

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

**AVALIAÇÃO DA SUSCETIBILIDADE A DESLIZAMENTOS POR
MEIO DO USO DE SISTEMA DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS:
APLICAÇÃO EM UMA ÁREA DO EIXO CAFETEIRO COLOMBIANO**

Geóloga. JENNY ALEXANDRA CORONADO DELGADO

ORIENTADOR: NORIS COSTA DINIZ, DSc.

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM GEOTECNIA

PUBLICAÇÃO: G.DM 149/06

BRASÍLIA / DF: OUTUBRO, 2006.

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

**AVALIAÇÃO DA SUSCETIBILIDADE A DESLIZAMENTOS POR
MEIO DO USO DE SISTEMA DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS:
APLICAÇÃO EM UMA ÁREA DO EIXO CAFETEIRO COLOMBIANO.**

JENNY ALEXANDRA CORONADO DELGADO

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A
OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE.**

APROVADA POR:

**NORIS COSTA DINIZ, DSc, UnB
(ORIENTADOR)**

**LUIS FERNANDO MARTINS RIBEIRO, DSc, UnB
(EXAMINADOR INTERNO)**

**RENATO FONTES GUIMARÃES, DSc, UnB
(EXAMINADOR EXTERNO)**

DATA: BRASÍLIA/DF, 30 de Outubro de 2006.

FICHA CATALOGRÁFICA

CORONADO, JENNY ALEXANDRA

Avaliação da Suscetibilidade a Deslizamentos por Meio do Uso de Sistema de Informações Geográficas: Aplicação em uma Área do Eixo Cafeteiro Colombiano. xvii, 92 p., 297 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Geotecnia, 2006)

Dissertação de Mestrado - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Civil

- | | |
|---------------------------------------|-----------------------------|
| 1. Movimentos de Massa | 2. Mapas de Suscetibilidade |
| 3. Sistema de Informações Geográficas | 4. Risco Geológico |
| I. ENC/FT/UnB | II. Título (série) |

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

CORONADO, J. A. (2006). Avaliação da Suscetibilidade a Deslizamentos por Meio do Uso de Sistema de Informações Geográficas: Aplicação em uma Área do Eixo Cafeteiro Colombiano. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM 149/06, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 92 p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: CORONADO, JENNY ALEXANDRA

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO: Avaliação da Suscetibilidade a Deslizamentos por Meio do Uso de Sistema de Informações Geográficas: Aplicação em uma Área do Eixo Cafeteiro Colombiano.

GRAU / ANO: Mestre / 2006

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

Jenny Alexandra Coronado Delgado
SQSW 304 Bloco I apto. 607
Brasília – DF.

DEDICATÓRIA

A Luciano e Gabriel

AGRADECIMENTOS

À Universidade de Brasília e a CAPES pela oportunidade proporcionada.

Aos professores da Geotecnia em especial à professora Noris Diniz por sua orientação. Ao Laboratório de Sistemas de Informações Espaciais (LSIE) do Departamento de Geografia da UnB pela colaboração prestada durante o desenvolvimento deste trabalho, em especial a Roberto Gómez.

A INGEOMINAS pelo acesso as informações técnicas, especialmente à Engenheira Yolanda Calderón.

Aos amigos Susana, Hugo, Luciana, Íris, Mariana, James, Isabela, Joice, Wallace, Priscila e Hector pela sua amizade durante estes anos.

A minha família na Colômbia e a minha família no Brasil por seu apoio constante.

A Luciano por seu apoio, compreensão e ajuda.

RESUMO

A Região Andina colombiana, onde se localiza o chamado Eixo Cafeteiro, apresenta características geológicas, geomorfológicas, morfodinâmicas e climáticas que a fazem suscetível a sofrer diferentes tipos de eventos naturais ameaçadores como enchentes, deslizamentos e sismos. Estes fenômenos podem chegar a constituir riscos de tipo geológico para o desenvolvimento da região, afetando tanto à população quanto às infra-estruturas e obras locais em geral.

O trabalho desenvolvido nesta dissertação tem como objetivo o estudo de um destes processos geodinâmicos em especial, a avaliação da suscetibilidade do terreno a sofrer deslizamentos, numa área de 189 km² localizada no Eixo Cafeteiro, onde apresenta-se um elevado número destes processos.

A metodologia desenvolvida para esta avaliação usa como ferramenta principal o Sistema de Informações Geográficas (SIG) e está dividida em cinco etapas principais: Montagem da base de dados, Análise de dados, Modelagem da suscetibilidade, Avaliação do Perigo e Determinação das áreas de risco. Com a finalidade de fazer uma avaliação quantitativa de cada um dos fatores que influenciam a estabilidade do terreno na área, foram utilizados os índices: Frequência da classe (F), Frequência de Deslizamento (FD) e Potencial de Deslizamento (PD).

A carta de suscetibilidade gerada neste trabalho tem como objetivo servir de referência para o monitoramento das áreas de maior perigo a deslizamentos, assim como, locais para execução de investigações complementares.

ABSTRACT

The Andean portion of Colombia, where the “Eixo Cafeteiro” is located, displays geological, geomorphological, morphodynamic, and climatic features that makes it susceptible to experience different types of natural events such as floods, landslides, and earthquakes. These phenomena may represent a geological risk to the region affecting population as well as facilities in general.

The research presented in this work was directed to study one of these geodynamic processes, specifically the assessment of susceptibility of this terrain to present landslides, in an area of 189 km² located in the “Eixo Cafeteiro”, where a large number of these processes occur.

The approach used to this assessment uses as a main tool Geographic Information Systems (GIS), and it is divided into five main stages: Generation of a database, data analysis, susceptibility modeling, risk assessment, and determination of risk areas. To quantitatively assess each factor that affects the terrain stability in the area, these indices were used: Class Frequency (F), Landslide Frequency (FD), and Landslide Potential (PD).

The objective of the susceptibility map produced by this work is to be used as a reference to monitor areas at greater risk to landslide, as well as other areas where further research should be made.

ÍNDICE

DEDICATÓRIA.....	iv
AGRADECIMENTOS.....	v
RESUMO	vi
ABSTRACT	vii
ÍNDICE	vii
LISTA DE TABELAS	xi
LISTA DE FIGURAS	xiii
LISTA DE SÍMBOLOS, ABREVIACÕES E NOMENCLATURA.....	xvi
1. INTRODUÇÃO	1
1.1 OBJETIVOS.....	2
1.1.1 Objetivo Principal	2
1.1.2 Objetivos Específicos.....	2
1.2 ESCOPO DO TRABALHO	3
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1 CONCEITOS BÁSICOS DE MOVIMENTOS DE MASSA	4
2.1.1 Tipos de Movimentos de Massa	5
2.1.2 Fatores que Afetam a Estabilidade do Terreno	8
2.2 TERMOS USADOS NA ANÁLISE DE RISCO.....	13
2.3 TIPOS DE CARTAS USADAS E PRODUZIDAS NAS ANÁLISES DE RISCO	14
2.4 METODOLOGIAS USADAS PARA A MODELAGEM E AVALIAÇÃO DA SUSCETIBILIDADE E AMEAÇA.....	16
2.5 ESCALAS DE TRABALHO	18
2.5.1 Unidades de Terreno Utilizadas	18
2.6 SISTEMA DE INFORMACÕES GEOGRÁFICAS (SIG).....	19
2.6.1 Estrutura de um SIG	20
2.6.2 Tipos de Dados	20
2.6.3 Fatores Usados como Dados de Entrada na Análise de Risco por Deslizamento no SIG.....	23
2.6.4 Avaliação do erro no SIG	23
3. DESCRIÇÃO GERAL DA ÁREA DE ESTUDO	25
3.1 LOCALIZAÇÃO	25

3.2 GEOLOGIA REGIONAL.....	26
3.2.1 Geologia.....	26
3.2.2 Geologia Estrutural.....	29
3.2.3 Geomorfologia.....	29
3.3 SOLOS	31
3.3.1 Caracterização Geotécnica	33
3.4. CLIMATOLOGIA	34
3.5. VEGETAÇÃO E USO DO SOLO	35
4. PROPOSTA METODOLÓGICA PARA ANÁLISE E AVALIAÇÃO DO PERIGO E RISCO A DESLIZAMENTOS NA ÁREA ESTUDADA.....	36
4.1 DADOS DE ENTRADA PARA A ANÁLISE	38
4.1.1 Obtenção dos Mapas Básicos	39
4.1.2 Elaboração dos Mapas Derivados.....	51
4.1.3 Inventário Geral de Deslizamentos.....	53
4.2 MODELO USADO NA AVALIAÇÃO	54
4.2.1 Modelagem da suscetibilidade.....	57
4.2.2 Processamento de dados no SIG.....	60
4.2.3 Avaliação do Perigo.....	61
5. RESULTADOS E ANÁLISE	63
5.1 DECLIVIDADE	63
5.2 GEOLOGIA	65
5.3 GEOMORFOLOGIA	67
5.4 SOLOS	70
5.5 FORMA DO RELEVO	72
5.6 ASPECTO	74
5.7 ELEVAÇÃO	76
5.8 PRECIPITAÇÃO	78
5.9 EVAPOTRANSPIRAÇÃO	81
5.10 RESULTADOS PARA A CARTA DE SUSCEPTIBILIDADE AOS MOVIMENTOS DE MASSA.....	83
6. CONCLUSÕES.....	84
6.1 CONCLUSÕES SOBRE OS SISTEMAS DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA	84
6.2 CONCLUSÕES SOBRE O MODELO APLICADO.....	84
6.3 CONCLUSÕES SOBRE A ÁREA DE ESTUDO	86

6.4 RECOMENDAÇÕES	87
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	88

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1. Tipos de Movimentos de Massa.	4
Tabela 2.2. Magnitudes aproximadas e tipos de deslizamentos causados.	12
Tabela 2.3. Principais fatores associados ao zoneamento da suscetibilidade a deslizamentos.	24
Tabela 3.1. Classificação textural de solos usada pelo INGEOMINAS.	31
Tabela 3.2. Classificação do sistema unificado de solos, usada pelo INGEOMINAS.	32
Tabela 3.3. Propriedades geotécnicas dos materiais do subsolo da cidade de Armênia.	34
Tabela 4.1. Intervalos de precipitação na área de estudo.	50
Tabela 4.2. Intervalos de evapotranspiração na área de estudo.	51
Tabela 4.3. Fatores e classes usadas no estudo.	56
Tabela 4.4. Pesos atribuídos aos fatores e classes usadas no estudo.	59
Tabela 4.5. Níveis de Suscetibilidade obtidos.	61
Tabela 5.1. Frequência das classes e Frequência de deslizamentos no fator declividade.	63
Tabela 5.2. Potencial de deslizamento para as classes de declividade.	64
Tabela 5.3. Frequência das classes e Frequência de deslizamentos no fator geologia.	65
Tabela 5.4. Potencial de deslizamento para as classes de geologia.	67
Tabela 5.5. Frequência das classes e Frequência de deslizamentos no fator geomorfologia.	68
Tabela 5.6. Potencial de deslizamento para as classes de geomorfologia.	69
Tabela 5.7. Frequência das classes e Frequência de deslizamentos no fator solos.	70
Tabela 5.8. Potencial de deslizamento para as classes de solos.	71
Tabela 5.9. Frequência das classes e Frequência de deslizamentos no fator forma.	72
Tabela 5.10. Potencial de deslizamento para as classes da forma.	73
Tabela 5.11. Frequência das classes e Frequência de deslizamentos no fator aspecto.	74
Tabela 5.12. Potencial de deslizamento para as classes de aspecto.	75
Tabela 5.13. Frequência das classes e Frequência de deslizamentos no fator	76

elevação.

Tabela 5.14. Potencial de deslizamento para as classes de elevação. 78

Tabela 5.15. Freqüência das classes e Freqüência de deslizamentos no fator precipitação. 79

Tabela 5.16. Potencial de deslizamento para as classes de precipitação. 80

Tabela 5.17. Freqüência das classes e Freqüência de deslizamentos no fator evapotranspiração. 81

Tabela 5.18. Potencial de deslizamento para as classes de evapotranspiração. 82

Tabela 5.19 Distribuição dos níveis de susceptibilidade para carta de susceptibilidade da área de estudo. 83

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Esquema ilustrativo de queda de rocha.	5
Figura 2.2. Esquema ilustrativo de tombamento.	5
Figura 2.3. Esquema ilustrativo de: (a) deslizamento rotacional e (b) deslizamento translacional.	6
Figura 2.4. Esquema ilustrativo de expansões laterais.	7
Figura 2.5. Esquema ilustrativo de: (a) corrida de detritos e (b) corrida de lama.	7
Figura 2.6. Representação dos dados de entrada no SIG.	20
Figura 2.7. Representação dos modelos usados no SIG.	21
Figura 2.8. Representação das tabelas usadas no SIG.	22
Figura 3.1. Localização do Departamento do Quindío.	25
Figura 3.2. Mapa geológico geral do Departamento do Quindío.	27
Figura 3.3. Geomorfologia geral da região Cafeteira Colombiana.	30
Figura 3.4. Agrupação textural do solo do Departamento de Quindío.	33
Figura 3.5. Cobertura do solo do Departamento de Quindío.	35
Figura 4.1. Fluxograma com as principais etapas da proposta metodológica para a elaboração do trabalho.	37
Figura 4.2. Departamento de Quindío, detalhe da área de estudo.	38
Figura 4.3. Esquema das cartas do Departamento de Quindío usadas para este trabalho.	39
Figura 4.4. Aspecto geral dos fluxos piroclásticos na região com coberturas locais de cinzas vulcânicas.	41
Figura 4.5. Aspecto geral dos fluxos laharicos na região.	42
Figura 4.6. Serras estruturais homoclinais ao ocidente da Cidade de Calarcá.	44
Figura 4.7. Aspecto geral das facetas triangulares na região. Observa-se a presença de várias gerações de facetas triangulares, indicadoras de vários eventos de atividade de falhamento.	45
Figura 4.8. Aspecto dos deslizamentos rotacionais na área de estudo, margem direita do Rio Santo Domingo.	47
Figura 4.9. Aspecto dos deslizamentos translacionais na área de estudo, margem	47

esquerda da cabeceira do Rio Santo Domingo.

Figura 4.10. Aspecto geral das planícies de inundação na região.	48
Figura 4.11. Detalhe da área média de deslizamentos.	54
Figura 4.12. Esquema ilustrativo da metodologia bivariada.	55
Figura 4.13. Fluxograma das etapas desenvolvidas no processamento de dados e obtenção de produtos finais no SIG.	60
Figura 4.14. Povoados e estradas presentes na área de estudo.	62
Figura 5.1. Distribuição das classes de declividade na área de estudo e dos deslizamentos em cada uma das mesmas.	64
Figura 5.2. Distribuição do potencial de deslizamento para as classes de declividade.	65
Figura 5.3. Distribuição das classes litológicas na área de estudo e dos deslizamentos em cada uma das mesmas.	66
Figura 5.4. Distribuição do potencial de deslizamento para as classes de geologia.	67
Figura 5.5. Distribuição das classes geomorfológicas na área de estudo e dos deslizamentos em cada uma das mesmas.	68
Figura 5.6. Distribuição do potencial de deslizamento para as classes de geomorfologia.	70
Figura 5.7. Distribuição das classes de solo na área de estudo e dos deslizamentos em cada uma das mesmas.	71
Figura 5.8. Distribuição do potencial de deslizamento para as classes de solos.	72
Figura 5.9. Distribuição das classes da forma na área de estudo e dos deslizamentos em cada uma das mesmas.	73
Figura 5.10. Distribuição do potencial de deslizamento para as classes de forma.	74
Figura 5.11. Distribuição das classes de aspecto na área de estudo e dos deslizamentos em cada uma das mesmas.	75
Figura 5.12. Distribuição do potencial de deslizamento para as classes de aspecto.	76
Figura 5.13. Distribuição das classes de elevação na área de estudo e dos deslizamentos em cada uma das mesmas.	77
Figura 5.14. Distribuição do potencial de deslizamento para as classes de elevação.	78
Figura 5.15. Distribuição das classes de precipitação na área de estudo e dos deslizamentos em cada uma das mesmas.	79
Figura 5.16. Distribuição do potencial de deslizamento para as classes de precipitação.	80

Figura 5.17. Distribuição das classes de evapotranspiração na área de estudo e dos deslizamentos em cada uma das mesmas.	81
Figura 5.18. Distribuição do potencial de deslizamento para as classes de evapotranspiração.	82

LISTA DE SÍMBOLOS, ABREVIACIONES E NOMENCLATURA

ϕ' : Ângulo de atrito efetivo do solo

AAC: Área atingida em cada classe

AAT: Área atingida total

AC: Área da classe

AT: Área Total

aprox: aproximadamente

cm²: centímetros quadrados

c': Coesão efetiva

D/L: Profundidade/Comprimento (Depth/Length)

DIRDN: Década Internacional de Redução de Desastres Naturais

E: Leste

ESRI: Environmental System Research Institute

FS: Fator de segurança

F: Frequência da classe

FD: Frequência de Deslizamento

°: graus

°C: graus centígrados

IAEG: International Association for Engineering Geology and the environment

IDEAM: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia

IGAC: Instituto Geográfico Agustín Codazzi

CRQ: Corporación Autónoma Regional del Quindío

γ (T/m³): Peso específico do solo

FNC: Federación Nacional de Cafeteros

Gs: Peso específico dos grãos do solo

INGEOMINAS: Instituto Colombiano de Geología y Minería

IP: Índice de plasticidade

Iso-ETP: Iso-evapotranspiração média anual

IUGS: International Union of Geological Science

kg: quilogramas

km²: quilômetros quadrados

LL: Limite de liquidez

LSIE: Laboratório de Sistemas de Informações Espaciais

LP: Limite de plasticidade
m: Metros
m²: Metros quadrados
mm: Milímetros
MDT: Modelo Digital do Terreno
MNT: Modelo numérico do terreno
N: Norte
NE: Noreste
NNE: Nor-noreste
NW: Noroeste
PD: Potencial de Deslizamento
S: Sul
SE : Sudeste
SIG: Sistema de Informações Geográficas
SW: Sudoeste
USGS: United States Geological Service
W: Oeste
Wn (%): Umidade natural

1. INTRODUÇÃO

A história dos desastres naturais na Colômbia é extensa, entre eles se destaca a corrida de massa do Rio Paes em 1994, deflagrada por um sismo, o que provocou cerca de 50 deslizamentos associados, afetando uma área de 250 km², gerando perdas significativas tanto econômicas quanto humanas (Rodríguez et al., 1999). Segundo Garcia (2004) os movimentos de massa junto com as inundações constituem-se nos riscos naturais mais severos no país, a isto se soma a falta de critérios para a delimitação das zonas susceptíveis a estes riscos, e por tanto, a instalação inadequada de centros urbanos, industriais e agrícolas.

A ocorrência destes eventos ameaçadores deve-se principalmente às diversas e variadas características geográficas e fisiográficas do país, sendo eles deflagrados tanto por fatores naturais quanto antrópicos. A região andina colombiana, principalmente o Eixo Cafeteiro apresenta condições particulares como relevo, clima, geologia, tectonismo, erosão, entre outras que fazem a região vulnerável para a ocorrência de processos geodinâmicos como deslizamentos, enchentes e sismos. Estes fenômenos podem chegar a constituir-se como um risco de tipo geológico para o desenvolvimento da região, afetando tanto à população quanto às infra-estruturas e obras locais em geral.

Os movimentos de massa constituem um risco geológico de tipo natural ou induzido, que deve ser considerado sobretudo nas regiões montanhosas, como a Região Andina Colombiana. No entanto, a percepção deste tipo de fenômenos naturais é baixa quando comparada com outros, como enchentes ou sismos. Isto se deve, principalmente, ao menor número de vítimas fatais (com exceção dos deslizamentos deflagrados por sismos) nestes tipos de fenômenos, por estarem a maioria deles localizados em zonas de difícil acesso e pouco povoadas.

Considerando estas características, atualmente é fundamental a implementação de técnicas para a análise e previsão destes riscos, neste caso tendo-se em conta que estas técnicas devem adequar-se ao marco ambiental e técnico-científico colombiano.

A melhor maneira de permitir a redução destes desastres é por meio de sua prevenção. Uma das ferramentas mais usadas atualmente para a análise e avaliação destes fenômenos são os

Sistema de Informações Geográficas (SIG), que permitem a modelagem da suscetibilidade da área e a elaboração das cartas de suscetibilidade e ameaça ou perigo de uma maneira sistemática, rápida e eficiente.

Este trabalho pretende servir como uma ferramenta para a avaliação de riscos de deslizamentos na área de estudo localizada no eixo cafeteiro, visando a sua utilização para a prevenção e mitigação de desastres na região de Quindío, Colômbia.

1.1. OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Principal

Estruturar e aplicar uma metodologia para a elaboração de cartas de suscetibilidade e perigo de deslizamentos no contexto da área de estudo, que possibilite sua aplicação em outras áreas na mesma região, e que sirva como uma ferramenta para a prevenção deste tipo de risco, orientando a implantação de sistemas de monitoramento e emergência bem como locais para execução de investigações complementares a estes.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Elaborar uma compilação completa de informação, mapas e estudos existentes na área, de forma a consolidar uma base de dados apropriada e completa para o desenvolvimento do trabalho.
- Identificar e avaliar o comportamento de cada um dos fatores que podem influenciar a ocorrência dos movimentos de massa na área de estudo e sua interação.
- Aprender a usar o sistema de informações geográficas (SIG) como ferramenta de trabalho para o desenvolvimento desta pesquisa.
- Gerar o Modelo Digital do Terreno (MDT), mapa de declividade, mapa de inventario de deslizamentos da área de estudo e os mapas temáticos em geral.
- Fazer uma modelagem da suscetibilidade a deslizamentos na área de estudo.
- Avaliar o perigo de deslizamentos de uma área específica no Departamento de Quindío e gerar uma carta de perigo a deslizamentos utilizando o Sistema de Informações Geográficas (SIG).

1.2 ESCOPO DO TRABALHO

O presente trabalho consta de 6 capítulos conformados da seguinte forma:

O capítulo 1 corresponde à introdução ao tema em geral e apresenta a justificativa da escolha do tema de pesquisa e os objetivos a serem alcançados.

O capítulo 2 faz referência aos conceitos básicos de movimentos de massa, como classificação, mecanismos de deflagração e fatores associados. Posteriormente, se introduz a parte terminológica de riscos e as metodologias usadas para a análise do mesmo. Por último se abordam os conceitos básicos do SIG e sua aplicação na avaliação da suscetibilidade a deslizamentos.

O capítulo 3 corresponde à descrição da área de estudo que inclui geologia, geomorfologia, solos, climatologia e vegetação.

O capítulo 4 expõe a proposta metodológica utilizada neste trabalho e aplicada na área de estudo. Neste capítulo, se descrevem cada um dos fatores usados como dados de entrada para a análise assim como o modelo usado para fazer a modelagem da suscetibilidade e a avaliação do risco.

O capítulo 5 corresponde aos resultados obtidos da análise de cada um dos fatores avaliados na modelagem da suscetibilidade a deslizamentos na área de estudo, e o comportamento de cada um dos fatores com respeito aos deslizamentos.

O capítulo 6 corresponde às conclusões do trabalho e recomendações para trabalhos futuros.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. CONCEITOS BÁSICOS DE MOVIMENTOS EM MASSA

O termo movimentos de massa tem sido definido por muitos pesquisadores da área, entre eles Varnes (1985), Cruden (1990). Em geral os movimentos de massa referem-se a processos geológicos exógenos, de tipo natural ou induzido, que envolvem mobilização de volumes de materiais (tais como rocha, solo ou detritos) encosta abaixo, por ação da gravidade.

Da mesma maneira, existem vários trabalhos que discutem as diferentes classificações destes movimentos, no entanto, a maioria deles consideram dois aspectos básicos: o tipo de ruptura e a natureza do material mobilizado. A classificação mais conhecida e trabalhada mundialmente corresponde à proposta por Varnes (1978) que reúne de forma completa e simplificada os diferentes tipos de movimentos (Tabela 2.1).

Tabela 2.1. Tipos de movimentos de massa, versão abreviada de Varnes (1978).

TIPO DE MOVIMENTO		TIPO DE MATERIAL		
		ROCHA	SOLOS	
			Predominantemente grosso	Predominantemente fino
QUEDAS		Queda de blocos	Queda de detritos	Queda de solo
TOMBAMENTOS		De rocha	De detritos	De solo
DESLIZAMENTOS	ROTACIONAIS	De rocha	De detritos	De solo
	TRANSLACIONAIS			
EXPANSÕES LATERAIS		De rocha	De detritos	De solo
CORRIDAS OU FLUXOS		De rochas	De detritos	De solo
			Rastejo	
COMPLEXOS		Combinação de dois ou mais tipos de movimentos		

No entanto, existem outras classificações baseadas na classificação de Varnes, que descrevem mais especificamente os fenômenos e que estão sendo usadas atualmente por serem mais detalhadas. Entre elas se encontram as de Hutchinson (1988), Cruden (1996) e Corominas e Garcia (1997).

2.1.1 Tipos de Movimentos de Massa

- **Quedas:** Corresponde ao desprendimento do talude de uma massa de qualquer tamanho, ao longo de uma superfície sem deslocamento, esta massa desce por queda livre (Figura 2.1). As quedas são comumente controladas por descontinuidades na rocha. O material mobilizado pode ser rocha ou detritos.

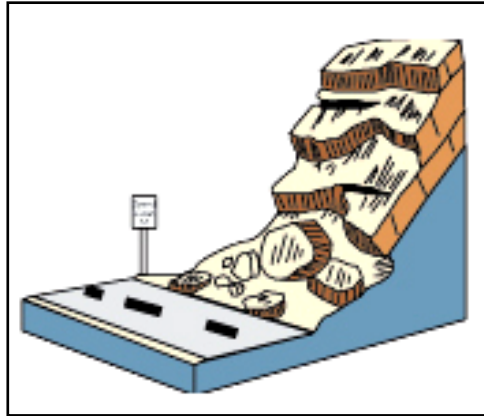


Figura 2.1. Esquema ilustrativo de queda de rocha (USGS, 2004).

- **Tombamentos:** Corresponde ao desprendimento de material devido a uma rotação sobre um ponto com centro de giro por embaixo do centro de gravidade, produzido por forças externas exercidas por ação da água nas fissuras, expansões e movimentos sísmicos. Apresentam-se geralmente em material rochoso e em regiões onde existem descontinuidades muito inclinadas, paralelas à frente da encosta (Figura 2.2).

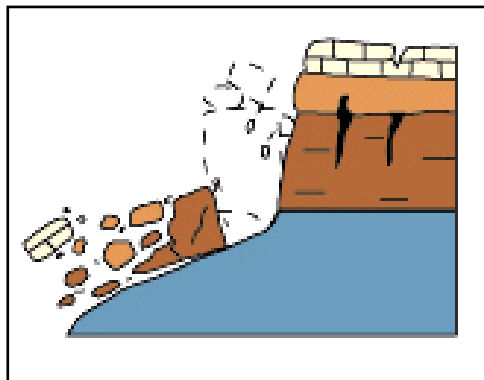


Figura 2.2. Esquema ilustrativo de tombamento (USGS, 2004).

- **Deslizamentos:** Correspondem a movimentos de massa, de um tipo de material ou vários tipos de materiais, ao longo de uma ou várias superfícies de ruptura. Existem

duas classes de deslizamentos: **deslizamento rotacional** onde a superfície de falha está bem definida e é formada por uma curva, cujo centro de gravidade se encontra acima do centro de gravidade do corpo em movimento, apresentando uma série de fraturas concêntricas e côncavas na direção do movimento. O deslizamento rotacional apresenta abaulamentos na sua parte superior e depósito de fluxos de materiais na sua parte inferior, ocorrendo principalmente em solos homogêneos (Figura 2.3a) (Suárez, 1998). Segundo Soeters e Van Westen (1996), o deslizamento rotacional está associado principalmente com declividades de 20° a 40° e sua relação profundidade-comprimento D/L (Depth/Length) é da ordem de 0,3 a 0,1.

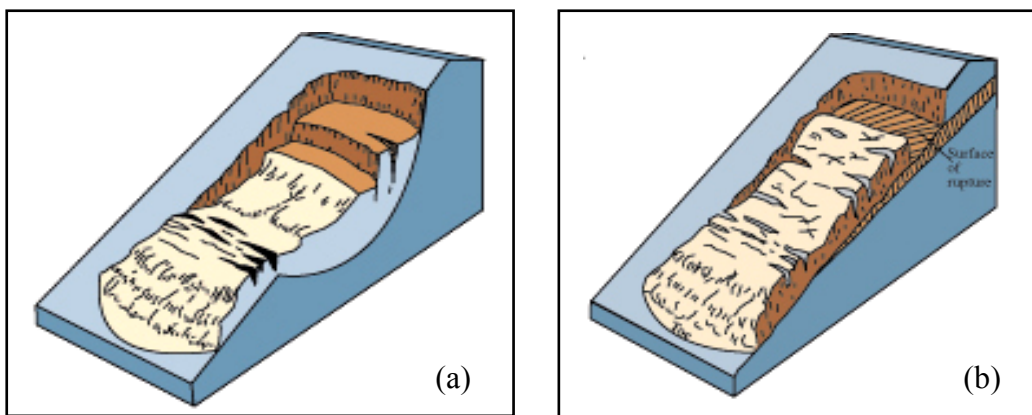


Figura 2.3. Esquema ilustrativo de: (a) deslizamento rotacional e (b) deslizamento translacional (USGS, 2004).

