



**PROJETO FINAL DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
CIVIL**

**CARTOGRAFIA GEOTÉCNICA PARA ANÁLISE DE
SUSCETIBILIDADE E RISCO A MOVIMENTOS DE
MASSA E EROSÃO ENTORNO DE RODOVIAS**

PEDRO BAENA DE MESQUITA

ORIENTADOR: NEWTON MOREIRA DE SOUZA

BRASÍLIA - DF, JULHO DE 2019

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

**FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

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

**CARTOGRAFIA GEOTÉCNICA PARA ANÁLISE DE
SUSCETIBILIDADE E RISCO A MOVIMENTOS DE
MASSAS E EROSÃO ENTORNO DE RODOVIAS**

PEDRO BAENA DE MESQUITA

ORIENTADOR: NEWTON MOREIRA DE SOUZA

**MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL EM
ENGENHARIA CIVIL**

BRASÍLIA / DF: Julho / 2019

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

**CARTOGRAFIA GEOTÉCNICA PARA ANÁLISE DE
SUSCETIBILIDADE E RISCO A MOVIMENTOS DE
MASSAS E EROSÃO EM TORNO DE RODOVIAS**

PEDRO BAENA DE MESQUITA

**MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA
CIVIL E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL.**

APROVADA POR:

**NEWTON MOREIRA DE SOUZA, DSc. (UnB)
(ORIENTADOR)**

**ELEUDO ESTEVES DE ARAUJO SILVA JUNIOR, MSc. (UnB)
(EXAMINADOR INTERNO)**

**PEDRO HENRIQUE LOPES BATISTA, MSc. (Ministério do Desenvolvimento
Regional)
(EXAMINADOR EXTERNO)**

DATA: BRASÍLIA/DF, 12 de JULHO de 2019.

FICHA CATALOGRÁFICA

| |
|---|
| MESQUITA, PEDRO BAENA DE |
| Cartografia geotécnica para análise de suscetibilidade e risco a movimentos de massas e erosão entorno de rodovias [Distrito Federal] 2019. |
| xiii, 118 p., 297 mm (ENC/FT/UnB, Bacharel, Engenharia Civil, 2019) |
| Monografia de Projeto Final - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia. |
| Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. |
| 1. Cartografia geotécnica 2. Suscetibilidade |
| 3. Risco 4. Rodovias |
| I. ENC/FT/UnB II. Título (série) |

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

MESQUITA, P. B. Cartografia Geotécnica para Análise de Suscetibilidade e Risco a Movimentos de Massas e Erosão Entorno de Rodovias. Monografia de Projeto Final, 2019. 132 f. Monografia (Graduação em Engenharia Civil). Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília - DF.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Pedro Baena de Mesquita

TÍTULO DA MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL: Cartografia geotécnica para análise de suscetibilidade e risco a movimentos de massas e erosão entorno de rodovias.

GRAU / ANO: Bacharel em Engenharia Civil / 2019

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

Pedro Baena de Mesquita

Quadra 116, Bloco F, Apartamento 210 – Asa Sul
70386-060 – Brasília/DF - Brasil

Para minha família, especialmente para minha bisavó.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, a Deus, Nosso Senhor, e à intercessão de Nossa Senhora pela saúde, pela capacidade de ter realizado esse trabalho, por todas as pessoas que conheci ao longo desses anos na UnB e por tudo que me deram durante esses anos de vida.

À minha família por sempre ter me apoiado, pelo amor dado, pela paciência, por todas oportunidades que me deram e por nunca terem me deixado faltar nada.

Ao professor Newton pela contribuição, pela orientação e paciência dadas ao longo desse trabalho.

Ao professor Pastor pelo apoio e pela orientação dados durante os programas Jovens Talentos e PIBIC.

Aos meus amigos do primeiro semestre de 2014 de engenharia ambiental por toda ajuda que me deram por todos os bons momentos e as dificuldades compartilhados, ao Arthur, à Ana Paula, à Bruna, à Camilla, à Dani, à Déborah, ao Pavoni, ao Gabriel, à Isa, à Luísa, ao Kaio, ao Lima, ao MMs, à Natália, ao Rafael, ao Flávio, à Samara, ao Spencer, ao Victor e ao Will. Agradeço especialmente ao Kaio, à Natalia e ao Victor, pela contribuição dada à realização desse trabalho. Vocês tornaram esses anos de graduação muito mais fáceis, agradáveis e divertidos.

Aos amigos que eu fiz na engenharia civil, à Agnis, à Bárbara, ao Breno, que já conhecia desde o ensino médio, ao Cássio, ao Daniel, ao Henrique, ao Jaire, à Larissa, ao Maykson e ao Rodrigo que também me ajudaram muito ao longo desses anos, por todos os trabalhos e bons momentos compartilhados. E a todos aqueles que eu não consegui mencionar e que me ajudaram de algum modo a chegar até aqui.

Resumo

As rodovias são obras de engenharia de grande extensão e importância para a sociedade, que atravessam ambientes com diferentes condições geológicas, geomorfológicas, topográficas, entre outras. Em alguns casos, elas impactam negativamente esses ambientes e provocam ou se tornam sujeitas a deslizamentos e a processos erosivos. Para compreender esses fenômenos, foram elaboradas as cartas geotécnicas de suscetibilidade e de risco para estudo e análise de um trecho da BR 251 no Distrito Federal. Com os dados sobre as diferentes características do meio físico, coletados em bases governamentais e em pesquisas anteriores, foram utilizados modelos para a elaboração das cartas de suscetibilidade ao deslizamento e à erosão. Os modelos adotados foram um método racional baseada nos critérios de Mohr-Coulomb e a Equação Universal de Perda de Solos. A carta de risco de deslizamento foi realizada com base na comparação entre as consequências dos possíveis deslizamentos com a suscetibilidade. A carta de risco de erosão foi gerada com a tolerância dos tipos de solos obtidas de pesquisas anteriores. A partir das cartas geradas, foram identificadas as vertentes com maiores declividades mais próximas dos rios como os locais mais suscetíveis aos deslizamentos e aos processos erosivos. A erosão foi também vinculada ao uso do solo. Nesse contexto, foram identificadas modalidades de ocupação humana e uso do solo associadas com maiores riscos de deslizamento e erosão. Com os resultados obtidos, foi recomendado a restringir a ocupação dessas áreas, evitar a remoção da vegetação nativa e a realização de novas pesquisas para melhorar os resultados.

Abstract

Highways are engineering works of great dimensions and importance for society, which cross environments with different geological, geomorphological and topographic conditions. In some cases, they impact negatively those environments and may cause or be affected by landslides and erosion processes. To understand these phenomena, susceptibility and risk maps were drawn in order to analyse a stretch of the BR 251 highway in Distrito Federal, Brazil. Based on information collected from governmental databases and previous research, models were used to elaborate the susceptibility maps for landslides and erosion. The models adopted were a rational method based on Mohr-Coulomb criteria and the Universal Soil Loss Equation. The landslide risk map was drawn on the basis of a comparison between the consequences of the possible landslides with landslide susceptibility. The risk of erosion map was based on the tolerances obtained from previous research for each soil type. The maps identified the slopes with highest declivity and closest to river streams as the places most susceptible to landslides and erosion events. Erosion was also linked to soil use. In this context, different patterns of human settlement and soil use associated with increased risk of landslides and erosion were also identified. Based on the results obtained, it was recommended to restrict the occupation of those areas, avoid the removal of the native vegetation and to conduct further research on soil properties to get better results.

SUMÁRIO

| Capítulo | Página |
|--|---------------|
| 1.INTRODUÇÃO | 1 |
| 2.OBJETIVOS | 2 |
| 2.1. OBJETIVO GERAL | 2 |
| 2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS | 2 |
| 3.REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 3 |
| 3.1. IMPORTÂNCIA DAS RODOVIAS | 3 |
| 3.2. PROBLEMAS GEOTÉCNICOS EM RODOVIAS | 6 |
| 3.2.1. A RELAÇÃO ENTRE AS RODOVIAS E O MEIO FÍSICO | 6 |
| 3.2.2. MOVIMENTOS DE MASSA | 9 |
| 3.2.3. EROSÃO | 20 |
| 3.3. RISCO E SUSCETIBILIDADE | 24 |
| 3.3.1. DEFINIÇÕES | 24 |
| 3.3.2. MÉTODOS PARA DETERMINAÇÃO DA SUSCETIBILIDADE E DO RISCO A DESLIZAMENTOS | |
| 26 | |
| 3.3.3. MÉTODOS QUANTITATIVOS PARA PROCESSOS EROSIVOS | 31 |
| 3.4. CARTAS GEOTÉCNICAS | 34 |
| 3.4.1. DIFERENTES TIPOS DE CARTAS GEOTÉCNICAS | 34 |
| 3.4.2. ELABORAÇÃO DAS CARTAS GEOTÉCNICAS | 39 |
| 3.5. SISTEMAS DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS DE GEOPROCESSAMENTO | 45 |
| 3.5.1. GEOPROCESSAMENTO | 45 |
| 3.5.2. SISTEMAS DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS | 49 |
| 3.6. DISTRITO FEDERAL | 52 |
| 3.6.1. FORMAÇÃO E CARACTERÍSTICAS | 52 |
| 3.6.2. GEOLOGIA | 55 |
| 3.6.3. GEOMORFOLOGIA | 56 |
| 3.6.4. PEDOLOGIA | 57 |
| 3.6.5. VEGETAÇÃO | 60 |
| 3.6.6. CLIMA | 65 |
| 3.6.7. HIDROGRAFIA E HIDROGEOLOGIA | 66 |
| 3.6.8. DESLIZAMENTOS | 67 |
| 3.6.9. PROCESSOS EROSIVOS | 68 |
| 4.METODOLOGIA | 70 |

| | |
|---|-----|
| 5.ÁREA DE ESTUDO | 72 |
| 5.1. ESCOLHA | 72 |
| 5.2. COLETA DE DADOS | 74 |
| 5.3. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO | 75 |
| 5.3.1. GEOLOGIA | 75 |
| 5.3.2. GEOMORFOLOGIA | 76 |
| 5.3.3. PEDOLOGIA | 76 |
| 5.3.4. VEGETAÇÃO E USO DO SOLO | 77 |
| 6.CARTAS AUXILIARES E MODELOS ADOTADOS | 78 |
| 6.1. CARTAS AUXILIARES | 78 |
| 6.1.1. CARTA DE ALTIMETRIA OU HIPSOMÉTRICO | 78 |
| 6.1.2. CARTA DE DECLIVIDADE | 79 |
| 6.1.3. DIREÇÃO DE FLUXO E ACÚMULO DE FLUXO | 80 |
| 6.2. MODELOS E SUSCETIBILIDADE E DE RISCO | 81 |
| 6.2.1. DESLIZAMENTOS | 81 |
| 6.2.2. EROSÃO | 83 |
| 7.CARTAS DE SUSCETIBILIDADE E DE RISCO | 84 |
| 7.1. CARTA DE SUSCETIBILIDADE E DE RISCO DE DESLIZAMENTOS | 84 |
| 7.2. CARTA DE SUSCETIBILIDADE E CARTA DE RISCO DE EROSÃO | 86 |
| 8.ANÁLISE DOS RESULTADOS | 87 |
| 9.CONCLUSÃO | 94 |
| REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICAS | 97 |
| APÊNDICES | 107 |

LISTA DE TABELAS

| Tabela | Página |
|---|---------------|
| Tabela 3.1: Classificação dos movimentos de massa | 10 |
| Tabela 3.2: Classificação dos movimentos de terra | 11 |
| Tabela 3.3: Principais movimentos de massa..... | 12 |
| Tabela 3.4: Lista das causas de movimentos de massa | 18 |
| Tabela 3.5: Condicionantes e causas para os deslizamentos | 19 |
| Tabela 3.6: Níveis de cartas geotécnicas no planejamento urbano, escalas e processos mapeáveis | 39 |
| Tabela 3.7: Exemplos de descritores de suscetibilidade..... | 44 |
| Tabela 3.8: Vegetação do Distrito Federal, conforme EMBRAPA (1978)..... | 64 |
| Tabela 6.1: Parâmetros de solos utilizados..... | 83 |
| Tabela 6.2: Associação das camadas na base de dados aos valores fornecidos por Baptista (1997) | 84 |
| Tabela 7.1: Classificação dos riscos de deslizamento raso. | 86 |
| Tabela 7.2: Classificação do risco em função da tolerância para cada tipo de solo, baseado em Baptista (1997). | 87 |

LISTA DE FIGURAS

| Figura | Página |
|---|---------------|
| Figura 3.1: Indicação de processo de rastejo e perfil esquemático do processo de rastejo | 13 |
| Figura 3.2: Deslizamentos planares induzidos pela ocupação e perfil esquemático dos deslizamentos planares | 15 |
| Figura 3.3: Deslizamento circular ou rotacional e perfil esquemático do deslizamento circular ou rotacional | 15 |
| Figura 3.4: Deslizamento em cunha e perfil esquemático de um deslizamento em cunha. | 15 |
| Figura 3.5: Área de risco de processos de queda de blocos rochosos e perfil esquemático de queda de blocos | 16 |
| Figura 3.6: Situação de risco de rolamento de bloco rochoso e perfil esquemático de rolamento de bloco rochoso..... | 16 |
| Figura 3.7: Acidente associado ao processo do tipo corrida e perfil esquemático de processos do tipo corrida..... | 17 |
| Figura 3.8: Exemplo de carta de suscetibilidade a processos geodinâmicos..... | 37 |
| Figura 3.9: Proposta simplificada de etapas para elaboração da análise de suscetibilidade a eventos de natureza geológica e hidrológica | 42 |
| Figura 3.10: Principais atividades envolvidas em geoprocessamento..... | 46 |
| Figura 3.11: Exemplo de modelo numérico de terreno, formado por isolinhas de topografia. | 48 |
| Figura 3.12: Exemplo de Imagem para a região de Manaus | 48 |
| Figura 3.13: Arquitetura de um Sistema de Informação Geográfica..... | 50 |
| Figura 3.14: Feições Geográficas representadas na camada selecionada..... | 51 |
| Figura 3.15: Localização do Distrito Federal | 53 |
| Figura 3.16: Ocupação Urbana em 1964 (vermelho) e em 2009 (cinza). | 55 |
| Figura 3.17: Mapa da Geologia do Distrito Federal | 56 |
| Figura 3.18: Mapa da Geomorfologia do Distrito Federal | 57 |
| Figura 3.19 Mapa de solos do Distrito Federal | 59 |
| Figura 3.20:Fitofisionomias do Bioma Cerrado. | 60 |
| Figura 3.21: Transição Mata Seca e Campo Limpo | 61 |
| Figura 3.22: Cerradão | 61 |
| Figura 3.23: Cerrado Típico | 62 |
| Figura 3.24: Campo Sujo..... | 63 |
| Figura 3.25: Transição Campo Limpo e Vereda | 63 |
| Figura 3.26: Precipitação mensal média do DF de 1989-2018, em milímetros. | 65 |
| Figura 3.27 Temperatura máximas e mínimas mensais do DF de 1989-2018, em graus Célsius. | 65 |
| Figura 3.28: Mapa hidrográfico do Distrito Federal de 2016..... | 66 |
| Figura 3.29: Risco ecológico de perda de solo por erosão | 68 |
| Figura 3.30: Processo erosivo decorrente de desmatamento..... | 70 |
| Figura 5.1: Vista do relevo a partir da BR 251..... | 72 |
| Figura 5.2: Localização da área de estudo (verde escuro) no Distrito Federal | 73 |
| Figura 5.3: Evolução urbana em torno da área de estudo..... | 73 |
| Figura 5.4: Rodovia BR 251 e corte no terreno..... | 74 |
| Figura 5.5: Processos Erosivos intensos na área de estudo | 74 |

| | |
|---|----|
| Figura 5.6: Geologia da região..... | 75 |
| Figura 5.7: Geomorfologia da região..... | 76 |
| Figura 5.8: Pedologia da área de estudo..... | 77 |
| Figura 5.9: Vegetação e Uso do Solo..... | 78 |
| Figura 6.1: Camada Raster de Altimetria da área de estudo..... | 79 |
| Figura 6.2: Camada Raster de Declividade..... | 80 |
| Figura 6.3: Camada Raster de Direção de fluxo..... | 81 |
| Figura 6.4: Camada Raster de Fluxo Acumulado. com os Córregos e Rodovias..... | 81 |
| Figura 6.5: Esquema representativo do modelo..... | 82 |

LISTA DE EQUAÇÕES

| Equação | Página |
|--|---------------|
| (3.1) Equação Universal de Perda de Solo | 31 |
| (3.2) Equação da Energia Cinética | 32 |
| (3.3) Fator de Erodibilidade..... | 32 |
| (3.4) Fator topográfico..... | 33 |
| (6.1) Força normal ao plano | 82 |
| (6.2) Tensão atuando no plano de deslizamento..... | 82 |
| (6.3) Fator de Segurança..... | 82 |
| (6.4) Tensão cisalhante resistente..... | 82 |
| (6.5) Tensão cisalhante atuante | 82 |
| (6.6) Fator topográfico adaptado | 83 |

LISTA DE ABREVIACÕES E DE SÍMBOLOS

- CNT – Confederação Nacional dos Transportes
CODEPLAN – Companhia de Planejamento do Distrito Federal
DF – Distrito Federal
DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IBRAM – Instituto Brasília Ambiental
INMET – Instituto Nacional de Meteorologia
MTPA – Ministério dos Transportes, Portos e Aviação Civil
NOVACAP – Companhia Urbanizadora da Nova Capital do Brasil
PDOT – Plano Diretor de Ordenamento Territorial
PNT – Política Nacional de Transportes
SEDUH – Secretaria de Estado de Desenvolvimento Urbano e Habitação
SIG – Sistemas de Informações Geográficas
UNDRO - Agência de Coordenação das Nações Unidas para o Socorro em Desastres
UTM – Universal Transversa de Mercator
ZEE – Zoneamento Econômico-Ecológico
A – Perda de solos por área
a – Percentual de matéria orgânica
b – Código de estrutura do solo usado na classificação do solo
c – Classe de perfil de permeabilidade
E – Energia cinética da chuva
FS – Fator de Segurança
I – Intensidade da chuva
K – Fator de erodibilidade do solo
L – Fator de comprimento de rampa
LS – Fator topográfico
M – Relação entre os teores de silte e areia e o teor de argila do solo
P – Fator de práticas conservacionistas
R – Fator de erosividade da chuva
S – Fator topográfico
 θ – Declividade do talude
 λ – Comprimento do talude

1. INTRODUÇÃO

As rodovias são empreendimentos de engenharia de grande extensão e relevância significativa para o País. O setor de transportes permite a locomoção de pessoas e mercadorias, por isso exerce um papel fundamental na economia. Esta capacidade lhe confere uma posição estratégica, indutora de crescimento econômico e geradora de empregos (MTPA, 2018a). Dentro desse setor, as rodovias se destacam pela extensão da malha, pelos volumes transportados e por ser o principal modal de transportes do Brasil (CNT, 2017).

Entretanto, as rodovias, devido a suas grandes extensões longitudinais, se tornam membros de paisagens diversas e as modificam, conforme suas necessidades. Essa modificação altera a interação natural de diversos fatores dentre os quais a topografia, a geologia, a geomorfologia, a vegetação e o fluxo de água (FERNANDES E CERRI, 2011).

Como consequência, ela se torna sujeita a fenômenos geotécnicos como deslizamentos que podem causar a interrupção ou a destruição de parte da rodovia e erosões que podem gerar assoreamento e poluição de rios. Os resultados desses acontecimentos são perdas econômicas, sociais e ambientais (GARIBALDI *et al.*, 2012) (RIDENTE JUNIOR, 2008).

Para garantir a segurança dos usuários e a operabilidade da rodovia, de um ponto de vista econômico e sustentável, é necessário conhecer os fenômenos aos quais ela está sujeita. A divisão dos fenômenos em categorias, possibilita conhecer a melhor forma como eles acontecem, assim como os fatores indutores e condicionantes dos processos. Com base nisso, é avaliada a suscetibilidade de determinados lugares a determinados fenômenos. Em seguida, com base na suscetibilidade consegue-se determinar o risco (CARVALHO *et al.*, 2007). Embora nem sempre seja possível uma avaliação dos riscos de forma quantitativa dada a grande quantidade parâmetros relacionados à erosão e aos deslizamentos, em particular, a análise de suscetibilidade e de risco fornecem os subsídios para a identificação dos tipos de fenômenos passíveis de ocorrerem e as consequências esperadas (FELL *et al.*, 2008). Eles são, por isso, importantes ferramentas no auxílio de tomada de decisões e de medidas para mitigação dos danos gerados por deslizamentos e erosões.

A combinação de grandes quantidades de parâmetros de diversas origens distribuídos no espaço dificulta a análise de suscetibilidade e risco. Para esse fim, cartas geotécnicas são de grande utilidade para a representação espacial de atributos distintos.

As cartas geotécnicas permitem diferentes tipos de análises, conforme o objeto de estudo. Elas podem ser divididas em cartas geotécnicas clássicas, de suscetibilidade e de risco. Elas possuem diversas finalidades adequadas ao objetivo do estudo e o objeto de interesse (ZUQUETTE; NAKAZAWA, 1998). A importância das cartas geotécnicas para o planejamento se torna cada vez mais reconhecida com a exigência legal de elaboração de cartas geotécnicas, por parte dos municípios, para o mapeamento de áreas suscetíveis a desastres (BRASIL, 2012).

Dessa forma, as rodovias são de grande relevância para o País, entretanto, por causa de suas naturezas, elas estão sujeitas a diversas circunstâncias dos terrenos que às tornam suscetíveis a deslizamentos e a processos erosivos. Estes comprometem a sua qualidade, seja em termos econômicos ou ambientais. Por isso, para uma avaliação das condições naturais em torno da rodovia, são necessárias ferramentas que forneçam as informações adequadas para a correta consideração da situação e a tomada de medidas correspondentes.

Pela capacidade fornecer um parecer com base em uma grande quantidade de parâmetros e nas consequências esperadas, considera-se as cartas geotécnicas de suscetibilidade e de risco os instrumentos adequados para a proposta de medidas para melhorar o planejamento, garantir a segurança e aumentar a sustentabilidade das rodovias.

2. OBJETIVOS

2.1.OBJETIVO GERAL

O presente trabalho tem por objetivo elaborar uma Carta Geotécnica de Risco e de Suscetibilidade para um trecho de uma rodovia localizada no Distrito Federal sujeita a deslizamentos e processos erosivos.

2.2.OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos deste trabalho são os seguintes:

- Coleta de dados quantitativos de qualidade e precisão para a elaboração das cartas de suscetibilidade e de risco;

- Elaboração dos mapas de atributos: geológico, geomorfológico, hipsometria, de declividade, entre outros, para servirem de subsídios às cartas de suscetibilidade e de risco;
- Identificar por meio das cartas de suscetibilidade e risco as áreas suscetíveis aos fenômenos geodinâmicos, compreendê-los no contexto das análises realizadas e propor soluções.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. IMPORTÂNCIA DAS RODOVIAS

Os sistemas de transportes são de grande importância para a economia e para o desenvolvimento de um país e a integração entre as suas regiões. A importância deles advém da conexão entre locais distantes no espaço. Estes possuem características distintas com necessidades e abundâncias próprias em matérias primas, bens manufaturados e consumidores. (GARBER; HOEL, 2009)

Dessa forma, possibilitam um maior número de produtos de serem fabricados, ao dar acesso a mais insumos, e lhes dão acesso a uma maior quantidade de consumidores. Além disso, eles possibilitam o deslocamento de pessoas para outros lugares, seja em busca de novas oportunidades ou a lazer. (GARBER; HOEL, 2009)

Nesse sentido, Garber e Hoel (2009) citam uma adequada infraestrutura de transportes como fator necessário para o desenvolvimento de uma região, além de mostrarem as vantagens de um sistema de transporte eficiente. Segundo os autores, o transporte eficiente facilita a locomoção de pessoas e mercadorias, reduz os custos de matérias primas e bens manufaturados, permite a especialização da indústria e do comércio, aumenta a competitividade entre as regiões o que resulta em mais escolhas e preços melhores para o consumidor. Relaciona-se também o desenvolvimento e a industrialização de países como Estados Unidos, Canadá e do Reino Unido com seus sistemas de transportes eficientes.

A CNT (2017) confirma igualmente a importância dos transportes para o desenvolvimento econômico de um país. De acordo com a CNT, um sistema eficiente de transportes é capaz de reduzir os custos de produção, entre outras maneiras pela redução do custo da matéria prima necessária para a atividade econômica. Além disso, os transportes afetam também a produtividade nacional e a sua relação com o comércio exterior, ao compor uma parcela do preço do produto. Um transporte caro aumenta o valor do produto a ser exportado e do

produto que chega aos portos, o que gera uma perda de competitividade dos produtos nacionais e uma redução das importações e das exportações (CNT, 2017).

No caderno das estratégias governamentais, MTPA (2018a), para a reformulação da PNT – Política Nacional de Transportes, evidencia-se a relevância do setor de transportes para o País. Ele afirma:

“Setor de Transportes se configura como elemento fundamental na organização e dinâmica do Estado brasileiro, uma vez que funciona como instância essencial para os deslocamentos das pessoas, das matérias-primas e dos produtos finais, vinculando-se ao abastecimento interno, à segurança alimentar, ao direito de ir e vir, à provisão de insumos para as produções agropecuárias e industriais e aos movimentos de importação e de exportação, por exemplo. Assim sendo, a relação dos meios de transporte com as potencialidades de desenvolvimento social e econômico do País é estreita, de modo que a rede viária e as infraestruturas logísticas a ela associadas funcionam como meios imprescindíveis para a vitalidade social e econômica da Nação” (MTPA, 2018a p.19).

O papel significativo dos transportes na economia pode ser observado nos empregos gerados diretamente e nas atividades auxiliadoras. O sistema de transportes brasileiro gerou 2.176.502 empregos, dos quais 408.620 foram em atividades auxiliadoras, no ano de 2016. O modal com maior relevância é o rodoviário. Esse foi responsável por 1.595.286 empregos, dos quais 871.014 no transporte de cargas e 173.962 no transporte intermunicipal, interestadual e internacional. Ele contribui igualmente com 318.818 empregos em atividades auxiliares, como armazenagem, carga e descarga, concessionárias, terminais, entre outros (CNT, 2017).

De acordo com a CNT (2018), o modal rodoviário, apesar de ter sofrido com a crise econômica, ainda é responsável por 61,1% do transporte de cargas e transportou 79,5 milhões de pessoas em 2017. O sistema rodoviário brasileiro possuía, de acordo com essa mesma pesquisa, 1.720.700,61 km de rodovias dentre as quais 1.349.938,5 km (78,5% do total) não são pavimentadas, 213.452,8 km (12,4% do total) são pavimentadas e 157.309,3 km (9,1% do total) são planejadas.

O Brasil, no entanto, possui algumas deficiências no seu sistema de transportes. Dentre as quais está uma participação exagerada do modal rodoviário no transporte de pessoas e de cargas, decorrentes do desenvolvimento ainda pouco efetivo dos modais ferroviários e

hidroviários e da falta de intermodalidade. Além disso, as rodovias existentes são muitas vezes de baixa qualidade e causam prejuízos aos motoristas.

O Ministério dos Transportes, Portos e Aviação Civil, MTPA, com a reformulação da Política Nacional de Transportes, PNT, reconhece o desequilíbrio da matriz de transportes, que se consolidou com muitos anos de políticas públicas favoráveis ao modal rodoviário. Essa situação é vista como irracional e pouco econômica e causadora de “custos logísticos e de transporte muito elevados, baixa eficiência energética da matriz de transportes e elevados custos sociais e ambientais, ligados, por exemplo, às emissões de gases de efeito estufa e à segurança viária” (MTPA, 2018a, p. 23).

De acordo com a CNT (2017), as rodovias possuem as seguintes vantagens com relação aos outros modais. “Esse tipo de transporte apresenta vantagens em relação aos outros modais, devido à flexibilidade e facilidade de acesso aos pontos de embarque e desembarque, oferecendo um serviço porta a porta aos usuários.” (CNT, 2017, p. 19). Além disso, ela ressalta que o transporte rodoviário é mais adequado a produtos de alto valor agregado ou perecíveis, em pequenas ou médias distâncias e pequenas ou médias tonelagens. No quesito passageiros, ele oferece flexibilidade, custo menor e maior acessibilidade para trajetos curtos ou médios.

Sobre a qualidade do transporte rodoviário brasileiro, a CNT (2017) critica a qualidade da infraestrutura e a quantidade. Ela afirma também: “Como efeitos adversos da qualidade das rodovias disponíveis no país, pode-se citar o aumento do custo operacional do transporte, a maior probabilidade de ocorrência de acidentes rodoviários e, ainda, impactos ambientais” (CNT, 2017, p.7).

A fim de modernizar o sistema de transportes, planejar o futuro e reduzir os prejuízos que o País sofre com uma matriz de transportes inadequada, foi estabelecida a Política Nacional de Transportes pelo Ministério dos Transportes. Os seus princípios são o princípio à vida, excelência institucional, planejamento e integridade territorial, infraestrutura sustentável, eficiência logística, desenvolvimento econômico, social e regional e responsabilidade socioambiental. Destaca-se ainda os objetivos da PNT: prover um sistema acessível, eficiente, e confiável para a mobilidade de pessoas e bens, garantir a segurança operacional em todos os modos de transportes, prover uma matriz viária racional e eficiente, considerar as particularidades e potencialidades regionais nos planejamentos setoriais de transportes e

atuar como vetor do sistema de desenvolvimento socioeconômico e sustentável do País (MTPA, 2018b).

3.2.PROBLEMAS GEOTÉCNICOS EM RODOVIAS

3.2.1. A relação entre as rodovias e o meio físico

Eventos geotécnicos como deslizamentos ou erosões podem ter impactos significativos nas rodovias e prejudicarem ou até mesmo interromperem a circulação. Os congestionamentos podem acarretar diversos tipos de prejuízos para a população como danos ao bem-estar, aumento do nível de ruído, aumento da poluição, aumento no tempo e custos das viagens, redução da velocidade, maior emissão de gases tóxicos, degradação de áreas ambientais, geração de calor pelos motores dos veículos, danos aos animais selvagens, entre outros (GARIBALDI *et al.*, 2012).

Em casos mais graves nos quais há bloqueio total da rodovia, a alteração do fluxo de tráfego gera consequências mais sérias e mais abrangentes. Algumas delas são o isolamento de uma área, ao dificultar o acesso, que altera as relações socioeconômicas, perda de clientes e de receitas, alteração obrigatória do trajeto, impacto da infraestrutura substituta e no meio ambiente, alteração da paisagem, aumento do tempo e custo de viagem, diminuição da qualidade de vida (GARIBALDI *et al.*, 2012).

As rodovias são obras caracterizadas por grande extensão longitudinal e pequena transversal. A dimensão dessas obras faz com que elas atravessem condições geológicas, geomorfológicas, pedológicas distintas combinadas com variações do relevo, da flora e do uso do solo igualmente variáveis. O grande número de circunstâncias que podem ocorrer ao longo do trajeto de uma rodovia a torna suscetível a diversos fenômenos geotécnicos (FERNANDES E CERRI, 2011) (LOPES, 2007).

De acordo com Ridente Júnior (2008, p.2), as rodovias “geralmente atravessam diversos ambientes, formados por diferentes formações geológicas, formas geomorfológicas, tipos de solos, formações florestais, grupos de faunas, ambientes sociais, etc.”

