntamente com outros elementos da natureza, como o clima, as geleiras e as ondas, são capazes, ao longo do tempo, de modelar e modificar a paisagem através de sua força destrutiva. Evidências do que se tornou conhecido como lei de Playfair são constatadas ao observarmos a erosão do terreno e a formação de pequenas voçorocas após fortes tempestades de chuva, e quando são estimados enormes volumes de sedimentos finos depositados pelos rios em lagos, reservatórios e deltas.

Horton (1945) foi o primeiro pesquisador a reconhecer o significado das ravinas como feições das encostas que funcionam como condutos para a água e o transporte de sedimentos, representando o início da formação de um sistema de drenagem.

Os estágios iniciais da evolução de sistemas de drenagem, segundo Bryan (1987), podem estar relacionados às ravinas permanentes que evoluem tipicamente em direção à jusante para voçorocas. Já as ravinas efêmeras podem se aprofundar e alargar, transformando-se em ravinas permanentes, ou podem espalhar-se por uma área maior e tornar-se mais rasas, eventualmente desaparecendo. Nestes casos, elas afetam fortemente o fluxo de água e o transporte de sedimentos nas encostas e, conseqüentemente, a evolução das formas do relevo.

Um modelo evolutivo para ravinas e voçorocas é apresentado por Oliveira (1999), baseado na localização destas incisões nas encostas e considerando a sua relação com canais de primeira ordem. Este modelo pressupõe a hipótese de que grandes incisões erosivas que ocupam longitudinalmente o conjunto da encosta seriam o resultado da integração, ao longo do tempo, de incisões conectadas e desconectadas da rede de drenagem. Segundo o autor, as áreas de cabeceiras de vale, ou áreas de contribuição de mananciais, de olhos-d'água e de canais de primeira ordem são os pontos da rede hidrográfica que demonstram maior sensibilidade às oscilações hidrodinâmicas ao longo do tempo. Portanto, devido à sua dinâmica pretérita e atual e às características mecânicas herdadas desta dinâmica, compreendem áreas de risco potencial de erosão por voçorocas.

2.1.2 – Fatores Controladores da Erosão Hídrica

Grande parte dos estudos de erosão dos solos, segundo Guerra (1998), é oriunda de trabalhos empíricos que coletam uma vasta gama de dados sobre perda de solo e agentes controladores, a partir dos quais são determinadas correlações estatísticas. Em função disso, uma grande quantidade de variáveis é apontada como sendo significativa para explicar e prever a erosão.

Os principais fatores que controlam a erosão compreendem a erosividade da chuva, a erodibilidade proporcionada pelas propriedades do solo, a natureza da cobertura vegetal, o relevo, bem como o uso do solo. Além destes, também consideramos a geologia como um fator controlador da erosão tendo em vista a existência de alguns trabalhos que apontam a sua importância na formação de erosão. Todos estes fatores são apresentados e discutidos a seguir.

a) Erosividade

A erosividade é definida como a habilidade da chuva em causar erosão. Os parâmetros utilizados para investigá-la compreendem o total de chuva, a intensidade, o momento e a energia cinética.

Embora o total pluviométrico seja utilizado em vários estudos sobre erosão dos solos, esse parâmetro por si só é insuficiente para prever a erosão (Guerra, 1998). Já a intensidade da chuva, parâmetro determinado em várias estações meteorológicas, é muito importante em estudos que se relacionam à energia da chuva e tem sido demonstrada por diversos autores como um bom parâmetro para prever a perda de solo.

De acordo com Summerfield (1991), quando a intensidade de precipitação excede a capacidade de infiltração da superfície, uma parte da precipitação escoar sobre a superfície recebendo o nome *fluxo superficial hortoniano* (R. E. Horton foi um pioneiro neste tema) ou de *fluxo superficial que excede a precipitação*. Em outras situações, a capacidade de infiltração não é excedida pela taxa de precipitação. No entanto, a combinação da intensidade e da duração da precipitação pode ser suficiente para saturar localmente o solo e elevar o lençol freático até a superfície. Estas condições dão origem ao que é chamado de *fluxo superficial de saturação*, que ocorre mais comumente em áreas onde o lençol freático é pouco profundo e constitui a forma predominante de fluxo superficial em ambientes úmidos.

Um valor crítico para intensidade da chuva a partir do qual começa a haver erosão, segundo Guerra (1998), tem sido buscado através de várias tentativas. No entanto, isto tem se mostrado difícil uma vez que outros fatores também influenciam o processo, como é o caso da formação de crostas na superfície do solo.

O momento é o produto entre a massa e a velocidade da gota da chuva e consiste em um parâmetro relacionado à chuva que tem sido empiricamente relacionado à remoção de partículas do solo. Estudos de erosividade e perda de solo, utilizando o momento e a energia cinética, têm mostrado, na sua maioria, que a energia cinética prediz melhor a perda de solo do que o momento (Guerra, *op. cit.*).

A energia cinética da chuva está relacionada com a sua intensidade, pois é a energia do número total de gotas de um evento chuvoso, de acordo com Evans (1980) *apud* Guerra (*op. cit.*). Levando-se em conta que a energia cinética está relacionada com a intensidade da chuva, ela é função da sua duração, massa e tamanho da gota e velocidade.

Segundo Wischmeier e Smith (1978), dados indicam que somente a energia da chuva não é um bom indicador do seu potencial erosivo. De acordo com os autores, a energia da chuva é função do total de chuva e da sua intensidade. Como o tamanho médio de uma gota aumenta com a intensidade da chuva, a velocidade final de uma gota em queda livre aumenta com o aumento do tamanho da gota e a energia de uma dada massa em movimento é proporcional ao quadrado da velocidade, a energia da chuva está diretamente relacionada à sua intensidade. Assim, o cálculo do fator erosividade para a Equação Universal de Perda de Solos consiste no produto entre a energia cinética de uma chuva e a sua intensidade máxima em 30 minutos (Wischmeier e Smith, *op. cit.*).

b) Erodibilidade

Erodibilidade, segundo Summerfield (1991), é a resistência do solo em ser removido e

transportado. Ela depende das propriedades físicas do solo, principalmente textura, estrutura, permeabilidade, densidade e das características químicas, biológicas e mineralógicas que exercem diferentes influências na erosão ao conferir maior ou menor resistência à ação das águas. Estas relações, descritas por Guerra (1998), são sintetizadas a seguir.

A erodibilidade do solo, assim como as propriedades que a afetam, não são estáticas e sim uma função que depende do tempo. Desta forma, quando analisadas em um estudo, devem ser relacionadas a um determinado período de tempo, pois podem evoluir modificando o comportamento erosivo do solo. Este é o caso, por exemplo, do uso agrícola do solo. Solos cultivados com rotação de culturas podem apresentar diferentes suscetibilidades à erosão, dependendo do tipo de cultura, assim como solos cultivados com uma mesma espécie, porém em diferentes estágios de crescimento (Castro *et al.*, 1999).

A textura influi na capacidade de infiltração e de absorção da água da chuva, interferindo no potencial de escoamento superficial do solo e em relação à maior ou menor coesão entre as partículas. Desta forma, solos com textura arenosa são porosos, permitindo a rápida infiltração da água da chuva e dificultando o escoamento superficial. Apesar disso, como possuem pequena quantidade de partículas argilosas, que atuam como uma ligação entre as partículas maiores, estes solos apresentam maior facilidade para a remoção das partículas, mesmo quando submetidos a pequenas taxas de escoamento superficial.

O papel da textura na erodibilidade dos solos também é apontado por Evans (1992) *apud* Guerra (1998), que estudou duas áreas na Inglaterra com solos com características distintas. Segundo o autor, nas áreas com solos argilosos, as ravinas se restringem aos fundos dos vales, enquanto que, nos solos mais arenosos, as ravinas encontram-se de forma mais generalizada pela encosta.

A estrutura do solo, assim com a textura, influi na capacidade de infiltração e absorção da água e na capacidade de arraste de partículas do solo. Assim, solos com estrutura microagregada apresentam alta porcentagem de poros e, conseqüentemente, alta permeabilidade, favorecendo a infiltração da água da chuva. Também mostram resistência do solo ao arraste de partículas pela água por apresentarem agregação entre partículas.

A permeabilidade, relacionada diretamente com a porosidade do solo, determina a capacidade de infiltração das águas da chuva. Geralmente, solos arenosos são mais permeáveis que solos argilosos, embora, dependendo da estruturação, solos argilosos possam apresentar-se altamente porosos e até mais que certos solos arenosos.

A densidade aparente do solo está relacionada à maior ou menor compactação dos solos. Por efeito de compactação do solo, quase sempre verificada em áreas de cultivo, observa-se um aumento da densidade como resultado da diminuição dos macroporos. A

densidade aparente também mostra relação com o teor de matéria orgânica, uma vez que, à medida que este diminui, aumenta a ruptura dos agregados e formam-se crostas que aumentam a compactação do solo.

As propriedades químicas, biológicas e mineralógicas do solo influem no estado de agregação entre as partículas, aumentando ou diminuindo a resistência do solo à erosão. Solos quimicamente pobres em bases e ricos em sesquióxidos de ferro e alumínio, como aqueles com características latossólicas, tendem em geral a se estruturar por microagregação ou em estrutura maciça, o que confere ao solo alta porosidade. Por outro lado, solos com alto conteúdo em bases tendem, em geral, a estruturas poliédricas, apresentando pequena porosidade entre as partículas e menor permeabilidade do que os latossolos.

A matéria orgânica incorporada ao solo permite maior agregação e coesão entre as partículas, tornando o solo mais estável em presença de água, mais poroso e com maior poder de retenção de água, aumentando assim a capacidade de infiltração (Salomão e Iwasa, 1995).

A estabilidade dos agregados também tem influência sobre as taxas de erodibilidade, pois à medida que os agregados se rompem no topo do solo, formam-se crostas que eventualmente provocarão a selagem dos solos (Guerra, 1999). Esse processo é responsável pela diminuição das taxas de infiltração e o aumento do escoamento superficial, o que pode acarretar no aumento da perda de solo.

A existência de crostas, assim como a compactação do solo provocada pelo tráfego de maquinário agrícola e a baixa rugosidade do solo, caracterizam o seu estado superficial, favorável ao desenvolvimento de escoamento superficial (Auzet *et al.*, 1995).

A mineralogia do solo, em especial no que se refere aos tipos de argilo-minerais, também tem influência na sua erodibilidade. As argilas do tipo montmorilonita são pouco estáveis em água, ao contrário da caulinita. Já as ilitas apresentam comportamento intermediário.

A espessura do solo é outra característica importante com relação ao seu comportamento erosivo. Solos rasos permitem rápida saturação dos horizontes superiores, favorecendo o desenvolvimento de escoamento superficial.

O gradiente textural entre os horizontes superiores do solo, relação entre os teores de areia e argila nestes horizontes, é uma das características pedológicas mais importantes em relação ao seu comportamento erosivo. Solos com gradiente textural apresentam horizonte A arenoso, ao passo que o horizonte B subjacente possui maior concentração de argilas, representando uma certa barreira à infiltração das águas. Como consequência, o fluxo de água, logo abaixo da superfície, e a saturação do horizonte superior propiciam o desenvolvimento de erosão.

c) Cobertura Vegetal

A cobertura vegetal é a defesa natural de um terreno contra a erosão. Entre os principais efeitos da cobertura vegetal, destacam-se: a proteção contra o impacto direto das gotas da chuva, a dispersão e quebra da energia do escoamento superficial, o aumento da infiltração pela produção de poros no solo por ação das raízes e o aumento da capacidade de retenção de água pela estruturação do solo por efeito da produção e incorporação de matéria orgânica.

A densidade da cobertura vegetal, segundo Guerra (1998), é fator importante no escoamento superficial e na perda de solo, enquanto o tipo de cobertura e a sua porcentagem podem reduzir os efeitos dos fatores erosivos naturais. Em uma área com alta densidade de cobertura vegetal, o escoamento superficial e a erosão ocorrem em taxas baixas, especialmente se houver uma cobertura de serrapilheira no solo que intercepta as gotas de chuva que caem através dos galhos e folhas. Já em áreas parcialmente cobertas pela vegetação, o escoamento e a perda de solo podem aumentar rapidamente, como ocorre geralmente em áreas semi-áridas, agrícolas e de superpastoreio, e onde os solos apresentam menos de 70% de cobertura vegetal.

Além de influenciar na interceptação das águas da chuva, a cobertura vegetal também atua diretamente na produção de matéria orgânica que, por sua vez, atua na agregação das partículas constituintes do solo. A agregação também é promovida pela ramificação das raízes no solo e pelo húmus resultante da sua decomposição.

d) Relevo

O relevo tem influência na erosão dos solos através da declividade, comprimento e forma das encostas.

A declividade da encosta tem influência sobre a erosão do solo devido ao efeito que provoca nas taxas de infiltração e na velocidade do escoamento superficial, embora em encostas muito íngremes ocorra uma diminuição da erosão devido a menor disponibilidade de material (Guerra, 1998). Além da relação de aumento do escoamento superficial à medida que ocorre elevação da declividade, Wischmeier e Smith (1978) salientam que, em encostas cultivadas, o escoamento superficial também é influenciado por outros fatores como tipo de cultura, rugosidade da superfície e perfil de saturação. À medida que a declividade aumenta, a perda de solo aumenta muito mais rapidamente que o escoamento superficial. De acordo com

os autores, este efeito da declividade sobre o escoamento superficial diminui nos períodos extremamente úmidos.

Morgan (1995) sugere uma relação não linear entre a perda de solo e a declividade segundo a qual a erosão aumenta rapidamente à medida que a declividade passa de suave à moderada, atingindo um máximo em declives com 8 a 10°, e passando a decrescer à medida que a declividade continua a aumentar. Esta relação é aplicável apenas para erosão por salpicamento e por escoamento superficial, não se mostrando adequada para movimentos de massa, *piping* ou erosão em voçorocas por colapso de *pipes*.

Segundo Dunne e Leopold (1978), quando a intensidade da precipitação é superior à capacidade de infiltração do solo, a água acumulada na superfície do terreno escoar sob a forma de uma lâmina irregular. A profundidade e a velocidade de escoamento desta lâmina de água aumenta para jusante à medida que se gera água por excesso de precipitação, até que a força aplicada ao solo pela água seja suficiente para exceder a resistência do solo à erosão. A intensidade de erosão depende, então, do produto entre a profundidade da lâmina de água e o gradiente da encosta. Normalmente a erosão aumenta com a distância à medida que o gradiente torna-se maior e diminui ou ocorre deposição na porção inferior da encosta, onde os gradientes são menores.

O comprimento da encosta afeta a erosão do solo, embora seja um parâmetro difícil de ser avaliado, pois outras características da encosta e do solo também afetam o escoamento superficial. Em solos cultivados, de acordo com Wischmeier e Smith (1978), o efeito do comprimento da encosta no total de escoamento superficial anual por unidade de área pode ser considerado como insignificante. Em alguns dos estudos analisados pelos autores, o escoamento superficial por unidade de área nas encostas mais longas foi ligeiramente inferior durante a época de crescimento das culturas e ligeiramente maior na época de dormência, embora as diferenças sejam relativamente pequenas e as relações não sejam consistentes. Apesar do efeito do comprimento da encosta no total de escoamento superficial ser muito pequeno, segundo os mesmos autores, a perda de solo por unidade de área geralmente aumenta substancialmente à medida que aumenta o comprimento da encosta. Isto ocorre uma vez que a maior acumulação do escoamento superficial nas encostas mais longas aumenta a sua capacidade de desagregação e transporte de partículas.

As encostas são componentes tridimensionais da superfície que compõem a paisagem e podem apresentar diferentes formas em função das curvaturas no perfil e no plano. A forma das encostas pode ser até mais importante na erosão dos solos do que a declividade, de acordo com Hadley *et al.* (1985) *apud* Guerra (1998). Encostas curtas convexo-côncavas, no perfil,

com cristas longas constituem características morfológicas que propiciam a erosão dos solos, assim como encostas convexas com topos planos.

A forma da encosta no plano, segundo Summerfield (1991), possui um efeito significativo na erosão, uma vez que determina o caminho a ser percorrido pela água. Assim, em encostas com contorno divergente em planta, o fluxo laminar é disperso para jusante e a erosão é minimizada, enquanto que, em contornos convergentes, o fluxo será concentrado e a erosão linear será mais efetiva.

e) Geologia

O papel da geologia no desenvolvimento de voçorocas foi avaliado por Beavis (2000) no sudeste da Austrália. Este papel, segundo o autor, é exercido, de uma forma geral, pelas estruturas geológicas que determinam a localização da erosão na paisagem e pela litologia, em função da mineralogia e do tamanho das partículas que determinam a intensidade da erosão. O estudo desenvolvido pelo autor demonstra uma significativa correlação entre a orientação das fraturas e falhas e a orientação das voçorocas, sugerindo fortemente que as estruturas presentes no substrato rochoso possuem uma forte influência tanto no desenvolvimento como na orientação das voçorocas, onde o solo é resultante de intemperismo *in situ*. Esta conclusão vem ao encontro da hipótese levantada pelo autor segundo a qual o fluxo subsuperficial é dominante no desenvolvimento das voçorocas em contraponto ao escoamento superficial, onde não é esperada necessariamente qualquer relação com estruturas subjacentes.

As áreas de arenização existentes no noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, segundo Frasca (1996), embora tenham sido geradas por processos naturais, estão controladas por parâmetros estruturais, litológicos e climáticos. O autor sugere que o controle estrutural está relacionado à ocorrência de movimentações ao longo de uma zona de descontinuidade formada pela intersecção de dois sistemas de falhas, um sistema de falhas e fraturas NW e um sistema de falhas NE, associados, respectivamente, ao Sistema Arco de Rio Grande e ao Sistema Lancinha Cubatão.

f) Uso do Solo

A ocupação antrópica, através do desmatamento e cultivo do solo, da construção de estradas, da criação e expansão de núcleos urbanos, sobretudo quando de modo inadequado, constitui o fator decisivo da origem e aceleração dos processos erosivos.

Uma vez deflagrados pela ocupação do solo, os processos erosivos passam a ser comandados por diversos fatores naturais que determinam as variações nas taxas de erosão.

Os efeitos das características do uso do solo em áreas cultivadas no desenvolvimento de erosão têm sido estudados por diversos autores que têm considerado diferentes culturas e formas de cultivo, bem como as conseqüências da mudança das formas de cultivo.

O surgimento e o desenvolvimento de voçorocas no noroeste da França, segundo Boiffin *et al.* (1988), não estão relacionados às características da chuva, mas sim ao estado superficial do solo nas lavouras que caracterizam a região e que resultam da sua forma de cultivo. As práticas agrícolas utilizadas em cada lavoura induzem a variações espaciais e temporais da capacidade de infiltração e do armazenamento superficial que podem ser progressivas ou descontínuas. O sistema de cultivo também contribui para o surgimento de uma rede de canais onde ocorre concentração do escoamento superficial e que também sofre mudanças ao longo do tempo.

As práticas agrícolas aumentam ou reduzem consideravelmente o risco de erosão por ravinas, segundo Ouvry (1989-90), uma vez que condicionam o desenvolvimento de crostas na superfície do solo, possibilitam o seu rompimento através das operações de aragem, determinam a proporção de superfície compactada pelo tráfego de máquinas agrícolas, geram rugosidade e protegem a superfície do solo através de cobertura vegetal.

O sistema de cultivo foi identificado por Auzet *et al.* (1992) como exercendo uma grande influência nos fatores que caracterizam a suscetibilidade à erosão por ravinas em bacias hidrográficas de primeira ordem situadas no norte da França. Os principais fatores responsáveis pelas diferenças no ravinamento entre as bacias consistem no tamanho da área de contribuição de escoamento superficial, que depende das condições superficiais do solo, comprimento de incisão potencial, que resulta da distribuição espacial das áreas de contribuição do escoamento superficial ao longo dos talvegues, e erodibilidade do solo. A influência do sistema de cultivo sobre estes fatores se deve a enorme variação das propriedades do solo ao longo do tempo e do espaço e que resultam na geração e concentração de escoamento superficial e na suscetibilidade do solo à formação de crostas.

A mudança de prática agrícola foi apontada por Castro *et al.* (1999) como responsável pela redução das erosões laminar e em ravinas, nas escalas de parcela e de bacia no noroeste do Rio Grande do Sul. A mudança da prática de cultivo convencional com aragem e terraceamento para o plantio direto sem terraceamento resultou nas reduções do escoamento superficial e de perda de solo, embora tenha aumentado o escoamento subsuperficial. Desde o início da mudança de prática agrícola, além de não terem sido observadas novas ravinas em sub-bacias de até 1 km², o seu número reduziu na sub-bacia de 20 km².

2.1.3 – Formas de Erosão

Dependendo da forma que se dá o escoamento superficial ao longo da vertente, podem se desenvolver dois tipos de erosão (Salomão e Iwasa, 1995). A erosão é dita laminar ou em lençol se o fluxo é difuso, e a erosão é linear se ocorre concentração das linhas de fluxo das águas, resultando em pequenas incisões na superfície do terreno, em forma de sulcos, que podem evoluir por aprofundamento para ravinas ou mesmo para voçorocas.

a) Erosão Laminar

O escoamento difuso que provoca a erosão laminar ocorre quase sempre sob condições de chuvas prolongadas, embora possa ocorrer em outras condições, e raramente apresenta uma profundidade uniforme, ocorrendo em geral de maneira anastomosada, sem canais definidos (Guerra, 1999).

Segundo Summerfield (1991), o fluxo em lençol é capaz de transportar somente partículas muito finas, e a efetividade da erosão laminar é controlada fortemente pelas características da superfície, como o tamanho das partículas e o grau de coesão entre elas, a extensão e a natureza da cobertura vegetal e a declividade do terreno.

O escoamento difuso ou em lençol torna-se um processo erosivo efetivo especialmente em solos arenosos, onde grandes porções das encostas são cobertas pelo lençol de água (Morgan, 1977 *apud* Guerra, 1998). Em solos mais coesos e mais resistentes à ação da erosão por salpicamento ou *splash* e à erosão em lençol, as principais formas erosivas são as ravinas e voçorocas.

A perda de solo por erosão laminar pode ser calculada através de várias equações que foram desenvolvidas nos Estados Unidos, desde a década de 40. A equação mais consagrada e difundida é a Equação Universal de Perda de Solos, mais conhecida pela abreviatura do nome em inglês, USLE. Ela foi desenvolvida nos Estados Unidos através de uma cooperação entre o Centro Nacional de Dados de Escoamento Superficial e Perda de Solo e a Universidade de Purdue, como resultado de inúmeros estudos utilizando estações experimentais em diferentes estados norte-americanos.

A USLE, segundo Wischmeier e Smith (1978), é um modelo de erosão desenvolvido para prever a perda de solo por escoamento superficial em áreas específicas, com culturas e sistemas de manejo específicos, embora também possa ser aplicada em áreas não agrícolas. É expressa pela relação

$$A = R K L S C P$$

onde

A – fator que representa a perda de solo por unidade de área (usualmente em ton/ha/ano)

R – fator de erosividade da chuva

K – fator de erodibilidade

L – fator relativo ao comprimento da encosta

S – fator relativo à declividade da encosta

C – fator relativo ao uso e manejo do solo

P – fator relativo à prática conservacionista adotada.

Segundo Salomão e Iwasa (1995), a precisão do cálculo da equação é determinada pelo tamanho da área estudada em função das variações espaciais normalmente observadas nos terrenos com relação aos fatores analisados.

b) Erosão Linear

O estágio seguinte ao escoamento difuso é o fluxo linear quando começa haver uma concentração do escoamento superficial que resulta na erosão por ravinas e por voçorocas.

As ravinas, de acordo com Guerra (1998), são formadas quando a velocidade do fluxo de água aumenta tornando-se turbulento. O aumento do gradiente hidráulico pode ocorrer devido ao aumento da intensidade da chuva, ao aumento da declividade da encosta ou porque a capacidade de armazenamento de água na superfície é excedida, e a incisão começa a ocorrer no topo do solo.

Para Horton (1945), o processo de ravinamento está relacionado ao seu conceito de infiltração e início de escoamento superficial, que derivou de inúmeros experimentos conduzidos em parcelas com solos cultivados. O deslocamento inicial das partículas é atribuído à tensão cisalhante exercida pelo escoamento superficial à medida que aumenta a sua profundidade em direção à jusante. Esta idéia originou o conceito de faixa sem erosão (*belt of no erosion*) que desconsidera a influência do salpicamento das gotas de chuva (*rainsplash*) e de outros processos erosivos e reflete a interação entre infiltração/escoamento superficial, declividade da encosta e resistência da superfície.

A taxa de erosão por fluxo concentrado, segundo Summerfield (1991), é determinada pela profundidade e velocidade do fluxo. Diferentemente do fluxo laminar, a profundidade maior do fluxo concentrado permite que materiais maiores do que partículas muito finas sejam transportadas.

As ravinas podem ocorrer naturalmente em ambientes áridos e semi-áridos, segundo Summerfield (1991), enquanto que, em ambientes úmidos, a presença de vegetação indica que as ravinas se desenvolvem geralmente em superfícies modificadas pela ação antrópica.

O desenvolvimento de ravinas pelo alargamento lateral, com o tempo e durante os eventos de precipitação, é atribuído à instabilidade das paredes laterais, causada principalmente pela infiltração da água no solo (Figueiredo e Vajapeyam, 1989). O surgimento de fendas de tração, devido ao alívio de pressões laterais e aos ciclos de umedecimento e secamento do solo, bem como a presença natural do lençol freático próximo ao pé dos taludes das ravinas, podem contribuir, individualmente ou em conjunto, para acelerar o processo de ruptura das paredes.

Caso a erosão se desenvolva não somente por influência das águas superficiais mas também dos fluxos subsuperficiais, em que se inclui o lençol freático, configura-se o processo mais conhecido por voçoroca ou boçoroca, com o desenvolvimento de *piping*, ou seja, erosão interna ou tubular (Salomão e Iwasa, 1995).

As voçorocas, segundo Guerra (1998), são características erosivas relativamente permanentes nas encostas, que possuem paredes laterais íngremes e, em geral, fundo chato, onde pode ocorrer fluxo de água durante os eventos chuvosos.

Existem várias classificações sobre os limites entre ravinas e voçorocas, com base na largura e profundidade. O *Glossary of Soil Science Terms* (1997), publicado pela Sociedade de Ciência dos Solos dos Estados Unidos, estipula um limite entre ravinas e voçorocas, segundo o qual as voçorocas possuem profundidade e largura superior a 0,5 m. Segundo esta referência, as voçorocas não podem ser obliteradas por operações com máquinas agrícolas.

Guerra (1998) cita três possíveis origens para as voçorocas: o alargamento e aprofundamento de ravinas, a erosão por escoamento subsuperficial formando dutos ou *pipes* e a partir do escoamento superficial concentrado sobre antigos deslizamentos de terra.

O fenômeno de *piping*, segundo Salomão e Iwasa (1995), provoca a remoção de partículas do interior do solo, formando dutos ou canais que evoluem em sentido contrário ao do fluxo d'água, podendo dar origem a colapsos do terreno, com desabamentos que alargam a voçoroca ou criam novos ramos.

Moeyersons (1991) observou, em encostas com alta declividade situadas em Ruanda, que as intervenções humanas na drenagem superficial podem introduzir o voçorocamento em locais onde o escoamento superficial normalmente acarretaria em erosão por ravinas. Nestes casos, a incisão inicial gerada pelo escoamento superficial como resultado de uma concentração artificial deste escoamento ou do fluxo subsuperficial, aumenta em direção à

jusante. O desenvolvimento deste tipo de voçoroca progressiva contrasta com o desenvolvimento remontante clássico.

A evolução de um sistema de ravinas e voçorocas em uma área experimental abrangendo uma encosta, ao longo de quase um ano, é descrita e analisada por Govers (1987). Segundo o autor, a erosão por ravinas, uma vez tendo sido gerado escoamento superficial, é controlada pela topografia, embora a relação entre a intensidade da erosão, a declividade do terreno e o comprimento da encosta seja variável no tempo. Já a formação das voçorocas não é determinada unicamente pela constituição do perfil de solo, mas também por um importante aporte de água proveniente de montante. Por isso, a vulnerabilidade de um perfil de solo depende da sua posição na topografia.

Segundo Salomão e Iwasa (1995), no estudo da erosão linear é fundamental conhecer-se o comportamento das águas da chuva e do lençol freático nas coberturas pedológicas ao longo das vertentes.

Salomão (1994) *apud* Salomão e Iwasa (1995) desenvolveu uma abordagem metodológica embasada em estudos de toposseqüências. Ela permite configurar, em uma dada vertente, as características morfológicas relacionadas ao comportamento hídrico dos solos e discutir as direções dos fluxos da água infiltrada e escoada, superficial e intersuperficialmente, numa avaliação qualitativa das diferentes condições de desenvolvimento de processos erosivos por escoamento concentrado.

O potencial erosivo do processo de voçorocamento depende da concentração de fluxo e do gradiente hidráulico promovidos pelas águas subterrâneas, em especial do concentrado em canal, com desenvolvimento de fenômeno de *piping*. Estas características podem ser determinadas através do estudo do comportamento piezométrico do lençol freático, entendendo-se que, para possibilitar a ocorrência de fenômenos de *piping*, é necessário o estabelecimento, em uma dada porção da vertente, de altos níveis de concentração de fluxo d'água subsuperficial associados a valores elevados de gradiente hidráulico, de maneira a permitir a remoção de partículas do solo na zona de percolação do lençol.

Oliveira e Méis (1985) classificam as voçorocas mapeadas, considerando a relação entre a forma erosiva e a geometria das encostas afetadas, ao estudar os condicionantes e mecanismos de erosão por voçorocas na região do médio vale do rio Paraíba do Sul. Foi verificado que 65% das voçorocas concentram-se em ambiente de contorno e perfil côncavo, embora estes ambientes ocorram em 29% da área de estudo. Verificou-se ainda que 40% destes casos ocorrem em ambiente com declividade e amplitude de relevo inferiores às médias na área de estudo, e somente 25% dos casos ocorrem em ambientes com declividade e amplitude superiores aos das médias.

Explicação para isso pode residir no fato destas encostas corresponderem a rampas de colúvio. Estes segmentos das encostas consistem em superfícies levemente inclinadas de origem sedimentar, com seus depósitos recobrando e interdigitando-se com os depósitos aluviais. Méis e Moura (1984) *apud* Oliveira e Méis (1985) mostram a existência de descontinuidades erosivas, separando os vários estratos que constituem estas unidades e que podem ser determinantes nos mecanismos erosivos.

Oliveira e Méis (*op. cit.*) apresentam quatro tipos de mecanismos para a evolução das voçorocas, fundamentados em observações empíricas realizadas a campo, considerando o grau de atividade da forma erosiva, marcas deixadas nos entalhes pelos processos mais recentes, e as variações de altura e a largura do canal erosivo entre as seções de montante e de jusante.

O primeiro mecanismo considerado apresenta os setores mais elevados das encostas afetados pela erosão. A variação da largura e da altura do canal é positiva, isto é, ambas as dimensões diminuem em direção à jusante. Não há ligação direta com qualquer canal de ordem superior à jusante e é sugerido como determinante à predominância dos fluxos superficiais.

No segundo caso, os setores mais baixos das encostas são afetados de forma progressiva para o alto da mesma, e os canais são mais largos e mais profundos para jusante. O mecanismo estimado é o predomínio de fluxos subsuperficiais atuando no desenvolvimento da erosão por solapamento das bases. Ocorre invariavelmente a ligação com um canal de ordem superior.

O terceiro caso é descrito como complexo, já que toda a encosta é afetada pela erosão e não é observado nenhum indício de fator deflagrador do processo. As formas erosivas são muito antigas, apresentam vegetação no canal e afloramento do fluxo de base. Parece resultar da integração dos dois casos anteriores.

O quarto tipo de mecanismo é denominado atípico e compreende variações dos demais tipos. As voçorocas normalmente encontram-se associadas com cortes de estradas, em setores intermediários das encostas, e apresentam formas exóticas resultantes de processos recentes como marcas de escoamento superficial descontínuo, marcas de erosão superficial variando abruptamente para a formação de túneis subterrâneos e vice-versa.

Oliveira *et al.* (1994), ao estudarem as relações entre morfometria das encostas e erosão por voçorocas, verificam que os parâmetros morfométricos que expressam as dimensões gerais das encostas apresentam correlações menos significativas com as dimensões dos entalhes erosivos do que os parâmetros relacionados às dimensões parciais das encostas.

Os parâmetros que apresentam correlações mais significativas são área de contribuição e densidade de eixos de drenagem acima das cabeceiras das voçorocas. A análise de correlação entre o comprimento dos entalhes erosivos e a área de contribuição parcial evidenciou a necessidade de estudar separadamente voçorocas ativas e estabilizadas ou em vias de estabilização. A fraca correlação observada entre estes parâmetros para voçorocas estabilizadas, ao contrário do observado para as voçorocas ativas, sugere um desenvolvimento independente das áreas de captação e de contribuição de escoamento subsuperficial, a partir de um certo estágio evolutivo, havendo, assim, a substituição do escoamento subsuperficial pelo escoamento superficial. Já a variação do comprimento das voçorocas, em função da densidade de eixos de drenagem acima das cabeceiras erosivas, demonstra uma tendência de avanço regressivo exponencial à medida que aumentam as densidades de eixos de drenagem.

2.2 – Técnicas Auxiliares

2.2.1 – Identificação de Lineamentos

Um lineamento, segundo O'Leary *et al.* (1976), é “uma feição linear da superfície, mapeável, simples ou composta, cujas partes estão alinhadas de uma forma retilínea ou levemente curvilínea, e que difere distintamente dos padrões das feições adjacentes e presumivelmente reflete um fenômeno de subsuperfície”. As feições superficiais podem ser fisiográficas, expressas através do relevo, ou tonais, indicadas por contrastes. Expressões fisiográficas consistem em formas de relevo contínuas ou isoladas, limites de áreas distintas morfologicamente ou quebras em um terreno uniforme, como um curso d'água. As expressões tonais incluem descontinuidades, limites ou faixas, incluindo aquelas relacionadas à vegetação.

Os lineamentos, de acordo com Erdélyi e Gálfi (1988), são resultantes de falhamentos e fraturamentos e podem representar zonas de aumento de porosidade e permeabilidade em áreas com rochas maciças, significativas para o acúmulo e movimentação de água subterrânea. Podem ser utilizados como indicadores do controle exercido pelas estruturas geológicas na erosão por voçorocas, como foi identificado por Beavis (2000) no sudeste da Austrália.

Strieder e Amaro (1997) distinguem dois tipos de lineamentos em função das diferentes feições geomorfológicas e padrões de distribuição espacial que são gerados, a partir da análise de lineamentos extraídos de imagens de satélite e fotografias aéreas. Os lineamentos do tipo 1 estão relacionados a estruturas penetrativas e desenvolvem feições

geomorfológicas negativas ou positivas, paralelas, em um arranjo linear ou curvilíneo. Os lineamentos do tipo 2 estão geralmente associados a estruturas disjuntivas frágeis, como as fraturas. São expressos como feições geomorfológicas negativas que controlam os padrões de drenagem, resultantes do intemperismo e erosão promovidos pelo fluxo de água através das fraturas.

A análise de dados estruturais e morfológicos pode ser realizada utilizando o conceito “multi” que pressupõem a utilização de diferentes produtos analógicos e digitais, em diferentes bandas do espectro eletromagnético e em diferentes escalas, por mais de um profissional simultaneamente. Este conceito foi empregado por Schuck *et al.* (1990) para estudar as características morfotectônicas e estruturais de um trecho do rio Uruguai. A análise comparativa dos resultados mostrou que o processamento digital das imagens apresentou um papel complementar em relação à análise visual das fotografias aéreas, servindo como contraprova do traçado resultante da análise visual, em que o fator subjetivo é considerável.

2.2.2 – Sistema de Informações Geográficas

Um Sistema de Informações Geográficas (SIG) compreende um poderoso conjunto de ferramentas para coletar, armazenar, recuperar, transformar e visualizar dados espaciais do mundo real, tendo em vista objetivos específicos (Burrough, 1992).

Eastman (1999) descreve o conjunto de capacidades que compõem um SIG como a habilidade de digitalizar dados espaciais e anexar atributos às feições armazenadas, de analisar estes dados com base nestes atributos e de apresentar o resultado sob a forma de mapa. Além disso, um SIG completo também deve possuir a habilidade de analisar dados com base nas suas características espaciais, o que compreende o sistema de análise geográfica.

Os dados geográficos descrevem os objetos do mundo real em termos de suas posições em relação a um sistema de coordenadas, seus atributos que independem da localização e das inter-relações espaciais existentes, que descrevem como estes objetos estão agrupados ou como podem se movimentar entre si (Burrough, 1992).

Na verdade, segundo Eastman (1999), esta habilidade de comparar feições diferentes com base na sua ocorrência geográfica em comum constitui o diferencial do SIG, a qual é possível através do processo de sobreposição de planos de informações.

No caso específico do mapeamento geomorfológico, segundo Dikau (1989), a aplicação de tecnologias de SIG se tornou uma importante ferramenta para gerenciamento de dados e análise de dados numéricos, incluindo o armazenamento de dados espaciais digitalizados a partir de diferentes mapas, a avaliação destes dados visando objetivos

aplicados, a simplificação dos processos de mapeamento, através da modelagem da superfície do terreno, e a modelagem de processos geomorfológicos com base em objetos quantificados.

Embora para o autor seja prematuro imaginar uma análise de formas do relevo completamente automatizada, considera que os métodos oferecidos pelo geoprocessamento se prestam muito bem a esta finalidade.

Um SIG armazena dois tipos de dados que podem ser encontrados em um mapa: a definição geográfica de feições da superfície terrestre e os atributos ou qualidades que essas feições possuem. A lógica de armazenamento destes dados utiliza as técnicas de representação de mapa denominadas vetorial e *raster* ou matricial.

Na representação vetorial, os limites ou os cursos das feições são definidos por uma série de pontos que, quando unidos, constituem a representação gráfica da feição. Os pontos são codificados por um par de números que se relaciona a um sistema de coordenadas ao qual está associado o atributo da feição.

Na forma de representação matricial, o espaço é representado por uma matriz bidimensional composta por linhas e colunas formando células. Cada célula é identificada por suas coordenadas e contém um valor relacionado ao atributo da feição que representa. Uma vez que cada célula de uma matriz bidimensional só pode conter um valor, atributos geográficos diferentes devem ser representados em diferentes matrizes que podem ser sobrepostas. O conceito de sobreposição de matrizes é fundamental para a maioria das atividades de processamento matricial.

2.2.2.1 – Técnicas de Análise Geográfica

Um modelo de integração de dados espaciais de distintas fontes, no contexto do geoprocessamento, segundo Bonham-Carter (1994), pode ser descrito como um processo de combinação de um conjunto de mapas de entrada através de uma função “*f*” que pode assumir muitas formas diferentes, produzindo um novo mapa de saída:

$$\text{Mapa de saída} = f(\text{mapas de entrada})$$

Os relacionamentos que ela expressa podem ser baseados no entendimento teórico dos princípios físicos e químicos ou são empíricos, baseados em dados observados, ou podem ainda ser uma combinação de teoria e empirismo.

Os modelos empíricos podem ser baseados em relacionamentos estatísticos. Neste caso, os relacionamentos espaciais entre as variáveis de estudo são estimados por critérios

estatísticos, a partir de amostras de uma região experimental ou a partir de um conjunto de classes cujos limiares são definidos por especialistas. Um modelo previsionial de potencial mineral é um exemplo de modelo empírico baseado em relacionamentos estatísticos.

Bonham-Carter (*op. cit.*) apresenta alguns modelos de integração de mapas apropriados para implementação em ambiente SIG.

O modelo **Boleano**, o mais simples e conhecido, envolve combinação lógica de mapas binários através de operadores condicionais. Cada mapa utilizado como uma condição pode ser entendido como um plano de informação (PI) ou uma evidência, e vários planos de informação (PIs) são combinados para dar suporte a uma hipótese ou preposição. Cada localização é, então, testada para determinar se as evidências nesse ponto satisfazem ou não as regras definidas pela hipótese.