O **deslizamento translacional ou planar** ocorre em zonas de pequena espessura submetidas à intensa tensão cisalhante. O material se movimenta para fora ou abaixo ao longo de uma superfície plana a ligeiramente ondulada (Figura 2.3b), estes deslizamentos são controlados principalmente por planos de debilidade, como discontinuidades, falhas ou superfícies de estratificação (Suárez, 1998). Segundo Soeters e Van Westen (1996) a relação D/L em deslizamentos translacionais geralmente é menor de 0,1.

- **Expansões laterais:** São movimentos de massa que ocorrem em encostas suaves ou moderadas, onde a deformação plástica lenta ocorre numa superfície horizontal definida que se estende sobre uma capa mais competente. A ruptura da capa superior é gerada por movimentação do material subjacente, sendo esta deslocada (Figura 2.4).

As expansões laterais podem ocorrer em material rochoso sobre solo plástico ou solos finos (Suárez, 1998; Soeters e Van Westen, 1996).

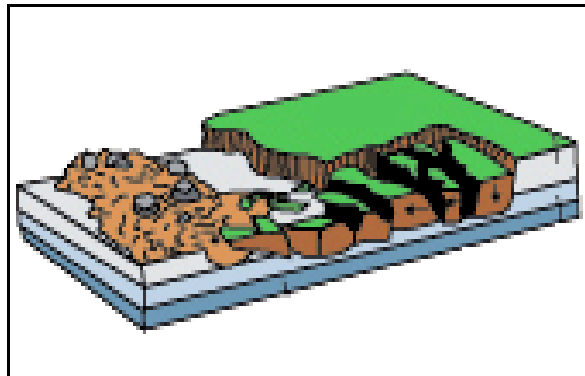


Figura 2.4. Esquema ilustrativo de expansões laterais (USGS, 2004).

- **Corridas ou Fluxos:** Correspondem a movimentos laterais e contínuos de uma massa que se desloca sobre uma superfície de ruptura, estes movimentos estão associados de maneira geral com a presença de água. Podem ser divididos em: **fluxos de rocha**, movimentos de alta velocidade que ocorrem em taludes com inclinações $> 45^\circ$; **fluxos de detritos e lama**, onde os materiais transportados são mais finos, com um alto conteúdo de umidade e velocidades que variam (Figuras 2.5.). Segundo Augusto Filho (1992) as corridas de massa apresentam um grande volume de material, assim como um extenso raio de alcance.

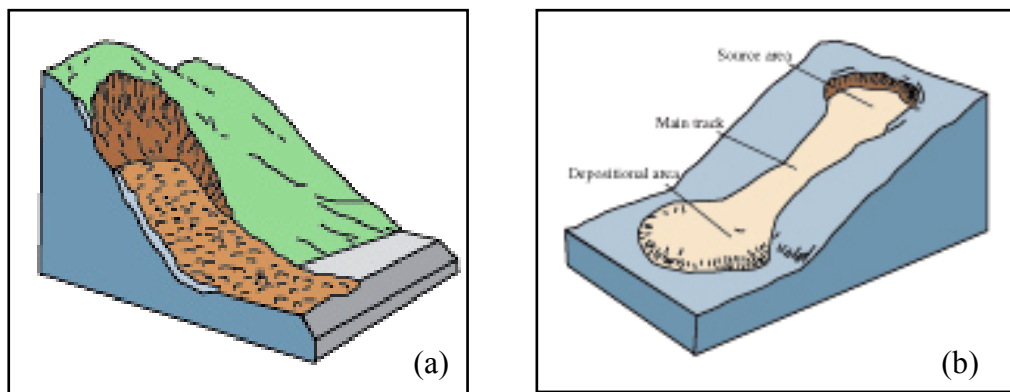


Figura 2.5. Esquema ilustrativo de: (a) corrida de detritos e (b) corrida de lama (USGS, 2004).

2.1.2 Fatores que Afetam a Estabilidade do Terreno

A estabilidade das encostas está condicionada pela ação simultânea das forças que tendem a promover o movimento dos materiais encosta abaixo, e das forças opostas que tendem a resistir a esse movimento. O desequilíbrio destas forças devido à presença de certos fatores é o que produz os movimentos de massa. Autores como Mora e Vahrson (1993), Soeters e Van Westen (1996) e Popescu (1996) classificam estes fatores em dois grupos com base em sua função.

2.1.2.1 Fatores preparatórios ou de suscetibilidade

São os fatores que fazem a encosta suscetível a deslizamentos, sem chegar a iniciá-lo ou deflagrá-lo, e tendendo a manter a encosta em um estado estável. Estes fatores correspondem às características intrínsecas e extrínsecas do terreno, tais como: relevo, declividade, geologia, umidade natural.

- **Topografia:** Corresponde às características morfológicas do terreno e definem parâmetros como declividade, elevação, amplitude do relevo e forma da encosta, os quais dão uma idéia geral da suscetibilidade do terreno a sofrer deslizamentos. Destes fatores, a declividade e a elevação do terreno são os mais usados na análise de estabilidade.

A declividade é uma componente essencial nas análises de estabilidade, porque com seu incremento acontece um aumento da tensão cisalhante (forças desestabilizadoras). Dessa forma, baixa declividade significa geralmente baixa tensão cisalhante e baixa frequência de movimentos de massa. Inclinações de encosta altas se traduzem em pouca espessura de solos (rocha aflorando) (Garcia, 2004).

- **Geologia:** Corresponde à composição do terreno, ao tipo de material que conforma a encosta, a sua litologia, às propriedades físicas, químicas e de resistência e à evolução no ambiente. Inclui, também, as estruturas, como discontinuidades, falhas, dobramentos, planos de estratificação e foliação e grau de intemperismo.
- **Geomorfologia:** Descreve a forma do terreno e sua evolução, assim como as mudanças da paisagem controladas pelos movimentos de massa antigos e presentes.

- **Hidrologia e Clima:** Corresponde ao regime climático que afeta o terreno estudado, determinado pela intensidade, frequência e magnitude das chuvas, e as variações de temperatura, incidindo no nível de evapotranspiração da região. Tanto a precipitação quanto a evapotranspiração são dois fatores muito usados no estudo de estabilidade das encostas.

O regime de águas subterrâneas controla e modifica a resistência e o estado de tensões da massa do solo. Entre os efeitos da água subterrânea que afetam a estabilidade estão o aumento das poro-pressões, a diminuição da sucção, a lixiviação de cimentos, a erosão interna, as subpressões (quando confinada por um material impermeável) e o aumento do peso específico (Garcia, 2004).

Adicionalmente, existe um fenômeno climatológico que afeta esta região, denominado “El Niño”, que se caracteriza por um aumento do Nível Médio do Mar (NMM) e da Temperatura Superficial do Mar (TSM), gerando déficit de chuvas no território colombiano. O fenômeno oposto, “La Niña”, caracterizado por uma diminuição da temperatura no Pacífico, gera excesso de chuvas na região andina colombiana. Ao final de 1998 e começo de 1999 foram registradas precipitações acima da média histórica desta região (IDEAM, 2001).

- **Vegetação:** A vegetação tende a determinar o conteúdo de água na superfície. Também reduz a ação dos agentes climáticos, interceptando e protegendo a massa de solo da ação de chuvas, dos ventos e do sol; retém uma grande quantidade de água, não permitindo sua infiltração e livre movimento sobre o solo, reduzindo assim as possibilidades de erosão; favorece a evapotranspiração; o sistema de raízes aumenta a resistência do solo criando poro-pressões negativas e dando maior coesão.

2.1.2.2 Fatores deflagradores

São os fatores que induzem a dinâmica do deslizamento, gerando com maior ou menor intensidade a mobilização. Entre eles destaca-se a atividade vulcânica e a atividade antrópica. A seguir se faz uma curta descrição destes fatores:

- **Atividade vulcânica:** Os movimentos de massa podem ser relacionados com a erupção ou os sismos prévios a atividade vulcânica. Nas primeiras etapas da erupção, depositam-se fluxos piroclásticos, os quais formam novos depósitos ou ampliam

alguns existentes, gerando movimentos de massa no pé do vulcão (Aguilar e Mendoza, 2002). Nos vulcões nevados, as altas temperaturas produzidas por uma erupção fundem os depósitos de gelo e neve que se misturam com os materiais piroclásticos expelidos, gerando corridas e fluxos de lodo, que podem recorrer grandes distâncias e atingir povoados vizinhos, como no caso do desastre do Nevado do Ruiz em 1985, na Colômbia.

- **Atividade Antrópica:** O homem é um dos principais modificadores da paisagem e mais especificamente nas encostas sua ação tem atuado como um agente desestabilizador. Segundo Aguilar e Mendoza (2002) a ação do homem sobre as encostas pode ser classificada em quatro tipos: **mudanças na topografia e cargas do talude**, ocasionadas pela extração de solos e rochas ou aumento da carga nas encostas devido aos processos de construção e/ou mineração; **mudanças nas condições de umidade do talude**, ocasionadas pela alteração das drenagens naturais e subterrâneas, infiltração e aumento de águas superficiais; **mudanças na cobertura vegetal**, ocasionadas, principalmente, pelos processos de desflorestamento, práticas agrícolas e pecuárias e modificações no uso do solo em geral; **vibrações nos taludes**, ocasionadas pela construção civil em geral (explosões, movimento de carga pesada, transportes, etc.).

No entanto, dentro do contexto da área de estudo, os principais fatores deflagradores, que foram identificados por diferentes pesquisadores, correspondem aos sismos e as chuvas, como comprovado em trabalhos anteriores (Aguilar e Mendoza, 2002); (González e Mayorga, 2004). Por tanto, a seguir se faz uma curta descrição destes fatores.

Chuva como agente deflagrador

A água atua tanto como um agravante quanto um fator permanente na estabilidade das encostas. As condições hidráulicas e hidromecânicas do terreno e o estado de saturação do solo (características que condicionam a poropressão do solo, portanto sua resistência) podem chegar a determinar a estabilidade da encosta. Uma chuva forte, dependendo da sua intensidade e duração, pode gerar o desequilíbrio destas condições e provocar instabilidade, causando a deflagração dos deslizamentos.

A precipitação tem influência direta na percolação do terreno e no regime de água subterrânea. O estudo das precipitações para a análise de seu efeito nos taludes se realiza desde vários pontos de vista:

- **Chuvas médias e chuvas máximas anuais:** Baseado nos dados pluviométricos medidos calcula-se a espessura da lâmina de água média mensal e anual que cai sobre um determinado local, para isto requerem-se dados de períodos longos de observação. Espera-se que nas áreas de maior precipitação se apresentem mais movimentos de massa.
- **Regime de chuvas:** Cada região possui um regime de chuvas que se repete aproximadamente cada ano, permitindo identificar os períodos de alta e baixa precipitação. Estes dados são obtidos da análise dos registros mensais anuais da área.
- **Chuvas acumuladas:** Correspondem às chuvas que se acumulam por sua prolongada duração e intensidade e podem ser de vários ou poucos dias.
O período de chuva acumulada significativo varia de horas a semanas, dependendo das condições locais, da permeabilidade dos solos e da profundidade da superfície de ruptura.
Durante chuvas intensas ou prolongadas o movimento de massa pode ser deflagrado pela saturação do solo ou pelo aumento da pressão dos poros. No primeiro caso, devido à eliminação da sucção do solo, quando se satura a frente úmida de percolação. No segundo caso, quando tem transcorrido o tempo necessário para a frente úmida alcançar o nível freático, alterando e diminuindo a resistência ao cisalhamento do solo (Suárez, 1998).

Gonzales e Mayorga (2004) propõem dois tipos de eventos chuvosos que influem na deflagração dos deslizamentos na Colômbia:

- As chuvas acumuladas ao longo de 180 dias antes da ocorrência do evento, também denominadas como precipitações ao longo prazo.
- As chuvas como eventos únicos ou precipitações de curto prazo que geram o deslizamento após 24 horas da sua iniciação.

No caso da análise de riscos a deslizamentos os parâmetros utilizados corresponderam à precipitação, duração e intensidade dos eventos chuvosos, dados obtidos das estações meteorológicas.

Sismo como agente deflagrador

Os sismos são reconhecidos como uma das maiores causas dos movimentos de massa (Keefer, 1984), devido à ativação de deslizamentos na região epicentral. Na Colômbia, o Eixo Cafeteiro faz parte das regiões mais afetadas por sismos, tendo como exemplo recente o sismo de 1999 que deflagrou deslizamentos numa área de 1.402 km², com uma distância máxima do epicentro de 30 km (Aguilar e Mendoza, 2002).

O tipo e número de deslizamentos deflagrados por sismos depende da magnitude do sismo; Keefer (2002) após um estudo estatístico, faz uma aproximação das magnitudes e os tipos de deslizamentos que podem ser gerados por sismos (Tabela 2.2), no entanto os diferentes tipos de deslizamentos podem ser deflagrados por diferentes agentes não sísmicos.

Tabela 2.2. Magnitudes aproximadas e tipos de deslizamentos causados.

MAGNITUDE APROXIMADA (Richter)	TIPO DE MOVIMENTO
~ 4 – 4.5	Queda e deslizamentos de rocha, desprendimento e deslizamentos de solo interrompidos.
~ 5	Expansões laterais de solo, fluxos rápidos de solo, fluxos lentos de detritos, deslizamentos sub-aquosos.
~ 6	Corridas de rocha.

Existem diferentes métodos para avaliar a ocorrência de deslizamentos por sismos, mas até hoje o método mais usado para zoneamento de ameaça por deslizamentos causada por sismos é o método de deslocamento de Newmark (1965), que propõem modelar o talude como um bloco de atrito restringido num plano inclinado sujeito as mesmas acelerações do talude modelado (Miles, 2004).

No entanto, este método foi especificamente desenvolvido para taludes de barragens de solo, está baseado no método do equilíbrio limite e somente modela deslizamentos com uma superfície de deslizamento bem definida, portanto, o método não considera as características geomorfológicas dos taludes naturais e não modela os deslizamentos deflagrados comumente por sismos (Keefer, 1984). Desta forma pode-se considerar que embora seja o método mais usado, não se constitui com o mais apropriado para o estudo de taludes naturais.

A partir do método de Newmark vários pesquisadores da área têm realizado suas próprias aplicações, entre eles se destacam Jibson et al (1998) e Mankelov e Murphy (1998), desenvolvendo modelos probabilísticos regionais a partir do método de Newmark.

2.2. TERMOS USADOS NA ANÁLISE DE RISCO

Os termos usados para a análise de risco têm sido definidos por inumeráveis autores nas últimas duas décadas, no entanto a tendência mundial é chegar a uma definição simples e padronizada. Neste trabalho utilizam-se as definições adotadas pelo grupo da Década Internacional de Redução de Desastres Naturais (DIRDN), que estão baseadas no glossário internacional multi-lingual de termos concernentes a desastres.

- **Susceptibilidade:** corresponde a maior ou menor predisposição do terreno à ocorrência de um fenômeno potencialmente danoso ou destrutivo numa área determinada, com base nas condições locais e sem ter em conta o aspecto temporal.
- **Perigo ou Ameaça:** é a probabilidade de ocorrência de um fenômeno potencialmente danoso ou destrutivo num dado período de tempo e área determinada.
Segundo Leroi (1996), em relação a deslizamentos, esta definição inclui a probabilidade de localização no espaço, que está condicionada a fatores “permanentes” de predisposição e susceptibilidade (como declividade e geologia da encosta); e a probabilidade de ocorrência dentro de um intervalo de tempo, que está condicionada pelos agentes deflagradores como precipitações e sismos.
- **Vulnerabilidade:** é o grau de perda resultante de um fenômeno potencialmente destrutivo, a vulnerabilidade é expressa numa escala de 0 (sem perdas) a 1 (perda total).

A vulnerabilidade é sempre de um elemento natural ou antrópico em função da sua exposição ao perigo e a perda associada ao risco.

A vulnerabilidade está representada por curvas de vulnerabilidade referidas a fenômenos específicos (Leroi, 1996).

- **Risco:** são as perdas esperadas (vidas, feridos, propriedades ou atividade econômica interrompida) devido à ocorrência de uma ameaça particular numa área e período de tempo determinados. O risco total é expresso matematicamente da seguinte forma (Van Westen, 2004):

$$\boxed{\text{RISCO TOTAL} = \Sigma (\text{P} * \Sigma (\text{V} * \text{E}))} \quad (2.1)$$

P = perigo (probabilidade)

V = vulnerabilidade (0-1)

E = elementos sob risco, como prédios, casas, etc. (custo \$).

2.3 TIPOS DE CARTAS USADAS E PRODUZIDAS NAS ANÁLISES DE RISCO

Dentro das metodologias desenvolvidas para avaliação e análise de risco existem diferentes propostas mundialmente. No entanto a maioria delas coincide com a produção e uso de cartas preliminares, como são as cartas de susceptibilidade e/ou ameaça. Einstein (1988) propõe um procedimento para avaliação de risco de deslizamento baseado numa estrutura de 5 níveis de mapeamento:

Nível 1: Mapas Temáticos; *nível 2:* Mapas de Suscetibilidade ou de Inventário de Deslizamentos; *nível 3:* Mapas de Perigo de Deslizamento; *nível 4:* Mapas de Risco e *nível 5:* Mapas de gerenciamento. Este autor também afirma que os mapas de suscetibilidade podem ser considerados como mapas de perigo de deslizamento, nos quais, as probabilidades espaciais são consideradas como representativas das probabilidades temporais.

Outros autores também fazem referência à produção de cartas preliminares que podem ser comparadas com as propostas por Einstein.

- **Mapas temáticos e informação básica**

Correspondem aos mapas e a informação que caracterizam o meio físico e que serão usados como dados de entrada para a produção dos mapas de susceptibilidade e/ou perigo, dentre eles

se destaca: os mapas geológico, topográfico, geomorfológico, de declividade e de uso do solo, o modelo digital do terreno (MDT), as fotografias aéreas, os dados de ensaios geotécnicos e os dados de precipitações e sismológicos.

- **Mapas de inventário de deslizamentos**

Correspondem aos mapas que devem indicar os principais e mais prováveis tipos e mecanismos de movimentos de massa que podem ocorrer na área mapeada (deslizamentos de solo, rocha, quedas, corridas, etc.).

- **Mapas de susceptibilidade**

Correspondem a mapas de zoneamento que indicam a existência de condições preexistentes à ocorrência de movimentos, mostrando que o evento acontecerá desde que condições externas o desencadeiem.

- **Mapas de perigo ou ameaça de deslizamento**

Correspondem aos mapas que apresentam as probabilidades de ocorrência dos diferentes tipos de deslizamento. Estas probabilidades podem ser estimadas com base na análise da frequência de deflagração destes processos em função de fatores de susceptibilidade e/ou deflagradores, tais como: pluviometria, terremotos, propriedades do solo e rocha, geometria das encostas, etc.

- **Mapas de risco**

Correspondem aos mapas que combinam o perigo de deslizamento com as perdas potenciais (danos potenciais em um determinado período de tempo), obtendo como resultado uma análise quantitativa. Segundo a IUGS Working Group, Committee on Risk Assessment (1997), dita análise consiste das seguintes atividades principais:

- Análise de perigo ou análise da probabilidade e características dos deslizamentos potenciais;
- Identificação dos elementos sob risco, isto é, seu número e características, incluindo sua variabilidade temporal e vulnerabilidade aos perigos identificados;
- Análise da vulnerabilidade dos elementos sob risco;
- Cálculo do risco resultante das etapas anteriores (perigos, elementos sob risco e vulnerabilidade destes elementos sob risco).

Para o desenvolvimento desta avaliação é necessário conhecer os elementos sob risco localizados na área estudada (infra-estrutura, serviços públicos, atividades econômicas, população, entre outros), assim como a vulnerabilidade dos ditos elementos. Esta vulnerabilidade é expressa por meio de uma curva que relaciona a intensidade do evento ameaçante com o grau de dano esperado de cada um dos elementos (Van Westen, 2004).

2.4 METODOLOGIAS USADAS PARA A MODELAGEM E AVALIAÇÃO DA SUSCETIBILIDADE E AMEAÇA.

Para avaliar a suscetibilidade do terreno a deslizamentos existem diferentes métodos que na sua maior parte estão baseados na determinação dos fatores que influem no surgimento dos movimentos de massa. Habitualmente a combinação destes fatores define os diferentes graus de suscetibilidade do terreno, este resultado é expresso de forma cartográfica por meio do mapa de suscetibilidade.

De forma geral existem quatro principais grupos de metodologias utilizadas na avaliação de susceptibilidade e/ou perigo a deslizamentos:

- **Métodos determinísticos**, utilizados no estudo de estabilidade de encostas, estão fundamentados em métodos baseados no equilíbrio limite ou métodos numéricos, como o modelo do talude infinito e o modelo shalstab entre outros. Os dados de entrada provêm de ensaios de laboratório (parâmetros de resistência) e se usam para calcular o fator de segurança - FS do talude. São métodos muito precisos quando se têm dados confiáveis, que permitem a modelagem da suscetibilidade do terreno, assim como calculam o alcance e frequência do fenômeno. São os mais adequados para avaliar a instabilidade em encostas em áreas pequenas (grande escala), não são os mais idôneos na avaliação de áreas extensas e a nível regional (Van Westen, 1993).
- **Métodos heurísticos**, baseados no conhecimento a priori dos fatores que produzem instabilidade na área estudada, categorizando e ponderando estes fatores segundo a influência de cada um deles na deflagração dos deslizamentos, com base na experiência do pesquisador. Estes métodos são conhecidos como indiretos porque seus resultados podem ser extrapolados a uma área sem deslizamentos que apresente uma combinação de fatores similar à da área afetada. Os métodos heurísticos permitem trabalhar a escala

regional (Carrara, 1995). No entanto, estes métodos podem chegar a ser subjetivos (Brabb, 1984).

- **Métodos probabilísticos**, dentro deste grupo encontram-se os métodos estáticos e as análises de frequência dos deslizamentos. Estes métodos são indiretos e seus resultados podem ser extrapolados para estimar a suscetibilidade em áreas com condições similares à área estudada, podendo assim regionalizar os resultados. Os métodos probabilísticos estão baseados nas relações observadas entre cada fator e a distribuição dos deslizamentos atuais e passados (Carrara, 1995), são utilizados quando se tem uma boa quantidade e qualidade de dados. Estes métodos podem se dividir em bivariados, multivariados e de análise de frequência, e a principal vantagem é que se constituem como métodos com maior objetividade. Estes métodos são usados em escalas intermédias.

- *Métodos bivariados*: Avaliam a relação probabilística entre os diversos fatores que condicionam a estabilidade do terreno e a ocorrência de deslizamentos. Estão baseados na superposição dos diversos fatores com o mapa de distribuição de deslizamentos, a fim de obter-se a probabilidade condicionada de cada fator à presença ou não de deslizamentos. Como resultado da combinação de todos os fatores se atribui um valor entre 0 e 1 a cada um dos fatores, estes fatores podem ser interpretados em termos de probabilidade segundo o teorema de Bayes.

- *Métodos multivariados*: Utilizam técnicas estatísticas como regressão múltipla e análise discriminante. O resultado destas técnicas são funções baseadas na combinação linear dos fatores com maior significância estatística para definir as condições de estabilidade do terreno a partir de presença ou ausência de deslizamentos na região estudada.

- **Métodos geomorfológicos**, são métodos diretos, baseados na determinação das condições de instabilidade da área por meio de análise geomorfológica e zoneamento. O pesquisador faz uma identificação dos deslizamentos e dos processos associados aos mesmos no campo, com estas observações obtém critérios para a determinação de áreas instáveis, gerando assim um mapa de suscetibilidade final. A elaboração deste mapa exige o conhecimento da morfologia e tipologia dos movimentos de massa da área, por parte do especialista. O resultado final depende diretamente da experiência do pesquisador, por tanto é um método subjetivo. Em geral estes métodos são usados para grandes escalas.

2.5 ESCALAS DE TRABALHO

A escala de trabalho é um dos pontos de partida no início de qualquer estudo cartográfico relacionado à avaliação da suscetibilidade a deslizamentos. Dependendo da escala de trabalho se escolhem a metodologia a ser usada, os fatores e dados a serem considerados e as unidades de terreno. Segundo a IAEG podem-se considerar três escalas para o zoneamento da suscetibilidade a deslizamentos em geral.

- **Escala regional:** corresponde à escala que varia de 1:100.000 a 1:500.000, nesta escala se produzem mapas que se usam para identificar áreas com presença de movimentos de massa a nível geral com um baixo detalhe. Para trabalhar nesta escala se utilizam métodos semi-quantitativos como a superposição de mapas e unidades de terreno. Esta escala é utilizada principalmente em projetos de planejamento a nível regional.
- **Escala intermédia:** corresponde à escala que varia de 1:25.000 a 1:50.000, nesta escala se produzem mapas usados principalmente em planejamento e estudos civis locais. Para trabalhar nesta escala se utilizam métodos analíticos e probabilísticos, junto com mapas temáticos detalhados (MDT, declividade, etc).
- **Grande escala:** corresponde à escala que varia de 1:5.000 a 1:10.000, nesta escala se produzem mapas voltados à análise e avaliação de problemas locais de instabilidade de taludes e planejamento de infra-estruturas específicas. Os métodos utilizados nesta escala são os probabilísticos multivariantes e os métodos determinísticos como os de talude infinito. Um exemplo de trabalhos nesta escala realizados no Brasil, corresponde ao desenvolvido por Oliveira e Augusto Filho (2005) onde analisa os movimentos em massa ocorridos em Campos de Jordão, São Paulo.

2.5.1. Unidades de Terreno Utilizadas

As unidades de terreno correspondem às unidades cartográficas que representam uma porção de área que contém uma série de condições de terreno que diferem das unidades adjacentes mediante limites bem definidos (Hansen, 1995). A seleção da unidade de terreno influencia as análises a serem feitas (Carrara et al, 1995). Em termos gerais podem-se definir cinco tipos de unidades de terreno:

- **Unidades geomorfológicas:** Baseadas em limites morfológicos, frequentemente refletem diferenças geomorfológicas e geológicas. A divisão destas unidades é subjetiva.
- **Celas (malha regular):** Corresponde à divisão da área em unidades de tamanho regular atribuindo-se um valor a cada cela para um fator determinado.
- **Unidades de condição única:** Obtidas a partir da superposição de mapas de distintos fatores previamente categorizados em classes. O número, tamanho e natureza destas unidades dependem dos critérios utilizados para a sua classificação e dos fatores utilizados (Chung et al, 1995).
- **Unidades principais de talude:** São divisões feitas a partir da relação física entre os deslizamentos e a drenagem de uma bacia específica.
- **Facetas:** São unidades de terreno baseadas na declividade e direção da declividade do terreno como cristas, topos, escarpas, vertentes e vales.

2.6. SISTEMA DE INFORMACÕES GEOGRÁFICAS (SIG)

De acordo com Antenucci et al (1991), o sistema de informações geográficas ou SIG está definido como sistema computacional, projetado para apoiar a captura, gerenciamento, manipulação, análise e apresentação de dados, referenciados espacialmente, para solução de problemas de planejamento e gerenciamento.

As principais funções de um SIG são: integrar informações espaciais de dados cartográficos, imagens de satélite e modelos numéricos de terreno, numa única base de dados; cruzar informações por meio de algoritmos de manipulação para gerar mapeamentos derivados e consultar, recuperar, visualizar e permitir saídas gráficas para o conteúdo da base de dados geocodificados (Carrara, 1993).

O SIG permite uma melhor organização, armazenamento, recuperação e atualização das informações cartográficas e a formação de bases de dados, possibilitando as simulações de cruzamentos e retroanálises nos estudos do meio físico (Diniz, 1998).

As principais vantagens do SIG são: a capacidade de armazenar grande quantidade de dados georreferenciados, a rapidez do processamento e a representação gráfica do mesmo.

2.6.1 Estrutura de um SIG

Um SIG está composto por:

- *Entrada de dados*
- *Armazenamento e tratamento da base de dados*
- *Transformação de dados e análise*
- *Saída de dados*

De forma geral um SIG trabalha por meio da superposição dos diferentes planos de informação como os mapas temáticos (geologia, geomorfologia, uso do solo) e a informação básica (inventários de deslizamentos, MDT) de uma determinada área. A superposição está baseada num conjunto de operações matemáticas entre matrizes, combinando células da mesma posição, nos diversos níveis de informação, fazendo uma análise estatística da combinação das variáveis associadas aos deslizamentos, gerando finalmente a carta procurada. Por tanto, o SIG é uma ferramenta muito útil na análise e cartografia de suscetibilidade, ameaça e risco a deslizamentos. O desenvolvimento do sistema de informações geográficas tem incrementado a disponibilidade das diferentes técnicas de avaliação e a sua aplicação.

2.6.2 Tipos de Dados

No SIG, os dados gráficos são organizados em forma de planos de informação (*layers*), ou seja, como uma série de camadas, cada uma das quais contém feições gráficas espacialmente relacionadas. Cada camada representa um tema ou uma classe de informação (Carvalho et al, 2000) (Figura 2.6).

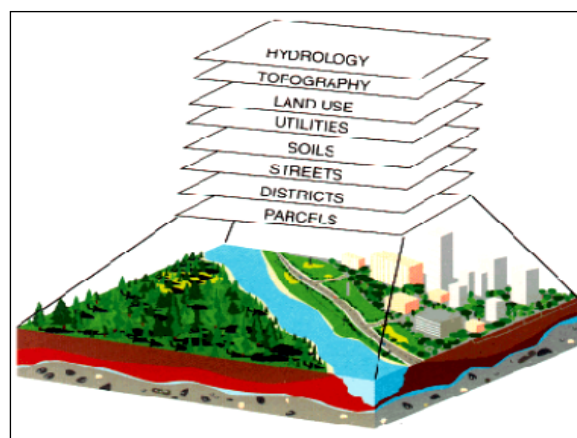


Figura 2.6. Representação dos dados de entrada no SIG (ESRI, 2002).