Cerri (1990) descreve o meio físico como constituído de ar, água, solo e rocha. Esses elementos interagem entre si de forma complexa e provocam erosão, assoreamento, escorregamento e circulação de massas de água e ar. A ocorrência, a distribuição temporal e

espacial e a intensidade desses fenômenos são influenciados por uma grande quantidade de condicionantes principalmente geológicos, mas também biológicos.

Um dos elementos fundamentais do ambiente é o relevo. O relevo é parte da paisagem e, como tal, está submetido a diversos processos que alteram a sua forma continuamente. Este processo natural cria as encostas, gerada por fatores externos e internos e por meio de agentes geológicos, climáticos, biológicos e humanos (CARVALHO *et al.*, 2007).

Lopes (1998) aborda essa relação entre os diversos elementos do meio físico. Esses fatores são o clima, a vegetação, o solo, a topografia, a geologia, a fauna e a rede de drenagem. O clima altera a condição da rocha e gera o solo, que por sua vez protege a rocha e transforma a topografia. Esta por sua vez favorece o acúmulo do solo e o seu desenvolvimento. O clima e o solo facilitam ou dificultam o movimento da água e modelam as redes de drenagem. O tipo de solo, clima, relevo e rede de drenagem favorecem o desenvolvimento da vegetação que interfere no balanço hidrológico ao aumentar a evapo-transpiração e reduzir o escoamento superficial. A fauna é atraída pelas condições ambientais da região e age no controle da vegetação.

Os seres humanos, ao se assentar e utilizar o solo para o seu proveito, modificam essa condição natural, de acordo com a modalidade de ocupação exercida. Essa alteração compromete, muitas vezes a sua própria segurança e a eficiência do seu empreendimento. Por isso, há a necessidade de um controle geotécnico do solo tendo em vista melhorar a utilização do espaço físico, caracterizar o espaço, estabelecer critérios de ocupação, avaliar soluções de engenharia e adotar ações preventivas ou corretivas (CERRI, 1990).

A rodovia atua nessas relações e altera as condições topográficas, vegetais, de drenagem e fluxo de água. Fornasari Filho *et al.* (1992) identificaram os processos do meio físico que atuam em estradas de rodagem e como eles são afetados pela modificação do terreno, decorrente do processo de implantação e funcionamento da obra. Eles identificaram que as estradas de rodagem estão submetidas à erosão do terreno, ao escorregamento, à queda de blocos, ao escoamento das águas em superfície, à movimentação da água em baixo da superfície e à deposição de sedimentos.

Alguns contextos já são propícios para a ocorrência de deslocamento de massas, o que torna as rodovias ainda mais passivas à ocorrência desses fenômenos. Fernandes e Cerri (2011) citam como problemas comuns em locais com instabilidade tectônica os escorregamentos,

os rastejos e as quedas de blocos. Essa instabilidade é característica da área estudada do trecho da rodovia Marechal Rondon. Além disso, eles também identificaram diversas ocorrências de processos erosivos causados pela remoção de vegetação para nativa para a agricultura e pastagem.

Lopes (1998) faz uma análise das condições topográficas e do solo para as rodovias em regiões de colinas, planas e montanhosas. Em regiões de colina, o autor cita condições favoráveis para as rodovias como abundância de tangentes, rampas suaves, baixos volumes de aterro e corte. Além disso, solos laterizados característicos das regiões tropicais e subtropicais possuem bom comportamento geotécnico: pouca absorção de água, trabalhabilidade, capacidade de suporte, entre outros. Em regiões planas, os maiores problemas citados pelo autor são o grande volume de aterro necessário e solos com pouca resistência, alta compressibilidade, o que leva a problemas de estabilidade de aterros e a recalques. Em regiões montanhosas, o autor vê um cenário mais crítico do ponto de vista geotécnico. As condições topográficas, litológicas, climáticas, pedológicas, além de solos coluvionares e instabilidades naturais criam um cenário propício à ocorrência de escorregamentos.

Lopes (1998) aponta como o arcabouço litológico afeta a estabilidade das rodovias, principalmente em termos de movimentos de taludes e de processos erosivos. Dessa forma, rochas com grãos finos, baixa permeabilidade e baixos coeficientes de atrito favorecem o movimento de massas. Enquanto processos erosivos são facilitados por materiais arenosos.

Durante a implantação e operação da rodovia, escorregamentos, quedas de blocos ou detritos, rastejos estão sujeitos a ocorrerem principalmente na fase de movimentação de solo e rocha. O fator preponderante é a remoção de materiais que estabilizavam a encosta e a alteração da geometria. Entretanto obras de contenção, drenagem e proteção superficial podem retardar ou reduzir drasticamente a possibilidade de ocorrência desses fenômenos (FORNASARI FILHO *et al.*, 1992).

Projetos inadequados e falta de conhecimento do meio físico tornam mais prováveis a ocorrência de fenômenos geológicos-geotécnicos. Estes fenômenos ocorrem tanto em solos como em rochas e causam diversos tipos de instabilidades agravadas se não houver manutenção da obra (RODRIGUES e LOPES, 1998).

3.2.2. Movimentos de Massa

Para compreender melhor o fenômeno de movimento de massas em rodovias, é necessário verificar os diferentes tipos existentes e suas características.

Gaberti e Robaina (2017) descrevem movimentos de massa e escorregamentos como:

“Os movimentos de massa são um dos principais processos geomorfológicos responsáveis pela evolução do relevo, movimentando e remobilizando fragmentos de solo e rocha ao longo das encostas. Os escorregamentos (landslides) são movimentos gravitacionais rápidos de curta duração, com volume e superfície de ruptura bem definidos, onde o material desprendido é jogado para fora da encosta, tendo como resultado, geralmente feições longas, como cicatrizes, podendo assumir geometria rotacional ou translacional” (GABERTI E ROBAINA, 2017, p.2)

Uma outra definição apresentada por Tominaga *et al.* (2009). fornece uma outra perspectiva do movimento de massa:

“Movimento de massa é o movimento do solo, rocha e/ou vegetação ao longo da vertente sob a ação direta da gravidade. A contribuição de outro meio, como água ou gelo se dá pela redução da resistência dos materiais de vertente e/ou pela indução do comportamento plástico e fluido dos solos.” (TOMINAGA *et al.*, 2009, p.27)

Além disso, é necessário conhecer os processos para poder adotar medidas de prevenção. Carvalho *et al.* (2007) adotam perguntas básicas para o gerenciamento de riscos.

- i) O que e como ocorre? Identificação da tipologia dos processos;
- ii) Onde ocorrem os problemas? Mapeamento das áreas de risco;
- iii) Quando ocorrem os problemas? Correlação com condições hidrometeorológicas adversas, monitoramento;
- iv) Que fazer? Medidas estruturais e não-estruturais;
- v) Quem irá fazer? Responsáveis pela adoção de medidas. (CARVALHO *et al.*, 2007, p. 17)

Entretanto, categorizar os movimentos de massa é complexo, porque como foi visto e de acordo com Lopes (2007, p. 20): “As classificações dos movimentos de massa são complexas, pois há uma grande variedade de materiais e processos envolvidos.” Dentre os principais parâmetros para as classificações, ela cita a velocidade e mecanismo de movimento, propriedades dos materiais, modo de deformação, geometria do movimento e quantidade de água.

No mesmo sentido, Carvalho *et al.* (2007) reconhecem que os termos escorregamentos ou deslizamentos fazem referência a mais de um tipo de movimentos de massas, seja de solo, rocha ou detrito, por meio da ação gravitacional e da infiltração da água, principalmente de chuva.

Varnes (1978) reconhece igualmente a diversidade de maneiras de classificação de movimentos de encostas e a grande quantidade de critérios possíveis de serem adotados. Segundo o autor, os critérios utilizados para esta classificação foram o tipo de movimento e de material, taxa de movimentação, geometria da área de falha e depósito residual, idade, causas, atividade atual, entre outros. A escolha dos critérios é feita segundo o objetivo da classificação. Este pode ser reconhecimento, controle, correção, ou ainda para evitar a ocorrência. Em sua classificação, Varnes (1978), utiliza o tipo de movimento como critério principal e o tipo de material como critério secundário.

Tabela 3.1: Classificação dos movimentos de massa (Varnes, 1978)

| Tipos de movimentos | | | Tipos de materiais | | |
|------------------------|---------------|---|--------------------------------|------------------------------------|--------------------------------|
| | | | Rocha | Solos de engenharia | |
| | | | | Solos predominantemente grosseiros | Solos predominantemente finos |
| Quedas | | Queda de rocha | Queda de detritos | Queda de terra | |
| Tombamentos | | Tombamento de rocha | Tombamento de detritos | Tombamento de terra | |
| Deslizamento | Rotacional | Poucas unidades | Queda de rocha | Queda de detritos | Queda de terra |
| | Translacional | | Deslizamento de bloco de rocha | Deslizamento de bloco de detritos | Deslizamento de bloco de terra |
| | | Várias unidades | Deslizamento de rocha | Deslizamento de detritos | Deslizamento de terra |
| Espalhamentos laterais | | Espalhamento de rocha | Espalhamento de detritos | Espalhamento de terra | |
| Corrida | | Rastejo profundo | corrida de detritos | corrida de terra | |
| | | | Rastejo de solo | | |
| Complexos | | Combinação de dois ou mais tipos principais de movimentos | | | |

A primeira classificação brasileira elaborada por Freire (1965, *apud* Lopes, 2007) considerou, em primeiro lugar, os tipos de descontinuidades relacionadas aos

escorregamentos, em seguida, as propriedades do relevo e a forma da massa movimentada e da superfície em que ocorre o deslizamento. Por fim, foi considerada ainda a causa dos deslocamentos em sua classificação.

Tabela 3.2: Classificação dos movimentos de terra, segundo Freire (1965, apud. Lopes, A., 2007)

| Tipo fundamental | | Sub-Tipo | | Classes principais | |
|------------------|--|--------------------------------|---------------------|---|--|
| Escoamentos | Consistindo em deformação ou movimento contínuo com ou sem superfície definitiva de escorregamento | Rastejo Reptação | Escoamento plástico | Rastejo de solo | |
| | | | | Rastejo de tálus | |
| | | | | Rastejo de rocha | |
| | | | | Solifluxão | |
| | | | | Rastejo de detritos | |
| | | | | Geleiras | |
| | | Corridas | Escoamento líquido | Corrida de terra | |
| | | | | Corrida de areia ou silte | |
| | | | | Corrida de lama | |
| | | | | Avalanche de detritos | |
| Escorregamento | Consistindo em deslocamento finito ao longo da superfície de movimento ou deformação | Escorregamentos rotacionais | | Escorregamento de taludes | |
| | | Escorregamentos translacionais | | Escorregamento de base | |
| | | | | Rotura do solo ou fundação | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| Subsidência | Consiste em deslocamento finito ou deformação continua vertical | Subsidência | | Carreamento de grãos | |
| | | | | Dissolução camadas inferiores cavernas | |
| | | | | Deformação de estratos inferiores | |
| | | | | Rotura de estratos inferiores | |
| | | | | Retirada do suporte lateral | |
| | | Recalques | | Consolidação | |
| | | | | Compactação | |
| | | Desabamentos | | Rotura de camada | |
| | | | | Subescavação | |
| | | | | Retirada do suporte lateral | |
| 4 | | | | Formas de transição ou termos de passagem | |
| 5 | | | | Movimentos de massa complexos | |

Em sua metodologia de mapeamento de riscos, Carvalho *et al.* (2007) utilizam a classificação de Augusto Filho (1992, *apud*. CARVALHO *et al.*, 2007). De acordo com essa classificação, os movimentos de terra são agrupados em quatro grupos: rastejos, escorregamentos, quedas e corridas. Eles são em seguida caracterizados.

Tabela 3.3: Principais movimentos de massa (AUGUSTO FILHO, 1992 *apud*. CARVALHO *et al.*, 2007)

| Processos | Característica do movimento do material e da geometria |
|--------------------------|--|
| Rastejo (Creep) | Vários planos de deslocamento (internos) |
| | velocidades muito baixas a baixas (cm/ano) e decrescentes com a profundidade |
| | movimentos constantes, sazonais ou intermitentes |
| | solo, depósitos, rocha alterada/fraturada |
| | geometria indefinida |
| Escorregamentos (Slides) | poucos planos de deslocamento (externos) |
| | velocidades médias (m/h) a altas (m/s) |
| | pequenos a grandes volumes de material |
| | geometria e materiais variáveis |
| | PLANARES: solos poucos espessos, solos e rochas com um plano de fraqueza |
| | CIRCULARES: solos espessos homogêneos e rochas muito fraturadas |
| Quedas (Falls) | EM CUNHA: solos e rochas com dois planos de fraqueza |
| | sem planos de deslocamento |
| | movimento tipo queda livre ou em plano inclinado |
| | velocidades muito altas (vários m/s) |
| | material rochoso |
| | pequenos a médios volumes |
| | geometria variável: lascas, placas, blocos, etc. |
| Corridas (Flows) | ROLAMENTO DE MATACÃO |
| | TOMBAMENTO |
| | muitas superfícies de deslocamento (internas e externas à massa em movimentação) |
| | movimento semelhante ao de um líquido viscoso |
| | desenvolvimento ao longo das drenagens |
| | velocidades médias a altas |
| | mobilização de solo, rocha, detritos e água |
| | grandes volumes de material |
| | extenso raio de alcance, mesmo em áreas planas |

Rastejo diferencia-se dos outros movimentos de massa por ser lento. Ele tem a propriedade de ocorrer seguindo uma deformação plástica, que resulta na falta de uma superfície de ruptura bem definida, ele desloca também um grande volume de material. Ele pode ocorrer na superfície do solo, na transição solo - rocha ou na rocha em grandes profundidades. Ele se caracteriza por não possuir um plano de ruptura definido e gerar trincas no terreno que crescem lentamente ao longo do tempo. O processo pode ser acelerado pela ação do homem com a realização de cortes em sua base (FORNASARI FILHO *et al.*, 1992) (CARVALHO *et al.*, 2007).

Fornasari Filho *et al.* (1992) realizaram uma caracterização dos processos do meio físico que foi constituída e dividida em elementos interativos do processo, fatores condicionantes e parâmetros, assim como em essenciais e reguladores. Desse modo, eles identificaram como parâmetros essenciais do processo de rastejo: a coesão, o teor de umidade, trincas, fissuras, curva tensão deformação, granulometria, composição mineralógica, plasticidade, índice de vazios, grau de declive do terreno e comprimento do declive. Como parâmetros reguladores, eles citam os padrões pluviométricos, duração, frequência e intensidade e a oscilação térmica, assim como a ocorrência de outros fenômenos como escorregamentos e escoamento de água.

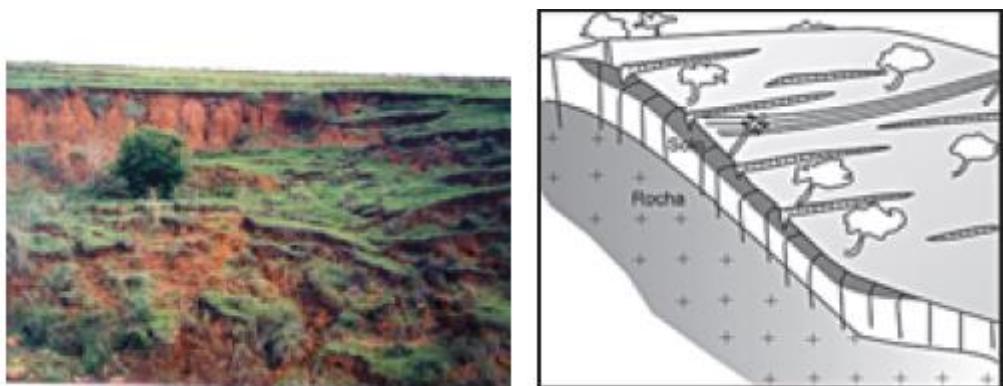


Figura 3.1: Indicação de processo de rastejo e perfil esquemático do processo de rastejo
Fonte: Carvalho *et al.*(2007)

Os deslizamentos ou escorregamentos se diferenciam dos rastejos por possuírem superfície de ruptura definida e por serem rápidos. Eles ocorrem principalmente em função da precipitação e acontecem em solo, rocha ou depósitos. Os volumes deslocados podem ser identificados com certa facilidade. Eles podem ser subdivididos em deslizamentos planares

ou translacionais, circulares, em cunha e os induzidos, de acordo com a geometria, mecanismo de ruptura e tipo de material (CARVALHO *et al.*, 2007).

O deslizamento planar ou translacional ocorre em vertentes com altas declividades e solos pouco desenvolvidos ou em planos de fraqueza do solo. Os deslizamentos circulares acontecem a partir de uma combinação de rupturas e possuem superfícies de deslizamento curvas. Elas ocorrem em camadas de solos mais espessas, em rochas sedimentares ou cristalinas muito fraturadas. Os deslizamentos em cunha se originam da interseção de dois planos de fraqueza. Taludes que sofreram processos erosivos ou foram afetados por deslizamentos próximos se tornam mais suscetíveis a deslizamentos em cunha. Os deslizamentos induzidos são causados pela própria ação do homem. Esta é geralmente a retirada de vegetação, cortes e aterros mal executados e concentração de águas pluviais (CARVALHO *et al.*, 2007).

Fornasari *et al.* (1992) relatam igualmente a velocidade do movimento, o volume bem definido e o deslocamento do centro de gravidade para baixo e para fora do talude como características dos escorregamentos. Eles destacam o papel da água como fator facilitador do processo. Ao aumentar o grau de saturação, ela reduz as tensões capilares e as ligações feitas por substâncias cimentantes solúveis. Além disso, ela pode se infiltrar em juntas e descontinuidades e aplicar tensões hidrostáticas, o que contribui para a instabilidade do talude. A água afeta também a estabilidade do talude por meio de processos erosivos, que alteram a geometria do local (FORNASARI FILHO *et al.*, 1992).

Foi realizada ainda uma classificação do processo de escorregamento em elementos interativos, fatores condicionantes e parâmetros condicionantes. Destes se destacam como elementos essenciais e parâmetros condicionantes: a coesão, o atrito interno, o teor de umidade, a altitude das estruturas e a inclinação e altura do talude, como elementos reguladores e parâmetros condicionantes: as características pluviométricas, com duração, intensidade e frequência, períodos de oscilação térmica, tipo de vegetação e cobertura vegetal (FORNASARI FILHO *et al.*, 1992).

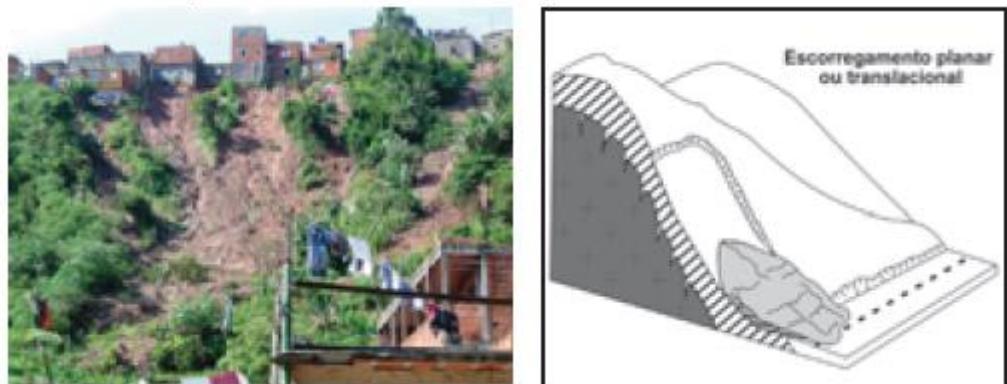


Figura 3.2: Deslizamentos planares induzidos pela ocupação e perfil esquemático dos deslizamentos planares.

Fonte: Carvalho *et al.* (2007)

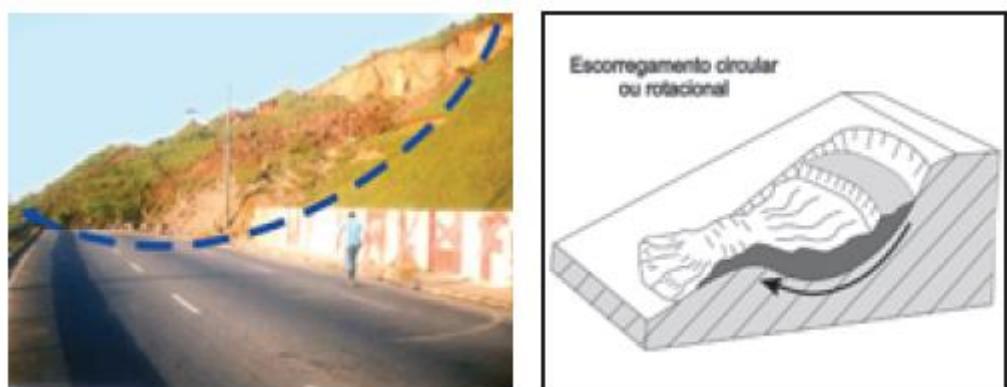


Figura 3.3: Deslizamento circular ou rotacional e perfil esquemático do deslizamento circular ou rotacional.

Fonte: Carvalho *et al.* (2007)

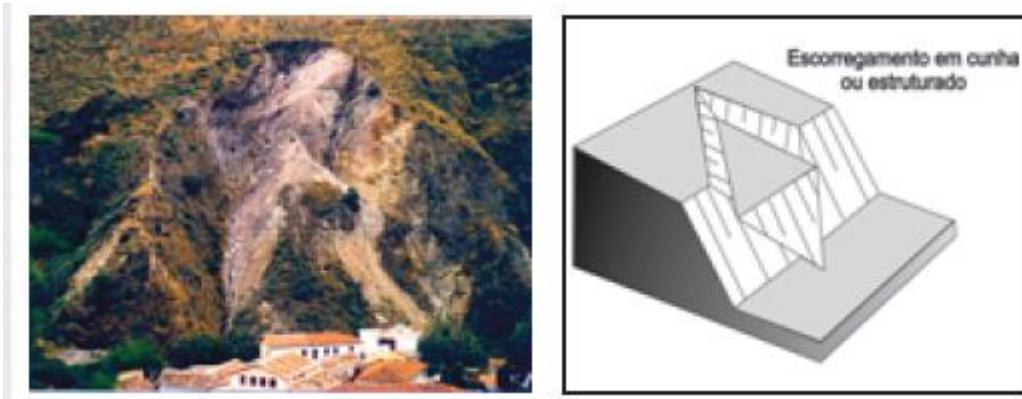


Figura 3.4: Deslizamento em cunha e perfil esquemático de um deslizamento em cunha

Fonte: Carvalho *et al.* (2007)

As quedas designam um movimento muito rápido de um bloco ou lasca de rocha em queda livre decorrente da ação gravitacional. As quedas ocorrem em locais com afloramentos

rochosos e encostas com grande declividade e taludes escavados. O destacamento da rocha é causado em rochas fraturadas principalmente pela subpressão de água nas descontinuidades do maciço rochoso, penetração de raízes e vibrações, decorrentes de atividades humanas (CARVALHO *et al.*, 2007).

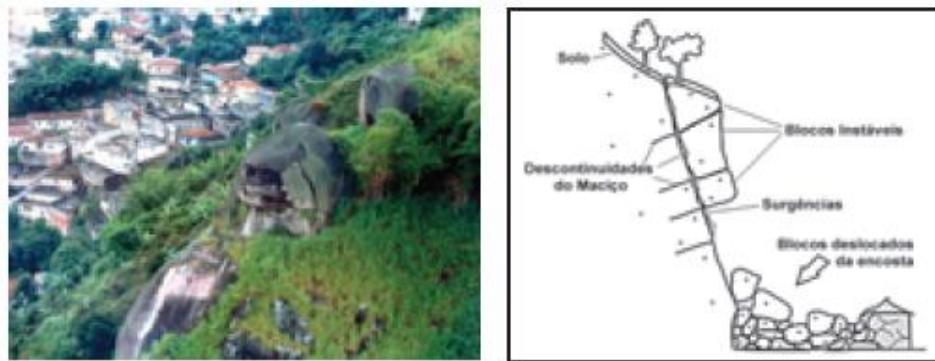


Figura 3.5: Área de risco de processos de queda de blocos rochosos e perfil esquemático de queda de blocos
Fonte: Carvalho *et al.* (2007)

Os tombamentos acontecem também em afloramentos rochosos quando sujeitos a descontinuidades verticais. Eles são movimentos mais lentos do que as quedas e são gerados pela alteração da geometria do talude por causa de cortes (CARVALHO *et al.*, 2007).

O rolamento de blocos é comum em locais com rochas graníticas ou onde há matacões, isolados e expostos na superfície. O rolamento se inicia quando o seu apoio é removido, pela ação natural da erosão da água ou remoção do apoio decorrente da escavação efetuada pelo homem (CARVALHO *et al.*, 2007).



Figura 3.6: Situação de risco de rolamento de bloco rochoso e perfil esquemático de rolamento de bloco rochoso.
Fonte: Carvalho *et al.* (2007)

As corridas de massas são eventos excepcionais decorrentes de uma precipitação muito intensa e incomum. Elas surgem nas encostas e deslocam uma grande quantidade de material. Eles possuem uma maior capacidade de transportar materiais do que os deslizamentos e, desse modo, são capazes de gerar consequências muito mais graves em distâncias muito maiores (CARVALHO *et al.*, 2007).

Para Fornasari Filho *et al* (1992), a corrida de massa é: “a forma rápida de escoamento de uma massa de solo ou de solo e rocha, onde sua forma de deslocamento lembra a de um líquido viscoso, com deformações internas e inúmeros planos de cisalhamento”. Eles ressaltam ainda viscosidade da matriz deslocada composta por água, materiais finos como argila e silte e materiais mais grossos como seixo e até mesmo matacões. Como fatores condicionantes do processo, eles identificaram como propriedades intrínsecas dos materiais: o coeficiente de permeabilidade, o grau de saturação, a coesão, o atrito interno, e a granulometria, como propriedades extrínsecas: o grau de suscetibilidade a escorregamentos da encosta, a declividade, volume de depósitos de drenagens e geometria da bacia drenada, como elementos reguladores há ainda os padrões sazonais de pluviosidade com intensidade, duração e frequência próprios e de alteração da temperatura.

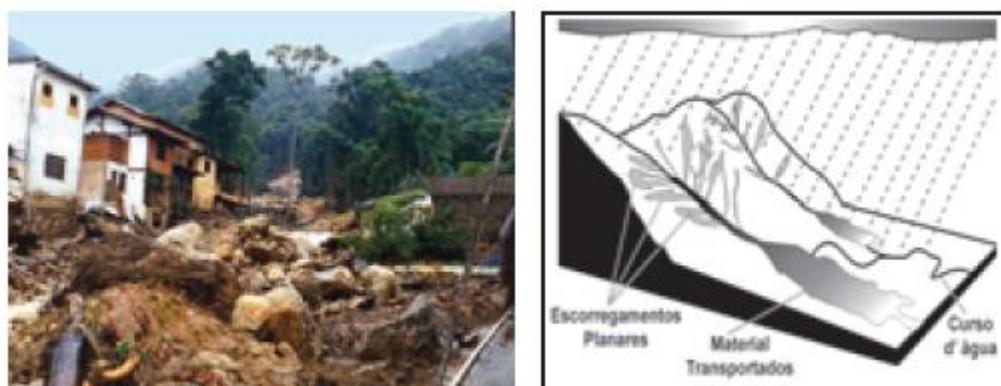


Figura 3.7: Acidente associado ao processo do tipo corrida e perfil esquemático de processos do tipo corrida.

Fonte: Carvalho *et al.* (2007)

Uma forma de classificar as causas dos deslizamentos é fornecida por Cruden e Varnes (1996). Eles classificam as causas como geológicas, morfológicas, físicas e humanas. A classificação possui características semelhantes à de Carvalho *et al.*, mas é mais específica com relação ao estado dos materiais e ao uso do solo.

Tabela 3.4: Lista das causas de movimentos de massa (CRUDEN; VARNES, 1996, adaptado SILVEIRA, 2016)

| Causas geológicas | Causas morfológicas | Causas físicas | Causas humanas |
|---|--|---|-----------------------------------|
| materiais fracos | levantamento tectônico ou vulcânico | chuvas intensas | escavações de taludes |
| materiais sensíveis | alívio por degelo | derretimento rápido de neve | sobrecarga no talude ou na crista |
| materiais intemperizados | erosão fluvial no pé do talude | precipitações excepcionalmente prolongadas | rebaixamento (reservatórios) |
| materiais fissurados ou fraturados | erosão glacial no pé do talude | Terremotos | irrigação |
| orientação desfavorável de descontinuidades (acamamento, xistosidade, etc.) | erosão nas margens laterais | erupções vulcânicas | mineração |
| orientação desfavorável de descontinuidades estruturais (falhas, contatos, inconformidades, etc.) | erosão subterrânea (Solução e piping) | descongelamento | vibração artificial |
| contraste de permeabilidade | deposição de cargas no talude ou na crista | intemperismo por congelamento e descongelamento | vazamento de água |
| contraste de rigidez (materiais densos, rígidos sobre materiais plásticos) | remoção da vegetação (fogo, seca) | intemperismo por expansão e retração | |

Carvalho *et al* (2007) elencam também os principais condicionantes e as causas para os deslizamentos. Eles são divididos em condicionantes naturais e antrópicos e dentro dos naturais há uma subdivisão entre os agentes característicos do meio físico que predispõe o talude para ocorrência de deslizamento e os agentes efetivos que desencadeiam o processo.

Algumas vezes o mesmo fenômeno pode estar em mais de uma categoria, pois ele pode ter diversas causas.

Tabela 3.5: Condicionantes e causas para os deslizamentos (Carvalho *et al*, 2007, adaptado)

| | | Agentes predisponentes |
|------------|--|--|
| | | Comportamento das rochas |
| | | Perfil e espessura do solo |
| | | Resistência da rocha ao intemperismo |
| | | Clima e hidrologia |
| | | Ação de intemperismo |
| | | Vegetação natural |
| | | Agentes efetivos |
| Naturais | Preparatório | pluviosidade |
| | | erosão pela água ou pelo vento |
| | | congelamento e degelo |
| | | variação de temperatura |
| | | umidade |
| | | ação química |
| | | ação de fontes e mananciais |
| | | oscilação do nível do lago e mananciais |
| | Imediatos | desflorestamento |
| | | precipitação intensa |
| | | vibração |
| | | fusão do gelo e neve |
| | | erosão, terremoto |
| Antrópicas | Características intrínsecas dos maciços naturais | ondas |
| | | rocha ou solo |
| | | cobertura vegetal |
| | | ação da água (saturação, elevação do lençol freático, pressões neutras, distribuição da chuva no tempo) |
| | | processos de alteração da rocha |
| | | erosão do material |
| | | Remoção da cobertura vegetal |
| | Má execução de cortes, aterros e patamares | Lançamento e concentração de águas pluviais |
| | | Má execução de cortes, aterros e patamares |
| | | Retirada de solo superficial |
| | Obstrução da drenagem natural | |

3.2.3. Erosão

Além desses fatores, Ridente Júnior (2008) cita também os impactos socioambientais que ocorrem em decorrência da implantação de uma rodovia. Entre os impactos mencionados estão: o desmatamento, exposição do solo, escavação, cortes e aterros, obras de arte, desvio das drenagens naturais e interferência nos habitats dos animais e das pessoas nas margens da rodovia.