O resultado da integração de dados usando a inferência boleana é expresso de forma binária ou dicotômica, onde “0” indica que a hipótese não foi satisfeita e “1” indica que a hipótese foi satisfeita.

Este método, embora seja prático e facilmente aplicável especialmente quando se trabalha com PIs que descrevem restrições legais, normalmente não é o mais adequado. Na prática, não é possível atribuir igual importância a cada critério que esteja sendo combinado, já que as evidências necessitam ser ponderadas de acordo com sua importância relativa.

No método de inferência pela **Média Ponderada**, os PIs são integrados através de uma soma ponderada. É atribuído um peso a cada mapa utilizado como evidência, dependendo da importância do mesmo em relação à hipótese considerada.

O mapa ponderado pode ser ajustado para refletir o julgamento de um especialista, segundo os pesos de importância definidos para cada critério. Para isto, no entanto, é necessário um conhecimento sobre a relação de cada critério com a hipótese em análise.

Embora este método permita uma combinação de mapas mais flexível do que unicamente com os operadores lógicos booleanos, a maior desvantagem que apresenta reside na sua natureza aditiva linear.

A integração de PIs também é possível através do método **Fuzzy**, que se baseia no conceito de classes definidas de maneira inexata, isto é, sem limites rígidos.

A caracterização formal de um conjunto *fuzzy* recorre ao conceito de função de pertinência. A função de pertinência, considerando-se o valor de um atributo, determina se o elemento avaliado pertence ou não a um determinado conjunto em análise. O valor assumido pela função de pertinência pode ser entendido como o grau de compatibilidade do objeto que está sendo analisado em relação a um conjunto. Este valor varia de “0” a “1”, indicando um

aumento contínuo de não compatibilidade entre o objeto e o conjunto até a completa compatibilidade.

A combinação dos mapas representados por funções de pertinência pode ser realizada através de vários operadores, entre os quais “e”, “ou”, soma algébrica, produto algébrico e operador gama. Bonham-Carter (1994) recomenda que, na prática, diferentes operadores sejam utilizados em um mesmo problema.

A lógica *fuzzy* é indicada para situações em que é necessário tratar modelos matemáticos ou conceituais de fenômenos empíricos com ambigüidade, abstração e ambivalência.

A **regressão logística** é um modelo de estatística multivariada muito útil na integração de planos de informação porque possibilita que sejam utilizados mapas categóricos. Esta análise de regressão é empregada na estimação de um modelo que descreve a relação entre uma ou mais variáveis independentes e uma variável dependente, binária.

A relação entre a variável dependente e as variáveis independentes é não linear e segue a curva logística. Os dados são gerados a partir de uma amostra aleatória que deve ser maior do que o número de variáveis independentes, que não podem ser linearmente relacionadas.

Câmara *et al.* (1999) apresentam o modelo de inferência espacial por **Redes Neurais Artificiais**, que se baseia em técnicas computacionais que utilizam um modelo matemático inspirado na estrutura neural de organismos inteligentes e que adquirem conhecimento através da experiência.

Uma rede neural artificial é composta por vários elementos de processamento geralmente conectados por canais de comunicação que estão associados a determinados pesos. Os pesos são coeficientes adaptativos da rede que determinam a intensidade dos sinais de entrada.

A propriedade mais importante das redes neurais é a habilidade de aprender e com isso melhorar seu desempenho. Isto é feito através de um treinamento, isto é, um processo iterativo de ajuste aplicado a seus pesos. O aprendizado é efetuado através de algoritmo de aprendizado que são um conjunto de regras bem definidas para a solução de um determinado problema.

Uma vez que a rede neural tenha sido treinada e avaliada, ela pode ser integrada em um sistema do ambiente operacional de aplicação.

O método **Bayesiano** fundamenta-se na teoria de probabilidade de Bayes, que é uma extensão da teoria da probabilidade clássica, e permite combinar uma nova evidência sobre uma hipótese sobre a qual existe um conhecimento prévio para estimar a probabilidade de que a hipótese seja verdadeira.

O teorema de Bayes é expresso da seguinte forma (Eastman, 1999):

$$p\langle\varpi_i|X\rangle = \frac{p\langle X|\varpi_i\rangle \times p(\varpi_i)}{\sum_j p\langle X|\varpi_j\rangle p(\varpi_j)}$$

onde:

$p\langle\varpi_i|X\rangle$ é a probabilidade da hipótese ser verdadeira dada a evidência (probabilidade *a posteriori*);

$p\langle X|\varpi_i\rangle$ é a probabilidade de achar a evidência dada a hipótese ser verdadeira;

$p(\varpi_i)$ é a probabilidade de a hipótese ser verdadeira a despeito de evidência (probabilidade *a priori*).

A normalização pela soma dos produtos, para todas as classes, da probabilidade *a priori* de a hipótese ser verdadeira e da probabilidade de achar a evidência sendo a hipótese verdadeira, é importante, já que assume que as classes consideradas são as únicas possíveis interpretações para cada célula em consideração.

O procedimento de integração dos PIs gera uma imagem para cada uma das classes que expressa a probabilidade *a posteriori* de uma célula pertencer a cada classe considerada. Por exemplo, a probabilidade *a priori* seria a probabilidade da ocorrência mineral em relação à área total. Já a probabilidade *a posteriori* seria resultado do aumento das chances de sucesso em se encontrar um depósito mineral em função de uma ou mais evidências que possuem uma relação direta com a mineralização.

Este método é muito utilizado em sensoriamento remoto, no reconhecimento de padrões, como no caso de uma classificação de uso do solo, e em geoprocessamento, na geração de mapas de prospecção mineral, quando se pensa na possibilidade de um depósito mineral ocorrer em função da ocorrência de uma certa evidência, como, por exemplo, uma litologia favorável.

Segundo Eastman (1999), a integração de planos de informação através do método bayesiano é um processo confiável, pois assume que a única interpretação possível para uma célula é uma das classes que se supõem existir na área. A ausência de evidência para uma hipótese alternativa dá suporte para a hipótese que permanece.

Segundo Câmara *et al.* (1999), a probabilidade *a priori* para a presença de um dado pode ser estimada a partir de modelos de distribuição espacial aleatória ou por análises estatísticas multivariadas.

Na formulação apresentada por Eastman (1999), a probabilidade *a posteriori* é a probabilidade condicional multivariada obtida pela matriz de covariância e pelo vetor média derivados dos dados dos polígonos de treinamento utilizados para definir cada classe, obtidos

a partir de todos os planos de informação a serem integrados. A caracterização do padrão de cada classe fundamenta-se na sua função de probabilidade que deve ser aproximada pela função de densidade normal multivariada.

A maior parte das técnicas de análise estatística multivariada baseia-se no pressuposto de que os dados foram gerados a partir de uma distribuição normal multivariada (Johnson e Wichern, 1992). Embora os dados nunca sejam exatamente multivariadamente normais, a densidade normal é normalmente uma aproximação útil da verdadeira distribuição da população. Caso os dados não sejam normalmente distribuídos, podem ser realizadas transformações que os aproximem de uma distribuição normal. Algumas transformações possíveis consistem na aplicação de raiz quadrada a dados resultantes de contagens, na transformação logarítmica de dados de proporções e na transformação “z” de Fischer aplicada a coeficientes de correlação.

Swain (1978) apresenta os fundamentos do reconhecimento de padrões em sensoriamento remoto e que, em essência, podem ser estendidos para a análise espacial bayesiana, onde o objetivo é a classificação de cada observação dentre um número de classes discretas.

O reconhecimento de padrões, segundo o autor, é realizado em duas etapas. Na primeira, as classes de interesse são caracterizadas através da análise dos dados que são representativos destas classes. Na segunda etapa, os dados remanescentes são classificados a partir de regras numéricas que utilizam as caracterizações das classes.

As regiões de decisão correspondentes às n classes presentes na área de estudo são delimitadas por funções discriminantes. Embora seja possível determinar estas funções apenas com base em considerações teóricas ou no conhecimento físico do problema, na maior parte dos casos, elas são derivadas das informações de padrões de treinamento, isto é, vetores de dados com identidade conhecida representativos das classes.

Neste procedimento de “treinamento” do classificador, a convergência para a solução somente é garantida se a função discriminante é linear. Embora possa ser generalizado de forma a permitir limites mais complexos entre as classes, o procedimento não é mais adequado quando ocorre uma sobreposição de padrões.

O reconhecimento de padrões através de técnicas estatísticas baseia-se nas funções de probabilidade associadas aos padrões das classes e que devem ser estimadas a partir dos padrões de treinamento. O método é dito paramétrico quando a função de probabilidade é conhecida e alguns parâmetros associados são estimados. Por outro lado, quando se desconhece a função de probabilidade, o método é denominado não paramétrico. Estes, embora sejam capazes de estimar as funções de probabilidade com exatidão, requerem

sistemas de reconhecimento mais complicados e um número muito grande de padrões de treinamento.

Utilizando-se a notação de vetor e matriz para facilitar a representação de dados em n dimensões (ou n variáveis) e assumindo-se que qualquer classe pode ter sua função de probabilidade aproximada por uma função densidade de probabilidade normal, esta função é escrita da seguinte forma para a classe i :

$$p\langle X | \varpi_i \rangle = \frac{1}{(2\pi)^{n/2} |\Sigma_i|^{1/2}} \exp \left[\frac{-1}{2} (X - U_i)^T \Sigma_i^{-1} (X - U_i) \right]$$

onde $|\Sigma_i|$ é a determinante da matriz de covariância Σ_i , Σ_i^{-1} é a inversa de Σ_i , $(X - U_i)^T$ é a transposta de $(X - U_i)$, X é o vetor de dados e U_i é o vetor média da classe i .

Segundo Swain (1978), é razoável assumir que a função de probabilidade de qualquer classe pode ser aproximada por uma função densidade de probabilidade normal, uma vez que o pressuposto da distribuição multivariada normal foi adequadamente utilizado para modelar os processos probabilísticos observados em um grande número de aplicações em sensoriamento remoto. Os classificadores desenvolvidos com base nisto são robustos no sentido de que a exatidão da classificação não é muito sensível mesmo quando existem violações moderadamente severas deste pressuposto.

Os métodos estatísticos de reconhecimento de padrões são tolerantes aos erros resultantes da incerteza na definição dos padrões de treinamento utilizados na determinação das funções discriminantes e permitem, no caso de sobreposição de padrões, classificações “mais frequentes” ou “mais corretas”.

A classificação de um vetor de dados dentre as m classes supostas na área de estudo, isto é, a identificação da região de decisão a qual pertence um vetor de dados oriundos de todos os PIs, é determinada a partir dos valores obtidos pelo conjunto de m funções discriminantes. Segundo a regra de decisão da máxima verossimilhança, um vetor de dados (X) pertence à classe (i) se o valor obtido pela função discriminante é maior do que os gerados pelas funções das demais classes. Isto é, $X \in \omega_i$ se e somente se:

$$p\langle X | \varpi_i \rangle p(\varpi_i) \geq p\langle X | \varpi_j \rangle p(\varpi_j)$$

para $j = 1, 2, \dots, m$;

onde $p\langle X|\varpi_i\rangle$ é a função densidade de probabilidade associada com o vetor de dados X, dado que X é oriundo de um padrão $p\langle X|\varpi_i\rangle p(\varpi_i)$ na classe i , e $p(\varpi_i)$ é a probabilidade a priori da classe i .

O conjunto de produtos, $i = 1, 2, \dots, m$, constitui um conjunto de funções discriminantes.

Para a derivação da função discriminante usada na regra de decisão da máxima verossimilhança, é necessária a definição de um conjunto de funções de perda para as m classes:

$$\lambda\langle i|j\rangle \quad i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, m$$

onde $\lambda\langle i|j\rangle$ é a perda ou custo resultante da classificação de um padrão como classe i quando na verdade pertence à classe j .

A estratégia básica a ser seguida é minimizar a perda média em todo o conjunto de classificações a serem realizadas, através de uma estratégia conhecida como “ótimo de Bayes”. Para um padrão X, a perda média resultante da decisão de que X pertence à classe i é obtida por:

$$L_x(i) = \sum_{j=1}^m \lambda\langle i|j\rangle p\langle \varpi_j | X \rangle$$

onde $p\langle \varpi_j | X \rangle$ é a probabilidade condicional de que o padrão X pertença à classe j .

Esta expressão pode ser escrita da seguinte forma:

$$L_x(i) = \sum_{j=1}^m \lambda\langle i|j\rangle p\langle X|\varpi_j\rangle p(\varpi_j) / p(X) \quad (1)$$

Esta expressão irá conduzir a um conjunto de funções discriminantes se forem aplicadas três regras:

1. Minimizar um conjunto de funções é igual a maximizar o negativo do mesmo conjunto de funções.
2. Um conjunto razoável de funções de perda é

$$\lambda\langle i|j\rangle = 0 \quad i = j \quad \lambda\langle i|j\rangle = 1 \quad i \neq j$$

3. Se $\{g_i(X), i = 1, 2, \dots, m\}$ é um conjunto de funções discriminantes, então a aplicação de uma função monotônica a este conjunto gera um conjunto equivalente de discriminantes $\{g'_i(X), i = 1, 2, \dots, m\}$. Isto é, o uso de qualquer dos dois conjuntos de funções produz resultados de classificação idênticos.

A estratégia ótima de Bayes requer que a equação (1) seja minimizada, o que é possível aplicando-se a regra (1):

$$g_i(X) = -L_x(i) \quad i = 1, 2, \dots, m$$

Isto é, classificar X como pertencente à classe i para a qual $g_i(X) = -L_x(i)$ é máxima.

Aplicando a regra (2):

$$g_i(X) = - \sum_{j=1}^m \lambda \langle i|j \rangle p \langle X|\varpi_j \rangle p(\varpi_j) / p(X)$$

$$g_i(X) = \frac{-1}{p(X)} \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^m p \langle X|\varpi_j \rangle p(\varpi_j)$$

Como para dado X, o valor $p(X)$ é uma constante, um conjunto equivalente de funções discriminantes é:

$$\begin{aligned} g'_i(X) &= g_i(X)p(X) \\ g'_i(X) &= - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^m p \langle X|\varpi_j \rangle p(\varpi_j) \end{aligned} \quad (2)$$

Da teoria da probabilidade:

$$\begin{aligned} p(X) &= \sum_{j=1}^m p \langle X|\varpi_j \rangle p(\varpi_j) \\ p(X) &= p \langle X|\varpi_i \rangle p(\varpi_i) + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^m p \langle X|\varpi_j \rangle p(\varpi_j) \\ \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^m p \langle X|\varpi_j \rangle p(\varpi_j) &= p(X) - p \langle X|\varpi_i \rangle p(\varpi_i) \end{aligned}$$

Substituindo em (2):

$$g'_i = -p(X) + p \langle X|\varpi_i \rangle p(\varpi_i)$$

Considerando que $p(X)$ é considerado constante para um dado X, a aplicação da regra (3) conduz ao conjunto de funções discriminantes:

$$g'_i = p \langle X|\varpi_i \rangle p(\varpi_i)$$

Esta expressão é idêntica à apresentada inicialmente como a regra de decisão da máxima verossimilhança, comumente utilizada como estratégia de classificação.

Ainda segundo Swain (1978), se as funções de probabilidade associadas aos padrões das classes são funções de densidade normal multivariadas, a função discriminante pode ser expressa da seguinte forma:

$$g_i(X) = \frac{p(\varpi_i)}{(2\pi)^{n/2} |\Sigma_i|^{1/2}} \exp\left[-\frac{1}{2}(X - U_i)^T \Sigma_i^{-1}(X - U_i)\right] \quad (3)$$

A aplicação da regra (3) a esta expressão resulta em:

$$g_i(X) = \log_e(\varpi_i) - \frac{1}{2} \log_e |\Sigma_i| - \frac{1}{2} (X - U_i)^T \Sigma_i^{-1} (X - U_i) \quad (4)$$

Esta é a forma na qual a função discriminante é normalmente utilizada, onde a função densidade de probabilidade normal nunca é computada. Neste caso, é mais conveniente considerar que, para uma variável X com distribuição normal, a forma quadrática em X , isto é, o termo mais à direita em (4) possui uma distribuição qui-quadrado com n graus de liberdade, onde n é a dimensionalidade de X .

O sistema de reconhecimento de padrões baseado na regra de decisão da máxima verossimilhança classifica qualquer padrão em uma das classes para as quais foram especificadas funções discriminantes e gera um resultado com probabilidade mínima de erro no conjunto de dados classificados.

Segundo Johnson e Wichern (1992), a função discriminante é linear quando duas classes de objetos que se deseja classificar pertencem a duas populações com distribuição normal multivariada com matrizes de covariância iguais. Por outro lado, quando as matrizes de covariância são diferentes, é necessário utilizar uma função discriminante quadrática.

Classificações resultantes de funções quadráticas, segundo os autores, podem ser ineficientes em mais de duas dimensões, especialmente quando os dados não apresentam distribuição normal multivariada. Neste caso, os dados podem ser transformados ou pode-se utilizar a função linear ou quadrática a despeito da distribuição dos dados. Como existem casos em que dados sem distribuição normal, porém com matrizes de covariância iguais, geraram resultados ruins ao serem classificados com função linear, os autores recomendam que se deve sempre checar a performance do procedimento de classificação com amostras de validação.

2.2.2.2 – Modelo Numérico do Terreno

A representação matemática computacional da distribuição de um fenômeno espacial, como dados de relevo, recebe o nome de Modelo Numérico do Terreno (MNT). Quando utilizado em um ambiente SIG junto a técnicas de sensoriamento remoto, o MNT permite estudar a variabilidade das formas e dos processos físicos no ambiente.

O processo de geração de um modelo numérico do terreno pode ser dividido em três etapas: amostragem ou aquisição das amostras de dados, geração do modelo e a utilização do modelo (Felgueiras, 1999).

Os MNT que representam a variação dos dados de elevação do terreno são derivados de mapas topográficos representados em arquivos digitais normalmente após sua digitalização ou varredura automática (*scanner*). Os arquivos digitais apresentam uma grande quantidade de pontos que representam as curvas de nível de uma região.

A modelagem propriamente dita envolve a criação de estruturas de dados e a definição de superfícies de ajuste para os elementos destas estruturas.

O processo de geração de um modelo de grade compreende a construção de uma malha regular ou irregular e a definição de funções interpolantes locais, definidas para cada local da malha. Os modelos digitais do terreno mais utilizados na prática são os modelos de grade regular retangular e os modelos de grade irregular triangular (*Triangular Irregular Network – TIN*).

A estimação dos vértices de uma grade regular a partir de um conjunto de amostras de dados de elevação é feita através de interpoladores, diferentemente do modelo de grade irregular onde os pontos com dados das amostras são conectados por linhas para formar triângulos.

A triangulação de Delaunay compreende a malha de triangulação mais empregada nos SIGs, e pode utilizar dois critérios: o de maximização dos ângulos mínimos de cada triângulo e o critério do circuncírculo. A malha gerada pelo critério de maximização dos ângulos mínimos contém triângulos o mais próximo possível de equiláteros, evitando-se a criação de triângulos com ângulos internos muito agudos. Já segundo o critério do circuncírculo, o círculo que passa pelos três vértices de cada triângulo da malha triangular não contém no seu interior nenhum ponto do conjunto das amostras além dos vértices do triângulo em questão.

A inclusão de restrições na triangulação de Delaunay permite que características topográficas da superfície, como divisores de água e linhas de drenagem, sejam consideradas na geração do MNT.

2.2.2.3 – Atributos Derivados do Modelo Numérico do Terreno

O MNT pode ser utilizado para a geração de diversos atributos, entre os quais, a declividade do terreno, as curvaturas no plano e no perfil e a área de contribuição ou área acumulada.

A declividade do terreno é definida como a taxa de diminuição da altura na direção onde ocorre a maior redução, isto é, na direção de máximo decrescimento da função que representa o terreno (Mendonado *et al*, 1998b). A declividade ou inclinação do terreno é um dos atributos topográficos mais utilizados, pois exerce influência sobre o fluxo da água e é importante, entre outros, em estudos de erosão.

Dikau (1989) apresenta uma classificação tridimensional das encostas, baseadas nas curvaturas no plano e no perfil, como mostra a Figura 2.1.

		Curvatura no Plano		
		Convergente	Retilínea	Divergente
Curvatura no Perfil	Côncava			
	Retilínea			
	Convexa			

Figura 2.1 – Formas tridimensionais das encostas (Fonte: Dikau, 1989, p. 57).

O método de classificar a grande variedade de formas do relevo baseia-se na sua subdivisão hierárquica em unidades de relevo que podem ser descritas com atributos topológicos e geométricos. As unidades para síntese da forma são os elementos e facetas de mesoforma. Suas tipologias são baseadas estritamente no conceito da homogeneidade dos atributos geométricos. As facetas de forma são unidades do relevo com gradiente, aspecto e curvatura homogêneos. Representam o mais baixo nível hierárquico. Os elementos de forma são unidades do relevo com curvaturas no plano e no perfil homogêneas. Podem ser subdivididos em facetas de forma.

A curvatura no plano é a taxa de variação da declividade na direção ortogonal a do aspecto, sendo aspecto a direção de máximo decrescimento da função que representa o terreno (Mendonado *et al.*, 1998b). A curvatura no plano influencia a acumulação da umidade e do fluxo da água superficial e subsuperficial.

A partir da curvatura no plano, um terreno ou encosta pode ser convergente, divergente ou reto. Terrenos convergentes são aqueles em que as direções de maior

declividade em diferentes pontos do terreno tendem a se encontrar. Terrenos divergentes são aqueles em que as direções de maior declividade em diferentes pontos do terreno tendem a separar-se.

A curvatura no perfil é a taxa de variação da declividade na direção de máximo decréscimo da função que representa o terreno (Mendiondo *et al.*, 1998b). Ela é decisiva na aceleração ou desaceleração do fluxo da água sobre o terreno e, portanto, influencia a erosão no solo.

Sob o ponto de vista da curvatura no perfil, um terreno pode ser côncavo, convexo ou reto. Os terrenos são côncavos quando a declividade diminui na direção do aspecto, convexos quando a declividade aumenta na direção do aspecto e retos quando a declividade não se altera no perfil.

Zevenbergen e Thorne (1987) apresentam um sistema para determinação de declividade, aspecto e curvaturas, a partir da modificação de um método desenvolvido por outros autores (Young, 1978 e Evans, 1979 *apud* Zevenbergen e Thorne, 1987). A área em análise é discretizada em uma grade retangular de elevações igualmente espaçadas e é analisada repetidamente através de uma matriz 3 x 3, cuja célula central relaciona-se a todos os índices topográficos. A análise é baseada em uma superfície que passa pelas nove elevações originais da matriz, gerada pela equação quadrática parcial:

$$Z = Ax^2y^2 + Bx^2y + Cxy^2 + Dx^2 + Ey^2 + Fxy + Gx + Hy + I \quad (1)$$

Os nove parâmetros A, ..., I podem ser determinados a partir da matriz 3 x 3 por polinômios de Lagrange. As relações entre os nove parâmetros da equação e as nove elevações da matriz são:

$$A = [(Z_1 + Z_3 + Z_7 + Z_9) / 4 - (Z_2 + Z_4 + Z_6 + Z_8) / 2 + Z_5] / L^4$$

$$B = [(Z_1 + Z_3 - Z_7 - Z_9) / 4 - (Z_2 - Z_8) / 2] / L^3$$

$$C = [(-Z_1 + Z_3 - Z_7 + Z_9) / 4 + (Z_4 - Z_6) / 2] / L^3$$

$$D = [(Z_4 + Z_6) / 2 - Z_5] / L^2$$

$$E = [Z_2 + Z_8) / 2 - Z_5] / L^2$$

$$F = (-Z_1 + Z_3 + Z_7 - Z_9) / 4L^2$$

$$G = (-Z_4 + Z_6) / 2L$$

$$H = (Z_1 - Z_8) / 2L$$

$$I = Z_5$$

Z_1 a Z_9 são as nove elevações da matriz numeradas sistematicamente como mostra a Figura 2.2. A célula central da matriz é Z_5 ($x = y = 0$). L é a distância entre as células da matriz nas direções das linhas e colunas e devem estar na mesma unidade que as elevações.

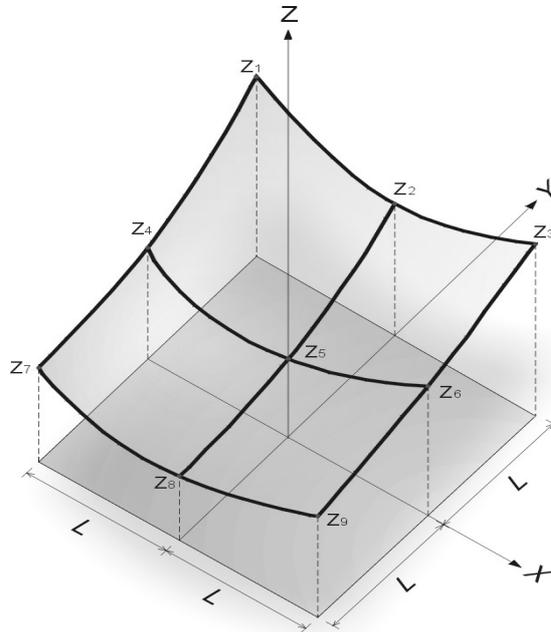


Figura 2.2 – Matriz de elevação 3 x 3 (Fonte: Zevenbergen e Thorne, 1987, p.48).

Os índices topográficos são obtidos pela diferenciação da equação (1) e solução da equação resultante para a célula central da matriz.

A declividade é a primeira derivada de Z com relação a S , onde S é a direção do aspecto (θ):

$$\text{Declividade} = \delta Z / \delta S = G \cos \theta + H \sin \theta$$

Como na origem $\cos \theta = -G / (G^2 + H^2)^{1/2}$ e $\sin \theta = -H / (G^2 + H^2)^{1/2}$, então:

$$\text{Declividade} = - (G^2 + H^2)^{1/2}$$

O sinal negativo indica que a direção de θ é para jusante e é por convenção ignorado.

A curvatura em qualquer direção, ϕ , é a segunda derivada de Z em relação a S :

$$\text{Curvatura} = \delta^2 Z / \delta^2 S = 2 (D \cos^2 \phi + E \sin^2 \phi + F \cos \phi \sin \phi)$$

As curvaturas no perfil e no plano, ou seja, respectivamente, na direção da declividade ($\phi = \theta$) e na direção ortogonal a declividade ($\phi = \theta + \pi/2$), são calculadas pelas seguintes expressões:

$$\begin{aligned} C_{\text{perfil}} &= -2 (D \cos^2\theta + E \sin^2\theta + F \cos\theta \sin\theta) \\ &= -2(DG^2 + EH^2 + FGH) / (G^2 + H^2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} C_{\text{plano}} &= -2 (D \sin^2\theta + E \cos^2\theta + F \sin\theta \cos\theta) \\ &= -2 (DH^2 + EG^2 - FGH) / (G^2 + H^2) \end{aligned}$$

Um pacote de programas baseados na estratégia de utilização da matriz 3 x 3 apresentada por Zevenbergen e Thorne (1987), é utilizado por Dikau (1989) para descrever as unidades básicas do relevo a partir de um MNT, em uma região da Alemanha caracterizada por distintas formas de relevo. Após terem sido testados diferentes resoluções e raios de curvatura, a definição automática das feições geomorfológicas destas áreas forneceu um padrão espacial com boa conformidade em relação àqueles definidos no mapa geomorfológico na escala 1:25.000.

Os elementos de forma de uma bacia rural com 435 km² foram determinados a partir do MNT, para diferentes resoluções da grade e raios de curvatura, por Merten *et al.* (2000) que compararam os resultados com as curvaturas no plano e no perfil verificadas a campo. Foram utilizadas resoluções de 20, 30, 40 e 50 m, e raios de curvatura de 600, 1200 e 3000 m. A frequência dos elementos de forma aumentou com a redução do tamanho da célula e com a elevação do raio de curvatura, à exceção do elemento retilíneo-retilíneo que, embora predomine em todos os casos, apresenta uma redução de frequência. Além deste, predominam em menor escala os elementos retilíneo-convexo e divergente-convexo, o que é coerente com a topografia da área. Com relação à concordância entre os elementos gerados e os observados em campo, não houve diferença significativa em função da resolução. Já com relação aos raios de curvatura, observou-se que o aumento dos seus valores favoreceu a concordância. A baixa concordância entre os elementos gerados pelo modelo e os observados em campo, segundo os autores, poderia ser explicada como decorrência de uma série de fatores relacionados com erros de digitalização das curvas de nível, interpolação e geração do MNT, algoritmo utilizado para geração dos elementos de forma e erros relativos ao georeferenciamento dos pontos de controle com GPS.

O raio de curvatura, segundo Merten *et al.* (2000), define a sensibilidade do modelo em determinar as feições morfológicas do terreno, e sua escolha é determinada de forma

empírica, dependendo do tipo de terreno. Assim, são utilizados raios de curvatura pequenos (600 m) em áreas com relevo bastante ondulado e raios maiores (> 1200 m) em áreas planas.

Pennock *et al.* (1987) apresentam uma classificação de distintos elementos tridimensionais do terreno e examinam a relação entre esses elementos e algumas propriedades morfológicas dos solos. O objetivo da classificação foi o de distinguir combinações de declividade, curvatura no plano e curvatura no perfil que definissem distintos elementos da paisagem. O critério utilizado para classificação da curvatura no perfil foi $\pm 0,1^\circ/\text{m}$. Valores menores ou iguais que $-0,1^\circ/\text{m}$ indicam encostas côncavas no perfil; valores maiores que $-0,1$ e menores do que $0,1^\circ/\text{m}$ indicam encostas retilíneas, e valores maiores ou iguais a $0,1^\circ/\text{m}$ indicam encostas convexas no perfil. Cabeceiras e base de encostas foram classificadas quanto à curvatura no plano em convergente e divergente, se os valores obtidos fossem menores ou maiores que $0^\circ/\text{m}$, respectivamente.

A área de contribuição ou área acumulada, sob o ponto de vista hidrológico, é uma medida que integra o fluxo superficial ou subsuperficial à montante de um ponto do terreno (Mendes e Cirilo, 2001). Ela é importante para a definição de sub-bacias, rede de drenagem e índices de saturação, entre outros parâmetros de interesse hidrológico.

A importância da área de contribuição na localização de voçorocas efêmeras foi demonstrada por Moore *et al.* (1988), ao examinarem a relação entre variáveis topográficas e a distribuição do conteúdo de umidade do solo em uma bacia hidrográfica experimental com 7,5 ha, situada no sudeste da Austrália. O melhor resultado, para prever a localização de voçorocas efêmeras nos talwegues, foi obtido na análise de regressão linear múltipla, utilizando a declividade e a variável resultante do quociente entre área de contribuição e o seu perímetro. Já a localização das voçorocas fora dos talwegues foi predita, de forma mais significativa estatisticamente, pela variável logaritmo natural do quociente entre área de contribuição e declividade da área de contribuição.

Para a estimação da área de contribuição, é necessário que o MNT não apresente depressões. Depressões são células ou grupos de células de altura inferior à altura de todas as células de sua vizinhança, onde a direção de fluxo é indeterminada. Podem ser dados errados introduzidos durante a geração do MNT ou podem ser feições topográficas reais.

As depressões podem ser removidas através da suavização do MNT, que remove as depressões mais rasas e não as mais profundas, ou as depressões podem ser preenchidas ao elevar-se o valor da célula com o mais baixo valor das células vizinhas.

Collischonn *et al.* (1998) apresentam o processo de remoção de depressões e de obtenção de direções de fluxo que são realizados simultaneamente e de forma interativa. As direções de fluxo são obtidas em uma janela móvel que percorre o MNT e atribui a cada

célula um código que representa a direção de fluxo. A direção de fluxo é aquela que apresenta maior declividade, calculada como a diferença entre a altura da célula vizinha e a célula central, dividida pela distância entre as células. A partir desta direção, é realizada a remoção de depressões. Todas as células marcadas com um código, que indica a indefinição da direção de fluxo, têm a altura elevada até igualar a altura da mais baixa célula da vizinhança. O algoritmo de atribuição de direções de fluxo é novamente utilizado até que todas as células tenham suas direções de fluxo determinadas.

A partir da grade com as direções de fluxo, a área acumulada é obtida através de um algoritmo que soma a área das células na direção indicada, iniciando pela célula do canto superior esquerdo e encerrando na célula do canto inferior direito.

Técnicas de SIG e de sensoriamento remoto foram utilizadas por Risso (1993) no desenvolvimento de uma metodologia para estimação e manipulação das características de uma bacia piloto, através da análise qualitativa e quantitativa de fatores hidrológicos (naturais e antrópicos) presentes na Equação Universal de Perda de Solos e na Equação Universal de Perda de Solos Modificada. Os programas desenvolvidos para a manipulação de MNT, com a finalidade de identificar fatores geomorfológicos das equações, mostraram-se extremamente eficientes. O autor recomenda, no entanto, o uso de malhas com células de no máximo 50 x 50 metros, com o intuito de dispor-se de um universo maior de classes de declividade e de comprimento das encostas, e a utilização de cartas planialtimétricas com o dobro da escala do projeto final para um maior controle na digitalização das isolinhas e um menor intervalo de discretização altimétrica.

3 – METODOLOGIA

A metodologia empregada para verificação da existência de controle por parte da geologia, geomorfologia e solos no fenômeno de erosão por voçorocas, pode ser dividida em três etapas distintas: aquisição de dados, integração dos dados através de técnicas de geoprocessamento e validação dos resultados.

3.1 – Aquisição de Dados

Esta etapa da pesquisa teve início com o levantamento bibliográfico dos temas relacionados ao problema enfocado e às ferramentas a serem utilizadas para analisá-lo. Foram consultados livros e artigos, abordando os processos erosivos e os seus fatores controladores, os métodos de integração e de geração de dados em um sistema de informações geográficas, além de trabalhos realizados na área de estudo ou em áreas semelhantes, abordando o fenômeno de erosão por voçorocas e/ou descrevendo as variáveis consideradas neste estudo como possivelmente controladoras deste fenômeno.

A seguir, as feições erosivas foram, a partir de fotointerpretação e de trabalhos de campo, identificadas, descritas e espacializadas, dando origem a um mapa das voçorocas na área de estudo.

Com o objetivo de identificar um possível controle por parte da geologia, geomorfologia e solos, foram escolhidas e caracterizadas sete variáveis: litologia, lineamentos, declividade do terreno, curvatura das encostas no plano, curvatura das encostas no perfil, área de contribuição das voçorocas e distribuição espacial dos solos. Para a caracterização destas variáveis, em alguns casos, dados foram gerados e, em outros, foram apenas colocados no formato necessário para a etapa seguinte, quando foram relacionados às voçorocas.

A base cartográfica utilizada consiste em uma carta planialtimétrica, na escala 1:25.000, com curvas de nível equidistantes em 10 metros. Esta carta foi gerada em setembro de 2003, a partir da restituição de fotografias aéreas na escala 1:60.000, datadas de 1996, adquiridas na 1ª Divisão de Levantamento do Ministério do Exército.

3.1.1 – Mapeamento das Voçorocas

As feições resultantes de erosão linear, preferencialmente voçorocas, foram identificadas na bacia do arroio Taboão e representadas em mapa na escala 1:25.000.

Este mapeamento é fundamental no desenvolvimento deste estudo e foi realizado, visando espacializar as áreas onde devem ser reconhecidos os comportamentos das variáveis relacionadas à geologia, geomorfologia e solos. Adicionalmente, para as etapas de verificação do controle de cada variável e de obtenção do mapa de risco de erosão por voçorocas, os polígonos que representam as voçorocas são separados em dois grupos: um grupo menor irá compor a amostra utilizada para identificação dos parâmetros estatísticos que caracterizam a ocorrência de voçorocas, e o restante dos polígonos será utilizado para validar os resultados. Áreas onde não ocorre erosão também foram identificadas para as mesmas finalidades.

Para a identificação das feições erosivas, inicialmente, foi realizada interpretação das fotografias aéreas na escala 1:60.000, datadas de 1996, utilizando-se estereoscópio. A escala das fotografias aéreas, embora não seja a mais adequada para identificação das feições erosivas, é a de maior detalhamento existente para a área de estudo. Posteriormente, foram realizadas verificações de campo nos locais indicados pela análise preliminar das fotografias aéreas e em locais indicados pelos agricultores e pela comunidade da área de estudo.

Durante os trabalhos de campo, que consistiram em quatro campanhas realizadas nos meses de abril, maio, junho e julho de 2003, foi utilizada uma ficha de descrição das feições erosivas contemplando: posição georreferenciada das cabeceiras e exutórios; medidas máximas de comprimento, largura e profundidade, obtidas com trena; descrição do tipo de seção transversal da feição erosiva e do canal de drenagem, nos casos de encaixe da feição erosiva no mesmo; direção do canal de drenagem ou do talvegue, nos casos de encaixe da feição erosiva no mesmo; medidas das declividades ao longo do eixo longitudinal e das vertentes laterais das erosões obtidas com clinômetro; verificação da existência de concentração do escoamento superficial de origem natural ou antrópica; verificação de conexão da voçoroca com a rede de drenagem; observação do tipo de cobertura vegetal; identificação do tipo de uso do solo atual e anterior, quando possível, e verificação da existência e localização de *piping* no interior das voçorocas.

A posição espacial da cabeceira e do exutório das feições erosivas foi definida a partir da determinação das coordenadas UTM (Universo Transverso de Mercator), com receptor de navegação GPS - *Geographical Position System*, marca Garmin, com referência ao *datum* horizontal SAD 69 (*South American datum of 1969*).

As curvaturas das encostas no plano e no perfil, embora não tenham sido descritas desde o início dos trabalhos de campo, foram observadas nas feições erosivas descritas nas etapas finais. Estas informações foram importantes para a identificação do raio de curvatura mais apropriado para a obtenção das curvaturas no plano e no perfil, isto é, do raio de

curvatura que, ao ser utilizado, resulta em curvaturas mais semelhantes às observadas na área de estudo.

Nos casos em que as feições erosivas identificadas nas fotografias aéreas já se encontravam recuperadas, foram utilizadas as dimensões medidas no mosaico gerado a partir das imagens digitais ortoretificadas das fotografias aéreas.

O mapa de voçorocas foi gerado a partir da digitalização dos polígonos interpretados nas fotografias aéreas ou gerados pelas medidas obtidas no campo, no aplicativo Autodesk Map 5[®], dando origem a um arquivo vetorial, com formato *dxf*. Este arquivo foi importado para o ambiente do aplicativo de geoprocessamento, Idrisi 32[®], preservando-se a numeração dada às feições erosivas durante o trabalho de campo.

Foram gerados dois arquivos matriciais representando os polígonos das voçorocas: um preservando a numeração de campo, e outro, binário, atribuindo valor unitário a todas as voçorocas e valor zero ao restante da área. Optou-se por uma resolução de 20 m para a geração destes arquivos, pois assim foi possível representar adequadamente as voçorocas sem ônus computacional.

3.1.2 – Caracterização das Variáveis Controladoras da Erosão por Voçorocas

O papel da geologia, da geomorfologia e dos solos no desenvolvimento da erosão por voçorocas foi considerado neste estudo, com base em algumas variáveis. Assim, a geologia foi analisada com base nas variações litológicas e nos lineamentos; a geomorfologia foi considerada a partir da declividade do terreno, das curvaturas das encostas no plano e no perfil, e da área de contribuição das voçorocas, e os solos foram considerados com base na sua distribuição espacial na área de estudo.

Estas variáveis foram escolhidas para análise em função do controle que exercem no desenvolvimento de erosão, como é amplamente descrito na literatura, no caso das variáveis relacionadas a geomorfologia e aos solos. No caso da geologia, são menos numerosos os trabalhos que analisam o seu papel na erosão por voçorocas. No entanto, o evidente controle estrutural no desenvolvimento da rede de drenagem e as evidências de concentração do fluxo subsuperficial em fraturas e em litologias mais porosas, observados na área de estudo, levaram a escolha destas variáveis para análise.

Estas variáveis foram caracterizadas e colocadas no formato necessário para os procedimentos posteriores desenvolvidos neste estudo.