O SIG pode conter vários modelos de dados dos objetos geográficos: vetorial, raster, modelos numéricos de terreno e bases de dados (tabelas):

- **Modelos vetoriais:** Representam os fenômenos geográficos por meio de pontos linhas e polígonos, os modelos vetoriais são usados particularmente para representar e armazenar feições, tais como limites territoriais (Figura 2.7).
- **Modelos raster:** Representam as superfícies por meio de malhas regulares ou grades de células. Os modelos raster são úteis para armazenar dados que são contínuos através de uma área (Figura 2.7).

Cada célula é uma unidade do mapa e corresponde a um ponto ou *pixel* de determinado tamanho (área) e a cada célula da malha é associado um valor. Este valor pode ser um número associado à cobertura vegetal ou elevação do terreno num modelo digital do terreno (Garcia, 2004). Os modelos raster incluem imagens de satélite e fotografias aéreas.

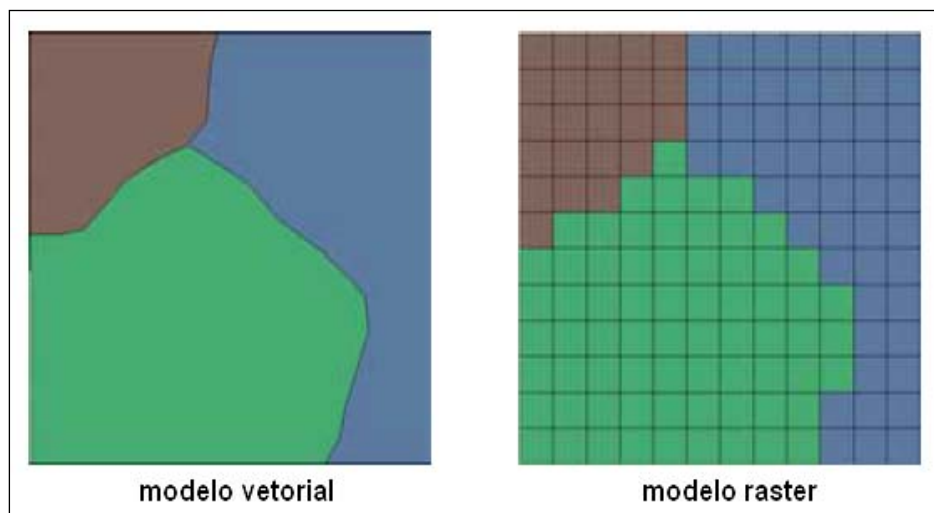


Figura 2.7. Representação dos modelos usados no SIG (ESRI, 2002).

- **Modelo numérico do terreno (MNT):** Segundo Câmara (2004) o MNT pode ser definido como um modelo matemático que reproduz uma superfície real a partir de algoritmos e de um conjunto de pontos (x, y) , em um referencial qualquer, com atributos denotados de z , que descrevem a variação contínua da superfície.

O processo de geração de um modelo numérico do terreno pode ser dividido em duas etapas: (a) aquisição das amostras ou amostragem e (b) geração do modelo propriamente dito ou interpolação, estes conceitos são descritos a seguir. Após a geração do modelo, podem-se desenvolver diferentes aplicações.

- A *amostragem* compreende a aquisição de um conjunto de amostras representativas do fenômeno de interesse. Geralmente essas amostras estão representadas por curvas de isovalores e pontos tridimensionais.

- A *interpolação* envolve a criação de estruturas de dados e a definição de superfícies de ajuste com o objetivo de obter-se uma representação contínua do fenômeno a partir das amostras. Essas estruturas são definidas de forma a possibilitar uma manipulação conveniente e eficiente dos modelos pelos algoritmos de análise contidos no SIG. As estruturas de dados mais utilizadas são a grade regular e a malha triangular.

- As *aplicações* são procedimentos de análise executados sobre os modelos digitais. As aplicações podem ser qualitativas, tais como a visualização do modelo usando-se projeções geométricas planares, ou quantitativas, tais como cálculos de volumes e geração de mapas de declividades (Felgueiras, 2004).

- **Bases de dados (tabelas):** Correspondem às tabelas associadas às diferentes classes de feições ou aos modelos raster contendo informação dos mesmos, tais com localização, área, etc. (Figura 2.8).

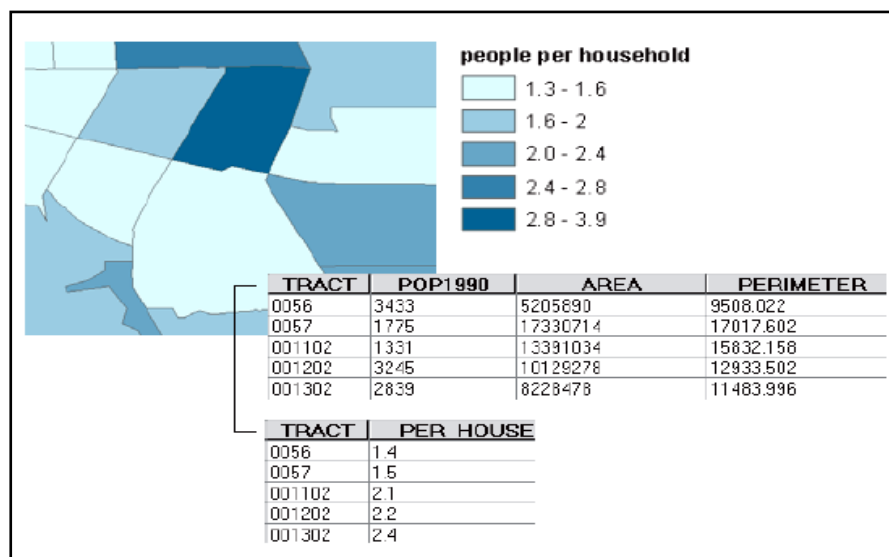


Figura 2.8 Representação das tabelas usadas no SIG (ESRI, 2002).

2.6.3 Fatores Usados como Dados de Entrada na Análise de Risco por Deslizamento no SIG

Existem dois tipos principais de fatores usados no Sistema de Informações Geográficas para a análise e avaliação do risco por deslizamento, os quais influem direta ou indiretamente na estabilidade das encostas.

O primeiro grupo corresponde aos fatores que são obtidos por meio de estudos de campo e interpretação de fotografias aéreas, a informação obtida está representada por meio de dados vetoriais, estes fatores são:

- *Geologia (Litologia, Geologia estrutural)*
- *Geomorfologia*
- *Tipo de solo*
- *Uso do solo e vegetação*
- *Climatologia (Precipitação, Evapotranspiração)*
- *Inventário de Deslizamentos*

O segundo grupo de fatores corresponde aos que são derivados do MDT, estes fatores são:

- *Elevação*
- *Declividade*
- *Aspecto*
- *Forma da encosta*

2.6.4 Avaliação do erro no SIG

Devido à grande quantidade de dados e de operações que manejam o SIG pode-se chegar a produzir erros significativos durante o processo de avaliação. Portanto é muito importante ter em conta os possíveis erros associados às análises de risco por deslizamento. A este respeito os erros podem ser classificados em três grupos (Santacana, 2001):

- **Erros associados a dados preexistentes:** correspondem aos erros existentes na base de dados, nos mapas geológicos, geomorfológicos, topográficos e de solos. Tendo em conta que o MDT e seus derivados são obtidos do mapa topográfico, estes podem estar afetados por este tipo de erros.

- **Erros nos dados recolhidos:** correspondem a possíveis erros na interpretação de imagens e fotografias aéreas (erros de tipo subjetivo), assim como na transcrição de dados e a sua localização geográfica.
- **Erros no processamento de dados:** correspondem aos erros operacionais devido à superposição das camadas de informação no SIG, dando como resultado a superprodução de classes que podem chegar a ter pouco significado físico.

Adicionalmente é importante considerar o grau de incerteza associada aos dados que tem algum grau de subjetividade como à definição das unidades geomorfológicas ou os limites litológicos, o grau de incerteza está diretamente relacionado com a escala de trabalho e o tamanho da área de estudo. Na tabela 2.3, se apresenta uma estimativa do grau de incerteza dos principais fatores associados á suscetibilidade a deslizamentos do terreno.

Tabela 2.3. Principais fatores associados ao zoneamento da suscetibilidade a deslizamentos (Carrara, 1992).

FATOR	GRAU DE INCERTEZA
Declividade	Baixo
Aspecto	Baixo
Forma da Encosta	Baixo
Litologia geral	Baixa
Tectónica geral	Baixa
Aceleração sísmica	Alto
Distribuição da chuva	Intermédio
Geomorfologia geral	Baixo
Distribuição de deslizamentos atuais	Intermédio
Tipologia dos deslizamentos	Intermédio
Distribuição de deslizamentos passados	Alto
Distribuição dos tipos de solo	Baixa
Espessura do solo	Alta
Condição da água subterrânea	Alta
Uso do solo	Baixa
Condições climatológicas passadas	Alta

3. DESCRIÇÃO GERAL DA ÁREA DE ESTUDO

3.1 LOCALIZAÇÃO

O Departamento do Quindío (Figura 3.1) encontra-se localizado no Eixo Cafeteiro na região centro-oeste da Colômbia, cobre uma extensão aproximada de 1845 km² e está limitada pelas seguintes coordenadas geográficas:

NW: Lat 4° 43' 28" N e Long 75° 53' 59" W NE: Lat 4° 43' 28" N e Long 75° 23' 11" W
SW: Lat 4° 4' 43" N e Long 75° 53' 59" W SE: Lat 4° 4' 43" N e Long 75° 23' 11" W

O Departamento está conformado por 12 municípios, apresenta uma topografia irregular e montanhosa, correspondente às vertentes altas da cordilheira Central, com altitudes que variam entre os 950 m e 3.900 m. Devido a seu histórico de desastres naturais, esta área se constitui numa zona de grande interesse para a análise de riscos geológicos associados a deslizamentos, os quais segundo Vélez et al (1993) se constituem os riscos naturais mais severos nesta região.

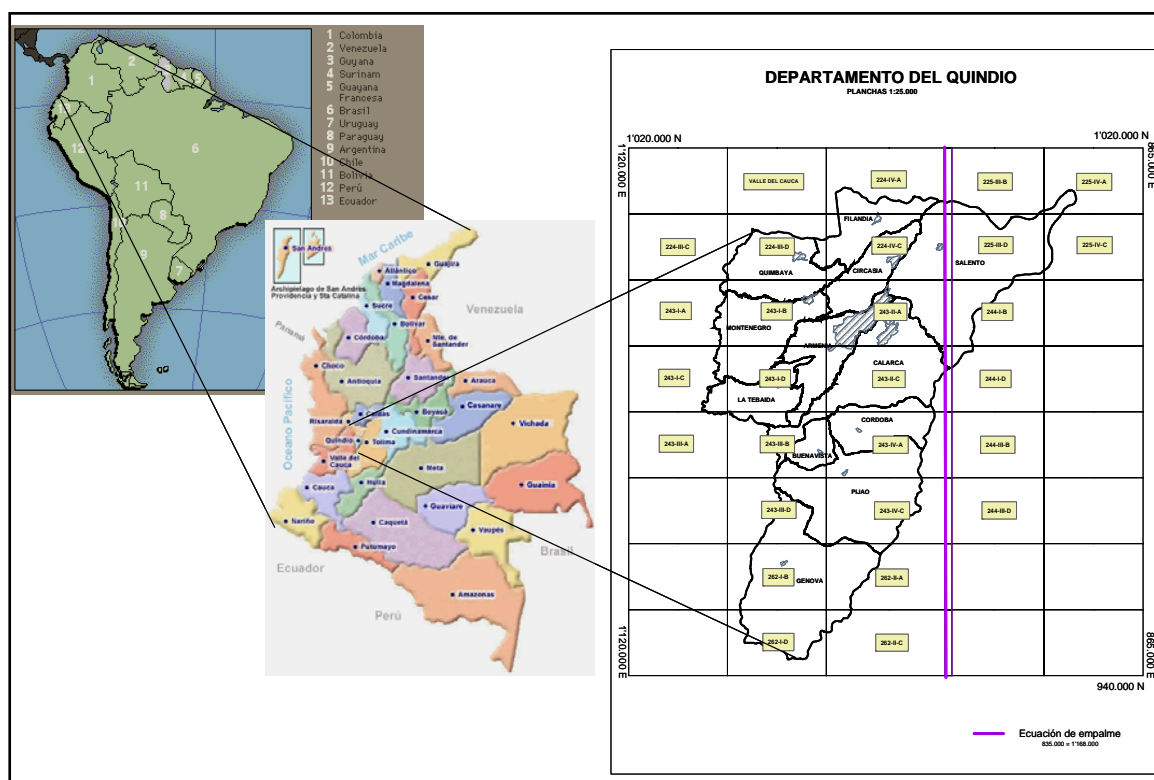


Figura 3.1. Localização do Departamento do Quindío (INGEOMINAS, no prelo).

3.2 GEOLOGIA REGIONAL

3.2.1 Geologia

O Departamento do Quindío faz parte da vertente ocidental da cordilheira Central onde afloram rochas de origem sedimentar, ígnea e metamórfica, submetidas localmente a fortes processos de falhamento que determinam as características geomorfológicas do território, com a presença de serras homoclinais montanhosas e alongadas em geral na direção NNE no setor oriental. Na região noroeste o território é normalmente plano a suavemente inclinado, associado tanto com fluxos laharicos cobertos por um manto de rochas piroclásticas, quanto com planícies aluviais, localmente amplas, associadas com terraços fluviais (Figura 3.2). Os fluxos laharicos são depósitos comumente encontrados nesta região; correspondem a fluxos de lodo e escombros vulcânicos originados pelos degelos de glaciais ocasionados pela atividade vulcânica da região.

Litologicamente, no Departamento apresentam-se os três complexos rochosos principais: Cajamarca, Quebradagrande e Arquía, dispostos tectonicamente. Adicionalmente apresentam-se alguns corpos intrusivos ígneos de idade cretácea que afetam os complexos rochosos de Quebradagrande e Arquía, e localmente afloram rochas hipoabisais do Terciário, e finalmente alguns conjuntos rochosos sedimentares, predominantemente argilosos, arenosos e conglomeráticos terciários (Gonzales e Nuñez, 1991) (Figura 3.2).

O **Complexo Cajamarca** está composto por rochas metamórficas como quartzo-sericita xistos, xistos verdes, filitos, quartzitos e algumas faixas de mármore locais, de idade paleozóica inferior, localmente associadas com o **Intrusivo gnáissico da Linha** que se compõe de granodiorito tonalítico com uma textura grão médio a grosso. Em geral, este complexo, conforma as serras mais elevadas do Departamento, afetadas localmente por processos erosivos glaciais.

Na região média da vertente ocidental da cordilheira ocidental, com geoformas de esporões estruturais falhados com direção E- W e serras homoclinais de direção NNE, encontram-se as rochas do **Complexo vulcânico – sedimentar de Quebradagrande** de idade cretácea. Composto por lutitas, cherts, arenitos, brechas, rochas piroclásticas, basaltos e localmente rochas ultramáficas e gabros (Gonzales e Nuñez, 1991).

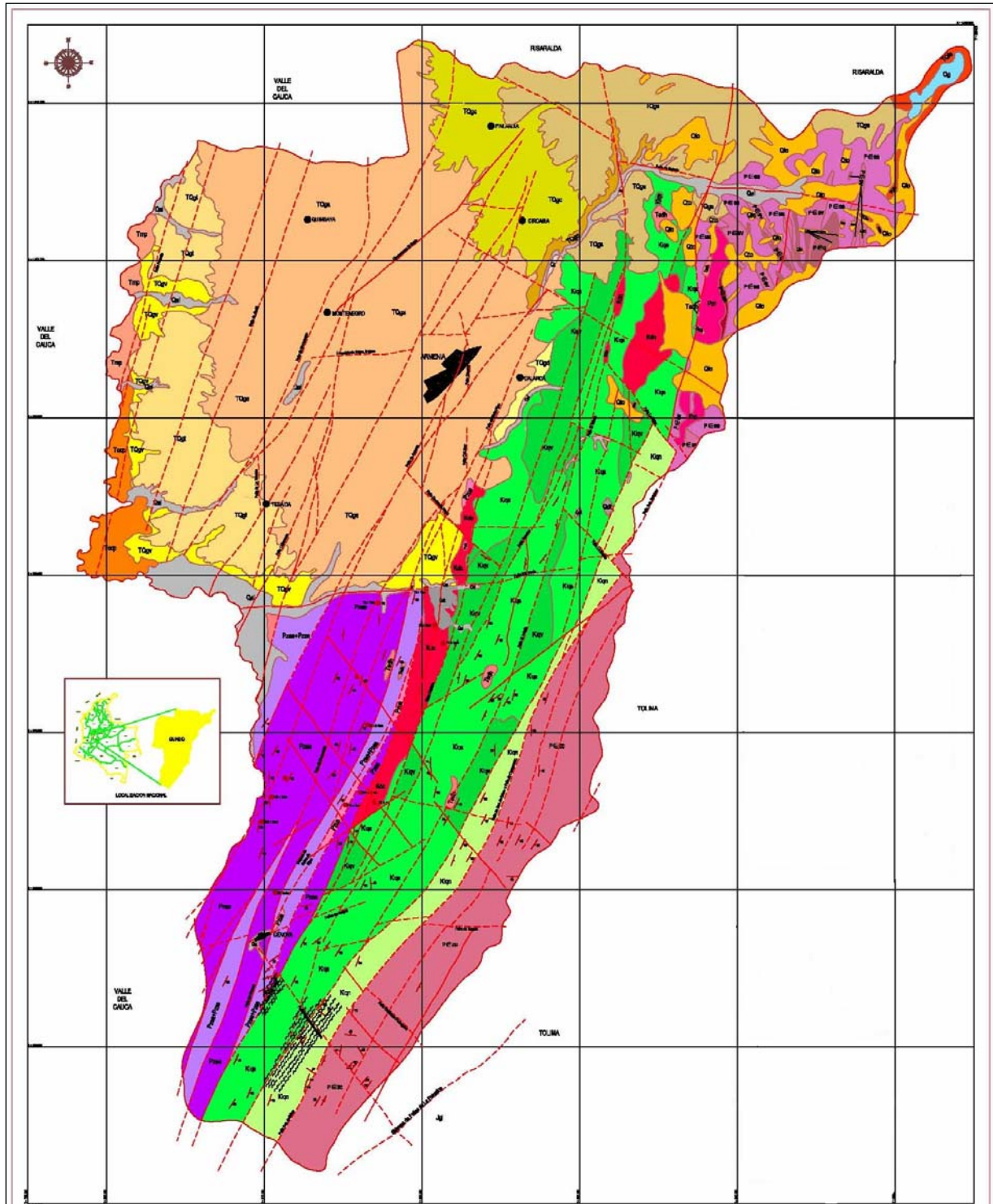


Figura 3.2. Esquema geral da geologia e os sistemas de falhas do Departamento do Quindío (INGEOMINAS, 1999).

No setor sul ocidental do Departamento apresentam-se as rochas do **Complexo Arquía**. Estas rochas se encontram dispostas como serras homoclinais montanhosas dispostas na direção NNE. São de origem ígnea básica e sedimentar de idade provavelmente paleozóica, afetadas posteriormente por múltiplos eventos de metamorfismo regional de média a alta pressão, particularmente no Cretáceo Inferior. Litologicamente este Complexo está constituído por duas seqüências rochosas: 1) uma seqüência básica com anfíbolitos, anfíbolitos granadíferos, xistos anfibólicos e localmente eclogitos e eclogitos anfíbolitizados associados com rochas ultramáficas serpentinizadas e tectonizadas, 2) Uma seqüência de xistos micáceos grafíticos, e localmente uma intercalação de xistos glaucofânicos, segundo González e Nuñez (1991).

Intruindo estes complexos se apresentam corpos de composição tonalítica e diorítica do Cretáceo Superior – Terciário, denominados na literatura geológica como **intrusivos de Córdoba e Rio Navarco**. O primeiro se apresenta com geoformas de serras homoclinais na direção NNE, cuja disposição obedece a um alto grau de fraturamento e foliação associados com falhamento. O segundo corresponde a um morro alombado residual que é intrusivo nas seqüências metargilosas do Complexo Quebradagrande.

Adicionalmente apresentam-se corpos delgados e alongados de morfologia abaulada, compostos por rochas ultramáficas serpentinizadas e tectonizadas que se encontram de forma não continua ao longo de uma zona de cisalhamento, definida como Pijao -Córdoba.

Na parte ocidental do Departamento as geoformas são de morfologia abaulada e definem pranchas estruturais denudadas localmente muito dissecadas constituídas por rochas sedimentares terciárias de origem fluvial e lacunar, denominadas **Formações La Paila e Zarzal** respectivamente (Suter, 2003).

Cobrimdo quase na totalidade estas rochas Terciárias se encontra o denominado Abanico do Quindío, constituído por fluxos laharicos do Plioceno - Pleistoceno, e sedimentos principalmente de origem fluvial do Quaternário mais recente. Nas partes montanhosas se apresentam fluxos flúvio torrenciais, fluxos de escombros, colúvios e deslizamentos, locais como produto da alta atividade sísmica da região (Figura 3.2).

3.2.2. Geologia Estrutural

Com respeito às características estruturais do Departamento, González e Nuñez (1991) identificaram três sistemas de falhamento com características e atividade diferente (Figura 3.2). O sistema denominado **Falha de Romeral** com direção aproximada N10°E a N10°W que atravessa a zona montanhosa, e que constitui o limite dos complexos rochosos descritos anteriormente como contactos falhados, este arranjo tem determinado a presença de serras homoclinais mergulhando em direção a oeste com alto grau de inclinação (80°, aproximadamente). Entre as falhas desta orientação destacam-se as Falhas Silvia – Pijao, Córdoba e Navarco, San Jerónimo, El Salado, Buenavista, Armênia e Almaguer.

O segundo sistema de falhamento com direção aproximada E – W corresponde às falhas de tipo normal, que determina a segmentação da cordilheira Central no Departamento e adicionalmente tem gerado a formação de bacias que definiram a evolução do abanico do Quindío. Este sistema de falhas possui alguns segmentos considerados como ativos graças às evidências neotectônicas da atividade sísmica particularmente em Armênia. Entre estas falhas destacam-se as falhas de Salento, Quebrada Negra, Rio Verde (Suter, 2003).

De acordo com Gonzalez e Nuñez (1991) o terceiro sistema de falhamento tem direção N20°E e só apresenta alguns traços em direção à zona axial da Cordilheira, o que coincide com a localização dos vulcões do chamado complexo Ruiz-Tolima.

3.2.3. Geomorfologia

O Departamento do Quindío encontra-se localizado geomorfologicamente na geomorfoestrutura correspondente ao Sistema montanhoso orogênico Andino que limita o Cratón Guayanés pela parte noroeste. O sistema orogênico Andino está conformado pelas províncias geomorfológicas proeminentes da cordilheira ocidental, a cordilheira central e a cordilheira oriental, separadas geomorfologicamente pelas províncias dos vales interandino Cauca – Patía e Magdalena respectivamente (Carvajal et al, 2003).

O território do Departamento do Quindío faz parte da província geomorfológica da Cordilheira Central, cuja evolução está associada a eventos de acumulação de sedimentos em bacias inicialmente distensivas e subsidentes, afetadas pelo menos por três eventos orogênicos

associados com processos intrusivos ígneos pós orogênicos e eventos vulcânicos, associados igualmente a processos compressivos e de acréscimo de terrenos alóctonos que determinaram à geração de metamorfismo regional de baixa e média pressão, e localmente de origem dinâmica.

O processo em geral gerou o levantamento da cordilheira, e favoreceu a cobertura glacial durante o Pleistoceno. Posteriormente os degelos associados aos últimos eventos vulcânicos do vulcão do Quindío, determinaram a geração de fluxos piroclásticos, avalanches e fluxos laharicos que atualmente cobrem um 35% do noroeste do Departamento. O levantamento da cordilheira se associa com a atividade sísmica alta que afeta a região, evidenciada pela geração de deslizamentos co-sísmicos, coluviões e fluxos torrenciais, cujos sedimentos em parte contribuem ao aporte de carga das correntes fluviais que cruzam o Departamento.

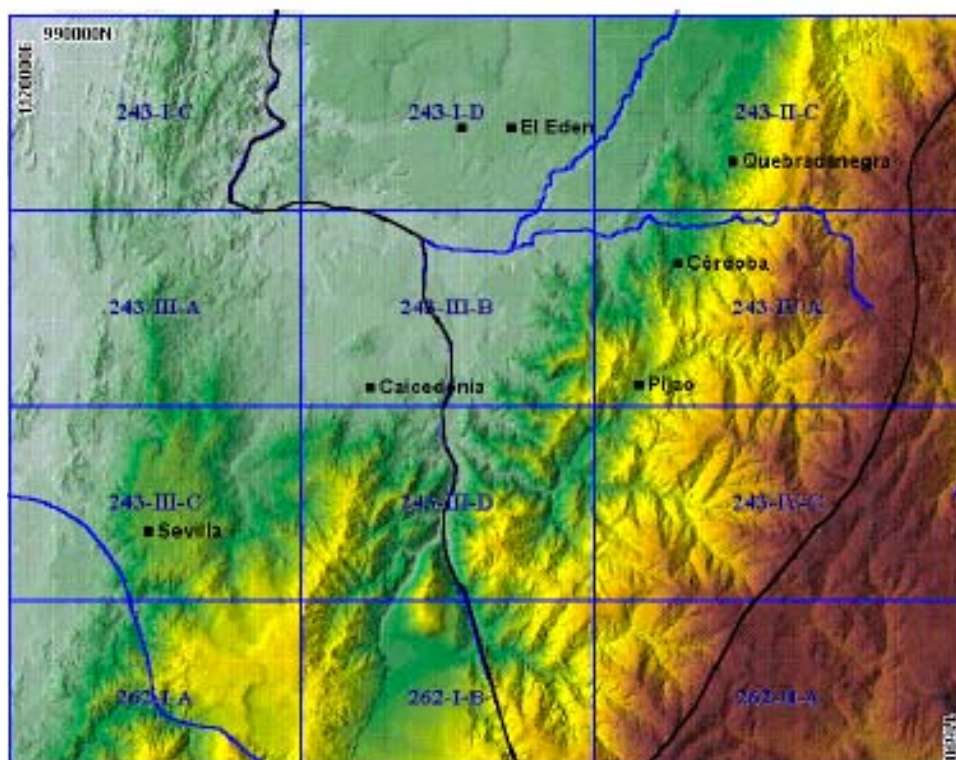


Figura 3.3. Detalhe do relevo geral da região do Departamento do Quindío (Aguilar e Mendoza, 2002).

Em geral o Departamento do Quindío está constituído por uma série de serras morfoestruturais e vulcânicas, localmente glaciadas que fazem parte das vertentes ocidentais da cordilheira central (onde se localiza a área de estudo), afetadas localmente por processos flúvio-vulcânicos que determinaram a formação do abanico do Quindío (Figura 3.3).

3.3. SOLOS

O INGEOMINAS realizou um estudo completo do solo no Departamento do Quindío onde definiu, entre outros, a classificação pedológica, textural e a profundidade efetiva dos mesmos. Sendo a classificação textural a que define características, tais como a permeabilidade e a retenção de umidade do solo, por exemplo, a abundância de frações grossas no solo representa a facilidade de infiltração, a troca gasosa rápida e a retenção de umidade baixa, no entanto a fração argilosa no solo representa maior resistência à transformação, e maior retenção de água.

Tabela 3.1. Classificação textural usada pelo INGEOMINAS.

<i>Tamanho</i>	<i>Classe</i>
Muito fina	$\geq 60\%$ de argila
Fina	Entre 60% e 35% de argila
Moderadamente Fina	Menos de 18% de argila, mais de 86% de silte e menos de 15% de areia.
Moderadamente grossa	Menos de 18% de argila, mais de 15% de areia, e menos de 70% de areia
Grossa	Menos de 15% de argila e mais de 70% de areia

A partir da classificação textural dos solos feita pelo INGEOMINAS (Tabela 3.1) para o Departamento de Quindío, realizou-se uma correlação com a classificação do sistema unificado de solos, onde cada uma das texturas edafológicas tem uma equivalência no sistema, permitindo sua aplicação à geomecânica. Nesta correlação se utiliza a classificação a seguir:

Tabela 3.2. Classificação do sistema unificado de solos usada pelo INGEOMINAS.

SÍMBOLO	NOME E DESCRIÇÃO
GW	Pedregulhos bem graduados, misturas de areia e pedregulho com pouco ou nenhum fino
GP	Pedregulhos mal graduados, misturas de pedregulho e areia com pouco ou nenhum fino
GM	Pedregulhos siltosos, misturas de pedregulho, areia e silte mal graduados
GC	Pedregulhos argilosos, misturas de pedregulho, areia e argila bem graduados
SW	Areias bem graduadas, areias pedregulhosas, com pouco ou nenhum fino
SP	Areias mal graduadas, areias pedregulhosas, com pouco ou nenhum fino.
SM	Areias siltosas, misturas mal graduadas de areia e silte
SC	Areias argilosas, misturas bem graduadas de areia e argila
ML	Siltes inorgânicos e areias muito finas, alteração de rocha, areias finas, siltosas ou argilosas com pequena plasticidade
CL	Argilas inorgânicas de baixa e média plasticidade, argilas pedregulhosas, argilas arenosas, argilas siltosas, argilas magras
OL	Siltes orgânicos e siltes argilosos orgânicos de baixa plasticidade
MH	Siltes inorgânicos, micáceos ou diatomáceos, finos arenosos ou solos siltosos, siltes elásticos
CH	Argilas inorgânicas de alta plasticidade, argilas gordas.
OH	Argilas orgânicas de média e alta plasticidade. Siltes orgânicos
Pt	Solos com elevado teor de matéria orgânica

No Departamento de Quindío, 53% do território está composto por argilas inorgânicas de plasticidade baixa, com argilas siltosas, pedregosas e argilas de baixa resistência, junto com argilas arenosas, ou seja, se tem uma mistura dos sistemas CL - SC o que indica que estes solos contem entre 35% e 60% de argila (Figura 3.4).