Ridente Júnior (2008) aborda principalmente a questão dos processos erosivos, pois segundo ele, são um dos principais motivos para a degradação ambiental em torno das rodovias em operação e a sua relação com os aspectos geológicos, geomorfológicos, pedológicos e geotécnicos.

A erosão é caracterizada como um processo do meio físico decorrente de parâmetros como a erodibilidade identificada com a estrutura, textura, e permeabilidade do solo, o comprimento e o grau de declive do terreno e a densidade vegetal, uso dos solos, manejo e conservação. Os processos que regulam o fenômeno erosivo são a pluviosidade e a erosividade, assim como os escoamentos superficiais e subsuperficiais (FORNASARI FILHO *et al.*, 1992).

Giannini e Melo (2009) descrevem o processo de erosão como a retirada sistemática de grãos e partículas do solo. Esse fenômeno acontece predominantemente em relevos mais íngremes, mas pode igualmente existir com caráter intermitente na serra e na planície. Nestes ele varia entre períodos de transporte rápido e alta energia com períodos de transporte lento e arraste ou retenção. A duração e a intensidade desse processo seguem a declividade do relevo e as condições climáticas.

Segundo Guerra (1966, p.148), erosão é “a destruição das saliências ou reentrâncias do relevo, tendendo a um nivelamento ou colmatagem, no caso dos litorais, de enseadas, de baías e depressões”. Ele aborda a erosão como um processo de modificação do terreno ligado, porém separado no espaço pelo processo de sedimentação. Ele distingue o processo de erosão em cinco classes: acelerada, elementar, eólica, fluvial, glaciária, marinha e pluvial.

Winge *et al.* (2018) trata a erosão como um evento que reduz a superfície terrestre. Rochas, solos e vegetação sofrem a ação de agentes erosivos, chuva, rio, vento, gelo, maré ou ondas.

O material erodido é retirado e disperso pela atuação da força da gravidade e se acumula em locais favoráveis.

Christofoletti (1980) descreve o processo erosivo em duas etapas: a ação das gotas da chuva e o transporte pluvial. O impacto das gotas de chuva sobre o solo, provoca o arrancamento e o deslocamento dos grãos em função da energia cinética delas. A partícula de solo é arremessada, em função do impacto da chuva para todas as direções. Em relevos inclinados, o deslocamento para jusante se torna maior, pois a partícula percorre distâncias maiores quando arremessadas para jusante. Os grãos mais finos estão sujeitos a serem transportados por distâncias maiores.

O transporte pluvial é a fase mais importante. Ele ocorre quando a quantidade de água precipitada é maior do que a velocidade de infiltração. A partir desse momento, os filetes de água formados nas irregularidades da superfície crescem e se tornam escoamentos concentrados. O fluxo transporta os grãos soltos pelo impacto da chuva, as partículas finas por suspensão e as mais grossas por arrastamento. (CHRISTOFOLETTI, 1980)

Lopes (2007, p. 28) define a erosão como: “um processo natural de desagregação, decomposição, transporte e deposição de materiais de rochas e solos que vem agindo sobre a superfície terrestre desde os seus princípios”. Apesar de ser um processo natural, ele destaca ainda a ação do homem como acelerador do processo de erosão e lista como consequências: “a perda de solos férteis, a poluição da água, o assoreamento dos cursos d’água e reservatórios e a degradação e redução da produtividade global dos ecossistemas terrestres e aquáticos”. (LOPES, 2007, p. 28)

Valle Junior (2008) destaca igualmente ação do homem na aceleração da erosão. Para ele, a erosão é caracterizada pela propriedade de retirada, transporte e deposição do solo pelo vento ou pela água. O homem atua no meio ambiente ao desequilibrar os fatores que contribuem para a erosão. Ele cita como consequência o assoreamento, a poluição e a eutrofização de águas superficiais.

Do mesmo modo, Fernandes e Cerri (2011) observaram o aumento do processo erosivo decorrente da ação do homem. Eles identificaram em sua área de estudo a deterioração das cabeceiras de drenagem como consequência de um processo erosivo intenso. Este processo se tornou ainda mais importante com a remoção da vegetação causado pelo avanço da agricultura e pastagem.

Com relação às causas do processo erosivo, Ridente Júnior (2008, p.8) cita, “além de causas naturais, tais como: perfil de alteração dos solos, relevo, clima, pluviometria, etc.”, movimentos de terra, sistema de drenagens ineficientes, falta de cobertura vegetal e áreas que serviram de apoio à obra.

Tominaga *et al.* (2009) destacam que o processo erosivo é mais intenso nas regiões com climas tropicais e índices pluviométricos elevados e concentração de chuvas. Além disso, eles também citam a remoção da vegetação para a agricultura, como fator intensificador.

A remoção da cobertura vegetal é um fator facilitador significativo do processo de erosão. O desenvolvimento de áreas para a agropecuária de modo desordenado substituiu a vegetação nativa por áreas de pastos e plantações de grãos. Desse modo, ocorreu um aumento do processo erosivo, notadamente nas beiras de córregos com declividades acima de 20% (vinte porcento). O carreamento de partículas de solo para o rio acarretou no assoreamento destes e na diminuição do potencial hidráulico da bacia (Miranda, 2005).

O processo erosivo pode ser dividido em dois tipos, quando atribuída ao escoamento de água superficial. O primeiro é a erosão laminar, a partir de escoamento difuso e o segundo é o escoamento linear, gerado pela concentração de água, que pode evoluir até se tornar ravinias. Uma outra forma de erosão é a interna, ou piping, decorrente do escoamento subsuperficial que pode gerar voçorocas (SANTORO, 2009).

De acordo com Giannini e Melo (2009), as voçorocas são feições erosivas altamente destrutivas que se ampliam rapidamente e põem em risco campos, solos cultivados e áreas habitadas. Elas se originam em sulcos ou ravinias formados pela erosão linear. Sulcos e ravinias são gerados por fluxos concentrados de escoamento superficial de água. Quando a remoção do solo atinge o lençol freático, o fluxo de água subsuperficial se torna o agente erosivo preponderante e inicia o processo de voçorocamento.

De acordo com Fornasari Filho *et al.* (1992), a implantação de uma rodovia gera impactos significativo na rede de drenagem natural. Ela altera o escoamento da água na superfície e na subsuperfície e aumenta os processos erosivos, além de poder facilitar a ocorrência de inundações.

A construção de uma rodovia envolve movimentar grandes quantidades de solo e rocha. Isso gera uma alteração do relevo e do escoamento da água. O escoamento da água superficial é

afetado pela transformação do relevo e pode ser intensificado, reduzido, concentrado e dispersado. Essa mudança no escoamento superficial interage com outros processos como erosão, escorregamentos, movimento de águas de subsuperfície e inundação dentre outros. O escoamento subsuperficial também é afetado pela movimentação de camadas e altera as condições de infiltração, escoamento subterrâneo e capilaridade do solo. A transformação gerada na rede de drenagem afeta a erosão do solo. A erosão retira o solo e pode produzir ravinas, voçorocas, entre outros fenômenos. (FORNASARI FILHO *et al.*, 1992).

A partir de sua determinação dos processos do meio físico, Fornasari *et al.* (1992) identificaram os elementos essenciais atuantes no processo de escoamento de água superficial. Foram catalogados a conformação topográfica da bacia de captação, definida pela área de captação, comprimento e graus de declives, quantidade e dimensão das depressões, acumuladores e retentores de água, pelo tipo e área de cobertura vegetal, pelo coeficiente de permeabilidade do solo e pelo balanço hídrico. Os processos reguladores do fenômeno são a intensidade, duração e frequência das chuvas e os seus padrões sazonais, a movimentação de água de subsuperfície, a circulação de água no ar e a ocorrência de inundações (FORNASARI FILHO *et al.*, 1992).

Para Karmann (2009) os fatores que influenciam o escoamento superficial são a infiltração, a precipitação, a vegetação, a topografia, e a ocupação do solo. A infiltração corresponde à capacidade do solo de reter a água, o escoamento superficial só se inicia quando há esgotamento da capacidade do solo de absorver a água. Como precipitações intensas e concentradas no ano exigem mais da capacidade de infiltração do solo, elas geram maiores escoamentos superficiais, enquanto precipitações regularmente distribuídas são mais facilmente absorvidas ao longo do tempo. A cobertura vegetal aumenta a infiltração, ao abrir espaços no solo com as raízes, mas impede a água de atingir o solo por interceptação das gotas de chuva e evaporação. Relevos acentuados promovem o escoamento da água, por facilitar a ação gravitacional e o deslocamento da água e reduzir o tempo necessário para a infiltração. A ocupação do solo contribui com o escoamento da água na medida em que ela fomenta a impermeabilização do solo e a remoção da cobertura vegetal.

Do ponto de vista do transporte superficial de sedimentos, ele ocorre, em fluidos pouco viscoso como a água, conforme a atuação de forças em grãos individualizados. As características desse transporte, como velocidade, trajetória e modo de deslocamento estão associados à densidade, tamanho e rugosidade do grão. de forma individualizada quando há

uma alteração do equilíbrio de forças no grão. Dessa forma, o fluxo pode promover uma seleção das partículas de solo em função do tamanho, forma, densidade e peso. Os principais meios de deslocamento são a suspensão, a saltação, o arraste e o rolamento (GIANNINI; MELO, 2009).

O escoamento de água de subsuperfície, por outro lado, envolve um maior número de variáveis. Os elementos essenciais do processo são divididos em função dos materiais. No caso de solos, esses elementos são as propriedades físico hídricas dos solos, umidade, condutividade hidráulica, taxa de infiltração de água no solo, retenção de água no solo, textura, porosidade, capacidade de armazenamento de água no solo. Para rochas, os coeficientes hidrogeológicos de armazenamento, de infiltração, de retenção e de transmissividade, assim como o grau de faturamento possibilitam ou dificultam um maior escoamento subsuperficial. A composição mineralógica da água, pH e temperatura também são importantes. O processo é igualmente regulado pela pluviosidade, cobertura vegetal do local, escoamento superficial e circulação de gases no solo e na rocha (FORNASARI FILHO *et al.*, 1992).

Ao contrário do escoamento superficial, o escoamento subterrâneo é favorecido pela infiltração de água no solo. Mais especificamente a taxa de infiltração é maior em materiais porosos e permeáveis como solos, sedimentos arenosos e em rochas fraturadas. Ela é menor em argilas e rochas cristalinas pouco fraturadas. A porosidade é outro fator importante, pois ela é o volume disponível no solo para ser preenchido por água. Apesar de importantes, esses fatores não são suficientes para o escoamento subterrâneo. Uma outra propriedade do solo, a permeabilidade, é a que possibilita o deslocamento da água pelo solo e é o gradiente hidráulico, a diferença de pressão de água, que gera o escoamento (KARMANN, 2009).

3.3.RISCO E SUSCETIBILIDADE

3.3.1. Definições

A fim de melhorar a operabilidade das rodovias, de garantir a segurança, se adequar da melhor forma à Política Nacional de Transportes e evitar perdas financeiras, sociais e em vidas humanas, é necessário conhecer a suscetibilidade da rodovia a esses fenômenos e as suas consequências. Para isso, a análise da suscetibilidade e de risco desses fenômenos ocorrerem se tornam medidas essenciais. A complexidade desses fenômenos envolvem uma grande quantidade de parâmetros e propriedades dos solos, das rochas, do relevo e da

vegetação e podem ser difíceis de serem previstos com precisão, mas com a identificação das características geotécnicas e geomorfológicas de uma região, é possível realizar o estudo de suscetibilidade e de risco para escolher melhor locais para a instalação de uma rodovia ou para a execução de medidas de prevenção e correção de acidentes.

A seguir serão verificados os principais termos relacionados a risco e suscetibilidade, de acordo com a Agência de Coordenação das Nações Unidas para o Socorro em Desastres, UNDRO (1980), Cerri e Amaral (1998), Augusto Filho (2001, *apud*. Araújo 2004) e Carvalho *et al.* (2007).

Um evento é um fato que aconteceu em determinado momento e local com características próprias (CARVALHO *et al.*, 2007). Ele não é responsável por danos e perdas econômicas ou sociais. O acidente se distingue de um evento por gerar consequências sociais e econômicas (CERRI e AMARAL, 1998).

O conceito de perigo é estabelecido com base nas circunstâncias que podem causar acidentes. Perigo é uma situação ou fenômeno com capacidade de gerar uma consequência adversa (CARVALHO *et al.*, 2007). A UNDRO (1980) inclui no conceito de perigo a probabilidade de ocorrência e a localização espacial e temporal do fenômeno, além da possibilidade de ocasionar danos. Os danos são avaliados com relação a diversos elementos submetidos a eles, como pessoas, edifícios, obras de engenharia e atividades econômicas (UNDRO, 1980). O grau de dano de um elemento ou conjunto de elementos sujeitos a uma situação perigosa é caracterizado pela vulnerabilidade que pode ser avaliada em uma escala de 0 (sem perda) a 1 (perda total) (UNDRO, 1980).

A suscetibilidade se assemelha ao perigo com relação à possibilidade de ocorrência de um fenômeno. Entretanto, ela não leva em consideração as consequências desse fenômeno (CERRI e AMARAL, 1998). Carvalho *et al.* (2007) recomendam ainda a divisão da suscetibilidade em classes de possibilidade de ocorrência. A suscetibilidade pode ser determinada por métodos quantitativos ou qualitativos (FELL *et al.*, 2008).

Cerri e Amaral (1998) definem risco geológico como sendo: “uma situação de perigo, perda ou dano, ao homem e as suas propriedades, em razão da possibilidade de ocorrência de processos geológicos induzidos ou não” (CERRI e AMARAL, 1998, p. 301). O risco é determinado pelo produto da possibilidade de ocorrência de um evento pelas consequências potenciais. Carvalho *et al.* (2007) definem risco de maneira semelhante com a observação

da magnitude do fenômeno e a especificação das consequências econômicas e sociais em um elemento, grupo ou comunidade.

Dois pontos importantes no gerenciamento de riscos é a previsão e a prevenção. A previsão é necessária para localizar no tempo e no espaço os locais sujeitos a riscos. A prevenção possibilita a adoção de medidas para impedir um fenômeno ou, pelo menos, reduzir as consequências (CARVALHO *et al.*, 2007).

Augusto Filho (2001, *apud*. Araújo, 2004) divide risco em aceitável e tolerável e em individual e social:

- Risco aceitável: risco para o qual a convivência é aceitável e para qual o a sociedade não quer mais pagar pela sua redução.
- Risco tolerável: risco sob o qual aceita a convivência para a obtenção de um benefício, desde que controlado e com esperança de redução futura.
- Risco individual: risco de morte e/ou dano para um indivíduo que está exposto a condições de perigo.
- Risco de múltiplos risco danos ou mortes, cujas consequências, mortes, injúrias, perdas financeiras e ambientais, são suportáveis pela sociedade.

Castro *et al.* (2005) observam as diversas naturezas dos riscos. Eles distinguem riscos ambientais, sociais, tecnológicos, naturais, biológicos, entre outros. Eles afetam, por sua vez, a vida cotidiana com consequências na segurança, condições de trabalho e de habitação, transporte e na saúde.

3.3.2. Métodos para determinação da suscetibilidade e do risco a deslizamentos

No material de treinamento de equipes municipais para o mapeamento de riscos de deslizamentos de encostas e solapamentos de margens, Carvalho *et al.* (2007) abordam o controle de riscos geológicos e hidrológicos sob três aspectos:

- i) Eliminar /reduzir o risco:
 - (1) Agindo sobre o processo;
 - (2) Agindo sobre a consequência.

- ii) Evitar a formação de áreas de risco:
 - (1) Controle efetivo do uso do solo.
- iii) Conviver com os problemas:
 - (1) Planos preventivos de defesa Civil (CARVALHO *et al.*, 2007, p. 16).

O modelo de abordagem de enfrentamento de desastres naturais da UNDRO (1991) é baseado na prevenção e na preparação. As atividades de prevenção “compreendem os estudos da fenomenologia dos processos, da análise de risco e a formulação de métodos, técnicas e ações de prevenção de desastres.” (CARVALHO *et al.*, 2007, p. 18). As ações de preparação são destinadas a combater as consequências dos fenômenos, tem um caráter logístico e é realizado pela defesa civil.

A metodologia do programa inclui as seguintes etapas:

- i) Identificação dos riscos;
- ii) Análise dos riscos;
- iii) Medidas de prevenção;
- iv) Planejamento para situações de emergência;
- v) Informações públicas e treinamento (CARVALHO *et al.*, 2007, p. 19).

Essa metodologia é semelhante à fornecida por Fell *et al.* (2005). Para o autor, a gestão de riscos engloba a avaliação de risco e a análise de risco. A análise de risco corresponde à definição do escopo, à caracterização do perigo, à análise de frequência e à análise das consequências, com caracterização das consequências, análise das probabilidades e severidade dos danos. A partir disso, é feita a estimativa do risco, última etapa da análise de risco. Esta em conjunto com critérios de tolerância possibilitam a avaliação dos riscos. Por fim, com base na avaliação realizada e para obter a completa gestão de riscos, é feita a investigação das opções para a mitigação dos riscos, estabelecido um plano de controle que é implementado e revisado periodicamente.

Para a identificação dos riscos, é necessário entender o processo que gera uma situação de risco, as condições em que eles ocorrem, os elementos que o controlam e regulam e os que

estão sob risco. A análise de risco é feita a partir das informações coletadas nessa etapa e envolve o zoneamento ou setorização das áreas, quantificação relativa e/ou absoluta do risco, cadastramento de risco, carta de risco, hierarquização de risco, avaliação de possíveis cenários de acidentes. (CARVALHO *et al.*, 2007)

Essa visão de análise de risco vai de acordo com a de Augusto Filho (2001) *apud*. Araújo (2004). Para ele, análise de risco engloba: definição do escopo, identificação do perigo e a determinação do risco. Ele define análise de risco como: “O uso da informação disponível para estimar o risco para indivíduos ou populações, propriedades ou o ambiente” (AUGUSTO FILHO, 2001, *apud*. ARAÚJO, 2004, p. 29).

Alameddine (2009) considera processos semelhantes para sua proposta de gestão de risco. Na fase diagnóstico, ela considera a identificação das ameaças e riscos e da análise de risco. A identificação é composta pela ameaça: descrição do processo atuante, objeto: identificação dos elementos sob risco, áreas de risco: descrição dos elementos em risco, caracterização dos mesmos e sua localização. A análise de risco é vista como “os produtos da revisão ou execução do mapeamento de risco, necessários à identificação de fatores condicionantes, da intensidade, frequência, distribuição espacial das áreas suscetíveis aos processos e seus setores de risco” (ALAMEDDINE, 2009, p. 43).

O método apresentado pelo Carvalho *et al.* (2007) envolve uma classificação em quatro níveis de risco, a partir das condições geológicas-geotécnicas do local analisado, probabilidade de ocorrência de fenômenos e informações sociais. Os níveis são: baixo risco (R1), médio (R2), alto (R3) e muito alto (R4).

Esta classificação é feita em sete passos:

- i) Dados gerais de moradia;
- ii) Caracterização do local:
 - (1) Tipo de talude;
 - (2) Tipo de material;
 - (3) Presença de materiais;
 - (4) Inclinação da encosta;

(5) Distância da moradia ao topo ou base de taludes.

iii) Água:

- (1) Presença e origem da água.
- iv) Vegetação no talude e nas proximidades;
- v) Sinais de movimentação;
- vi) Tipos de processos de instabilização esperados ou ocorridos;
- vii) Determinação do grau de risco (CARVALHO *et al.*, 2007).

A metodologia de avaliação de riscos de Carvalho *et al.* (2007) é formulada para o ambiente urbano e de forma qualitativa. Muitas vezes é utilizada essa forma de avaliação de riscos, em detrimento de uma classificação quantitativa e de locais fora do ambiente urbano, apesar de poderem estar sujeitos, em alguns casos, a maiores ameaças (FELL *et al.*, 2008).

Fell *et al.* (2008) fornecem os seguintes métodos para a determinação da frequência de ocorrência de deslizamentos. Os registros históricos são o primeiro ponto. Eles necessitam, no entanto, uma série de dados e levantamentos contínuos ao longo de décadas para a obtenção de valores confiáveis. Uso de imagens de satélite ou fotografias aéreas são a base do segundo método. Estas podem oferecer a frequência pela identificação de deslizamentos ou pela alteração no relevo entre duas imagens tomadas em momentos distintos. Uma outra forma, é pela observação dos efeitos dos deslizamentos, como depósitos e alteração na vegetação. As características geomorfológicas, como trincas, cicatrizes e inclinações das estruturas também podem ser utilizadas. Por último, é possível utilizar correlações entre eventos desencadeadores, como chuvas fortes e terremotos, e a ocorrência de escorregamentos.

A determinação do tempo de ocorrência de deslizamentos pode necessitar de diferentes métodos. O uso de registros históricos é melhor empregado, com o uso de técnicas estatísticas, para pequenos deslizamentos recorrentes. Esse método, já apresenta maiores incertezas quanto a deslizamentos com longos tempos de retorno, para os quais é preciso fazer uma análise de antigos depósitos de escorregamentos (FELL *et al.* 2008).

Entretanto a elaboração de um modelo determinístico, apresenta uma série de dificuldades. Um número elevado de causas para os diferentes tipos de deslizamentos afeta a intensidade e a probabilidade de ocorrência de deslizamentos. Desse modo, a quantificação dos perigos existentes, tanto em sua amplitude, quanto frequência, requerem uma grande quantidade de dados e parâmetros muitas vezes limitados. A falta deles tornam os resultados aproximados. Atualmente existem métodos que relacionam a frequência dos deslizamentos com a queda de chuvas, eles necessitam, no entanto, de muitos dados de boa qualidade e de calibração prévia, dada a complexidade dos fenômenos geotécnicos (FELL *et al.* 2008).

A imprecisão dos dados é um dos grandes empecilhos para o estabelecimento de um método probabilístico de análise de deslizamentos. Alguns elementos como redes de água e esgoto, podem apresentar pouca imprecisão e baixa acurácia, enquanto a complexidade e falta de dados dos solos e das precipitações tornam quase impossível captar esses processos em sua totalidade e com acurácia (SIMÕES *et al.*, 2016).

Fell *et al.* (2008) ainda notam que o estabelecimento de uma probabilidade para os escorregamentos dada a geomorfologia do local ainda é subjetiva e aproximada. Os modelos que relacionam a precipitação com a ocorrência de deslizamentos indicam quando um escorregamento pode ocorrer em determinada área, mas não define o tipo.

Afim de evitar as dificuldades de obtenção de parâmetros, é possível utilizar outras ferramentas na modelagem de fenômenos naturais. A análise multivariada pode fornecer bons resultados nesse quesito (ARAÚJO, 2004).

Essa técnica busca quantificar a probabilidade de ocorrer um evento, a partir de eventos ocorridos e mapeados e atributos topográficos e/ou geológicos previamente estabelecidos. Estes atributos são em seguida sobrepostos aos eventos e entre si, para a obtenção de uma correlação. Araújo (2004) utiliza esse conceito com um método de análise espacial baseado no método bayesiano e análise estatística para avaliar a suscetibilidade a escorregamentos em determinada região e obtenção de mapas de probabilidade (ARAÚJO, 2004).

Como pontos positivos do modelo, Araújo (2004) destacam a objetividade, baseada nas ocorrências para estimar as probabilidades, a possibilidade de melhorar o modelo com novos dados e a grande versatilidade e melhor compreensão dos processos. Entretanto, ele exige independência condicional entre os dados e qualidade destes, difícil de serem obtidas.

A lógica Fuzzi foi utilizada em diversos trabalhos com resultados satisfatórios, ao possibilitar contornar as incertezas e a variabilidade espacial das propriedades do solo. Ela se mostrou uma ferramenta útil associada à geoestatística para a caracterização das condições geológicas, geomorfológicas e pluviométricas de uma região (SIMÕES *et al.*, 2016).

3.3.3. Métodos quantitativos para processos erosivos

Com relação ao processo erosivo, há modelos que descrevem melhor o seu comportamento. A Equação Universal de Perda de Solos é o mais utilizado para descrever a perda de solos dada a sua simplicidade e facilidade de uso. A equação é empírica foi proposta por Wischmeier e Smith (1978), após informações recolhidas durante meio século de estudos sobre erosão em todo os Estados Unidos. A equação fornece uma quantificação da erosão e possibilita o planejamento com base em uma previsão de solo transportado e limites aceitáveis. Entretanto, o modelo não atende à demanda de calcular a deposição e a erosão de voçoroca, de margem ou de leito de rio (WISCHMEIER; SMITH, 1978, BLOISE *et al.*, 2001).

A equação universal de perda de solo é descrita na equação 3.1

$$A = R * K * L * S * C * P \quad (3.1)$$

Em que: A é a perda de solo por área (t/ha); R é o fator de erosividade da chuva (MJ.mm/(ha.h)); K é o fator de erodibilidade do solo (t.h/(MJ.mm)); L é o fator de comprimento de rampa (adimensional); S é o fator de declividade (adimensional); C é o fator de uso do solo e manejo (adimensional) e P é o fator práticas conservacionistas.

Dessa forma, a fórmula apresenta a vantagem de ser linear e levar em consideração os principais fatores identificados como contribuintes para a erosão laminar como a meteorologia, a pedologia, a geomorfologia e parâmetros regionais. A fórmula é descrita originalmente em unidades britânicas, mas os próprios autores Wischmeier e Smith (1978) fornecem os coeficientes para a conversão. No entanto, Bloise *et al.* (2001) ressalta a necessidade de várias medições para a obter de bons parâmetros para os fatores da equação e conseguir valores quantitativos da erosão. De qualquer modo o método é útil para a análise qualitativa e identificação das áreas suscetíveis à erosão laminar. (BLOISE *et al.*, 2001)

Wischmeier e Smith (1978) identificaram que, contrariamente o que era acreditado, a erosão não é resultado apenas de intensas precipitações. A partir dos dados coletados, eles observaram que a perda de solo ocorria também em função de chuvas moderadas. Eles adotaram um parâmetro EI, com comportamento linear com relação à perda de solo. Esse parâmetro é definido como o produto entre a energia da tempestade pela máxima intensidade de chuva em trinta minutos. Eles perceberam que a energia, não seria um bom indicador para o potencial erosivo, pois uma chuva longa pode possuir a mesma energia curta, porém a capacidade erosiva da chuva aumenta com a intensidade. O fator I_{30} relaciona a energia à intensidade da chuva. O parâmetro EI, baseado em interação estatística, indicaria o modo como são combinados a energia e a intensidade para cada precipitação.

Wischmeier e Smith (1978) fornecem a relação entre energia e intensidade, de acordo com a equação 3.2:

$$E = 210 + 89 \log_{10} I \quad (3.2)$$

Em que: E é a energia cinética em ton.m/(ha.cm²) e I é a intensidade em cm/h.

Sendo a intensidade limitada em 7,6 cm/h, para a obtenção do parâmetro EI nas unidades corretas, é necessário dividir ainda por cem. O fator R é obtido com uma correlação com o índice de erosão de chuvas.

A erodibilidade do solo engloba as características do solo que o tornam mais facilmente erodíveis do que um outro tipo de solo sob as mesmas condições. Esse fator é geralmente obtido empiricamente, mas para solos com teor de silte e de areia fina menor do que 70%, é possível utilizar a seguinte fórmula:

$$K = \frac{* 2,1 * M^{1,14} * 10^{-4} * (12 - a) + 3,25(b - 2) + 2,5(c - 3)}{100} * 1,313 \quad (3.3)$$

Em que: M é (silte+areia fina) %*(100-argila%); a é o percentual de matéria orgânica; b é o código de estrutura do solo usado na classificação do solo e c é a classe de perfil de permeabilidade.

O fator topográfico é obtido pela fórmula:

$$LS = \left(\frac{\lambda}{22}\right)^m \cdot (65,42 \sin^2 \theta + 4,56 \sin \theta + 0,065) \quad (3.4)$$

Em que: λ é comprimento do talude (m); θ é o ângulo do talude e m é 0,5 para declividade maior ou igual a 5%, 0,4 para declividade entre 3,5 e 4,5%, 0,3 em taludes com 1 a 3 % de declividade e 0,2 em gradientes uniformes com menos de 1% de declividade.

O tipo de vegetação ou cultura sobre o solo e a forma como é gerida afeta o escoamento superficial e, logo, a erosão. Por isso, Wischmeier e Smith (1978) estabeleceram um fator de uso e manejo para diferenciar essas condições de um campo não cultivado. A erosão em um campo não cultivado poderia ser calculada pelo produto dos fatores anteriores, entretanto o resultado obtido experimentalmente indicou uma taxa de erosão bem menor. Wischmeier e Smith (1978) fornecem valores tabelados para tipos de culturas, áreas construídas, pastagens, florestas, entre outros.

Algumas medidas podem ser tomadas para reduzir a degradação do solo. Wischmeier e Smith (1978) fornecem igualmente dados tabelados para diferentes tipos de intervenções para a consideração de práticas que conservem o solo.

Outras metodologias utilizadas para o cálculo quantitativo da erosão são encontradas nos trabalhos de Neto e Souza (2006), Macêdo (2009), Pieri *et al.* (2007) e Tangestani (2006).

Neto e Souza (2006) utilizam uma metodologia baseada na quantidade de Césio-137. A metodologia se baseia na quantidade de Césio 137 em uma amostra no solo. O Césio é adsorvido fortemente pela argila, de modo que o seu transporte está associado ao da partícula de solo. A quantificação da erosão é realizada por meio da comparação de uma amostra a ser examinada com uma amostra padrão não perturbada. Valores diferentes entre as duas amostras indicam uma perda ou ganho de solo.

Macêdo (2009), emprega também o modelo do Césio-137 como metodologia para avaliação quantitativa da erosão. Além desse, ela faz uso igualmente do modelo de Wischmeier e Smith (1978), da equação universal de perda de solos, do modelo da Equação Universal de

Perda de Solos modificado, do modelo Morgan – Morgan – Finney. O modelo da modificação da Equação de Perda de Solos traz como novidade a estimativa do escoamento superficial e a taxa de escoamento de pico. Estes dois substituem do fator de erosividade no modelo original. O modelo de Morgan – Morgan – Finney foi uma tentativa de manter a simplicidade do modelo de Wischmeier e Smith (1978), mas com uma base física mais forte acrescida dos avanços científicos seguintes. Ele incorpora na sua versão mais recente o impacto da chuva, a altura da cobertura vegetal, a drenagem da água pelas folhas e o destacamento dos grãos de solo pelo escoamento. (MACÊDO, 2009)

Outros modelos utilizados para a quantificação da erosão são o *Water Erosion Prediction Project* (WEPP), o *Erosion Potencial Method* (EPM) e o *Pacific Southwest Interagency Comitee* (PSIAC). Pieri *et al.* (2007) empregam o modelo WEPP para simular os resultados obtidos em campo de escoamento e de erosão em uma região dos Apeninos, próximo de Bolonha. O modelo simula igualmente o transporte de sedimentos, o que não é feito pelo modelo de Wischmeier e Smith (1978).

Tangestani (2006) realiza uma comparação entre os modelos EPM e PSIAC em ambientes de Sistemas de Informações Geográficas (SIG). Ambos os modelos são baseados em fatores que quantificam os processos associados a perda de solos.