3.1.2.1 – Geologia

Na área de estudo, não se dispõe de mapeamento geológico de detalhe e os afloramentos de rocha são muito restritos em função do desenvolvimento de espessos perfis de solo. Os afloramentos limitam-se, na sua grande maioria, a antigas pedreiras de material de empréstimo localizadas preferencialmente próximo aos cursos d'água e no assoalho de algumas voçorocas. Assim, foram utilizadas as informações obtidas nos afloramentos descritos durante o mapeamento das feições erosivas e a partir da correlação das litologias identificadas.

Visando caracterizar as litologias identificadas na área de estudo, foram coletadas amostras de rocha sã e confeccionadas lâminas petrográficas. As análises destas lâminas, em microscópio polarizado com luz transmitida, foram realizadas por petrógrafos da CPRM – Serviço Geológico do Brasil.

As informações obtidas nos afloramentos, aliadas aos resultados das descrições petrográficas, possibilitaram a separação de derrames de rochas vulcânicas e a identificação de três intervalos altimétricos relacionados a níveis de arenitos. Estes intervalos foram representados em um arquivo matricial, onde, a partir da linha de contorno média de cada intervalo, foi considerada uma área de influência com 40 m de largura correspondente a duas células da grade. Como resultado, obteve-se um plano de informação (PI), representando resumidamente a variação litológica existente na área, relevante ao desenvolvimento de voçorocas. Neste PI, os níveis de arenito foram identificados pelo número 1, e as rochas vulcânicas, que ocorrem no restante da bacia pelo número 0.

Os lineamentos foram extraídos de fotografias aéreas nas escalas 1:110.000 e 1:60.000 datadas, respectivamente, de 1968 e 1996. A fotointerpretação foi realizada utilizando-se, inicialmente, estereoscópio de espelho com o objetivo de identificar padrões regionais de estruturas. Em um segundo momento, foi utilizado estereoscópio de bolso para extração da rede de drenagem das fotografias em transparências de acetato.

Os lineamentos do tipo 2 (Strieder e Amaro, 1997) foram traçados sem prolongamento dos traços, com base nas feições geomorfológicas negativas representadas pelas linhas de drenagem, e digitalizados em aplicativo gráfico diretamente no monitor do computador sobre a imagem do mosaico ortorretificado das fotografias aéreas na escala 1: 60.000.

Embora seja usual a utilização de técnicas de aumento de contraste e filtragem direcional de imagens digitais de satélite para detecção de lineamentos, este procedimento não foi adotado. Razões para isso compreendem o espesso manto de intemperismo existente na área, que mascara uma grande parte das estruturas geológicas existentes, e o elevado número

de feições lineares de origem antrópica, como estradas, cercas e divisas de lavoura que, ao ser ressaltado pela filtragem direcional, demandaria um tempo demasiadamente grande para consistência. Assim, conclui-se que a utilização destas técnicas de processamento digital de imagens de satélite não representaria um ganho substancial de informação.

A partir do arquivo vetorial com os lineamentos estruturais, foi realizada uma análise estatística dos dados através da construção de diagrama de roseta, no aplicativo Rockworks 99[®]. Os diagramas de roseta permitem a identificação de grupos distintos na população de dados ao apresentarem os lineamentos em uma projeção polar em duas dimensões, representando a distribuição das suas direções (Strieder e Amaro, 1997).

Após serem identificadas as direções preferenciais dos lineamentos no diagrama de roseta, foram utilizados filtros direcionais para geração de arquivos vetoriais em formato *dxf* com os lineamentos relativos aos diferentes intervalos de direção selecionados. Estes arquivos foram importados para o aplicativo de geoprocessamento, onde foram transformados para o formato matricial. Foi considerada uma área de influência a partir de cada estrutura equivalente a duas células da grade, isto é, com 40 m de largura.

O PI resultante, representando os lineamentos presentes na área, apresenta quatro classes de lineamentos numeradas de 1 a 4, individualizadas de acordo com os intervalos de direção definidos e a possibilidade de cruzamento dos lineamentos, de acordo com a Tabela 3.1.

Tabela 3.1 –Classes de Lineamentos

Classe	Lineamentos
1	direção NE
2	direção NO
3	direção EO
4	Cruzamentos

3.1.2.2 – Geomorfologia

A geomorfologia foi considerada, nesta análise, através da declividade do terreno, da curvatura das encostas no plano, da curvatura das encostas no perfil, e da área de contribuição das voçorocas. Todos estes elementos geomorfológicos foram estimados a partir dos dados de elevação do terreno, representados no Modelo Numérico do Terreno – MNT.

O MNT foi derivado da carta planialtimétrica na escala 1: 25.000, resultante da restituição das fotografias aéreas na escala 1:60.000, com curvas de nível equidistantes de 10 metros.

Inicialmente, em aplicativo gráfico, as informações de elevação do terreno representadas através de pontos cotados e de curvas de nível foram transformadas em polilinhas abertas. Este arquivo vetorial foi importado para o ambiente do aplicativo de geoprocessamento, onde foi realizada a modelagem dos dados de elevação através da geração de uma grade irregular triangular. A construção da grade triangular baseou-se na triangulação de Delaunay com restrições, utilizando o critério do circuncírculo (Felgueiras, 1999). Por fim, o MNT resultou da geração de uma grade regular, com resolução de 20 m, a partir da grade triangular.

A declividade do terreno e as curvaturas no plano e no perfil foram estimadas a partir do MNT no aplicativo *Slope*, desenvolvido por Walter Collischonn, Mario Mendiondo e Carlos A. Bulhões Mendes, que se baseia no sistema desenvolvido por Zevenbergen e Thorne (1987). Para estimação das curvaturas no plano e no perfil, foi necessário testar raios de curvatura distintos, uma vez que o raio de curvatura define a sensibilidade do sistema em determinar as feições morfológicas do terreno e sua escolha é determinada de forma empírica, dependendo do tipo de terreno (Merten *et al.*, 2000). Assim, foram testados cinco raios de curvatura (R): 3000 m, 1500 m, 1000 m, 800 m e 600 m, resultando em dois arquivos matriciais, para cada raio de curvatura, contendo os valores numéricos relacionados às curvaturas das encostas no perfil e no plano.

Os arquivos contendo as informações de declividade e das curvaturas das encostas no perfil e no plano foram levados para o ambiente do aplicativo de geoprocessamento, onde assumiram o formato de PI. Assim, o PI que representa a declividade do terreno na área de estudo apresenta, em cada célula da grade, o seu valor de declividade em porcentagem.

Visando facilitar a leitura dos mapas com as curvaturas, os valores originais dos mapas foram agrupados, dando origem a uma nova legenda, conforme a Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Relação entre raio de curvatura e as curvaturas no perfil e no plano

Raio de Curvatura	Valores Originais	Curvatura no Perfil	Curvatura no Plano
R	$\leq -1/R$	Côncava	Convergente
	$> -1/R$ $< 1/R$	Retilínea	Retilínea
	$\geq 1/R$	Convexa	Divergente

As diferenças observadas em função da variação do raio de curvatura foram verificadas principalmente na curvatura no plano. Também foram observadas diferenças na curvatura no perfil, mas não de forma tão intensa como no plano. Em ambos os casos, assim como observado por Merten *et al.* (2000), as diferenças consistem no aumento do número de elementos côncavos e convexos, e convergentes e divergentes, à medida que se aumenta o raio de curvatura. Conseqüentemente, ocorre a redução no número de elementos retilíneos.

A comparação dos mapas de curvaturas no plano e no perfil com as observações de campo destas curvaturas, realizadas durante as etapas finais do mapeamento das voçorocas, permitiu a identificação das curvaturas geradas com raio de 1000 m como as mais semelhantes às formas das encostas existentes na área de estudo.

Embora fosse possível reduzir o número de PIs a serem integrados, utilizando-se um único PI com a classificação dos elementos de forma baseada na curvatura no plano e no perfil, optou-se por representar em dois PIs distintos as informações de curvatura das encostas no perfil e de curvatura das encostas no plano. Assim, é possível identificar nos procedimentos subseqüentes a relação entre cada curvatura e as voçorocas e o controle exercido por cada uma destas variáveis no desenvolvimento das feições erosivas. Os dois PIs que representam as curvaturas das encostas no perfil e no plano apresentam três classes numeradas de 1 a 3, conforme a Tabela 3.3.

Tabela 3.3 - Classes de curvaturas no perfil e no plano

Classe	Curvatura no Perfil	Curvatura no Plano
1	Côncava	Convergente
2	Retilínea	Retilínea
3	Convexa	Divergente

A área de contribuição das voçorocas foi estimada no aplicativo de geoprocessamento, após a remoção das depressões do MNT, no aplicativo *MNT*, segundo a metodologia apresentada por Collischonn *et al.* (1998).

O processo de remoção de depressões realizado simultaneamente e de forma interativa com o de obtenção de direções de fluxo, se baseia na utilização de uma janela móvel que percorre o MNT e atribui a cada célula um código que representa a direção de fluxo. A direção de fluxo é aquela que apresenta maior declividade, calculada como a diferença entre a altura da célula vizinha e a célula central, dividida pela distância entre as células. A partir desta direção, é realizada a remoção de depressões. Todas as células marcadas com um código, que indica a indefinição da direção de fluxo, têm a altura elevada até igualar a altura

da mais baixa célula da vizinhança. O algoritmo de atribuição de direções de fluxo é novamente utilizado até que todas as células tenham suas direções de fluxo determinadas.

A partir da grade com as direções de fluxo, a área acumulada é obtida através de um algoritmo que soma a área das células na direção indicada, iniciando pela célula do canto superior esquerdo e encerrando na célula do canto inferior direito.

O PI que representa a área de contribuição apresenta em cada célula da grade o valor relativo ao número de células situadas à montante.

3.1.2.3 – Solos

A influência dos solos no desenvolvimento de erosão linear foi analisada a partir do levantamento de solos na bacia do arroio Taboão (Carvalho *et al.*, 1990), realizado na escala 1: 50.000 e a partir das informações sobre os solos na bacia descritas por Boulet *et al.* (1993).

Embora fosse importante representar os solos com base em variáveis que possuem um papel importante no desenvolvimento de erosão, como conteúdo de matéria orgânica, propriedades químicas, textura, espessura, etc., isto não foi possível devido à ausência de informações para a geração destes PIs. Como resultado, considerou-se apenas a distribuição espacial das diferentes classes de solo existentes na área de estudo.

O mapa de solos foi digitalizado em aplicativo gráfico dando origem a um arquivo vetorial em formato *dxf*, contendo os polígonos das classes de solo. O arquivo vetorial foi importado para o aplicativo de geoprocessamento e transformado em um arquivo matricial, onde cada classe de solo é identificada por um número, conforme a Tabela 3.4.

Tabela 3.4 – Identificadores das classes de solo

Identificador	Classe de Solo
1	Neossolo Flúvico Tb Eutrófico (RUbe)
2	Gleissolo Háptico (GX)
3	Latossolo Vermelho Distrófico (LVd)
4	Latossolo Vermelho Distroférrico
5	Neossolo Litólico Eutrófico (RLe)
6	Nitossolo Vermelho Eutroférrico (NVef)

3.2 – Integração dos Dados Através de Técnicas de Geoprocessamento

Nesta etapa, foram realizados os procedimentos de integração dos dados das voçorocas e das variáveis em análise, visando identificar, na área de estudo: as relações existentes entre cada variável e as voçorocas, o controle relativo de cada variável no processo erosivo, comparativamente às demais variáveis, e o controle conjunto de todas as variáveis, o que foi possível através de um zoneamento de risco de erosão por voçorocas.

3.2.1 – Relações entre Voçorocas e Geologia, Geomorfologia e Solos

Inicialmente, visando identificar as relações de cada uma das variáveis relativas à geologia, geomorfologia e solos com as voçorocas, os sete PIs, contendo as informações destas variáveis, foram cruzados individualmente com o PI das voçorocas. No caso da geomorfologia e dos solos, a análise também considerou espacialmente os limites das bacias de contribuição das voçorocas, representadas em um PI binário.

A operação algébrica utilizada para a integração dos PIs foi a multiplicação, o que resulta no mascaramento das características das variáveis fora dos limites das voçorocas. Uma vez que foram utilizados os arquivos binários com as voçorocas e com as bacias de contribuição, as imagens resultantes das multiplicações apresentam os valores relativos a cada classe dos PI no interior das voçorocas e das suas bacias, e valor zero no restante da área. Desta forma, as imagens resultantes destes primeiros cruzamentos apresentam as informações que demonstram as relações de cada variável com as voçorocas.

Estas relações foram obtidas através dos histogramas das imagens, a partir dos quais foram calculadas as porcentagens de área ocupada pelas classes de cada PI em relação à área total das voçorocas. Obteve-se, assim, a frequência das classes de cada PI no interior dos polígonos que representam as voçorocas. O mesmo procedimento foi adotado no caso das variáveis analisadas com relação à bacia de contribuição das voçorocas.

A análise das relações entre as voçorocas e suas bacias de contribuição e as variáveis que representam a geologia, geomorfologia e solos, também foi realizada com base na obtenção de um resumo estatístico das informações dos PIs resultantes dos cruzamentos iniciais, abrangendo valores mínimo, máximo e médio. Neste caso, os PIs que representam as variáveis foram cruzados, também através de multiplicação, com os arquivos matriciais onde as voçorocas e as bacias de contribuição preservam suas numerações identificadoras.

3.2.2 – Controle da Geologia, Geomorfologia e Solos na Erosão por Voçorocas

Para integração simultânea de todos os PIs, necessária para a identificação da relevância de cada variável no desenvolvimento das voçorocas, e para a identificação do controle conjunto exercido por todas as variáveis no processo de erosão por voçorocas, foi utilizado o modelo Bayesiano de integração de dados espaciais (Eastman, 1999).

O modelo expressa a probabilidade a *posteriori* de que uma hipótese, sobre a qual existe um conhecimento prévio, seja verdadeira em função de uma nova evidência. No presente estudo, é a probabilidade de que ocorra erosão por voçorocas em função do comportamento das variáveis que descrevem a geologia, a geomorfologia e os solos.

A probabilidade a *posteriori* é a probabilidade condicional multivariada obtida pela matriz de covariância e pelo vetor média derivados dos dados dos polígonos de treinamento utilizados para definir cada classe, obtidos a partir de todos os PIs a serem integrados. A caracterização do padrão de cada classe fundamenta-se na sua função de probabilidade que deve ser aproximada pela função de densidade normal multivariada.

Embora, como a maior parte das técnicas de análise estatística multivariada, este modelo baseie-se no pressuposto de que os dados apresentam uma distribuição normal multivariada, neste estudo não foi analisada a distribuição de probabilidade multivariada dos dados. O fato de não se proceder esta análise respalda-se em Swain (1978), segundo o qual os classificadores desenvolvidos com base neste pressuposto são robustos no sentido de que a exatidão dos resultados não é muito sensível mesmo quando existem violações moderadamente severas deste pressuposto.

O resultado da integração dos dados dos PIs, que representam as variáveis em análise neste estudo, compreende tantas imagens quanto o número de classes consideradas na análise da hipótese, onde cada célula da grade apresenta a probabilidade de que a classe em questão ocorra. Foram consideradas duas classes na integração dos dados: *área potencial para ocorrência de voçoroca* e *área potencial para não ocorrência de voçoroca*.

A probabilidade a *priori*, isto é, a probabilidade da hipótese ser verdadeira a despeito de evidência, no caso da classe *área potencial para ocorrência de voçoroca*, foi estimada a partir do somatório das áreas das bacias de contribuição das voçorocas em relação à área total da bacia, obtendo-se o valor de 7%. Para a classe *área potencial para não ocorrência de voçoroca*, conseqüentemente, obteve-se o valor de 93%.

3.2.2.1 - Definição das Amostras para Integração de Dados

O procedimento de integração de dados foi empregado, inicialmente, para a identificação da melhor amostra para a classe *área potencial para ocorrência de voçoroca*, utilizando-se todos os PIs e considerando a ocorrência das classes caso a probabilidade a *posteriori* fosse superior a 50%.

Visando identificar a área cujas características determinam a ocorrência das voçorocas, foram testadas quatro amostras para a classe área com erosão: polígonos das voçorocas, áreas à jusante, áreas à montante e bacia de contribuição das voçorocas. Para tanto, foram escolhidos aleatoriamente alguns polígonos que limitam voçorocas e, a partir deles, no aplicativo de geoprocessamento, geradas automaticamente às suas bacias de contribuição. No caso das amostras expressas através de áreas à jusante e de áreas à montante das voçorocas, foram digitalizadas, também no aplicativo de geoprocessamento, linhas com comprimento equivalente a cerca de cinco células da grade.

Para a classe área sem erosão, foram utilizadas bacias de contribuição de locais onde não foram verificadas, nas fotografias aéreas ou no campo, feições de erosão linear.

Para identificação da melhor amostra da classe *área potencial para ocorrência de voçoroca*, foram realizadas quatro integrações simultâneas dos PIs, utilizando-se em cada procedimento uma das quatro amostras.

Cada uma das quatro imagens resultantes das integrações de dados foi cruzada com o PI binário que representa as voçorocas e com o PI binário que representa a área de estudo sem voçorocas. Ao contrário da composição das amostras, onde foram utilizados somente alguns polígonos representando as voçorocas e as áreas sem erosão, para a validação destes e dos resultados das integrações de dados realizadas posteriormente, foram considerados todos os polígonos das voçorocas mapeadas e a superfície da área de estudo onde não ocorrem voçorocas.

Nos histogramas das imagens resultantes das multiplicações pelo PI binário que representa as voçorocas, o maior número de células dentro dos polígonos das voçorocas classificadas como *área potencial para ocorrência de voçoroca* indica o melhor resultado, isto é, a melhor amostra. Da mesma forma, nos histogramas das imagens resultantes da multiplicação pelo PI binário que representa a superfície da área de estudo sem voçorocas, o maior número de células classificadas como *área potencial para não ocorrência de voçoroca* indica o melhor resultado. Obteve-se, assim, o percentual de concordância de cada classe com a realidade da área de estudo.

3.2.2.2 - Relevância de cada Variável na Erosão por Voçorocas

Uma vez tendo sido identificada a melhor amostra para representar as áreas que sofrem erosão, o próximo passo foi identificar a importância de cada uma das sete variáveis que representam a geologia, a geomorfologia e os solos no desenvolvimento de voçorocas.

O procedimento utilizado para isso foi a realização de sete sucessivas integrações dos PIs, retirando-se em cada tentativa um dos sete PIs que representam as variáveis em consideração. As sete imagens resultantes das integrações foram cruzadas individualmente com o PI binário que representa as voçorocas e com o PI binário que representa a área de estudo sem voçorocas. A seguir, foram gerados os histogramas destas imagens resultantes dos cruzamentos e comparados os resultados gerados a partir das sete integrações.

Segundo o raciocínio utilizado nesta análise, quanto pior o resultado obtido na integração de dados sem uma determinada variável, maior é o controle exercido pela mesma no desenvolvimento do fenômeno erosivo, relativamente às demais variáveis. Isto é, a menor coincidência entre as voçorocas mapeadas no campo e as áreas classificadas como *área potencial para ocorrência de voçorocas*, indica o maior controle exercido pela variável representada pelo PI que deixou de ser integrado. Conseqüentemente, maior será o número de células na grade que representa a superfície da área de estudo sem erosão, com valores correspondentes à classe *área potencial para não ocorrência de voçorocas*.

Como a análise dos resultados demonstrou que algumas variáveis são pouco relevantes no desenvolvimento de voçorocas, comparativamente às demais, foi realizada uma nova integração de dados sem os PIs que representam estas variáveis. Obteve-se um resultado superior ao resultante da integração com todos os PIs. Por este motivo, estas variáveis não foram consideradas na etapa subsequente deste estudo.

3.2.2.3 - Zoneamento de Risco Potencial à Erosão por Voçorocas

O controle conjunto exercido pelas variáveis no desenvolvimento de voçorocas é obtido através de um zoneamento de risco potencial de erosão por voçorocas na área de estudo. Para isto, procedeu-se novamente a integração simultânea dos PIs que mostraram ser mais importantes no desenvolvimento das voçorocas, utilizando-se intervalos de probabilidade a *posteriori* da classe *área potencial para ocorrência de voçorocas* para determinar os níveis de potencial erosivo. Foram determinadas empiricamente cinco classes de risco potencial de erosão por voçorocas através dos intervalos de probabilidade apresentados na Tabela 3.5.

Tabela 3.5 – Risco potencial de erosão em função da probabilidade de ocorrência de voçoroca

Probabilidade (%)	Risco potencial
0 - 30	Muito baixo
30 – 50	Baixo
50 – 70	Moderado
70 – 90	Alto
90 – 100	Muito Alto

A imagem, apresentando as cinco classes de risco, foi reclassificada dando origem a cinco novas imagens binárias. Em cada uma destas imagens, o valor 1 indica a classe de risco em questão e o valor 0 indica as demais classes. Cada uma destas imagens binárias, representando as cinco classes de risco de erosão foi cruzada com os sete PIs que representam as variáveis relativas à geologia, geomorfologia e solos.

As relações entre cada classe e a declividade, assim como as relações entre cada classe e a área de contribuição, foram analisadas com base no resumo estatístico dos dados das imagens resultantes destes cruzamentos. Já as relações entre cada classe de risco e as variáveis litologia, lineamentos, curvaturas das encostas no plano e no perfil, e solos, foram estabelecidas a partir dos histogramas das imagens resultantes dos cruzamentos.

3.3 – Validação dos Resultados

A verificação da existência de controle por parte da geologia, geomorfologia e solos foi realizada a partir da validação do zoneamento de risco potencial de erosão por voçorocas, ao identificar-se a relação entre as voçorocas mapeadas na área de estudo e o mapa de risco potencial de erosão por voçorocas.

Esta relação foi analisada de duas formas. Inicialmente, isto foi possível a partir do cruzamento entre a imagem binária com as voçorocas e a imagem com o zoneamento de risco de erosão. No histograma da imagem resultante deste cruzamento, obteve-se o número de células no interior dos polígonos das voçorocas ocupadas por cada classe de risco. Assim, obteve-se a frequência de cada classe de risco nos locais onde se desenvolvem as voçorocas.

Uma segunda forma de analisar a relação entre as voçorocas e as classes de risco de erosão consistiu na identificação do valor máximo de classe de risco no interior de cada voçoroca identificada. Desta forma, identificou-se o risco máximo de erosão existente no interior de cada voçoroca.

Procurou-se explicar a ocorrência de voçorocas nas classes de risco baixo e muito baixo, isto é, nas áreas com probabilidade inferior a 70% de apresentarem características semelhantes à amostra que definiu a classe “área potencial para ocorrência de voçoroca”. Para isso, analisou-se o comportamento das variáveis que representam a geologia, a geomorfologia e os solos nas voçorocas situadas em áreas classificadas como alto e muito alto risco de erosão e nas voçorocas situadas em áreas com moderado, baixo e muito baixo risco. Além destas variáveis, foram consideradas algumas informações obtidas durante o mapeamento das voçorocas, como suas dimensões e concentração do escoamento superficial. O comportamento destas variáveis foi analisado nos histogramas e nos resumos estatísticos das imagens resultantes dos cruzamentos de cada PI com as duas imagens representando os dois grupos de voçorocas. Estas duas imagens foram criadas a partir da identificação das voçorocas situadas em áreas classificadas como alto e muito alto risco de erosão, e nas voçorocas situadas em áreas com moderado, baixo e muito baixo risco. No caso das informações geradas durante o mapeamento de campo, foram utilizados os dados tabulados.

4 – DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área objeto deste estudo compreende a bacia hidrográfica do arroio Taboão, situada no noroeste do Estado do Rio Grande do Sul.

A bacia do Taboão apresenta uma superfície de 100 km² e tem em Pejuçara o seu maior núcleo urbano.

O arroio Taboão é afluente do rio Potiribu, que tem algumas de suas nascentes na cidade de Cruz Alta e tem sua foz junto ao rio Ijuí, nas proximidades da cidade de mesmo nome, como mostra a Figura 4.1.

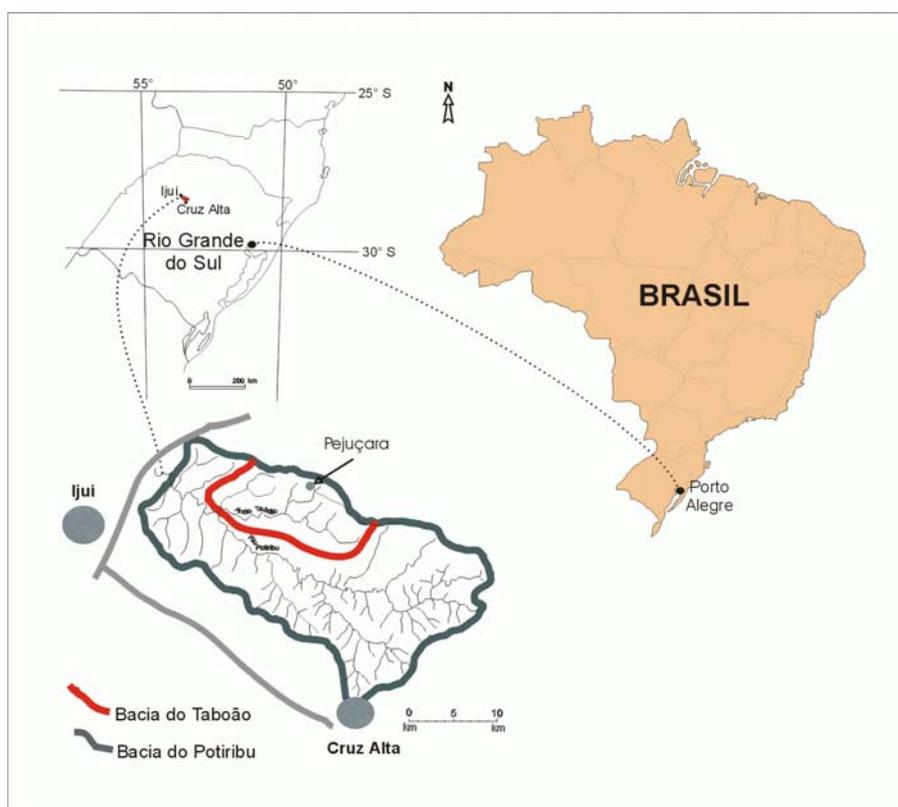


Figura 4.1 – Mapa de localização da bacia do arroio Taboão

O presente estudo insere-se no contexto do Projeto Potiribu, desenvolvido desde 1989 pelo Instituto de Pesquisas Hidráulicas – IPH, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS. O projeto, ao longo da sua execução, contou com apoio de instituições como o Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul – FAPERGS, FINEP e Instituto Francês de Pesquisa Científica para o Desenvolvimento em Cooperação – IRD, antiga ORSTOM.

O Projeto Potiribu possui dois objetivos principais: investigar os processos físicos que governam a produção de água e sedimentos nos solos em bacias embutidas para estudar os

efeitos de escala e elaborar modelos conceituais distribuídos para simular o comportamento de bacias de até 1000 km² (Bordas *et al.*, 1990).

A escolha pela bacia do rio Potiribu decorreu de um estudo realizado por pesquisadores do IPH/UFRGS, na década de 80, que abrangeu uma área de aproximadamente 230.000 km do derrame basáltico nos estados de Santa Catarina, Paraná e Rio Grande do Sul (Bordas & Borges, 1990).

O estudo identificou, nesta área, treze zonas físico-climáticas homogêneas com base nos critérios de erosividade da chuva, erodibilidade do solo e relevo. Destas, cinco zonas foram consideradas representativas da região do derrame basáltico para estudos de produção e de controle de água e sedimentos. Três delas situam-se na borda do derrame, onde o relevo é bastante acidentado, e as outras duas localizam-se na porção mais central do derrame, caracterizada por um relevo mais suave. A bacia do rio Potiribu foi escolhida como representativa do segundo tipo de zona, que é extremamente cultivada.

A seguir são descritas algumas características físico-climáticas e da vegetação da bacia do Taboão.

4.1 – Clima

Nimer (1989) descreve o clima na região como temperado úmido, sem estação seca, caracterizado por sua homogeneidade no que se refere à pluviometria e ao ritmo estacional de seu regime. Esta homogeneidade não é observada com relação aos valores e regimes térmicos. Com relação à temperatura, a média mensal varia de 14°C em julho a 24°C em janeiro.

A precipitação média anual na região é de 1.700 mm, e a distribuição mensal das precipitações apresenta uma notável homogeneidade, no período de 1945 a 1985, entre 120 e 160 mm mensais (Chevallier & Castro, 1991).

Esta aparente homogeneidade é, no entanto, alterada por importantes variações anuais e mensais. É o caso dos eventos extremos, considerados como efeitos do El Niño, observados em 1992, quando foram registrados 396 mm entre os dias 26 e 27 de maio, em 1997, com registros de 840 mm nos meses de outubro e novembro, e em 1998, quando foi registrado um total de 291 mm no mês de abril (Castro *et al.*, 1999).

O efeito destes picos pode estar registrado no cálculo das precipitações médias mensais na bacia do Taboão, no período de 1990 a 2001, que indica o mês de outubro como mais chuvoso (219 mm) e o mês de agosto como menos chuvoso (84 mm) (Medeiros, 2004), conforme a Figura 4.2.

O estudo detalhado dos eventos de chuva, a partir de 16 anos de observação do posto da IPAGRO, situado em Ijuí, mostrou intensidade de 115 mm/h em 5 minutos e 68 mm/h em 30 minutos com um período de retorno anual (Castro *et al.*, 1993).

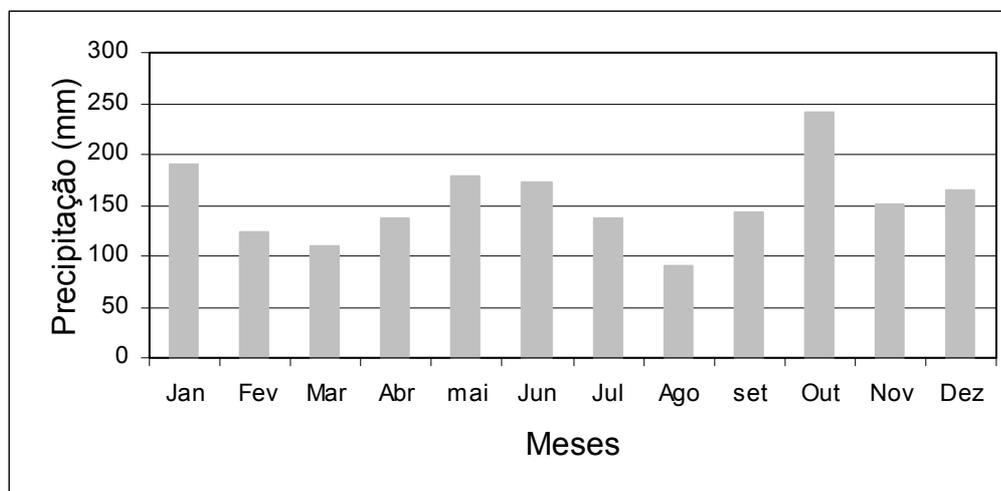


Figura 4.2 – Precipitações médias na bacia do Taboão, entre 1990 e 2001 (Fonte: Medeiros, 2004, p. 34)

O fator erosividade, da Equação Universal de Perda de Solos foi calculado por Chevallier & Castro (1991), com os dados de 16 anos de observação do posto da IPAGRO situado em Ijuí, resultando em um valor mínimo de 258, máximo de 759 e médio de 504 t.m.mm/ha h. Os meses de maior erosividade das chuvas estão relacionados ao verão devido à atuação de eventos convectivos que ocorrem somente nesta época do ano.

4.2 – Vegetação

De acordo com Brasil (1986), ocorrem na área da bacia do Taboão duas regiões fitoecológicas: a Região da Savana e a Região da Floresta Estacional Decidual.

Na Região Geomorfológica Planalto das Missões, onde está inserida a área de estudo, a Savana situa-se em áreas de relevo suave ondulado a ondulado, com solos distróficos profundos. A Savana é caracterizada por vegetação gramíneo lenhosa e apresenta as seguintes formas biológicas predominantes: hemiptófitas, geófitas, caméfitas e raras terófitas, representadas por espécies das famílias das gramíneas, ciperáceas, compostas, leguminosas e verbenáceas. Fanerófitas representadas por espécies lenhosas podem estar presentes em maior ou menor quantidade.

A Região da Floresta Estacional Decidual ocorre restrita a bacia do rio Ijuí no Planalto das Missões. Sua estrutura é representada por dois estratos arbóreos distintos: um emergente,

aberto e decíduo, com altura variando entre 25 e 30 m, e outro, dominado e contínuo, de altura não superior a 20 m, formado especialmente por espécies perenifoliadas, além de um estrato de arvoretas. A fisionomia decidual desta floresta é determinada pelo dossel emergente, dominado por leguminosas caducifólias, onde se destacam a *Apuleia leiocarpa* (grápia) e a *Parapiptadenia rígida* (angico).

Carvalho *et al.* (1990) apresentam uma caracterização da cobertura vegetal da bacia do arroio Taboão. Segundo os autores, a vegetação na bacia é composta por resquícios de floresta do tipo intermediário tropical/subtropical, formada por espécies arbóreas, arbustivas e rasteiras, que foi sendo destruída ao longo do tempo para dar espaço a lavouras.

A pouca vegetação remanescente é formada por árvores de grande porte, com destaque para *Peltophorum vogelianum* (canafistola), *Myrocarpus frondosus* (cabriúva), *Cabranea oblongifolia* (cangerana), *Cedrela fissilis* (cedro), *Patagonula americana* (guajuvira), *Ingá ssp* (ingás), *Cordia frichotoma* (louro), *Enterolobium contortisiliquum* (timbaúva) e *Piptadenia spp* (angico). Todo esse complexo pode estar habitado ainda por epífitas, musgos, líquens e pteridófitas.

Entre as espécies que formam a vegetação baixa, destacam-se: *Sorocea ilicifolia* (cincho), *Chusquea spp* (crissiumas), *Urera baccifera* (urtigão), *Actinostemon concolor* (laranjeira do mato), *Trichilia elegans* (pau ervilha) e *Genoma schottiana* (urucana).

A vegetação rasteira compreende avencas, gramíneas de baixo e grande porte e cipós rasteiros que, em geral, pertencem à família das bignoniáceas e salpindáceas.

A vegetação herbácea gramíneo lenhosa é composta de forma esparsa e irregular principalmente por *Aristida spp* (barba de bode), *Baccharis* (carquejas), *Desmodium spp* e *Trifolium spp*.

As florestas de galerias são estreitas, densas e de porte medianamente alto. As espécies mais comuns são a *Peltophorum dubium* (canafistola), *Luhea divaricata* (açoita cavalo), *Eugenia uniflora* (pitangueira) e *Lithraea brasiliensis* (aroeira preta).

4.3 – Uso do Solo

Risso (1993) apresenta um levantamento do uso do solo a partir da classificação de uma imagem LANDSAT TM de abril de 1989. Embora não sejam atuais, estas informações de uso do solo são as únicas disponíveis para a área. Foram identificados pelo autor quatro usos distintos para o solo da região, conforme mostra a Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Uso do solo na bacia do Taboão

Tipo de Uso	Área (km ²)	Área (%)
Área Agrícola	61,1	58
Pastagem	32,5	30,9
Floresta	10,3	9,8
Área Urbana	1,4	1,3

O principal uso do solo verificado na bacia do Taboão compreende o cultivo de soja, principalmente, e milho, como culturas de verão; aveia e trigo, como culturas de inverno. A soja é semeada em novembro e colhida entre abril e maio. O milho é uma alternativa ao plantio da soja, já que possui um ciclo similar. A segunda cultura, trigo ou aveia, é semeada entre maio e junho e a colheita ocorre em novembro, pouco antes do plantio de soja.

A área plantada destas culturas no município de Pejuçara, que compreende o maior núcleo urbano na bacia do Taboão, segundo dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE relativos a 1999 e disponíveis na Internet, é de 26.900 hectares de soja, 1.400 hectares de milho, 100 hectares de aveia, 4.000 hectares de trigo. Além destas, são relacionadas áreas de cultivo significativas das seguintes culturas: 38 hectares de cana-de-açúcar, 30 hectares de arroz, 23 hectares de feijão e 10 hectares de batata-doce.

A produção agrícola na região se caracteriza pela aplicação de vários produtos químicos, como fertilizantes, pesticidas e fungicidas, bem como pela utilização de pesado maquinário agrícola.

A utilização do solo para pastagens é menos expressiva do que para a agricultura. Com relação à pecuária, segundo dados do IBGE relativos a 1999 e disponíveis na Internet, no município de Pejuçara, o efetivo dos rebanhos é composto por 14.600 cabeças de bovinos, 3.200 cabeças de porcos, 21.800 cabeças de aves e por um pequeno número de eqüinos, caprinos, ovinos e coelhos.

Pequenas áreas com remanescentes de floresta original são observadas geralmente próximo às estradas e limites de propriedades. As matas galerias estão preservadas onde os cursos de água são encaixados e estão ausentes quando há alargamentos dos talwegues ou existem zonas de alagamento.

Com relação à área urbana, Pejuçara é a única sede municipal situada na bacia do arroio Taboão. Também está situado na bacia o distrito de Santa Lúcia, pertencente ao município de Bozano. Pejuçara possui uma área de 414,14 km² que abrange mais de 90% da área da bacia do Taboão, com exceção da vertente direita da sub-bacia do arroio Rincão. Segundo dados do censo realizado pelo IBGE no ano de 2000, sua população total é de 4.186

habitantes. Deste total, 63,7% reside em área urbana e 36,3 % em área rural. Em 1993, embora a população total fosse a mesma, 56% residia em área urbana e 44% da população estava concentrada em área rural, segundo dados fornecidos pela Secretaria Municipal da Fazenda (Castro, 1996). O aumento da população residente na área urbana entre 1993 e 2000 pode indicar que tenha ocorrido êxodo rural, mas também demonstra que muitos produtores e trabalhadores rurais optaram por viver na cidade.

4.4 - Geologia

4.4.1 – Geologia Regional

O noroeste do Rio Grande do Sul insere-se no contexto geológico da Bacia do Paraná que ocupa uma superfície de 1.400.000 km² no Brasil, Uruguai, Paraguai e Argentina. Esta é uma bacia intracratônica preenchida por uma seqüência sedimentar e por uma seqüência vulcânica que atingem 8.000 m no seu depocentro. A sedimentação inicial data do Paleozóico e desenvolveu-se predominantemente em ambiente marinho, ao passo que as seqüências Mesozóicas são exclusivamente continentais, culminando com arenitos eólicos da Formação Botucatu, de idade Jurássica.

Durante o Cretáceo inferior, extrusões de lava subaérea ocorreram diretamente sobre os arenitos Botucatu em toda a extensão da bacia, dando origem à seqüência vulcânica denominada como Formação Serra Geral. Os arenitos intercalam-se ao pacote vulcânico por um mínimo de 160 metros de espessura, indicando manutenção da aridez do regime desértico ao longo do período inicial do vulcanismo (Peate, 1997).

Horizontes sedimentares centimétricos a decamétricos intercalados à seqüência vulcânica, com características de uma sedimentação vulcanogênica contemporânea ao magmatismo, desvinculada do sistema desértico relacionado aos arenitos da Formação Botucatu, ocorrem principalmente nas porções média a superior do vulcanismo Serra Geral (Wildner *et al.*, 2003). Esses horizontes sedimentares, provavelmente relacionados a leques aluviais e fluviais, ocupam irregularidades geradas pela erosão da superfície dos derrames, desenvolvendo formas de paleocanais, rugosidades e horizontes de paleossolos, com espessuras que variam entre 0,5 m e 25 m de espessura. Litologicamente são arenitos finos e siltitos avermelhados em camadas finas intercaladas com níveis de conglomerados de grãos e seixos, com acamadamento gradacional incipiente e, localmente, contendo estratificação cruzada de pequeno porte.

Com base em critérios geoquímicos (Peate *et al.*, 1992), o magmatismo Serra Geral é dividido em três tipos de magma: um grupo alto Ti/Y, característico da porção norte da bacia, composto pelas fácies Pitanga, Paranapanema e Ribeira; um grupo baixo Ti/Y, característico da porção sul, composto pelas fácies Gramado e Esmeralda, e um magma riolítico, do qual fazem parte os riolitos tipo Palmas que predomina entre as rochas vulcânicas ácidas e os riolitos tipo Chapecó restritos à porção norte-nordeste do Rio Grande do Sul e centro-leste de Santa Catarina e Paraná.