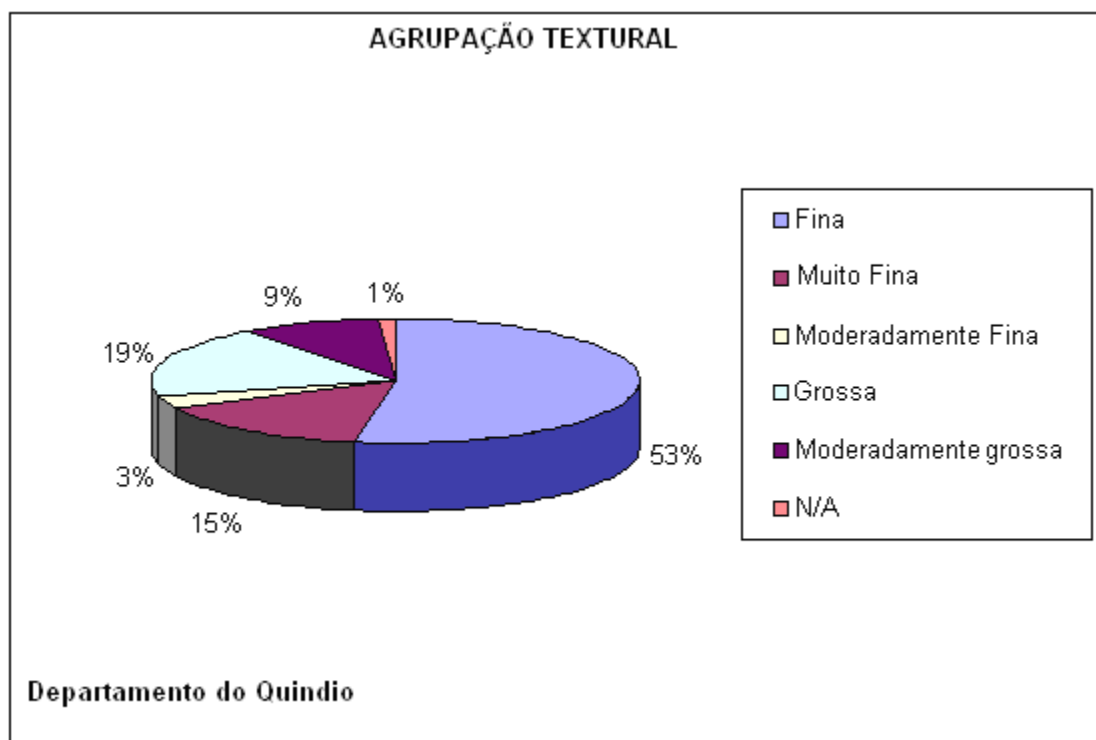


Figura 3.4. Conjunto textural do solo do Departamento de Quindío (INGEOMINAS, no prelo).

3.3.1 Caracterização Geotécnica

Dentre os poucos trabalhos que fazem uma caracterização geotécnica dos solos no Departamento do Quindío, se destaca o realizado por Forero-Dueñas C.A. et al (2000), onde se faz uma caracterização geotécnica do solo (Tabela 3.3) da Cidade de Armênia (Capital do Departamento). Este estudo faz parte de uma série de trabalhos gerados após o sismo do Eixo cafeeiro em 1999. Neste trabalho os autores fazem uma descrição e caracterização dos materiais encontrados na área, os quais na sua maioria correspondem a cinzas vulcânicas. Segundo estes autores estas cinzas vulcânicas fazem parte dos “solos alofanos”, este tipo de solos sofrem mudanças volumétricas e estruturais durante a secagem ao ar, as quais são irreversíveis. Em estado seco se comportam como um material arenoso e em estado úmido se comportam como material plástico.

Tabela 3.3. Propriedades geotécnicas dos materiais do subsolo da cidade de Armênia.

(Forero-Dueñas C.A. et. al, 2000).

Características	Cinza vulcânica	Solo residual	Saprolito	Aterros (naturais e antrôpicos)
Wn (%)	56,9	65,8	60,1	50,7
LL	68,6	74,2	68,2	55,6
LP	51,6	54,3	45,4	36,9
IP	19,9	19,9	22,8	18,5
Gs	2,67	2,75	2,79	2,69
γ (T/m ³)	1,54	1,55	1,66	1,67
ϕ' pico* (°)	43,4	36,9	-	30,7
ϕ' residual* (°)	43,8	30,6	-	31,6
c' pico* (kg/cm ²)	0,32	1	-	0,5
c' residual* (kg/cm ²)	0,15	0,19	-	0,15

3.4. CLIMATOLOGIA

O clima da região corresponde ao Andino Tropical com dois períodos principais de chuvas: o primeiro de maior pluviosidade entre os meses de março a maio e de setembro a novembro e o segundo de menor pluviosidade entre os meses de janeiro a fevereiro e junho a agosto. A temperatura média oscila entre os 18 e 21°C.

Segundo o zoneamento climático de Caldas modificado feito para o Departamento do Quindío (Ruiz, 2004), na região predomina o clima médio úmido dominante em todo o Abanico flúvio-vulcânico do Quindío em altitudes médias de 1000 - 2000 m e temperaturas médias de 18 - 24°C com precipitações anuais entre 1000 e 2000 mm. Em alturas médias entre 2000 - 3000 mm, temperaturas médias entre 12 e 18°C com precipitações anuais entre 2000 e 4000 mm. As zonas mais frias com climas extremamente frios caracterizam-se por temperaturas da ordem dos 4°C e precipitações anuais maiores de 2000 mm.

Em geral se apresenta uma tendência de pluviosidade maior no leste, na zona montanhosa.

3.5. VEGETAÇÃO E USO DO SOLO

A vegetação é um parâmetro importante a ser analisado no estudo geotécnico pois abrange a maior densidade de cobertura na superfície terrestre em comparação com os corpos de água e a infra-estrutura urbana e rural. Segundo INGEOMINAS (2004) a influência da vegetação na estabilidade das encostas é importante pelos seguintes aspectos: o sistema de raízes que contribui com o reforço mecânico do solo mediante a transmissão de esforços cortantes a resistência no solo e tensão nas raízes ou gerando esforços locais por invasão de fissuras que podem contribuir com a instabilidade; o sistema de vegetação modifica o conteúdo de umidade do solo por efeito de evapotranspiração; o movimento das árvores pela ação do vento e o peso da vegetação que exerce efeitos desestabilizadores.

De acordo com o estudo da cobertura feito pelo INGEOMINAS, 53% do território do Departamento do Quindío está ocupado por pastagem (Figura 3.5).

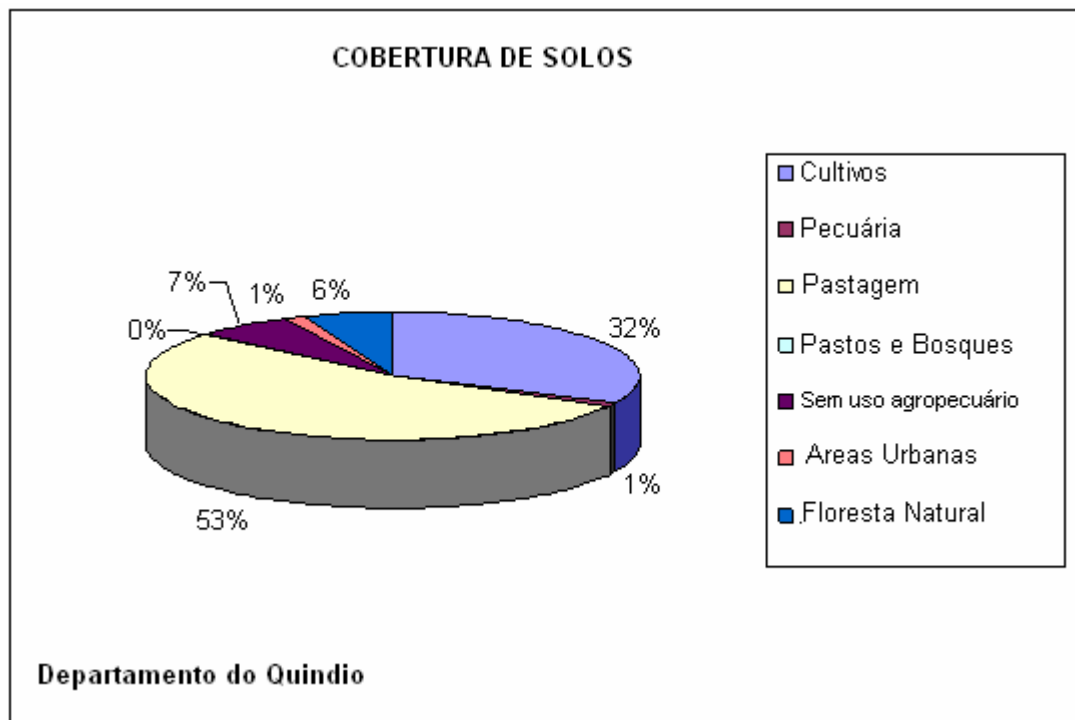


Figura 3.5 Cobertura do solo do Departamento de Quindío. (INGEOMINAS, no prelo).

4. PROPOSTA METODOLÓGICA PARA ANÁLISE E AVALIAÇÃO DO PERIGO E RISCO A DESLIZAMENTOS NA ÁREA ESTUDADA

O objetivo principal da pesquisa é a concepção e desenvolvimento de uma metodologia simples e prática para a avaliação do perigo a deslizamentos na zona cafeteira colombiana, tendo em conta a informação disponível da área, ou seja, a informação com a que conta o “Instituto Colombiano de Geologia y Minería” (INGEOMINAS), este banco de dados representa o estado atual do conhecimento técnico-científico colombiano e da maioria dos países da América Latina. Para o desenvolvimento desta metodologia se utilizou como principal ferramenta o sistema de informações geográficas (SIG). A Figura 4.1, apresenta o roteiro usado para o desenvolvimento desta proposta.

Partindo deste objetivo a primeira etapa desta pesquisa abarca a compilação dos trabalhos existentes da área (artigos, teses, cartas, etc.), assim como de base de dados, obtendo:

- Mapas topográficos, geológicos, de geologia de engenharia e geomorfológicos a escala 1:25.000 do Departamento de Quindío.
- Mapa de solos (características texturais e geotécnicas), mapa climatológico e hidrológico com informações de precipitação média anual, evapotranspiração e densidade de drenagem, a escala 1:200.000 do Departamento do Quindío.
- Fotografias aéreas de diferentes escalas do Departamento de Quindío.
- Inventário geral de deslizamentos do Departamento de Quindío.
- Mapa de cicatrizes de deslizamento, escala 1:25.000.

Posteriormente se fez uma análise da base de dados obtida, assim como dos estudos de casos específicos de movimentos de massa (artigos, dissertações e teses) na região, e desta forma se realizou a escolha da área mais representativa onde se acharam a maior quantidade de cicatrizes de deslizamento.

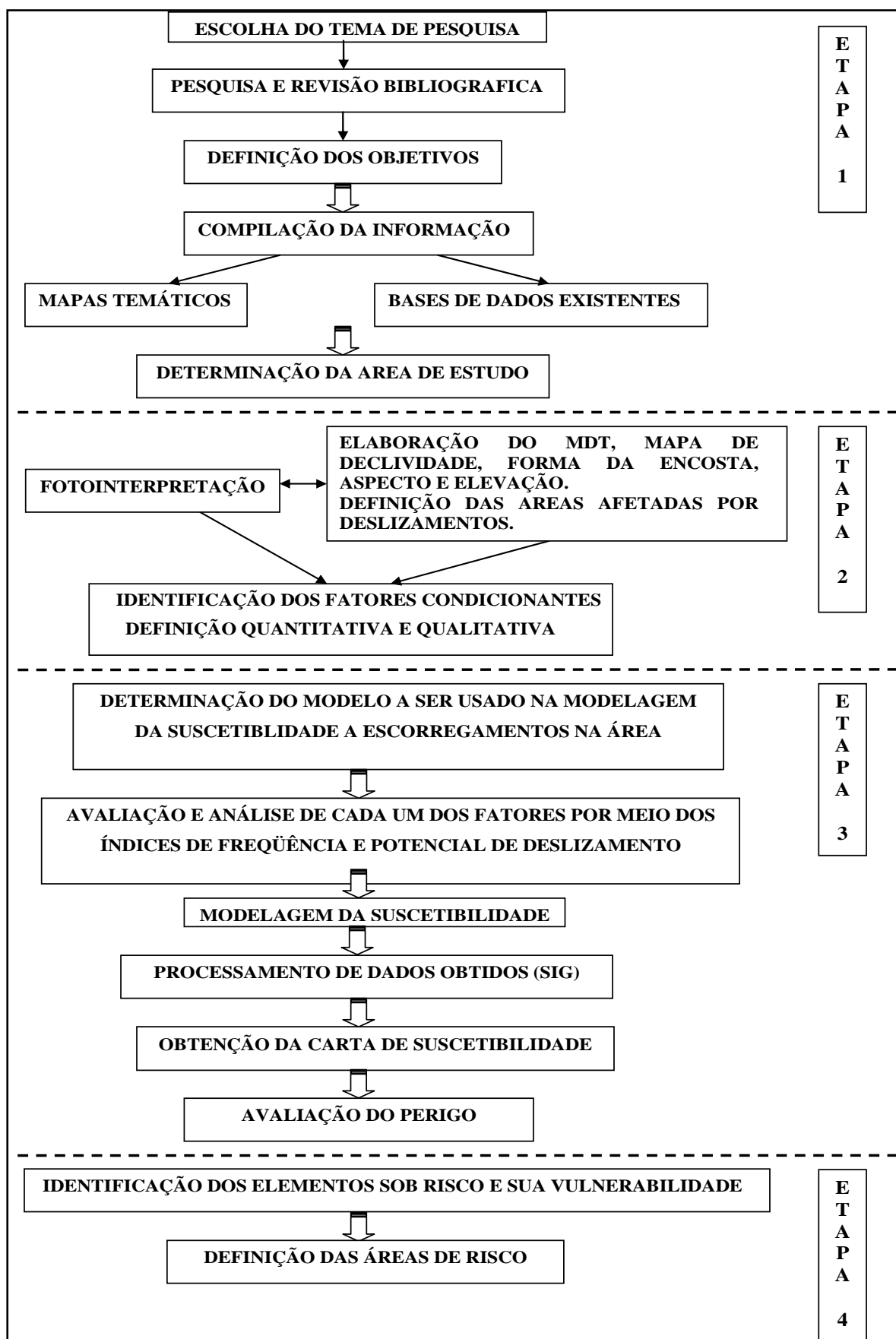


Figura 4.1. Fluxograma com as principais etapas da proposta metodológica para a elaboração do trabalho.

A área escolhida abarca na maior parte o Município de Calarcá e uma pequena parte dos Municípios de Córdoba e Salento (Figura 4.2). A área de estudo cobre uma extensão aproximada de 189 km² e está delimitada pelas seguintes coordenadas: 1.154.000 N a 1.170.000 N e 980.000 E a 995.000 E do Hemisfério Norte (Figura 4.2). Para efeitos de geração do MDT escolheu-se delimitar a área de estudo de acordo com a área de drenagem da Bacia do Rio Santo Domingo.

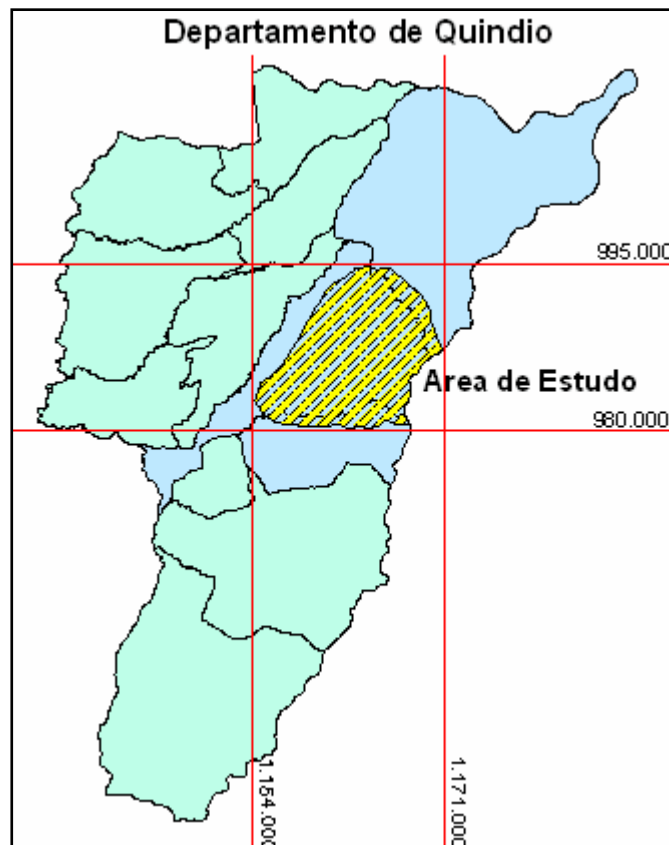


Figura 4.2. Departamento de Quindío, detalhe da área de estudo em amarelo (grafada).

4.1 DADOS DE ENTRADA PARA A ANÁLISE

Tendo determinado a área a ser estudada, se deu início á segunda etapa da pesquisa que abarca a escolha dos fatores a serem utilizados e a elaboração dos mapas temáticos. Os mapas básicos foram extraídos e modificados da base de dados existente do INGEOMINAS (escala 1:25.000), os mapas a serem utilizados na análise são:

Mapa topográfico, Mapa de geologia de engenharia, Mapa de geomorfologia, Mapa de classificação geotécnica de solos, Mapa de precipitação mensal anual e Mapa de evapotranspiração.

4.1.1 Obtenção dos Mapas Básicos

Os mapas básicos fornecem a informação básica da área de estudo no que se refere à análise de estabilidade do terreno, descrevendo e caracterizando de forma completa a topografia, geologia, geomorfologia, tipo de solo e condições climáticas únicas presentes na área. A respeito dos dados de vegetação e uso do solo existentes, estes não foram utilizados, pois, 90% da área o uso do solo está classificado como pastagem e só 4% como área de cultivos, portanto estas classes de uso do solo não representam fator condicionante significativo ao estudo.

Estes mapas foram obtidos da base de dados do “Instituto Colombiano de Geologia y Minería” (INGEOMINAS), e a informação foi extraída para a área específica.

4.1.1.1 Topografia

Este mapa foi extraído do mapa topográfico geral do Depto. de Quindío, escala 1:25.000, elaborado pelo INGEOMINAS em 2005, com curvas de nível de 25m (ANEXO 1). Este mapa também inclui a rede de drenagem.

4.1.1.2 Geologia de engenharia

Este mapa foi extraído das cartas de geologia de engenharia elaborado pelo INGEOMINAS, correspondentes as cartas 243 IIA e 243 IIC, escala 1:25.000 (Figura 4.3).

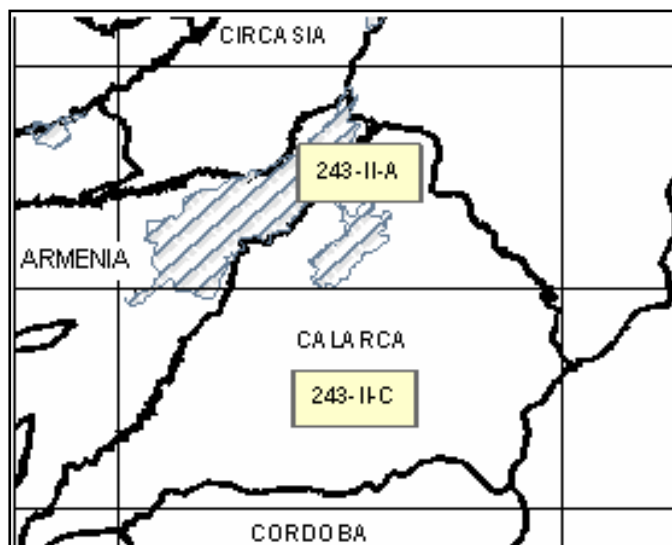


Figura 4.3. Esquema das cartas do Departamento de Quindío usadas para este trabalho.

A partir do mapa de geologia de engenharia da área (ANEXO 2), se identificaram as unidades geológico-geotécnicas presentes na área, estas unidades foram classificadas pelo INGEOMINAS tendo em conta suas propriedades geológico-geotécnicas e estão divididas nos seguintes grupos (esta descrição é complementar as legendas do ANEXO 2):

Rochas Duras (Correspondentes aos Corpos Ígneos Intrusivos):

- **Rd1:** Correspondente a corpos ígneos intrusivos, de composição diorítica-quartzodiorítica, pouco fraturados e moderadamente alterados, com setores completamente alterados, e com desenvolvimento de solos residuais de espessura importante, que na área de estudo corresponde a 2 metros.

Rochas Intermédias (Correspondentes ao Complexo de Quebrada Grande):

- **Ri1_v:** Correspondente a diabásios foliados, apresentando perfis de alteração e formação local de solos residuais com espessura < 2m. A foliação apresenta inclinações que variam entre 40-60° a leste. As rochas se encontram moderadamente alteradas a muito alteradas. Nesta unidade apresentam-se deslizamentos de tipo rotacional e translacional.
- **Ri1_s:** Correspondente a intercalações de capas finas a grossas de meta-argilitos pretos, meta-arenitos e ultra-milonitos foliados, com desenvolvimentos de perfis de alteração, e capas locais de solos residuais. A foliação apresenta inclinações que variam entre 60-80° a leste. As rochas encontram-se moderadamente alteradas a muito alteradas. Nesta unidade, apresentam-se deslizamentos de tipo rotacional e translacional.

Rochas Intermédias (Correspondentes ao Complexo Cajamarca):

- **Ri3:** Correspondente a uma seqüência interestratificada de rochas metamórficas composta por xistos quartzo sericíticos e grafitosos, siltes quartzíticos e quartzitos que apresenta uma estratificação laminar a média, em geral são rochas fraturadas e moderadamente alteradas, estas rochas estão cobertas na sua maioria por capas finas de cinzas vulcânicas.

Solos Residuais

- **Srvs3:** Correspondente a solos de composição silto-argilosa, de cor laranja e vermelha, cuja rocha parental é de origem vulcano-sedimentar e pertencente ao Complexo de Quebrada Grande.
- **Srii2:** Correspondente a solos de composição silto-argilosa, de cor laranja e vermelha cuja rocha parental são corpos ígneos intrusivos, de composição diorítica, granodiorítica e quartzodiorítica; pertencentes às unidades do Complexo ígneo de Córdoba e Pórfiros andesíticos.

Solos transportados

- **Stv1:** Correspondente a depósitos piroclásticos de granulometria média a fina. Materiais de cinza vulcânica Lapilli e pó vulcânico pertencentes ao Glacis do Quindío (Figura 4.4). Nesta unidade, apresentam-se deslizamentos de tipo rotacional e translacional.



Figura 4.4. Aspecto geral dos fluxos piroclásticos na região com coberturas locais de cinzas vulcânicas (INGEOMINAS, no prelo).

- **Stf1**: Correspondente a depósitos de origem fluvial de leitos antigos e atuais compostos por; areias, siltes, pedregulhos e blocos de composição heterogênea com formas e tamanhos.
- **Stft**: Correspondente a depósitos gerados pelos abanicos fluviais, compostos por pedregulhos e blocos de composição heterogênea numa matriz arenosa e siltosa.
- **Stfv + Sr_v**: Correspondente a fluxos vulcânicos e laharicos antigos os quais nos níveis mais superiores apresentam-se muito alterados gerando um horizonte de solo residual de cor amarelo-vermelho. Estes depósitos têm uma granulométrica fina a grossa e estão compostos por pedregulhos e blocos de composição heterogênea e formas variadas dentro de uma matriz de areia, silte e argila (Figura 4.5).



Figura 4.5. Aspecto geral dos fluxos laharicos na região (INGEOMINAS, no prelo).

Solos Coluviais

- **Strc1**: Correspondente a depósitos coluviais antigos de granulometria média a grossa, constituídos por fragmentos, matações e blocos de composição heterogênea, de formas angulares, embebidos numa matriz silto-argilosa.

4.1.1.3 Geomorfologia

Este mapa foi extraído das cartas geomorfológicas do Depto. de Quindío elaboradas pelo INGEOMINAS, correspondentes as cartas 243 IIA e 243 IIC, escala 1:25.000 (Figura 4.3).

A partir do mapa geomorfológico da área de estudo (ANEXO 3), identificaram-se as unidades geomorfológicas presentes na área, estas unidades foram classificadas pelo INGEOMINAS, por meio da metodologia do esquema de hierarquização geomorfológica proposta por Carvajal (2003), as quais foram divididas nos seguintes grupos (esta descrição é complementar às legendas do ANEXO 3):

Geoformas de Origem Morfoestructural Denudacional

- **Sshcp:** Correspondem a serras homoclinais com vertentes estruturais definidas pela inclinação das capas em contra pendente, associada a uma inter-estratificação de rochas vulcânicas como diabásios foliados e algumas intercalações de rochas meta sedimentares. Com durezas que variam de dura a branda e com coberturas locais de cinza vulcânica. Formando encostas de formas côncavas e convexas e com associação de deslizamentos de tipo rotacional. As inclinações das estruturas (estratificação) variam entre 40° - 60° a leste. Em geral estas encostas caracterizam-se por apresentar formação de solos residuais finos <2m.
- **Sshle:** Correspondem a serras homoclinais com vertentes estruturais definidas pela inclinação dos estratos a favor da encosta com inclinações >35° (Figura 4.6), associadas geralmente a rochas vulcânicas como diabásios foliados e algumas intercalações de rochas meta sedimentares meta-arenitos, meta argilitos. Em geral rochas duras a intermediárias com desenvolvimento de capas finas de solos residuais localmente e com capas de cinza vulcânica, também locais. Estas capas estão associadas ao desenvolvimento de deslizamentos translacionais.



Figura 4.6. Serras estruturais homoclinais na parte ocidental da Cidade de Calarcá (INGEOMINAS, no prelo).

- **See:** Corresponde às serras perpendiculares e às serras homoclinais, definidas por estratos com inclinação a favor da encosta. Formadas por processos de dobramento e erosão diferenciada em uma seqüência de estratos duros e brandos composta por meta argilitos pretos, meta arenitos, quartzitos. Suas cristas apresentam localmente uma capa delgada de cinza vulcânica. Apresentam-se também localmente deslizamentos rotacionais.
- **Seef:** Correspondem à serras montanhosas perpendiculares as estruturas maiores, de cristas agudas, escalonadas e formadas por uma sucessão de facetas triangulares que se inclinam a favor da encosta, originadas por processos de erosão, falhamento e dobramento. Compostas por inter-estratificações, de capas delgadas de rochas duras e brandas (meta-argilitos pretos, meta arenitos e ultra-milonitos foliados) correspondentes ao membro sedimentar do Complexo Quebradagrande, localmente com cobertura de uma capa delgada de Cinza vulcânica. Apresenta uma drenagem sub-paralela associada a deslizamentos rotacionais. Caracteriza-se também a disposição da foliação e/ou estratificação incipiente de direção N10W e N40E com ângulos de 60°- 80° a leste que contrasta com os falhamentos com o mesmo ângulo de mergulho em direção oeste.

- **Scor**: Correspondem à cornisas estruturais rochosas que se apresentam nas encostas geralmente irregulares ou escalonadas. São tabulares de morfologia abaulada suavemente inclinada, cuja origem deve-se á erosão diferencial em rochas duras e brandas ou por falhamento. As cornisas estruturais são geoformas alongadas de aspecto aterrçado e de pouca extensão (200–500 m de amplitude) que se apresentam na parte média a alta das encostas.
- **Sifp**: Correspondem à escarpas de linha de falha, que variam de muito curtas a compridas, abruptas a escarpads, originadas pela erosão acentuada ao longo de escarpas de falha definidas pelo truncamento das estruturas topográficas e geológicas.
- **Sft**: Correspondem à facetas triangulares. Que são superfícies abruptas, retas com uma base ampla que se estreita para cima, cuja origem deve-se ao truncamento e deslocamento de esporões estruturais por processos de falhamento intenso. Na Figura 4.7., observa-se a presença de várias gerações de facetas triangulares, indicadoras de vários eventos de atividade de falhamento.



Figura 4.7. Aspecto geral das facetas triangulares na região. (INGEOMINAS, no prelo).