O modelo de erosão potencial avalia a erosão por meio da quantificação do transporte anual de sedimentos para uma área de captação. Ele engloba fatores, como a superfície geológica e tipo de solo, características topográficas, condições climáticas e uso do solo. (TANGESTANI, 2006)

O modelo PSIAC se fundamenta também no transporte de sedimentos, mas faz uso de alguns pontos representativos da área de captação. Ele necessita de um maior número de parâmetros, como geologia, solo, clima, escoamento, topografia, cobertura do solo, uso do solo, canais erosivos e erosão a montante. (TANGESTANI, 2006)

3.4.CARTAS GEOTÉCNICAS

3.4.1. Diferentes tipos de cartas geotécnicas

Fenômenos geotécnicos como erosão e movimentos de terra são fenômenos complexos que envolvem muitas variáveis. Essas variáveis possuem diferentes origens geomorfológicas, geológicas, topográficas ou até mesmo antrópicas. Elas estão presentes no ambiente de

formas diferenciadas no espaço. A combinação dessas características é que induz ou regula a ocorrência dos processos de erosão ou de deslocamento. Dessa forma, para a melhor compreensão desses fenômenos e da realização análise de risco e suscetibilidade, é necessário localizar eles no espaço. Com esse objetivo a cartografia disponibiliza diversas ferramentas para o auxílio dessas análises.

A abordagem da engenharia com relação aos escorregamentos focou muitas vezes em casos individuais e na proposta de soluções para as consequências. O uso de técnicas apropriadas zoneamento de instabilidade de encostas aumentou a conscientização de um planejamento eficiente como meio para redução de custos de construção e de manutenção de estruturas de engenharia (SOETERS; VAN WESTEN, 1996).

A importância e a necessidade das cartas geotécnicas se tornam cada vez mais reconhecidas. A Lei 12.608 de 2012, que institui a Política Nacional de Proteção e Defesa Civil, atribui à União, aos Estados, ao Distrito Federal e aos Municípios o dever de adotar medidas para a redução do risco de desastre (BRASIL, 2012).

Dentre as diretrizes da política estão o planejamento com base em pesquisas e estudos sobre áreas de risco e incidência de desastres no território nacional e a prioridade de ações preventivas. Com relação aos objetivos, Política Nacional de Defesa Civil promove a identificação e avaliação das ameaças, suscetibilidades e vulnerabilidades a desastres, de modo a evitar ou reduzir sua ocorrência, além de monitorar eventos meteorológicos, hidrológicos, geológicos, entre outros. Com relação à competência, é dever dos Estados e do Distrito Federal identificar e mapear as áreas de risco e realizar estudos de identificação de ameaças, suscetibilidades e vulnerabilidades, em articulação com a União e os Municípios. Aos Municípios cabe identificar e mapear as áreas de risco de desastre. A União deve auxiliar os Estados, o Distrito Federal e os Municípios e promover estudos referentes às causas e possibilidades de ocorrência de desastres (BRASIL, 2012).

Por fim a lei determina que os Municípios inclusos no cadastro nacional de municípios com áreas suscetíveis à ocorrência de deslizamentos de grande impacto, inundações bruscas ou processos geológicos ou hidrológicos devem realizar o mapeamento dessas áreas. Além disso, ela estabelece que o mapeamento e a identificação das áreas de risco levarão em conta as cartas geotécnicas (BRASIL, 2012).

Zuquette e Nakazawa (1998) apresentam tipos de cartas e mapas comuns para o uso durante a implantação de uma obra de engenharia civil. Além desta, eles podem também serem usados para o planejamento urbano, ambiental e territorial e para a conservação do meio ambiente. “Os termos mapa e carta referem-se aos documentos cartográficos que reúnem as informações pertinentes a um ou mais aspectos do meio ambiente (meio físico, meio biótico, meio antrópico” (ZUQUETTE; NAKAZAWA, 1998, p. 283).

Eles observam que muitas vezes os dois termos são tratados como sinônimos, entretanto eles distinguem mapa de carta pela interpretação dada aos dados. Para Zuquette e Nakazawa (1998), mapa é uma representação cartográfica de algum atributo ou informação do meio físico sem haver interpretação sobre eles. Carta, por outro lado, apresenta igualmente informações sobre o meio físico, que podem ser retiradas de mapas, mas possui também um objetivo específico, logo necessita de uma interpretação dos dados. Quando o mapa ou a carta abordam temas relativos à geologia de engenharia e à geotecnica, eles são chamados de mapa geotécnico ou carta geotécnica.

De acordo com Varnes (1974, p.1), mapas geotécnicos com finalidades no âmbito da engenharia necessitam: “para a sua preparação operações específicas de adição, seleção, generalização, e transformação de informação espacial.” Para Varnes (1974), essas informações englobam a litologia, estrutura das rochas e solos, hidrologia, geomorfologia e geologia.

Para Cerri (1990), a Carta Geotécnica visa igualmente a caracterização e representação dos diversos elementos do meio físico que interferem nas obras de engenharia. Para esse fim, elas são constituídas pela distribuição espacial dos diferentes tipos de solos e de rochas, pelas propriedades geológicas e geotécnicas destes, pelas formas de relevo e dinâmica dos principais processos atuantes, pelas alterações decorrentes da implantação de diferentes formas de uso e ocupação do solo e dos reflexos da ocorrência de processos nas formas de uso e ocupação.

De acordo com Cerri (1990), as cartas geotécnicas no Brasil podem ser divididas em quatro categorias:

- Cartas geotécnicas clássicas;
- Cartas de suscetibilidade;
- Cartas de risco; e

- Cartas de conflito de uso.

As cartas geotécnicas clássicas possuem como propriedades a divisão em unidades de análise, uso de ensaios de campo e mapas temáticos. A partir das informações recolhidas é feito compartimentação das informações geológicas geotécnicas. Essas informações são em seguidas comparadas com as informações de uso e ocupação do solo para a análise das condições do terreno (CERRI, 1990).

As cartas de suscetibilidade envolvem a análise de um processo geológico. Ela é realizada a partir de mapas temáticos em conjunto com mapas de uso e ocupação do solo, visto como possíveis intensificadores do processo (CERRI, 1990).

As cartas geotécnicas de suscetibilidade possibilitam a representação dos parâmetros de suscetibilidade da dinâmica superficial do meio físico. Elas são por esse motivo instrumentos fundamentais na gestão ambiental de obras rodoviárias, ao possibilitar a localização dos eventos e facilitar o planejamento e execução do empreendimento (FERNANDES e CERRI, 2011).

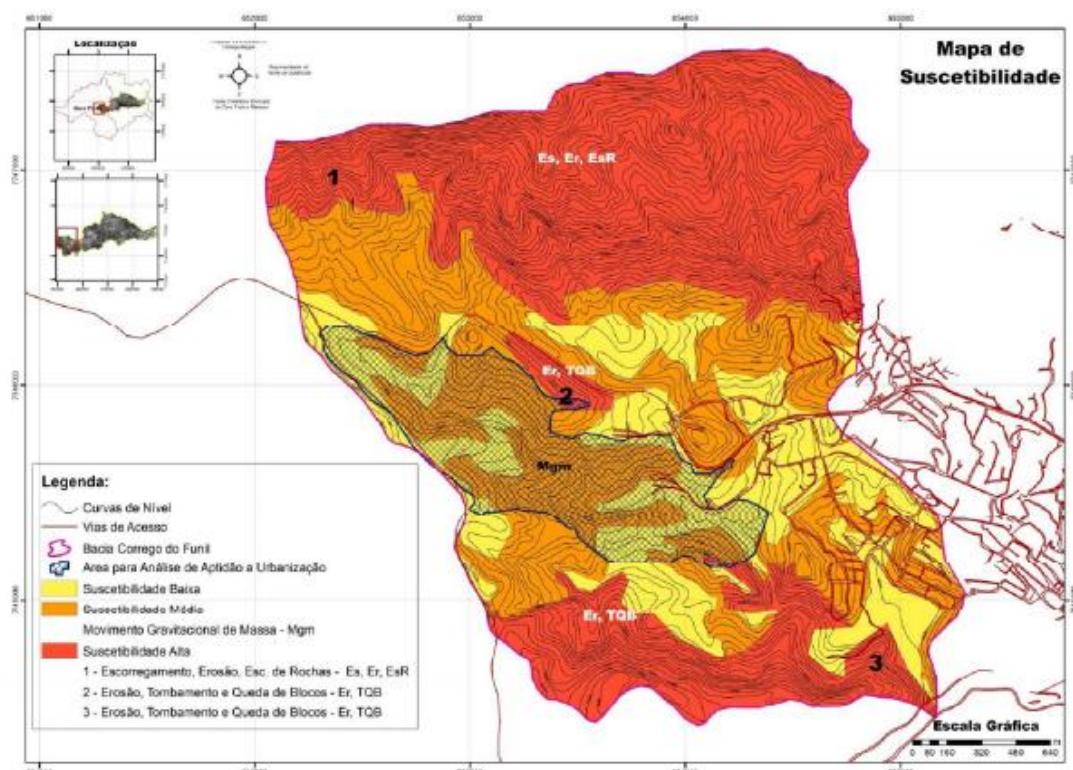


Figura 3.8: Exemplo de carta de suscetibilidade a processos geodinâmicos
Fonte: Souza e Sobreira (2015).

As cartas de suscetibilidade são de serventia no planejamento regional. Elas localizam as áreas possíveis de serem ocupadas restringem outras. Além de serem utilizadas para avaliar as condições de ocupação do terreno, elas possuem outros usos, pelo menos em análise inicial. Como elas possuem a finalidade principal orientar devido à sua escala, elas podem auxiliar instrumentos de planejamento (SOUZA; SOBREIRA, 2015).

As cartas de risco são realizadas a partir da carta de suscetibilidade. O uso e ocupação do solo não é visto somente como fator exacerbador, mas também como sujeito às consequências econômicas e sociais (CERRI, 1990).

As cartas de risco são também de grande utilidade na gestão ambiental de rodovias. Elas, por serem baseadas nas cartas de suscetibilidade, elas possuem as mesmas características de identificação e localização. Elas oferecem, entretanto, a possibilidade de hierarquizar os locais, afim facilitar a tomada de decisões, de propor medidas, acompanhar e supervisionar (GARIBALDI *et al.*, 2012).

As cartas de conflito de uso utilizam as informações sobre o uso e ocupação do solo. Elas são em seguidas comparadas com as de ordem geológico-geotécnica para a realização de um diagnóstico e identificação das áreas de conflito (CERRI, 1990).

Com relação às escalas das cartas ou dos mapas geotécnicos, elas variam conforme o tipo e a fase da obra. Durante o inventário, escalas variam de 1:200.000 para obras longitudinais, como estradas, até 1:50.000 para obras localizadas. Durante a fase de viabilidade, é necessário um maior nível de informações para os projetistas compreenderem melhor com comportamento geológico-geotécnico local e como ele irá afetar as diferentes etapas das obras. Por isso, é recomendada uma escala que varia de 1:100.000 até 1:20.000. Para avaliações ambientais, a escala varia:100.000 a 1:5.000, conforme a obra e problema a ser identificado. A escala utilizada pode ser ainda maior para os projetos básicos e executivos de acordo com as informações desejadas (ZUQUETTE; NAKAZAWA, 1998).

Com foco no planejamento urbano, Souza e Sobreira (2015) fornecem, em função do objetivo da carta, diferentes escalas para identificação de processos geodinâmicos.

Tabela 3.6: Níveis de cartas geotécnicas no planejamento urbano, escalas e processos mapeáveis (SOUZA; SOBREIRA, 2015)

| Produto | Escalas de Mapeamento | Processos geodinâmicos passíveis de identificação |
|---------------------------------|-------------------------------|--|
| Cartas de suscetibilidade | 1: 25.000 ou maiores | Movimentos gravitacionais de massa, inundações/enchentes, corridas, erosões, assoreamento, processos costeiros, sismos induzidos. |
| Cartas de Aptidão à Urbanização | 1:10.000, 1:15.000 ou maiores | Movimentos gravitacionais de massa translacionais, inundações/ enchentes/ alagamentos, corridas, erosões lineares de grande porte (ravinas), assoreamento, subsidências e colapsos, queda e rolamento de blocos rochosos, processos costeiros. |
| Cartas de Riscos Geológicos | 1:2.000 ou maiores | Movimentos gravitacionais de massa - translacionais, rotacionais, em cunha, inundações/ enchentes/ alagamentos, corridas de lama e detritos, rastejos, erosões lineares (sulcos, ravinas e voçorocas), solapamentos de margem, assoreamento, subsidências e colapsos, expansão de terrenos, queda e rolamento de blocos rochosos, processos costeiros. |

3.4.2. Elaboração das cartas geotécnicas

Soeters e Van Westen (1996) consideram necessários para o zoneamento de perigo de deslizamentos, tendo em vista os muitos fatores influenciadores do terreno:

- Um inventário detalhado dos processos de instabilidade de taludes;
- O estudo desses processos com relação à configuração ambiental;
- Análise dos fatores desencadeadores e condicionadores; e
- Representação da distribuição espacial desses fatores.

Soeters e Van Westen (1996) apontam três métodos para a elaboração de cartas geotécnicas. O primeiro é o método heurístico, baseado na opinião de especialista. O segundo, é o método estatístico que compara a situação atual de determinado local com situação semelhante onde ocorreram deslizamentos. O terceiro, é o método determinístico, a partir de modelos de estabilidade de encosta.

O modelo heurístico é baseado na experiência de um geomorfologista para a determinação da probabilidade de haver movimentos de terra. O mapeamento é utilizado em conjunto com as informações geomorfológicas, principal parâmetro de análise. O modelo pode ser dividido

em análise geomorfológica e combinação qualitativa de mapas. A primeira, é realizada por meio de testemunhos de deslizamentos anteriores, experiência pessoal e analogia de casos passados. A combinação de mapas é baseada na superposição de mapas com os parâmetros influenciadores do processo. A avaliação do especialista é feita com relação ao peso dado para cada parâmetro (SOETERS; VAN WESTEN, 1996).

O modelo estatístico permite uma análise quantitativa, fundamentada em casos históricos anteriores. É realizada a combinação estatística dos fatores que levaram à ocorrência do deslizamento. A partir disso, é feita a projeção para locais ainda intactos com condições semelhantes (SOETERS; VAN WESTEN, 1996).

O modelo determinístico fornece também uma análise quantitativa, embasada nas teorias de estabilidade de talude. Com o apoio dos Sistemas de Informação Geográficos – SIG, a realização dos cálculos se tornou mais simples e possibilitou uma utilização maior de modelos determinísticos. Entretanto, a quantidade e a qualidade da coleta de dados limitam o modelo às condições geomorfológicas e geológicas homogêneas e deslizamentos simples (SOETERS; VAN WESTEN, 1996).

Carvalho *et al.* (2007) abordam uma metodologia heurística para o mapeamento. Ele evidencia dois tipos de mapas para a elaboração do mapa de risco. O primeiro é o mapa de inventário que serve de base para os mapas de suscetibilidade e de risco. Ele apresenta a distribuição espacial, tipo, tamanho, forma e estado de atividade dos eventos, fotos e imagens de campo (CARVALHO *et al.*, 2007).

O inventário é realizado com o zoneamento de riscos geológicos de uma área. O zoneamento corresponde à identificação dos processos atuantes e caracterização da área de risco. Ele é feito por pessoal treinado e especializado que realizam a pré-setorização com base na experiência e em parâmetros como a declividade, a tipologia dos processos, posição da ocupação em relação à encosta e a qualidade da ocupação. Em seguida, é realizada a setorização. A setorização é igualmente feita por equipe treinada com conhecimento do histórico do local. Ela coleta de informações com uma ficha para caracterização do local, identificação de evidências de movimentação, presença de água e vegetação. O local é mapeado e setorizado com o auxílio de fotografias aéreas, de satélite ou oblíquas de baixa altitude (CARVALHO *et al.*, 2007).

O Mapa de Suscetibilidade é iniciado com o Mapa de Inventário pronto. Ele fornece informações importantes acerca da possibilidade de ocorrência de fenômenos geotécnicos, divididas em classes de possibilidade. Ele é muito útil para o estabelecimento de medidas preventivas. O Mapa de Suscetibilidade apresenta as informações do Mapa de Inventário em conjunto com os fatores que influenciam a ocorrência dos eventos, a correlação entre eles e a classificação das unidades de acordo com a probabilidade (CARVALHO *et al.*, 2007).

Fernandes e Cerri (2011) realizaram uma carta de suscetibilidade geotécnica de um trecho da rodovia Marechal Rondon em São Paulo na escala 1: 50.000 para processos de dinâmica superficial. Para esse fim, eles realizaram uma abordagem com base nos dados de declividade, tipo de solo, mapeamento dos processos e uso do solo.

O Mapa de risco correlaciona os dados do Mapa de Suscetibilidade com os possíveis danos. A classificação no Mapa de Risco é com relação à possibilidade de haver processos geológicos naturais ou induzidos e as consequências socioeconômicas. Ele aborda a probabilidade no tempo e no espaço, o comportamento e tipo do evento estudado, a vulnerabilidade dos elementos sob risco e os custos decorrentes de eventuais danos (CARVALHO *et al.*, 2007).

Fell *et al.* (2008) fornecem as diretrizes para a elaboração do zoneamento de suscetibilidade, de risco e de perigo para o planejamento do uso do solo. Inicialmente, eles diferenciam quatro tipos de zoneamentos: de suscetibilidade, de perigo, de risco e o inventário. O zoneamento pode ser realizado com diferentes graus de precisão que podem ser divididos em básicos, intermediários e avançados. Cascini (2008) fornece exemplos de aplicação dessas diretrizes e afirma que elas são ferramentas poderosas para o zoneamento de suscetibilidade e de perigo em diferentes escalas.

Conforme o rigor requerido e a metodologia escolhida, diferentes níveis de zoneamento podem ser obtidos. Zoneamentos preliminares são resultado de procedimentos mais simples, ao passo que zoneamentos intermediários e sofisticados necessitam de métodos mais sofisticados. A escolha do zoneamento utilizado é feita em função da disponibilidade, qualidade e precisão dos dados, da resolução e escala do zoneamento, do resultado desejado, entre outros (CASCINI, 2008).

O inventário fornece dados fatuais observados em princípio, entretanto pode haver um grau de interpretação ao se analisar características geomorfológicas a partir de fotografias (FELL

et al., 2008). Um inventário confiável que possibilite a definição do tipo, da atividade e da distribuição espacial do deslizamento é de grande importância para a compreensão da situação e avaliação correta da análise de ocorrência de deslizamentos e a sua relação com o meio ambiente (SOETERS; VAN WESTEN, 1996).

Souza e Sobreira (2015) realizaram um inventário composto por fotos aéreas, ortofotos e imagens espaciais, base topográfica na escala 1:25'000, delimitação das bacias de contribuição, vias de acesso, registros históricos, a partir de interpretação de imagens e trabalhos de campo e pelos mapas geológicos e geomorfológicos. A partir disso, eles conseguiram gerar novos parâmetros de análise dos processos, como o mapa de declividade do terreno, concentração de fluxo, hipsometria, entre outros. As informações geológicas forneceram o subsídio para a identificação dos condicionantes dos movimentos de massa, enquanto a geomorfologia possibilita avaliar a probabilidade de ocorrência e a intensidade dos eventos.

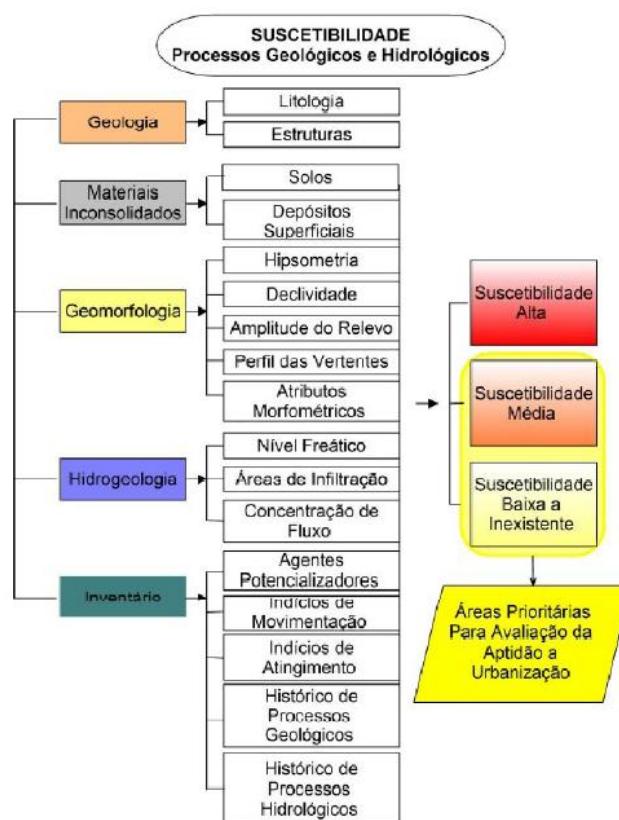


Figura 3.9: Proposta simplificada de etapas para elaboração da análise de suscetibilidade a eventos de natureza geológica e hidrológica.

Fonte: Souza e Sobreira (2015)

O zoneamento de suscetibilidade é mais interpretativo. O motivo disso é que ele classifica regiões de acordo com a potencialidade de ocorrerem deslizamentos e distribui espacialmente essas regiões. No entanto, são numerosos fatores geológicos, topográficos, climatológicos, assim como das propriedades geotécnicas, da vegetação e da ação humana que afetam a possibilidade de ocorrerem deslizamentos (FELL *et al.*, 2008).

Cascini (2008) enfatiza o papel do inventário e da qualidade dos dados na elaboração de zoneamentos de suscetibilidade. Além disso, segundo o autor, o entendimento do modo de ocorrência dos fatores favoráveis aos deslocamentos e a relação entre eles é de grande importância para a boa interpretação dos dados. A falta de entendimento da atuação destes parâmetros pode induzir em uma análise estatística ao estabelecimento de relações de equivocadas e gerar dados enganosos.

O zoneamento de perigo pode ser realizado quantitativa ou qualitativamente. É preferível que ele seja realizado quantitativamente para obtenção de melhores parâmetros para comparação e para que o risco seja também avaliado quantitativamente. Apesar disso, quando for difícil a obtenção de parâmetros confiáveis, pode ser feita uma análise qualitativa. Embora, uma análise qualitativa do perigo possa ser a única medida viável, eles ainda recomendam a estimativa da probabilidade de acontecer um deslizamento (FELL *et al.*, 2008).

Cascini (2008) destaca igualmente a qualidade dos dados para a obtenção do zoneamento de perigo. Para Cascini (2008), a escolha entre o zoneamento qualitativo e quantitativo de perigo está estritamente relacionado com a qualidade dos dados disponíveis e não dependem do nível de complexidade da análise.

Para Fell *et al.* (2008), o zoneamento de risco envolve três componentes. Esses são os elementos em risco, que serão analisados, a probabilidade temporal e espacial de haver um deslocamento de terra e a vulnerabilidade. Ele deve ser realizado antes da instalação de algum empreendimento ou após a instalação para tomada de medidas cabíveis. Com o empreendimento instalado, é igualmente recomendado realizar o zoneamento de riscos ao longo do tempo para evitar que alterações das condições do terreno modifiquem os resultados (FELL *et al.*, 2008).

Castro *et al.* (2005) fornecem uma abordagem da dimensão espacial de riscos ambientais a partir da geografia com uma visão mais abrangente do processo gerador e das consequências

do evento. Esta abordagem pode englobar: 1) a análise de processos ocorridos, com perdas, e a avaliação espaços de perda/espaços de risco. 2) a avaliação das escalas de ocorrência, de concentração espacial dos eventos e das causas. 3) a influência no novo espaço gerado e 4) as relações entre o espaço e escala das perdas, a exposição ao risco e a restrição aos recursos.

Fell *et al.* (2008) notam que uma determinada área pode estar sujeita a diferentes tipos de movimentos de terra e recomendam que sejam feitos diferentes zoneamentos de suscetibilidade e de risco para cada um (FELL *et al.*, 2008).

Eles fornecem orientações para a identificação da possibilidade de deslizamentos com relação a situações topográficas, geológicas e desenvolvimento. Eles dividem essas orientações em cinco categorias: Histórico de deslizamento, condições topográficas e geomorfológicas favoráveis à ocorrência de deslizamento, obras que, em caso de ruína, podem gerar deslizamentos rápidos e em áreas com atividades florestais ou desmatadas, nas quais os deslizamentos podem causar prejuízos ao meio ambiente (FELL *et al.*, 2008).

Para zoneamentos em torno de rodovias e ferrovias, eles citam algumas especificidades. A probabilidade de ocorrência de movimentos de terra é avaliada no nível da estrada e não na origem (FELL *et al.*, 2008).

Tabela 3.7: Exemplos de descritores de suscetibilidade (FELL *et al.*, 2008)

| Descritores de suscetibilidade | Queda de rochas | Pequenos deslizamentos em taludes naturais | Grandes deslizamentos em taludes naturais |
|--|---|--|---|
| Probabilidade de rochas atingirem a área, dada a queda de rocha* | Proporção da área na qual eles podem ocorrer.** | Proporção da área na qual eles podem ocorrer.*** | |
| Suscetibilidade alta | >0,5 | >0,5 | >0,5 |
| Suscetibilidade moderada | 0,25 a 0,5 | 0,25 a 0,5 | 0,25 a 0,5 |
| Suscetibilidade baixa | 0,01 a 0,25 | 0,01 a 0,25 | 0,01 a 0,25 |
| Suscetibilidade muito baixa | 0 a 0,01 | 0 a 0,01 | 0 a 0,01 |

*Probabilidade espacial, determinada historicamente, índices, dados ou análise.

** Baseado no inventário de deslocamentos, geologia, topografia e geomorfologia.

*** Baseado no inventário de deslocamentos, geologia, topografia e geomorfologia. Usualmente são deslizamentos ativos, dormentes, e, potencialmente reativados, não é o primeiro.

Garibaldi *et al.* (2012) elaboraram uma Carta de Risco em escala 1:10.000 para um trecho de rodovia em São Paulo para avaliação do uso em gestão ambiental. A análise foi realizada em uma faixa de 250 a 500 metros em torno da rodovia. Eles utilizaram para isso dados sobre a declividade, as condições geomorfológicas, o uso do solo, aspectos socioeconômicos. Como critérios para a distinção dos níveis de risco, foram adotadas as consequências para a estrutura da rodovia e de outras obras nas proximidades. Eles dividiram os riscos em:

- Risco alto: alta suscetibilidade de escorregamentos para taludes a montante, com comprometimento total ou parcial da rodovia e interdição total ou parcial da mesma e perigo para usuários. Ou para taludes a jusantes com as mesmas consequências;
- Risco médio: há a possibilidade de escorregamento, mas as consequências previstas não são severas, com danos aos dispositivos auxiliares da pista como acostamento e sistema de drenagem, e sem apresentar alguma ameaça aos usuários.
- Risco baixo: há também a possibilidade de ocorrerem escorregamentos, mas distantes da pista e com consequências insignificantes.

Eles identificaram a possibilidade de ocorrência de escorregamentos planares rasos, estruturados, rolamento, queda de blocos e escorregamento em aterros.

3.5.Sistemas de Informações Geográficas de Geoprocessamento

3.5.1. Geoprocessamento

As sociedades organizadas sempre tiveram a necessidade de coletar informações de diversos bens para o seu proveito. Ao longo do seu desenvolvimento, elas tiveram necessidade de conhecer os locais, onde havia recursos minerais, animais, plantas e onde estavam situadas as propriedades. Com esse fim e para transmitir o conhecimento, elaboraram os primeiros mapas em papel. Entretanto esse meio apresentava empecilhos para a análise de dados contidos em diferentes mapas. Com o desenvolvimento da informática, se tornou mais simples armazenar e representar dados em ambiente computacional, o que possibilitou o aparecimento do geoprocessamento (CÂMARA; DAVIS, 2001).

Câmara e Davis (2001, p.1) fornecem a seguinte definição: “Geoprocessamento denota a disciplina do conhecimento que utiliza técnicas matemáticas e computacionais para o tratamento da informação geográfica”. Os autores citam também a influência que ele tem nas áreas de cartografia, análise de recursos naturais, transportes, planejamento urbano e regional, entre outros.

Para Vaz (1997), o geoprocessamento corresponde à computação de dados georreferenciados. O computador é utilizado para processar dados cartográficos e informações associadas a coordenadas (VAZ, 1997). Carvalho *et al.* (2007, p.115) apontam o geoprocessamento como: “o conjunto tecnologias de coleta, de tratamento e desenvolvimento de informações espaciais”.

Conforme Câmara e Monteiro (2001), o geoprocessamento é uma tecnologia interdisciplinar. Isso significa que ele possibilita o estudo de fenômenos ambientais e urbanos por diferentes áreas.

O geoprocessamento engloba as tecnologias que coletam e tratam a informação espacial e que desenvolvem novos sistemas e aplicações. Ele está associado à cartografia digital, processamento digital de imagens e sistemas de informações geográficas (ROSA, 2013).

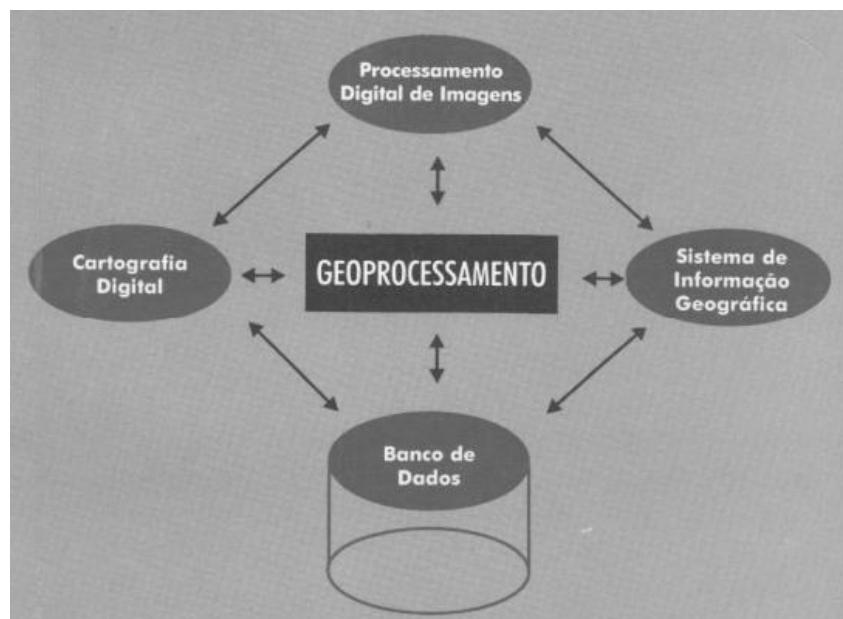


Figura 3.10: Principais atividades envolvidas em geoprocessamento.
Fonte: Rosa (2013)

O geoprocessamento responde fundamentalmente à pergunta: onde? Quando o conhecimento do local é uma informação importante para o objeto de, então o geoprocessamento é a ferramenta de trabalho (CÂMARA; DAVIS, 2001).

O geoprocessamento engloba diversas tecnologias computacionais que lidam com dados geográficos. Ele abrange o sensoriamento remoto, digitalização dos dados, automação de tarefas cartográficas, os sistemas de informações geográficas, entre outros (SANTOS *et al.*, 2000).