As idades radiométricas indicam um período principal entre 129 e 134 Ma, com evidências de um aporte de lavas mais antigo, entre 135 a 138 Ma, e de um ápice para o magmatismo entre 133 e 131 Ma. (Wildner *et al.*, 2003).

Heeman (1997) apresenta a estruturação dos derrames relacionados à Formação Serra Geral, na região de Sobradinho-Salto do Jacuí, fundamentada em aspectos petrográficos, estruturais e geoquímicos. São identificadas três associações de rochas vulcânicas separadas por horizontes regionalmente correlacionáveis a níveis intertrápicos de arenito Botucatu. Segundo o autor, a partir da cota de 80 m, que corresponde ao topo da Formação Botucatu na área, ocorre uma associação de basaltos com textura intergranular com espessura média de 120 m. O limite superior dessa unidade é marcado pelo intertrape de arenito da Formação Botucatu da cota de 200-220 m. A próxima camada de arenito intertrape, de expressão regional, ocorre na cota altimétrica de 380-400 m, representando o limite superior entre derrames ácidos e básicos. Entre estes derrames, é descrito um nível de arenito Botucatu na cota de 300 m com continuidade restrita ao extremo sul da área de estudo. A partir do intertrape da cota de 400 m, ocorrem derrames de dacito holocristalino com espessura total aflorante de 160 m e que constituem a unidade de topo na região.

Na bacia do Taboão, as rochas vulcânicas apresentam características físicas, petrográficas, químicas e reológicas que as enquadram na divisão litoquímica do fácies Paranapanema/Pitanga (Schobbenhaus e Bizzi (Coords.), 2001). Este fácies, segundo Wildner *et al.*(2003), está representado por derrames de lavas básicas, com espessura variando de 15 a 50 metros e geometria aproximadamente tabular, entre os quais é freqüente a presença de camadas irregulares de sedimentos vulcanogênicos, que variam de arenitos conglomeráticos a siltitos avermelhados. Os derrames apresentam um nível vesicular basal pouco espesso, com 20 a 50 centímetros e uma porção central que ocupa cerca de 60 a 70% de sua espessura, onde predomina um padrão colunado irregular característico deste fácies. No topo, é comum a presença de um nível vesicular composto geodos de tamanhos variados que podem chegar até 2 metros de diâmetro, preenchidos por calcedônia, ágata e ametista, além de calcita e zeolitas. Litologicamente, são rochas granulares finas a médias, mesocráticas, cinza a cinza

avermelhado, com horizontes vesiculares bem desenvolvidos posicionados principalmente junto ao topo do derrame.

4.4.2 – Geologia Estrutural

A Bacia do Paraná é dominada por elementos tectônicos lineares que se orientam em três direções principais: NW-SE, NE-SW e E-W (Zalán *et al.*, 1990). As duas mais importantes são as orientações NW-SE e NE-SW que podem constituir falhas simples ou extensas zonas de falhas com dimensões da ordem de centenas de quilômetros, representando antigas zonas de fraquezas que foram recorrentemente ativas durante a evolução da bacia.

O mesmo padrão de direções NW e NE foi observado por Soares *et al.* (1982) *apud* Zalán *et al.* (1990) em um estudo detalhado de imagens LANDSAT e de radar nas porções central e oriental da bacia. Foram identificadas faixas retilíneas com alta concentração de lineamentos separados em três grupos de trendes NW, variando de N 25 - 65 W, e dois grupos de trendes NE, variando de N 35 - 60 W.

As falhas com direção NW, segundo Zalán *et al.* (1990), foram fortemente reativadas durante o quebramento do Gondwana no Juro-Cretáceo, evento tectônico que mais fortemente afetou a bacia. A reativação destas falhas condicionou a intrusão de corpos ígneos que serviram como zonas de alimentação dos derrames de lava relacionados à Formação Serra Geral. O padrão estrutural das zonas de falha NE apresenta em geral uma ausência de diques e, conseqüentemente, das deformações associadas a eles. São muito mais comuns estruturas relacionadas a movimentações transcorrentes ao longo dos lineamentos NE do que ao longo dos lineamentos NW. Os movimentos ao longo das zonas de falhas, associadas a ambas direções, tiveram componentes horizontais e verticais resultando em rejeitos da ordem de centenas de metros até poucos quilômetros, estes maiores relacionados às componentes horizontais em função de suaves deslocamentos recorrentes e a reversão de movimentos.

Ocorrem na bacia dois tipos principais de estilos estruturais, ainda segundo Zalán *et al.* (*op. cit.*): deformações associadas às intrusões ígneas básicas e deformações associadas às reativações dos grandes lineamentos. Pequenos domos, *horsts*, *grabens* e falhas lítricas, identificadas na bacia, podem estar relacionados a corpos ígneos intrusivos em subsuperfície ou à reativação de zonas de falhas importantes. Deformações associadas aos lineamentos NE e NW consistem basicamente em estruturas em flor, dobras e falhas reversas escalonadas ou grandes falhas normais.

No Rio Grande do Sul, segundo Frasca & Lisboa (1993), a Bacia do Paraná apresenta a influência de dois amplos padrões estruturais relacionados ao Arco de Rio Grande e ao

Cinturão Móvel Dom Feliciano. O Arco de Rio Grande representa um arqueamento crustal regional, estruturado desde o Paleozóico e transformado em sua forma atual no Mesozóico, com eixo de arqueamento segundo a direção NW. O Cinturão Móvel Dom Feliciano representa um cinturão orogênico exumado, formado durante o Proterozóico Superior e Paleozóico Inferior, ao qual estão associadas diversas falhas de direção NE e N-S.

Estas duas grandes entidades geotectônicas apresentam continuidade sob a Bacia do Paraná, evidenciando que os padrões morfotectônicos, isto é, padrões de forma de relevo com significado tectônico que ocorrem na sua superfície, representam feições do embasamento e zonas de fraturas.

Frasca & Lisboa (1993), através da análise visual de modelados de dissecação em fotografias aéreas e imagens de radar e de satélite, individualizam três unidades morfotectônicas no Grupo São Bento, da Bacia do Paraná, no Rio Grande do Sul: Fachada Atlântica, Abóbada Oeste e Abóbada Central.

A unidade morfotectônica Abóbada Central, onde se insere a área de estudo, é descrita como constituída por um relevo uniforme mamelado-dissecado. Mostra predominância de lineamentos de pequeno porte multidirecionais, com distribuição de alta densidade, com setores de maior concentração nas direções NE e NW.

A orientação dos lineamentos igualmente distribuída indica que a área sofreu de maneira uniforme a influência dos padrões estruturais do Arco de Rio Grande e do Cinturão Móvel Dom Feliciano, e do sistema de falhas NE-SW e N-S associados.

4.5 – Geomorfologia

A bacia do Taboão está inserida na Região Geomorfológica Planalto das Missões que, por sua vez, faz parte do Domínio Morfoestrutural das Bacias e Coberturas Sedimentares, de acordo com Brasil (1986).

Devido à homogeneidade das condições fisiográficas na escala em que foi realizado o referido estudo, esta área é considerada indivisa para um estudo geomorfológico, caracterizando-se ao mesmo tempo como uma região e uma unidade. A unidade geomorfológica, denominada Planalto de Santo Ângelo, apresenta um relevo de dissecação homogênea, sob a forma de colinas suaves, bem arredondadas, regionalmente conhecidas como coxilhas, onde os vales fluviais aprofundam entre 22 e 28 metros. Associadas às coxilhas, nos interflúvios e nas cabeceiras de drenagem, é comum a presença de *dales*, ou seja, áreas deprimidas com forma circular ou elíptica que apresentam fundo plano e brejoso, impossibilitando o plantio.

A análise do relevo da área de estudo foi baseada nos dados de elevação do terreno representados no MNT que é apresentado na Figura 4.3.

A bacia do arroio Taboão possui uma forma alongada com eixo principal orientado segundo a direção NW. Sua amplitude de relevo varia de 330 a 495 m, sendo que as altitudes mais elevadas concentram-se no extremo leste da bacia. A densidade de drenagem é baixa, igual a 1,54 a partir da carta planialtimétrica na escala 1:25.000 (Diniz, 2001).

A declividade média na bacia é de 8%, embora, nos vales, as declividades variem de 10 à 20%. Localmente, especialmente no sudoeste da bacia, o arroio Taboão e seu tributário, arroio Rincão, apresentam vales entalhados na rocha. Estas são as áreas mais declivosas da bacia, podendo as vertentes apresentar declividades em torno de 30% e chegando a atingir 45%. A distribuição das declividades na bacia pode ser observada na Figura 4.4.

A classificação do relevo da bacia do Taboão, baseada nos elementos de forma curvatura no plano e curvatura no perfil, é apresentada na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 –Curvaturas das encostas no perfil e no plano

Curvatura perfil – Curvatura Plano	Área (%)
Côncava-convergente	5,1
Retilínea-convergente	7,1
Convexa-convergente	0,8
Côncava-retilínea	5,8
Retilínea-retilínea	58,7
Convexa-retilínea	7,1
Côncava-divergente	1,0
Retilínea-divergente	10,0
Convexa-divergente	4,4

A partir da classificação do relevo, verifica-se que 75,8% das encostas são retilíneas no perfil, enquanto que 12,3% são convexas e 11,9% são côncavas. Já em relação à curvatura no plano, 71,6% da área da bacia é ocupada por encostas retilíneas, 15,4% por encostas divergentes e 13% da área apresenta forma convergente. A classificação gerada pelo aplicativo computacional apresenta resultado concordante com o relevo observado na área de estudo, dominado por coxilhas com extensas vertentes retilíneas, topos convexos e talwegues côncavos. As Figuras 4.5 e 4.6 apresentam a distribuição dos elementos de forma das encostas no perfil e no plano.

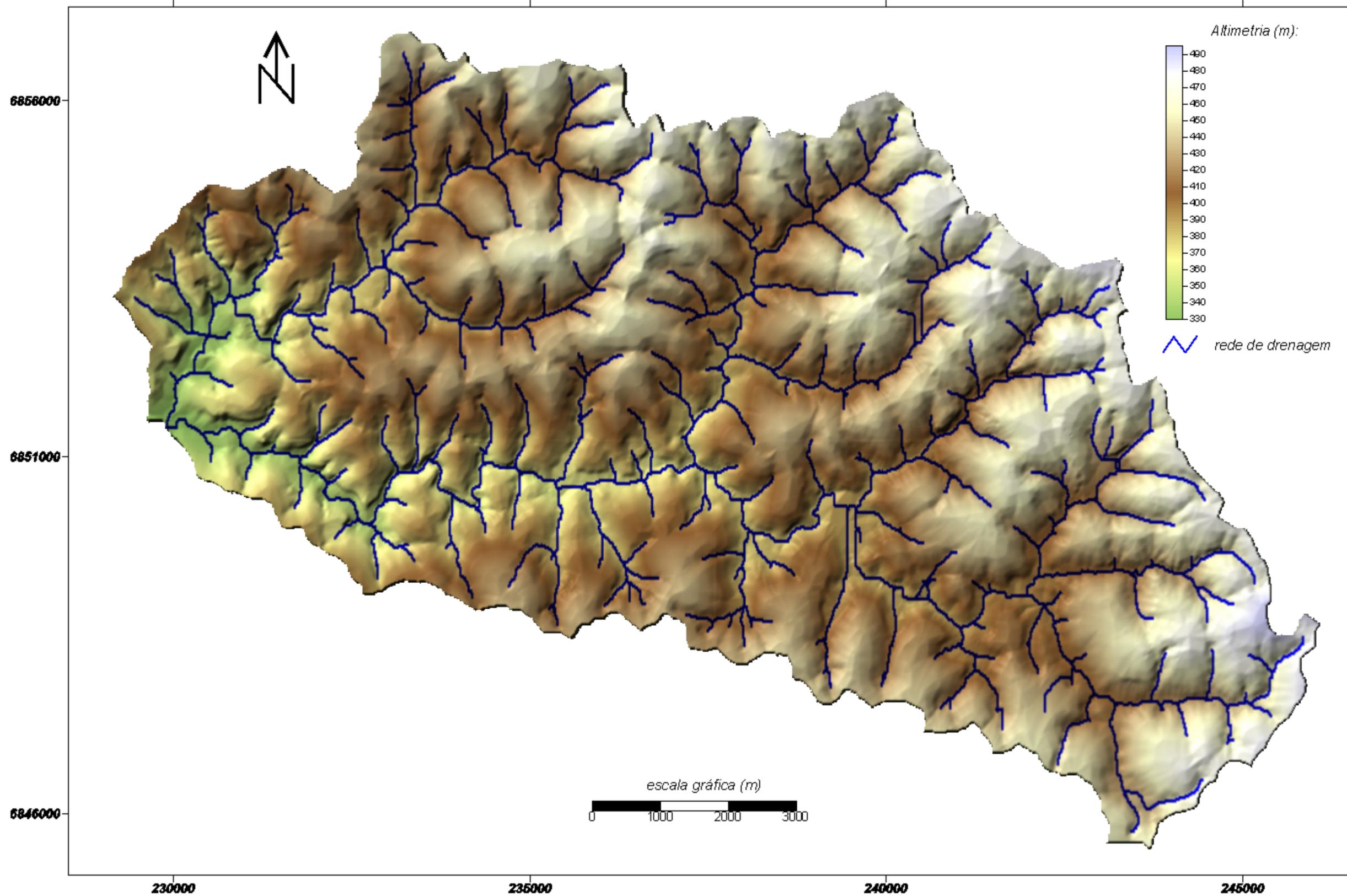


Figura 4.3 - Modelo Numérico do Terreno da Bacia do Taboão

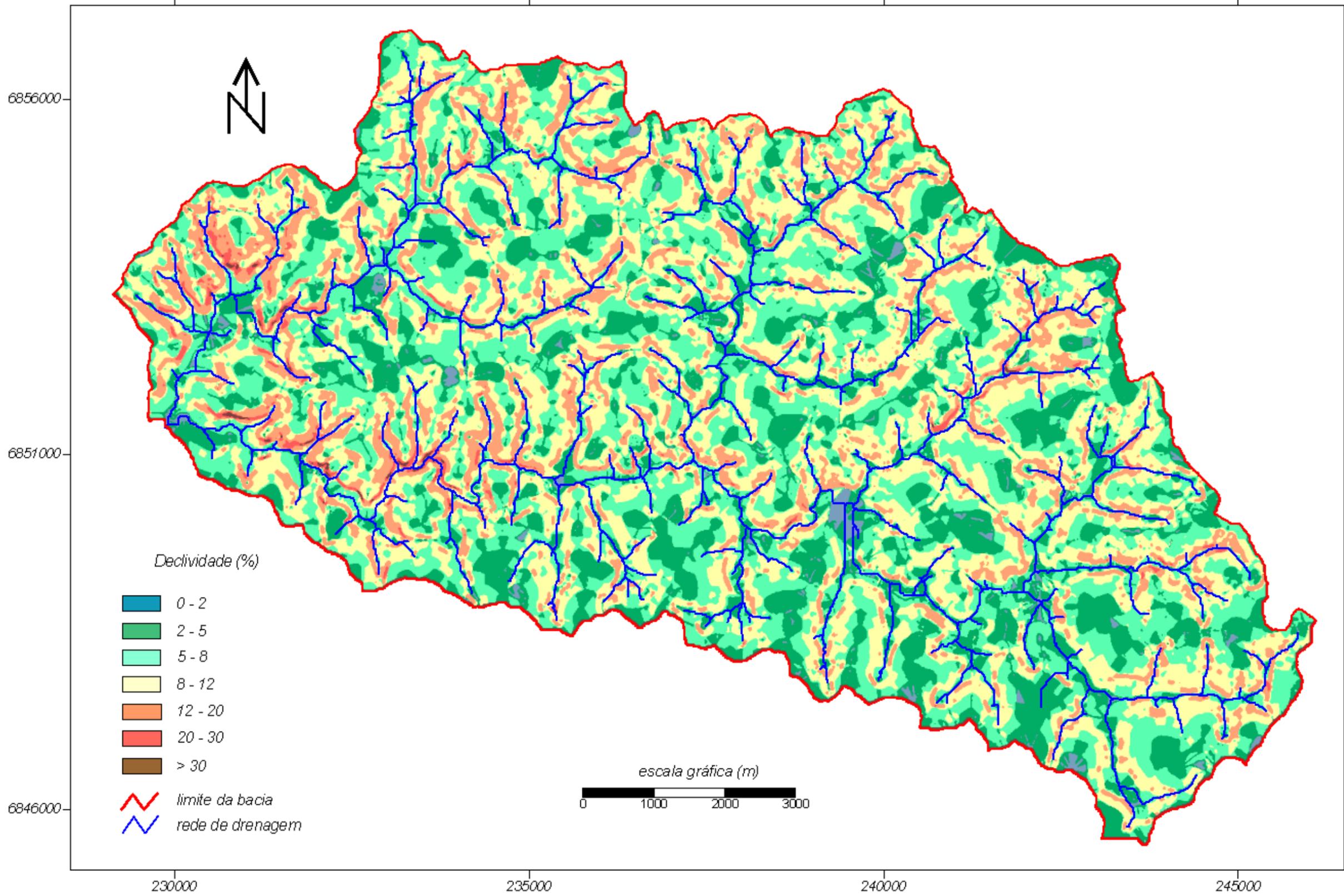


Figura 4.4 - Declividade na Bacia do Taboão

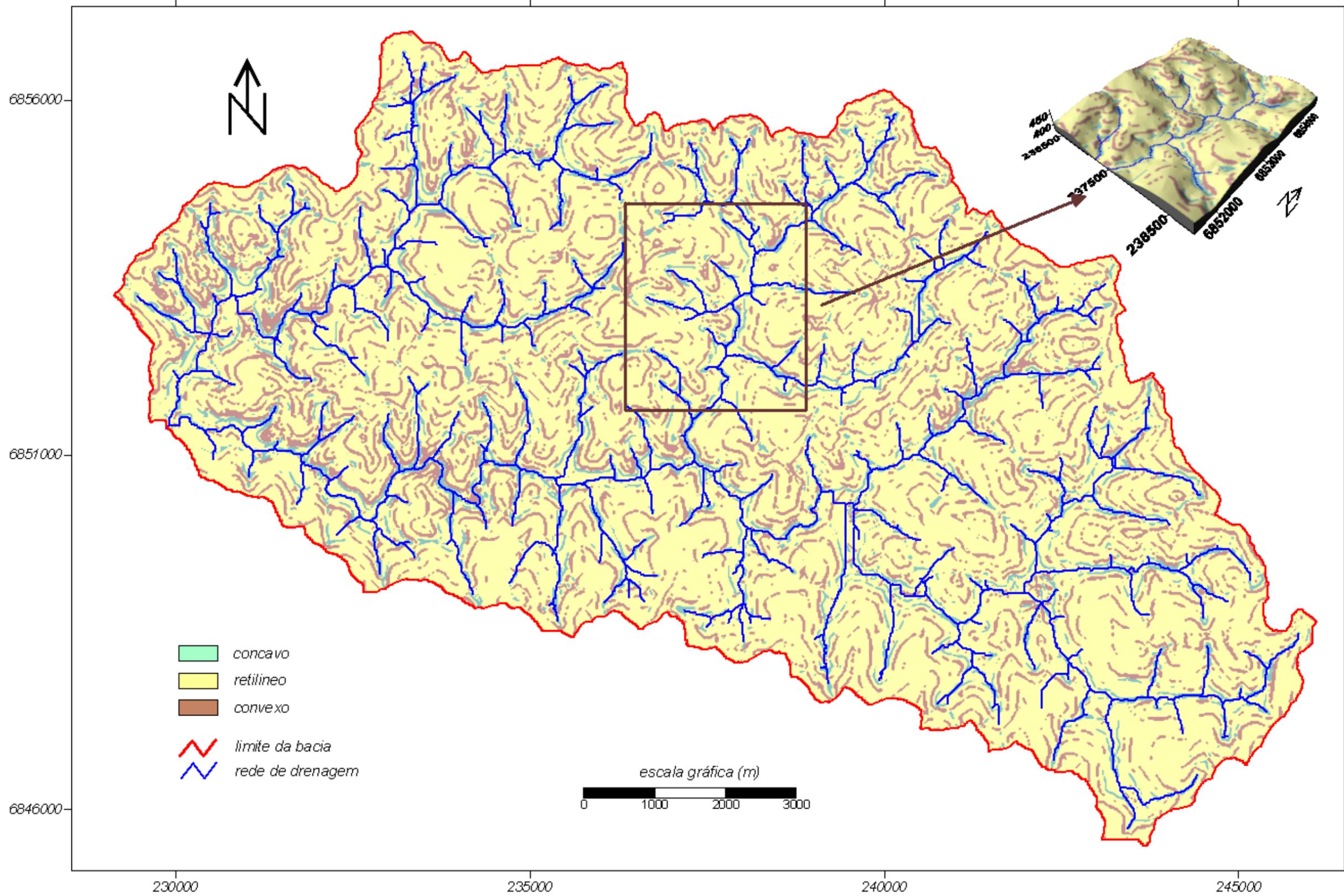


Figura 4.5 - Forma das Encostas no Perfil na Bacia do Taboão

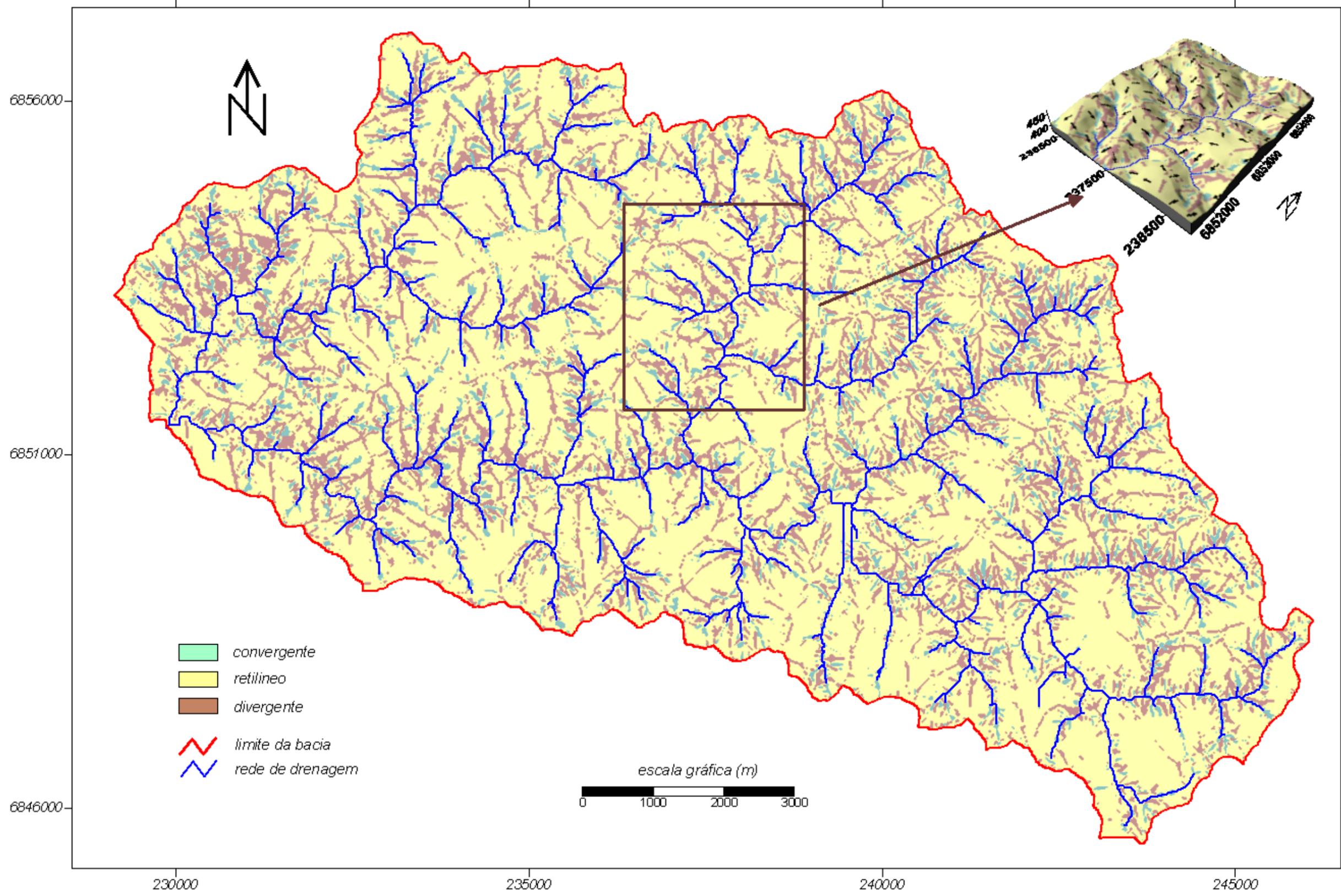


Figura 4.6 - Forma das Encostas no Plano na Bacia do Taboão

4.6 – Solos

Carvalho *et al.* (1990) realizaram levantamento de solos na bacia do arroio Taboão e identificaram sete unidades de mapeamento, como mostra a Figura 4.7. As unidades de mapeamento apresentadas são resultantes do enquadramento das unidades definidas no levantamento original segundo o Sistema Brasileiro Classificação de Solos (EMBRAPA,1999). O enquadramento foi realizado com base nos perfis de solo que descrevem cada unidade de mapeamento, representados pela descrição morfológica e dados físicos e químicos dos horizontes descritos.

Os solos classificados como Latossolo Vermelho Distroférico típico textura muito argilosa A moderado epieutrófico (LVdf) ocorrem em 39,8% da área da bacia. Apresentam uma inerente resistência à erosão em estado natural devido ao alto grau de flocculação das argilas, à alta porosidade, à boa permeabilidade e ao fato de ocorrerem em áreas de relevo suave. No entanto, o uso contínuo de maquinário pesado tem ocasionado a formação de uma camada adensada de aproximadamente 5 a 10 centímetros de espessura, conhecida como “pé de arado”, localizada a uma profundidade média de 15 centímetros, o que dificulta a penetração da água e das raízes, favorecendo a erosão. Esta unidade de mapeamento apresenta três subclasses na bacia do Taboão com base no tipo de relevo e na classe de declividade do terreno onde ocorrem.

Os solos da unidade de mapeamento como Latossolo Vermelho Distroférico típico textura muito argilosa A moderado epieutrófico, relevo suave ondulado, 0-3% de declive, topo, são encontrados nas partes mais aplainadas de um relevo suave ondulado, coincidindo normalmente com o topo das colinas, com declives de até 3%, entre as cotas 440 e 460 metros, aproximadamente. Comparativamente com as outras subdivisões da classe, esta unidade apresenta pequenos riscos de erosão.

Os solos da unidade de mapeamento como Latossolo Vermelho Distroférico típico textura muito argilosa A moderado epieutrófico, relevo suave ondulado, 3-8% de declive, meia encosta, se diferenciam da unidade anterior por sua posição na paisagem, isto é, na meia encosta e pela sua maior suscetibilidade à erosão, especialmente nos locais onde ocorre uma camada adensada gerada pelo o uso contínuo de maquinário pesado.

Os solos da unidade de mapeamento como Latossolo Vermelho Distroférico típico textura muito argilosa A moderado epieutrófico, relevo ondulado, 8-13% de declive, encosta inferior, se assemelham aos solos das duas unidades anteriores, mas, por se situarem nas encostas inferiores de um relevo regional suave ondulado/ondulado, com declives um tanto acentuados, são solos mais suscetíveis à erosão.

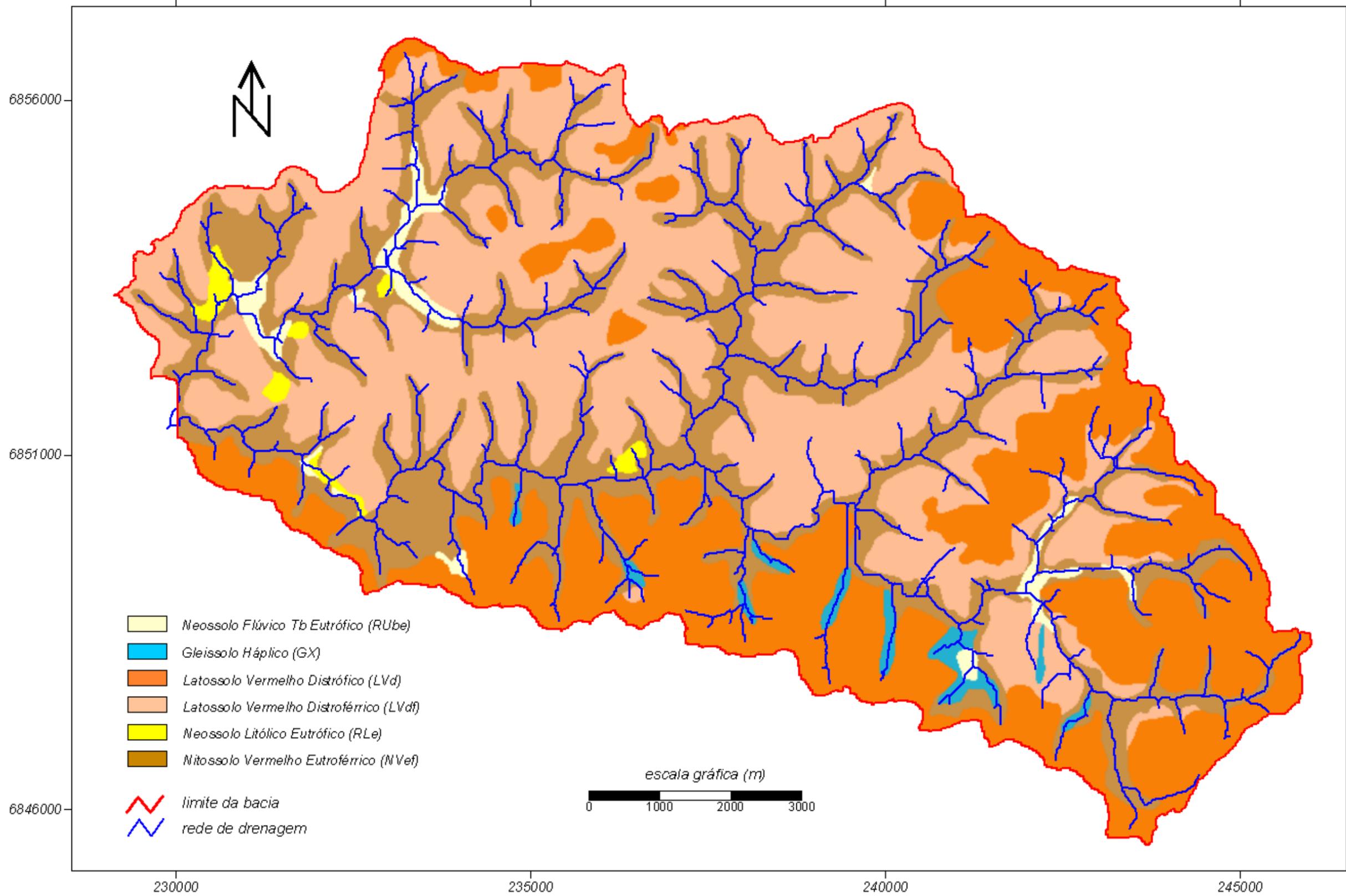


Figura 4.7 - Solos na Bacia do Taboão

Os solos da classe Latossolo Vermelho Distrófico típico textura argilosa A moderado endoálico (LVd) ocorrem em relevo suave ondulado, formado por colinas com topos arredondados e vertentes longas, ocupando 28,5% da superfície da bacia do Taboão. Por apresentarem alto grau de flocculação, alta porosidade, boa permeabilidade e ocorrerem em relevo favorável, são bastante resistentes à erosão em estado natural. Quando sob cultivo, se mal manejados, têm a tendência a desenvolver uma camada adensada que favorece o escoamento superficial da água. Esta unidade de mapeamento foi subdividida em duas subclasses, em função da fase de relevo.

Os solos da unidade Latossolo Vermelho Distrófico típico textura argilosa A moderado endoálico, relevo suave ondulado, 0-3% de declive, topo, são encontrados nas partes mais elevadas e aplainadas do relevo e são ligeiramente suscetíveis à erosão.

Os solos da unidade Latossolo Vermelho Distrófico típico textura argilosa A moderado endoálico, relevo suave ondulado, 3-8% de declive, meia encosta, são encontrados em situação de meia encosta, com declives entre 3 e 8%. Diferenciam-se dos solos da unidade anterior por necessitarem cuidados redobrados no que diz respeito à erosão.

Os solos pertencentes à unidade de mapeamento Nitossolo Vermelho Eutrófico típico textura muito argilosa A moderado fase relevo ondulado (NVef) ocorrem em 28% da área da bacia do Taboão. Ocupam as encostas inferiores das elevações, com declives em geral entre 8 e 15%, próximo aos cursos de água que drenam a região. Apresentam sérios riscos de erosão laminar e concentrada, caso sejam mal manejados, em função dos declives relativamente acentuados onde ocorrem.

A unidade de mapeamento Gleissolo Háplico (GX) compreende solos formados em terrenos baixos e planos, representando 1,2% da bacia, com grande influência do lençol freático, aflorante ou subaflorante, pelo menos em grande parte do ano.

Os solos da unidade Neossolo Flúvico Tb Eutrófico gleico textura argilosa A moderado fase relevo plano (RUbe) ocorrem em áreas com declives entre 1 e 2%. Estão presentes em 1,9% da superfície da bacia

Os solos classificados como Neossolo Litólico Eutrófico típico textura média esquelética A moderado fase relevo ondulado e forte-ondulado (RLe) ocorrem normalmente em áreas declivosas, com 20% ou mais de declive, sob vegetação tipo floresta subtropical/tropical. Ocupam 0,8% da área da bacia.

Três toposequências são descritas por Boulet *et al.* (1993), na bacia Taboão: uma situada na sub-bacia do arroio Donato, à montante da voçoroca nº 60; uma situada no nordeste da cidade de Pejuçara, e uma terceira toposequência junto à estrada municipal que liga

Pejuçara à Linha Donato. A seguir, apresenta-se a descrição da toposequência situada na sub-bacia do arroio Donato, onde foram realizadas sete sondagens.

Ao longo desta toposequência, a cobertura pedológica é homoganeamente argilosa, sendo possível distinguir a variação textural somente a partir de análise tátil. Na porção mais à montante da toposequência, o solo apresenta uma espessura de 2,5 m que, no entanto, pode chegar a 7,5 m a partir da meia-encosta em direção à jusante.

O horizonte superficial consiste em um horizonte cultural com 20 cm, argiloso, cores 2,5 YR 3/4 a 3/3, pouco coesos, com estrutura prismática e sub-estrutura poliédrica pouco coerente à montante, e estrutura poliédrica média a fina, bem desenvolvida, a partir da meia-encosta. A microagregação e a porosidade intermicroagregados são bem desenvolvidas. A porosidade tubular é observada à montante.

O segundo horizonte caracteriza-se pela dureza, muito maior do que no horizonte superficial, estrutura compacta e porosidade baixa a média. Sua cor, 2,5 YR 3/4, é ligeiramente mais viva que a do horizonte anterior. Assim como o anterior é argiloso, apresenta estrutura poliédrica e coesão média. Os agregados poliédricos são angulosos e apresentam as faces lisas. Apresentam porosidade tubular fraca a moderada. Verifica-se a presença pouco numerosa de tubos de origem biológica, menores do que 5 mm, entre os microagregados. A espessura deste horizonte endurecido e compacto é de 45 cm, à montante, e chega a 90 cm na porção mais inferior da toposequência. Observa-se a presença de “pé de arado” e umidade no topo deste horizonte.

O terceiro horizonte apresenta mesma cor, porosidade tubular um pouco mais desenvolvida e dureza nitidamente menor do que as verificadas no segundo horizonte. A estrutura prismática poliédrica é mais grosseira e com faces mais lisas do que no horizonte anterior. São verificados grãos milimétricos de cor branca, constituídos, provavelmente, por sílica amorfa. A espessura varia de 40 cm a 3 m e caracteriza-se pelo espessamento progressivo do horizonte em direção às porções inferiores da toposequência.

O quarto horizonte foi considerado um horizonte BC devido à presença de fragmentos, milimétricos a centimétricos, de basaltos alterados. Os grãos brancos aumentam ligeiramente e irregularmente em número e tamanho, em direção à base. Sua espessura varia de 1,3 m, à montante, diminuindo progressivamente até 20 cm, no meio da toposequência, e voltando a aprofundar até atingir 3 m na porção mais inferior.

O horizonte mais inferior, cor vermelho violáceo, com porções brancas a ocre, é constituído predominantemente por basalto alterado. Sua textura é mais siltosa do que a dos demais horizontes.

Na base da seqüência, observa-se um nível muito úmido e plástico, não saturado. À montante, este nível é observado no horizonte BC, embora não seja observado no perfil descrito no ponto mais elevado da toposeqüência. A partir do terço inferior da pendente, este nível torna-se mais espesso até atingir 4,5 m próximo ao exutório da bacia. Ocupa a totalidade do terceiro horizonte e a metade do quarto.

A cobertura pedológica descrita nesta toposeqüência é bastante homogênea e suas variações são essencialmente limitadas a sua espessura e a dos seus horizontes. O perfil de solo, assim como nas outras duas toposeqüências, é descrito como Nitossolo Vermelho bem diferenciado, embora seja mapeado como Latossolo Vermelho Distrófico (LVd) por Carvalho *et al.* (1990). Isto pode ser resultante da escala de mapeamento e demonstra como estas duas classes de solo estão associadas.

4.7 – O Problema da Erosão na Bacia do Taboão

No noroeste do Rio Grande do Sul, os solos espessos e férteis, o relevo suavemente ondulado e as condições climáticas adequadas aliados ao significativo aumento do preço da soja na Bolsa de Chicago que praticamente quadruplicou, propiciaram, a partir da década de 70, o rápido crescimento de lavouras mecanizadas de soja (Castro, 1996). À medida que ocorreu o desenvolvimento da agricultura intensiva, surgiram na bacia do Taboão, vários problemas de erosão resultantes da compactação do solo e da redução da capacidade de infiltração, evidenciados pelo surgimento de ravinas e voçorocas nos canais de concentração do escoamento superficial. Paralelamente, observou-se um significativo aumento da carga sólida nos rios, a aceleração da sedimentação nos reservatórios e a ocorrência de inundações mais severas (Castro *et al.*, 1993; Castro, 1996; Castro *et al.*, 1999).

Medidas foram adotadas pelos agricultores para evitar estes problemas e consistiram na construção de terraços nos locais onde a declividade era superior a 5%, na redução do número de operações necessárias para preparar o solo e na utilização de maquinário mais apropriado (Castro *et al.*, 1993).

No início da década de 90, a prática de cultivo convencional utilizado até então começa a ser substituída pelo plantio direto sem terraceamento por alguns agricultores, incentivados pela Federação Brasileira de Plantio Direto na Palha, por cooperativas agrícolas e por instituições de pesquisa, (Castro *et al.*, 1999). O plantio dito convencional consistia na aragem até 20 cm de profundidade seguido por duas passagens de grade niveladora. A cada cinco anos aproximadamente, uma subsolagem que atingia 35 a 40 cm de profundidade era realizada para descompactar o chamado “pé de arado”, camada adensada em torno de 20 cm

de profundidade resultante do tráfego intenso das máquinas agrícolas. Terraços eram construídos paralelamente às curvas de nível. Já no plantio direto, o plantio passou a ser feito por máquinas especiais diretamente sobre os resíduos da safra anterior, após secagem por agroquímicos.