Geoformas de Origem Denudacional

- **Derm**: Correspondem a morros testemunhos topograficamente isolados, localmente alongados de morfologia abaulada de vertentes curtas, de formas convexas e inclinados abruptamente. Sua origem está relacionada com processos de erosão diferencial antigos.
- **Dcr**: Correspondem a morros residuais, topograficamente sobressalentes de morfologia abaulada com cumes arredondados de vertentes curtas convexas muito inclinadas, associadas com solos residuais grossos de origem ígneo e localmente metamórfico com cobertura local de cinza vulcânica. Sua origem se associa a processos de intemperismo diferencial intenso em climas úmidos tropicais. Com desenvolvimento local de processos de remoção em massa.
- **Dco**: Correspondem a cones e lóbulos coluviais de longitudes curtas a longas, com formas convexas e inclinações suaves a abruptas. Originam-se respectivamente por acumulação de materiais sobre as vertentes tanto por processos de escoamento superficial como por fluxo lento e viscoso de solo. Constituem-se de blocos angulares a sub-angulares de diferentes tamanhos embebidos em material argiloso com espessuras de 5 - 35 m.
- **Dcdr**: Correspondem a cones de deslizamentos rotacionais. Formados pela acumulação de cinza vulcânica e solo residual em forma de cone ou lóbulo de morfologia abaulada baixa, de longitude muito curta a curta e com formas irregulares localmente escalonadas a abruptas (Figura 4.8). Apresentam espessuras de 5 - 20 m.
- **Dcdt**: Correspondem a cones de deslizamentos translacionais. De morfologia abaulada e lobular, de longitude curta e forma irregular, complexa, abrupta e de aspecto caótico (Figura 4.9). Compostos por blocos rochosos separados por gretas com drenagem ausente. Apresentam espessuras de 3 - 15 m.
- **Deem**: Correspondente à escarpa erosiva maior, de comprimento muito curto a curto, com forma côncava-convexa. Sua origem se associa aos processos de erosão lateral diferencial ou a retrocesso por fenômenos de remoção em massa ao longo de correntes fluviais.



Figura 4.8. Aspecto dos deslizamentos rotacionais na área de estudo, margem direita do Rio Santo Domingo (INGEOMINAS, no prelo).



Figura 4.9. Aspecto dos deslizamentos translacionais na área de estudo, margem esquerda da cabeceira do Rio Santo Domingo (INGEOMINAS, no prelo).

- **Dft**: Correspondente a fluxos torrenciais. Lóbulos e leques de morfologia abaulada de longitudes muito longas a extremadamente longas, de formas convexas abruptas a muito abruptas. Estes depósitos constituem-se por blocos rochosos angulares a sub-arredondados de dimensões métricas em meio a matriz arenosa a granular com espessura de 20-40 m. Sua origem se associa às avalanches torrenciais induzidas possivelmente por eventos sísmicos ou mudanças climáticas associadas a chuvas torrenciais.
- **Dfl (1, 2, 10)**: Correspondente a fluxos laharicos ou fluxos de escombros em formas lobuladas e de terraço de grande extensão cobertas por um manto de cinza vulcânica que varia de 3 - 25 m. Desenvolvendo uma drenagem de tipo dendrítico. Estes depósitos constituem-se por blocos rochosos de 10-30 cm, disseminados numa matriz arenosa de origem vulcânica.

Geoformas de Origem Fluvial e Lacunar

- **Fpi**: Corresponde à planícies de inundação. São faixas de terreno planas, baixas, de morfologia ondulada, apresentam-se as margens dos leitos fluviais e estão limitadas localmente por escarpas de terraços (Figura 4.10). Compostas por pedregulhos, areias e argilas (material heterogêneo) produto da sedimentação durante os eventos torrenciais e de inundação fluvial.



Figura 4.10. Aspecto geral das planícies de inundação na região (INGEOMINAS, no prelo).

Estas planícies de inundação podem ser divididas em sub unidades dentro das quais se destacam: **Ft** (terraços aluviais de acumulação), **Fte** (terraços aluviais por erosão), **Fcdy** (cones de dejeção).

4.1.1.4 Mapa de classificação geotécnica de solos

Este mapa foi extraído do Mapa de Solos Geotécnicos Superficiais Unificados do Depto. de Quindío elaborado pelo INGEOMINAS, escala 1:200.000. Obtido a partir da correlação entre o sistema unificado de engenharia e a classificação textural edáfica dos solos feita pelo INGEOMINAS. As propriedades de engenharia dos solos edáficos, foram consideradas por meio de tabelas comparativas.

A partir do mapa de solos geotécnicos superficiais unificados da área de estudo (ANEXO 4), se identificaram as unidades de solo presentes na área, estas unidades foram classificadas pelo INGEOMINAS, por meio do sistema unificado de classificação de solos (SUCS), e descritas a seguir (esta descrição é complementar às legendas do ANEXO 4):

Unidades de solo

- **CL – SC**: Argilas arenosas inorgânicas de plasticidade baixa a média, de baixa resistência.
- **SM – SC**: Areias silto argilosas de plasticidade de média a baixa.
- **SM**: Areias siltosas, misturas mal graduadas de areia e silte.

4.1.1.5 Mapa de Precipitação.

Este mapa foi extraído do mapa de zoneamento da precipitação média anual multianual do Depto. de Quindío, elaborado pelo INGEOMINAS, escala 1:200.000.

Este mapa representa espacialmente a distribuição da precipitação no Departamento de Quindío, por meio de linhas de Iso-precipitação média anual (Isoietas), agrupadas em intervalos. Foi elaborado com base na compilação da informação das estações pluviométricas existentes no Departamento desde a década de 70 e complementado com mapas similares feitos por outras entidades (IDEAM, IGAC, CRQ, FNC).

A partir do mapa de zoneamento da precipitação média anual multianual da área de estudo (ANEXO 5), se identificaram os intervalos de precipitação presentes na área. (Tabela 4.1)

Tabela 4.1. Intervalos de precipitação na área de estudo.

1400 mm - 1600 mm
1600 mm - 1700 mm
1700 mm - 1800 mm
1800 mm - 1900 mm
1900 mm - 2000 mm
2000 mm - 2100 mm
2100 mm - 2200 mm
2200 mm - 2400 mm
2400 mm - 2600 mm

A importância da precipitação como fator modelador da paisagem se relaciona diretamente com a quantidade e distribuição dos movimentos de massa dependendo da intensidade e a frequência das chuvas (Mora e Mora, 1994; Restrepo e Velásquez, 1997). Os solos residuais permanecem usualmente em estado de saturação parcial com uma fase de ar contínua entre seus interstícios; a pressão dos poros por conteúdo de ar se aproxima à pressão atmosférica como resultado da capilaridade nos poros menores, conferindo ao sistema um estado de equilíbrio.

4.1.1.6 Mapa de Evapotranspiração

Este mapa foi extraído do mapa de iso-linhas de evapotranspiração média anual multianual do Depto. de Quindío, elaborado pelo INGEOMINAS, escala 1:200.000.

Para avaliar a evapotranspiração no Departamento de Quindío, se geraram linhas de Iso-evapotranspiração média anual (Iso-ETP). Por meio da compilação da informação das estações (climatológicas, agroclimatológicas e meteorológicas) existentes no departamento e outras dos departamentos vizinhos para ter concordância com a tendência da região. Destas estações se obteve a maior quantidade de registros dos parâmetros, necessários para o cálculo da evapotranspiração potencial, pelo método de Hargreaves. Adicionalmente se consultaram produtos similares feitos por outras entidades (IDEAM, IGAC, CRQ, FNC).

A partir do mapa de iso-linhas de evapotranspiração média anual multianual da área de estudo (ANEXO 6), se identificaram os intervalos de evapotranspiração presentes na área. (Tabela 4.2)

Tabela 4.2. Intervalos de evapotranspiração na área de estudo.

400 mm – 600 mm
600 mm – 700 mm
700 mm – 800 mm
800 mm – 900 mm
900 mm – 1000 mm
1000 mm – 1100 mm
1100 mm – 1200 mm

4.1.2 Elaboração dos Mapas Derivados

Baseado no mapa topográfico conjuntamente com a rede de drenagem foi gerado o MDT (Modelo Digital do Terreno) por meio do programa ArcInfo©. O MDT corresponde a uma representação matemática computacional da distribuição de um fenômeno espacial que ocorre dentro de uma região da superfície terrestre (Felgueiras, 2004). O modelo digital está representado na rede (grade) de pontos, de modo a transmitir ao usuário as características espaciais do terreno. Esta grade é obtida a partir dos dados fornecidos pelo mapa topográfico da área (escala 1:25.000), neste caso se utilizou uma grade regular retangular que é gerada pelo programa ArcInfo©.

A partir do MDT por meio do SIG ArcGIS 9.0©, se elaboraram os mapas derivados a escala 1:25.000 que correspondem a: Mapa de declividade, Mapa de elevação ou hipsometria, Mapa de forma da encosta e o Mapa de aspecto. Gao (1993), após um estudo estatístico, concluiu que estas quatro variáveis derivadas fazem parte dos fatores mais significativos no que se refere aos estudos e análises da estabilidade das encostas.

4.1.2.1 Mapa de Declividade

O mapa de declividade é um produto derivado do MDT gerado pelo SIG, este mapa representa a inclinação da encosta definida como o ângulo existente entre a superfície de terreno e a horizontal, seu valor se expressa de 0° a 90°.

A declividade é um fator representativo da presença de rupturas no relevo, dado que é o principal fator geométrico que aparece nas análises de estabilidade. A declividade também determina a taxa de percolação do terreno.

Neste trabalho, os valores de declividade obtidos foram agrupados em 5 classes principais que representam a variação do relevo na área; 0° - 10° , 10° - 20° , 20° - 30° , 30° - 45° e $>45^{\circ}$. O mapa de declividade da área de estudo se encontra no ANEXO 7.

4.1.2.2 Mapa de Elevação

O mapa de altitude é um produto derivado do MDT aonde se agrupam os valores topográficos em classes. Segundo Gao (1993), a localização de um deslizamento depende da elevação do terreno devido à relação estreita entre a elevação e os fatores que contribuem ao potencial de deslizamento no terreno como a taxa de percolação da água de chuva.

Neste trabalho, os valores foram agrupados em 10 classes que representam a variação do terreno na área de estudo, a partir do menor e maior valor de altitude na área se fez uma divisão em intervalos iguais; 1182m - 1430m, 1430m - 1678m, 1678m - 1926m, 1926m - 2174m, 2174m - 2422m, 2422m - 2670m, 2670m - 2918m, 2918m - 3166m, 3166m - 3414m, 3414m - 3662m. O mapa de elevação da área de estudo se encontra no ANEXO 8.

4.1.2.3 Mapa de Forma

O mapa de forma da encosta é um produto derivado do MDT e representa o grau de concavidade/convexidade do terreno. Esta variável derivada do MDT está definida por um intervalo de valores dependendo da zona. A variável se relaciona como os deslizamentos na medida em que indica o grau de dispersão ou concentração de drenagem superficial (Santacana, 2001). Nas zonas côncavas o fluxo se concentra, enquanto nas convexas se dispersa. Alguns estudos sugerem que os deslizamentos superficiais ocorrem principalmente em convergências topográficas onde se concentra o fluxo subterrâneo, áreas onde o terreno fica mais instável.

Na área de estudo especificamente o grau de curvatura varia de -69 a 32. Fez-se uma divisão simples da seguinte forma: -69 a 0 intervalo de valores que representam o relevo côncavo, de

0 a 32 intervalo de valores que representam o relevo convexo. O mapa de forma da encosta da área de estudo se encontra no ANEXO 9.

4.1.2.4 Mapa de Aspecto

O mapa de aspecto é um produto derivado do MDT e representa a direção da exposição da encosta com relação ao norte, se calcula a partir do ângulo existente entre o norte geográfico e a projeção sobre o plano horizontal do vetor normal à superfície. Os valores variam de 1° a 360°. O aspecto ou orientação da encosta afeta a distribuição da precipitação e da insolação solar sobre a mesma, e estes fatores influem direta e indiretamente na estabilidade do terreno.

No presente trabalho se agrupou os seguintes intervalos: N, N-E, E, S-E, S, S-W, W, N-W. O mapa de aspecto da área de estudo se encontra no ANEXO 10.

4.1.3 Inventário Geral de Deslizamentos

Partindo da base de dados do INGEOMINAS, se obteve adicionalmente um mapa de cicatrizes de deslizamentos da área de estudo, os quais na sua maioria foram caracterizados no relatório de geomorfologia do INGEOMINAS, como deslizamentos de tipo rotacional e translacional. Estas cicatrizes de deslizamentos foram analisadas junto com o modelo de sombras da área, que corresponde a um produto derivado do MDT escala 1:25.000 com uma resolução de 15 m, onde se identificaram anomalias em forma de incisões nas encostas e vales de geoformas côncavas, com a finalidade de gerar finalmente um mapa de inventário de deslizamentos para a área de estudo, na escala 1:25.000 (ANEXO 11).

Posteriormente, este mapa foi comparado com a foto-interpretação feita das fotografias aéreas existentes da área para definir a dimensão dos deslizamentos rotacionais e translacionais em geral, obtendo como resultado uma área de deslizamento média de 125.000 m² (aprox.) com um raio de 200 m (Figura 4.11).

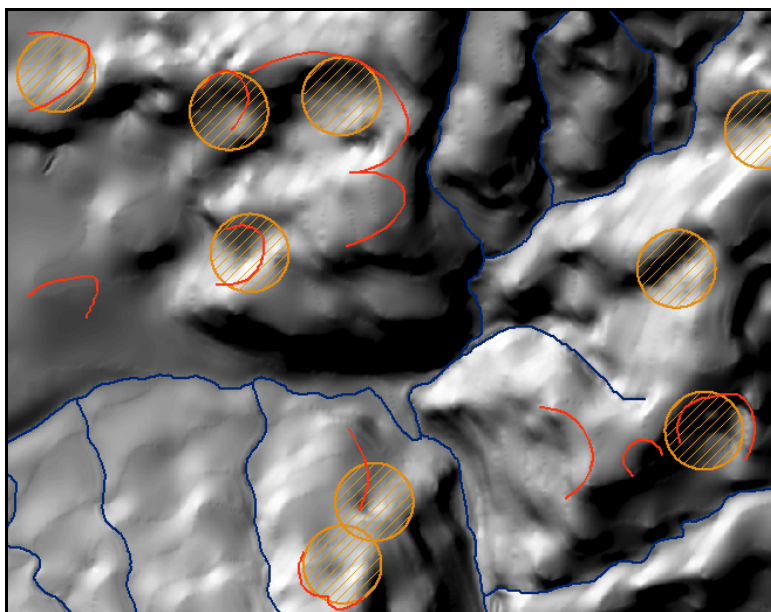


Figura 4.11. Detalhe da área média de deslizamentos em laranja, cicatrizes de deslizamentos em vermelho.

Na área de estudo foram identificadas 72 cicatrizes de deslizamento rotacional e translacional, que corresponde ao tipo de movimento de massa analisado. Salienta-se que, devido ao clima tropical da área que gera elevado grau de intemperismo, algumas das cicatrizes de deslizamento podem estar mascaradas, mesmo as de deslizamentos recentes.

4.2 MODELO USADO NA AVALIAÇÃO

Como visto no capítulo de revisão bibliográfica, são variados os modelos usados atualmente na análise de suscetibilidade e risco por deslizamento. A escolha do modelo a ser usado depende diretamente dos dados de entrada existentes ou disponíveis para o estudo. A terceira etapa da pesquisa corresponde à escolha deste modelo.

A partir desta condição, no presente trabalho decidiu-se trabalhar com métodos probabilísticos, mais exatamente, com base no método bivariado o qual avalia a relação probabilística entre os diversos fatores que condicionam a estabilidade do terreno e a ocorrência de deslizamentos (Figura 4.12). O método consiste na superposição dos diversos fatores (geologia, geomorfologia, declividade, etc.) com o mapa de inventário de deslizamentos, com a finalidade de obter a probabilidade condicionada de cada fator à presença ou não de deslizamentos, atribuindo valores numéricos a cada um destes fatores. Neste trabalho os dados espaciais correspondentes aos fatores foram trabalhados em áreas

(polígonos vetoriais), e, posteriormente, estes foram transformados ao formato raster para a aplicação das operações lógicas no SIG. Dessa forma, o mapa de suscetibilidade obtido é gerado no formato raster.

Adicionalmente, é importante ter em conta que esta metodologia tem sido catalogada por diferentes pesquisadores (Carrara, 1995) da área como idônea para escalas medias (1:25.000) que corresponde à escala utilizada neste trabalho.

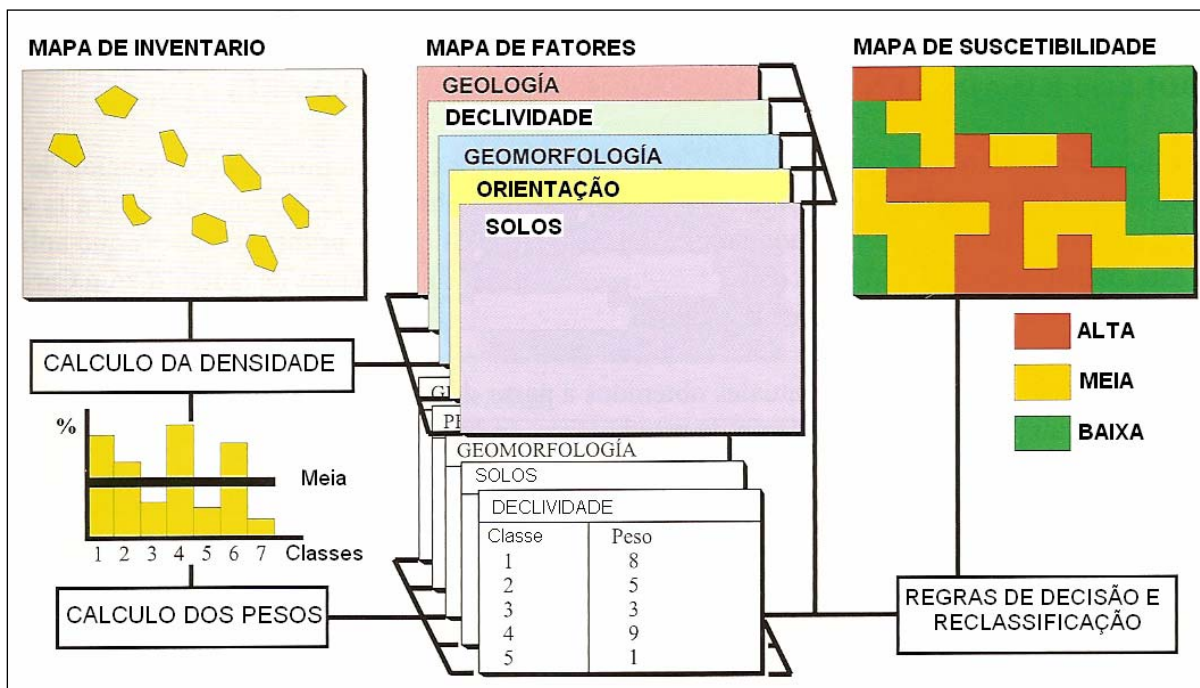


Figura 4.12. Esquema ilustrativo da metodologia bivariada (modificado- Irigaray, 2002).

Vários são os autores e diferentes os trabalhos que têm utilizado a metodologia estatística bivariada para a avaliação da ameaça por deslizamento, entre eles podem-se citar Brabb (1984), Van Westen (1993), Chung et. al. (1995). O presente trabalho basea-se nas diferentes aplicações desta metodologia, fazendo uso conjuntamente dos índices de Frequência e Potencial de deslizamentos utilizados por autores como Gao (1993), Millan e Lozano (1998), Guimares et. al (1998) e Gomes et. al (2005).

Os fatores avaliados neste trabalho foram: Geologia, Geomorfologia, Solos, Declividade, Elevação, Aspecto, Forma, Precipitação e Evapotranspiração, para cada um destes parâmetros são consideradas diferentes classes (Tabela 4.3).

Tabela 4.3. Fatores e suas respectivas classes usadas no estudo.

CLASSES		DESCRIÇÃO CLASSES									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Fatores											
Declividade	0° - 10°	10° - 20°	20° - 30°	30° - 45°	> 45°	-	-	-	-	-	
Geologia	Ri1	Ri3	Stre1	Rd1	Srvs3	Stv1	Stft	Srii2	Stf1	Stfv+Srv	
Solos	CL-SC	SM-SC	SM	Áreas Urbanas	-	-	-	-	-	-	
Geomorfologia	See	Slfp	Dft	Seef	Dcr	Sshcp	Scor	Sft	Sshle	Dco	
Forma	-69° - 0° côncavo	0° - 32° convexo	-	-	-	-	-	-	-	-	
Aspecto	N	N-E	E	S-E	S	S-W	W	N-W	-	-	
Elevação (m)	1182 m - 1430 m	1430 m - 1678 m	1678 m - 1926 m	1926 m - 2174 m	2174 m - 2422 m	2422 m - 2670 m	2670 m - 2918 m	2918 m - 3166 m	3166 m - 3414 m	3414 m - 3662 m	
Precipitação (mm)	1600mm- 1400mm	1700mm- 1600mm	1800mm- 1700mm	1900mm- 1800mm	2000mm- 1900mm	2100mm- 2000mm	2200mm- 2100mm	2400mm- 2200mm	2600mm- 2400mm	-	
Evapotranspiração (mm)	1200mm- 1100mm	1100mm- 1000mm	1000mm- 900mm	900mm- 800mm	800mm- 700mm	700mm- 600mm	600mm- 400mm	-	-	-	

4.2.1 Modelagem da suscetibilidade

Baseado no trabalho dos diversos autores anteriormente citados foi desenvolvida esta análise, na qual para cada um dos fatores avaliados foram obtidos três índices: a Freqüência da classe (F), que indica a porcentagem de cada uma das classes com respeito à área total de estudo; a Freqüência de Deslizamento (FD), que indica a porcentagem da área atingida por deslizamentos em cada uma das classes com respeito à área total escorregada na área de estudo; e o Potencial de Deslizamento (PD), que indica a porcentagem da área atingida por deslizamentos em cada uma das classes com respeito à área de cada classe, como se mostra a seguir.

$$\text{Freqüência da classe (F)} = \text{Área da classe (AC)} / \text{Área Total (AT)} * 100 \quad (4.1)$$

$$\text{Freqüência de Deslizamento (FD)} = \text{Área Atingida em cada classe (AAC)} / \text{Área Atingida Total (AAT)} * 100 \quad (4.2)$$

$$\text{Potencial de Deslizamento (PD)} = \text{Área Atingida em cada classe (AAC)} / \text{Área da Classe (AC)} * 100 \quad (4.3)$$

Estes índices foram obtidos para cada uma das classes avaliadas neste estudo e se utilizaram para fazer uma análise detalhada de cada um dos fatores utilizados e descrever o comportamento de cada um deles com respeito aos deslizamentos. O resultado desta análise está compilado no capítulo de Resultados e Análise.

- Atribuição dos Pesos

Uma vez obtidos estes índices, se procedeu à atribuição de valores ou “pesos” a cada uma das classes usando para isto os valores obtidos no Potencial de Deslizamento (PD). Atribuíram-se valores numéricos que variam de 0 a 10, sendo 0 para as classes que não são atingidas por deslizamentos (PD= 0%) e 10 para as classes que são completamente atingidas por deslizamentos (PD= 100%); os valores intermédios variam de acordo com a porcentagem de área que foi atingida por deslizamentos dentro de cada classe, atribuindo o valor 9 para a classe que apresenta o maior valor de potencial de deslizamento e com respeito a este se

determinaram os outros valores. Esta parte será mais bem explicada no capítulo de Resultados e Análise.

É importante destacar, portanto, que a atribuição de pesos para cada classe é quantitativa, no sentido de buscar superar uma atribuição qualitativa e subjetiva, daí a relevância fundamental do inventário de deslizamentos.

Também foram atribuídos pesos para cada um dos fatores analisados no estudo, estes pesos são atribuídos de forma heurística, ou seja, baseados na experiência do pesquisador de trabalhos de campo de geologia de engenharia, em mapeamento geológico e na caracterização geológico-geotécnica de maciços rochosos.

Neste trabalho se tomaram estudos anteriores feitos por pesquisadores como Van Westen (1993), Carrara (1995) e Diniz (2004) os quais ressaltam a importância dos fatores entre si. A este respeito cabe explicar que os pesos foram atribuídos tendo em conta a importância dos fatores entre si, desta forma os fatores considerados como os mais relevantes que no caso são: Geologia e Declividade têm o peso maior; os fatores considerados com relevância média como Solos, Geomorfologia, Forma, Aspecto e Elevação têm um peso intermediário e os fatores considerados com a menor importância têm o menor peso.

Na tabela a seguir se apresentam os pesos finais usados.

Tabela 4.4. Pesos atribuídos aos fatores e classes usadas no estudo.

PESO FATOR	CLASSES FATORES	PESO CLASSES									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
2	Declividade	2	6	9	8	8	-	-	-	-	-
2	Geologia	5	0	2	2	6	4	0	9	3	0
1	Solos	6	4	9	-	-	-	-	-	-	-
1	Geomorfologia	4	2	1	4	5	3	0	9	5	1
1	Forma	9	7	-	-	-	-	-	-	-	-
1	Aspecto	5	6	7	6	9	8	5	6	-	-
1	Elevação	1	3	7	4	9	5	4	3	2	5
0,5	Precipitação	8	2	2	4	9	4	5	3	6	-
0,5	Evapotranspiração	3	2	4	7	9	3	6	-	-	-

4.2.2 Processamento de dados no SIG

Um dos objetivos desta pesquisa era a aprendizagem do uso da ferramenta SIG (ArcGIS 9.0©) e o treinamento na mesma para ser aplicada ao tema trabalhado, a parte prática deste trabalho foi realizada com o apoio do Laboratório de Sistemas de Informações Espaciais (LSIE) do Departamento de Geografia da Universidade de Brasília. Na Figura 4.13 apresenta-se o fluxograma onde se descrevem as etapas desenvolvidas no processamento de dados no SIG e a aplicação da ferramenta.

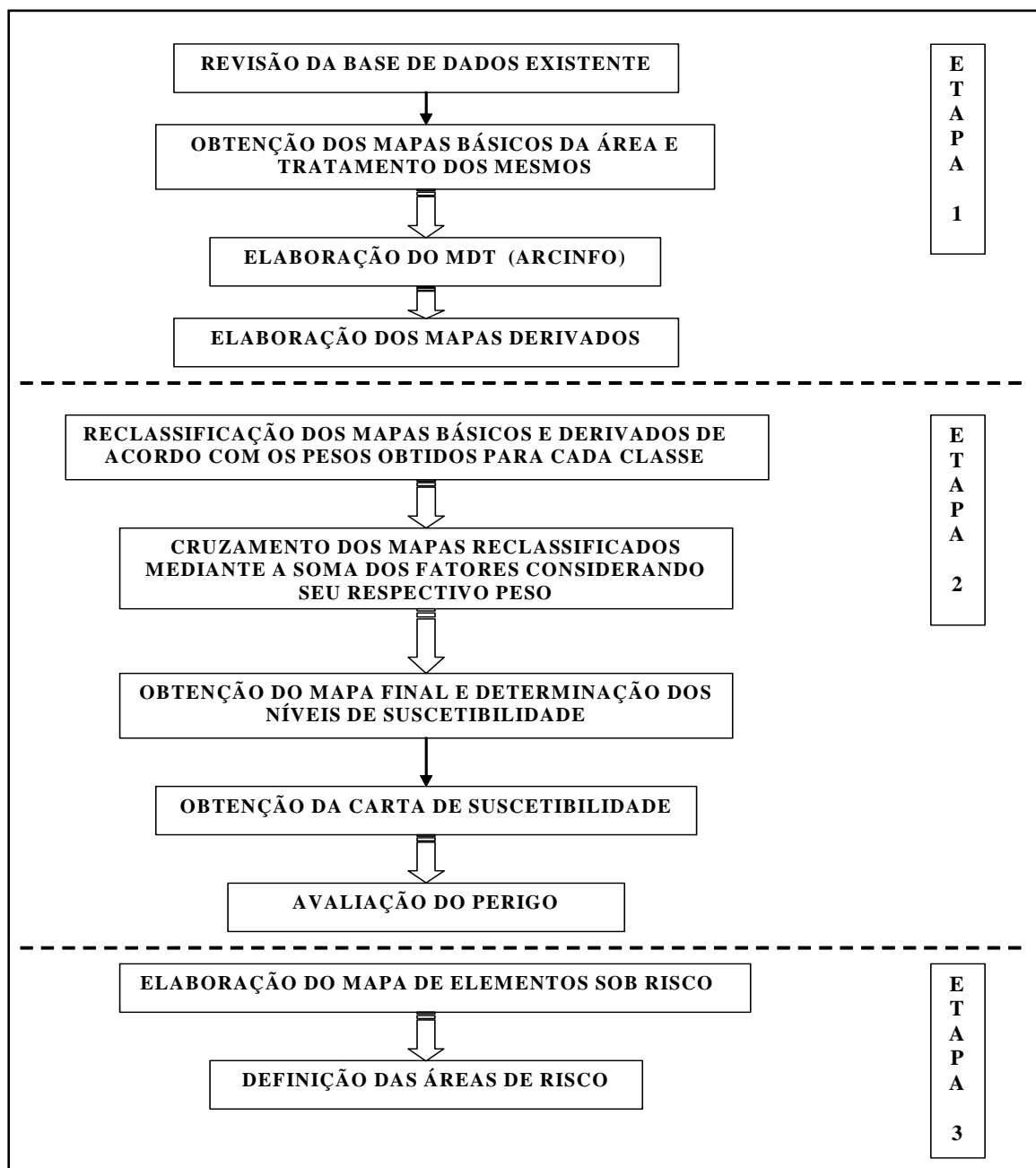


Figura 4.13. Fluxograma das etapas desenvolvidas no processamento de dados e obtenção de produtos finais no SIG.