O geoprocessamento disponibiliza muitas ferramentas úteis aos pesquisadores e órgãos públicos para a tomada de decisão. Ele permite a elaboração de uma base de dados computacional e atualizá-lo de modo eficiente. Além disso, é possível identificar locais com determinadas características, de modo a estabelecer critérios de seleção e facilitar a escolha de respostas. Ele auxilia também no monitoramento de eventos no espaço e na identificação de trajetos mais curtos (VAZ, 1997).

Os dados base do geoprocessamento são coletados de quatro modos. O primeiro é por meio de levantamento de campo. O segundo é por meio de sensoriamento remoto. O terceiro é por meio de digitalização dos dados. O quarto é pela entrada dos dados através do computador (PINA; SANTOS, 2000).

Diversos setores que fazem uso de informações no espaço podem ser beneficiados com o geoprocessamento. Algumas aplicações são o ordenamento e gestão do território, a otimização de arrecadação, a localização de equipamentos e serviços públicos, a identificação de público-alvo, a gestão ambiental, o gerenciamento do sistema de transportes, a comunicação com os cidadãos e a gestão da frota (VAZ, 1997).

Câmara e Monteiro (2001) descrevem os tipos de dados existentes no geoprocessamento: Os dados temáticos são utilizados na descrição qualitativa e distribuição espacial de feições como o mapa de solos e de aptidão agrícola. Eles envolvem a coleta de dados no campo e a digitalização dos resultados ou por classificação de imagens (CÂMARA; MONTEIRO, 2001).

Os dados cadastrais correspondem aos atributos de determinado objeto geográfico, armazenados em um banco de dados. Estes representam características do objeto como a localização, dono, valor e diversas outras (CÂMARA; MONTEIRO, 2001).

As redes correspondem à sistemas lineares do mundo real, como serviços de água, luz e água, redes de drenagem e rodovias. Elas possuem localização geográfica e atributos descritivos (CÂMARA; MONTEIRO, 2001).

Os modelos numéricos do terreno constituem uma representação quantitativa de uma propriedade espacial. Eles são geralmente associados à altimetria para comporem mapas de altimetria e de declividade, porém eles podem representar outras características. O modelo numérico de terreno é uma superfície real formada, descrita por um modelo matemático, cuja a elevação é determinada pela propriedade de referência, e situada em um sistemas de coordenadas (x,y) (CÂMARA; MONTEIRO, 2001).

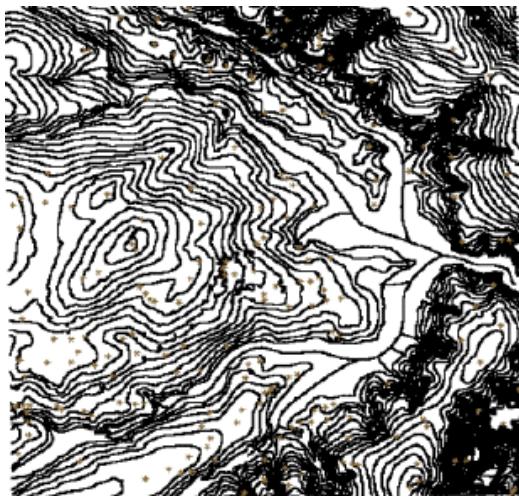


Figura 3.11: Exemplo de modelo numérico de terreno, formado por isolinhas de topografia.
Fonte: Câmara e Monteiro (2001)

As imagens são formadas por uma matriz de píxeis com valores correspondentes aos níveis de energia eletromagnética absorvida. Elas são obtidas por captura indireta de dados espaciais, por meio de satélites, fotografias aéreas ou sensores aerotransportados. Elas necessitam de técnicas de fotointerpretação e de classificação para individualização dos dados. Propriedades importantes das imagens são as resoluções espectrais, espaciais, radiométricas e temporais. Estas estão relacionadas à largura das bandas do espectro eletromagnético, ao tamanho da menor área observada por cada sensor, ao nível de informações contidas em cada píxel e ao intervalo entre duas passagens do satélite pelo mesmo ponto (CÂMARA; MONTEIRO, 2001).

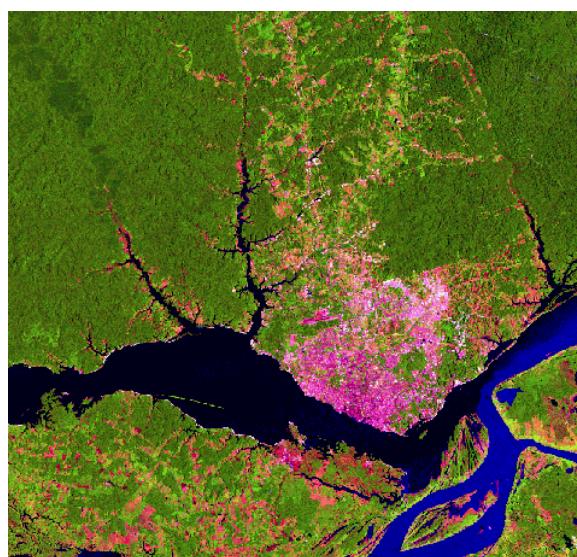


Figura 3.12: Exemplo de Imagem para a região de Manaus
Fonte: Câmara e Monteiro (2001)

3.5.2. Sistemas de Informações Geográficas

Dentre as técnicas e tecnologias utilizadas no geoprocessamento, existem os SIG, Sistemas de Informações Geográficas. Estes correspondem ao conjunto de ferramentas computacionais que manipulam dados de origem espacial. Além disso, eles possibilitam a integração de dados de diversas fontes, assim como a manipulação, a análise, o armazenamento e a exibição de informações espaciais (CARVALHO *et al.*, 2007).

Santos *et al.* (2000, p. 14) fornecem a seguinte definição para os Sistemas de Informações Geográficas: “são sistemas que computacionais, usados para o entendimento dos fatos e fenômenos que ocorrem no espaço geográfico.” Além disso, para as autoras, a capacidade dos SIG de reunir, integrar e estruturar grande quantidade de dados com aspecto espacial torna-os essenciais para a manipulação de dados geográficos.

Conforme Câmara e Davis (2001), o termo Sistemas de Informações Geográfica é aplicado da seguinte forma:

“sistemas que realizam o tratamento computacional de dados geográficos e recuperam informações não apenas com base em suas características alfanuméricas, mas também através de sua localização espacial; oferecem ao administrador (urbanista, planejador, engenheiro) uma visão inédita de seu ambiente de trabalho, em que todas as informações disponíveis sobre um determinado assunto estão ao seu alcance, interrelacionadas com base no que lhes é fundamentalmente comum -- a localização geográfica.” (CÂMARA; DAVIS, 2001).

Os SIGs, Sistemas de Informações Geográficas, são compostos por dois elementos principais. Estes são o dado geográfico que é relacionado a um dado não-locacional ou estatístico. Nos SIG, a informação geográfica assume maior importância do que o atributo (MAGUIRE, 1991).

De acordo com Martins (2005), os SIGs buscam simular o espaço geográfico. Eles realizam isso, com base na integração de dados espaciais advindos de dados cartográficos e no oferecimento de mecanismos de análise gráfica e manipulação de dados.

Para Raia Júnior (2004, p. 109): “Um Sistema de Informações Geográficas é destinado ao tratamento de diversas fontes como mapas, imagens de satélite, cadastros e outras, permitindo recuperar e combinar informações e efetuar os mais diversos tipos de análise de dados.”

Conforme Câmara *et al.* (1996), os SIG são constituídos pela interface com o usuário, pela entrada e integração dos dados, funções de processamento, visualização e plotagem e pelo armazenamento e recuperação dos dados.

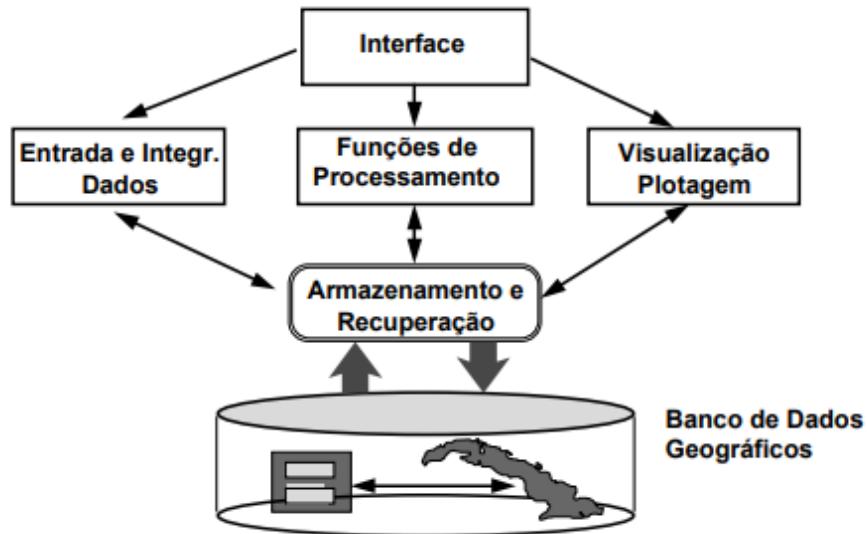


Figura 3.13: Arquitetura de um Sistema de Informação Geográfica.

Fonte: Câmara *et al.* (1996)

Os SIGs possuem muitas semelhanças com outros sistemas de informação, eles se diferenciam, no entanto é a visão voltada para elementos espaciais e as suas relações. A capacidade dos SIGs de organizar e reunir informações dispersas com base em características geográficas é o que o torna tão poderoso. Os SIGs podem ser utilizados para elaborar inventários, realizar operações analíticas e, por meio de análise espacial, criação de modelos e operação dos mesmos, servirem de suporte para a tomada de decisão (MAGUIRE, 1991).

Os SIGs fornecem ao planejador uma grande quantidade de opções de manipulação e de análise dos dados geográficos, além capacidade de armazenar grandes quantidades de informações. Os SIGs são capazes de capturar, armazenar, manipular, analisar, apresentar, selecionar e buscar dados, assim como simplificar a visualização e análise gráfica de mapas. Tudo isto lhe confere grande habilidade de facilitar o entendimento de processos, criar cenários e elaborar previsões essenciais para o planejadores (SANTOS *et al.*, 2000).

Os SIGs possibilitam armazenar, analisar e manipular dados, cuja posição geográfica constitui aspecto fundamental do objeto de estudo. Os SIG possuem uma vasta área de aplicação, como na demografia, cartografia, planejamento urbano, monitoramento costeiro,

entre outros. Os SIG conferem grande facilidade ao processo de integração dos dados (CÂMARA ET AL., 1996).

Maguire (1991) menciona três enfoques do SIG. O primeiro foco é para a elaboração de mapas, com relação ao qual os SIGs foram elogiados por sua capacidade de elaborar mapas e cartas com alta qualidade. O segundo é para a base de dados, no qual a gestão de dados é vista como parte integrante do SIG. A terceira é o foco na análise espacial com grande potencial de crescimento.

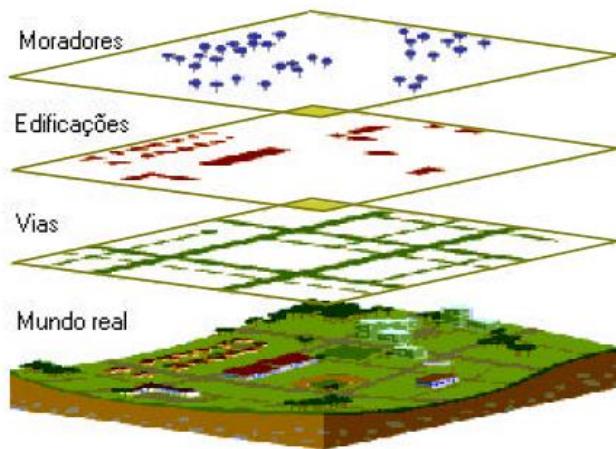


Figura 3.14: Feições Geográficas representadas na camada selecionada.
Fonte: Raia Junior (2004)

Os SIGs são fundamentados em um banco de dados com informações coletadas do mundo real. Este banco de dados é formado pelas informações espaciais e pelos atributos. As primeiras estabelecem o conhecimento acerca da forma e da posição da superfície do terreno, enquanto o segundo trata da qualidade desse conhecimento. Em seguida, procedimentos analíticos baseados na manipulação dos dados, na cartografia automatizada e na análise gráfica possibilitam explorar os dados e desenvolver o conhecimento (RAIA JUNIOR, 2004).

A representação dos dados é realizada por feições geométricas. As feições utilizadas são os pontos, as linhas e os polígonos. Os pontos representam eventos localizados com coordenadas específicas no espaço. As linhas são destinadas à feições lineares. Elas são constituídas por um conjunto de pontos. Os polígonos são associados à áreas com determinadas características e possuem área, perímetro e formatos próprios (MARTINS, 2005).

O campo de aplicações dos SIG é muito vasto e possui grande aplicabilidade em diversas situações (MAGUIRE, 1991). Câmara *et al.* (1996) mencionam a aplicabilidade dos SIGs em análise de fenômenos geográficos, aplicações socioeconômicas, aplicações ambientais e de gerenciamento. Dentre as aplicações ambientais, estão a elaboração de sistemas de informação do solo. Além disso, os bancos de dados dos SIG podem ser utilizados para diversas finalidades, desde que executadas as devidas operações. Desse modo, dados pluviométricos são utilizados para obter a distribuição das chuvas, tendo em vista o planejamento do plantio, ou para realizar estudos sobre erosão do solo, em conjunto com dados de declividade e de permeabilidade. (CÂMARA *et al.*, 1996)

Para Martins (2005) a aplicação dos SIGs pode ser considerada infinita, por causa das diversas situações em que é importante conhecer determinado atributo, em conjunto com a sua posição no espaço. Ela cita como exemplo de locais de utilização de SIG a administração pública, concessionárias de água, luz e energia, saúde pública, meio ambiente, transportes, agricultura, entre outros.

3.6.Distrito Federal

3.6.1. Formação e características

O Distrito Federal, DF, é uma das Unidades Federativas do Brasil, localizado na região Centro-Oeste e praticamente dentro do Estado de Goiás, exceto por um trecho curto que faz fronteira com Minas Gerais. Ele está situado entre os paralelos de 15°30' e 16°03' de latitude Sul e pelos meridianos 47°25' e 48°12' de longitude Oeste. O Distrito Federal se distingue das outras Unidades da Federação por nele estar situada a capital do País, Brasília, e por não possuir municípios. Ele é atualmente dividido em trinta e uma regiões administrativas e possui uma área de 5783 km². Conforme o último censo do IBGE realizado em 2010, a população do Distrito Federal atingiu 2.690.959 habitantes (CODEPLAN, 2017).



Figura 3.15: Localização do Distrito Federal
Fonte: CODEPLAN (2017)

O primeiro marco significativo para a formação do Distrito Federal remonta à primeira Constituição republicana de 1891. Anteriormente, a área já era habitada por indígenas antes e no início do período colonial, em seguida, as primeiras vilas foram formadas pelas bandeiras e pelos que buscavam metais preciosos. Havia também o desejo de interiorizar a capital do País desde o período colonial e durante o Império. Entretanto, somente em 1891 que a mudança da capital se tornou preceito legal (CODEPLAN, 2013). Conforme a Constituição (BRASIL, 1891) no artigo terceiro: “Fica pertencendo à União, no planalto central da República, uma zona de 14.400 quilômetros quadrados, que será oportunamente demarcada para nela estabelecer-se a futura Capital federal.”

O objetivo da mudança da capital era a interiorização do país. A população brasileira, até a década de 1950, se localizava principalmente próxima ao litoral. A mudança da capital para o interior era vista como uma forma de melhorar a ocupação do território brasileiro e de levar o desenvolvimento econômico para o interior do país (CODEPLAN, 2017).

Com base nessa lei, foi formada a Comissão Exploradora do Planalto Central do Brasil, a Comissão Cruls, em 1893 encarregada de mapear a futura área do Distrito Federal. Ela

resultou na primeira demarcação área para o futuro Distrito Federal. Além disso, foi produzido o relatório Cruls que continha os primeiros estudos topográficos, climáticos, geológicos, e sobre a fauna e a flora do Distrito Federal (CODEPLAN, 2013).

As Constituições seguintes de 1934 e de 1946 retomavam ideia da centralização da capital. Durante o Governo Dutra, foi formada a comissão Polli Coelho, encarregada de realizar novos estudo e averiguar as vantagens do local escolhido pela missão Cruls. Definida a mudança de capital, em 1953, houve o último estudo para determinação do local da futura capital que resultou no relatório Belcher. Nele incluíam novos estudos topográficos, geográficos, hídricos, sobre o uso do solo para obras de engenharia e a demarcação da área. O presidente Café Filho aprovou o local e os trabalhos para a fundação da nova capital foram iniciados, em seguida, sob o mandato do presidente Juscelino Kubitschek, que transferiu a capital para Brasília no dia 21 de abril de 1960 (CODEPLAN, 2013).

Embora o plano original de Lúcio Costa previa criação das cidades satélites, após o Plano Piloto atingir 500 mil habitantes, elas surgiram antecipadamente como forma de abrigar os trabalhadores das obras da capital. A partir desse momento, foram criadas as cidades de Taguatinga e do Núcleo Bandeirante, anteriormente à construção de Brasília existiam somente as cidades de Planaltina e de Brazlândia. Inicialmente, a distribuição de terras foi organizada pela NOVACAP, em seguida as primeiras medidas de ordenação do território surgiram com Decreto 163 de 26.02.1962 e o Código Sanitário do Distrito Federal (DISTRITO FEDERAL, 2017).

Nos anos seguintes, ocorreu grande aumento populacional e foi criado o Plano Estrutural de Ordenamento Territorial em 1978. O objetivo do plano era manter o projeto original do Plano Piloto, determinar áreas para a expansão urbana, reduzir custos de mobilidade e de infraestrutura, além de conciliar o uso do solo com as melhores condições para a infraestrutura urbana e distribuição e coleta de água (COSTA, 2011).

Em seguida, com o Plano de Ocupação Territorial do Distrito Federal, Brasília Revisitada, Plano de Ocupação e Uso do Solo e os seguintes Planos Diretores de Ordenamento Territorial, foram feitos avanços nas diretrizes para o desenvolvimento do território do Distrito Federal. Esses planos continuaram a enfatizar a importância do planejamento do território, a proteção da bacia do lago Paranoá, instalaram a distinção entre solo urbano e solo rural, conjuntamente com as áreas de proteção e preservação ecológica e estabeleceram vetores de crescimento para as áreas urbanas (COSTA, 2011).

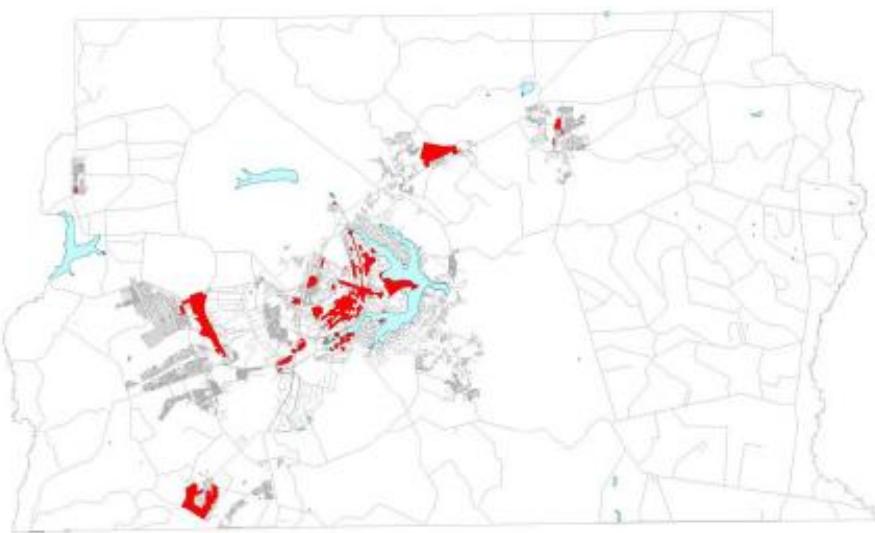


Figura 3.16: Ocupação Urbana em 1964 (vermelho) e em 2009 (cinza).
Fonte: Distrito Federal (2017)

3.6.2. Geologia

A geologia corresponde ao estudo básico para a caracterização de determinada região. Aspectos litológicos, estratigráficos, estruturais, assim como a evolução desses elementos ao longo do tempo, são todos componentes da geologia que possibilitam uma melhor compreensão do terreno de determinado local. Nela estão incluídos aspectos litológicos, estratigráficos, estruturais e sua transformação ao longo do tempo. A geologia é essencial para a formação de relevos, a evolução geomorfológica, características e composição químicas dos solos, ocorrência de intemperismo, natureza e intensidade de processos erosivos, distribuição das águas, entre outros (IBRAM, 2014).

O Distrito Federal está localizado na porção central da Faixa de Dobramentos e de Cavalgamentos de Brasília. A estruturação é complexa, em decorrência da sobreposição de diferentes camadas com dobramentos e eixos ortogonais. Ele está situado na transição das porções internas, com maior grau metamórfico, e externas, com menor grau metamórfico. (ROMÃO; SOUZA, 2006)

A geologia do Distrito Federal é constituída pelos grupos Paranoá, Canastra, Araxá e Bambuí. Os grupos Paranoá e Canastra foram formados na idade Meso/Neoproterozóica, enquanto os grupos Araxá e Bambuí são de idade Neoproterozoica. Ocorreu igualmente formação de solos residuais e coluvionares. (CAMPOS, 2004)

O grupo Paranoá é o mais abrangente dos quatro e corresponde à 65% da área do Distrito Federal. Ele é formado por Metassíltitos/metarrítmitos arenosos (S), ardósias (A),

metarritmito arenoso/ metassíltito (R3), quartzitos (Q), metarritmito argiloso e pela unidade de psamo pelito carbonatada (PPC) (ROMÃO; SOUZA, 2006).

Os grupos Canastra e Bambuí ocupam aproximadamente 15% da área do Distrito Federal. O primeiro, localizado no sul do vale do rio São Bartolomeu, é constituído por filitos e possui corpos lenticulares de mármore e quartzitos. O segundo é composto por metassíltitos e ocorre na região leste do Distrito Federal. O grupo Araxá é o menor de todos e ocupa somente 5% da área ele é formado por xistos (ROMÃO; SOUZA, 2006).

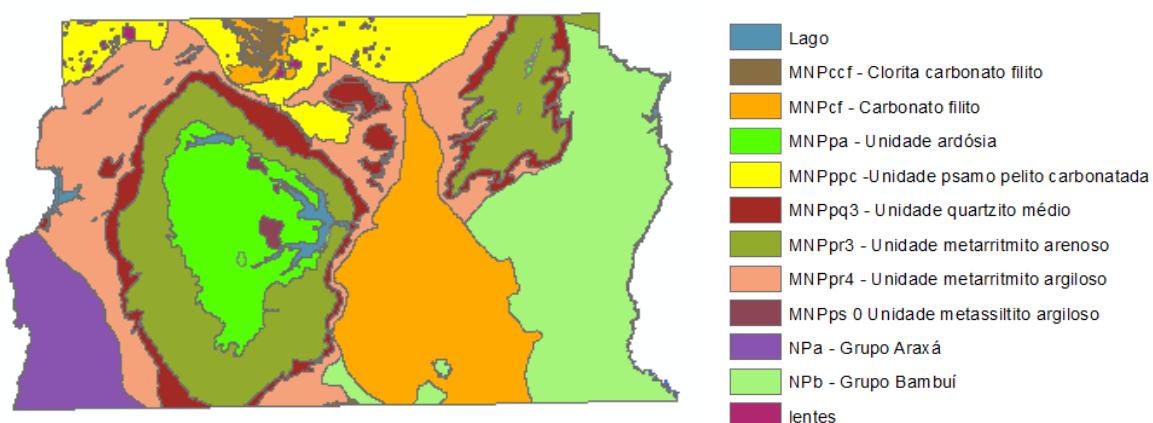


Figura 3.17: Mapa da Geologia do Distrito Federal
Fonte: Freitas-Silva e Campos (1998)

3.6.3. Geomorfologia

Inserido no Planalto Central, o relevo do Distrito Federal foi moldado ao longo dos anos por processos, que lhe conferiram características típicas dessa região. A altitude do terreno varia entre 950 e 1400m, onde estão presentes chapadas e chapadões, resultantes de processos erosivos, assim como vales, colinas e serras (CODEPLAN, 2017).

A geomorfologia do Distrito Federal é constituída por terreno plano elevado (1200 – 1400 metros), terreno plano intermediário (950- 1200 metros), rampa íngreme (800 – 950 metros), rebordo e vale dissecado. Os terrenos planos são característicos das chapadas, enquanto as rampas íngremes formam as depressões interplanálticas (CODEPLAN, 2017).

Uma classificação semelhante é realizada por Novaes Pinto (1993, *apud* ROMÃO; SOUZA, 2006). O autor divide a região em três unidades e agrupa os terrenos planos em uma unidade como região de chapada. As outras duas são a área de dissecação intermediária e a região dissecada em vale.

A região de chapada ocupa aproximadamente 34 % da área do Distrito Federal. Ela é formada por terreno plano e plano ondulado, acima de 1000 metros. A chapada de Contagem praticamente contorna o Plano Piloto. Ela ocorre sobre quartzitos ou sobre ardósias, filitos e

micaxistas. Os solos característicos são couraças lateríticas, latossolos vermelhos e vermelhos-amarelos (IBRAM, 2014).

A área de dissecação corresponde à área formada por pouca dissecação, drenada por pequenos córregos. Elas adquirem o seu aspecto da moldagem por pequenos córregos das ardósias, dos quartzitos e dos metarrítmitos do grupo Paranoá. Essa região ocupa 31 % do território do Distrito Federal (IBRAM, 2014).

A última região, dissecada em vale, abrange 35 % da área do Distrito Federal. Ela ocorre nas depressões formadas por rochas com resistências variadas sobre é característica do entorno dos principais rios do Distrito Federal, os rios Descoberto, São Bartolomeu e Maranhão. (IBRAM, 2014).

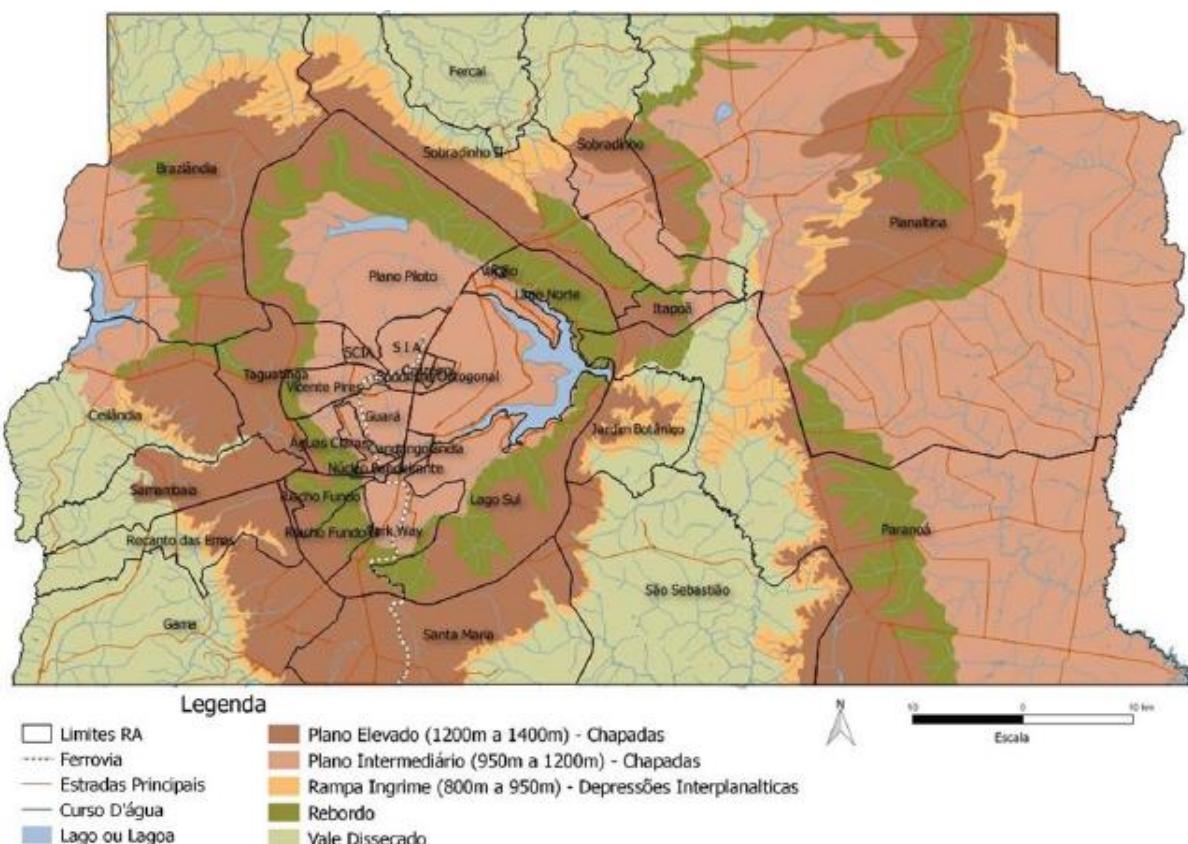


Figura 3.18: Mapa da Geomorfologia do Distrito Federal
Fonte: CODEPLAN (2017)

3.6.4. Pedologia

O primeiro levantamento de solos do Distrito Federal foi realizado pela Embrapa em 1978. A classificação dos solos foi realizada com base na importância do solo como fonte de recursos para a produção, a gênese do solo e as suas características físicas, químicas, mineralógicas e morfogeológicas. As classes de solos levantadas foram as seguintes: latossolo vermelho - escuro, latossolo vermelho - amarelo, podzólico vermelho - amarelo,

podzólico vermelho - amarelo equivalente eutrófico, terra roxa estruturada similar, do cambissolo, solos litólicos, solos aluviais e solos hidromórficos (EMBRAPA,1978).

Reatto *et al.* (2004) reclassificaram os solos conforme o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. Os autores obtiveram as seguintes novas categorias: latossolos, neossolos quartzarenicos, argissolos, nitossolos, cambissolos, chernossolos e plintossolos. Os solos mais comuns são os latossolos (54,50 % da área do DF), os argissolos (2,89%), os cambissolos (30,98%) e os solos hidromórficos (3,98%) (REATTO *et al.*, 2004).

O latossolo vermelho-escuro é um tipo de solo mineral que sofreu intemperização e lixiviação. Ele possui espessura elevada, superior a 3 metros, apresenta textura argilosa, com alta permeabilidade, porosidade e é muito drenado. Eles são poucos suscetíveis à erosão, entretanto podem ocorrer voçorocas onde há concentração de fluxo de água e onde o declive for mais acentuado. Eles ocorrem em terrenos planos e levemente ondulados, em colinas com topos aplinados em altitudes que variam de 850 a 1250 metros. Ele está associado a vegetação do tipo floresta subcaducifólia, cerradão, cerrado subcaducifólio e campo cerrado (EMBRAPA,1978).

O latossolo vermelho-amarelo é igualmente um solo mineral, com textura argilosa ou média, profundo, boa drenagem e que sofreu intensos processo de lixiviação e de intemperismo. São pouco suscetíveis ao processo erosivo e formam sulcos somente com grandes volumes de escoamento de águas superficiais. Eles são também encontrados em terrenos planos e ondulados. Apresenta tipicamente cobertura de floresta, cerrado, campo cerrado e vegetação campestre.