Os efeitos da mudança da forma de cultivo em sub-bacias do Taboão são avaliados por Castro *et al.* (1999) que mostram que a nova prática resultou em um relativo decréscimo do escoamento superficial nas encostas e um incremento no fluxo subsuperficial, assim como uma significativa diminuição de perda de solo e de erosão, tanto laminar como linear, desde a escala de parcela até a de bacia. Embora desde 1994 não tenham surgido novos casos de erosão linear nas sub-bacias do Donato (1 km²) e Anfiteatro (12,5 ha), e o seu número tenha diminuído consideravelmente na bacia do Turcato (20 km²), o monitoramento da evolução da voçoroca situada na sub-bacia do arroio Donato mostra que partes da mesma continuam se estendendo. Possivelmente, isto deve-se à influência exercida por fortes eventos de chuva, como os que ocorreram em outubro e novembro de 1997. Nesta voçoroca, foram verificadas evidências de fluxo subsuperficial sob a forma de *pipings*, entre setembro de 1996 e dezembro de 1998, e foram medidas vazões entre 0,5 e 0,8 l/s, durante o evento de El Niño de 1997/98, e entre 0 e 0,2 l/s, nas condições pluviométricas normais.

As voçorocas e ravinas, resultantes da atividade antrópica na região, configuram uma rede freqüentemente conectada aos canais de drenagem (Mendiondo *et al.*, 1998). As voçorocas, quando situadas onde o substrato rochoso é subaflorante caracterizam-se por movimentos de massa devido aos seus taludes verticais e aos escoamentos subsuperficiais difuso e concentrado na forma de *pipings*. Anteriormente à introdução do plantio direto, o cultivo de duas safras anuais resultava no desenvolvimento de ravinas efêmeras nas cabeceiras dos canais de drenagem, que eram eliminadas pelas máquinas agrícolas no período que precedia o plantio da safra subsequente.

Os padrões espaciais das concentrações de fluxo na sub-bacia do arroio Turcato e as variações temporais das características destes caminhos preferenciais são apresentados por Mendiondo *et al.* (1998). Os autores identificaram que, nas cabeceiras dos cursos d'água com declividades superiores a 15%, o fluxo concentrado está relacionado principalmente às ravinas resultantes do cultivo do solo com aragem. Já nas áreas com declividades inferiores a 5%, o fluxo subsuperficial determina outro padrão de desenvolvimento de concentração de escoamento.

5 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados referentes à análise dos possíveis fatores condicionantes do fenômeno de erosão por voçorocas, serão apresentados e discutidos a seguir.

Inicialmente, as voçorocas foram identificadas na bacia do arroio Taboão e representadas em mapa na escala 1:25.000. Esta etapa, fundamental no desenvolvimento deste estudo, foi realizada visando espacializar as áreas onde devem ser reconhecidos os comportamentos das variáveis relacionadas à geologia, geomorfologia e solos, assim como, as regiões que irão compor as amostras referentes a duas situações (classes); as *áreas com erosão* e as *áreas sem erosão*.

As variáveis escolhidas para descrever o papel da geologia, da geomorfologia e dos solos no desenvolvimento da erosão por voçorocas foram, a seguir, caracterizadas para as etapas subseqüentes. A geologia foi analisada com base nas variações litológicas e nos lineamentos; a geomorfologia foi considerada a partir da declividade do terreno, das curvaturas das encostas no plano e no perfil, e da área de contribuição das voçorocas, e os solos foram considerados com base na sua distribuição espacial na área de estudo.

Uma vez conhecidas as localizações das voçorocas na área de estudo, assim como o comportamento das variáveis a serem analisadas, a etapa seguinte compreendeu a integração destas informações com o objetivo de identificar as relações existentes entre cada variável e as voçorocas, a relevância de cada variável no processo erosivo e o controle conjunto de todas as variáveis.

5.1 - Mapeamento das Voçorocas

A partir da análise de fotografias aéreas, de trabalhos de campo e de informações obtidas junto à população local, foram identificadas 92 feições resultantes da ação da erosão linear na bacia do arroio Taboão. Os dados obtidos nesta etapa do trabalho são apresentados no Anexo 1.

Dentre as feições erosivas mapeadas, nove são consideradas ravinas utilizando o critério de classificação que limita este tipo de feição erosiva até 0,5 m de largura e de profundidade (*Glossary of Soil Science Terms*, 1997).

O reduzido número de ravinas identificadas em relação ao total levantado é o resultado de um mapeamento cujo objetivo consistiu em identificar voçorocas. Por esta razão, não serão feitas considerações sobre as ravinas e comparações com relação às voçorocas. Assim, o mapa

gerado apresenta 83 voçorocas distribuídas por toda a bacia do Taboão, como mostra a Figura 5.1.

Dentre as voçorocas mapeadas, 45 encontram-se ativas, 28 estão estabilizadas e 10 já se encontram recuperadas. As Figuras 5.2 e 5.3 ilustram voçorocas ativas e estabilizadas identificadas na área de estudo.

A estabilização de um número significativo de voçorocas resultou da redução do escoamento superficial em decorrência da substituição da prática de cultivo convencional pelo plantio direto há cerca de 10 anos, conforme apresentado por Castro *et al.* (1999). A recuperação de voçorocas é uma realidade que também resulta da estabilização de várias feições erosivas que são conseqüências da substituição da prática de cultivo.

As voçorocas apresentaram dimensões muito variáveis, como pode ser observado na Tabela 5.1, onde são resumidas estas informações.

Tabela 5.1 – Dimensões das voçorocas na bacia do Taboão

Valor	Comprimento (m)	Largura (m)	Profundidade (m)	Área (m ²)
Mínimo	6,0	2,0	1,0	19,8
Máximo	910,0	60,0	15,0	54.600,0
Médio	136,7	10,8	3,6	2.051,7

Todas as dimensões máximas das voçorocas apresentadas na Tabela 5.1 estão relacionadas à voçoroca identificada pelo número 56, situada na porção centro-sul da bacia. Esta voçoroca apresenta inúmeras ramificações e segundo informações do capataz da fazenda onde a voçoroca está situada, esta possui mais de 100 anos de idade e não é resultante do desmatamento e do uso agrícola do solo, uma vez que a vegetação natural desta área são os campos. Embora não tenha sido possível confirmar esta informação, a ausência de relação entre o seu desenvolvimento e o uso do solo pelo homem pode sugerir que a mesma esteja associada ao crescimento da rede de drenagem.

As relações entre as profundidades, os comprimentos e as áreas das voçorocas e as áreas das suas bacias de contribuição são visualizadas nas Figuras 5.4, 5.5 e 5.6, nas quais se destaca a voçoroca nº 56 em função das suas grandes dimensões. Embora pouco nítida, pode-se observar uma pequena tendência de aumento das dimensões das voçorocas à medida que aumentam as suas áreas de contribuição.

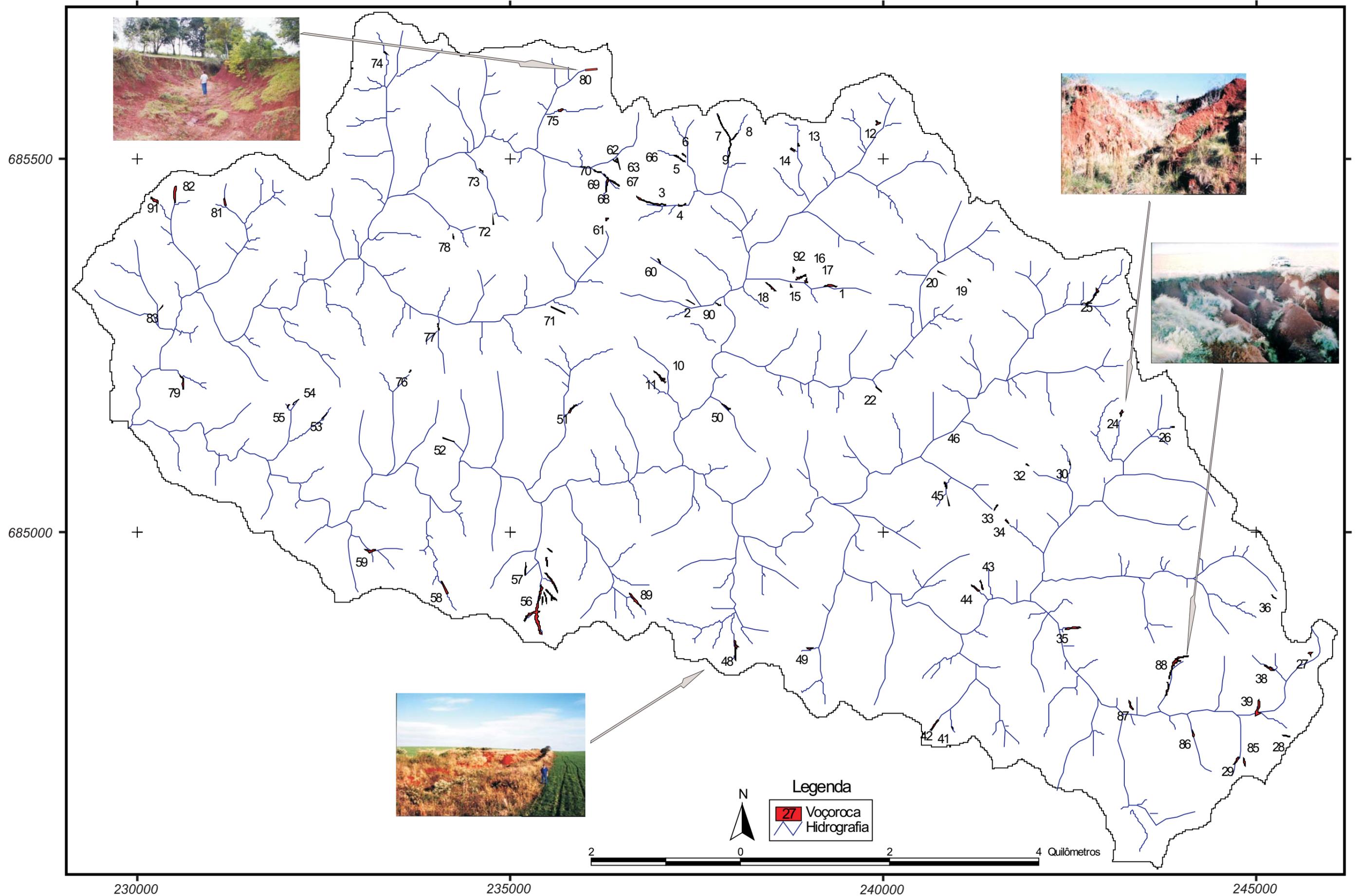


Figura 5.1 - Voçorocas na Bacia do Taboão



Figura 5.2 – Voçoroca ativa situada no extremo oeste da bacia, nº 79



Figura 5.3 – Voçoroca estabilizada situada no noroeste da bacia, nº 78

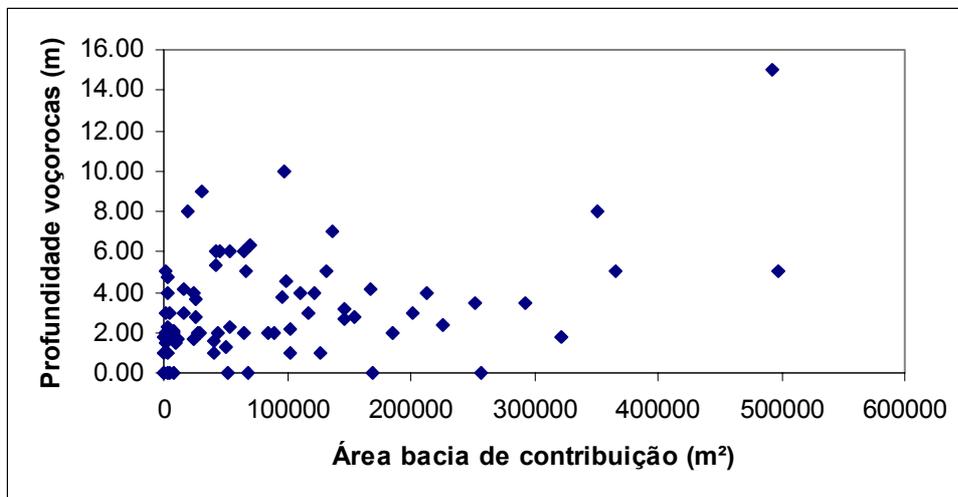


Figura 5.4 – Relação entre área da bacia de contribuição e profundidade das voçorocas

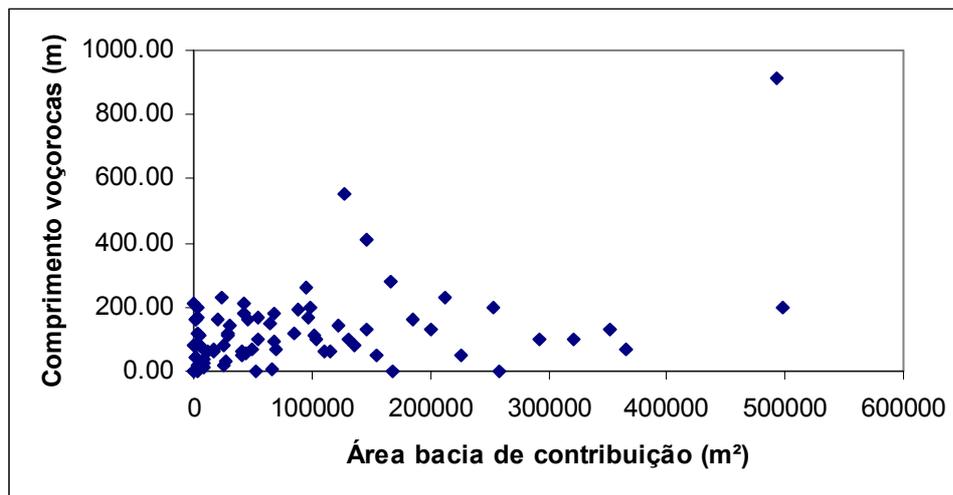


Figura 5.5 – Relação entre área da bacia de contribuição e comprimento das voçorocas

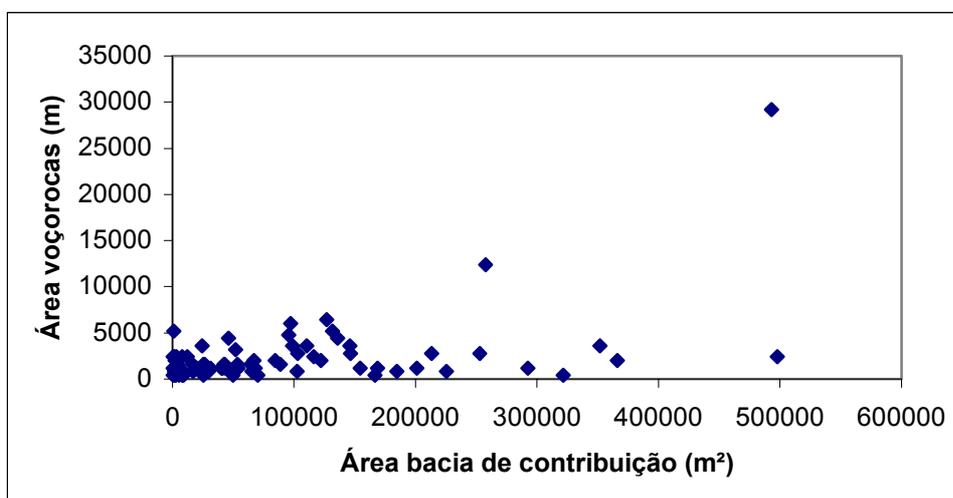


Figura 5.6 - Relação entre área da bacia de contribuição e área das voçorocas

Considerando que a área de contribuição possa estar intimamente relacionada com o comprimento da encosta, estas relações confirmam o que foi sugerido por Wischmeier e Smith (1978), segundo os quais a perda de solo por unidade de área geralmente aumenta substancialmente à medida que aumenta o comprimento da encosta.

Segundo Wischmeier e Smith (*op. cit.*), a correlação positiva existente entre perda de solo por unidade de área e o comprimento da encosta ocorre uma vez que a maior acumulação do escoamento superficial nas rampas mais longas aumenta a sua capacidade de desagregação e transporte de partículas. Coincidentemente, a voçoroca nº 56, que apresenta as maiores dimensões entre todas as voçorocas, desenvolve-se ao longo de uma das mais extensas vertentes da bacia do Taboão. Apesar disso, em função de sua cabeceira estar muito próxima do divisor de águas, a sua área de contribuição média não é proporcionalmente tão grande quanto às suas dimensões.

Com relação à forma da seção transversal, 32 voçorocas apresentam seção do canal erosivo com formato de “V” e 40 apresentam seção em forma de “U”. Entre as voçorocas com seção em “V”, 72% estão ativas e 28% estão estabilizadas. Já entre as voçorocas com seção em “U”, 45% estão estabilizadas e 55% estão ativas.

Considerando a situação das voçorocas em relação à rede de drenagem, observa-se que 18% das voçorocas estão ligadas a canais de drenagem e, portanto, conectadas à rede de drenagem, 78% das voçorocas estão situadas em talvegues, mas desconectadas à rede de drenagem, e somente 4% das voçorocas não apresentam qualquer relação com a rede de drenagem.

Neste estudo, estas relações entre as voçorocas e a rede de drenagem não foram suficientes para o seu enquadramento no modelo evolutivo para ravinas e voçorocas, baseado na localização destas incisões nas encostas e considerando a sua relação com canais de primeira ordem, proposto por Oliveira e Méis (1985) e Oliveira (1999). Isto não foi possível uma vez que, durante os trabalhos de campo, não foram observadas as variações de altura e a largura do canal erosivo, entre as seções de montante e de jusante necessárias para identificar o mecanismo de evolução das voçorocas.

A direção dos canais das voçorocas, isto é, a direção dos talvegues e dos canais de drenagem junto aos quais as voçorocas estão associadas, em 56,3% dos casos é noroeste (NO), em 25% é nordeste (NE), em 5% dos casos é norte-sul (N-S) e em 3,7% dos casos os canais das voçorocas estão orientados segundo a direção leste-oeste (E-O).

Os *pipes* são evidências da existência de erosão subsuperficial, embora sua ausência não descarte a possibilidade de ocorrência deste tipo de processo erosivo. Em 55% das voçorocas, não foram identificadas estas feições e, em 21% delas, não foi possível sua identificação, devido ao seu mascaramento pela vegetação ou porque as voçorocas já se encontram recuperadas. Entre as voçorocas em que foram identificados *pipings* (24% do total), estas feições encontram-se, na grande maioria dos casos, no horizonte C dos solos, onde normalmente o fluxo subsuperficial é mais evidente.

A declividade do terreno nos locais onde se situam as voçorocas formadas com contribuição do escoamento subsuperficial, o que é evidenciado pela presença de *pipings*, pode ser identificada tanto através dos dados medidos no campo, como a partir dos dados gerados do MNT. Os valores médios de declividade no interior das voçorocas gerados a partir das medidas tomadas a campo e a partir do MNT, são apresentados na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Declividade (%) nas voçorocas com *piping*

Valor	Declividade Campo	Declividade MNT
Mínimo	2,0	2,9
Máximo	14,0	11,7
Médio	5,6	7,5

Observa-se que tanto as declividades medidas como as obtidas a partir do MNT tendem a ser superiores ao valor de 5% apresentado por Mendiondo *et al.* (1998a), como limite máximo para a concentração de escoamento por fluxo subsuperficial na sub-bacia do arroio Turcato, que possui 20 km². Explicação para isto pode residir no surgimento de novos *pipes* em áreas mais declivosas, como resultado do aumento da infiltração verificado desde que o cultivo através do plantio direto foi introduzido na região e que hoje é verificado em toda a área de estudo.

Uma vez que as voçorocas são feições resultantes de erosão por fluxo concentrado, procurou-se identificar durante o trabalho de campo a existência de concentração do escoamento superficial.

Verificou-se que 39% dos casos apresentam concentração do escoamento superficial somente pelo fato das voçorocas estarem situadas em talvegues. A concentração do escoamento superficial, nestes casos, é natural e ocorre devido às formas convergentes das encostas no plano. Em 54% dos casos, a concentração do escoamento superficial também ocorre devido ao fato de as voçorocas estarem situadas em talvegues, assim como, devido à existência de estradas e/ou de cercas caracterizando limites de propriedades à montante das voçorocas. A concentração do fluxo laminar, nestes casos, é resultante das canalizações sob as estradas ou da existência de um caminho preferencial desprovido de vegetação. Em 7% das voçorocas, a concentração do escoamento superficial é promovida somente pela existência de cercas nas suas cabeceiras.

Entre as formas de concentração do escoamento superficial identificadas, não constam os canais de drenagem dos terraços existentes até o início da década de 90, quando ainda era usual na região a prática de plantio em terraços. Até esta época, este foi um dos principais responsáveis pela deflagração e aceleração da erosão linear de acordo com informações obtidas com os produtores rurais e registros na literatura (Castro *et al.*, 1993; Castro *et al.*, 1999; Mendiondo *et al.*, 1998a).

Não foi possível considerar esta informação devido à inexistência destes canais nos dias atuais ou de feições na superfície do terreno que indiquem a sua existência no passado e a dificuldade de obtenção desta informação com os produtores rurais para todas as voçorocas mapeadas.

Embora o uso do solo seja predominantemente agrícola na área de estudo, as voçorocas estão relacionadas a distintas formas de uso agrícola do solo. Assim, em 67,5% dos casos, o solo é cultivado através da prática do plantio direto; 23% dos casos ocorrem em áreas onde o solo é utilizado para a criação de gado, e em 9,5% dos casos, as voçorocas situam-se em áreas onde se desenvolvem campos.

As áreas descritas como campos estão relacionadas às voçorocas com maiores dimensões na bacia e, na sua grande maioria, não estão sendo usadas visando à estabilização das voçorocas, conforme informação dos proprietários. No entanto, não se pode descartar que, em alguns casos, estas áreas podem estar sendo utilizadas como pastagens.

Considerando-se que o plantio direto é uma prática de cultivo relativamente recente na região, praticada desde o início da década de 90, procurou-se identificar nas áreas onde as voçorocas estão instaladas o uso do solo anterior, através de informações com os produtores rurais. Em 83% dos casos, o solo era cultivado em terraços; em 14,5% dos casos, o solo era utilizado para a criação de gado e, em apenas 2% dos casos, as voçorocas se desenvolvem em áreas onde se desenvolviam campos.

A diminuição do percentual de áreas utilizadas para o cultivo e a elevação do percentual daquelas utilizadas para a criação de gado, foram observadas ao se comparar os dados de uso do solo no passado e no presente. Isto pode indicar uma tentativa de controlar o desenvolvimento das voçorocas ao ser identificada a forma de uso do solo responsável pela sua deflagração (agricultura), embora a criação de gado, através de caminhos preferenciais dos animais, também possa promover erosão linear.

Com relação à cobertura vegetal, 36,5% das voçorocas encontram-se inseridas na lavoura ou cobertas com palha gerada pela lavoura, 34% das voçorocas apresentam vegetação do tipo gramíneas, 21,5 % apresentam vegetação arbustiva e gramíneas e 8% apresentam vegetação arbustiva, gramíneas e mata. Entre estas últimas, foram identificadas pelo menos duas voçorocas situadas no interior de mata ciliar bastante densa. Este fato, aliado à informação de surgimento da voçoroca nº 56 anteriormente às práticas agrícolas na região e à falta de indícios de que tenha havido desmatamento no local onde ela se desenvolve, sugere a existência de um componente natural no desenvolvimento de voçorocas nesta área relacionado possivelmente à expansão da rede de drenagem.

5.2 –Comportamento da Geologia, Geomorfologia e Solos na Formação de Voçorocas

O papel da geologia, da geomorfologia e dos solos no desenvolvimento da erosão por voçorocas foi analisado a partir da identificação do comportamento de algumas variáveis no interior das voçorocas mapeadas. As variáveis escolhidas foram: litologia e lineamentos para representar a geologia, declividade do terreno, curvatura das encostas no plano, curvatura das encostas no perfil e área de contribuição das voçorocas, para descrever a geomorfologia, e distribuição espacial das unidades de mapeamento de solos na área de estudo.

5.2.1 –Geologia e Voçorocas

A análise da hipótese de um controle da geologia no desenvolvimento de voçorocas foi realizada, considerando a existência de variações litológicas e as evidências de controle estrutural no desenvolvimento da rede de drenagem na bacia do Taboão. Esta análise baseou-se na identificação dos tipos litológicos e dos lineamentos presentes na área de estudo.

O esboço geológico concebido para a bacia do Taboão fundamenta-se nas informações obtidas a partir da descrição dos afloramentos e das análises petrográficas apresentadas a seguir.

A ausência de um mapeamento geológico de detalhe e o limitado número de afloramentos, decorrente do espesso manto de intemperismo, dificultam o entendimento da geologia da região. No entanto, os poucos afloramentos de rocha encontrados na área de estudo, situados em antigas pedreiras de material de empréstimo e junto ao substrato de algumas voçorocas, indicam a existência de níveis sedimentares depositados entre derrames.

Entre as cotas 345 e 350 m, no extremo oeste da bacia, a voçoroca, identificada pelo nº 83, entalha um solo raso desenvolvido sobre um nível de rocha vulcânica vesicular. A presença de pequenos geodos preenchidos por sílica na superfície do terreno indica o topo de um derrame.

Na cota 360 m, a cerca de 1 km do ponto anterior, a ravina 84 se desenvolve à jusante de afloramento de rocha sob a forma de lajeado. Na sua superfície, diques de arenito, cor alaranjada, com até 5 cm de largura, são observados, cortando a rocha vulcânica, como mostra a Figura 5.7, indicando a base de derrame.

Entre 400 e 410 m, a voçoroca nº 10 se desenvolve em solo espesso, no centro da bacia. No horizonte B do perfil do solo, verificam-se grânulos centimétricos de quartzo e, junto ao assoalho da voçoroca, no horizonte C, identificam-se estruturas vesiculares, sugerindo tratar-se de topo ou base de derrame.

Distando 1 km ao norte deste local, foi realizado um perfil ao longo do canal da drenagem, em cuja cabeceira se instalou a voçoroca de nº 60, abrangendo um intervalo altimétrico de aproximadamente 10 m. Neste perfil, sedimentos sotopostos à rocha vulcânica bastante alterada, com esfoliação esferoidal, aflorante no assoalho da voçoroca na cota 423 m, indicam tratar-se da base de um derrame. A análise petrográfica das amostras coletadas descreve sedimentos vulcanogênicos caracterizados por arenitos com litoclastos de basalto e vidro vulcânico, clastos de quartzo e feldspato no intervalo areia média a areia muito fina, moderadamente a bem selecionados, esfericidade baixa a alta, com matriz argilosa. Intercalado entre os arenitos, ocorre nível de vidro vulcânico vesiculado, devitrificado e argilizado. Na base do perfil, a litologia identificada é um arcóseo com clastos de quartzo e feldspatos, angulares a subangulares, de esfericidade baixa, moderadamente selecionado, laminado milimetricamente e microgradado desde arenito fino a matriz de silte/argila sin-sedimentar, com presença de vesículas milimétricas.



Figura 5.7 – Diques de arenito cortando rocha vulcânica, ravina nº 84

No intervalo altimétrico entre 450 e 460 m, a identificação de estruturas de rocha vulcânica vesicular em solo residual na voçoroca nº 24, situada no nordeste da bacia, sugere condições de topo de derrame.

Próximo à cota 465 m, no extremo leste da bacia, a voçoroca nº 27 entalha solo com textura mais arenosa que a observada usualmente na área. O horizonte C do solo apresenta textura areia média à fina e estratificações cruzadas de pequeno porte, que alternam tons rosados e amarelados. O intenso grau de intemperismo impossibilitou a coleta de amostra e

caracterização petrográfica destes sedimentos. O fato de não terem sido identificados afloramentos de rocha vulcânica topograficamente acima destes sedimentos arenosos impede a caracterização dos mesmos como arenitos intertrápicos ou como sedimentos depositados após o fim do vulcanismo.

Estes sedimentos correspondem possivelmente aos que Carvalho *et al.*(1990) interpretaram como pertencendo à Formação Tupanciretã. Os autores citam a existência de arenitos conglomeráticos sobre as rochas vulcânicas nas partes mais elevadas da bacia. Deve-se salientar, no entanto, que a denominação litoestratigráfica dos sedimentos identificados não é relevante neste estudo, mas sim a natureza da litologia e as evidências de descontinuidade em subsuperfície.

As informações obtidas nos afloramentos descritos sugerem a existência de pelo menos três níveis de arenitos na bacia, nos intervalos altimétricos de 350 a 360 m, de 410 a 420 m e de 465 a 475 m representados na Figura 5.8. A partir da representação gráfica das litologias, verifica-se que os arenitos e os basaltos ocupam, respectivamente, 11,3 % e 88,7 % da superfície da bacia do Taboão.

Correlações entre afloramentos indicam que os dois níveis inferiores correspondem a arenitos depositados entre derrames de rochas vulcânicas. Faltam informações para caracterizar o nível arenoso superior como tal e mesmo como sedimento de cobertura.

Descontinuidades laterais dos depósitos sedimentares provocadas por efeitos de paleorelevo e mesmo por rejeitos de falha podem ser responsáveis pelas diferenças de cota entre os arenitos identificados na área de estudo e aqueles mapeados por Heeman (1997), no intervalo altimétrico de 380-400 m, a sudeste da bacia do Taboão, na região de Sobradinho-Salto do Jacuí.

Embora não se disponha de um controle adequado da ocorrência dos arenitos intertrápicos na área e se admita a possibilidade de ocorrerem descontinuidades laterais, considerando-se a relevância da análise destes níveis neste estudo, utiliza-se a hipótese de que os mesmos sejam sub-horizontais. Ressalta-se, no entanto, que um levantamento geológico de detalhe é necessário para verificar a validade desta hipótese e as conclusões advindas da sua utilização.

Os lineamentos foram considerados como um elemento da geologia que exerce, possivelmente, controle no desenvolvimento de erosão linear, uma vez que se observa na área de estudo um forte controle estrutural no desenvolvimento da rede de drenagem e que 96% das voçorocas estão conectadas à rede de drenagem e/ou aos talwegues.

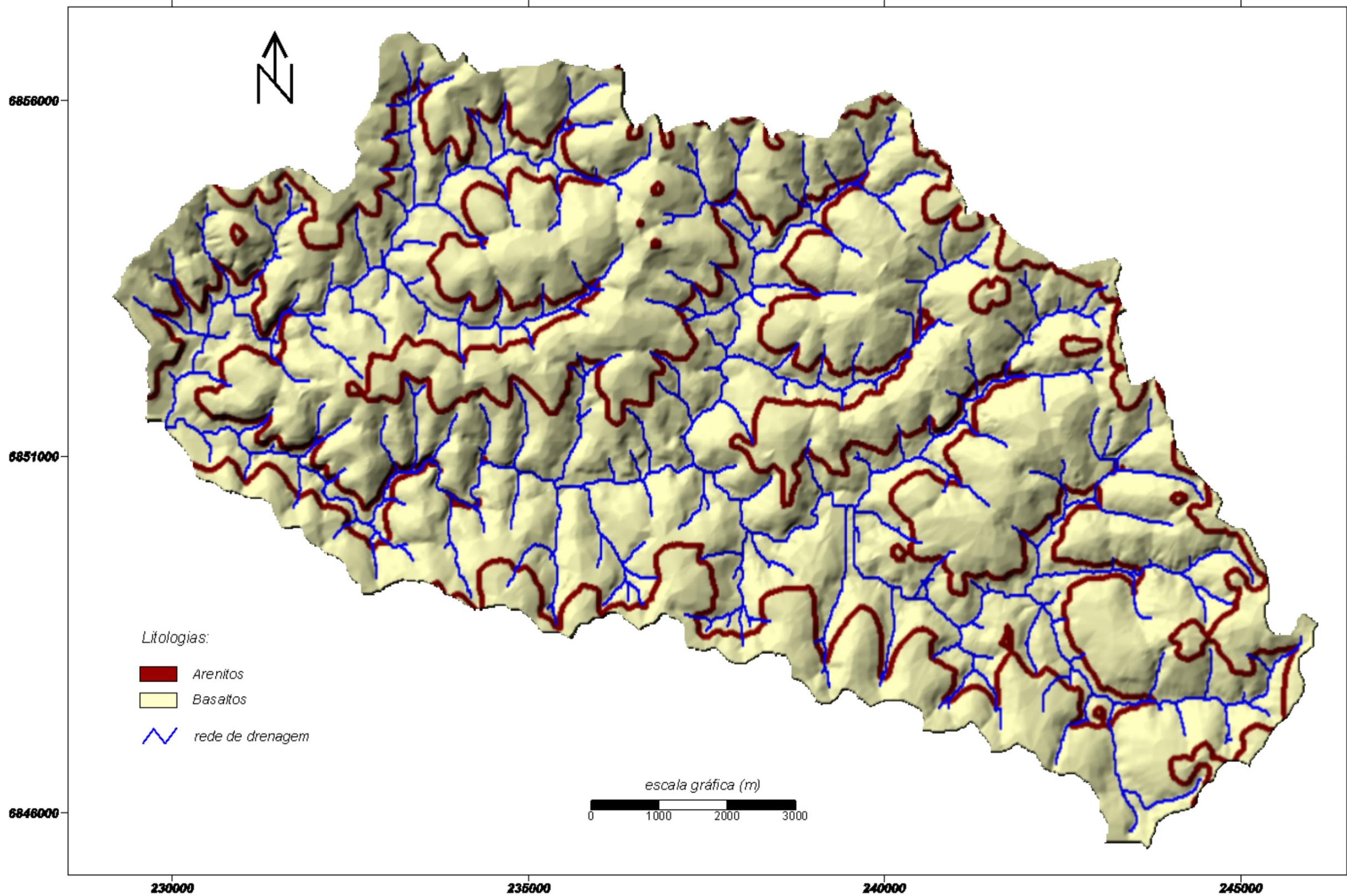


Figura 5.8 - Esboço Geológico da Bacia do Taboão

Considerando a baixa permeabilidade das rochas vulcânicas que predominam na bacia do Taboão, os lineamentos resultantes de falhamentos e fraturamentos representam zonas de aumento de porosidade e permeabilidade significativas para o acúmulo e movimentação de água subterrânea, que possibilitam a remoção de partículas do solo nos locais de afloramento (Erdélyi e Gálfi, 1988).

Isto foi observado na voçoroca nº 60, situada na sub-bacia do arroio Donato, após um período de chuvas. Este período úmido ocorreu em dezembro de 2003, quando foi registrado na estação meteorológica situada 500 m à montante da voçoroca, um total pluviométrico de 409 mm, dos quais 208,9 mm durante quatro dias. A infiltração da água da chuva no solo provocou a sua saturação e possibilitou a recarga das fraturas. Na metade do mês de janeiro, verificou-se que a umidade no solo já havia diminuído, porém mantendo parcialmente saturado o horizonte C do perfil de solo e observou-se a surgência de água nas fraturas existentes no basalto alterado no assoalho da voçoroca, como mostra a Figura 5.9.

O afloramento de água sob pressão causou a remoção e o transporte de material inconsolidado depositado no interior da voçoroca. Este mesmo quadro foi verificado inúmeras vezes após eventos de chuva de longa duração, especialmente no inverno, quando a evapotranspiração é baixa.

Observações das estruturas presentes na rocha aflorante no assoalho desta voçoroca, assim como as medições das atitudes destas estruturas, indicam a presença de fraturas com mergulho sub-vertical com quatro distintas direções. A principal estrutura identificada consiste em uma fratura com direção N 10 W, com abertura milimétrica, através da qual ocorria surgência de água. Esta estrutura é interceptada por outra fratura fechada, com direção N 70 E.



Figura 5.9 – Surgência de água em fratura com direção N 20 W, voçoroca nº 60

Distando poucos metros deste local, junto à cabeceira da voçoroca, mediu-se uma fratura com direção N-S, onde também havia surgência de água. No entanto, a maior abertura e o maior volume de água surgente foram verificados em fratura que se encontrava submersa. Esta estrutura apresenta abertura centimétrica e direção N 20 W, coincidente com a direção do talvegue e com o canal de drenagem que se desenvolve à jusante, sugerindo que é coerente a hipótese de controle por parte dos lineamentos no desenvolvimento das voçorocas.

Uma vez que não foram feitas observações semelhantes em outras voçorocas, não é possível chegar a qualquer conclusão sobre a relação entre as direções dos lineamentos e suas aberturas, que possibilitam o acúmulo e a movimentação de água. Contribui para isto o fato de que as direções NW das fraturas abertas estão associadas normalmente, no contexto da Bacia do Paraná, às estruturas fechadas (Zalán, *et al.*, 1990).

Os lineamentos existentes na área de estudo, como mostra a Figura 5.10, foram extraídos de fotografias aéreas nas escalas 1:60.000 e 1:110.000 datadas, respectivamente, de 1990 e 1968. A identificação da distribuição de direções dos lineamentos baseou-se no diagrama de roseta, conforme a Figura 5.11.

Os lineamentos apresentam as mais distintas direções na área de estudo, embora se observe uma relativa predominância de lineamentos no quadrante NW. Também é evidente uma frequência relativamente maior de lineamentos com direções N 30-45 E, N 20-40 W e E-W, das quais as duas primeiras coincidem com as direções de mais alta concentração de lineamentos identificados por Soares *et al.* (1982) *apud* Zalán *et al.* (1990).

Considerando a distribuição aparentemente homogênea nas direções dos lineamentos, foram definidas quatro classes de lineamentos na geração do mapa de lineamentos, com base nas suas direções e possibilidade de cruzamento de estruturas: lineamentos com direção NE, lineamentos com direção NW, lineamentos com direção EW e cruzamento de lineamentos.

As rochas sedimentares, assim como as estruturas geológicas, podem representar descontinuidades e zonas mais permeáveis do que as rochas vulcânicas que predominam na região. As estruturas, além de constituírem reservatórios de água, promovem a recarga dos sedimentos ao interceptá-los em subsuperfície. Através destas zonas mais permeáveis ocorrem infiltração e fluxo de águas superficiais e subsuperficiais. Nos afloramentos dos níveis arenosos, especialmente em situações de meia-encosta, originam-se nascentes. Estas, ao terem seu fluxo concentrado, potencializam o processo de erosão linear.