- Carta de suscetibilidade

Uma vez obtidos os pesos para as classes e os fatores é realizada a reclassificação dos mapas temáticos com estes novos valores, esta reclassificação é feita por meio do SIG ArcGIS 9.0© que foi utilizado durante toda a pesquisa como ferramenta principal de trabalho. Posteriormente, estes mapas foram cruzados entre si, chegando a um resultado final onde se obtiveram células com valores que variavam entre 25 e 84 (Tabela 4.5). Estes valores foram divididos da seguinte forma:

Tabela 4.5. Níveis de Suscetibilidade obtidos.

Valores Obtidos	Susceptibilidade
25-36	Muito baixa a nula
36-48	Baixa
48-60	Média
60-72	Alta
72-84	Muito alta

Desta forma, obteve-se finalmente a carta de suscetibilidade a deslizamentos na área de estudo (ANEXO 12).

4.2.3 Avaliação do Perigo

Uma vez feita a modelagem da suscetibilidade realizou-se uma avaliação a priori do risco por deslizamento na área de estudo. Considerando a insuficiência de informação específica da área, que permitiria fazer uma avaliação mais exata onde se pudesse chegar a definir a probabilidade de ocorrência do evento num tempo determinado, adotou-se a técnica usada por Einstein (1998) e reconhecida pelo IUGS (1997) chamada método de avaliação quantificada de risco. Neste método de avaliação se denominam os níveis de suscetibilidade obtidos como as “probabilidades prévias” de deslizamento, assim, considerou-se o mapa de suscetibilidade como mapa de perigo (a priori) (ANEXO 13).

- Elementos sob risco

Para análise de risco é essencial a consideração das perdas tanto humanas quanto materiais, portanto, faz parte deste trabalho a identificação dos elementos sob risco. A área de estudo consiste de uma região rural, por isto no presente trabalho adotou-se como elementos sob risco os povoados e estradas existentes na área de estudo, que podem chegar a apresentar vulnerabilidade ante os deslizamentos. Os povoados correspondem às cidades de Calarcá, La Virginia e Quebrada Negra (Figura 4.14) os quais fazem parte do município de Calarcá que tem uma população aproximada de 75.000 habitantes; e as estradas presentes na área são estradas intermunicipais.

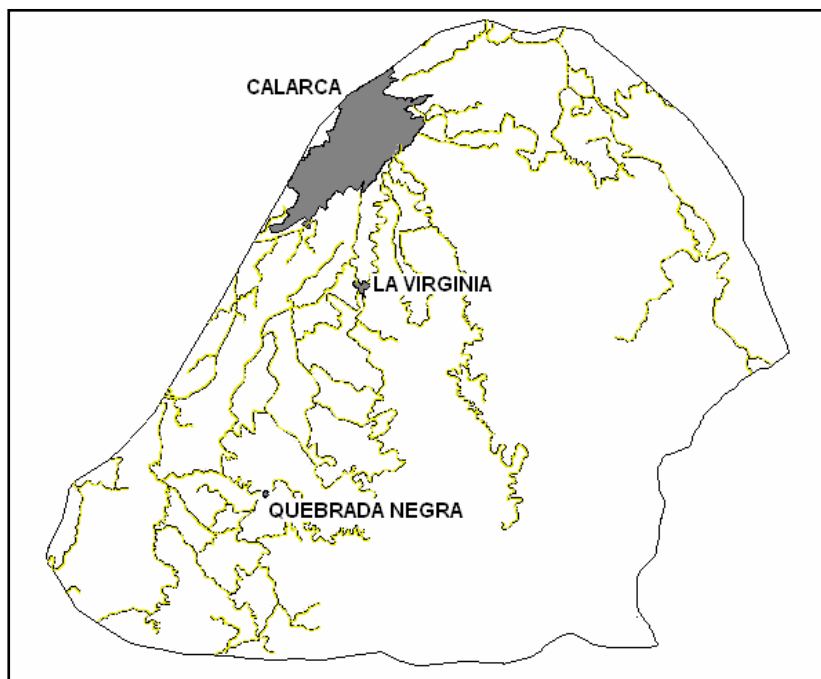


Figura 4.14. Povoados e estradas presentes na área de estudo.

- Definição das Áreas de Risco

No trabalho de identificação de áreas de risco, em primeira instância, se realizou o cruzamento do mapa de elementos sob risco junto com o mapa de perigo (a priori), e posteriormente, foram utilizadas as fotografias aéreas para a análise das feições geomorfológicas de deslizamentos, em relação ao seu leque de deposição, e distância de alcance. Feitas estas considerações, foram escolhidos os trechos dos povoados e das estradas considerados como vulneráveis, diante da dinâmica da região, e obtidas as áreas onde o risco pode ser classificado como iminente. Desta forma se obteve um mapa de áreas de risco (ANEXO 14).

5. RESULTADOS E ANÁLISE

Como visto no capítulo anterior cada um dos fatores usados neste estudo foi analisado e avaliado isoladamente por meio da obtenção de índices: Freqüência (F), Freqüência de deslizamento (FD) e Potencial de deslizamento (PD). Os dois primeiros índices são usados para fazer uma descrição do comportamento de cada uma das classes e desta forma descrever qual é o comportamento de cada fator com respeito aos deslizamentos.

O Potencial de deslizamento é usado para atribuir os pesos a cada uma das classes usadas neste estudo. O PD indica a porcentagem da área atingida por deslizamentos em cada uma das classes com respeito à área de cada classe, por tanto, as classes com maior valor de PD são as mais suscetíveis a deslizamentos e as de menor valor de PD são as menos suscetíveis. Às classes de maior valor é atribuído o peso maior, que é 9, e a partir deste valor se calculam os outros pesos por ponderação matemática.

5.1 DECLIVIDADE

A declividade que tem sido definida por diferentes autores e pesquisadores da área como um dos fatores mais influentes na deflagração de deslizamentos foi dividida em 5 classes principais na área de estudo. Na Tabela 5.1 apresenta-se a distribuição (freqüência) de cada uma das classes na área de estudo, assim como a área atingida por deslizamentos (freqüência de deslizamentos) nas mesmas.

Tabela 5.1. Freqüência das classes e freqüência de deslizamentos no fator declividade.

Classes	Intervalos	Área Classe (km ²)	Freqüência	Área Atingida (km ²)	Freqüência de deslizamento
1	0° - 10°	42,49	25,2%	0,77	7,9%
2	10° - 20°	58,79	29,9%	2,79	28,7%
3	20° - 30°	50,23	25,6%	3,68	37,9%
4	30° - 45°	34,20	17,4%	2,24	23,0%
5	> 45°	3,58	1,8%	0,25	2,5%
TOTAL		189,29	100,0%	9,73	100,0%

As classes que apresentam maior freqüência de deslizamentos são as classes 3 (20°-30°); e a classe 2 (10°-20°), estas mesmas classes são as de maior extensão na área de estudo (Figura

5.1). O comportamento da declividade do terreno com respeito aos deslizamentos mostra que a classe com maior concentração de deslizamentos é a que representa a declividade média da área, ou seja, a classe 3 (20°-30°), já as classes 4 e 5 que representam maiores declividades tem uma concentração de deslizamentos menor.

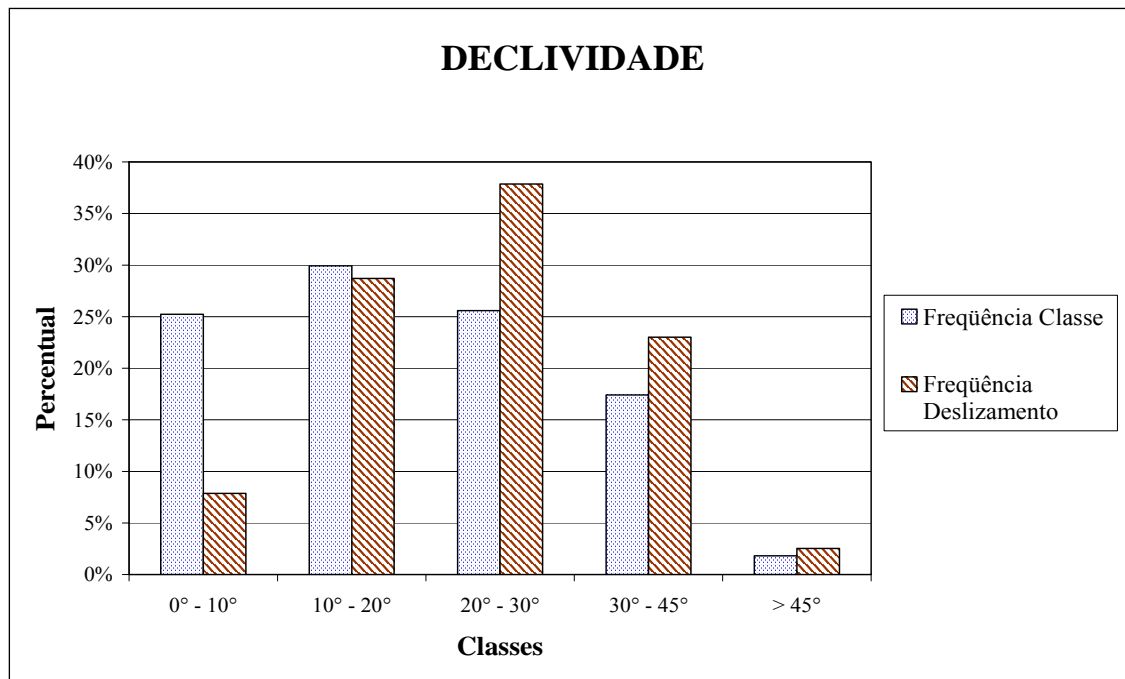


Figura 5.1. Distribuição das classes de declividade e dos deslizamentos em cada uma das mesmas na área de estudo.

Ao fazer o cálculo do potencial de deslizamento (Tabela 5.2) as classes 3, 4 e 5 são as que tem um valor maior (Figura 5.2). Embora a classe 5 seja a de menor extensão na área de estudo, a área atingida por deslizamentos é maior com relação às classes 1 e 2.

Tabela 5.2 Potencial de deslizamento para as classes de declividade.

Classes	Potencial de deslizamento	Peso
1	1,8%	2
2	4,8%	6
3	7,3%	9
4	6,6%	8
5	6,9%	8

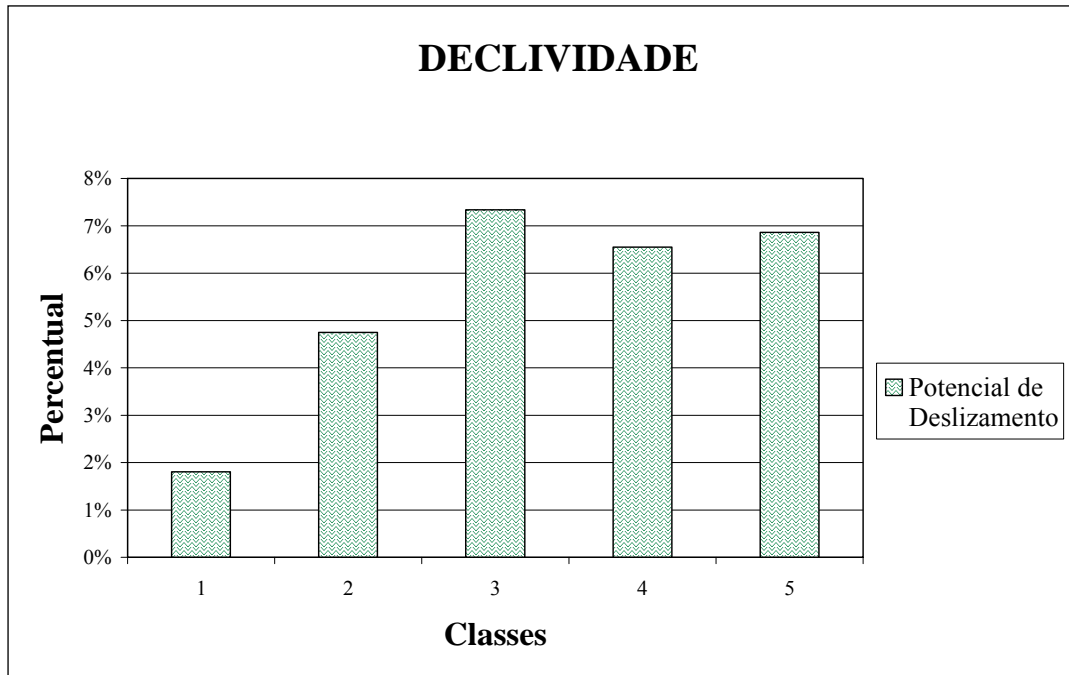


Figura 5.2. Distribuição do potencial de deslizamento para as classes de declividade.

5.2 GEOLOGIA

A geologia também é um dos fatores importantes no estudo de deslizamentos nas encostas. Neste caso, foram consideradas 10 classes litológicas diferentes presentes na área de estudo. Na Tabela 5.3 se apresenta a distribuição de cada uma das classes na área total, assim como a área atingida por deslizamentos em cada uma delas.

Tabela 5.3. Frequência das classes e frequência de deslizamentos no fator geologia.

Classes	Unidades	Área Classe (km ²)	Frequência	Área Atingida (km ²)	Frequência de deslizamento
1	Ri_1	72,17	38,1%	4,22	43,3%
2	Ri_3	0,99	0,5%	0,00	0,0%
3	Strc1	5,60	3,0%	0,14	1,4%
4	Rd1	1,65	0,9%	0,04	0,4%
5	Srvs3	13,62	7,2%	1,00	10,3%
6	Stv1	89,39	47,2%	4,04	41,5%
7	Stft	2,24	1,2%	0,00	0,0%
8	Srii2	2,22	1,2%	0,25	2,6%
9	Stf1	1,15	0,6%	0,04	0,4%
10	Stfv+Srv	0,26	0,1%	0,00	0,0%
TOTAL		189,29	100,0%	9,73	100,0%

As classes que apresentaram maior frequência de deslizamentos foram a classe 1 (Ri1) que corresponde a rochas metamórficas derivadas de rochas sedimentares e vulcânicas moderadamente alteradas; e a classe 6 (Stv1) que corresponde a depósitos de cinza vulcânica. Estas classes são as que apresentam maior extensão na área de estudo (Figura 5.3).

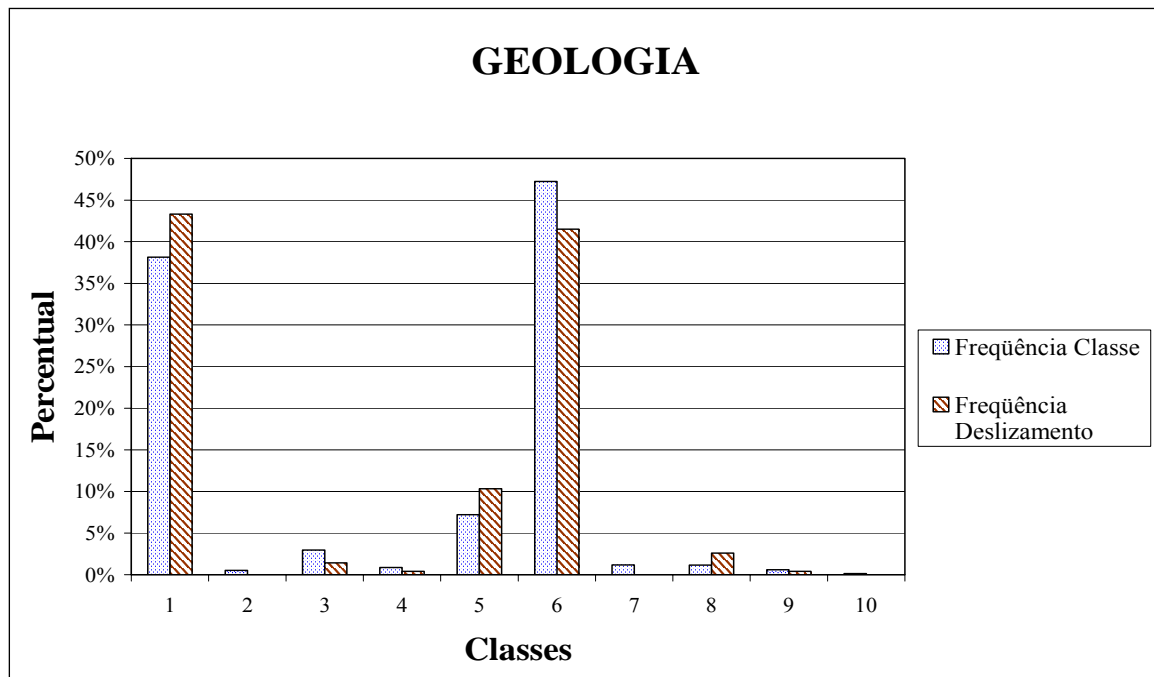


Figura 5.3. Distribuição das classes litológicas e dos deslizamentos em cada uma das mesmas na área de estudo.

No entanto, ao fazer o cálculo do potencial de deslizamento (Tabela 5.4), a classe 8 (Srii2) correspondente a depósitos de solos residuais silto-argilosos derivados de corpos ígneos intrusivos, é a que apresenta maior valor (Figura 5.4), por tanto a esta classe foi atribuído o peso máximo. Cabe destacar que as classes com maior frequência na área de estudo apresentam um potencial de deslizamento ou intermediário. Isto porque a classe 8 apresenta maior porcentagem de área escorregada (11,4%) do que as classes 1 e 6.

Tabela 5.4. Potencial de deslizamento para as classes de geologia.

Classes	Potencial de deslizamento	Peso
1	5,8%	5
2	0,0%	0
3	2,5%	2
4	2,4%	2
5	7,4%	6
6	4,5%	4
7	0,0%	0
8	11,4%	9
9	3,5%	3
10	0,0%	0

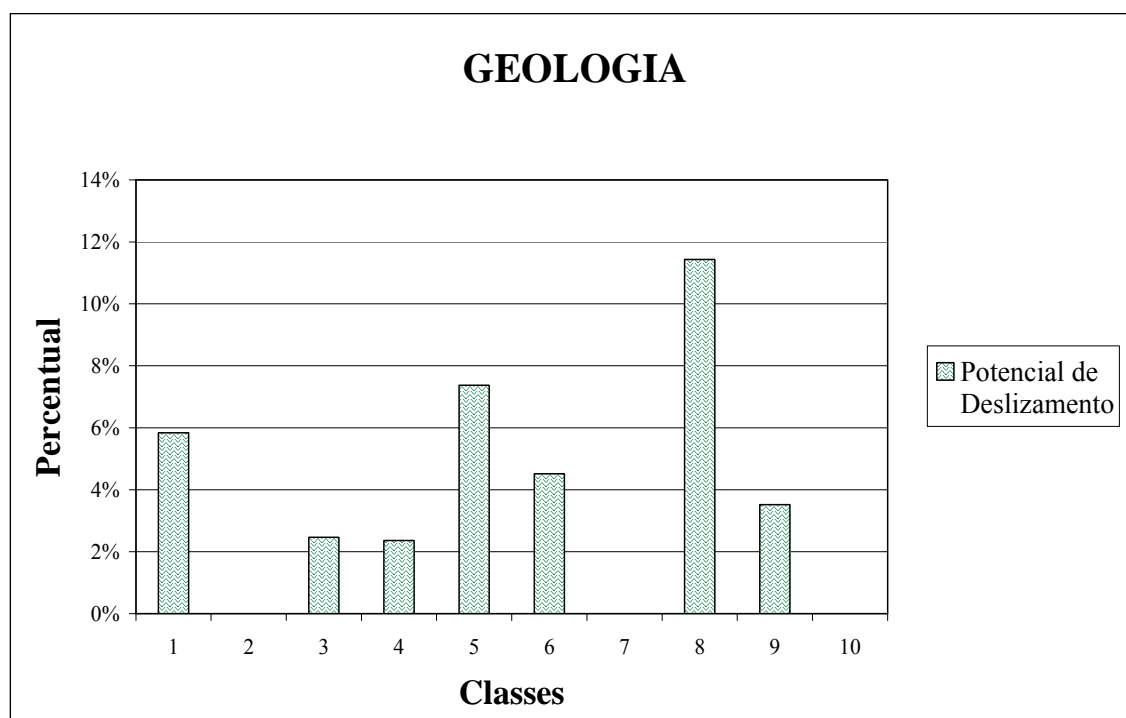


Figura 5.4. Distribuição do potencial de deslizamento para as classes de geologia.

5.3 GEOMORFOLOGIA

Foram consideradas 15 classes geomorfológicas diferentes presentes na área de estudo. Na Tabela 5.5 se apresenta a distribuição de cada uma das classes na área total, assim como a área atingida por deslizamentos em cada uma delas.

Tabela 5.5. Frequência das classes e frequência de deslizamentos no fator geomorfologia.

Classes	Unidades	Área Classe (km ²)	Frequência	Área Atingida (km ²)	Frequência de deslizamento
1	See	6,28	3,3%	0,43	4,4%
2	Slfp	2,73	1,4%	0,10	1,0%
3	Dft	4,93	2,6%	0,09	0,9%
4	Seef	50,18	26,5%	3,16	32,6%
5	Dcr	6,27	3,3%	0,46	4,8%
6	Sshcp	60,90	32,2%	3,43	35,4%
7	Scor	3,12	1,6%	0,02	0,2%
8	Sft	0,96	0,5%	0,14	1,4%
9	Sshle	22,51	11,9%	1,76	18,1%
10	Dco	6,08	3,2%	0,10	1,1%
11	Dcrm	2,34	1,2%	0,00	0,0%
12	Dfl1	13,33	7,0%	0,04	0,3%
13	Dfl12	2,41	1,3%	0,00	0,0%
14	Fpi	7,09	3,7%	0,00	0,0%
15	Fcdyl	0,15	0,1%	0,00	0,0%
TOTAL		189,29	100,0%	9,73	100,00%

A classe 6 (Sshcp) que corresponde a encostas definidas pela inclinação dos estratos em contra-pendente e a classe 4 (Seef) que corresponde a serras montanhosas de cristas agudas e escalonadas, são as que apresentam maior ocorrência de deslizamentos e a sua vez são as de maior extensão na área de estudo (Figura 5.5)

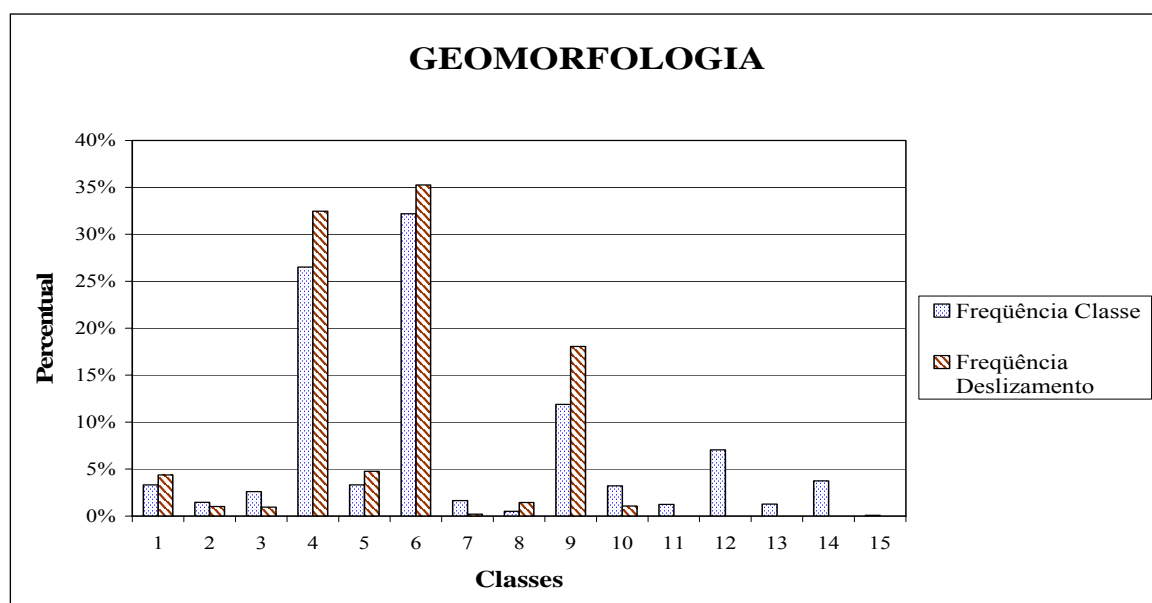


Figura 5.5. Distribuição das classes geomorfológicas e dos deslizamentos em cada uma das mesmas na área de estudo.

Ao fazer o cálculo do potencial de deslizamento para o fator Geomorfologia (Tabela 5.6), a classe 8 (Sft) correspondente a facetas triangulares originadas por processos de falhamento intenso, é a classe que apresenta maior potencial de deslizamento (Figura 5.6) e, portanto, a que foi atribuído o maior peso. Cabe destacar que as classes com maior frequência na área de estudo apresentam um potencial de deslizamento menor que algumas outras classes como a classe 8 que tem menor frequência na área de estudo. Isto porque a classe 8 apresenta maior porcentagem de área escorregada (14,5%) do que as classes 6 e 4.

Tabela 5.6. Potencial de deslizamento para as classes de geomorfologia.

Classes	Potencial de deslizamento	Peso
1	6,8%	4
2	3,6%	2
3	1,9%	1
4	6,3%	4
5	7,4%	5
6	5,6%	3
7	0,7%	0
8	14,5%	9
9	7,8%	5
10	1,7%	1
11	0,0%	0
12	0,3%	0
13	0,0%	0
14	0,0%	0
15	0,0%	0

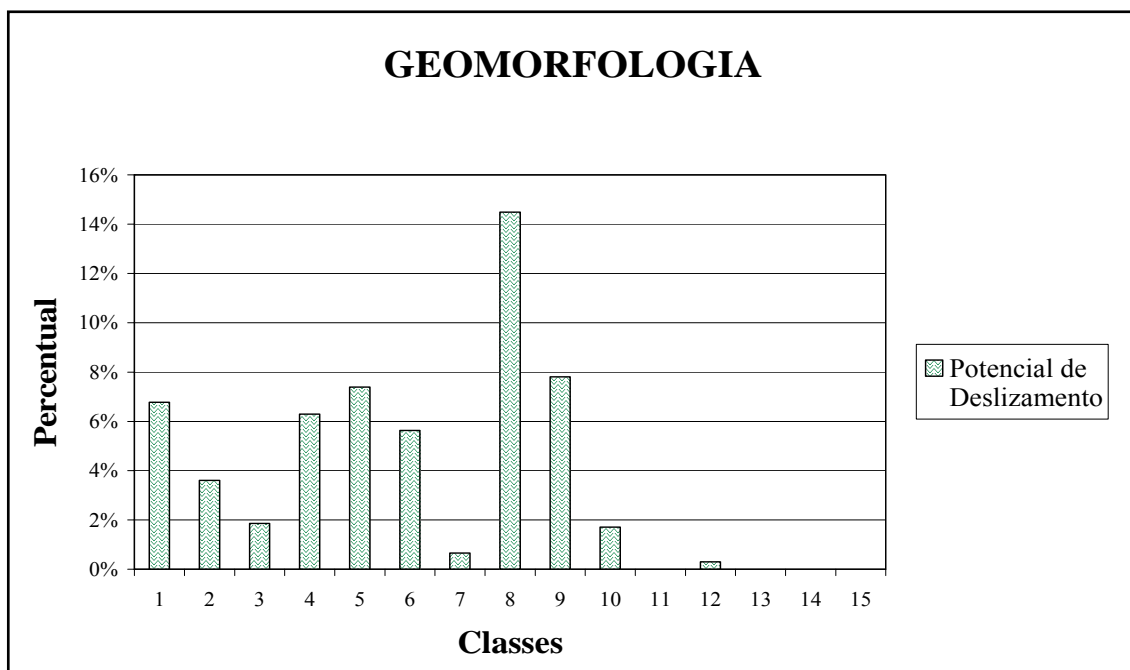


Figura 5.6. Distribuição do potencial de deslizamento para as classes de geomorfologia.

5.4 SOLOS

Foram consideradas 4 classes de solos geotécnicos presentes na área de estudo. Na Tabela 5.7 apresenta-se a distribuição de cada uma das classes na área total, assim como a área atingida por deslizamentos em cada uma delas.

Tabela 5.7. Frequência das classes e Frequência de deslizamentos no fator solos.

Classes	Unidades	Área Classe (km ²)	Frequência	Área Atingida (km ²)	Frequência de deslizamento
1	CL-SC	95,33	50,4%	4,15	42,6%
2	SM-SC	8,93	4,7%	0,26	2,7%
3	SM	83,81	44,3%	5,32	54,7%
4	Áreas Urbanas	1,22	0,6%	0,00	0,0%
TOTAL		189,29	100,0%	9,73	100,0%

A classe 1 (CL-SC) que corresponde a argilas arenosas inorgânicas de plasticidade baixa a média e de baixa resistência, e a classe 3 (SM) que corresponde a areias siltosas, são as que se apresentam na maior parte da área de estudo e as que apresentam maior presença de deslizamentos (Figura 5.7).