Conforme a reclassificação realizada por Reatto *et al.* (2004), os latossolos vermelho-escuro e vermelho-amarelo formam somente uma classe de latossolo. Os autores enfatizam a alta permeabilidade desse tipo de solo, elevada drenagem, baixos teores de silte por um lado, e elevados teores de argila, por outro. Além disso, é um tipo de solo intensamente intemperizado, onde ocorreu a remoção da sílica e permaneceu óxidos de ferro e magnésio, em conjunto com grãos de quartzo (REATTO *et al.*, 2004).

O podzólico vermelho-amarelo é um solo com textura argilosa média, bem drenado, moderadamente poroso, com transição clara entre os horizontes e com intensa atividade biológica. Apresenta maior suscetibilidade à erosão e apresentar, consequentemente, em trechos com maiores declividades a parte superficial desgastada e sulcos em vários estágios de formação. Eles podem ser encontrados em áreas com relevo ondulado e fortemente

ondulado entre 800 e 900 metros. A vegetação característica é formada por floresta subcaducifólia e cerradão subcaducifólio (EMBRAPA, 1978).

Podzólico vermelho-amarelo equivalente eutrófico. Ele apresenta coloração mais escura no horizonte A, bem drenado, profundo e textura de argila ou argila siltosa. Ele ocorre em relevo ondulado, fortemente ondulado ou montanhoso, com vegetação tipo floresta subcaducifólia (EMBRAPA,1978).

Estas duas classes foram reagrupadas nos argissolos por Reatto *et al.* (2004). Ela ocupa a porção inferior das encostas, onde o relevo é ondulado (8 a 20%) ou fortemente ondulado (20 a 45%). Neles ocorrem variação do teor de argila responsável por gerar diferentes valores de permeabilidade. Dessa forma, é comum a formação de sulcos nesse tipo de solo (REATTO *et al.*, 2004).

Cambissolos. É um solo pouco desenvolvido, pouco intemperizados e pode apresentar teores de siltes mais elevados do que de argila. Eles possuem textura argilosa ou média argilosa, muito suscetíveis à erosão com formação frequente de sulcos e voçorocas. Ele está presente em uma grande faixa de altitude que vai de 800 metros até 1150 metros e em relevo que varia de suave ondulado até montanhoso. A vegetação é igualmente diversificada com floresta subcaducifólia, cerradão subcaducifólio, campo cerrado e campestre.

Segundo Reatto *et al.* (2004), os cambissolos são solos rasos ou profundos de 0,2 até 1 metro. A baixa espessura do solo, assim como a posição em relevo inclinado, torna necessário o incentivo à preservação da vegetação nativa e o combate ao desmatamento para a preservação da cobertura do solo.

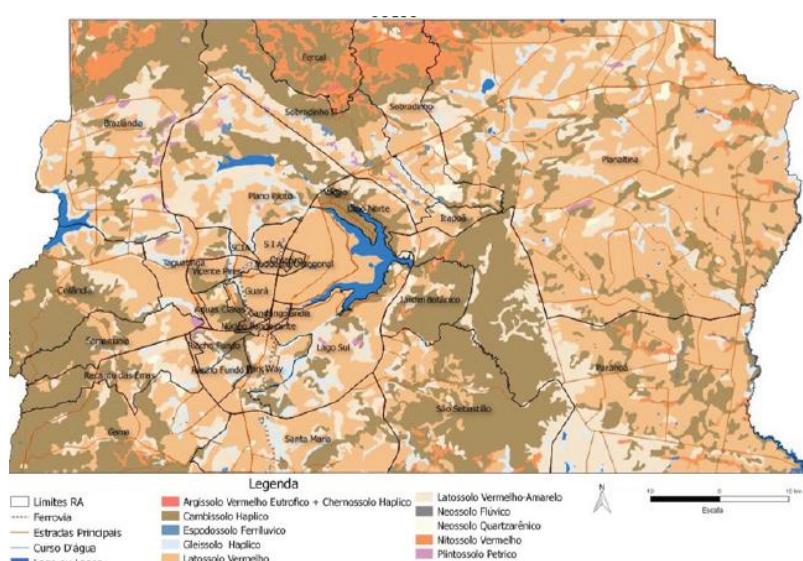


Figura 3.19 Mapa de solos do Distrito Federal
Fonte: CODEPLAN (2017)

3.6.5. Vegetação

O Distrito Federal está completamente localizado na região de Cerrado. Este é o segundo maior bioma no território brasileiro e possui uma grande biodiversidade, com milhares de espécies de árvores, centenas de aves e grande variedade de peixes. A fronteira com os biomas da Amazônia e da Mata Atlântica estimulam uma diversificação da fauna. A flora também possui potencial econômico para ser explorado. Entretanto, o crescimento econômico intenso ocorrido no Centro-Oeste, com aumento de produção agrícola do rebanho bovino, entre outros, provocou um extenso desmatamento. Como consequência, resta apenas um terço da área nativa de Cerrado no Distrito Federal (IBRAM, 2014).

Ribeiro e Walter (2008) realizaram uma categorização da fitofisionomia da vegetação do Cerrado. Os critérios adotados para a diferenciação foram a fisionomia, aspectos do ambiente e composição florística. As divisões feitas foram em onze tipos de fisionomias que podem ser agrupadas em formações florestais (mata ciliar, mata galeria, mata seca e cerradão), savânicas (cerrado sentido restrito, parque cerrado, palmeiral e vereda) e campestre (campo sujo, campo limpo e campo rupestre) (RIBEIRO;WALTER, 2008).



Figura 3.20:Fitofisionomias do Bioma Cerrado.

Fonte: Ribeiro e Walter (2008)

A Mata Ciliar é a vegetação que acompanha os rios da região do Cerrado. Ela é relativamente estreita, geralmente menor do que 100 metros em cada margem. A vegetação pode apresentar diferentes graus de caducifólia, por causa disso a cobertura vegetal pode variar de 50 a 90% entre a estação seca e a úmida. A mata ciliar ocorre geralmente em terrenos acidentados e apresenta árvores eretas de 20 a 25 metros de altura (RIBEIRO; WALTER, 2008).

A Mata Galeria é formada geralmente em torno de córregos e rios de pequeno porte sobre os quais está presente a cobertura vegetal, o que confere a aparência de um corredor. A vegetação é perenifólia e varia de 20 a 30 metros de altura. Ela pode ser subdividida em inundável e não-inundável (RIBEIRO; WALTER, 2008).

A Mata Seca corresponde à formações florestais que não possuem relação com um curso d'água. Elas apresentam diferentes graus de caducifolia. Elas necessitam de solos mestróficos profundos com condições físico-químicas específicas e com teores mais elevados de nutrientes. As árvores são eretas e variam de 15 a 25 metros de altura (RIBEIRO; WALTER, 2008).



Figura 3.21: Transição Mata Seca e Campo Limpo
Fonte: Parron *et al.* (1998)

O Cerradão apresenta vegetação esclerófila. Do ponto de vista da fisionomia, pode ser considerado uma floresta, porém floristicamente está mais próximo do Cerrado sentido restrito. Ele possui dossel contínuo com variação da cobertura vegetal da estação úmida para a seca (90 a 50%). A altura das árvores varia de 8 a 15 metros, possibilitando a maior luminosidade e a formação de estratos arbustivos e herbáceos. Ele está situado sobre solos profundos e bem drenados (RIBEIRO; WALTER, 2008).



Figura 3.22: Cerradão
Fonte: Parron *et al.* (1998)

O Cerrado sentido restrito possui vegetação com árvores baixas retorcidas, inclinadas e tortuosas, arbustos espalhados e gramas. Ele apresenta adaptações à climas secos e solos com poucos nutrientes. Conforme a densidade das árvores pode ser subdividido em Cerrado Denso, Cerrado Típico, Cerrado Ralo e Cerrado Rupestre (RIBEIRO; WALTER, 2008).

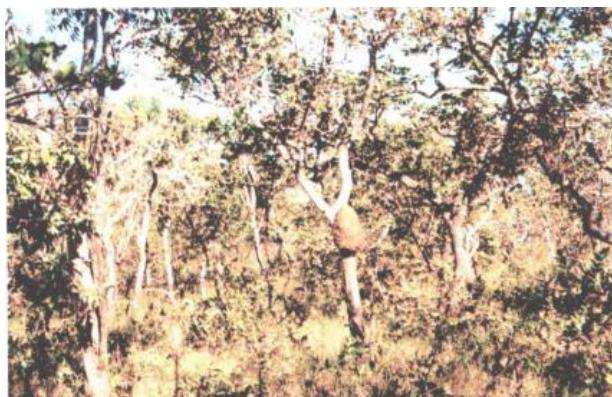


Figura 3.23: Cerrado Típico
Fonte: Parron *et al.* (1998)

O Parque cerrado é uma formação savânica, com pouca cobertura arbórea e árvores de pequeno tamanho (3 a 6 metros). Nele há a ocorrência de murunduns (RIBEIRO; WALTER, 2008).

O Palmeiral é um tipo de savana, na qual ocorre preponderantemente uma espécie de árvore, o Palmeiral, que dá origem ao nome. Ele possui cobertura descontínua e está localizado, geralmente, em locais bem drenados. Em função da espécie dominante pode haver o Babaçual e o Buritzal (RIBEIRO; WALTER, 2008).

A Vereda é constituída por palmeira arbórea emergente em meio a agrupamentos mais ou menos densos de espécies arbustivas-herbáceas. Ela possui pouca cobertura vegetal%, formada frequentemente por buritis de 12 a 15 metros, que varia de 5 a 10% e pode ser dividida em três zonas (borda, meio e fundo), em função da topografia e da drenagem do solo. Ela possui importante papel hidrológico e de manutenção da fauna do cerrado. Ela é condicionada pelo afloramento do lençol freático (RIBEIRO; WALTER, 2008).

O Campo Sujo é formado por arbustos e herbáceas. Ele pode ser dividido em Campo Sujo Seco, Campo Sujo Úmido e Campo Sujo com murunduns conforme a profundidade do lençol freático e a presença de murunduns (RIBEIRO; WALTER, 2008).

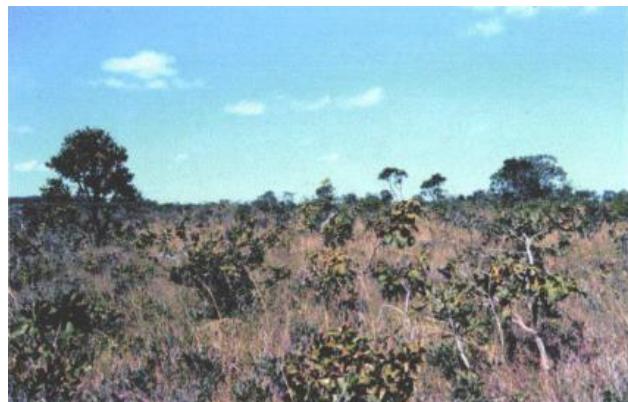


Figura 3.24: Campo Sujo.
Fonte: Parron *et al.* (1998)

O Campo Limpo possui uma fitofisionomia preponderantemente herbácea, com arbustos e raros e sem a presença de árvores. Ele pode ser encontrado em diversas condições de topografia, declividade, fertilidade e de grau de umidade (RIBEIRO; WALTER, 2008).



Figura 3.25: Transição Campo Limpo e Vereda
Fonte: Parron *et al.* (1998)

O Campo Rupestre é a formação típica de relevos com afloramentos rochosos, caracterizados por vegetação herbácea-arbustiva com pequenas árvores de até dois metros pouco desenvolvidas. As características do solo como a profundidade, a fertilidade, a disponibilidade e a posição topográfica influenciam significativamente a densidade das espécies (RIBEIRO; WALTER, 2008).

Uma classificação da vegetação do Distrito Federal foi realizada pela Embrapa em 1978. Segundo essa classificação, a vegetação encontrada no Distrito Federal é formada por diferentes tipos de florestas, cerradão, cerrado, campo cerrado, campestre, campo de várzea e campo higrófilo de surgente (EMBRAPA, 1978).

Tabela 3.8: Vegetação do Distrito Federal, conforme EMBRAPA (1978).

| | |
|----------------------|---|
| Formações Florestais | Floresta subcaducifólia |
| | Floresta caducifólia |
| | Floresta perenifólia de várzea |
| | Cerradão subcaducifólio |
| Cerrados | Cerrado subcaducifólio |
| | Campo cerrado |
| Campos | Vegetação campestre |
| | Campos de Várzea |
| | Campo higrófilo de surgente |
| Outras formações | Formação rupestre dos afloramentos de cárstico |
| | Formação rupestre dos afloramentos de quartzito |

As formações florestais são caracterizadas por formações arbóreas mais densas e mais altas.

A subdivisão é feita pela permanência das folhas durante o período de estiagem. A floresta subcaducifólia perde grande parte das suas folhas durante o período de seca, enquanto a floresta caducifólia perde quase completamente e as florestas perenifólias de várzea, características das matas ciliares e de galeria, as mantém. O Cerradão se assemelha ao cerrado, porém ainda possui vegetação alta característica das florestas, além de arbustos e gramíneas (EMBRAPA, 1978).

O Cerrado subcaducifólio é a vegetação predominante no Distrito Federal. Ele é definido como uma vegetação não florestal, pouco densa, troncos retorcidos, copas assimétricas, folhas grandes e grossas. Além disso, ele é caracterizado por estrato herbáceo e arbustivo-arbóreo de até 8 metros. Os Campos Cerrados possuem vegetação mais rasa, constituída por pequenas árvores e arbustos esparsos (EMBRAPA, 1978).

Os Campos divididos em vegetação campestre, campo de várzea e campos higrófilos de surgente, são formados por cobertura rasteira. A vegetação campestre, onde se encontra os campos limpos, possui, além de gramíneas, arbustos esparsos. O campo de várzea caracterizados por gramíneas e formações higrófilas está presente em ambientes úmidos, próximos de cursos d'água, cabeceira de drenagem e várzea inundável. Os campos higrófilos de surgente se assemelham aos campos de várzeas, porém se diferenciam destes por estarem localizados em altitudes mais elevadas e do excesso de umidade gerada pelo lençol subterrâneo (EMBRAPA, 1978).

3.6.6. Clima

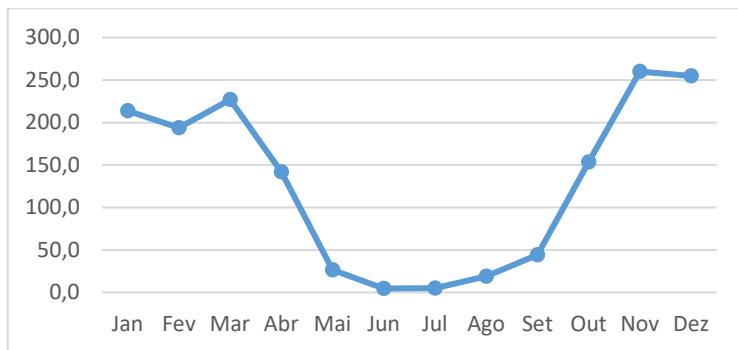


Figura 3.26: Precipitação mensal média do DF de 1989-2018, em milímetros.

Fonte: Adaptado de INMET (2018)

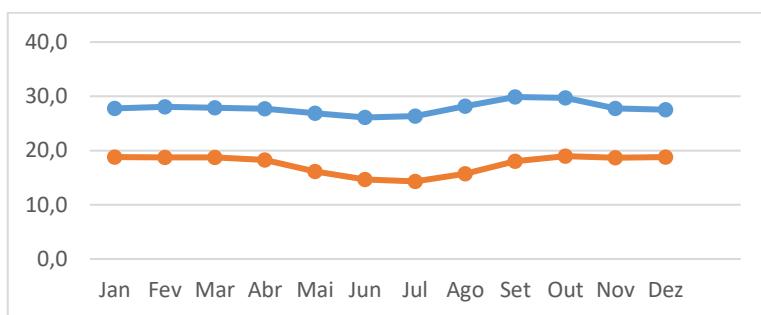


Figura 3.27 Temperatura máximas e mínimas mensais do DF de 1989-2018, em graus Célsius.

Fonte: Adaptado de INMET (2018)

Conforme os dados do INMET (2018) os níveis de precipitação são elevados no Distrito Federal para os meses de outubro a maio e muito baixos para os meses de maio a setembro. Isso indica a existência de duas estações do ano bem definidas: a primeira úmida durante os meses de outubro a abril correspondentes ao verão e à primavera, a segunda seca durante o inverno e outono. Além disso, a temperatura é bastante estável com as temperaturas médias mensais máximas e mínimas próximas de trinta e 20 graus, respectivamente, e com variações em torno de cinco graus.

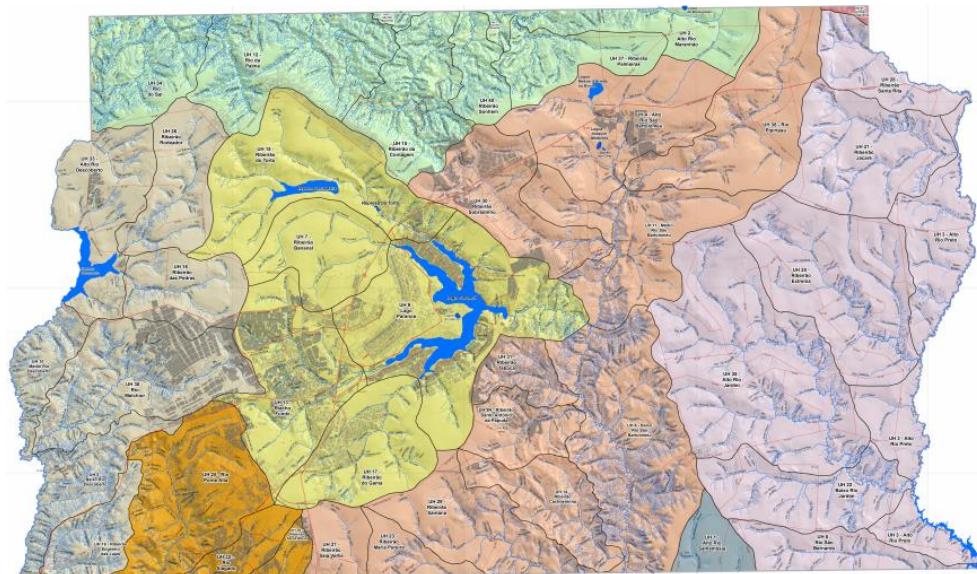
De acordo com a classificação de Köppen, o Distrito Federal possui clima tropical de savana (Aw) que pode ser subdividido em megatérmico e em mesotérmico. O Clima tropical de savana e tropical de altitude é caracterizado por temperatura para o mês mais frio superior a 18°C, período chuvoso durante o verão e estiagem durante o inverno, sendo que o mês mais frio ocorre menos do que 60 mm de precipitação. Esse clima é característico de altitudes abaixo de 1000 metros. Outras subdivisões climáticas Cwa e Cwb ocorrem em função das temperaturas médias dos meses mais frio e mais quente, se elas são superiores ou inferiores a 18 e a 22°C, respectivamente. Como a temperatura está relacionada à altitude, a fronteira

entre as duas divisões ocorre, aproximadamente, na altitude de 1200 metros. (EMBRAPA, 1978)

3.6.7. Hidrografia e hidrogeologia

O Distrito Federal está localizado sobre a cabeceira de três importantes regiões hidrográficas nacionais: as bacias do Tocantins/Araguaia, do Paraná e do São Francisco. No seu território, existem oito bacias hidrográficas, subdivididas em 41 unidades hidrográficas. As oito bacias hidrográficas pertencem aos rios São Bartolomeu, Paranoá, Corumbá, Descoberto e São Marcos, membros da região hidrográfica do Paraná, aos rios Maranhão e Paraná, integrantes da região hidrográfica do Tocantins/Araguaia, e ao rio Preto, único componente da região hidrográfica do São Francisco (SEMA, 2016).

No Distrito Federal, ocorre o predomínio de rios sobre os lagos. Existem somente as lagoas Bonita e Joaquim Medeiros de origem natural, os lagos Paranoá, Santa Maria e Descoberto foram criados posteriormente. O regime hidrológico possibilita aos rios, em sua grande maioria, manterem vazão de água ao longo de todo o ano, sendo caracterizados como perenes. O relevo da região permite caracterizar os rios como de planalto, com corredeiras e quedas de água frequentes (BAPTISTA, 1997).



| | |
|---|--|
| Região Hidrográfica São Francisco | Bacia Hidrográfica do Rio Preto |
| Região Hidrográfica Tocantins/Araguaia | Bacia Hidrográfica do Rio Paraná Bacia Hidrográfica do Rio Maranhão |
| Região Hidrográfica Paraná | Bacia Hidrográfica do Rio Descoberto Bacia Hidrográfica do Rio Corumbá Bacia Hidrográfica do Rio Paranoá |
| | Bacia Hidrográfica do Rio São Bartolomeu Bacia Hidrográfica do Rio São Marcos |

Figura 3.28: Mapa hidrográfico do Distrito Federal de 2016
Fonte: SEMA (2016)

O Distrito Federal está situado na província hidrogeológica do Escudo Central, na qual ocorrem aquíferos nas fissuras das rochas cobertas por solos e rochas alteradas com características e espessuras variáveis. O domínio hidrogeológico é dividido em poroso e confinado (ROMÃO; SOUZA, 2006).

No Distrito Federal, o domínio poroso é caracterizado pelo acúmulo de água nos solos, nos saprolitos e nos aluviões. Os aquíferos presentes nesse domínio são livres ou suspensos e variam de poucos centímetros até 80 metros de espessura, situado geralmente entre 15 a 25 metros de altura. Outro parâmetro importante, além da espessura da camada saturada, é a condutividade hidráulica. Em função desses parâmetros os aquíferos de domínio poroso são classificados em P₁, P₂, P₃ e P₄ (CAMPOS, 2004).

O domínio fraturado ocorre em meio as fraturas nas rochas. Ele está correlacionado com a geologia local, por isso é divido em quatro conjuntos denominados sistemas aquíferos Paranoá, Canastra, Araxá e Bambuí.

3.6.8. Deslizamentos

No Brasil, desastres relacionados à deslizamentos de terra estão associados principalmente à região da Serra do Mar. No entanto, para as outras regiões do país, nas quais movimentos de massas não são tão frequentes, esses fenômenos não podem ser descartados. O Distrito Federal possui um relevo em grande parte plano, o que o torna menos suscetível, apesar de possuir condições pluviométricas parecidas a dessa região. Entretanto, é crescente o número de áreas suscetíveis (BRAGA, 2015).

Em 2011, a Defesa Civil do Distrito Federal mapeou 26 áreas consideradas de risco em 11 das trinta e uma regiões administrativas. Em 2012, um segundo levantamento indicou que 3,4 mil pessoas vivem em áreas de alto risco em 37 localidades de 16 regiões administrativas (BRAGA, 2015). Conforme Brandão (2016) baseada em dados do Corpo de Bombeiros Militar do Distrito Federal, foram registrados 36 desabamentos e desmoronamentos em 2012, 42 em 2013, 29 em 2014 e 21 em 2015.

Diversos trabalhos foram realizados para analisar a estabilidade de encostas em diversas localidades do Distrito Federal, para isso foram utilizados diferentes métodos.

Azevedo (2015) determinou a probabilidade de ruptura de encostas na Vila Varjão pelo método FOSM. A partir dos resultados, ele obteve valores de até 5% de probabilidade de ruptura em determinadas localidades. O autor utilizou igualmente o modelo SLIDE para identificar a ameaça de deslizamento em uma região entre Ceilândia e Taguatinga. Foram obtidos valores superiores a 50 % em pequenos trechos próximos à cabeceira de drenagem

e com alta declividade. Em uma área da bacia do Ribeirão Contagem, pertencente à Região Administrativa de Sobradinho, Azevedo (2015) identifica pelo método SHALSTAB que 16,6% da área de estudo é classificada como incondicionalmente instável e apresentam mais do que 50 % de probabilidade de escorregamentos raso.

Azevedo *et al.* (2018) aplica um modelo tridimensional de estabilidade de taludes para obter a suscetibilidade de ruptura dos taludes em uma área entre Sobradinho e o Lago Norte. Braga (2015) analisa geomorfológica e geotecnicalemente diferentes encostas da bacia hidrográfica do Ribeirão Contagem. Braga *et al.* (2017) identificam posteriormente até 15 feições de deslizamentos dentro da bacia do Ribeirão Contagem. Roque e Souza (2008) utilizam o modelo racional para analisar a estabilidade de talude da região de Taquari. Hussein e Carvajal (2017) descrevem a resposta de um microtremor em função de um movimento de massa lento igualmente na bacia do Ribeirão Contagem.

3.6.9. Processos Erosivos

O Distrito Federal possui em seu território grande suscetibilidade para processos erosivos. Conforme o Zoneamento Ecológico-Econômico (2016), áreas de risco muito alto atingem até 31 % território da Unidade da Federação.

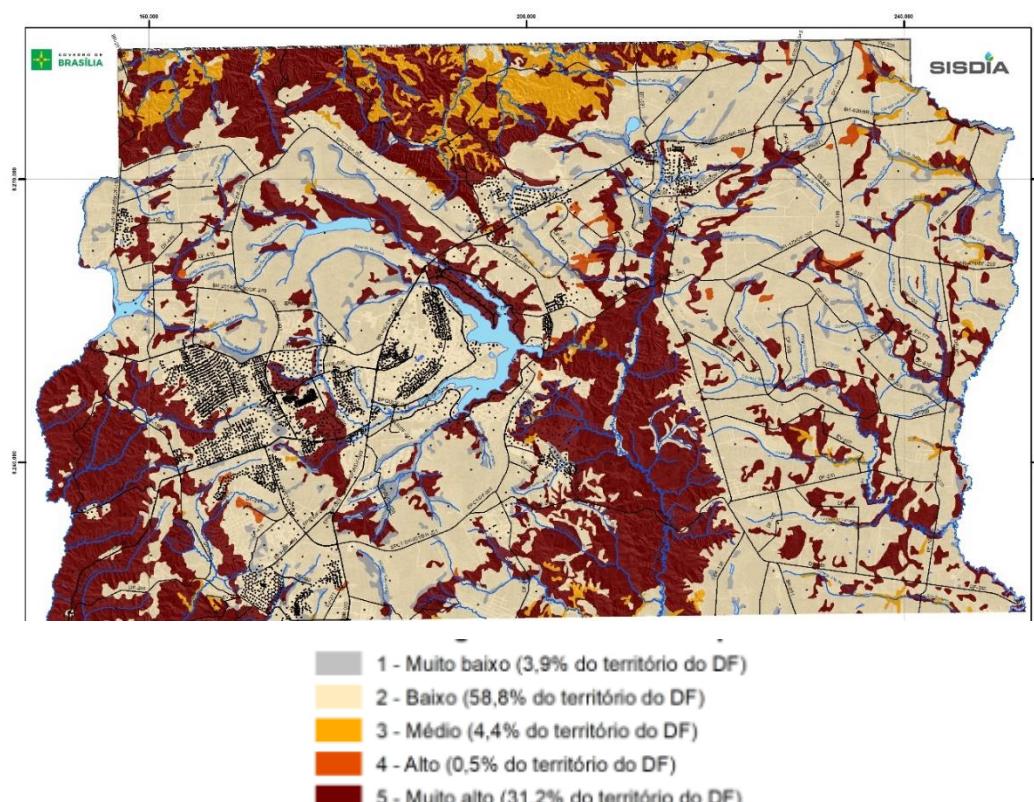


Figura 3.29: Risco ecológico de perda de solo por erosão

Fonte: ZEE (2017)

O Zoneamento ecológico-econômico do Distrito Federal é um instrumento estratégico de planejamento e gestão territorial que se tornou lei no início de 2019. O objetivo é orientar políticas públicas voltadas para o desenvolvimento socioeconômico sustentável e à melhoria da qualidade de vida da população (DISTRITO FEDERAL, 2019)

O desenvolvimento da agricultura sem os devidos cuidados de conservação do solo possibilita a remoção da camada superficial do solo. Isso gera a longo prazo perda dos nutrientes e da produtividade do solo. No Distrito Federal, esse problema ocorre entre outros lugares nas regiões dos rios Preto e São Bartolomeu com o uso do solo para a agricultura de soja e de subsistência. (BAPTISTA, 1997)

De acordo com Chaves *et al.* (1996), a erosão no Distrito Federal possui grande variabilidade espacial e temporal. Os autores quantificaram os processos erosivos seguindo a metodologia de Wischmeier e Smith (1978) para os anos de 1953, 1986 e 1991 e obtiveram valores que vão de 2t/ha.ano até 50 t/ha.ano.

Além deste trabalho, diversos outros foram conduzidos para o cadastro, para a avaliação e quantificação dos processos erosivos no Distrito Federal e possibilitaram aumentar o conhecimento acerca desses fenômenos. Com relação ao cadastramento, Martins *et al.* (2006) afirma que, além de melhorar o conhecimento sobre a dinâmica e as relações existentes entre a erosão e o ambiente, permite a avaliação das áreas de risco e constitui o primeiro passo para a recuperação.

Martins (2005) identificou 1252 feições erosivas, após trabalho de campo esse número reduziu um pouco por causa de áreas de empréstimos e de solos expostos. Entretanto, ainda foi observado um número elevado que a autora correlacionou com ocupação urbana desordenada, uso agrícola, cortes e aberturas para estradas, que também estimulam o primeiro fator. Os locais mais suscetíveis a erosões, além do perímetro urbano foram os campos e o solo exposto.

Arcaya (2007) observa quanto ela 1582 feições de processos erosivos, concentrados nas Regiões administrativas de Sobradinho, Ceilândia, Gama, Brazlândia e São Sebastião. A autora também correlacionou a presença de processos erosivos, dentre os quais as voçorocas com a presença de estradas, área urbana e campos.

Braga *et al.*(2017) mapeou digitalmente 189 feições erosivas, voçorocas, ravinas e sulcos, na bacia do Ribeirão Contagem. A partir disso, ela observou relações entre as ocorrências, o uso do solo, o tipo de solo, a declividade, entre outros. Oliveira (2011) mapeou as voçorocas para todo o Distrito Federal.

Baptista (1997) utilizou o método de Wischmeier e Smith (1978) para uma análise qualitativa da perda de solo por erosão. Com base nisso, ele estabeleceu critérios para avaliação dos impactos, principalmente com relação à profundidade do solo e propôs medidas a serem tomadas que consistiam normalmente em uma melhor prática agrícola.



Figura 3.30: Processo erosivo decorrente de desmatamento.
Fonte: Martins (2005)

4. Metodologia

A revisão bibliográfica possibilitou verificar a importância do setor de transportes para o Brasil, em especial das rodovias. Estas possuem um papel significativo para o crescimento econômico e o desenvolvimento regional. Para garantir esses benefícios e a qualidade do sistema rodoviário, a Política Nacional de Transportes possui como princípios o planejamento e integridade territorial, infraestrutura sustentável, eficiência logística, desenvolvimento econômico, social e regional e responsabilidade socioambiental.

Entretanto, foi também observada a relação entre a rodovia e o meio físico, dentre os quais podem listar a influência no relevo e na vegetação e a situação geológica, geotécnica e geomorfológica do ambiente em que se insere a rodovia. A interação das rodovias com o esse ambiente e, em alguns casos, a ação do homem no seu entorno as tornam sujeitas a fenômenos geodinâmicos como movimentos de massas e a processos erosivos.