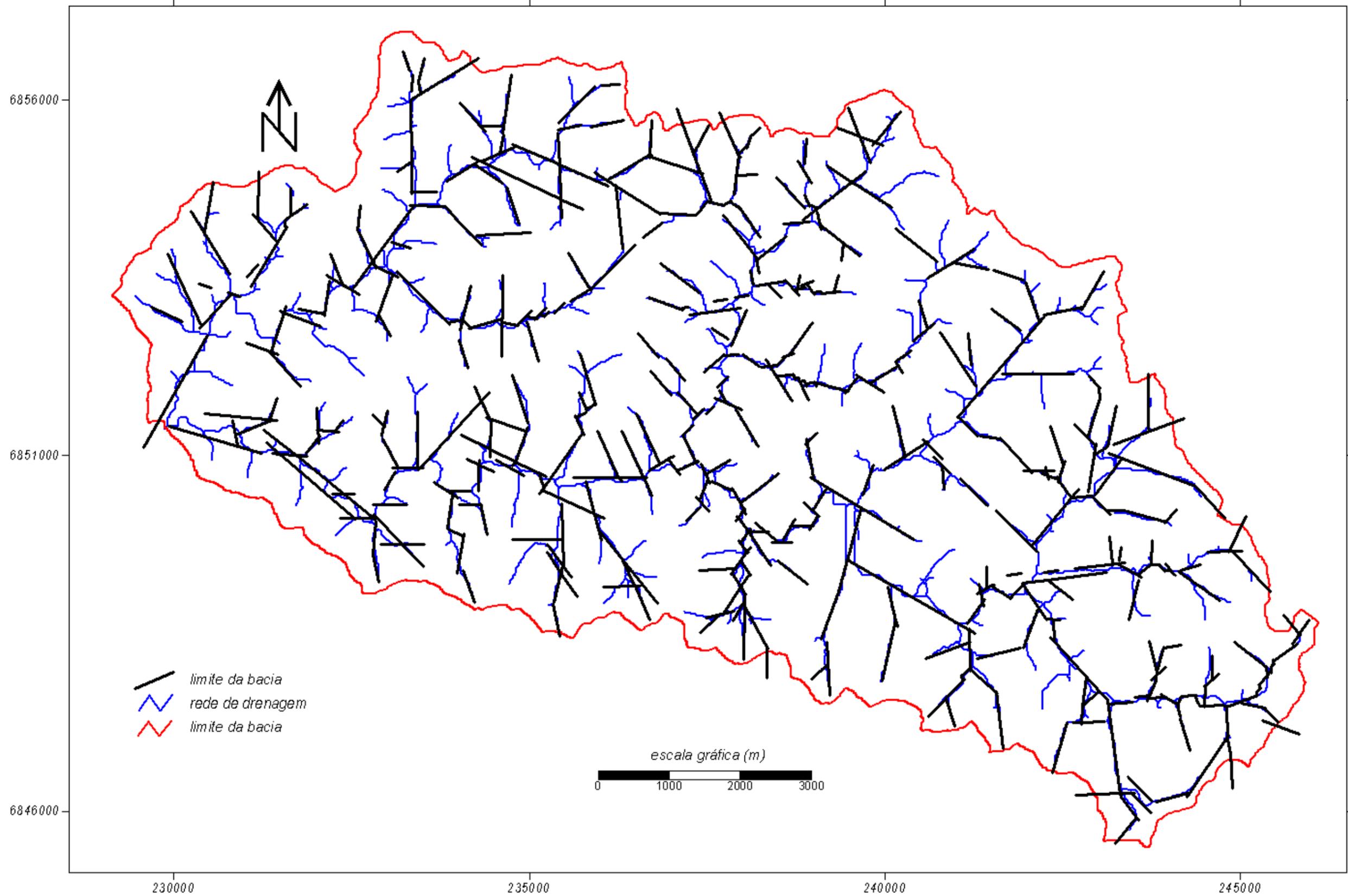


Figura 5.10 - Mapa de Lineamentos da Bacia do Taboão

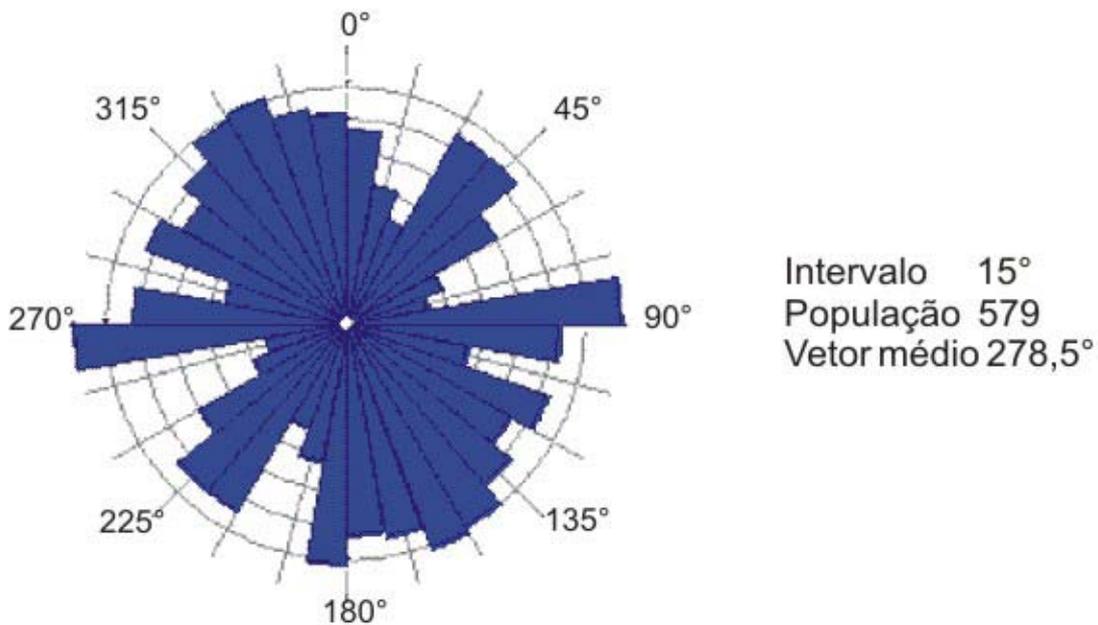


Figura 5.11 –Frequência dos lineamentos na bacia do Taboão

A importância dos níveis sedimentares e das estruturas na acumulação e transporte de água subterrânea é demonstrada por Freitas *et al.* (2000), ao definirem o comportamento como aquífero das rochas vulcânicas ácidas da bacia do Paraná, no oeste de Santa Catarina. Estas rochas, segundo os autores, constituem aquíferos heterogêneos e anisotrópicos com armazenamento e circulação de água restrita às discontinuidades, como mostra a Figura 5.12, onde são apresentadas as condições mais favoráveis para perfuração de poços tubulares.

Segundo o modelo de aquífero proposto pelos autores, os níveis de sedimentos vulcanogênicos depositados entre os derrames de lava são alimentados pelas fraturas que cortam o pacote rochoso, condicionando fluxos de água que afloram nas quebras de relevo sob a forma de fontes.

A hipótese de um possível controle da geologia no desenvolvimento de voçorocas fundamenta-se neste modelo que é aplicável à área de estudo em função dos contextos geológicos muito similares.

A integração dos Planos de Informação (PIs) com as voçorocas e com os intervalos altimétricos relacionados à ocorrência de arenitos, indica que 54% das voçorocas desenvolvem-se sobre estes intervalos ou imediatamente à jusante dos mesmos. Observa-se que, embora os arenitos favoreçam o desenvolvimento das voçorocas, considerando que ocorrem em somente 11,3 % da bacia do Taboão, a sua existência não é um fator determinante para a formação de erosão linear.

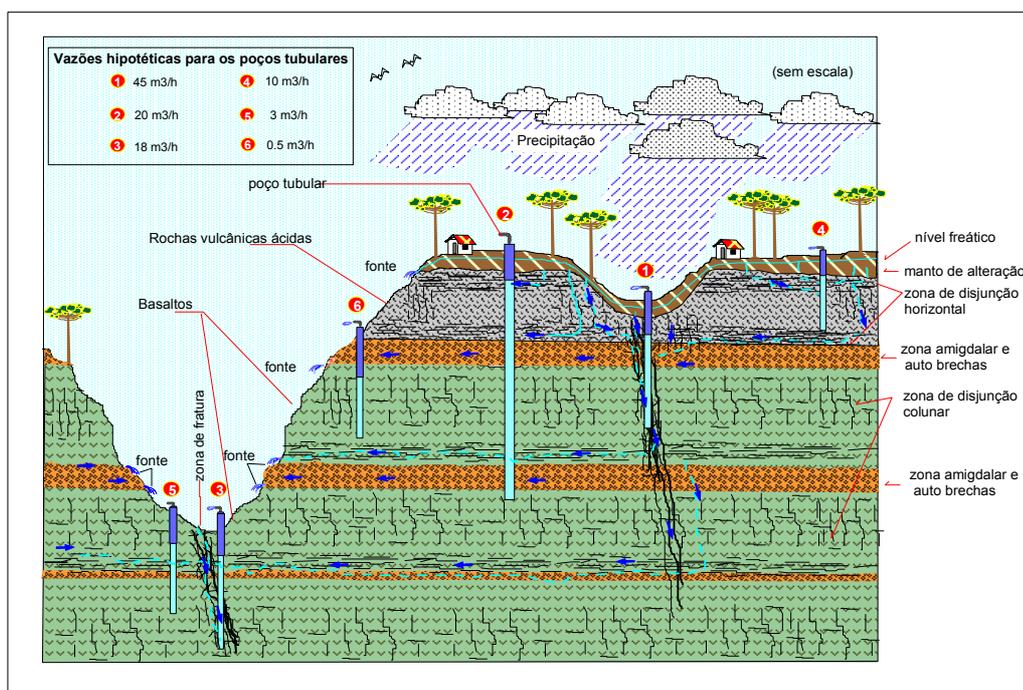


Figura 5.12 – Ilustração do Aquífero Serra Geral (Fonte: Freitas *et al.*, 2000)

O cruzamento entre os PIs, representando as voçorocas e os lineamentos, indica que 61% das voçorocas desenvolvem-se sobre lineamentos. Deste total, 51% das voçorocas ocorrem sobre lineamentos com direção NW, 23,5% sobre lineamentos NE, 21,5% sobre cruzamentos de pelo menos duas estruturas e 4% sobre lineamentos com direção E-W.

A relação entre as direções dos lineamentos e as voçorocas, obtida automaticamente pelo aplicativo de geoprocessamento, é muito similar à relação entre a direção dos canais de drenagem e dos talvegues e as voçorocas, obtida a partir das observações de campo e medidas da carta planialtimétrica.

Este resultado é semelhante ao obtido por Beavis (2000), que demonstrou uma significativa correlação entre a orientação das fraturas e falhas e a orientação das voçorocas, sugerindo fortemente que as estruturas presentes no substrato rochoso possuem uma forte influência tanto no desenvolvimento como na orientação das voçorocas. Adicionalmente, as observações do fluxo subsuperficial, através das estruturas geológicas e da remoção de partículas resultante deste fluxo, vêm ao encontro da hipótese levantada pelo referido autor, segundo a qual o fluxo subsuperficial é dominante no desenvolvimento das voçorocas.

5.2.2 – Geomorfologia e Voçorocas

A análise da hipótese de um controle da geomorfologia no desenvolvimento de voçorocas foi realizada considerando a declividade do terreno, as curvaturas das encostas no plano e no perfil, e a área de contribuição das voçorocas. A declividade também foi analisada nas bacias de contribuição das voçorocas, estimada a partir do MNT.

As voçorocas se desenvolvem em áreas com um amplo intervalo de valores de declividade, como pode ser observado na Tabela 5.3, onde se verifica que os valores médios das declividades mínimas e máximas são iguais, respectivamente, a 2,9 e 20,6%.

Tabela 5.3 – Declividade (%) nas voçorocas e nas bacias de contribuição

Valor	Voçorocas			Bacias de Contribuição		
	Mínimo	Máximo	Media	Mínimo	Máximo	Media
Mínimo	0,6	3,9	2,9	0,1	4,6	4,5
Máximo	18,4	37,8	20,6	11,9	37,8	16,1
Médio	6,3	11,9	9,0	2,9	16,2	8,3

Embora o valor médio das declividades nos locais onde as voçorocas se desenvolvem seja igual a 9%, 61% das voçorocas ocorrem em áreas com declividade superior à média da bacia, que é igual a 8%. A variabilidade na declividade é ainda maior nas bacias de contribuição das voçorocas, onde os valores médios das declividades mínimas e máximas são, respectivamente, menor e maior dos que nas voçorocas. Esta grande variabilidade resulta em um valor médio de declividade inferior ao observado nas voçorocas, embora seja um pouco superior à declividade média da bacia do Taboão.

A relação entre as voçorocas e a declividade média na área de estudo é muito distinta da observada por Oliveira *et al.* (1994) no médio vale do rio Paraíba do Sul. Enquanto no Taboão, 61% das voçorocas se situam em áreas com declividade superior à média da bacia, no vale do rio Paraíba do Sul somente 25% dos casos ocorrem em ambientes com declividade superior à média. Esta diferença é justificável se considerarmos que, naquela região, as voçorocas se desenvolvem sobre rampas de colúvio. Estas consistem em superfícies levemente inclinadas de origem sedimentar, com descontinuidades erosivas separando os vários estratos que as constituem, que podem ser determinantes nos mecanismos erosivos.

A área de contribuição da voçoroca foi obtida automaticamente pelo aplicativo de geoprocessamento. Esta variável também apresenta uma ampla gama de valores no interior das voçorocas, como mostra a Tabela 5.4.

Tabela 5.4 – Área de contribuição (m²) nas voçorocas

Valor	Área de Contribuição das Voçorocas		
	Mínimo	Máximo	Media
Mínimo	400,0	400,0	400,0
Máximo	423.200,0	1.343.600,0	449.200,0
Médio	28.005,0	109.373,0	61.683,0

Esta grande amplitude de valores sugere que as voçorocas ocorrem associadas a cursos d'água de distintas ordens.

A área total da bacia de contribuição da voçoroca tende a variar inversamente com a sua declividade média, como mostra a Figura 5.13. Isto é, quanto maior a declividade à montante de um certo ponto, menor é a área de contribuição necessária para desencadear o fenômeno de erosão por voçorocas. Esta relação está de acordo com o observado por Oliveira *et al.* (1994) no médio vale do rio Paraíba do Sul.

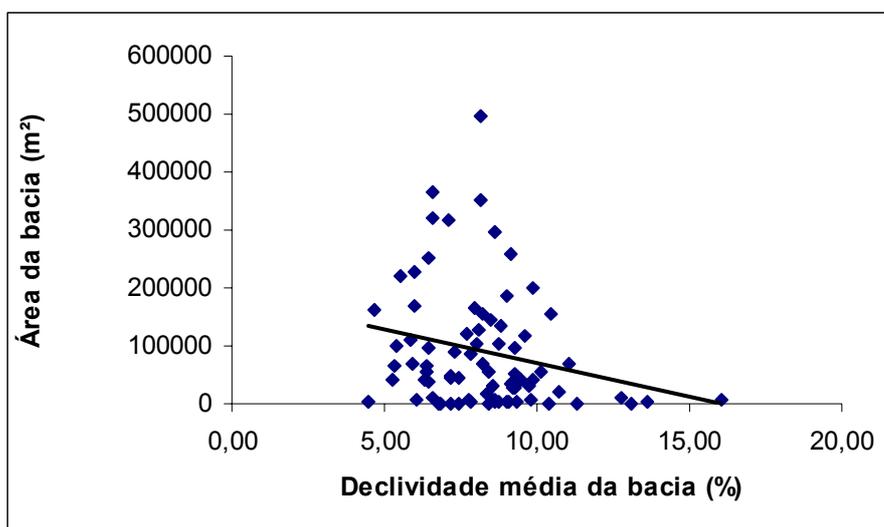


Figura 5.13 – Relação entre área e declividade média da bacia de contribuição

A relação entre a ocorrência de voçorocas e as curvaturas no plano e no perfil pode ser verificada na Tabela 5.5, onde são apresentadas as porcentagens das áreas das voçorocas

ocupadas pelas nove classes de forma das encostas, resultantes das combinações de curvatura no perfil e de curvatura no plano.

Tabela 5.5 – Formas das encostas nas voçorocas

Curvatura perfil – Curvatura Plano	Área das Voçorocas (%)
Côncava-convergente	32,4
Retilínea-convergente	20,3
Convexa-convergente	5,6
Côncava-retilínea	10,7
Retilínea-retilínea	18,6
Convexa-retilínea	1,9
Côncava-divergente	1,9
Retilínea-divergente	6,1
Convexa-divergente	2,5

Observa-se que, embora somente 5% da bacia do Taboão seja constituída por encostas com forma côncava-convergente, as voçorocas desenvolvem-se preferencialmente em encostas caracterizadas por estes elementos de forma.

Desta tabela, é possível calcular que 58,3% das superfícies ocupadas por voçorocas apresentam encostas convergentes em planta, 31,2 % apresentam-se retilíneas em planta e 10,5% apresentam curvatura divergente no plano.

A observação de que a maior parte das voçorocas situa-se em encostas com forma convergente no plano é coerente com a colocação de Summerfield (1991). Segundo o autor, a forma da encosta no plano possui um efeito significativo na erosão, uma vez que determina o caminho a ser percorrido pela água. Assim, em contornos convergentes, o fluxo laminar e subsuperficial é concentrado, e a erosão linear é mais efetiva, ao contrário das encostas com contorno divergente em planta, onde o fluxo laminar é disperso para jusante e a erosão é minimizada.

Com relação à curvatura no perfil, verifica-se que 45% das superfícies das voçorocas são côncavas, 45% são retilíneas e 10% são convexas.

As relações encontradas entre as curvaturas no perfil e no plano e a ocorrência das voçorocas são coerentes com o observado por Oliveira & Méis (1985), ao estudar os condicionantes e mecanismos de erosão por voçorocas na região do médio vale do rio Paraíba

do Sul. Os autores verificaram que as voçorocas concentram-se em ambiente de contorno e perfil côncavo, embora estes ambientes ocorram em 1/3 da área de estudo.

5.2.3 – Solos e Voçorocas

O controle exercido pelos solos no desenvolvimento de voçorocas na bacia do Taboão foi verificado a partir da identificação no interior das voçorocas das unidades de mapeamento de solos na área de estudo.

A Tabela 5.6 apresenta a área, em porcentagem, ocupada por cada classe de solo nas voçorocas e nas suas bacias de contribuição.

Tabela 5.6 – Solos nas voçorocas e nas suas bacias de contribuição

Classe de solo	Área das Voçorocas (%)	Área das Bacias Contribuição (%)
Latossolo Vermelho Distroférico (LVdf)	26,8	49,0
Latossolo Vermelho Distrófico (LVd)	36,1	38,4
Nitossolo Vermelho eutrófico (NVef)	35,4	12,31
Gleissolo Háptico (GX)	0,2	0,0
Neossolo Flúvico Tb Eutrófico (RUbe)	0,2	0,0
Neossolo Litólico Eutrófico (RLe)	1,3	0,19

Observa-se que as voçorocas se desenvolvem principalmente sobre as unidades de mapeamento LVd e NVef, embora estes tipos de solos não sejam os mais abundantes na bacia do Taboão, indicando que os mesmos são mais suscetíveis à erosão por voçorocas do que as demais classes.

Os valores de área das voçorocas ocupadas por estas duas classes de solo podem ser questionáveis, isto é, os NVef podem ser mais abundantes, considerando que Boulet *et al.* (1993) descrevem três toposequências, como NVef em áreas mapeadas por Carvalho *et al.* (1990) como LVd. No entanto, é indiscutível que os NVef são bastante suscetíveis à erosão por voçorocas, em função da elevada e crescente porosidade em direção à base do perfil que possibilita um maior escoamento subsuperficial (Boulet *et al.*, *op. cit.*), apesar da textura muito argilosa que confere maior resistência à erosão (Guerra, 1998). Também deve ser considerado o fato dos solos NVef desenvolverem-se preferencialmente junto aos talwegues e em áreas com declividade entre 8 e 15%, enquanto os LVd distribuem-se na maior parte das vezes fora dos talwegues e em áreas com 0 a 8% de declividade.

Os solos da unidade de mapeamento LVdf estão presentes em somente 27 % das voçorocas, embora predominem na bacia. Estes casos possivelmente relacionam-se a sub-classe fase de relevo ondulado, com declividade entre 8 e 15%.

Já praticamente metade das bacias de contribuição das voçorocas apresenta LVdf, o que está de acordo com o fato de estes solos ocorrerem em 40% da bacia do Taboão. Os LVd ocupam uma superfície igual a 38% das bacias de contribuição, significativa se for considerada sua frequência na bacia do Taboão, e os NVef estão presentes em 12%. Tanto nas voçorocas como nas bacias de contribuição, as demais classes de solo ocupam superfícies desprezíveis.

Conclusões Parciais

A identificação e análise do comportamento das variáveis que descrevem a geologia, a geomorfologia e os solos, no interior das voçorocas permitem que se chegue a algumas conclusões sobre o papel das mesmas no desenvolvimento da erosão por voçorocas.

A hipótese de um controle da geologia no desenvolvimento de voçorocas foi analisada, considerando a existência de variações litológicas e as evidências de controle estrutural no desenvolvimento da rede de drenagem na bacia do Taboão. A escolha destas variáveis reside no fato de que os níveis arenosos, identificados entre os derrames de rochas vulcânicas, e as estruturas geológicas podem representar discontinuidades e zonas mais permeáveis para percolação das águas superficiais e subsuperficiais, potencializando o processo de erosão linear.

A integração dos PIs, representando as voçorocas e os intervalos altimétricos relacionados à ocorrência de arenitos, indica que 54% das voçorocas desenvolvem-se sobre estes intervalos ou imediatamente à jusante dos mesmos.

A importância dos lineamentos e dos arenitos no fenômeno de erosão por voçorocas na bacia do Taboão é evidenciada pelo mecanismo de transporte de partículas resultante do acúmulo e da movimentação de água subterrânea ao longo dos lineamentos, observado inúmeras vezes na voçoroca nº 60, que está assentada em uma zona de contato entre a base de um derrame e um nível de arenito, na sub-bacia do arroio Donato.

A relação entre os lineamentos e as voçorocas fica mais evidente a partir do resultado do cruzamento entre os PIs, representando as voçorocas e os lineamentos, que indica que 61% das voçorocas desenvolvem-se sobre lineamentos. Deste total, 51% das voçorocas ocorrem sobre lineamentos com direção NW, 23,5% sobre lineamentos NE, 21,5% sobre cruzamentos de pelo menos duas estruturas e 4% sobre lineamentos com direção E-W.

A análise de um possível controle por parte da geomorfologia no desenvolvimento de voçorocas foi realizada, considerando a declividade do terreno, as curvaturas das encostas no plano e no perfil, e a área de contribuição das voçorocas.

A declividade apresenta uma ampla variação nos locais onde se desenvolvem voçorocas. Embora o valor médio das declividades seja igual a 9%, pouco superior à média da bacia que é igual a 8%, 61% das voçorocas ocorrem em áreas com declividade superior à média da bacia. A variabilidade na declividade é ainda maior nas bacias de contribuição das voçorocas e resulta em um valor médio de declividade igual a 8,3%, inferior ao observado nas voçorocas, embora seja um pouco superior à declividade média da bacia do Taboão.

A área de contribuição da voçoroca apresenta uma ampla gama de valores e um valor médio 61.683 m². A grande amplitude de valores que esta variável apresenta, sugere que as voçorocas ocorrem associadas a cursos d'água de distintas ordens.

As voçorocas desenvolvem-se preferencialmente em encostas com forma côncava-convergente, isto é, 32,4% das superfícies ocupadas pelas voçorocas, embora este modelado de relevo ocorra em somente 5% da bacia do Taboão.

Considerando a forma das encostas no plano, 58,3% das superfícies ocupadas por voçorocas apresentam encostas convergentes, 31,2 % apresentam-se retilíneas e 10,5% apresentam curvatura divergente. Este resultado mostra que, em contornos convergentes, o fluxo laminar é concentrado, e a erosão linear é mais efetiva (Summerfield, 1991).

A relação entre curvatura no perfil e voçorocas é menos expressiva. O percentual de encostas côncavas e retilíneas no interior das voçorocas é idêntico e é igual a 45%, enquanto que somente 10% das superfícies das voçorocas são convexas.

A área total da bacia de contribuição da voçoroca apresenta uma correlação negativa com a sua declividade média, isto é, quanto maior a declividade à montante de um certo ponto, menor é a área de contribuição necessária para desencadear o fenômeno de erosão por voçorocas.

A análise do papel dos solos no desenvolvimento das voçorocas demonstrou que as mesmas ocorrem preferencialmente sobre as unidades LVd e NVef. Estes solos ocupam, respectivamente, 36 e 35% das superfícies das voçorocas, embora cada uma destas classes esteja presente em 28% da área da bacia do Taboão.

As superfícies das voçorocas ocupadas por estas duas classes de solo necessitam ser revistas, uma vez que áreas mapeadas como LVd (Carvalho *et al.*, 1990) foram classificadas posteriormente como NVef (Boulet *et al.*, 1993). No entanto, é indiscutível a suscetibilidade à erosão apresentada pelos NVef, possivelmente decorrente da elevada e crescente porosidade

em direção à base do perfil que potencializa o fluxo subsuperficial (Boulet *et al.*, *op. cit.*), e da sua localização junto aos talwegues em declives entre 8 e 15%.

Nas áreas de contribuição das voçorocas, os solos da unidade de mapeamento LVdf estão presentes em metade dos casos, coerentemente com o fato de estes solos ocorrerem em 40% da bacia do Taboão. Os solos LVd também ocupam uma superfície significativa das bacias, se for considerada sua freqüência na área de estudo, e os NVef são menos expressivos.

5.3 – Controle da Geologia, Geomorfologia e Solos na Erosão por Voçorocas

Com o objetivo de identificar o controle exercido pelas variáveis que caracterizam a geologia, a geomorfologia e os solos, os Planos de Informação (PIs) que as representam, foram integrados através do método bayesiano de inferência espacial (Eastman, 1999).

O procedimento de integração dos PIs foi realizado em duas etapas distintas visando, em um primeiro momento, identificar a relevância de cada variável no desenvolvimento de voçorocas, relativamente às outras variáveis e, em uma etapa seguinte, identificar o controle conjunto das variáveis que demonstraram, na primeira etapa, explicar melhor o fenômeno de erosão por voçorocas.

A identificação do controle conjunto exercido por estas variáveis é possível através de um zoneamento de risco potencial de erosão na bacia do Taboão. A partir deste zoneamento, é possível a identificação do comportamento de cada variável que favorece a ocorrência das voçorocas e a identificação dos locais mais suscetíveis à este tipo de erosão, o que permite a adoção de medidas preventivas onde ainda não foram deflagrados processos erosivos.

Para as integrações de dados, inicialmente, foram definidas amostras que melhor representam as áreas que sofrem erosão e aquelas que estão mais imunes aos processos erosivos.

5.3.1 – Definição das Amostras para Integração de Dados

A identificação da área cujas características determinam a ocorrência das voçorocas necessárias para compor a classe *área potencial para ocorrência de voçorocas*, resultou de testes com quatro amostras: polígonos das voçorocas, áreas à jusante, áreas à montante e bacia de contribuição das voçorocas. Para a classe *área com baixo potencial para ocorrência de voçoroca*, foram utilizadas como amostras, áreas situadas em bacias de contribuição onde não foram verificadas feições de erosão linear nas fotografias aéreas, o que foi confirmado no campo.

Cada uma das quatro imagens resultantes das integrações de dados foi cruzada com o PI binário que representa as voçorocas e com o PI binário que representa a área de estudo sem voçorocas.

A escolha da amostra que melhor representa as áreas com erosão, baseou-se nos dados extraídos dos histogramas destas imagens. Estes dados são resumidos em termos percentuais na Tabela 5.7, considerando o número total de células das voçorocas mapeadas no campo e a área da bacia sem estas voçorocas. Também são apresentadas as frequências das células que não são classificadas durante o procedimento de integração de dados, pelo aplicativo de geoprocessamento.

Tabela 5.7 – Resultados dos histogramas gerados pelo teste das amostras (%)

Amostra	Voçorocas			Bacia sem Voçorocas		
	Erosão	Sem Erosão	Não Classificado	Erosão	Sem Erosão	Não Classificado
Polígono voçorocas	63,4	23,8	12,8	24,6	35,7	39,7
Área Jusante Voçoroca	50,4	23,8	25,7	19,5	35,7	44,8
Área Montante Voçoroca	52,5	23,8	23,6	23,4	35,7	40,9
Bacia de Contribuição das Voçorocas	23,6	23,8	52,5	21,7	35,5	42,8

Analisando-se os resultados da integração de dados no interior das voçorocas, observa-se que o maior número de células classificadas como *erosão*, ou seja, 63,4% das células que representam as voçorocas mapeadas são obtidas quando se utiliza a amostra polígono das voçorocas. Uma vez que o percentual de células classificadas como *sem erosão* não varia em função da amostra, o resultado acima reflete a eficiência da classificação, já que a amostra polígono das voçorocas apresenta o menor número de células sem classificação.

Considerando a área da bacia sem voçorocas, a classificação de áreas *sem erosão* com cada uma das amostras apresenta resultados muito próximos. Na classificação de áreas com *erosão*, o menor número de células classificadas é obtido quando se utiliza a amostra área à jusante da voçoroca. Novamente, quando se utiliza a amostra polígono das voçorocas é obtido o menor número de células sem classificação.

Uma vez que o ganho em informação, ao utilizar-se a amostra composta por alguns polígonos de voçorocas na classificação de áreas com potencial para erosão é muito maior do que utilizando as outras amostras, e que o ganho em informação, obtido na classificação de

áreas *sem erosão* com a amostra áreas à jusante não é tão significativo, optou-se por utilizar a amostra polígono das voçorocas nas integrações de dados subseqüentes.

5.3.2 – Relevância de cada Variável na Erosão por Voçorocas

A identificação da relevância de cada variável, que caracteriza a geologia, a geomorfologia e os solos no desenvolvimento das voçorocas, foi possível ao proceder-se a integração dos dados repetidamente, retirando-se em cada tentativa um dos sete PIs que representam as variáveis em consideração.

As sete imagens resultantes destas integrações foram cruzadas individualmente com o PI binário que representa as voçorocas e com o PI binário que representa a área de estudo sem voçorocas. A partir dos histogramas destas imagens, foi possível a obtenção dos resultados das integrações de dados no interior das voçorocas e na área da bacia sem voçorocas e, com isso, a identificação dos melhores resultados.

Os dados apresentados nos histogramas das imagens são resumidos na Tabela 5.8, em termos percentuais, facilitando o entendimento da importância de cada tema no desenvolvimento das voçorocas.

Tabela 5.8 – Relevância de cada variável no desenvolvimento das voçorocas

Variável Não Integrada	Voçorocas			Bacia sem Voçorocas		
	Erosão	Sem Erosão	Não Classificado	Erosão	Sem Erosão	Não Classificado
Declividade	56,7	27,6	15,7	24,2	37,3	38,4
Curvatura no Perfil	57,5	27,2	15,3	23,9	36,6	39,5
Curvatura no Plano	57,7	24,7	17,6	24,1	36,6	39,3
Área de contribuição	68,4	21,8	9,8	25,7	35,7	38,6
Litologia	60,5	23,4	16,1	22,2	36,4	41,4
Lineamentos	54,2	30,1	15,7	26,2	36,3	37,5
Solos	47,9	36,0	16,1	6,0	84,7	9,2

Nas células relativas às voçorocas mapeadas no campo, a porcentagem de células, com probabilidade superior a 50% de ser voçorocas, varia de 47,9%, quando se deixa de integrar o PI que representa os solos, até 68,4%, quando não se integra o PI que representa a área de contribuição. Já na área da bacia do Taboão, onde não foram identificadas voçorocas, a porcentagem de células, com probabilidade superior a 50% de não ser voçorocas, varia de 35,7%, quando não se integra o PI que representa a área de contribuição, até 84,7%, quando

os solos não são considerados na integração. Assim, observa-se que os solos e a área de contribuição são as variáveis que geram resultados mais consistentes.

Este resultado é significativo tanto na classificação das áreas como *erosão* como *sem erosão*. A não utilização dos solos na integração de dados gera um efeito positivo na classificação das áreas *sem erosão* quando se analisa o resultado em relação à área da bacia do Taboão que não apresenta voçorocas. A porcentagem de células não classificadas também é a menor. Assim, estes resultados representam a melhor aproximação da realidade.

No entanto, quando se analisa o resultado dentro dos polígonos das voçorocas, observa-se que não considerar os solos no processo de integração gera um efeito negativo. Isto é, obtém-se o menor número de células classificadas como *erosão*, indicando o forte controle exercido por esta variável no desenvolvimento das voçorocas. A importância da variável solos possivelmente está relacionada à estreita relação entre as voçorocas e os solos das unidades NVef e LVd.

Embora seja muito desejável a obtenção de um resultado tão coerente na classificação das áreas *sem erosão*, não se pode deixar de considerar o prejuízo que é ocasionado na classificação das áreas com *erosão* se esta variável não for considerada.

A área de contribuição, contrariamente, ao deixar de ser considerada, gera um efeito positivo na classificação das áreas com *erosão*. Isto indica, entre as variáveis consideradas, o menor controle no processo erosivo. A menor relevância desta variável entre as demais pode ser consequência da sua grande amplitude de valores associados às voçorocas. Por outro lado, este resultado pode indicar uma deficiência da metodologia utilizada que não demonstra a verdadeira relevância da área de contribuição no fenômeno erosivo. O procedimento de integração, sem esta variável, também gera o menor número de células sem classificação no interior das voçorocas. Já o resultado da integração em relação à área da bacia sem voçoroca não é muito diferente dos demais.

A variável lineamentos também mostra um efeito bem marcante no processo de erosão, já que, ao deixar de ser considerada, dá origem a um resultado que só não é inferior ao gerado quando os solos não são integrados.

Analisando-se os resultados nos polígonos das voçorocas, as demais variáveis demonstram explicar menos o fenômeno de erosão por voçorocas.

Quando analisados os resultados na área da bacia que não apresenta voçorocas, verifica-se que, com exceção daquele apresentado pelo procedimento sem a variável solos, não existem diferenças significativas. Assim, as diferenças mais marcantes, que demonstram a importância relativa das variáveis representadas nos PIs no desenvolvimento das voçorocas,

são observadas na análise dos resultados dentro das células que representam as voçorocas existentes na bacia.

As variáveis declividade, curvatura das encostas no perfil, curvatura das encostas no plano e litologia, apresentam uma influência decrescente no fenômeno erosivo.

Procedeu-se a integração de dados sem os solos e área de contribuição, visando testar o efeito combinado destas variáveis que, ao não serem integradas junto às demais, melhoram os resultados nas áreas *sem erosão* e nas áreas com *erosão*, respectivamente. O resultado da integração simultânea dos PIs lineamentos, declividade, curvaturas no perfil e no plano, e litologia, é apresentado na Tabela 5.9.

Tabela 5.9 – Comparação de resultados das integrações

Integração	Voçorocas			Bacia sem Voçorocas		
	Erosão	Sem Erosão	Não Classificado	Erosão	Sem Erosão	Não Classificado
Todos PIs	60,7	25,3	14,0	29,5	36,2	34,3
Sem Área de contribuição	68,4	21,8	9,8	35,7	25,7	38,6
Sem Solos	47,9	36,0	16,1	6,0	84,7	9,2
Sem Solos e Área de contribuição	63,6	28,0	8,4	14,0	80,8	5,1

Observa-se que a integração dos dados sem os PIs que representam as variáveis solos e área de contribuição reproduz, em menor escala, os efeitos positivos gerados pelas integrações sem estes PIs, realizadas distintamente. Este resultado também é superior ao obtido com a integração de todas as variáveis.

Na classificação das áreas *sem erosão* obtém-se um resultado mais próximo da realidade verificada na área da bacia sem voçorocas. Este resultado é melhor do que o obtido a partir da integração de todos os PIs, embora não tão bom como o resultante da integração sem o PI solos.

Da mesma forma, ao analisar-se as áreas das voçorocas, observa-se um maior número de células classificadas como *erosão* do que na classificação com os sete PIs, embora não tão grande como na integração sem a variável área de contribuição.

5.3.3 – Zoneamento de Risco Potencial à Erosão por Voçorocas

Com o intuito de identificar o controle conjunto de todas as variáveis e gerar um zoneamento de risco potencial de erosão por voçorocas, procedeu-se novamente a integração simultânea dos PIs representando a declividade, as curvaturas no plano e no perfil, a litologia e os lineamentos, utilizando intervalos de probabilidade de ocorrência da classe *área potencial para ocorrência de voçoroca* para determinar os níveis de potencial erosivo.

O zoneamento de risco potencial de erosão por voçorocas na bacia do Taboão é apresentado na Figura 5.14.

A superfície ocupada pelas diferentes classes de risco consideradas neste zoneamento de risco de erosão por voçorocas na bacia do arroio Taboão pode ser verificada na Tabela 5.10.

Tabela 5.10 – Risco potencial de erosão na bacia do Taboão

Risco potencial	Área da bacia (%)
Muito baixo	78
Baixo	5
Moderado	5
Alto	5
Muito Alto	7

A maior parte da bacia apresenta risco potencial de erosão muito baixo e somente 12% da sua área apresenta características que conferem risco alto e muito alto à erosão por voçorocas. Isto significa, em outras palavras, que em somente 12% da área da bacia as variáveis declividade, curvatura das encostas no perfil e no plano, litologia e lineamentos, apresentam comportamentos associados que conferem ao terreno probabilidade superior a 70% de apresentar voçorocas.

5.3.3.1 – Caracterização das Classes de Risco Potencial à Erosão por Voçorocas

As cinco classes de risco potencial de erosão por voçorocas foram caracterizadas com base nas variáveis relacionadas à geologia, geomorfologia e solos, consideradas neste estudo. Embora esta análise pudesse ser realizada analisando o comportamento de todas as variáveis por classe, optou-se por realizar a análise por variável.

A Tabela 5.11 apresenta a relação entre o risco de erosão por voçorocas e declividade média e área de contribuição.

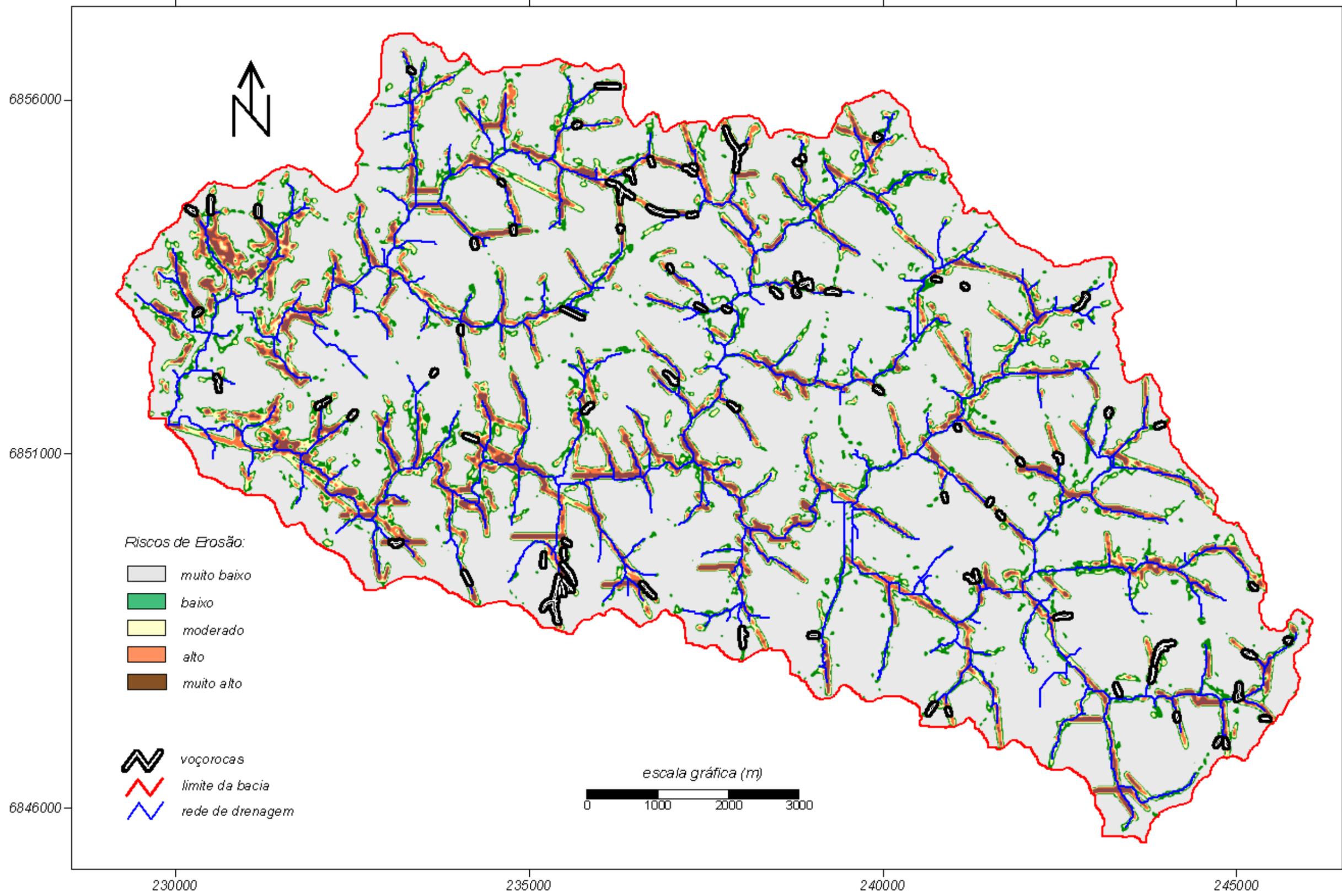


Figura 5.14 - Risco de erosão por voçorocas na Bacia do Taboão

O risco de erosão tende a elevar-se à medida que aumenta a declividade média do terreno, embora o valor de declividade médio encontrado nas áreas com baixo risco de erosão não siga esta tendência.