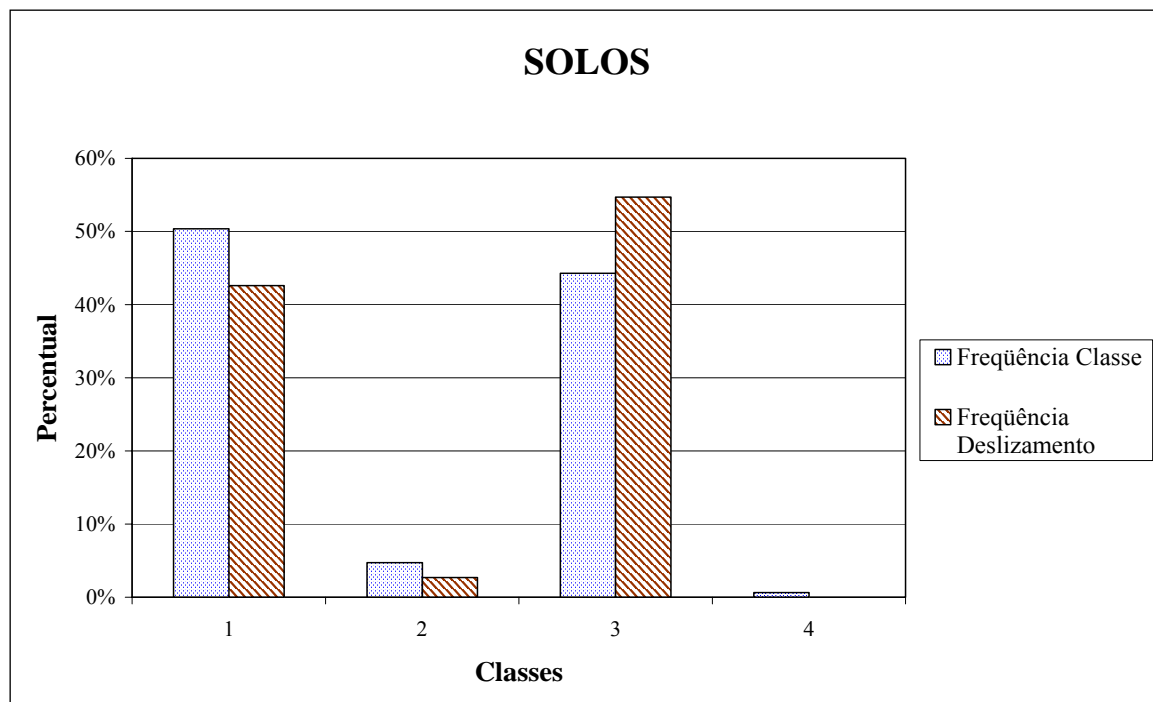


Figura 5.7. Distribuição das classes de solo e dos deslizamentos em cada uma das mesmas na área de estudo.

Ao fazer o cálculo do potencial de deslizamento para o fator solos (Tabela 5.8), a classe 3 (SM), correspondente a areias siltsosas, é a classe que apresenta maior potencial de deslizamento (Figura 5.8) e por tanto á que foi atribuído o maior peso.

Tabela 5.8. Potencial de deslizamento para as classes de solos.

Classes	Potencial de deslizamento	Peso
1	4,3%	6
2	2,9%	4
3	6,4%	9
4	0,0%	0



Figura 5.8. Distribuição do potencial de deslizamento para as classes de solos.

5.5 FORMA DO RELEVO

Foram consideradas 2 classes de forma do relevo na área de estudo. Na Tabela 5.9 apresenta-se a distribuição de cada uma das classes na área total, assim como a área atingida por deslizamentos em cada uma delas.

Tabela 5.9. Frequência das classes e frequência de deslizamentos no fator forma.

Classes	Forma	Área Classe (km ²)	Frequência	Área Atingida (km ²)	Frequência de deslizamento
1	Côncavo	90,99	48,1%	5,14	52,9%
2	Convexo	98,30	51,9%	4,59	47,1%
TOTAL		189,29	100,0%	9,73	100,0%

Na área de estudo, as duas classes se apresentam na mesma proporção ao mesmo tempo, a área atingida por deslizamentos nas duas classes é quase a mesma com uma diferença de 6% entre ambas (Figura 5.9).

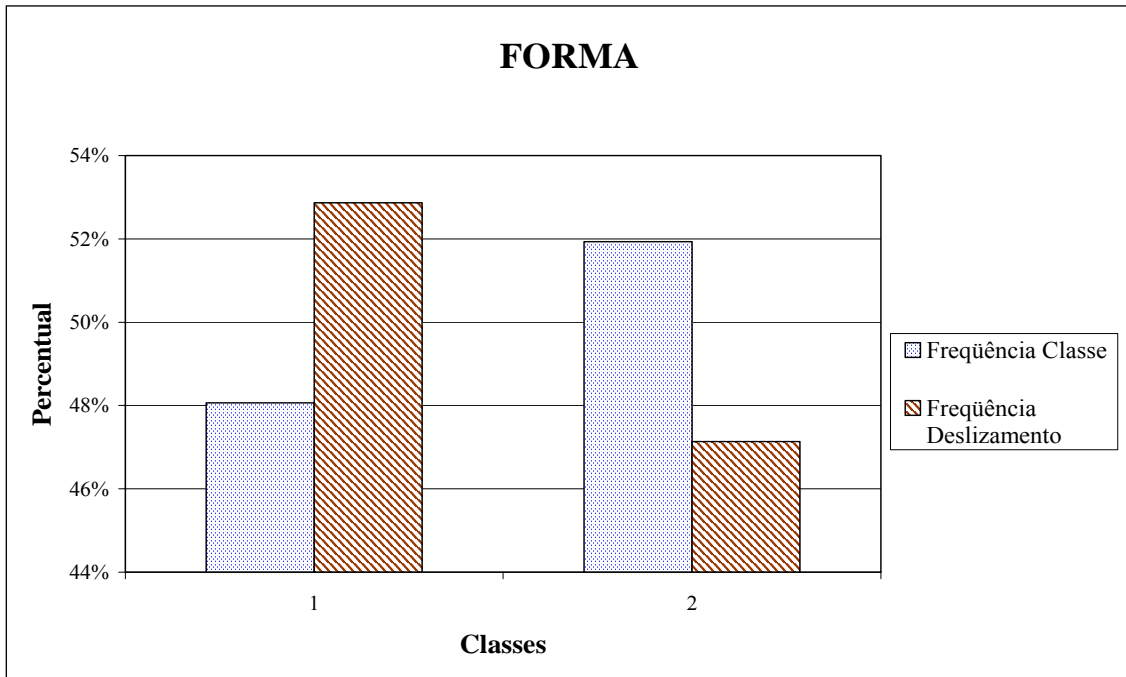


Figura 5.9. Distribuição das classes da forma e dos deslizamentos em cada uma das mesmas na área de estudo.

Ao fazer o cálculo do potencial de deslizamento para o fator forma (Tabela 5.10) a classe 1, correspondente ao relevo côncavo, é a que apresenta maior potencial de deslizamento (Figura 5.10) e portanto à que se atribui o peso maior.

Tabela 5.10. Potencial de deslizamento para as classes da forma.

Classes	Potencial de deslizamento	Peso
1	5,7%	9
2	4,7%	7

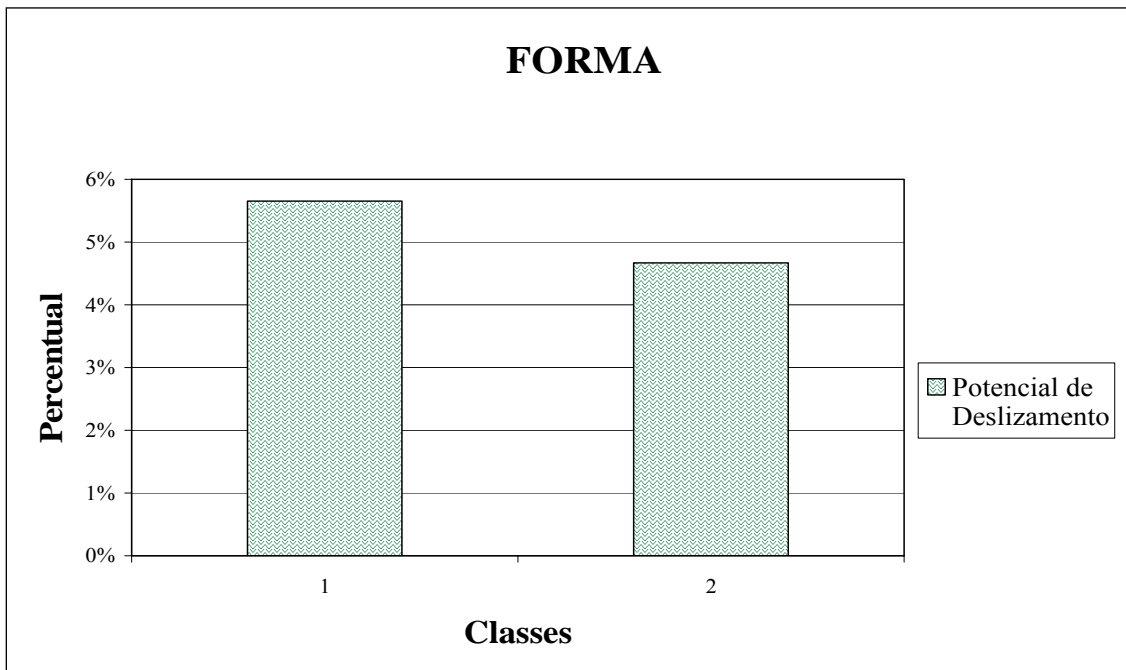


Figura 5.10. Distribuição do potencial de deslizamento para as classes de forma.

5.6 ASPECTO

Foram consideradas 8 classes para o fator aspecto na área de estudo. Na Tabela 5.11 apresenta-se a distribuição de cada uma das classes na área total, assim como a área atingida por deslizamentos em cada uma delas.

Tabela 5.11. Frequência das classes e frequência de deslizamentos no fator aspecto.

Classes	Orientação	Área Classe (km ²)	Frequência	Área Atingida (km ²)	Frequência de deslizamento
1	N	25,58	13,5%	1,08	11,1%
2	N-E	16,30	8,6%	0,84	8,6%
3	E	12,42	6,6%	0,69	7,1%
4	S-E	11,34	6,0%	0,54	5,6%
5	S	15,04	8,0%	1,12	11,5%
6	S-W	25,77	13,6%	1,80	18,5%
7	W	46,29	24,4%	1,99	20,5%
8	N-W	36,55	19,3%	1,67	17,2%
TOTAL		189,29	100,0%	9,73	100,0%

As classes 7 (W) e 8 (NW) são as que se apresentam com maior extensão na área de estudo, a classe 7 apresenta a maior área atingida por deslizamentos junto com as classes 6 e 8 (Figura 5.11).

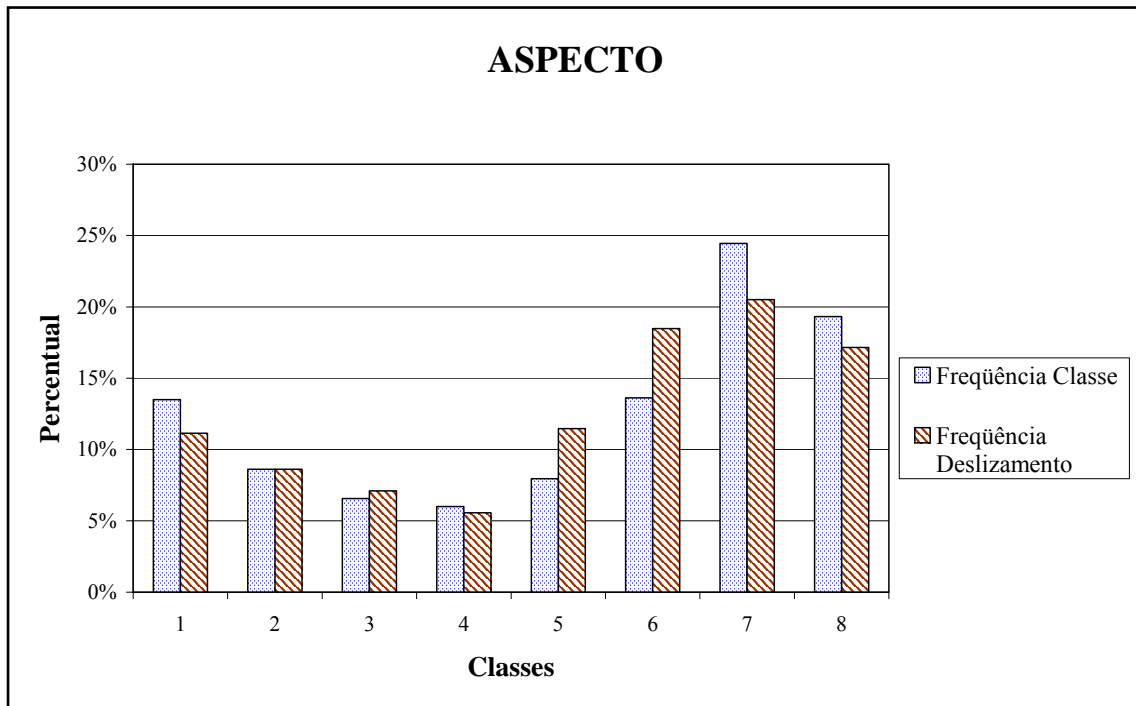


Figura 5.11. Distribuição das classes de aspecto e dos deslizamentos em cada uma das mesmas na área de estudo.

No cálculo do potencial de deslizamento para o fator aspecto (Tabela 5.12) as classes 5 (S); e 6 (SW) apresentam os maiores valores (Figura 5.12), embora as classes 7 e 8 são as de maior frequência, as classes 5 e 6 apresentam maior porcentagem de área escorregada.

Tabela 5.12. Potencial de deslizamento para as classes de aspecto.

Classes	Potencial de deslizamento	Peso
1	4,2%	5
2	5,1%	6
3	5,6%	7
4	4,8%	6
5	7,4%	9
6	7,0%	8
7	4,3%	5
8	4,6%	6

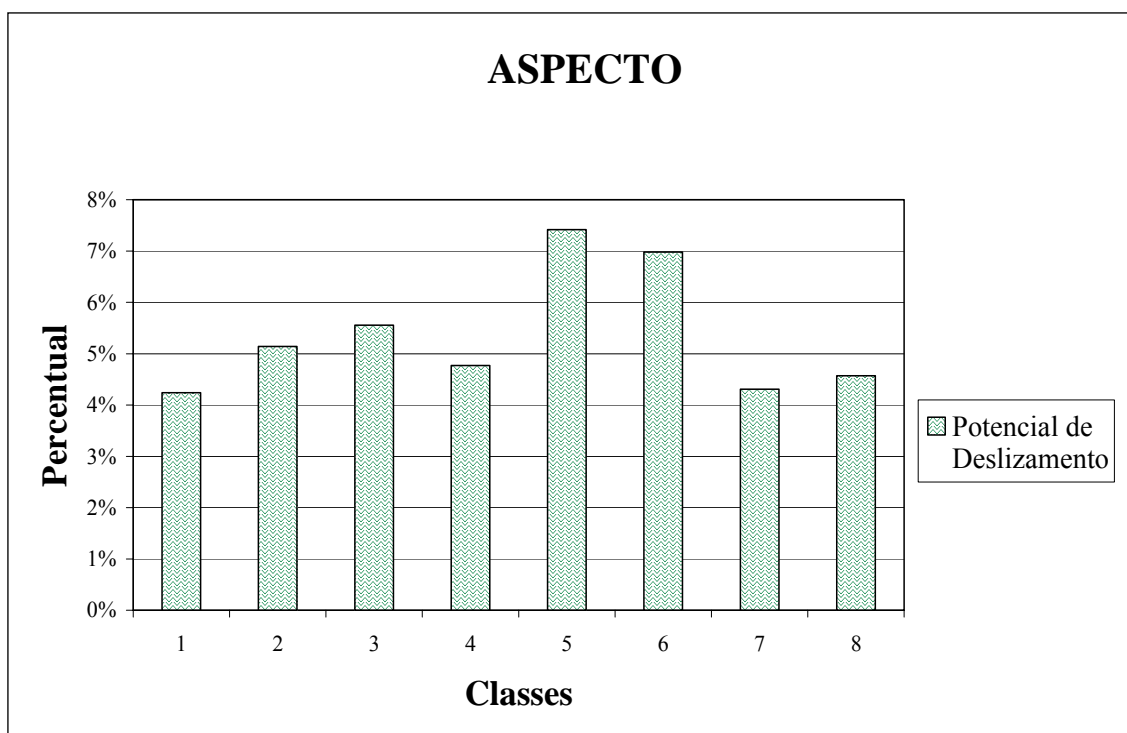


Figura 5.12. Distribuição do potencial de deslizamento para as classes de aspecto.

5.7 ELEVAÇÃO

Foram consideradas 10 classes para o fator elevação na área de estudo. Na Tabela 5.13 apresenta-se a distribuição de cada uma das classes na área total, assim como a área atingida por deslizamentos em cada uma delas.

Tabela 5.13. Frequência das classes e frequência de deslizamentos no fator elevação.

Classes	Intervalos (m)	Área Classe (km ²)	Frequência	Área Atingida (km ²)	Frequência de deslizamento
1	1182 - 1430	22,64	11,94%	0,40	4,10%
2	1430 - 1678	38,09	20,13%	1,15	11,84%
3	1678 - 1926	20,87	11,03%	1,65	16,94%
4	1926 - 2174	24,36	12,87%	1,25	12,80%
5	2174 - 2422	23,10	12,21%	2,50	25,64%
6	2422 - 2670	22,34	11,81%	1,21	12,43%
7	2670 - 2918	16,63	8,79%	0,74	7,61%
8	2918 - 3166	12,52	6,62%	0,49	5,09%
9	3166 - 3414	4,32	2,28%	0,08	0,84%
10	3414 - 3662	4,40	2,33%	0,26	2,69%
TOTAL		189,29	100,00%	9,73	100,00%

A classe 2 (1430m -1678m) é a que se apresenta com maior frequência na área de estudo, no entanto a classe 5 (2174m -2422m) é a que apresenta maior frequência de deslizamentos (Figura 5.13).

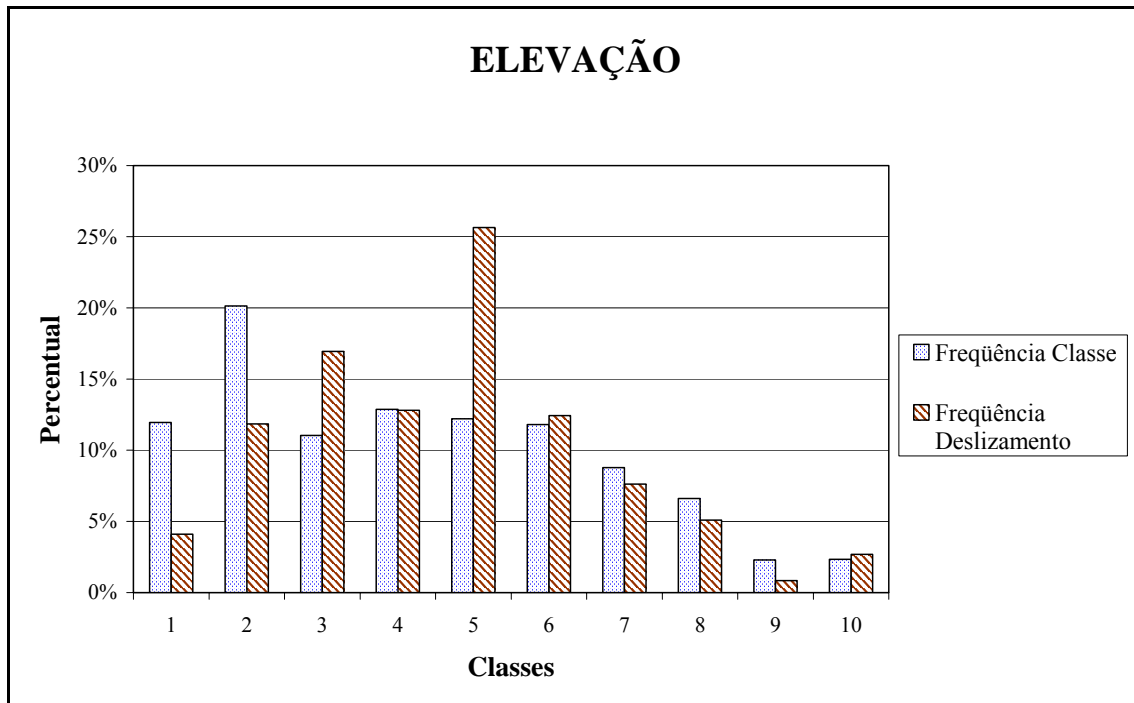


Figura 5.13. Distribuição das classes de elevação e dos deslizamentos em cada uma das mesmas na área de estudo.

O comportamento da elevação do terreno com relação aos deslizamentos, mostra que a classe com maior concentração de deslizamentos é a da altitude média neste caso corresponde á classe 5, as classes de altitude maior como a 9 e 10 apresentam uma baixa concentração de deslizamentos.

Ao fazer o cálculo do potencial de deslizamento para o fator elevação (Tabela 5.14), a classe 5 (2174m -2422m) é a classe que apresenta maior potencial de deslizamento (Figura 5.14) e por tanto á que foi atribuído o maior peso.

Tabela 5.14. Potencial de deslizamento para as classes de elevação.

Classes	Potencial de deslizamento	Peso
1	1,8%	1
2	3,0%	3
3	7,9%	7
4	5,1%	4
5	10,8%	9
6	5,4%	5
7	4,5%	4
8	4,0%	3
9	1,9%	2
10	5,9%	5

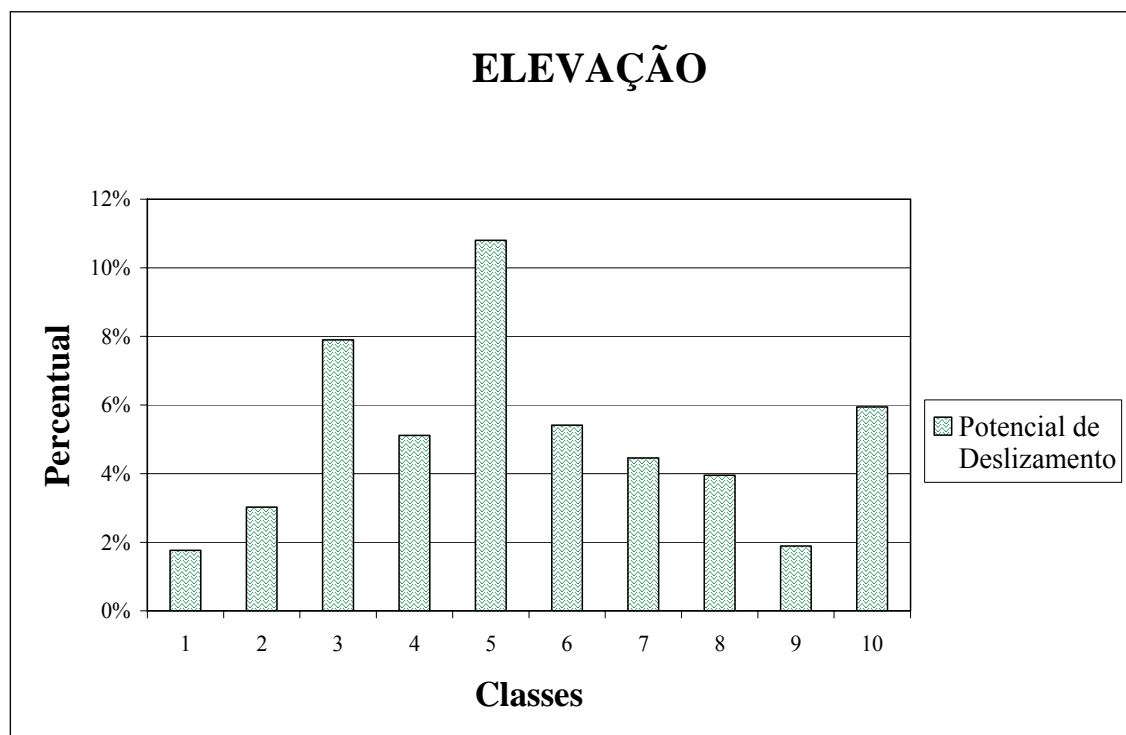


Figura 5.14. Distribuição do potencial de deslizamento para as classes de elevação.

5.8 PRECIPITAÇÃO

Foram consideradas 9 classes para o fator precipitação na área de estudo. Na Tabela 5.15 apresenta-se a distribuição de cada uma das classes na área total, assim como a área atingida por deslizamentos em cada uma delas.

Tabela 5.15. Frequência das classes e Frequência de deslizamentos no fator precipitação.

Classes	Intervalo (mm)	Área Classe (km ²)	Frequência	Área Atingida (km ²)	Frequência de deslizamento
1	1600 - 1400	2,91	1,54%	0,26	2,69%
2	1700 - 1600	5,97	3,15%	0,14	1,39%
3	1800 - 1700	11,56	6,11%	0,28	2,87%
4	1900 - 1800	10,68	5,64%	0,52	5,39%
5	2000 - 1900	20,90	11,04%	2,12	21,77%
6	2100 - 2000	34,31	18,12%	1,56	16,04%
7	2200 - 2100	36,11	19,07%	2,10	21,56%
8	2400 - 2200	59,98	31,69%	2,32	23,89%
9	2600 - 2400	6,87	3,63%	0,43	4,40%
TOTAL		189,29	100,00	9,73	100,00%

A classe 8 (2400mm- 2200mm) é a que apresenta a maior frequência na área de estudo e a sua vez a que apresenta maior presença de deslizamentos junto com as classe 5 e 7 (Figura 5.15).

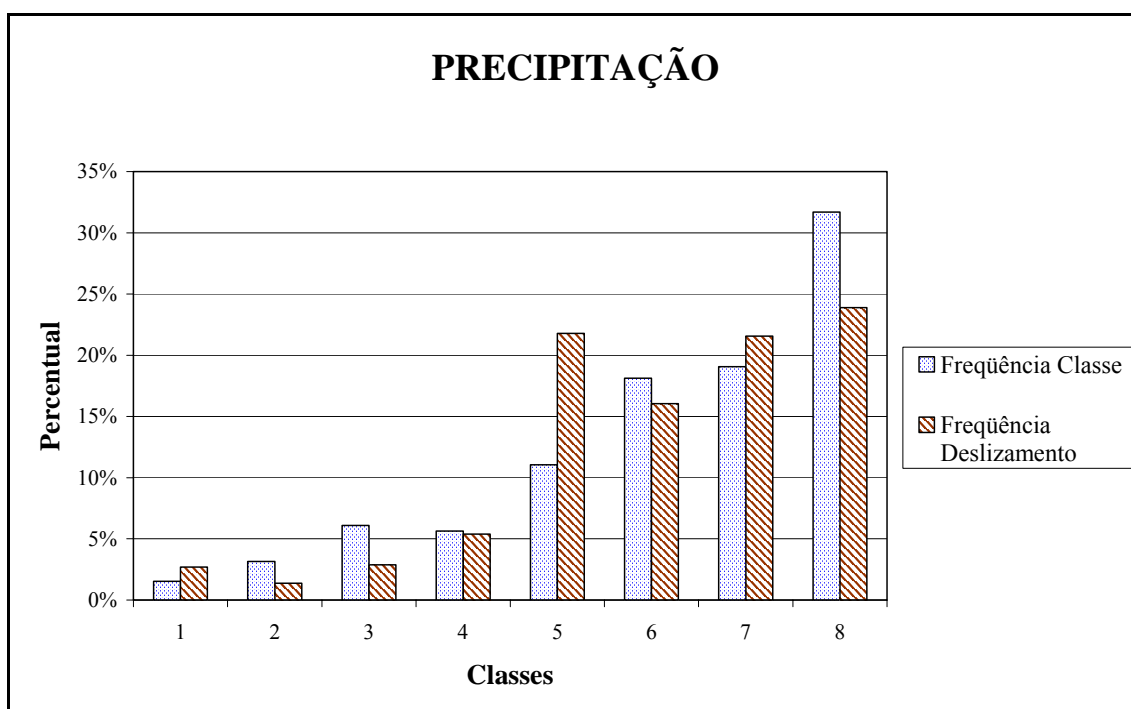


Figura 5.15. Distribuição das classes de precipitação e dos deslizamentos em cada uma das mesmas na área de estudo.

Ao fazer o cálculo do potencial de deslizamento para o fator precipitação (Tabela 5.16), a classe 5 (2000mm- 1900mm) é a classe que apresenta maior potencial de deslizamento

(Figura 5.16) e portanto, a qual foi atribuído o maior peso, seguida pela classe 1, embora a classe 1 seja a de menor frequência na área de estudo, esta classe apresenta um dos maiores potenciais de deslizamento.

O comportamento do fator precipitação na área de estudo indica que as zonas classificadas, dentro da faixa de 2000 a 1900 mm de precipitação média anual multianual, apresentam maior susceptibilidade a deslizamentos.

Tabela 5.16. Potencial de deslizamento para as classes de precipitação.