Para a correta avaliação da situação em que se encontra a rodovia, foram verificados os conceitos de suscetibilidade e risco. Inicialmente, foram considerados os principais conceitos com respeito ao tema. Em seguida, foram observados alguns métodos para a avaliação da suscetibilidade e risco a erosão e a deslizamentos.

Com o intuito de auxiliar na interpretação dos dados, a cartografia possui a vantagem de facilitar a agregação de grandes quantidades de dados e a visualização da sua distribuição espacial. Essa integração lhe fornece uma maior capacidade de análise dos parâmetros presentes no meio físico e facilita a avaliação de suscetibilidade e de risco. Todas essas características das cartas geotécnicas as tornam instrumento muitos úteis para o planejamento.

Com base no objetivo deste trabalho de identificação das áreas suscetíveis a processos erosivos e a deslizamentos, assim como das consequências, foi adotada a seguinte metodologia para a coleta de dados e elaboração das cartas de suscetibilidade e de risco.

A primeira etapa consistiu na escolha e na caracterização da área de estudo. Ela envolve a coleta de maior número de informações disponíveis sobre o terreno. Estas informações são os elementos e atributos do meio físico, identificados na revisão bibliográfica, que contribuem para a ocorrência de deslizamentos e de processos erosivos. Os elementos em questão correspondem à geologia, geomorfologia, topografia, vegetação e ao uso do solo. Eles fornecem os subsídios para a elaboração dos modelos que avaliam a suscetibilidade e o risco a erosão e a deslizamentos.

A segunda etapa compreendeu a elaboração dos mapas auxiliares e na execução dos modelos escolhidos. Os mapas auxiliares desenvolvem os dados iniciais coletados para extrair deles informações necessárias para a execução dos modelos ou gerar novos dados para a análise. Os dados importantes gerados nessa etapa são os de altimetria, declividade e fluxo acumulado.

A terceira etapa abrangeu a execução dos modelos de suscetibilidade e de risco a erosão e deslizamento. Para o cálculo da suscetibilidade ao deslizamento foi adotado o método de equilíbrio das forças como utilizado por Roque e Souza (2008). Para a suscetibilidade a erosão foi utilizada a Equação Universal de Perda de Solos de Wischmeier e Smith (1978). Em seguida, foram estabelecidos os critérios para a avaliação dos riscos. No final dessa etapa, foram geradas as cartas de risco e de suscetibilidade desejadas. Nessa etapa, foi utilizado o software ArcGis para auxiliar nas etapas de geoprocessamento e de cálculo.

A quarta etapa apresenta as análises dos resultados obtidos. Nessa etapa, é esperado localizar os principais locais em torno da rodovia sujeitos a deslizamentos e a erosões. Com base nesse resultado foram analisadas as possíveis consequências. Além disso, são comparados os

resultados finais obtidos, com os dados iniciais e com os esperados, a partir da revisão bibliográfica. Por fim, foram sugeridas as recomendações para medidas a serem tomadas e para outros trabalhos.

5. Área de estudo

5.1. Escolha

A rodovia escolhida para esse trabalho é um trecho da BR 251 do quilometro 13 e 900 metros ao 42 e 100 metros. A escolha é baseada em diversos elementos. Rodovias federais estão geralmente associadas a uma relevância maior, de caráter nacional. Dessa forma, problemas gerados em rodovias federais tendem a gerar mais impactos para a população. Em seguida, ela é uma importante via de comunicação entre o Plano Piloto e a região oeste do DF com a região Sudeste e com Minas Gerais, mais especificamente Unaí. O Plano Nacional de Contagem de Tráfego (2017) do DNIT contabilizou 4515 veículos médios diário anual em ambos os sentidos, desta rodovia.

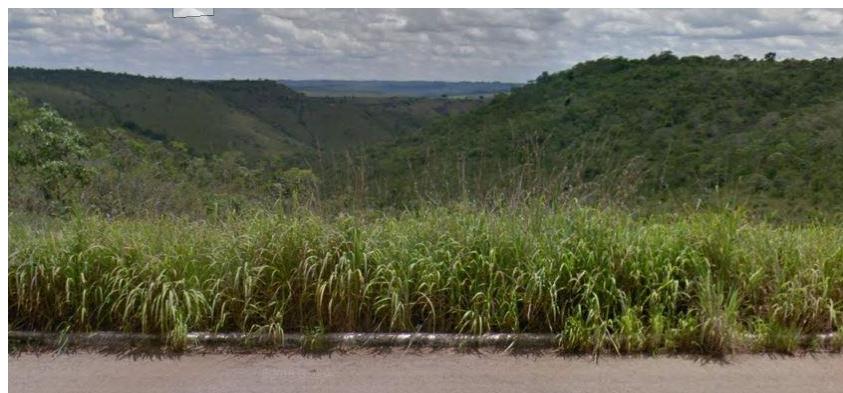


Figura 5.1: Vista do relevo a partir da BR 251
Fonte: Google Street View (2019)

O outro motivo da escolha é por causa da grande variação de relevo nesse trecho. Além disso, a região é drenada por vários de córregos que geram muitas vertentes. Algumas delas muito íngremes em certos pontos o que facilita a ocorrência de deslizamentos e favorece o processo erosivo. Ocorre também na região a localização diversas atividades como pastagem, agricultura e chácaras que afetam o fenômeno erosivo de diferentes modos. Há igualmente regiões de cerrado e de mata galeria preservados. Entretanto, acontece uma evolução urbana proveniente de São Sebastião que começa a ocupar novas áreas próximas das vertentes.

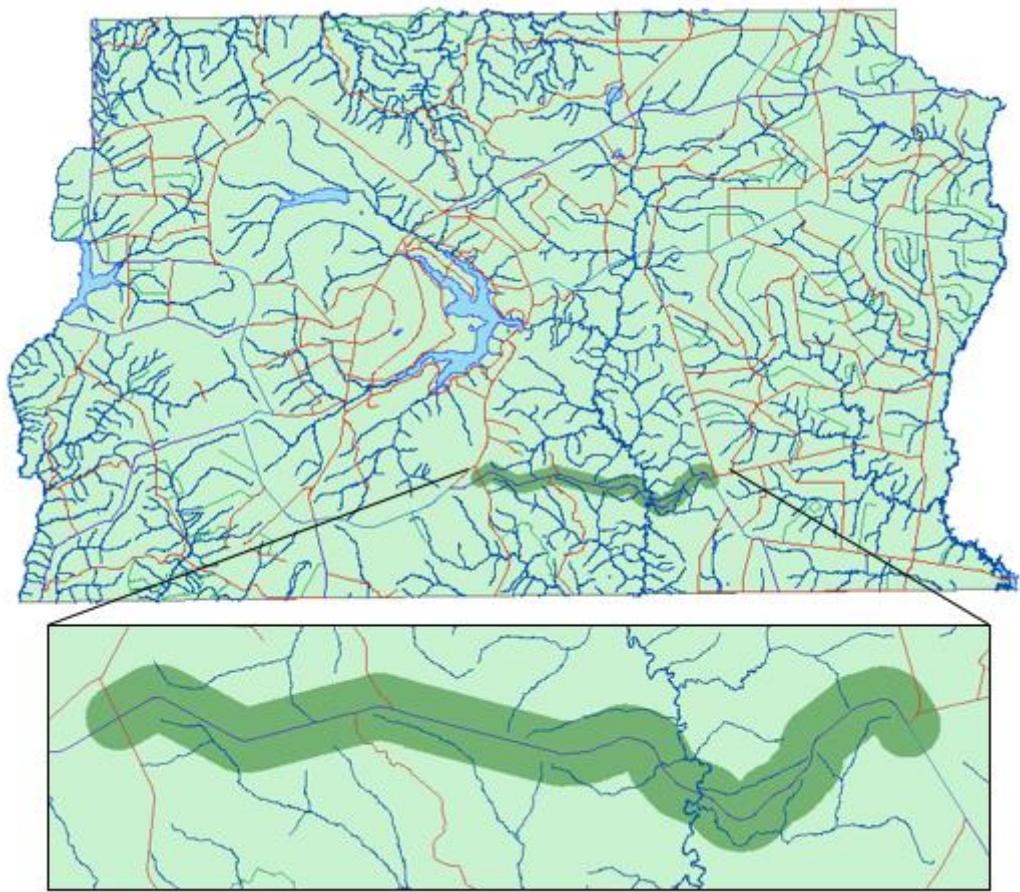


Figura 5.2: Localização da área de estudo (verde escuro) no Distrito Federal

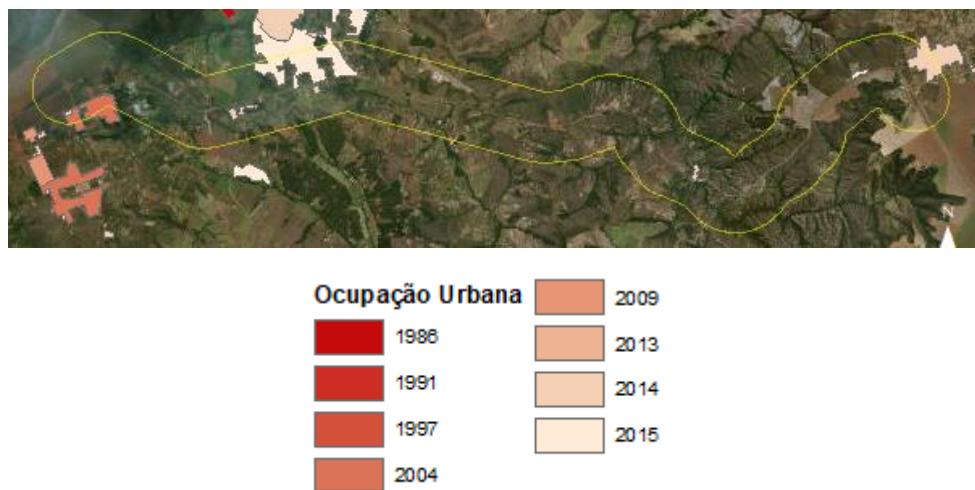


Figura 5.3: Evolução urbana em torno da área de estudo.

A área de estudo abrange uma área de um quilômetro entorno da rodovia, do mesmo modo que em Fernandes e Cerri (2011). A rodovia atravessa trechos planos e inclinados. No entanto, ela afeta a paisagem em diversas localidades, por necessitar de cortes e de aterros. De uma forma geral, a rodovia é de boa qualidade com sarjetas para a captação e o

escoamento da água. Entretanto, ainda é identificada a ocorrência em determinados locais de processos erosivos intensos.



Figura 5.4: Rodovia BR 251 e corte no terreno
Fonte: Google Street View (2019)

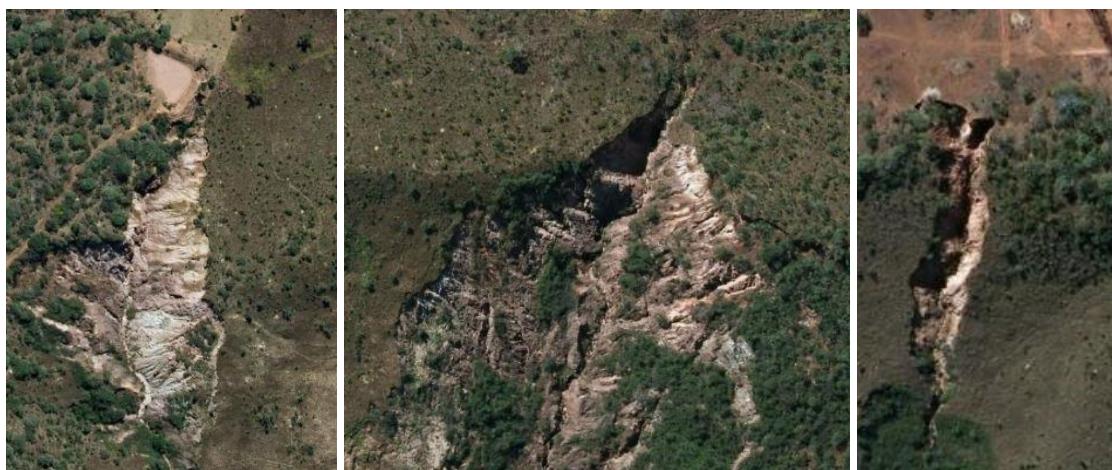


Figura 5.5: Processos Erosivos intensos na área de estudo
Fonte: SEDUH (2019)

5.2. Coleta de dados

Os dados foram coletados em bases governamentais e em trabalhos de pesquisa. A principal base de dados georreferenciados do Distrito Federal está disponibilizada pela Secretaria de Estado de Desenvolvimento Urbano e Habitação, SEDUH, no GeoPortal. A partir desse site foram retirados os dados georreferenciados de limite do Distrito Federal, as curvas de nível de 5 metros, os cursos de água, as rodovias, a vegetação e a evolução da ocupação urbana. Todos os dados coletados dessa base estão referenciados em SIRGAS 2000 UTM Zona 23 Sul. A delimitação da área de estudo foi feita com base na camada de rodovias obtidas no GeoPortal. Foram selecionados os trechos correspondentes à área desejada e aplicado a ferramenta buffer do ArcGis. Dessa forma, obteve-se uma camada shapefile que engloba toda a área distante de um quilômetro dos trechos selecionados.

A mapa de solos foi obtido da base de dados do IBGE em escala 1:250.000. A geologia é obtida a partir do trabalho de Freitas e Silva-Campos (1998). A geomorfologia é obtida da base de dados da ZEE (2011).

As propriedades dos solos, como a coesão, o ângulo de atrito, a erodibilidade e a espessura do solo para a aplicação dos modelos de suscetibilidade não estavam cadastrados em nenhuma base georreferenciada. Por isso, eles são coletados em diversos trabalhos para a posterior associação com a camada de solo.

Além de todos esses dados, foram utilizadas imagens do terreno para a avaliação do que local estudado. Para identificar feições no terreno foram utilizados o próprio mapa de base fornecido pelo ArcGis, o Google Maps e o Google Street View.

5.3. Caracterização da área de estudo

5.3.1. Geologia

O trecho estudado da BR 251 atravessa dois grupos geológicos; os grupos Canastra e Paranoá. O grupo Canastra encontrado na bacia do rio São Bartolomeu ocupa a maior parte da área de estudo. O grupo Paranoá se estende por um pequeno trecho na região mais alta a Oeste. O grupo Canastra é formado por filitos carbonatados. Ele está localizado na parte mais baixa da rodovia, mas abrange ainda a grande maioria da área de estudo, toda a parte leste e central e grande parte da oeste. O grupo Paranoá possui três outras unidades geológicas. Logo na fronteira com a unidade do filito carbonatado existe uma faixa de metarrítimo argiloso, seguida por quartzito médio e, por fim uma área de metarrítimo arenoso.

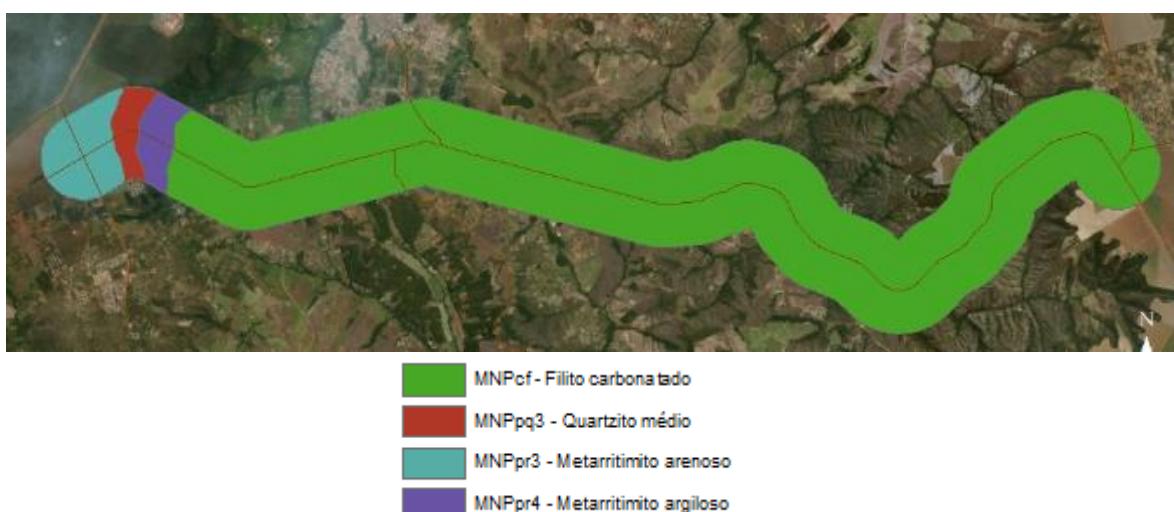


Figura 5.6: Geologia da região.

Com base nesses dados, obtidos de Freitas-Silva e Campos (1998) foi elaborado o mapa geológico da área de projeto na escala 1:100.000 (Apêndice 1). Para isso foi utilizada as ferramentas do ArcGis de definição de projeção e de interseção, para georreferenciar os dados e para delimitar a área de estudo.

5.3.2. Geomorfologia

A geomorfologia é um aspecto importante, pois ela está relacionada ao relevo e à declividade do terreno. Na área de projeto, ocorre predominantemente vale dissecado. Ele está localizado na parte central do trecho. O início e no final do trecho, são áreas de chapadas. Há também áreas escarpadas entre as chapadas e os vales dissecados e em torno de alguns córregos.

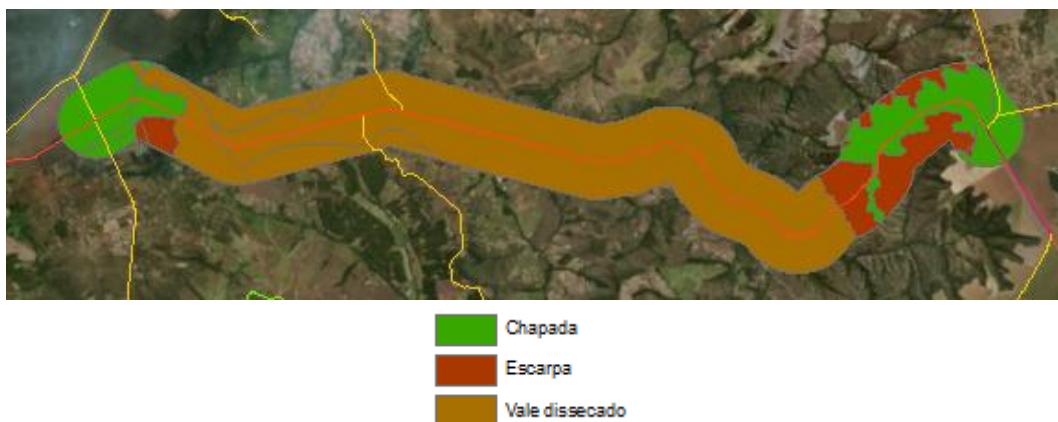


Figura 5.7: Geomorfologia da região.

O mapa geomorfológico (Apêndice 2) é obtido da mesma forma que o geológico. Os dados iniciais são obtidos da ZEE – DF (2011). Ele é feito na escala 1:100.000, com as ferramentas de definição de projeção e de interseção do ArcGis.

5.3.3. Pedologia

A pedologia é o dado mais importante do projeto, pois é sobre o solo que atuam os fenômenos estudados. As propriedades dos solos, características de cada um deles, são fundamentais para avaliar a capacidade do solo de resistir a deslizamentos e a processos erosivos. Os tipos de solos são definidos com base no mapa pedológico, folha 23 S da base de dados do IBGE.

Três tipos de solos são encontrados na área de estudo, os cambissolos, os latossolos e os plintossolos. O cambissolo é do tipo distrófico háplico e ocupa uma grande porção no centro da área de estudo. Os latossolos, muito comuns no Distrito Federal, são encontrados nas variantes vermelho escuro e vermelho-amarelo. Eles ocupam as extremidades das áreas de estudo. O latossolo vermelho está presente tanto a Leste quanto a Oeste da área de estudo,

enquanto o vermelho-amarelo, está presente na parte ocidental e faz a transição entre o latossolo vermelho para o Plintossolo. Os plintossolos são do tipo pétrico concrecionário e ocupam duas faixas ao norte a ao sul da rodovia na porção ocidental. A rodovia não cruza esse tipo de solo. Há também duas pequenas áreas urbanas, para as quais não está caracterizado o tipo de solo.

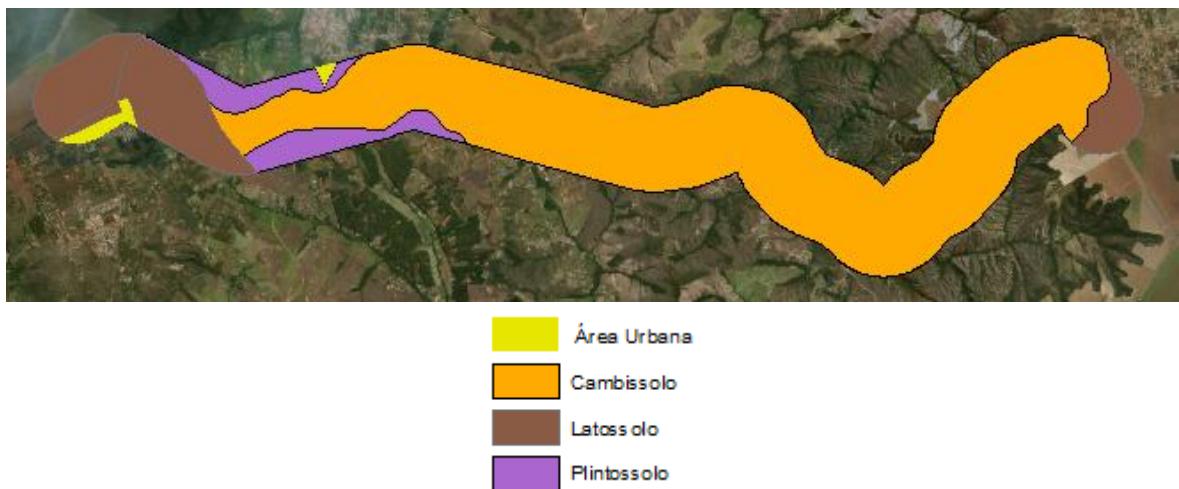


Figura 5.8: Pedologia da área de estudo.

O mapa pedológico (Apêndice 3) é elaborado na escala 1:100.000, praticamente do mesmo modo que os mapas geológicos e geomorfológicos, com a ferramenta de interseção do ArcGis.

5.3.4. Vegetação e uso do solo

A vegetação é fator relevante para o projeto, pois como foi identificado na revisão bibliográfica, ela exerce um importante papel de redução do processo erosivo por meio da interceptação das gotas de chuva, da redução da velocidade de escoamento e no auxílio da infiltração. Além disso, ela contribui para a estabilização do solo em vertentes.

Existe uma grande variedade de vegetação na região, composta por vegetações nativas e alteradas pelo homem. A vegetação nativa está concentrada no vale do rio São Bartolomeu, no centro da área de estudo é formada por matas de galeria, cerrado e campos. As matas estão concentradas nas beiras dos córregos. Áreas de cerrado e campo preservado em locais onde não chegou ainda a ocupação humana, principalmente nas vertentes.

As extremidades leste e oeste da área de estudo já estão ocupadas pelo homem. Há uma evolução em direção ao centro do vale do São Bartolomeu. Estas áreas de ocupação são divididas em áreas urbanas, culturas, pasto e pomares. Há também áreas reflorestadas. A presença humana no centro da área de estudo ocorre principalmente para a pastagem.

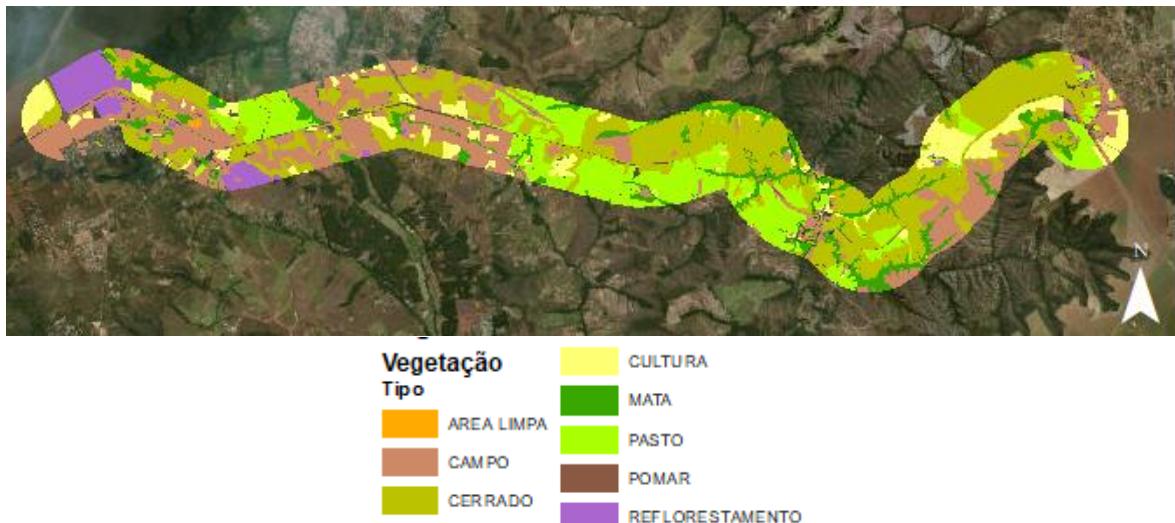


Figura 5.9: Vegetação e Uso do Solo.

O mapa de vegetação (Apêndice 4) é elaborado na escala 1:100.000 de modo semelhante aos mapas geológicos e geomorfológicos. A camada georreferenciada, com a projeção UTM Zona 23 Sul, em *shapefile* para todo o Distrito Federal é fornecida no site GeoPortal do SEDUH. A delimitação para a área de estudo é feita com a ferramenta intersectar do ArcGis.

6. Cartas auxiliares e modelos adotados

6.1. Cartas auxiliares

A elaboração dos mapas auxiliares constitui o início da fase intermediária do projeto. Ela faz a conexão entre os dados coletados inicialmente e a aplicação dos modelos para a avaliação da suscetibilidade e de risco a processos erosivos e deslizamentos. Os mapas auxiliares extraem dos dados iniciais informações adicionais fundamentais para a fase posterior. Estas informações são o relevo, a declividade e o fluxo acumulado da área de estudo.

6.1.1. Carta de Altimetria ou Hipsométrico

Embora não seja utilizado para a avaliação da suscetibilidade e de risco, o mapa de altimetria ou hipsométrico (Apêndice 5) é de grande importância, pois a partir dele é gerado o mapa de declividade e é definida a direção de fluxo. Além disso, ele possibilita analisar melhor a situação do terreno.

A altimetria do terreno foi gerada a partir dos dados de curvas de nível de 5 metros coletados na fase anterior. As curvas de nível utilizadas estão disponíveis em formato *shapefile* georreferenciado no GeoPortal. A fim de obter valores mais reais para a área de estudo e evitar desconsiderar influências externas a ela, como por exemplo o fluxo de água, nessa

etapa foi utilizada uma área de referência maior de modo que todos os pontos de maiores elevações nas intermediações da área de estudo estejam contidas nessa nova área. A camada de curvas de nível é selecionada para a geração de uma malha triangular (TIN). A grade obtida foi convertida em seguida para um arquivo raster com interpolação linear.

O ArcGis possibilita escolher durante a conversão o número de observações, o que está intimamente ligado ao valor do pixel de saída. É adotado um número de modo que a largura do pixel de saída seja o mais próximo possível de 5 metros. O valor obtido é de 5,0001058 metros. Esse é um parâmetro importante, pois posteriormente durante o uso da ferramenta calculadora raster tamanhos diferentes de pixeis poderiam gerar deformações das imagens. O valor de 5 metros é adotado, porque é o utilizado por Azevedo (2015), além de fornecer uma boa precisão sem ultrapassar a capacidade computacional.

O último procedimento consistiu no tratamento dos valores das classes do raster. Foram adotadas 14 classes de 25 em 25 metros.

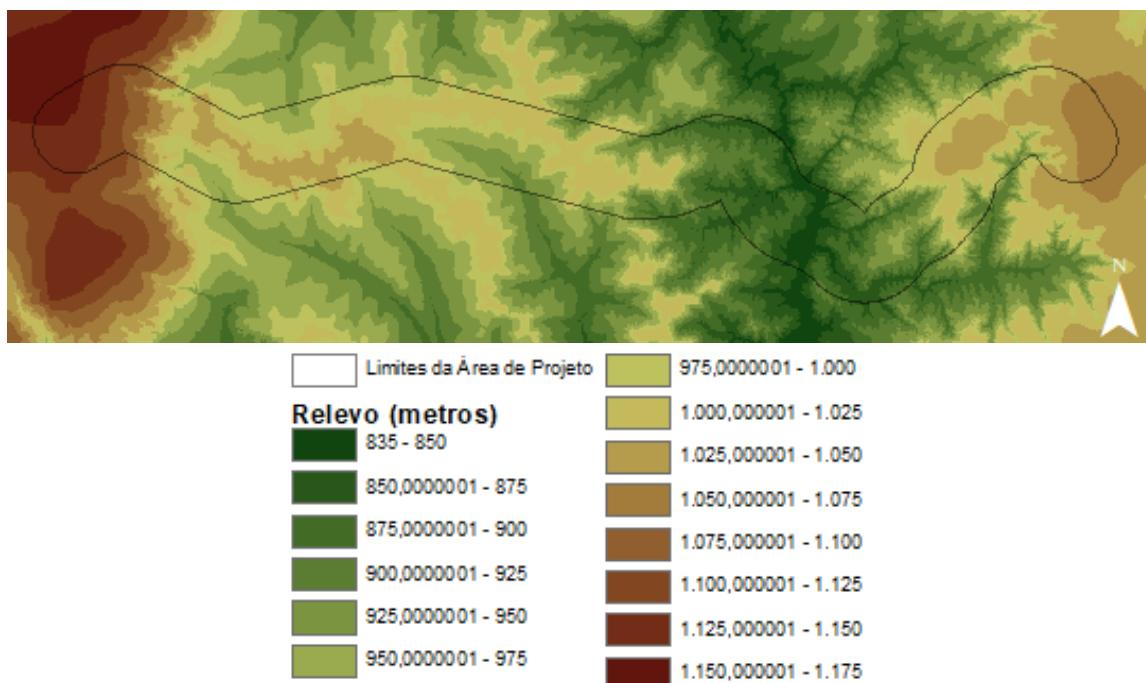


Figura 6.1: Camada Raster de Altimetria da área de estudo.

6.1.2. Carta de Declividade

O mapa de declividade (Apêndice 6) foi produzido com base no mapa de altimetria. Ele também foi feito para a área em volta da de estudo. A partir do mapa de altimetria, o procedimento para a obtenção da declividade é simples. Para isso foi empregada a ferramenta *slope* do ArcGis. O resultado de saída é uma camada raster, que pode ser no

formato graus ou em porcentagem. São geradas camadas com as declividades nos dois formatos, o primeiro para os cálculos posteriores e o segundo para a classificação.

A declividade é classificada em seis classes, conforme proposto por Embrapa (1979). Estas classes são com relação ao terreno: Plano (0-3%), Suave-Ondulado (3-8%), Ondulado (8-20%). Forte-Ondulado (20-45%), Montanhoso (45-75%), Escarpado (>75%).