Tabela 5.11 - Declividade e área de contribuição nas classes de risco de erosão

Risco	Declividade (%)	Área de contribuição (m ²)
Muito Baixo	7,6	66.680
Baixo	10,3	475.000
Moderado	8,7	649.600
Alto	9,8	846.680
Muito Alto	10,9	1.305.280

Esta relação proporcional é mais evidente entre a variável área de contribuição e o risco de erosão. Os valores médios calculados nas diferentes classes mostram claramente que as porções da bacia mais suscetíveis à erosão apresentam áreas de contribuição maiores.

As curvaturas das encostas no plano e no perfil não apresentam uma relação muito clara com o zoneamento de risco de erosão por voçorocas, como mostra a Tabela 5.12.

Tabela 5.12 – Frequência das curvaturas no plano e no perfil nas classes de risco de erosão

Risco	Curvatura no Perfil			Curvatura no Plano		
	Côncava	Retilínea	Convexa	Convergente	Retilínea	Divergente
Muito Baixo	2,1	85,4	12,5	6,0	78,7	15,3
Baixo	47,8	40,4	11,8	42,7	46,8	10,5
Moderado	56,5	36,1	7,4	42,7	47,8	9,5
Alto	29,2	57,3	13,5	35,7	45,0	19,3
Muito Alto	54,2	32,8	13,0	34,7	43,5	21,8

Como predomina na área da bacia a classe muito baixo risco de erosão, é natural que as formas de encostas predominantes na bacia sejam as mesmas que predominam nesta classe. Embora as encostas retilíneas no perfil e no plano predominem nesta classe, os percentuais são superiores aos verificados na bacia do Taboão onde cerca de 76 e 72% das encostas são retilíneas, respectivamente, no perfil e no plano.

Enquanto os percentuais de encostas convexas no perfil são aproximadamente constantes em todas as classes de risco, as formas côncavas e retilíneas variam muito e de forma irregular de classe para classe. Apesar disso, as encostas côncavas mostram uma tendência de aumento à medida que aumenta o risco de erosão, variando de um percentual

mínimo de 2,1% nas áreas com muito baixo risco de erosão até atingir cerca de 54% da área ocupada pela classe muito alto risco. Já as encostas retilíneas tendem a ser menos freqüentes à medida que aumenta o risco de erosão, variando de 85% na classe muito baixo risco até cerca de 33% na classe muito alto risco de erosão.

As encostas divergentes mostram, inicialmente, uma diminuição do percentual à medida que aumenta o risco de erosão. A partir da classe de risco moderado, são mais freqüentes à medida que aumento o risco de erosão. As formas convergentes no plano não mostram uma relação clara, apresentando a partir da classe moderado risco, um decréscimo dos percentuais até atingir 34,7% das áreas relativas à classe muito alto risco de erosão. As formas retilíneas mostram uma correlação negativa com o risco de erosão.

A Tabela 5.13 apresenta a relação entre o risco de erosão por voçorocas e as variáveis relacionadas à geologia. No caso da variável litologia, evidencia-se a freqüência dos níveis de arenito nas classes de risco de erosão, enquanto a análise dos lineamentos considera, inicialmente, a presença ou não dos mesmos nas áreas relativas a cada classe.

Tabela 5.13 – Relação entre risco de erosão por voçorocas e litologia e lineamentos (%)

Risco	Arenito		Lineamentos	
	Ausente	Presente	Ausente	Presente
Muito Baixo	89,8	10,2	96,8	3,2
Baixo	83,9	16,1	85,6	14,4
Moderado	86,8	13,2	54,3	45,7
Alto	86,4	13,6	29,4	70,6
Muito Alto	83,3	16,7	18,2	81,8

A presença de arenitos apresenta uma relação proporcional com o risco potencial de erosão por voçorocas. Os percentuais de área sobre estas zonas, apesar de pequenos, tendem a aumentar com o crescimento do risco de erosão, embora, na classe baixo risco, o percentual de áreas com arenito seja maior do que na classe risco moderado. Considerando o fato de que estas litologias são muito menos freqüentes na bacia do Taboão do que as rochas vulcânicas, esta tendência pode ser muito significativa no processo erosivo.

Esta relação é muito mais evidente ao se considerar os lineamentos. Cerca de 82% das áreas com muito alto risco de erosão estão relacionadas aos lineamentos enquanto que os mesmos ocorrem em somente 3% das áreas com muito baixo risco. Considerando a estreita relação entre as classes de risco alto e muito alto e a presença de lineamentos, a Tabela 5.14 detalha esta relação abordando a direção dos lineamentos.

Os lineamentos com direção NE predominam nas classes muito baixo e baixo risco de erosão e, à medida que aumenta o risco, diminuem significativamente. Já os lineamentos com direção NO são mais freqüentes com o aumento do risco de erosão e predominam nas classes alto e muito alto risco de erosão, embora mostrem uma pequena redução nesta última classe.

As tendências de aumento e decréscimo da presença de lineamentos com direção NW e NE, respectivamente, com o aumento do risco de erosão, demonstram claramente o controle desta direção de lineamentos no desenvolvimento de voçorocas, embora os lineamentos com direção NW predominem na bacia do Taboão.

Tabela 5.14 - Relação entre risco de erosão por voçorocas e as direções dos lineamentos (%)

Risco	Lineamentos			
	NE	NW	E-W	cruzamento
Muito Baixo	92,0	5,3	1,2	1,5
Baixo	91,3	7,9	0,4	0,4
Moderado	46,9	52,9	0,1	0,1
Alto	20,4	79,5	0,0	0,1
Muito Alto	7,5	58,6	16,5	17,4

A relação entre o risco de erosão por voçorocas e os solos na bacia do Taboão é apresentada na Tabela 5.15, onde são observadas as freqüências das classes de solos nas distintas classes de risco de erosão.

Tabela 5.15 – Relação entre risco de erosão por voçorocas e solos (%)

Risco	LVdf	LVd	NVef	GX	RUbe	RLe
Muito Baixo	43,8	32,5	20,9	0,9	1,4	0,5
Baixo	32,4	16,3	45,4	2,0	2,8	1,1
Moderado	27,0	14,7	50,1	2,9	4,0	1,3
Alto	24,8	13,1	54,5	2,1	3,7	1,8
Muito Alto	19,7	10,4	61,9	1,7	3,9	2,3

É marcante a relação proporcional entre os solos da unidade de mapeamento NVef e o risco de erosão, evidenciada pelo aumento do risco potencial de erosão à medida que aumenta consideravelmente a superfície ocupada por estes solos. Este comportamento reforça a relação identificada na análise entre os solos e a ocorrência de voçorocas na bacia, onde é evidente a maior suscetibilidade à erosão por voçorocas dos NVef e dos LVd, embora cada uma das unidades ocorra em somente 28% da superfície da bacia do Taboão.

A maior suscetibilidade à erosão apresentada pelos solos N_{Vef} resulta possivelmente da sua localização junto aos talvegues em declives entre 8 e 15 % e da sua porosidade intermicroagregados e tubular, elevada e crescente em direção à base do perfil (Boulet *et al.*, 1993), que favorece o fluxo subsuperficial, embora estes solos apresentem uma textura argilosa homogênea em todo o perfil que, teoricamente, confere maior resistência à erosão (Guerra, 1998).

A frequência dos solos das unidades de mapeamento LV_d e LV_{df}, contrariamente ao que acontece com os solos N_{Vef}, diminui na bacia do Taboão à medida que aumenta o risco de erosão.

As demais unidades ocupam superfícies muito pequenas em relação a estas três classes e mostram uma tendência de aumento de área à medida que aumenta o risco de erosão.

Conclusões Parciais

A caracterização das cinco classes de risco potencial de erosão por voçorocas com base nas variáveis que descrevem a geologia, a geomorfologia e os solos, mostrou que as relações entre estas variáveis e as classes de risco não são totalmente lineares.

Isto é verificado ao analisar-se a declividade média do terreno nas áreas ocupadas pelas distintas classes de risco. Embora o risco de erosão mostre uma tendência de elevação à medida que aumenta a declividade média do terreno, o valor médio de declividade encontrado nas áreas com baixo risco de erosão não segue esta tendência.

Esta relação proporcional é mais clara entre a variável área de contribuição e o risco de erosão. Os valores médios calculados nas diferentes classes mostram claramente que as porções da bacia mais suscetíveis à erosão apresentam áreas de contribuição maiores.

Entre as variáveis analisadas, as curvaturas das encostas no perfil e no plano apresentam comportamentos diferentes dos esperados. Ao contrário das demais, estas variáveis não apresentam tendências de comportamento que comprovem a sua importância no desenvolvimento de voçorocas e que foram responsáveis pela sua escolha para análise neste estudo.

Enquanto os percentuais de encostas convexas no perfil são aproximadamente constantes em todas as classes de risco, as formas côncavas e retilíneas variam muito e de forma irregular de classe para classe. Apesar disso, as encostas côncavas mostram uma tendência de aumento à medida que aumenta o risco de erosão, chegando a atingir cerca de 54% da área ocupada pela classe muito alto risco. Já as encostas retilíneas tendem a ser menos

freqüentes à medida que aumenta o risco de erosão, variando de 85% na classe muito baixo risco até cerca de 33% na classe muito alto risco de erosão.

As encostas divergentes mostram inicialmente uma diminuição do percentual à medida que aumenta o risco de erosão e, a partir da classe de risco moderado, são mais freqüentes com o aumento do risco de erosão. As formas convergentes no plano não mostram uma relação clara, apresentando a partir da classe moderado risco, um decréscimo dos percentuais até atingir 34,7% das áreas relativas à classe muito alto risco de erosão. As formas retilíneas mostram uma correlação negativa com o risco de erosão.

As variáveis que descrevem a geologia na bacia do Taboão apresentam relações bastante claras com o risco de erosão. A presença de arenitos é mais freqüente à medida que aumenta o risco potencial de erosão por voçorocas. Considerando o fato de que estas litologias ocupam na bacia do Taboão uma superfície muito menor do que as rochas vulcânicas, a tendência verificada pode ser muito significativa no processo erosivo embora os percentuais de área não sejam superiores a 17%.

Esta relação é muito mais evidente se forem considerados os lineamentos, uma vez que 82% das áreas com muito alto risco de erosão estão relacionadas aos lineamentos enquanto que os mesmos ocorrem em somente 3% das áreas com muito baixo risco.

Analisando as direções dos lineamentos, identifica-se que a direção NE predomina nas classes muito baixo e baixo risco de erosão e diminui significativamente à medida que aumenta o risco. Já os lineamentos com direção NW são mais freqüentes com o aumento do risco de erosão e predominam nas classes alto e muito alto risco de erosão, embora mostrem uma pequena redução nesta última classe. Estes comportamentos demonstram claramente o controle dos lineamentos com direção noroeste no desenvolvimento de voçorocas.

A relação mais marcante entre os solos e o zoneamento de risco de erosão na bacia do Taboão é evidenciada pelos solos da unidade de mapeamento NVef que mostram um aumento considerável da sua superfície à medida que aumenta o risco potencial de erosão. Por outro lado, à medida que aumenta o risco de erosão diminuem as áreas ocupadas pelos solos das unidades LVd e LVdf. Estes comportamentos reforçam a relação identificada na análise entre os solos e a ocorrência de voçorocas na bacia, que indica claramente a maior suscetibilidade à erosão por voçorocas dos NVef em relação aos demais tipos de solo.

5.3.3.2 – Relação entre Voçorocas e Zoneamento de Risco Potencial à Erosão

A verificação da validade do zoneamento do risco potencial à erosão por voçorocas na bacia do Taboão pode ser realizada através da identificação do risco potencial existente nos locais onde foram mapeadas as voçorocas. Estes dados podem ser verificados na Tabela 5.16, que apresenta o número de voçorocas nas áreas relacionadas às distintas classes de risco e a porcentagem de área das voçorocas ocupadas por cada classe.

Tabela 5.16 – Relação entre voçorocas e risco de erosão

Risco potencial	Nº voçorocas	Frequência (%)
Muito baixo	8	9.6
Baixo	4	4.8
Moderado	6	7.2
Alto	17	20.5
Muito Alto	48	57.8

Observa-se que cerca de 78% das voçorocas estão situadas em áreas com alto e muito alto risco de erosão, isto é, com probabilidade maior que 70% de apresentar comportamentos das variáveis iguais aos existentes nas voçorocas mapeadas.

A comparação dos valores médios das dimensões, da declividade e das áreas de contribuição das voçorocas situadas em áreas com potenciais erosivos distintos, como mostra a Tabela 5.17, demonstra existir uma justificativa para esta distinção.

Tabela 5.17 – Relação entre voçorocas por risco e dimensões, área de contribuição e declividade

Risco	Comprimento (m)	Largura (m)	Prof (m)	Área (m ²)	Área Contribuição (m ²)	Declividade (%)
Alto	151,2	10,8	3,8	2195,3	82.010	9,1
Baixo	104,6	10,7	3,1	1164,2	19.524	8,9

Constata-se que as voçorocas, situadas em áreas com potencial erosivo alto e muito alto (Alto Risco), apresentam dimensões maiores do que aquelas situadas em áreas com potencial erosivo muito baixo, baixo e moderado (Baixo Risco).

Da mesma forma, a área de contribuição das voçorocas também é significativamente maior nas voçorocas situadas em áreas com risco potencial à erosão mais elevado.

A menor área de contribuição nas voçorocas com Baixo Risco de erosão indica maior proximidade dos divisores de água e sugere que estas voçorocas estejam relacionadas a cursos d'água de ordem inferior às ordens dos cursos d'água próximos aos quais se desenvolvem as demais voçorocas.

Por outro lado, a largura e a declividade média das voçorocas situadas nas áreas mais suscetíveis à erosão é pouco superior às daquelas situadas em áreas com menor suscetibilidade.

A pequena diferença nos valores médios de declividade pode ser explicada pela relação inversa existente entre a área da bacia de contribuição e a declividade média na voçoroca, já verificada na bacia do Taboão. Assim, como a área média da bacia de contribuição das voçorocas situadas em áreas com Baixo Risco, é bem menor do que nos demais casos, a declividade média também tende a ser mais alta.

A concentração do escoamento superficial (ES) não apresenta diferenças significativas se forem comparados os dados das voçorocas situadas em áreas com Alto Risco e aquelas situadas em áreas com Baixo Risco, como mostra a Tabela 5.18.

Tabela 5.18 - Concentração do ES (%) nas voçorocas por risco de erosão

Concentração ES	Alto Risco	Baixo Risco
talvegue	29,2	33,3
Cerca	4,6	11,1
talvegue, estrada	60,0	50,0
talvegue, estrada, cerca	6,2	5,6

As voçorocas situadas em área com Alto Risco de erosão apresentam, em relação aos demais casos, percentual pouco superior de concentração do escoamento superficial no talvegue e pela canalização de drenagem relacionada às estradas. Por outro lado, a geração de concentração do escoamento superficial somente pelo talvegue ou somente pela existência de divisa de propriedade, é um pouco maior nas voçorocas situadas em áreas com Baixo Risco de erosão.

As curvaturas das encostas no perfil e no plano apresentam diferenças marcantes quando analisadas nas voçorocas que se desenvolvem em áreas classificadas nos dois grandes grupos de risco de erosão. A área, em porcentagem, no interior das voçorocas ocupada pelas distintas formas das encostas pode ser verificada na Tabela 5.19.

A curvatura das encostas no perfil é preferencialmente côncava nos casos em que as voçorocas desenvolvem-se em áreas Alto Risco potencial de erosão. Enquanto que as voçorocas situadas em áreas com Baixo Risco apresentam encostas preferencialmente retilíneas.

Tabela 5.19 – Relação entre voçorocas por de risco de erosão e curvaturas (%)

Risco	Curvatura no Perfil			Curvatura no Plano		
	Côncava	Retilínea	Convexa	Convergente	Retilínea	Divergente
Alto	52,9	36,4	10,7	64,7	25,4	9,9
Baixo	21,2	65,9	12,9	12,9	69,4	17,6

O mesmo padrão de comportamento é observado na curvatura das encostas no plano, embora sejam maiores os percentuais de encostas convergentes nas voçorocas situadas em áreas com Alto Risco de erosão e, de encostas retilíneas, nas voçorocas situadas em áreas com baixo potencial erosivo.

As variáveis relacionadas à geologia mostram relações distintas com as voçorocas situadas em áreas com alto e baixo risco de erosão, como mostra a Tabela 5.20, onde os valores expressam percentuais de área das voçorocas. A variável litologia é analisada considerando a presença de arenito nas voçorocas situadas nas áreas características dos dois grandes grupos de risco de erosão, enquanto a análise dos lineamentos considera, inicialmente, a presença ou não dos mesmos nas voçorocas.

Tabela 5.20 – Relação entre voçorocas por risco e litologia e lineamentos (%)

Risco	Arenito		Lineamentos	
	Presente	Ausente	Presente	Ausente
Alto	49,2	50,8	72,3	27,7
Baixo	72,2	27,8	22,2	77,8

A maior parte das voçorocas situadas em áreas de Baixo Risco de erosão desenvolvem-se em intervalos altimétricos onde afloram arenitos. Já as voçorocas situadas em áreas com Alto Risco de erosão apresentam-se distribuídas igualmente sobre zonas de contato de derrames e sobre as demais porções dos derrames.

Com relação aos lineamentos, observa-se uma relação contrária no caso das voçorocas situadas em áreas com Baixo Risco de erosão. Cerca de 80% destas desenvolvem-se sem a influência de lineamentos. Por outro lado, mais de 70% das voçorocas situadas em áreas com Alto Risco de erosão desenvolvem-se sobre lineamentos.

Apesar do pequeno controle exercido pelos lineamentos nas voçorocas situadas em áreas Baixo Risco de erosão, aquelas que não se desenvolvem em locais onde afloram arenitos, estão relacionadas a lineamentos ou apresentam concentração do escoamento superficial pelo talvegue e pela drenagem de estradas.

O tipo de solo também é um fator que distingue as voçorocas desenvolvidas em áreas com distintos riscos de erosão, como pode ser observado na Tabela 5.21, que apresenta os percentuais de área das voçorocas ocupados pelas diferentes classes de solo.

Tabela 5.21 – Relação entre voçorocas por risco e solos (%)

Classe de solo	Voçorocas	
	Risco Alto	Risco Baixo
Latossolo Vermelho Distroférrico (LVdf)	23,0	43,5
Latossolo Vermelho Distrófico (LVd)	37,7	15,3
Nitossolo Vermelho Eutrófico (NVEf)	37,2	41,2
Gleissolo Háptico (GX)	0,3	0,0
Neossolo Flúvico Tb Eutrófico (RUbe)	0,3	0,0
Neossolo Litólico Eutrófico (RLe)	1,6	0,0

A relação existente entre as voçorocas situadas em áreas com Alto Risco de erosão e os solos é a mesma observada na análise conjunta de todas as voçorocas. Isto é, as voçorocas desenvolvem-se preferencialmente em solos das unidades de mapeamento LVd e NVEf, embora exista uma pequena predominância do primeiro tipo de solo em relação ao segundo. Secundariamente, ocorrem voçorocas sobre solos da unidade LVdf.

Já as áreas com Baixo Risco relacionadas às voçorocas, apresentam solos das unidades LVdf e NVEf na grande maioria dos casos, com uma pequena predominância dos LVdf em relação aos NVEf, e, secundariamente, LVd. Nestas áreas ocorre um incremento nos percentuais de NVEf e LVdf, bastante significativo neste último, e um decréscimo

significativo no percentual de LVd, em relação às áreas com Alto Risco de erosão associadas com as voçorocas.

Conclusões Parciais

Muitos dos dados apresentados servem para explicar a razão pela qual as voçorocas desenvolvem-se sobre áreas classificadas com risco de erosão alto e muito alto.

As dimensões e as áreas de contribuição das voçorocas situadas em áreas com potencial erosivo alto e muito alto são maiores do que aquelas situadas em áreas com potencial erosivo baixo. A menor área de contribuição nas voçorocas com Baixo Risco de erosão sugere que estas voçorocas estejam relacionadas a cursos d'água de ordem inferior às ordens dos cursos d'água próximos aos quais se desenvolvem as demais voçorocas.

A pequena diferença entre os valores médios de declividade observados nos dois grupos de voçorocas pode ser resultado da relação inversa existente entre a área da bacia de contribuição e a declividade média na voçoroca. Segundo esta relação, quanto maior a área de contribuição, menor é a declividade necessária para deflagrar o processo erosivo. Como as bacias de contribuição das voçorocas situadas em áreas com Alto Risco de erosão são muito maiores do que nos demais casos, a sua declividade média não é necessariamente muito mais alta do que nos demais casos.

As naturezas e as frequências das concentrações do escoamento superficial também ocorrem com frequência muito similar nos dois grupos de voçorocas, diferentemente do esperado.

As curvaturas das encostas no perfil e no plano são preferencialmente côncavas e convergentes, respectivamente, nas voçorocas situadas em áreas com Alto Risco de erosão, enquanto que as voçorocas situadas em áreas com Baixo Risco apresentam encostas preferencialmente retilíneas.

Mais de 70% das voçorocas situadas em áreas com Alto Risco de erosão desenvolvem-se sobre lineamentos, enquanto somente 20% das voçorocas situadas em áreas com Baixo Risco de erosão desenvolvem-se com a sua influência.

O comportamento de algumas variáveis indica claramente a razão pela qual cerca de 20 % das voçorocas ocorrem em áreas onde, a princípio, isto não deveria ocorrer.

O tipo de solo parece exercer um papel importante na explicação da ocorrência de voçorocas em áreas com Baixo Risco de erosão. Os solos da unidade de mapeamento LVdf são muito mais frequentes nestes casos do que em relação aos demais. Os NVef, embora não mostrem um incremento tão expressivo como os LVdf, também são mais frequentes nas

voçorocas que ocorrem em áreas com Baixo Risco de erosão, o que é bastante significativo se for lembrado que a presença dos N_{Vef} favorece ocorrência de voçorocas. O significativo decréscimo no percentual de LV_d, de 37,7%, nas áreas com Alto Risco de erosão, para 15,3%, nas áreas com Baixo Risco de erosão associadas às voçorocas, indica um papel pouco relevante na ocorrência de voçorocas em áreas aparentemente menos suscetíveis à erosão.

A distinção mais clara no comportamento das variáveis, que parece esclarecer a ocorrência de voçorocas em áreas com Baixo Risco de erosão, é verificada ao analisar-se a presença de arenito nestes locais. Esta litologia ocorre em 70% das voçorocas destes casos, enquanto este fator não é significativo entre as voçorocas situadas em áreas com Alto Risco de erosão.

Conclui-se, desta forma, que o comportamento das variáveis litologia e solos é o principal responsável pelo desenvolvimento de voçorocas nas áreas onde o risco de erosão é moderado, baixo e muito baixo.

6 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

6.1 – Conclusões

A metodologia empregada para verificação da hipótese de controle por parte da geologia, da geomorfologia e dos solos no fenômeno de erosão por voçorocas, testada neste estudo, mostrou-se adequada. Os resultados obtidos demonstram que as variáveis utilizadas para representar a geologia, a geomorfologia e os solos controlam distintamente o desenvolvimento de voçorocas na bacia do Taboão.

O mapeamento das voçorocas e a identificação de áreas onde comprovadamente não ocorre erosão na área de estudo foram fundamentais para definição dos limites espaciais onde deveriam ser identificados os comportamentos das variáveis que caracterizam a geologia, a geomorfologia e os solos, e para validação dos resultados da integração dos dados de todas as variáveis. Além disso, as informações adquiridas durante esta etapa do trabalho permitiram a definição de um retrato atual do problema da erosão por voçorocas na área de estudo e possibilitaram a identificação de algumas relações citadas na literatura. Entre as conclusões obtidas a partir do **mapeamento das voçorocas**, é importante ressaltar:

- a) Foram identificadas 83 voçorocas distribuídas homoganeamente na bacia do Taboão, das quais 54% encontram-se ativas, 34% estão estabilizadas e 12% já estão recuperadas. Este quadro, respaldado em informações dos produtores rurais, indica os efeitos da substituição da prática de cultivo convencional pelo plantio direto, que têm resultado na redução das taxas de erosão e na tendência de estabilização de várias feições erosivas. Esta afirmação não pode ser comprovada uma vez que não se dispõe de um levantamento das voçorocas na época do cultivo convencional que permita comparações.
- b) *Pipings* foram identificados em 24% das voçorocas e encontram-se, na grande maioria dos casos, no horizonte C dos solos. A declividade média do terreno nestas voçorocas formadas com contribuição do escoamento subsuperficial, obtida a partir de medições de campo e a partir do MNT, é igual a 5,6% e 7,5%, respectivamente.
- c) Em mais da metade das voçorocas, isto é, 61% dos casos, ocorre concentração do escoamento superficial devido às características naturais das encostas aliadas a uma componente antrópica, como drenagem de estradas e divisas de propriedades.
- d) A agricultura é a principal forma de uso do solo na bacia, sendo que 67 % da sua área é utilizada para cultivo de soja predominantemente, e 23% é utilizada para pecuária. A comparação destes dados com informações dos usos do solo no passado mostra uma diminuição do percentual de áreas utilizadas para o cultivo e a elevação do percentual de áreas

utilizadas para a criação de gado, o que pode indicar uma tentativa de controle do desenvolvimento das voçorocas ao ser identificada a forma de uso do solo responsável pela sua deflagração.

e) O fato de duas voçorocas estarem situadas no interior de mata ciliar bastante densa, aliado à informação de surgimento de uma voçoroca anteriormente às práticas agrícolas na região e sem indícios de que tenha resultado de desmatamento, sugere a existência de um componente natural no desenvolvimento de voçorocas na bacia do Taboão.

A integração dos dados das voçorocas e das variáveis representando a geologia, a geomorfologia e os solos, foi realizada na área de estudo com três objetivos: identificar o **controle individual (1)** de cada variável no desenvolvimento das voçorocas, identificar a **relevância de cada variável (2)** em explicar o processo erosivo e o **controle conjunto de todas as variáveis (3)**, o que foi possível através de um zoneamento de risco de erosão por voçorocas.

A integração do mapa das voçorocas com cada um dos planos de informações (PIs) descrevendo a litologia e os lineamentos, declividade do terreno, área de contribuição, curvatura das encostas no perfil e no plano, e os tipos de solos, mostrou a relação existente entre estas variáveis e as voçorocas na bacia do Taboão (**Objetivo 1**).

A identificação da relevância de cada variável, relativamente às demais, em explicar o desenvolvimento de voçorocas (**Objetivo 2**) foi possível ao integrar-se todos os PIs conjuntamente e, em seguida, integrando-se todos os PIs menos um, sucessivamente. A análise dos PIs obtidos fornece a seguinte ordem decrescente de importância das variáveis: Solos > Lineamentos > Declividade > Curvatura no Perfil > Curvatura no Plano > Litologia > Área de Contribuição.

A validação do mapa de risco de erosão por voçorocas fundamentou-se na identificação do risco potencial existente nos locais onde foram mapeadas as 83 voçorocas, demonstrando que 78% delas estão situadas em áreas com alto e muito alto risco de erosão. As características das variáveis que determinam as classes de risco à erosão indicam o controle conjunto exercido na erosão por voçorocas (**Objetivo 3**).

Visando, principalmente, justificar a existência de cerca de 20 % das voçorocas em áreas onde isto não era esperado, foi analisado o comportamento das variáveis nas voçorocas situadas em áreas com alto e muito alto risco de erosão e nas voçorocas situadas em áreas com risco moderado, baixo e muito baixo.

A escolha das variáveis litologia e lineamentos para avaliar a existência de um **controle por parte da geologia** no desenvolvimento de voçorocas resulta do fato de que os arenitos identificados entre os derrames de rochas vulcânicas e as estruturas geológicas que

controlam a rede de drenagem na bacia do Taboão podem representar descontinuidades e zonas mais permeáveis para percolação das águas superficiais e subsuperficiais (Freitas, 2000; Erdélyi e Gálfi, 1988), potencializando o processo de erosão linear (Beavis, 2000).

Objetivo 1: O controle por parte dos lineamentos no desenvolvimento das voçorocas é claro: 61% das voçorocas desenvolvem-se sobre lineamentos, sendo que 51% destes lineamentos apresentam direção NW, 23,5% direção NE, 21,5% das voçorocas situam-se sobre cruzamentos de pelo menos duas estruturas e 4% sobre lineamentos com direção E-W. A litologia, em um primeiro momento, parece não exercer um controle significativo, uma vez que 54% delas desenvolvem-se sobre ou imediatamente à jusante dos intervalos altimétricos onde afloram os arenitos.

Objetivo 2: A análise da relevância destas variáveis em explicar a ocorrência de voçorocas na bacia confirma os papéis de cada uma delas identificados anteriormente. Os lineamentos mostram um efeito muito marcante no processo de erosão, representando a segunda variável mais importante no processo de erosão por voçorocas, enquanto a litologia é a segunda variável menos importante.

Objetivo 3: As relações entre as variáveis que descrevem a geologia e o risco de erosão são bastante claras. À medida que aumenta o risco de erosão aumenta a área ocupada por lineamentos. Exemplificando: 82% das áreas com muito alto risco de erosão estão relacionadas aos lineamentos enquanto que os mesmos ocorrem em somente 3% das áreas com muito baixo risco. Os lineamentos com direção NW se tornam mais freqüentes com o aumento do risco de erosão e predominam nas classes alto e muito alto risco de erosão, enquanto aqueles com direção NE predominam nas classes muito baixo e baixo risco de erosão e diminuem significativamente à medida que aumenta o risco. Estes comportamentos demonstram claramente o controle dos lineamentos com direção noroeste no desenvolvimento de voçorocas. A presença de arenitos também mostra uma relação diretamente proporcional com o risco de erosão, embora o percentual de área sobre os arenitos não seja superior a 17% na classe muito alto risco. Considerando o fato de que estas litologias são muito menos freqüentes na bacia do Taboão dos que as rochas vulcânicas, a tendência de aumento das suas áreas à medida que aumenta o risco de erosão pode ser muito significativa no processo erosivo.

A análise do comportamento das variáveis nas voçorocas situadas em áreas com alto e muito alto risco de erosão (Alto Risco) e nas voçorocas situadas em áreas com risco moderado, baixo e muito baixo (Baixo Risco) mostrou que a litologia explica muito claramente a ocorrência de voçorocas em áreas com Baixo Risco. Enquanto a presença de arenitos não é determinante para as voçorocas situadas em áreas com Alto Risco de erosão,

ocorrendo em 49% delas, ela está relacionada a 72% dos demais casos. A importância dos níveis sedimentares decorre da atuação do fluxo subsuperficial no interior destes pacotes rochosos permeáveis, que pode ser resultado da recarga através de fraturas que, em situações de afloramento, especialmente em meia-encosta, caracterizam zonas de surgência de água e favorecem o desenvolvimento das voçorocas, através da remoção de partículas do solo. Por outro lado, os lineamentos não conseguem explicar a existência de voçorocas em áreas pouco suscetíveis à erosão, pois somente 20% das voçorocas situadas em áreas com Baixo Risco desenvolvem-se com a sua influência.

O **controle da geomorfologia** no desenvolvimento das voçorocas foi verificado analisando-se o comportamento da declividade do terreno, área de contribuição, curvatura das encostas no perfil e curvatura das encostas no plano.

Objetivo 1: A declividade é muito variável nos locais onde se desenvolvem voçorocas e apresenta um valor médio igual a 9%, pouco superior ao valor médio da bacia que é igual a 8%. Apesar desta pequena diferença, 61% das voçorocas ocorrem em áreas com declividade superior à média da bacia, indicando um importante papel desta variável na erosão. A grande amplitude de valores que a área de contribuição apresenta no interior das voçorocas sugere que as mesmas ocorrem associadas a cursos d'água de distintas ordens e sugere que este não é um fator determinante no desenvolvimento das voçorocas. Com relação às curvaturas das encostas no plano e no perfil, em 32% dos casos, as voçorocas desenvolvem-se em encostas com forma côncava-convergente, embora estes modelados de relevo ocorram em somente 5% da bacia do Taboão. Considerando a forma das encostas no plano, 58,3% das superfícies ocupadas por voçorocas apresentam encostas convergentes, demonstrando que, em contornos convergentes, o fluxo laminar é concentrado, e a erosão linear é mais efetiva (Summerfield, 1991). A curvatura no perfil mostrou ser uma variável cujo comportamento não favorece o desenvolvimento de voçorocas: 45% das superfícies das voçorocas são côncavas, 45% são retilíneas e 10% são convexas.

Objetivo 2: A análise da relevância das variáveis na reprodução do fenômeno de erosão por voçorocas demonstrou que a área de contribuição é a variável, dentre todas, menos relevante no fenômeno erosivo, possivelmente em função da sua grande amplitude de valores. Este resultado pode indicar que a metodologia utilizada não permitiu demonstrar a verdadeira relevância desta variável no fenômeno erosivo. Já a declividade do terreno, a curvatura das encostas no perfil e a curvatura das encostas no plano apresentam, nesta ordem, uma influência decrescente no fenômeno erosivo, embora as diferenças entre as mesmas sejam muito pequenas.

Objetivo 3: A análise das relações entre o risco de erosão e o comportamento das variáveis, mostra que a declividade média do terreno e a área de contribuição tendem a crescer à medida que aumenta o risco, especialmente no caso da segunda variável. Enquanto os percentuais de encostas convexas no perfil são aproximadamente constantes em todas as classes de risco, as encostas côncavas tendem a ser mais freqüentes à medida que aumenta o risco de erosão, chegando a atingir cerca de 54 % da área ocupada pela classe muito alto risco. Já as encostas retilíneas tendem a ser menos freqüentes à medida que aumenta o risco de erosão, variando de 85 % na classe muito baixo risco até cerca de 33 % na classe muito alto risco de erosão. As encostas retilíneas e divergentes não favorecem a erosão, pois tendem a ser menos freqüentes à medida que aumenta o risco de erosão, enquanto que as formas convergentes não apresentam uma relação clara.

Nas voçorocas situadas em áreas com Alto Risco de erosão, as suas dimensões e as suas áreas de contribuição são maiores do que naquelas situadas em áreas com Risco Baixo. Os menores valores de área de contribuição nas voçorocas com Baixo Risco de erosão sugerem que estejam relacionadas a cursos d'água de ordem inferior às ordens dos cursos d'água próximos aos quais se desenvolvem as demais voçorocas. Ao contrário do esperado, os valores médios de declividade encontrados nos dois grupos de voçorocas são muito próximos, embora a declividade média do terreno apresente valores crescentes à medida que aumenta o risco de erosão. A declividade média nas voçorocas que ocorrem sobre áreas com Alto Risco de erosão é igual a 9,1%, enquanto que nos demais casos é igual a 8,9%. As curvaturas das encostas no perfil e no plano são preferencialmente côncavas e convergentes, respectivamente, nas voçorocas situadas em áreas com Alto Risco de erosão, enquanto que as voçorocas situadas em áreas com Baixo Risco apresentam encostas preferencialmente retilíneas no plano e no perfil.

O **controle exercido pelos solos** no desenvolvimento das voçorocas fica evidente ao se identificar:

Objetivo 1: Os solos das unidades de mapeamento LVd e NVef ocupam 36 e 35% das superfícies das voçorocas, respectivamente, embora cada unidade ocupe 28% da área da bacia do Taboão. As superfícies das voçorocas ocupadas por estas duas classes de solo podem ser questionáveis, uma vez que áreas mapeadas como LVd (Carvalho *et al.*, 1990), foram classificadas posteriormente como NVef (Boulet *et al.*, 1993). No entanto, é indiscutível a suscetibilidade à erosão apresentada pelos solos da unidade NVef, possivelmente decorrente da sua localização junto aos talvegues em declives entre 8 e 15 % e da sua elevada e crescente porosidade em direção à base do perfil (Boulet *et al.*, *op. cit.*) que favorece o fluxo subsuperficial.

Objetivo 2: A análise da relevância das variáveis na reprodução do fenômeno de erosão por voçorocas demonstrou que o tipo de solo é a variável mais importante entre as demais. Isto pode ser resultado da estreita relação entre as voçorocas e os solos das unidades NVef e LVd. Apesar disso, os solos não foram considerados na integração de dados que resultou no zoneamento do risco de erosão, uma vez que, com isso, a classificação das áreas *sem erosão* se aproxima mais da realidade da bacia.

Objetivo 3: A relação mais marcante entre os solos e o zoneamento de risco de erosão na bacia do Taboão é evidenciada pelos NVef que mostram um aumento considerável da sua superfície à medida que aumenta o risco potencial de erosão, reforçando a relação identificada anteriormente que indica, claramente, a maior suscetibilidade à erosão por voçorocas dos NVef em relação aos demais tipos de solo. Os solos das unidades LVd e LVdf são menos freqüentes à medida que aumenta o risco de erosão.

O papel dos solos nas voçorocas situadas em áreas com Baixo Risco de erosão, é mostrado mais claramente pelos solos da unidade NVef que são mais freqüentes neste grupo de voçorocas do que nas demais. Embora os LVdf também sejam mais freqüentes nas voçorocas situadas em áreas com Baixo Risco do que naquelas situadas em áreas com Alto Risco, seu comportamento não parece ser o responsável em explicar o desenvolvimento de voçorocas em áreas pouco suscetíveis à erosão. Os LVd são menos freqüentes nas voçorocas situadas em áreas com Baixo risco do que nas demais.

A explicação para a ocorrência de voçorocas em áreas com Baixo Risco de erosão é fornecida principalmente pela maior presença, nestes locais, de solos da unidade NVef e de arenitos, que mostraram ao longo deste estudo estar estreitamente relacionados às voçorocas. Embora tenham sido identificados os comportamentos das variáveis que potencializam a ocorrência de erosão em áreas menos suscetíveis, o fato de a concordância das voçorocas com as áreas com alto e muito alto risco (78%) não ser total pode indicar que as variáveis escolhidas para representar a geologia, a geomorfologia e os solos, não são as únicas a controlar o fenômeno de erosão por voçorocas na área de estudo.

6.2 - Recomendações

As relações claras e significativas entre as voçorocas e a litologia, os lineamentos, a curvatura das encostas no plano e os solos indicam que o fluxo subsuperficial é um componente bastante significativo na erosão por voçorocas e que deve ser detalhado e melhor compreendido em estudos futuros.

Acredita-se que malhas com resoluções maiores poderão representar melhor as feições erosivas e talvez melhorar os resultados obtidos. A maior resolução da malha requer a utilização de cartas planialtimétricas com escala maior e um menor intervalo de discretização altimétrica. A ferramenta de integração de dados utilizada consiste em apenas uma possibilidade entre várias que poderiam ser empregadas para testar a hipótese assumida neste estudo. Sugere-se que outras ferramentas sejam empregadas para integrar os dados gerados na bacia do arroio Taboão para verificação dos resultados obtidos. Considerando a incerteza resultante da resolução adotada e da possibilidade de mistura de padrões nos polígonos utilizados como amostras de cada classe, recomenda-se que sejam testados procedimentos de integração de dados que utilizem a lógica fuzzy.

Embora o método de integração de dados utilizado pressuponha que os dados apresentem distribuição multivariada normal, não foi analisada a distribuição de probabilidade multivariada dos dados. Recomenda-se que, em trabalhos futuros, esta análise seja realizada e, caso os dados não apresentem distribuição multivariada normal, sejam realizadas transformações para a obtenção desta distribuição de probabilidade.

Uma vez que foi utilizado somente um tipo de amostra para representar as áreas da bacia com baixo potencial para a ocorrência de voçorocas, e que esta amostra reproduz as características de montante das voçorocas, sugere-se que trabalhos, que venham a utilizar uma metodologia semelhante considerem uma segunda amostra para este tipo de terreno, considerando o comportamento de áreas de jusante.

A hipótese de controle da geologia no desenvolvimento de voçorocas fundamentou-se na distribuição aproximadamente horizontal dos níveis sedimentares entre as rochas vulcânicas. Recomenda-se a realização de um levantamento geológico mais detalhado visando identificar a geometria e as relações entre estas litologias e os basaltos, assim como identificar o comportamento das estruturas presentes nos substratos rochosos das voçorocas que possibilitam o acúmulo e a movimentação de água.