Classes	Potencial de deslizamento	Peso
1	9,0%	8
2	2,3%	2
3	2,4%	2
4	4,9%	4
5	10,1%	9
6	4,5%	4
7	5,8%	5
8	3,9%	3
9	6,2%	6

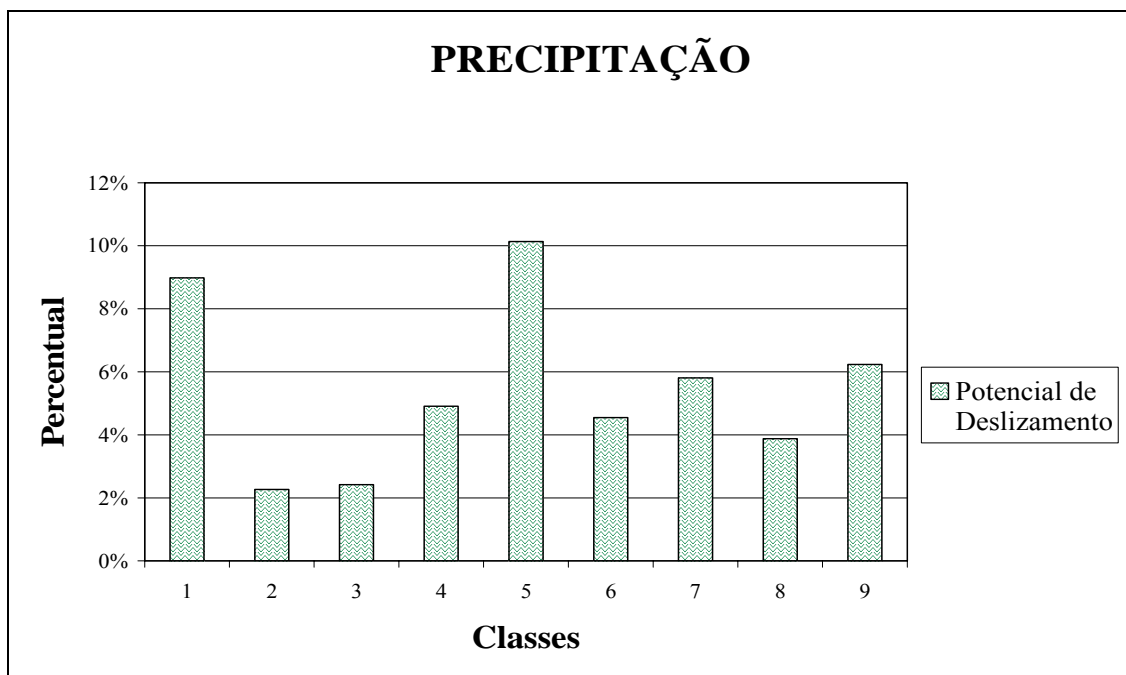


Figura 5.16. Distribuição do potencial de deslizamento para as classes de precipitação.

5.9 EVAPOTRANSPIRAÇÃO

Foram consideradas 7 classes para o fator evapotranspiração na área de estudo. Na Tabela 5.17, apresenta-se a distribuição de cada uma das classes na área total, assim como a área atingida por deslizamentos em cada uma delas.

Tabela 5.17. Frequência das classes e frequência de deslizamentos no fator evapotranspiração.

Classes	Intervalo (mm)	Área Classe (km ²)	Frequência	Área Atingida (km ²)	Frequência de deslizamento
1	1200 - 1100	25,63	13,5%	0,59	6,1%
2	1100 - 1000	17,72	9,4%	0,35	3,6%
3	1000 - 900	15,46	8,2%	0,57	5,8%
4	900 - 800	13,70	7,2%	0,91	9,3%
5	800 - 700	71,14	37,6%	5,84	60,0%
6	700 - 600	40,66	21,5%	1,21	12,4%
7	600 - 400	5,00	2,6%	0,26	2,7%
TOTAL		189,29	100,0%	9,73	100,0%

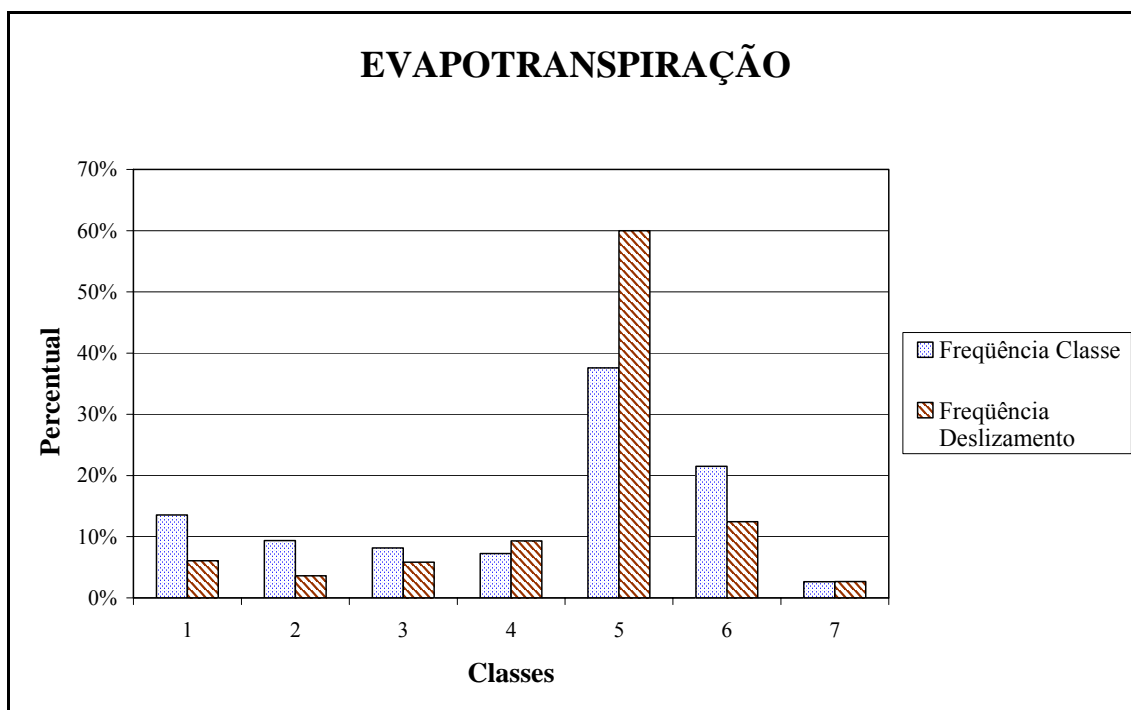


Figura 5.17. Distribuição das classes de evapotranspiração e dos deslizamentos em cada uma das mesmas na área de estudo.

A classe 5 (800mm- 700mm) é a que apresenta a maior frequência na área de estudo e também a que apresenta maior presença de deslizamento, isto é mais de 50%. (Figura 5.17).

Ao fazer o cálculo do potencial de deslizamento para o fator evapotranspiração (Tabela 5.18) a classe 5 (800mm- 700mm) é a classe que apresenta maior potencial de deslizamento (Figura 5.18) e portanto à que foi atribuído o maior peso. O comportamento do fator evapotranspiração com respeito aos deslizamentos indica que as zonas classificadas dentro da faixa de 800 a 700 mm de evapotranspiração média-anual multianual apresentam maior susceptibilidade a deslizamentos.

Tabela 5.18. Potencial de deslizamento para as classes de evapotranspiração.

Classes	Potencial de deslizamento	Peso
1	2,3%	3
2	2,0%	2
3	3,7%	4
4	6,6%	7
5	8,2%	9
6	3,0%	3
7	5,2%	6

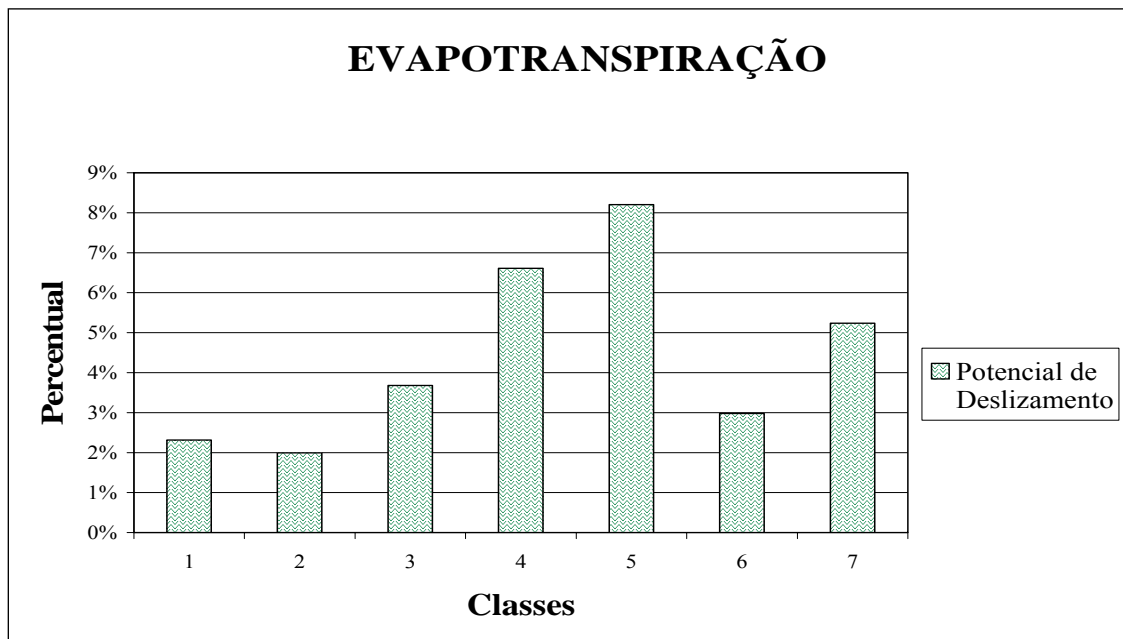


Figura 5.18. Distribuição do potencial de deslizamento para as classes de evapotranspiração

5.10 RESULTADOS PARA A CARTA DE SUSCEPTIBILIDADE AOS MOVIMENTOS DE MASSA

Em função dos intervalos de Níveis de Suscetibilidade obtidos na área de estudo, se calculou a porcentagem de distribuição de cada um deles na área (Tabela 5.19).

Tabela 5.19 Distribuição dos níveis de susceptibilidade para carta de susceptibilidade da área de estudo.

Nível de susceptibilidade	Porcentagem de área (%)
Muito baixa a nula	8,0%
Baixa	20,1%
Média	29,8%
Alta	30,8%
Muito alta	11,3%

A distribuição de níveis de susceptibilidade mostra que menos de 10% da área apresenta uma susceptibilidade baixa a nula, e que 42% da área apresenta uma susceptibilidade alta a muito alta.

De igual forma cabe ressaltar que esta carta prevê aproximadamente 77% dos deslizamentos identificados na área de estudo, os quais se encontraram em zonas de média a alta e muito alta susceptibilidade.

Na carta de susceptibilidade é possível observar que a parte mais baixa da área de estudo (extremo ocidental), que corresponde às planícies de inundação, apresenta uma susceptibilidade baixa a nula, e na medida em que o relevo vai mudando de ocidente a oriente, nas áreas correspondentes á vertente ocidental, a susceptibilidade vai aumentando paulatinamente até atingir um nível alto nas áreas com maior declividade. Já na parte central da área de estudo, onde o relevo fica mais irregular com encostas mais escarpadas, o nível susceptibilidade apresenta-se alto a muito alto nas partes mais inclinadas, e médio a baixo nos vales dos rios.

6. CONCLUSÕES

Esta dissertação teve como proposta principal a estruturação de uma metodologia para a avaliação da suscetibilidade e o perigo a deslizamentos no eixo cafeeiro colombiano, tendo em conta o estado do conhecimento atual da região. A seguir apresentam-se as conclusões obtidas neste trabalho, assim como as sugestões para pesquisas futuras.

6.1 CONCLUSÕES SOBRE O SISTEMA DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS.

O sistema de informações geográficas (SIG) se constitui na ferramenta ideal para os trabalhos em que se utilizam dados georreferenciados.

A praticidade dos SIG de trabalhar tanto com formatos raster quanto com formatos vetoriais permite o desenvolvimento de trabalhos que incluam estes dois tipos de modelos, como são as análises de suscetibilidade.

O programa ArcInfo© se mostrou como uma boa ferramenta para desenvolver o MDT da área, já que inclui na interpolação dados de altimetria e rede de drenagem.

Mediante esta ferramenta obtiveram-se de maneira rápida e eficiente os mapas derivados do MDT.

6.2 CONCLUSÕES SOBRE O MODELO APLICADO

O estudo e a avaliação da suscetibilidade do terreno aos movimentos de massa dependem diretamente do conhecimento e informação existentes da área de estudo, por tanto, quanto melhor e mais estruturada a base de dados da região maior será o número de estudos possíveis e a qualidade dos trabalhos realizados.

Os fatores analisados neste trabalho foram escolhidos como os mais indicados para a avaliação da suscetibilidade a deslizamentos, já que são os mais utilizados pelos diferentes

especialistas da área e porque representam as características que interagem e modelam os processos de movimentos de massa presentes na área de estudo.

O índice Potencial de Deslizamento usado para obter os pesos de cada uma das classes mostrou não ser um indicador abrangente de todas as classes avaliadas, portanto, os resultados obtidos podem chegar a ser limitados. Nesse caso o índice Frequência de Deslizamento pode chegar a ser mais abrangente em termos das áreas das classes avaliadas.

A carta de suscetibilidade identificou a região de planície de inundação como de baixa susceptibilidade e as áreas de morfologia mais escarpada com encostas de declividade alta como zonas de suscetibilidade alta.

A carta de suscetibilidade a movimentos de massa pode chegar a ser considerada como uma carta de perigo *a priori*. Devido à inexistência de dados mais específicos da área, como características geotécnicas do terreno, mapeamento detalhado dos deslizamentos e dados históricos de sismos, não foi possível elaborar uma carta de perigo que tivesse em conta a probabilidade de ocorrência do fenômeno num determinado intervalo tempo-espaço. É por isto que a maioria dos trabalhos nesta área de pesquisa são genéricos e pouco aplicáveis ao gerenciamento de risco.

A contribuição deste trabalho é o avanço ao respeito da análise quantitativa, baseada na alternativa proposta de se utilizar as cicatrizes de deslizamento para compor o inventário de deslizamentos na área de estudo.

O modelo utilizado para a avaliação da suscetibilidade a deslizamentos na área de estudo conseguiu identificar aproximadamente 77% dos deslizamentos encontrados na área, isto indica que embora a atribuição dos pesos dos fatores analisados fosse feito de forma heurística, os resultados do modelo aplicado assemelham-se com a realidade. De igual forma a carta de suscetibilidade também mostrou que aproximadamente 40% da área de estudo encontra-se com uma suscetibilidade alta a muito alta de sofrer deslizamentos.

A carta de áreas de risco é produto do intuito de avaliar a vulnerabilidade das zonas urbanas e estradas na área de estudo. Os elementos localizados nestas áreas de risco estão em perigo por encontrarem-se numa área de suscetibilidade média a alta de deslizamentos e apresentarem

feições, identificadas na foto interpretação, que podem ser classificadas como instáveis devido a suas características geomorfológicas.

A carta de risco obtida é uma referência para a realização de estudos mais aprofundados e para o monitoramento das áreas consideradas como iminentes a riscos, buscando minimizar perdas materiais e humanas na ocorrência de um evento catastrófico.

6.3 CONCLUSÕES SOBRE A ÁREA DE ESTUDO

O eixo cafeteiro colombiano historicamente é uma área suscetível a ocorrência de fenômenos naturais desastrosos entre os que se destacam os sismos e os deslizamentos. Estes fenômenos acontecem devido as características geológicas, geomorfológicas e climáticas da área.

Os resultados obtidos das análises de cada um dos fatores estudados proporcionaram o conhecimento do comportamento de cada um deles na área de estudo com respeito aos deslizamentos.

O comportamento do fator declividade na área de estudo mostra que a classe com maior concentração de escorregamentos é a que representa a declividade média da área, ou seja, a classe 3 (20°- 30°), já as classes 4 e 5 que representam maiores declividades têm uma concentração de escorregamentos menor. A classe 3 é a que apresenta maior potencial de deslizamento.

A classe geológico-geotécnica S_{rii2}, correspondente a solos residuais, é a que apresenta maior potencial de deslizamento. Este comportamento pode ser considerado como normal para materiais não consolidados já que por sua estrutura e os processos aos que foram submetidos são pouco estáveis.

A classe geomorfológica S_{ft}, correspondente a facetas triangulares originadas por processos de falhamento intenso, é a classe que apresenta maior potencial de escorregamento. Este comportamento foi considerado como normal devido a que estruturas geomorfológicas deste tipo derivadas de processos tectônicos intensos apresentam uma tendência a serem instáveis.

A classe geotécnica de solos SM, correspondente a areias siltsosas é a classe que apresenta maior potencial de deslizamento.

6.4 RECOMENDAÇÕES

A carta de suscetibilidade gerada neste trabalho para a área de estudo se constitui como uma guia para a definição das áreas que devem ser mais profundamente estudadas, e indicadas para monitoramento de gerenciamento de riscos, e eventualmente para a amostragem de materiais dos diferentes níveis de suscetibilidade e sua correspondente caracterização geotécnica.

A metodologia desenvolvida neste trabalho, que permite a valoração dos fatores que afetam a estabilidade do terreno, baseada em informações do mapeamento sistemático existente, pode ser aplicada pelo INGEOMINAS para outras áreas localizadas no Eixo Cafeteiro Colombiano.

Recomenda-se que a base de dados gerada para este trabalho seja complementada com informações adicionais da área, como os registros históricos de deslizamentos que podem ser encontrados nos jornais locais e relatórios da defesa civil. Da mesma maneira sugere-se a implementação de um sistema de inventário de deslizamentos para esta região.

Recomenda-se trabalhar com o índice Frequência de Deslizamento para a atribuição dos pesos das classes, devido a que este índice é muito mais abrangente e avalia melhor as classes que apresentam maiores áreas.

Uma vez feita a complementação da base de dados da região com o registro histórico de deslizamentos, se recomenda re-aplicar a metodologia para obter um produto melhorado.

Da mesma maneira, é recomendável atualizar a carta de elementos sobre risco presentes na área (povoados, rodovias, estradas, escolas, etc.) e no Eixo Cafeteiro em geral, com o objetivo de reavaliar as áreas de risco, junto com a carta de suscetibilidade a deslizamentos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguilar, V. & Mendoza, D.P. (2002). Aproximação a um Modelo de Suscetibilidade a Movimentos de Massa no Eixo Cafeteiro, Colômbia (em espanhol). Tesis de Grado, Facultad de Ingeniería, Universidad del Valle, Santiago de Cali, Colombia, 214 p.
- Antenucci, J. C., Brown, K., Crosswell, P. L., Kevany, M. J. (1991). Geographic Information Systems: a guide to the technology. Van Nostrand Reinhold, New York, 301 p.
- Augusto Filho, O. (1992). Caracterização Geológico-geotécnica voltada à Estabilização de Encostas: uma proposta metodológica. 1era Conferência Brasileira Sobre Estabilidade de Encostas, ABMS/ABGE/PUCRJ, Rio de Janeiro, RJ, 2: 721-733.
- Augusto Filho, O. (2001). Carta de Risco de Escorregamentos Quantificada em Ambiente de SIG como Subsídio para Planos de Seguro em Áreas Urbanas: Um Ensaio em Caraguatutuba (SP). Tese de Doutorado, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UNESP, São Paulo, SP, 196 p.
- Bitar, O.Y., Cerri, L.E.S., Nakazawa, V.A. (1992). Carta de Risco Geológico e Carta Geotécnica: uma diferenciação a partir de casos em áreas urbanas no Brasil. 2do Simpósio Latino-Americano sobre Risco Geológico Urbano, CARDER/INGEOMINAS/EAFIT/AGID/IUGS/IAEG/ ONAD, Pereira, Colombia, 1: 35-41.
- Brabb, E.E. (1984). Innovative approaches to landslide hazard and risk mapping. 4th International Symposium on Landslides, Toronto, Canada, 1: 307-324.
- Câmara, G., Monteiro, A.M., Medeiros, J.S. (2004). Introdução à Ciência da Geoinformação, INPE, São José dos Campos, SP, 328 p. Texto obtido pela Internet.
<http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/introd/index.html>
- Carrara A. (1992). Landslide hazard assessment. 1er Simpósio Internacional sobre Sensores Remotos e Sistemas de Informação Geográfica (SIG) para o estudo de riscos naturais, Bogotá, Colômbia, 329-335.
- Carrara, A., Cardinali, M., Detti, R., Guzzetti, F., Reichenbach, P. (1995). GSI Technology in Mapping Landslide Hazard. Geographical Information Systems in assessing natural hazards, Carrara A. & Guzzetti F. (eds), Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, pp.135-175.
- Carvajal, J. H. (2003) Visión integral de la geomorfología Colombiana. Resumen poster. Memorias del IX Congreso Colombiano de Geología. Medellín. Colombia.
- Carvalho, M. S., De Pina, M. F. & Dos Santos, S. M. (2000). Conceitos Básicos de Informação Geográfica Aplicados à Saúde. - Rede Interangencial de Informações para a Saúde (RIPSA), Brasília, Brasil, 122p.
- Chung, C. F., Fabbri, A. G. & Van Westen, C. J. (1995). Multivariate regression analysis for landslide hazard zonation. Geographical Information Systems in Assessing Natural Hazards, Kluwer Academic Publishers, Netherlands, 107 – 133

Corominas, J. e Garcia, Y.A. (1997). Terminologia dos movimentos de ladeira (em espanhol). 4to Simpósio Nacional sobre taludes e ladeiras instáveis, Granada, Espanha, 4: 1051-1072.

Cruden, D.M. (1990). Suggested Nomenclature for Landslides. Bulletin of the International Association of Engineering Geology, n.41: 13-16.

Cruden, D. M. & Varnes, D. J. (1996). Landslides, types and processes. Landslides, Investigation and Mitigation, Special Report 247, Turner A. K. & Schuster R. L. (eds), Transportation Research Board, National Research Council, National Academy Press, Washington, USA, pp. 36 - 75.

Diniz N. C. (1998). A Automação da Cartografia Geotécnica: uma Ferramenta de Estudos e Projetos para Avaliação Ambiental. Tese de Doutorado, USP, SP, 297p.

Diniz, N. C., Parizi, C. C. (2004). Metodologia para avaliação de áreas para implantação de habitação de interesse social. 5º Simpósio Brasileiro de Cartografia Geotécnica, São Carlos, São Paulo.

Einstein, H.H. (1988). Landslide Risk Assessment Procedure. 5th International Symposium on Landslides. A.A. Balkema, Lausanne, Switzerland, 2: 1075-1090.

ESRI (2002). Using Spatial Analyst. Environmental System Research Institute, ESRI, New York, USA, 232 p.

Felgueiras, C.A. (2004) Modelagem numérica de terreno. Introdução à Ciência da Geoinformação, Câmara G., Davis C., Monteiro A. M. (eds.), INPE, São José dos Campos, SP, pp. 7-1 - 7-33. Texto obtido pela Internet.

<http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/introd/cap7-mnt.pdf>

Forero-Dueñas, C. A., Carrillo E. J., Rodríguez, E. E. (2000) Caracterização Geotécnica Geral do Subsolo de Armenia, Colômbia (em espanhol). Boletín Colombiano de Geotécnica, 8 : 7-24.

Gao, J. (1993). Identification of topographic settings conducive to landslides from DEM in Nelson County, Virginia, U.S.A. Earth surface process and land forms, 18: 579-591.

García, H.A. (2004). Avaliação da Susceptibilidade aos Movimentos de Massa usando Sistemas de Informação Geográfica e Redes Neurais Artificiais, Caso de Aplicação Medellín, Colômbia. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 140 p

Gomes, R.A.T., Guimarães R.F., Carvalho Junior O. A., Fernandes N. F. (2005). Análise de um Modelo de Previsão de Deslizamentos (Shalstab) em Diferentes Escalas Cartográficas. Solos e Rochas, 28 (1): 85-97.

Gonzáles, A.J. & Mayorga, R. (2004). Thresholds for rainfall events that induce landslides in Colombia, Landslides: Evaluation and Stabilization. Lacerda, Ehrlich, Fontoura & Sayão (eds), London, England, 349-355.

Gonzales, H. & Nuñez, A. (1991). Mapa geológico generalizado do departamento do Quindío. Escala 1: 100.000 (em espanhol). Geología y recursos minerales. Memoria explicativa. Ingeominas. Bogotá, Colombia, 42 p.

Guimares, R. F., Viera B. L., Gomes R. A. T., Fernandes N. F. (1998). Avaliação dos parâmetros morfológicos das cicatrizes dos escorregamentos da bacia do Rio Quitite, Jacarepaguá (RJ). Revista Geosul , 14 (27): 316.320.

Hansen A., Franks C. A., Kirk P. A., Brimicombe A. J., Tung F. (1995). Application of GIS to hazard assessment, with particular reference to landslides in Hong Kong. Geographical Information Systems in Assessing Natural Hazards, 273 – 297.

Hutchinson, J.N. (1988). Morphological and geotechnical parameters of landslides in relation to geology and hydrogeology. . 5th International Symposium on Landslides. A.A. Balkema, Lausanne, Switzerland, 2: 1004-1016.

IDEAM (2001). O Meio Ambiente em Colômbia (em espanhol). IDEAM, Bogotá, Colômbia, 543 p.

INGEOMINAS (1999). Geologia da Zona do Eixo Cafeteiro, Terremoto do Quindío (25 de janeiro de 1999) Relatório Técnico - Científico, INGEOMINAS, Bogotá, Colômbia.

Irigaray, C. & Chacón, J. (2002). Métodos de análise da suscetibilidade aos movimentos em massa das encostas mediante SIG (em espanhol). Mapas de Susceptibilidad a los Movimientos de Ladera con Técnicas SIG, F. J. Ayala & J. Corominas (eds.), Instituto Geológico y Minero de España, Madrid, España, pp. 21-36.

IUGS Working Group -Committee on Risk Assessment- (1997). Quantitative risk assessment for slopes and landslides – the state of the art, Landslide risk assessment. Proceedings of the International Workshop on Landslide Risk Assessment, Cruden & Fell (ed.), A.A. Balkema, Rotterdam, The Netherlands, pp.3-14.

Keefer, D.K. (1984) Landslides Caused by Earthquakes. Geological Society of America Bulletin, 95: 406 – 421.

Keefer, D.K. (2002) Investigating Landslides Caused by Earthquakes- A Historical Review. U.S. Geological Survey, 23: 473-510.

Leroi, E. (1996) Landslide hazard- Risk maps at different scales: Objectives, tools and developments. Landslides, Senneset (ed), Rotterdam, The Netherlands, 35-51.

Miles, S.B. (2004). Participatory Assessment of a Comprehensive Areal Model of Earthquake-Induced Landslides. Doctoral dissertation, Department of Geography University of Washington, Washington, U.S.A., 349 p.

Millan, J.A. & Lozano, J.A. (1998). Lineamentos Metodológicos para a Avaliação da Ameaça por Fenômenos de Remoção em Massa (em espanhol). Tesis de Maestria en Geotecnia, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia, 112 p.

Mora, C. S. e Mora, R. (1994) Os Deslizamentos Causados pelo Terremoto de Limón: Fatores de Controle e Comparação com Outros Eventos em Costa Rica. Revista Geológica de América Central, Volumen Terremoto de Limón: 139 – 152.

Mora, S., Vahrson, W.G. (1993). Macrozonation methodology for landslide hazard determination. Bulletin of the Association of Engineering Geology, 31 (1): 49-58.

Oliveira, A. M. & Augusto Filho, O. (2005). Análise de Movimentos em massa com base em observações do Evento do ano 2000 de Campos de Jordão. Solos e Rochas, 28 (1): 99-111.

Popescu, M.E. (1996). From Landslide Causes to Landslide Remediation. Landslides. Senneset (ed.), Rotterdam, The Netherlands, 75-96.

Restrepo, C. e Velásquez, A. (1997) Resiliência dos Ecossistemas Tropicais de Montanha Frente ao Cambio: Biodiversidade, Processos e Deslizamentos de Terra. OSSO, Cali, Colombia, 62 p.

Rodriguez, C.E., Bommer, J.J. & Chandler, R.J. (1999). Earthquake-Induced Landslides: 1980 – 1997. Journal Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 18: 325-346.

Ruiz, A. (2004). Aplicação da proposta metodológica para a inclusão dos componentes hidrológico e climático na zonificação geomecânica do Departamento do Quindío (em espanhol). Informe inédito do INGEOMINAS, Bogotá, Colômbia, 80 p.

Santacana, N. (2001). Análise da suscetibilidade do terreno à formação de deslizamentos superficiais e grandes deslizamentos por meio do uso de sistemas de informação geográfica. Aplicação na Bacia alta do Rio Llobregart (em espanhol). Tesis de doctorado, Departamento de Ingenieria del terreno y Cartografia, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España, 270 p.

Soeters, R. and Van Westen, C. J. (1996). Slope Instability Recognition, Analysis and Zonation. Landslides: Investigation and Mitigation. Transportation Research Board Special Report 247.

Suárez J. D. (1998). Landslides and Slope Stability in Tropical Zones (in spanish). Instituto de Investigaciones sobre Erosion y Deslizamientos, Bucaramanga, Colômbia, 548 p.

Suter, F. (2003) Geologia da Região de Praia Azul, parte ocidental distal do abanico fluvio vulcânico do Quindío, Vale do Cauca, Colômbia (em espanhol). Tesis de Grado, Departamento de Geologia y Paleontologia, Facultad de Ciências, Universidad de Geneva, Suíza, 133 p.

USGS, (2004). Landslide Types and Processes. Texto obtido pela Internet.
<http://pubs.usgs.gov/fs/2004/3072/pdf/fs2004-3072.pdf>

Van Westen, C.J. (1993) Application of Geographic Information System to landslide hazard zonation. ITC publications, nº 15 ITC. Enschede, 245p.

Van Westen, C.J.(2004) Geo-Information tools for landslide risk assessment: an overview of recent developments. *Landslides: Evaluation and Stabilization*. Lacerda, Ehrlich, Fontoura & Sayão (eds.), London, England. 39-56.

Varnes, D. J. (1978) Slope movement types and processes. *Landslides analysis and control*, Schuster & Krizek (ed.), Washington, USA, pp. 11-33.

Varnes, D.J. (1985) *Landslide hazard zonation: a review of principles and practice*. UNESCO, Paris, França. 63 p.

Velez, M. V., Hoyos F. P., Vélez J. I. U. & Gómez S. I. (1993) Metodologia para o estudo de parâmetros Hidrogeológicos envolvidos nos Movimentos de Massa (em espanhol). IV Simposio Colombiano de Hidrogeología, Cartagena de Indias, Colombia, 349 – 359.