Recomenda-se que sejam abordados outros parâmetros morfométricos das encostas, como o comprimento da vertente, a densidade de eixos de drenagem acima da cabeceira da voçoroca, a declividade na cabeceira da voçoroca, a distância entre a cabeceira e o divisor, entre outros. Considerando as relações relativamente fracas encontradas por Oliveira *et al.*(1994) entre os parâmetros morfométricos gerais das encostas e as voçorocas, é importante que parâmetros morfométricos, que representam as dimensões parciais das encostas, sejam incorporados ao estudo do controle da geomorfologia no desenvolvimento de voçorocas.

As relações verificadas entre as voçorocas e a rede de drenagem foram insuficientes para aplicação do modelo evolutivo para ravinas e voçorocas baseado na sua localização nas

encostas, proposto por Oliveira e Méis (1985) e Oliveira (1999). Sugere-se que trabalhos futuros, ao analisar o controle da geomorfologia no desenvolvimento de voçorocas, busquem empregar este modelo evolutivo.

7 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AUZET, A.V.; BOIFFIN, J.; PAPY, F.; LUDWIG, B.; MAUCORPS, J. Rill erosion as a function of the characteristics of cultivated catchments in the north of France. **Catena: an interdisciplinary Journal of Soil Science – Hidrogeology – Geomorphology**, v.19 , p.1-22, 1992.

AUZET, A.V.; BOIFFIN, J.; LUDWIG, B. Concentrated flow erosion in cultivated catchments: influence of soil surface state. **Earth Surface Processes and Landforms**, v.20, p.759-767, 1995.

BEAVIS, S.G. Structural controls on the orientation of erosion gullies in mid-western New South Wales, Australia. **Geomorphology**, v. 33 , p.59-72 , 2000.

BOIFFIN, J.; PAPY, F.; EIMBERCK, M. Influence des systèmes de culture sur les risques d'érosion par ruissellement concentré. I.- Analyse des conditions de déclenchement de l'érosion. **Agronomie**, v.8 , p. 663-673, 1988.

BONHAM-CARTER, G. F. **Geographic information system for geoscientist**. Ontário : Pergamon, 1994. 398 p.

BORDAS, M.P; LANNA, A.E.L.; DE LUCA, S.J. **Projeto Potiribu: avaliação e controle dos impactos da agricultura sobre os recursos hídricos do derrame basáltico sul-americano**. Porto Alegre: UFRGS- IPH, 1990. 2f.

BORDAS, M P.; BORGES, A L.O. Escolha de bacias representativas e experimentais para estudo da erosão e do seu controle. In: CONGRESSO BRASILEIRO E ENCONTRO NACIONAL DE PESQUISA SOBRE CONSERVAÇÃO DO SOLO, 8, Londrina, 1990.

BOULET R.; LEPRUN J. C.; CHEVALLIER P.; SANCHEZ Y VACAS A. M. **Reconnaissance pedologique sur les bassins du Projet Potiribu**, Rapport provisoire. 1993. (Inédito)

BRASIL. Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE. **Folha SH.22 Porto Alegre e parte das Folhas SH.21 Uruguaiana e SI.22 Lagoa Mirim**. Rio de Janeiro: IBGE, 1986. (Levantamento de Recursos Naturais, v.33).

BRYAN, R.B. Processes and significance of rill development. In: BRYAN, R. B. (Ed.) Rill erosion: processes and significance. **Catena: an interdisciplinary Journal of Soil Science – Hidrogeology – Geomorphology supplement 8**, Braunschweig-Germany, Leuven, p.1-15 , 1987.

BURROUGH, P.A. **Principles of Geographical Information Systems for Land Resources Assessment**. Oxford: Clarendon, 1992. 194p.

CAMARA, G.; MOREIRA, F.R.; BARBOSA,C.; ALMEIDA Fº,R.; BONISCH, S. Técnicas de Inferência Geográfica. In: CÂMARA, G.; MONTEIRO, A. M. V. (Eds.) **Análise Espacial de Dados Geográficos**. São José dos Campos: INPE, 1999. Cap. 4 , p.1-47.

- CARVALHO, A.P.; ABRAO, P. U. R.; FASOLO, P. J.; POTTER, R. J. **Levantamento Semidetalhado dos Solos da Bacia do Arroio Taboão (Pejuçara/ Ijuí-RS)**. Multigr. 41p. + mapa 1:25.000, 1990.
- CASTRO, N. M. dos R. **Ruissellement et erosion sur des bassins versants de grandes cultures du plateau Basaltique du sud du Bresil (Rio Grande do Sul)**. 1996. 179p. Tese (Doutorado) - Univ. Luis Pasteur, Strasbourg, 1996.
- CASTRO, N. M. dos R.; AUZET, A. V.; CHEVALLIER, P.; LEPRUN, J.C. Land use change effects on runoff and erosion from plot to catchment scale on the basaltic plateau of southern Brazil. **Hydrological Processes**, v. 13, p.1621-1628, 1999.
- CASTRO, N. M. dos R.; CHEVALLIER, P.; SILVEIRA, A. L.L. da. Agriculture on the Brazilian basaltic plateau. Cultivations practices and soil conservation: first results of the Potiribu project. **Farm Land Erosion: in temperate plains environment and hills**, p.403-414, 1993.
- CHEVALLIER, P.; CASTRO, N. M. R. As precipitações na região de Cruz Alta e Ijuí (RS-Brasil). In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 5, Rio de Janeiro, 1991. **Anais ...** Rio de Janeiro: ABRH/ABRH, 1991, v.3, p.183-192.
- COLLISCHONN, W.; MENDIONDO, E. M.; MENDES, C.A.B. Modelos numéricos do terreno e suas aplicações a bacias hidrográficas 1: princípios gerais. In: CONGRESSO NACIONAL DEL AGUA, 17, Santa Fe, 1998. **Anales...** Santa Fe: Facultad de Ingenieria y Ciencias Hídricas de la Universidad Nacional del Litoral, 1998. v. 2, p.82-90.
- COOKE, R.U.; DOORNKAMP, J.C. **Geomorphology in Environmental Manegement: a new introduction**. 2.ed. New York: Oxford, 1990. 410 p.
- DE WIEST, R. J. M. **Geohydrology**. 2. ed. New York: John Wiley & Sons, 1967. 366 p.
- DIKAU, R. The application of a digital relief model to landform analysis in geomorphology. In: RAPER, J. (Ed.) **Three Dimensional Applications in Geographical Information System**. London: Taylor & Francis, 1989. p. 51-77.
- DINIZ, L. da S. Caracterização Morfológica de uma Bacia Hidrográfica: aplicação às bacias hidrográficas dos Arroios Taboão e Turcato. Porto Alegre: UFRGS-IPH, 2001. 41p. (Inédito)
- DUNNE, T.; LEOPOLD, L. B. **Water in Environmental Planning**. New York: W. H. Freeman, 1978. 818 p.
- ERDÉLYI, M.; GÁLFI, J. **Surface and Subsurface Mapping in Hydrogeology**. Budapest: Akadémiai Kiadó, 1988. 383 p.
- EASTMAN, J. R. **Guide to GIS and Image Processing**. Worcester: Clark University, 1999. v.1. 193 p.
- EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. - Brasília: Embrapa Produção de Informação; Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 1999. 412 p.

FELGUEIRAS, C. A. Modelagem Numérica do Terreno. In: CÂMARA, G.; MONTEIRO, A. M. V. (Eds.) *Análise Espacial de Dados Geográficos*. São José dos Campos: INPE,1999. Cap. 5 , p.1-38.

FIGUEIREDO, E.; VAJAPEYAM, S. A influência do lençol freático e de fendas de tração na erosão em ravinas. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 8, Foz do Iguaçu, 1989. *Anais...* Foz do Iguaçu:ABRH,1989 , v.2, p.450-459.

FRASCA, A. A. S. **Aplicações de Sensoriamento Remoto e Análise de Lineamentos em Estudos Tectônicos na Região de São Francisco de Assis, Porção da Borda Meridional da Bacia do Paraná, RS**. 1996. 105p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia, UFRGS, Porto Alegre,1996.

FRASCA, A. A. S.; LISBOA, N. A. Contribuição do sensoriamento remoto na compartimentação morfotectônica e morfoestrutural da Bacia do Paraná “Grupo São Bento”, RS e suas relações com as estruturas regionais do embasamento. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSOREAMENTO REMOTO, 7, Curitiba, 1993. *Anais...* Curitiba: INPE, 1993, p.211-220.

FREITAS, M.A.; CALDASSO, A. L.S.; DIAS, A.A.. 2000. Aquifer behaviour in acid volcanic rocks of the Parana basin in western Santa Catarina, Brazil. In: International Geological Congress, 31, Rio de Janeiro, 2000. **Abstracts Volume...** Rio de Janeiro : IGC , 2000. 1 CD-Rom.

GLOSSARY of Soil Science Terms. Wisconsin: Soil Science Society of America , 1997. 44p.

GOVERS, G. Spatial and temporal variability in rill development processes at the Huldberg experimental site. In: BRYAN, R. B. (Ed.) Rill erosion: processes and significance. **Catena: an interdisciplinary Journal of Soil Science – Hidrogeology – Geomorphology, supplement 8**, Braunschweig-Germany, Leuven, p.17-34 , 1987.

GUERRA, A. J. T. Processos erosivos nas encostas. In: GUERRA, A . J. T.; CUNHA, S. B. da (Orgs.) **Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos**. 3. Ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil , 1998. Cap.4 , p.149-209.

GUERRA, A. J. T. O início do processo erosivo. In: GUERRA, A . J. T.; SILVA, A. S. da BOTELHO, R. G. M. (Orgs.) **Erosão e Conservação de Solos: conceitos, temas e aplicações**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil , 1999. Cap.1 , p.17-50.

HEEMAN, R. **Geologia, controles e guias prospectivos dos depósitos de ágata na região do Salto do Jacuí (RS)**. 1997. 105p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia, UFRGS, Porto Alegre,1997.

HORTON, R. E. Erosional development of streams and their drainage basins; hydrophysical approach to quantitative morphology. **Bulletin of the Geological society of America**, v.56, p.275-370, 1945.

JOHNSON, R. A. ; WICHERN, D. W. **Applied Multivariate Statistical Analysis**. 3.ed. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1992. 642p.

MEDEIROS, J. D. F. de. **Variabilidade Espacial do Conteúdo de Água no Solo na Bacia do Arroio Donato, RS**. 2004. 186p. Tese (Doutorado) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas, UFRGS. Porto Alegre, 2004.

MENDES, C. A. B.; CIRILO, J. A. **Geoprocessamento em Recursos Hídricos: princípios, integração e aplicação**. Porto Alegre: ABRH , 2001. 533 p.

MENDIONDO, E. M.; CASTRO, N. M. dos R.; AUZET, A. V.; CHEVALLIER, P. Surface flow pathways in subtropical agricultural headwaters: a case study from southern Brazil. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON HEADWATER CONTROL, 4, Merano-Italy, 1998. **Headwaters: water resources and soil conservation**. Merano: IAHC/WASWC, 1998a. p.285-292.

MENDIONDO, E. M.; COLLISCHONN, W.; MENDES, C. A. B. Modelos numéricos do terreno e suas aplicações a bacias hidrográficas 2: obtenção de dados. In: CONGRESO NACIONAL DEL AGUA, 17, Santa Fe, 1998. **Anales...** Santa Fe: Facultad de Ingenieria y Ciencias Hídricas de la Universidad Nacional del Litoral, 1998b, v. 2, p.91-99.

MERTEN, G. H.; MORAIS, L. F. B. de; ROCKENBACH, C. A.; RICHTER, L. A. Morfologia das vertentes determinada a partir do modelo numérico do terreno. In: REUNIÃO SUL-BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO, 3, Porto Alegre, 2000. **Anais ...** Porto Alegre, 2000, p.708-715

MOEYERSONS, J. Ravine formation on steep slopes: forward versus regressive erosion. Some cases studies from Rwanda. **Catena: an interdisciplinary Journal of Soil Science – Hidrogeology – Geomorphology**, v.18 , p.309-324 , 1991.

MOORE, I. D.; BURCH, G. J.; MACKENZIE, D. H. Topographic effects on the distribution of surface soil water and the location of ephemeral gullies. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, v. 31 (4), p. 1098-1107, 1988.

MORGAN, R. P. C. **Soil erosion and conservation**. New York: Longman Group e J. Wiley & Sons, 1995. 198 p.

NIMER, E. **Climatologia do Brasil**. 2.ed. Rio de Janeiro: IBGE, 1989. 422p.

O'LEARY, D. W.; FRIEDMAN, J. D.; POHN, H. A. Lineament, linear, lineation: some proposed new standards for old terms. **Geological Society of America Bulletin**, v. 87 , p.1463-1469, 1976.

OLIVEIRA, M.A.T. de. Processos erosivos e preservação de áreas de risco de erosão por voçorocas. In: GUERRA, A . J. T. ; SILVA, A. S. Da ; BOTELHO, R. G. M. (Orgs.) **Erosão e Conservação de Solos: conceitos, temas e aplicações**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1999. Cap.2 , p.57-94.

OLIVEIRA, M.A.T.; MEIS, M.R.M. de. Relações entre geometria do relevo e formas de erosão linear acelerada (Bananal, SP). **Geociências**, São Paulo, nº 4, p.87-99, 1985.

OLIVEIRA, M.A.T.; COELHO NETO, A.L.; AVELAR, A. de S. Morfometria das encostas e desenvolvimento de boçorocas no médio vale do rio Paraíba do Sul. **Geociências**, São Paulo, n. 13, p.9-23, 1994.

- OUVRY, J. F. Effet des techniques culturales sur la susceptibilité des terrains à l'érosion par ruissellement concentré: expérience du Pays de Caux (France). **Cahiers ORSTOM**, Sér. Pédol. , v.25, n.12 , p.157-169,1989-1990.
- PEATE, D. W. The Parana-Etendeka basin. In: MAHONEY, J. J.; COFFIN, M. F. (Ed.) Large igneous provinces: continental, oceanic and planetary flood volcanism. **Geophysical Monograph 100**, American Geophysical Union, p.217-245, 1997.
- PENNOCK, D.J.; ZEBARTH, B.J.; DE JONG, E. Landform classification and soil distribution in hummocky terrain, Saskatchewan, Canada. **Geoderma**, v.40, p.297-315, 1987.
- RISSO, A. **Obtenção e Manipulação dos Parâmetros da Equação Universal de Perda de Solos Através de Técnicas de Geoprocessamento**. 1993. 166p.Dissertação (Mestrado) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas, UFRGS, Porto Alegre, 1993.
- SALOMÃO, F. X. T. ; IWASA, O . Y. Erosão e a ocupação rural e urbana. In: BITAR, O. Y. (Coord.) **Curso de Geologia Aplicada ao Meio Ambiente**. São Paulo: ABGE/IPT, 1995. p.31-57.
- SÃO PAULO. Secretaria de Energia e Saneamento. Controle de Erosão: bases conceituais e técnicas; diretrizes para o planejamento urbano e regional; orientação para o controle de boçorocas urbanas. 2 ed. São Paulo: DAEE / IPT , 1990. 92 p.
- SCHOBENHAUS, C.; BIZZI, L. (Coords.). **Mapa Geológico do Brasil: síntese da geologia do Brasil em ambiente GIS**. Rio de Janeiro: CPRM, 2001. Escala 1:5.000.000. 1 CD ROM . (Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil).
- SCHUCK, M.; LISBOA, N.A.; HAERTEL, V.; DIAS, R. A. Estudo morfotectônico e estrutural de um segmento da bacia do rio Uruguai, RS, através de técnicas de sensoriamento remoto. **Acta Geologica Leopoldensia**, São Leopoldo, v.13, n.30, p. 229-242, 1990.
- STRIEDER, A.J.; AMARO,V.E. Structural patterns removed from remotely sensed lineaments. **EGATEA**,v.25, n.4, p.109-117, 1997.
- SUMMERFIELD, M.A. **Global Geomorphology**:an introduction to the study of landforms. London: Logman ,1991. 537p.
- SWAIN, P. H. **Remote sensing**: the quantitative approach. New York: McGraw-Hill Book , 1978.396 p.
- WILDNER, W.; LOPES, R.da C.; ROMANINI, S. ; CAMOZZATO, E. Contribuição à Estratigrafia do Magmatismo Serra Geral na Bacia do Paraná. In: ENCONTRO DE ESTRATIGRAFIA DO RIO GRANDE DO SUL: ESCUDOS E BACIAS, 1, Porto Alegre, 2003. **Anais ...** Porto Alegre: UFRGS, 2003, p.204-210.
- WISCHMEIER, W. H. ; SMITH, D. D. Predicting rainfall erosion losses – a guide to conservation planning. **Agriculture Handbook**, n.537. 58 p., 1978.

ZALÁN, P. V.; WOLF, S.; CONCEIÇÃO, J. C. de J.; MARQUES, A.; ASTOLFI, M. A. M.; VIEIRA, I. S.; APPI, V. T. ; ZANOTTO, O. A. Bacia do Paraná. In: GABAGLIA, G. P. R. ; MILANI, E. J. (Coords.) **Origem e Evolução de Bacias Sedimentares**. Rio de Janeiro: Petrobrás, 1991. p.135-168.

ZEVENBERGEN, L. W.; THORNE, C. R. Quantitative analysis of land surface topography. **Earth Surface Processes and Landforms**, v.12, p.47-56, 1987.

ANEXO 1
Descrição das Voçorocas

ID	DATA	TIPO EROSAO	INICIO		FIM		COMP(M)	LARGURA (M)	PROF (M)	SEÇÃO EROSAO	DECLIV. VE	DECLIV. VD	DECLIV. CANAL	SITUAÇÃO DRENAGEM	SEÇÃO CANAL
			UTM E	UTM S	UTM E	UTM S									
1	1/4/2003	voçoroca	239400	6853250	239242	6853288	200.0	7.0	5.0	V	5°20'	5°20'	5°20'	canal	V
2	1/4/2003	voçoroca	237348	6853076	237300	6852920	160.0	7.0	5.0	V	-	-	-	canal	V
3	1/4/2003	voçoroca	236685	6854468	237100	6854310	550.0	2.0	1.0	U	2°40'	2°40'	-	talvegue	-
4	1/4/2003	voçoroca	237200	6854300	237400	6854330	250.0	5.0	6.0	U	3°50'	6°50'	1°50'	canal	U
5	2/4/2003	voçoroca	237213	6855032	237351	6854952	160.0	4.5	2.0	U	7°10'	4°30'	6°40'	talvegue	U
6	2/4/2003	voçoroca	237349	6855048	237350	6855020	11.5	3.0	2.0	U	1°50'	2°30'	2°10'	talvegue	U
7	2/4/2003	voçoroca	237769	6855607	237930	6855292	410.0	3.8	2.7	V	2°40'	2°50'	4°10'	talvegue	V
8	2/4/2003	voçoroca	238046	6855343	237954	6855247	130.0	7.7	3.0	U	5°10'	3°20'	3°40'	talvegue	U
9	2/4/2003	voçoroca	237954	6855247	237955	6855247	300.0	5.2	2.5	U	7°	7°40'	2°20'	talvegue	U
10	2/4/2003	voçoroca	236917	6852142	237073	6852019	200.0	13.8	4.7	V	-	-	3°20'	-	V
11	2/4/2003	voçoroca	237017	6852061	237091	6851994	80.0	10.0	2.0	U	-	-	3°20'	talvegue	U
12	2/4/2003	voçoroca	239925	6855475	239940	6855310	160.0	55.0	8.0	U	4°10'	6°	-	talvegue	U
13	2/4/2003	voçoroca	238880	6855250	238852	6855191	52.0	8.0	2.8	U	13°10'	5°50'	1°50'	talvegue	U
14	2/4/2003	voçoroca	238776	6855057	238816	6855101	59.0	5.8	2.0	U	7°	7°50'	8°20'	talvegue	U
15	3/4/2003	voçoroca	238760	6853275	238749	6853321	90.0	9.8	2.3	U	3°10'	3°20'	6°20'	talvegue	-
16	3/4/2003	voçoroca	238985	6853452	238777	6853356	230.0	7.5	4.0	V	4°	4°40'	10°10'	talvegue	-
17	3/4/2003	voçoroca	239004	6853436	238947	6853336	120.0	9.5	2.0	V	4°	4°40'	10°11'	talvegue	-
18	3/4/2003	voçoroca	238549	6853228	238417	6853325	160.0	12.5	3.0	U	6°40'	6°40'	5°10'	talvegue	-
19	3/4/2003	voçoroca	241164	6853342	241139	6853380	45.0	10.2	1.5	U	4°30'	3°50'	4°30'	talvegue	-
20	3/4/2003	voçoroca	240722	6853491	240782	6853462	65.0	4.1	4.2	V	11°	6°20'	12°50'	talvegue	V
21	3/4/2003	ravina	240723	6852743	240630	6852798	110.0	1.4	0.4	U	4°40'	4°40'	7°	talvegue	-
22	3/4/2003	voçoroca	239977	6851879	239903	6851938	95.0	15.3		???	4°30'	4°50'	6°10'	talvegue	-
23	29/5/2003	ravina	241720	6851950	241698	6852024	69.0	0.3	0.8	U	30'	2°50'	8°50'	talvegue	-
24	29/5/2003	voçoroca	243195	6851624	243179	6851522	140.0	50.0	9.0	U	50'	2°50'	10°20'	talvegue	U
25	29/5/2003	voçoroca	242875	6853250	242742	6853057	230.0	4.0	4.0	U	9°10'	2°30'	4°20'	talvegue	U
26	29/5/2003	voçoroca	243888	6851408	243848	6851363	60.0	8.0	1.0	U	8°20'	7°20'	4°30'	talvegue	-
27	29/5/2003	voçoroca	245716	6848381	245751	6848351	45.0	41.5	2.0	U	5°40'	4°20'	14°	talvegue	-
28	29/5/2003	voçoroca	245455	6847255	245442	6847282	25.0	26.5	1.5	U	1°50'	5°50'	9°30'	talvegue	-
29	29/5/2003	voçoroca	244684	6846864	244770	6846987	150.0	10.0	6.0	V	3°20'	9°50'	7°40'	talvegue	-
30	30/5/2003	voçoroca	242502	6850949	242513	6850895	120.0	10.0	4.0	V	7°10'	6°30'	6°20'	talvegue/canal	-
31	30/5/2003	ravina	243138	6849861	243176	6849716	150.0	1.5	0.5	U	3°50'	4°40'	5°10'	talvegue	-
32	30/5/2003	voçoroca	241916	6850918	241956	6850878	110.0	5.0	2.0	V	5°10'	4°10'	6°40'	talvegue/canal	V
33	30/5/2003	voçoroca	241562	6850392	241496	6850311	110.0	5.0	3.0	V	6°50'	7°50'	7°20'	talvegue	-
34	30/5/2003	voçoroca	241626	6850168	241678	6850119	70.0	4.0	3.0	V	6°30'	6°50'	5°20'	talvegue	-
35	30/5/2003	voçoroca	242642	6848724	242446	6848705	200.0	11.0	4.5	V	7°40'	7°40'	6°20'	talvegue/canal	V
36	30/5/2003	voçoroca	245269	6849105	245199	6849147	80.0	3.0	1.0	U	5°40'	4°50'	7°	fora	-
37	30/5/2003	ravina	245409	6848336	245333	6848142	210.0	0.5	0.5	U	6°30'	4°50'	5°50'	fora	-
38	30/5/2003	voçoroca	245145	6848190	245266	68482133	130.0	31.0	3.2	U	6°30'	4°50'	5°50'	talvegue/canal	U
39	30/5/2003	voçoroca	245028	6847741	244985	6847573	170.0	40.0	10.0	V	5°10'	5°10'	4°10'	talvegue	-
40	31/5/2003	ravina	241623	6847161	241593	6847298	140.0	2.0	0.5	V	5°50'	5°	3°40'	talvegue	-
41	31/5/2003	voçoroca	240924	6847397	240921	6847402	6.0	3.3	2.0	U	3°10'	6°	3°10'	talvegue/canal	U
42	31/5/2003	voçoroca	240625	6847332	240738	6847472	180.0	11.0	5.0	V	3°50'	3°50'	3°10'	talvegue	-
43	31/5/2003	voçoroca	241304	6849341	241319	6849311	30.0	11.2	3.7	U	6°30'	6°50'	2°50'	talvegue	-
44	31/5/2003	voçoroca	241172	6849290	241293	6849224	140.0	12.0	4.0	U	5°50'	4°30'	5°10'	talvegue	-
45	31/5/2003	voçoroca	240888	6850347	240866	6850429	80.0	5.0	1.8	V	4°30'	4°30'	6°20'	talvegue	-

ID	DATA	TIPO EROSAO	INICIO		FIM		COMP(M)	LARGURA (M)	PROF (M)	SEÇÃO EROSAO	DECLIV. VE	DECLIV. VD	DECLIV. CANAL	SITUAÇÃO DRENAGEM	SEÇÃO CANAL
			UTM E	UTM S	UTM E	UTM S									
46	31/5/2003	voçoroca	241059	6851382	241048	6851396	20.0	5.7	1.8	U	7°30'	6°40'	6°40'	talvegue/canal	U
47	31/5/2003	ravina	236692	6850439	236635	6850638	210.0	2.0	0.5	U	5°10'	5°20'	3°50'	talvegue	-
48	31/5/2003	voçoroca	238020	6848256	237995	6848514	260.0	12.5	3.8	U	2°40'	4°50'	6°40'	talvegue	-
49	31/5/2003	voçoroca	238979	6848412	239031	6848432	60.0	6.0	4.0	U	4°50'	6°10'	4°	talvegue	-
50	31/5/2003	voçoroca	237909	6851642	237858	6851690	70.0	10.0	5.0	V	7°30'	5°30'	4°10'	talvegue	-
51	1/6/2003	voçoroca	235832	6851662	235787	6851625	60.0	6.5	3.0	U	3°50'	3°40'	1°10'	talvegue	-
52	1/6/2003	voçoroca	234094	6851257	234252	6851204	170.0	5.0	2.3	V	5°40'	6°30'	4°10'	talvegue	-
53	1/6/2003	voçoroca	232546	6851587	232479	6851509	100.0	4.3	2.2	U	10°20'	4°40'	4°20'	talvegue	-
54	1/6/2003	voçoroca	232168	6851769	232098	6851687	110.0	2.5	1.0	U	6°	5°10'	4°50'	talvegue	-
55	1/6/2003	voçoroca	232049	6851703	232015	6851646	70.0	2.0	1.3	U	6°	5°10'	4°50'	talvegue/canal	U
56	2/6/2003	voçoroca	235398	6848617	235429	6849520	910.0	60.0	15.0	V	7°20'	3°20'	3°40'	talvegue	V
57	2/6/2003	voçoroca	235201	6849419	235227	6849624	210.0	15.0	6.0	U	4°50'	-	10°10'	talvegue	-
58	2/6/2003	voçoroca	234150	6849161	234060	6849322	200.0	10.0	3.5	U	7°40'	5°20'	4°40'	talvegue	-
59	2/6/2003	voçoroca	233206	6849761	233074	6849748	130.0	15.0	8.0	V	7°	4°40'	2°10'	talvegue	-
60	2/6/2003	voçoroca	237083	6853509			70.0	5.0	6.3	V	5°10'	3°50'	2°40'	talvegue	-
61	2/7/2003	voçoroca	236300	6854053	236305	6854042	20.0	4.5	2.8	V	2°30'	3°40'	3°40'	talvegue/canal	U
62	2/7/2003	voçoroca	236394	6854981	236435	6854967	40.0	19.0		-	6°10'	4°10'	8°30'	talvegue	-
63	2/7/2003	voçoroca	236467	6854851	236428	6855017	170.0	2.4	1.0	V	-	6°10'	5°20'	-	-
64	2/7/2003	ravina	236695	6855431	236697	6855337	90.0	2.0	0.5	U	7°30'	4°10'	2°10'	talvegue	-
65	2/7/2003	ravina	236821	6855132	236709	6855177	120.0	0.5	0.3	U	5°30'	4°10'	8°10'	talvegue	-
66	2/7/2003	voçoroca	236734	6855081	236715	6855159	80.0	5.0	0.3	?	5°30'	4°10'	8°10'	talvegue	-
67	2/7/2003	voçoroca	236444	6854627	236339	6854688	120.0	5.0	2.0	U	10°10'	1°	8°30'	talvegue	-
68	2/7/2003	voçoroca	236286	6854540	236299	6854729	190.0	14.0	2.0	U	9°10'	12°20'	8°10'	talvegue	-
69	2/7/2003	voçoroca	236277	6854736	236236	6854789	70.0	5.0		U	9°10'	12°20'	8°10'	talvegue	-
70	2/7/2003	voçoroca	236206	6854794	236122	6854821	90.0	10.0	3.0	V	9°10'	12°20'	8°10'	talvegue	-
71	3/7/2003	voçoroca	235734	6852918	235548	6853011	210.0	2.7	1.8	V	6°10'	-	7°10'	fora	-
72	3/7/2003	voçoroca	234765	6854125	234753	6854203	80.0	3.0	1.7	V	-	-	6°20'	talvegue	-
73	3/7/2003	voçoroca	234641	6854799	234580	6854848	80.0	3.0	1.8	U		2°10'	2°20'	talvegue/canal	U
74	3/7/2003	voçoroca	233301	6856389	233340	6856354	50.0	13.5	2.4	U	8°20'	3°10'	2°10'	talvegue	U
75	3/7/2003	voçoroca	235705	6855655	235599	6855612	100.0	10.8	3.5	U	5°20'	3°10'	4°20'	talvegue/canal	U
76	3/7/2003	voçoroca	233679	6852156	233645	6852123	50.0	2.4	1.6	V	4°30'	2°	3°10'	talvegue	V
77	3/7/2003	voçoroca	234041	6852697	234022	6852790	100.0	5.0	1.8	U	4°10'	2°10'	3°	talvegue	-
78	3/7/2003	voçoroca	234237	6853914	234223	6853985	70.0	4.5	2.1	U	7°10'	10°	8°20'	talvegue	-
79	3/7/2003	voçoroca	230617	6851897	230574	6852092	180.0	5.5	5.3	V	4°10'	4°10'	5°	talvegue	-
80	3/7/2003	voçoroca	236263	6856192	235963	6856201	280.0	5.3	4.1	V	4°20'	3°30'	6°10'	talvegue/canal	V
81	4/7/2003	voçoroca	231171	6854448	231180	6854372	79.0	14.0	7.0	U	4°10'	9°	3°10'	talvegue/canal	U
82	4/7/2003	voçoroca	230500	6854580	230495	6854440	100.0	10.0	5.0	-	4°50'	5°10'	7°10'	talvegue	-
83	4/7/2003	voçoroca	230386	6852965	230332	6852944	60.0	2.8	1.7	V	3°	2°	9°	talvegue	-
84	4/7/2003	ravina	230094	6853484	230062	6853453	40.0	8.9	0.6	U	4°	9°10'	14°30'	talvegue	-
85	17/11/2003	voçoroca	244847	6846869	244830	6846957	100.0	14.0	6.0	V	1°50'	5°40'	2°	talvegue	-
86	17/11/2003	voçoroca	244164	6847245	244153	6847332	-	-	-	-	3°10'	3°50'	4°	talvegue	-
87	17/11/2003	voçoroca	243297	6847741	243342	6847609	-	-	-	-	3°	4°	7°40'	talvegue	-
88	17/11/2003	voçoroca	244100	6848334	243785	6847792	-	-	-	-	5°10'	5°10'	4°10'	talvegue	-
89	17/11/2003	voçoroca	236759	6848990	236593	6849180	160.0	10.0	6.0	V	4°10'	3°50'	3°50'	talvegue	-
90	17/11/2003	voçoroca	237751	6853155	237820	6853125	-	-	-	-	6°10'	4°10'	3°	talvegue	-
91	17/11/2003	voçoroca	230175	6854485	230279	6854405	-	-	-	-	-	-	-	talvegue	91
92	17/11/2003	voçoroca	238797	6853539	238739	6853465	-	-	-	-	-	-	-	talvegue	92

Id	DIREÇÃO AZIMUTE	PIPING	CONCENTRAÇÃO ES	USO DO SOLO ATUAL	USO DO SOLO ANTERIOR	VEGETAÇÃO	SITUAÇÃO
1	80	horizonte C	talvegue, estrada	VD - potreiro, plantio direto	VD - potreiro, terraços	mata galeria e gramíneas	ativa
2	280	não identificado	talvegue	plantio direto	mata	mata galeria	estabilizada
3	90	não	talvegue	plantio direto	terraços	lavoura	ativa
4	50	horizonte C	talvegue	plantio direto	terraços	arbustos, lavoura	ativa
5	290	não	talvegue	plantio direto	terraços	lavoura	ativa
6	340	horizonte B	talvegue	plantio direto	terraços	lavoura	ativa
7	335	horizonte B	talvegue, estrada	plantio direto	terraços	lavoura	ativa
8	20	não identificado	talvegue	plantio direto	terraços	lavoura	ativa
9	20	não identificado	talvegue	plantio direto	terraços	lavoura	ativa
10	300	horizonte C	estrada, cerca	plantio direto	terraços	lavoura	ativa
11	310	não identificado	talvegue, estrada	campo	terraços	gramíneas	estabilizada
12	55	não identificado	talvegue, estrada	potreiro	terraços	gramíneas	ativa
13	345	não	talvegue	potreiro	terraços	gramíneas	ativa
14	295	não	talvegue	potreiro	potreiro	gramíneas	ativa
15	325	não	cerca	potreiro	terraços	gramíneas	estabilizada
16	45	não	estrada, cerca	potreiro	potreiro	gramíneas	ativa
17	45	não	estrada, cerca	potreiro	potreiro	gramíneas	estabilizada
18	325	não	cerca	potreiro	potreiro	gramíneas	estabilizada
19	315	não	cerca	potreiro	terraços	gramíneas	estabilizada
20	70	sim	estrada, cerca	plantio direto, potreiro	lavoura de cana	mato	ativa
21	315	não	estrada	plantio direto	terraços	lavoura	ativa
22	305	não identificado	talvegue	plantio direto	terraços	lavoura	recuperada
23	350	não		plantio direto	terraços	lavoura	ativa
24	15	horizonte C	talvegue	plantio direto	terraços	lavoura	ativa
25	30	não	talvegue, estrada	plantio direto	terraços	lavoura	ativa
26	30	não	talvegue, estrada	plantio direto	terraços	lavoura	recuperada
27	300	horizonte C	talvegue	plantio direto	terraços	gramíneas	ativa
28	10	não	talvegue, estrada	plantio direto	terraços	lavoura	ativa
29	35	Foto	talvegue, estrada	plantio direto	terraços	lavoura	ativa
30	10	horizonte C	talvegue, estrada	plantio direto	terraços	lavoura	ativa
31	345	não	talvegue, estrada	plantio direto	terraços	lavoura	ativa
32	310	não identificado	talvegue, estrada	plantio direto	terraços	arbustiva	ativa
33	35	não identificado	talvegue, estrada	plantio direto	terraços	arbustiva	ativa
34		não identificado	talvegue, estrada	plantio direto	terraços	mata ciliar	estabilizada
35		horizonte C/RA	talvegue, estrada	plantio direto	terraços	lavoura	ativa
36	320	não	estrada	campo	terraços	gramíneas	ativa
37	310	não	cerca	campo	terraços	gramíneas	ativa
38	280	horizonte C	talvegue	campo	terraços	gramíneas	ativa
39	15	horizonte C.	talvegue	campo	terraços	gramíneas	ativa
40	345	horizonte B	talvegue, cerca	plantio direto	terraços	lavoura	ativa
41	335	não	talvegue	plantio direto	terraços	lavoura	ativa
42	45	sim	talvegue, cerca	plantio direto	terraços	lavoura	ativa
43	335	não	talvegue	plantio direto	terraços	lavoura	ativa
44	305	não	talvegue	plantio direto	terraços	arbustiva	estabilizada
45	350	não	talvegue, estrada ,cerca	plantio direto	terraços	arbustiva/gramíneas	estabilizada

Id	DIREÇÃO AZIMUTE	PIPING	CONCENTRAÇÃO ES	USO DO SOLO ATUAL	USO DO SOLO ANTERIOR	VEGETAÇÃO	SITUAÇÃO
46	300	não	talvegue, cerca	plântio direto	terraços	arbustiva	estabilizada
47	340	não	talvegue	plântio direto	terraços	lavoura	ativa
48	325	não	talvegue, estrada	plântio direto	terraços	arbustiva	estabilizada
49	285	não	talvegue, estrada	plântio direto	terraços	lavoura	estabilizada
50		não	talvegue	plântio direto	terraços	lavoura	ativa
51	70	não	talvegue, estrada	VD-potreiro, VE-plântio direto	VD-potreiro, VE-terraços	gramíneas	ativa
52	310	não	talvegue, estrada	plântio direto	terraços	lavoura	ativa
53	45	não	talvegue, estrada	plântio direto	terraços	lavoura	ativa
54	10	não	talvegue	plântio direto	terraços	gramíneas	ativa
55	315	não	talvegue	plântio direto	terraços	arbustiva	estabilizada
56	0	não observado	talvegue	campo	campo	mato/gramíneas	ativa
57	20	não	talvegue	campo	campo	arbustiva	estabilizada
58	335	horizonte C	talvegue	plântio direto	terraços	arbustiva/gramíneas	estabilizada
59	300	não observado	talvegue	plântio direto	terraços	arbustiva/gramíneas	estabilizada
60	305	horizonte C/RA	talvegue, estrada	plântio direto	terraços	lavoura	ativa
61	335	horizonte C	talvegue, estrada	plântio direto	terraços	lavoura	ativa
62	290	não identificado	talvegue, cerca	plântio direto	terraços	gramíneas	recuperada
63	325	não	cerca	plântio direto	terraços	lavoura	estabilizada
64	360	horizonte A	talvegue	plântio direto	terraços	lavoura	ativa
65	85	não	talvegue	plântio direto	terraços	lavoura	ativa
66	320		talvegue	plântio direto	terraços	lavoura	recuperada
67	40	não identificado	talvegue, estrada, cerca	potreiro	estrada	gramíneas	estabilizada
68	15	não	talvegue, estrada	potreiro	potreiro	gramíneas	estabilizada
69	320		talvegue, estrada	potreiro	potreiro	gramíneas	recuperada
70	70	horizonte C	talvegue, estrada	potreiro	potreiro	gramíneas	estabilizada
71	310	não	divisa de lavoura	plântio direto	terraços	arbustiva	ativa
72	330	não identificado	talvegue, estrada	plântio direto	terraços	arbustiva	ativa
73	335	horizonte C	talvegue, estrada	plântio direto	terraços	arbustiva	ativa
74	310	não	talvegue, cerca	potreiro, plântio direto a montante	potreiro, terraços a montante	gramíneas	estabilizada
75	40	não	talvegue, cerca	potreiro	terraços	gramíneas	ativa
76	20	horizonte C	talvegue, estrada	plântio direto	terraços	lavoura (milho)	ativa
77	350	não	talvegue	potreiro	potreiro	gramíneas	estabilizada
78	355	não	talvegue, estrada, cerca	potreiro	potreiro	gramíneas	estabilizada
79	330	não observado	talvegue, estrada	plântio direto	terraços	lavoura	ativa
80	90	não identificado	talvegue, estrada	VD plântio direto, VE potreiro	VD terraços, VE potreiro	gramíneas, mata ciliar	ativa
81	5	não	talvegue, estrada	VD plântio direto, VE estrada	terraços	gramíneas, arbustiva	estabilizada
82	5	não identificado	talvegue, estrada	plântio direto	terraços	lavoura	recuperada
83	35	não	talvegue	campo	terraços	gramíneas	recuperada
84	80	não	talvegue	campo	campo	gramíneas	ativa
85	-	não	talvegue, estrada, cerca	campo	terraços	gramíneas	estabilizada
86	-	-	talvegue	plântio direto	terraços	lavoura	recuperada
87	-	-	talvegue	plântio direto	terraços	lavoura	recuperada
88	-	-	talvegue	plântio direto	terraços	lavoura	recuperada
89	-	-	talvegue, estrada	plântio direto	terraços	lavoura	estabilizada
90	-	-	talvegue	plântio direto	terraços	lavoura	recuperada
91	-	-	talvegue	plântio direto	terraços	lavoura	recuperada
92	-	-	talvegue	plântio direto	terraços	lavoura	estabilizada