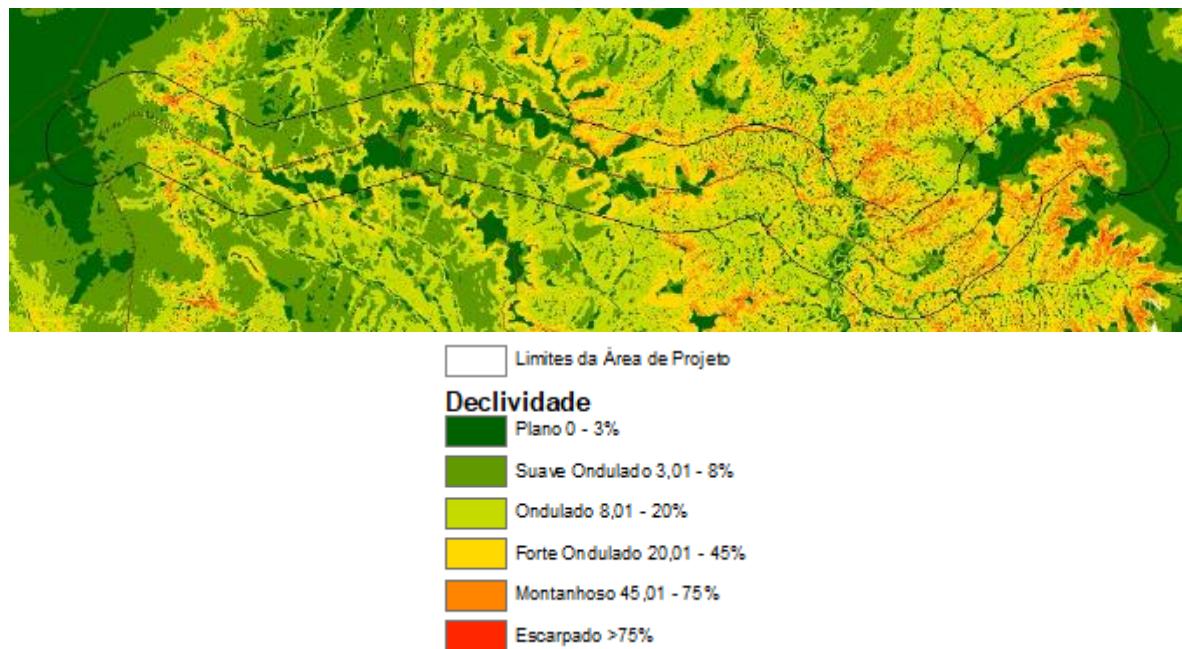


Figura 6.2: Camada Raster de Declividade.

6.1.3. Direção de fluxo e Acúmulo de fluxo

A direção de fluxo e o acúmulo de fluxo são também obtidos a partir do mapa de altimetria. Eles possibilitam avaliar o fluxo de água nas encostas, o que afeta a capacidade da água de transportar grãos de solo e provocar erosão. A direção de fluxo é obtida pela ferramenta homônima. O programa compara os valores de altimetria armazenados em cada pixel com os do entorno e escolhe o menor para conferir a direção de fluxo, ele fornece, em seguida um valor associado a cada direção. É criado uma camada raster com os resultados da análise. A partir desta camada, é gerada a camada de acúmulo de fluxo, com a ferramenta de mesmo nome. Neste caso, o programa soma pixels em função das direções da camada obtida anteriormente. Com esse procedimento, foram obtidas as camadas com os dados de direção e de acúmulo de fluxo.

A direção de fluxo é classificada em nove classes para melhor visualização. Classe 1(0-5 píxeis), Classe 2: (5-10 píxeis), Classe 3: (10-25 píxeis), Classe 4 (25-50 píxeis), Classe 5 (50-100 píxeis), Classe 6 (100-250 píxeis), Classe 7 (250-500 píxeis), Classe 8 (500-1000 píxeis), Classe 9 (>1000 píxeis).

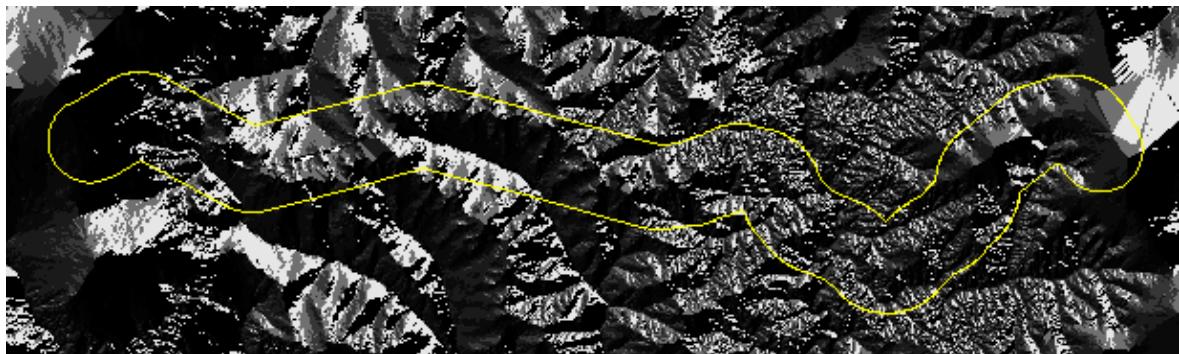


Figura 6.3: Camada Raster de Direção de fluxo.

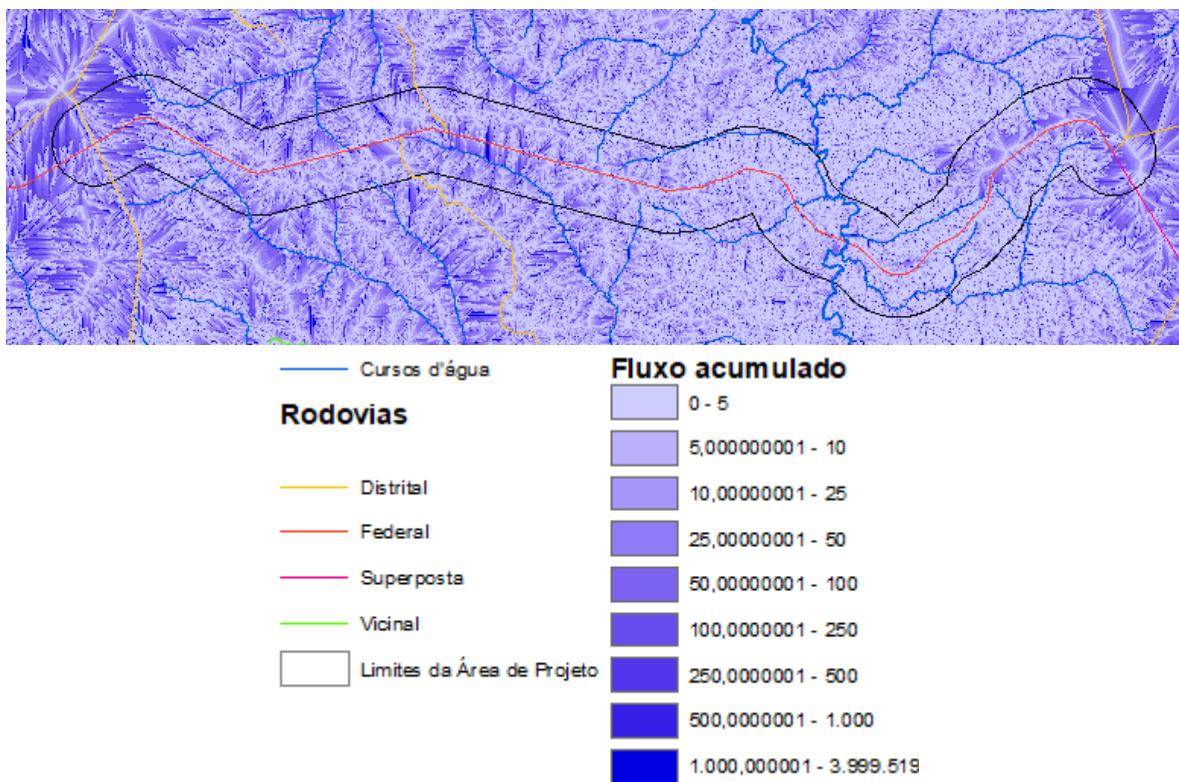


Figura 6.4: Camada Raster de Fluxo Acumulado. com os Córregos e Rodovias.

6.2 Modelos e suscetibilidade e de risco

6.2.1. Deslizamentos

Como indicado em Embrapa (1978), os solos da região são rasos, entorno de 1 metro de espessura. Por esse motivo a avaliação da suscetibilidade ao deslizamento é feita para deslizamentos planares rasos. O modelo utilizado para tal fim é racional baseado no critério de Mohr-Coulomb. Ele foi aplicado para análise das condições de ocupação urbana da região de Taquari também no Distrito Federal. Ele é baseado no cálculo de um fator de segurança para a estabilidade de um bloco de solo no qual atuam a força peso atuante e a força de atrito resistente.

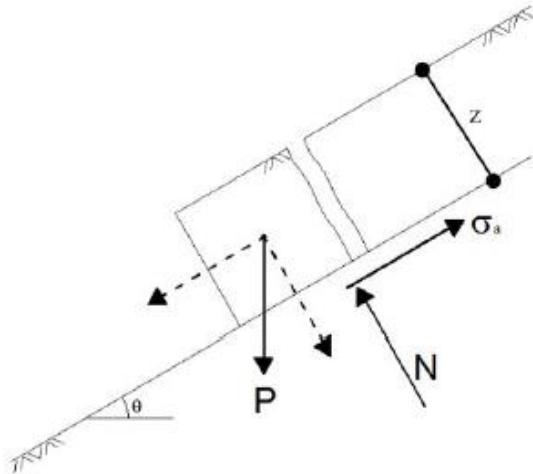


Figura 6.5: Esquema representativo do modelo.

Fonte: Roque e Souza (2008)

Onde:

$$N = P \cos \theta \quad (6.1)$$

$$\sigma_a = P \sin \theta \quad (6.2)$$

$$FS = \frac{\tau_r}{\tau_a} \quad (6.3)$$

$$\tau_r = Pz \cos \theta \tan \phi + c = \gamma z \cos \theta \tan \phi + c \quad (6.4)$$

$$\tau_a = Pz \sin \theta = \gamma z \sin \theta \quad (6.5)$$

Onde, P é o peso do bloco por área unitária em kN/m^3 , N é a força normal ao bloco, σ_a é a tensão no plano do deslizamento em kN/m^2 , z é a espessura do bloco em metro, FS é o fator de segurança, τ_r é a tensão cisalhante resistente em kN/m^2 , τ_a é a tensão cisalhante resistente em kN/m^3 , θ é a inclinação do talude, γ é o peso específico do solo em kN/m^3 , ϕ é o ângulo de atrito do solo, c é coesão do solo.

Para a execução do modelo a espessura dos solos foi obtida de Embrapa (1978), a qual realizou o levantamento de dois perfis de latossolos na área de projeto ou próxima com 1,2 metros de profundidade. Para os cambissolos, há também dois perfis, um com um metro de espessura coletada no quilômetro 27 e outra no quilômetro 22,9. É adotada a espessura de cambissolo igual a 1 metro, pois é o valor mais crítico para o cálculo do fator de segurança. Embrapa (1978) fornece somente uma amostra de 0,60 cm de laterita hidromórfica para espessuras de plintossolo, entretanto essa amostra está muito distante da área de projeto. Por isso, para se aproximar aos outros solos e pela segurança, é adotado o valor de um metro.

Os parâmetros dos solos utilizados são baseados em Azevedo *et al* (2018) e em Roque e Souza (2008). Para ser a favor da segurança são utilizados os parâmetros efetivos do solo.

Tabela 6.1: Parâmetros de solos utilizados (AZEVEDO *et al.* (2018), ROQUE; SOUZA (2008), EMBRAPA (1978)).

| | Peso específico (kN/m ³) | Ângulo de atrito específico (graus) | Coesão específica (kN/m ²) | Espessura (m) |
|-------------|---|--|---|---------------|
| Latossolo | 15 | 20 | 9 | 1,2 |
| Cambissolo | 15 | 25 | 4,5 | 1 |
| Plintossolo | 15 | 10 | 18 | 1 |

6.2.2. Erosão

O modelo adotado para a erosão é de Wischmeier e Smith (1978), pois é um modelo empírico simples criado nos Estados Unidos para o planejamento da conservação dos solos e dos recursos hídricos que fornece bons resultados e é amplamente utilizado. Para facilitar o cálculo do fator topográfico, é adotada a fórmula de Moore e Burch (1986) descrita por Lima *et al* (2015).

$$LS = \left(\frac{(Fluxo\ acumulado)}{22,13} \right)^{0,4} + \left(\frac{\text{sen}(declividade)}{0,0896} \right)^{1,3} \quad (6.6)$$

A erosividade da chuva é obtida por meio da média da erosividade da chuva calculada para as estações pluviométricas da CAESB da Papuda e da Cabeça de Veado disponibilizado em Baptista (1997). O valor obtido foi de 7961,5 MJ.mm/(ha.ano). Os valores de erodibilidade dos solos são obtidos de Lima *et al* (2015). A erodibilidade de latossolo vermelho é igual a 0,014, de latossolo vermelho-amarelo é de 0,032, de cambissolo é de 0,037 e de plintossolo é de 0,032. A fator de cobertura foi obtido de Baptista (1997), a associação com as camadas é feita da seguinte forma.

Tabela 6.2: Associação das camadas na base de dados aos valores fornecidos por Baptista (1997)

| Uso do solo na base de dados | Uso do solo em Baptista (1997) | Fator CP |
|------------------------------|--------------------------------|----------|
| Cultura | Agricultura | 0,12 |
| Pasto | Pecuária | 0,055 |
| Mata | Mata galeria | 0,00004 |
| Campo | Campo | 0,01 |
| Cerrado | Cerrado | 0,0007 |
| Reflorestamento | Reflorestamento | 0,0001 |
| Área limpa | Campo | 0,01 |
| Pomar | Campo | 0,01 |
| Árvore | Campo | 0,01 |

7. Cartas de suscetibilidade e de risco

7.1. Carta de suscetibilidade e de risco de deslizamentos

O primeiro passo para a realização da carta de suscetibilidade (Apêndice 7) foi associar as propriedades dos solos coletadas à camada correspondente. O ArcGis possibilita criar novas colunas na tabela de atributos e adicionar informações desejadas. Em seguida, foi necessário converter os dados de solo do formato vetorial para o formato raster, para estar no mesmo formato dos dados de declividade e proceder às operações matriciais. Com os dados inseridos e no formato adequado, foi utilizada a ferramenta raster calculator. Ela permite fazer cálculos com dados de camadas distintas pixel a pixel. Em seguida, ela gerou uma nova camada no formato matricial com os resultados obtidos.

Na camada de solos foram criadas colunas para as propriedades geotécnicas dos solos, importantes para a aplicação do modelo e cálculo do fator de segurança. Foram inseridos valores para a coesão específica, espessura, ângulo de atrito específico e de peso específico. Em seguida, foi criada uma camada raster para cada uma dessas propriedades. Foi obtida uma primeira camada para a tensão cisalhante resistente do solo, por meio da inserção da equação 6.4 na calculadora raster e das propriedades de solo. O procedimento foi repetido para a tensão cisalhante atuante, utilizando equação 6.5. Com as duas camadas matriciais obtidas para as tensões cislhantes atuantes e resistentes, foi realizada uma nova operação para o cálculo do fator de segurança com a equação 6.3. Dessa forma, foi obtida a camada raster para o fator de segurança. Em seguida, foi feita a classificação da suscetibilidade. Por

fim, foi feita a conversão do formato da camada para um formato vetorial, que é recortado para a adequação à área de estudo.

A classificação da suscetibilidade foi feita baseada em Roque e Souza (2008). Os autores classificam a estabilidade dos taludes em função do fator de segurança em alta $FS > 2$, média, $1,3 < FS < 2$, e baixa, $FS < 1,3$. Nesse trabalho a classificação da suscetibilidade a deslizamento é feita do seguinte modo: crítica, $FS < 1$, alta, $1 < FS < 1,3$, média, $1,3 < FS < 1,7$, baixa, $1,7 < FS < 2$, e muito baixa, $FS > 2$.

A partir dos dados de suscetibilidade foram geradas as cartas de risco a deslizamentos rasos (Apêndices 8, 9 e 10). Por causa da dificuldade de encontrar dados precisos o suficiente para obter valores de risco confiáveis, é preferível realizar a classificação de riscos com base nas estimativas das consequências. Apesar de não serem tão precisos, os resultados podem ser utilizados como orientação para tomadas de decisões posteriores.

A classificação dos riscos foi realizada de forma subjetiva ao comparar os valores de suscetibilidade com as possíveis consequências de um eventual deslizamento. A seleção de critérios é feita com base na possibilidade causar a morte de pessoas, seguida pela amplitude dos danos materiais. Dessa forma, são adotadas três classes de risco: risco alto, risco médio e risco baixo, conforme a tabela 7.1.

O risco alto corresponde à situação em que um eventual deslizamento gera a morte de pessoas ou prejuízos significativos como a destruição de longos trechos da rodovia, classificados como consequências graves, e a uma alta suscetibilidade de ocorrência. O risco médio corresponde a altos danos materiais ou perdas de vidas humanas, porém com baixa suscetibilidade de ocorrência, ou danos medianamente significativos, como danos a campos e a pastagens em grandes áreas ou curtos trechos de rodovia afetados, e média suscetibilidade. O risco baixo corresponde a suscetibilidades muito baixas, mesmo para eventos com graves consequências, ou a baixas suscetibilidades com consequências médias ou ainda a suscetibilidades médias para eventos com resultados de pouco impacto, como deslizamentos em locais inocupados como matas e cerrados.

A atribuição dos riscos, é feita primeiro pela classe de suscetibilidade muito baixa a qual é conferida o risco baixo. Segundo, pela classe de suscetibilidade baixa, quando à risco para residências ou para grandes extensões da rodovia, é atribuído o valor de risco médio, caso contrário o risco é classificado como baixo. A avaliação da possível destruição de residências é feita pela proximidade da residência identificada na imagem com a área suscetível e em

função da declividade e do relevo, que indicam o sentido do deslizamento. Em seguida, o risco médio e alto é atribuído em função dos critérios especificados.

Tabela 7.1: Classificação dos riscos de deslizamento raso.

| Fator de Segurança | Classe de suscetibilidade | Consequências | | |
|--------------------|---------------------------|---------------|--------|--------|
| | | Leves | Médias | Graves |
| 1,3<FS<1,7 | Médio | baixo | médio | alto |
| 1,7<FS<2 | Baixo | baixo | baixo | médio |
| FS>2 | Muito Baixo | baixo | baixo | baixo |

Com base na consideração das suscetibilidades e das consequências, área predominante é a de risco baixo. Como as áreas de risco estão associadas a possíveis consequências, elas se distinguem da suscetibilidade por possuir uma classe alta. A classe alta de risco é encontrada em poucas situações. Ela ocorre, devido à ocupação próxima de topo beira de encostas com média suscetibilidade ou no pé de vertentes. O risco médio também está associado à ocupação de locais inapropriados. Há longos trechos de rodovias próximos de áreas com média e baixa suscetibilidade. No entanto, foi verificado que se tratam de aterros e de cortes. No primeiro caso, o modelo utilizado não se aplica e, no segundo, não há presença de solo para deslizar.

7.2. Carta de suscetibilidade e carta de risco de erosão

O procedimento para elaboração da carta de suscetibilidade de erosão (Apêndice 11) é semelhante ao utilizado para a carta de suscetibilidade de deslizamento. Foi inserida a erodibilidade do solo na camada de pedologia. Em seguida, foi feita a conversão dos dados para o formato matricial. A ferramenta calculadora raster foi utilizada para a obtenção do fator topográfico por meio da equação 3.10. Com os dados de erosividade da chuva e dos dados de uso do solo, foi calculada a erosividade do solo pela equação de Wischmeier e Smith (1978). A suscetibilidade é classificada, em seguida, em três grupos: alta ($>30 \text{ t/(ha.ano)}$), média (10-30 t/(ha.ano)) e baixa ($<10 \text{ t/(ha.ano)}$)).

Para avaliar as consequências dos processos erosivos na área de estudo e identificar as áreas em situações mais críticas, foi elaborada a carta de risco de erosão. A avaliação do risco foi feita em três categorias em função da tolerância do solo. O valor da tolerância para cada tipo de solo é retirado de Baptista (1997). Ele calcula a tolerância para os solos do Distrito Federal baseado na proposta de Lombardi Neto e Bertone (1975). Ela foi feita baseada na

manutenção dos horizontes A e B do solo, para que ele mantenha sua capacidade de produção econômica e sua integridade.

O risco é considerado alto quando a perda de solo ultrapassa o valor da tolerância, baixo quando é menor do que metade do valor tolerado e médio para os valores intermediários. A obtenção da carta de risco de erosão (Apêndice 12) é obtido pela reclassificação da carta de suscetibilidade em função da perda de solo e da tolerância. Como Baptista (1997) realizou a pesquisa antes da reclassificação dos solos, ele não lista a tolerância específica para os plintossolos. Por isso, é adotado o de solos hidromórficos indiscriminados, pois os plintossolos eram classificados em Embrapa (1978) como lateritas hidromórficas. Ocorre a diferenciação entre os diferentes tipos de latossolos, conforme a antiga classificação da Embrapa (1978), pois de acordo com Baptista (1997), suas propriedade de erodibilidade são significativamente distintas.

Tabela 7.2: Classificação do risco em função da tolerância para cada tipo de solo, baseado em Baptista (1997).

| Risco | Cambissolo | Latossolo Vermelho | Latossolo Vermelho-Amarelo | Plintossolo |
|-------|-------------|--------------------|----------------------------|--------------|
| Baixo | <11,45 | <5,43 | <6,69 | <8,48 |
| Médio | 11,45-22,90 | 5,43-10,86 | 6,69-13,38 | 8,48 - 16,96 |
| Alto | >22,90 | >10,86 | >13,38 | >16,96 |

8. Análise dos Resultados

A etapa de coleta de dados é a base para o resto do projeto. Isso significa que dados com pouca qualidade ou escassos comprometem a precisão dos resultados para o resto do projeto. Como verificado na revisão bibliográfica, movimentos de terra e processos erosivos são fenômenos complexos que envolvem uma grande quantidade de fatores inibidores e facilitadores. Além disso, o impacto da rodovia no ambiente também deve ser considerado, pois ela altera o equilíbrio das condições naturais.

Na etapa de coleta de dados foram coletadas informações sobre as principais características da área de estudo, verificadas durante a revisão bibliográfica. Estas são a geologia, a geomorfologia, a topografia, a pedologia, a vegetação e o uso do solo. Entretanto a precisão dos dados obtidos não foi considerada satisfatória, principalmente com relação à pedologia. Esta é particularmente significativa pois é a partir dela que são inseridos os dados de solo para a realização dos cálculos que forneceram os insumos para as cartas geotécnicas. Embora estivesse originalmente na escala 1:250.000, ela foi adaptada para ser utilizada como base

para a cartas de suscetibilidades, em escala 1:100.000, e para as cartas de riscos de deslizamento raso na escala 1:20.000. Além disso, as propriedades dos solos não foram obtidas por meio de ensaios, mas por meio de referências de outros trabalhos que não se referiam especificamente à área de estudo. Por outro lado, quando havia dados referentes à área de estudo, eles eram escassos, como nos dois perfis de Embrapa (1978) para a determinação da espessura de cambissolos. No caso dos plintossolos, a falta de amostra resultou em um número ainda maior de hipóteses redutoras.

A necessidade de adoção de hipóteses possibilita a execução do modelo, porém compromete a representatividade final do resultado. Entretanto, apesar da falta de dados, ainda foi possível obter os mapas e cartas desejados e realizar a análise dos resultados.

Com relação aos mapas obtidos inicialmente, o mapa geológico indica uma significativa predominância de filito carbonatado. Os outros três grupos, de metarritmito argiloso, quartzito médio e metarritmito arenoso, ocupam uma pequena faixa trecho no extremo oeste da área de estudo. A baixa presença desses grupos dificulta uma análise mais aprofundada do papel atual da geologia para a suscetibilidade a deslizamentos e a erosão. Entretanto, isso não significa que ela deva ser desconsiderada, pois ela é essencial ao longo da história para a formação do relevo, para a geomorfologia e para a pedologia da região.

A geomorfologia é outra característica importante. Ela é dividida em três áreas: escarpa, vales dissecados e chapadas. Os vales dissecados correspondem às áreas com a maior irregularidade do relevo. Isso é provocado pela presença de muitos córregos que ao carregar sedimentos contribuem para o aprofundamento do relevo. O ponto mais baixo da área de projeto corresponde ao vale do rio São Bartolomeu. Isso torna a área de vale dissecado difícil de ser ocupada, o que resulta em grandes áreas de cerrado e de mata preservadas ou na criação de pastagens. As escarpas são caracterizadas por vertentes íngremes, enquanto as chapadas possuem o relevo mais plano. Desse modo, as escarpas são pouco ocupadas e as chapadas são encontradas com maior facilidade a presença de culturas.

O mapa de relevo contribuiu para a visualização dos vales de córregos na área de vales dissecados. A partir do mapa de relevo foi identificado pouca variação de cota altimétrica na região de chapada e um declive mais acentuado próximo ao rio São Bartolomeu. Além disso, é possível perceber a grande variação de altimetria da região intensificada no centro da área de estudo.

Com relação ao mapa de declividade, as maiores declividades são encontradas nas áreas de escarpa. Porém, declividades elevadas também são encontradas na região de vales

dissecados, principalmente entorno de córregos. Nesses locais o solo, como em grande parte da região de vale dissecado é do tipo cambissolo. Os plintossolos são encontrados em um trecho curto a Oeste com declividades pouco intensas em ambos os lados da rodovia.

A partir do mapa de declividade foi possível observar o efeito da rodovia no relevo. Na região oeste, há um trecho grande de rodovia cercado por declividades mais elevadas, ao conferir no Google Street View, foi percebido que se trata de uma região de aterro. Segundo em direção ao Leste, é possível fazer em diversos pontos a mesma observação: grandes declividades próximas das rodovias, o que caracterizam regiões de aterro ou de corte. Ela tende, contudo a diminuir a declividade no sentido longitudinal. Dessa forma, é observado que a rodovia atua significativamente na paisagem aumentando a declividade em um sentido e aplinando no outro.

O mapa de declividade está intimamente ligado à carta de suscetibilidade de deslizamento. As áreas que obtiveram os menores valores de fator de segurança são aquelas com os maiores valores de declividade. Isso era esperado, pois conforme o modelo adotado a declividade representada pelo ângulo de inclinação do talude contribui tanto para a redução da tensão cisalhante resistente quanto para o aumento da tensão cisalhante atuante. As regiões que se destacam nesse aspecto são as áreas escarpadas a Leste e a área próxima ao rio São Bartolomeu.

Conforme a divisão escolhida, a classe mais abrangente é a de fator de segurança muito baixo, seguida por baixo e médio. Não foram obtidos valores de suscetibilidade alta e nem críticos. Há, contudo uma área da carta em vermelho o que indica fatores de segurança abaixo de zero. No entanto, isso é devido à falta de valores da camada de solos, pois essa é uma área urbana, para a qual não estava definido o tipo de solo. Por isso, no cálculo foi adotado propriedades nulas para o solo, o que resultou em uma tensão cisalhante nula.

A região que mais apresentou suscetibilidade baixa e média está situada na região centro-leste da área de estudo. Na área oeste, há ocorrência das classes médias e baixas em menor grau e mais espalhadas. A maior parte da área suscetível baixa e medianamente a deslizamentos rasos está localizada em cambissolos, em menor grau nos latossolos e praticamente não há área suscetível em plintossolo. Do ponto de vista geomorfológico, a área de escarpas apresenta a maior suscetibilidade seguida pelo vale dissecado. As áreas de chapadas não fornecem dados de muito baixa suscetibilidade, em poucos e curtos trechos ela possui baixa suscetibilidade. Trechos consideráveis em torno das rodovias, apresentaram

suscetibilidade média ou baixa. Entretanto, após verificação no Google Street View, é constatado que se trata de regiões de corte e de aterro da rodovia.

Geralmente os lugares com maiores suscetibilidades, estão localizados nas bordas de córregos, onde há mata galeria. Do ponto de vista geológico, as áreas mais suscetíveis estão em sua grande maioria em área de metarrítmito localizadas em áreas de filitos carbonatos. Há ainda alguns locais com suscetibilidade média e baixa estão situados em áreas urbanas, porém nesses ambientes a mata ainda é preservada.

Uma outra característica importante para a análise da suscetibilidade a deslizamento são as propriedades dos solos. Um parâmetro que se destaca é a coesão específica dos solos, por causa da maior variação. Os cambissolos apresentam coesão específica muito baixa o que associado à ocorrência de declividades mais elevadas, explica o motivo dele possuir os fatores de segurança mais baixos. Os latossolos e os plintossolos, apesar de possuírem ângulos de atrito específicos menos elevados não são tão suscetíveis à ocorrência de deslizamento.

De um modo geral, a área de estudo é pouco suscetível a deslizamentos rasos. Ela pode ser considerada ainda menos suscetível ser feita a consideração de que a as regiões com maiores declividades estão localizadas em volta dos córregos, onde há também as matas. As raízes das árvores atuam como estabilizadoras de solo, o que diminui a possibilidade dele se movimentar. Essa consideração não foi feita no cálculo da suscetibilidade.

A pouca suscetibilidade a deslizamentos afeta significativamente a avaliação dos riscos. Dessa forma, como a grande parte da área de estudo é composta por áreas com pouca suscetibilidade ao deslizamento, a área com baixo risco de deslizamento também é. Além do mais, a área classificada com baixo risco é ainda maior do que a área de suscetibilidade baixa dada os poucos danos possíveis de serem gerados. O risco é obtido pela associação da declividade com a consequência do movimento de terra. Como muitos dos locais com suscetibilidades médias e baixas estão localizadas próximas de córregos e que a classificação das consequências foi feita com base no risco para pessoas e para a rodovia, elas não apresentavam um risco real para a sociedade. Por isso, foram obtidos poucos locais com riscos médios ou altos.

Por outro lado, a ocupação inadequada de borda de encostas e no pé de vertentes gerou áreas com alto e médio risco. O risco alto está associado à possibilidade de perdas de vidas humanas e de suscetibilidade média. Essas áreas podem ser identificadas nas cartas de risco a deslizamento nos apêndices de 8 a 10. São principalmente casas que se instalaram no pé

da vertente, mas há também um aeródromo e uma região envolta pelo crescimento urbano. Com relação a esta última, a área de risco médio está dentro de uma área de mata, por isso não é recomendado, nem a ocupação dessa área e nem a remoção da vegetação.

É necessário ressaltar que o modelo adotado para a avaliação da suscetibilidade é um modelo simples que não considera, por exemplo a influência da chuva ou a curvatura das vertentes. Por esse motivo, é possível que o fator de segurança real seja menor do que o calculado. Dessa forma, é aconselhado evitar a ocupação de áreas, cuja suscetibilidade esteja classificada como média e até baixa. Caso contrário, é recomendado a execução de ensaios para obtenção precisa de parâmetros e utilização de modelos para a avaliação precisa da segurança do local.

Um outro elemento que pode ser fator de instabilidade de encostas é a erosão. Ao remover o solo, ela pode enfraquecer o contato entre os grãos e diminuir a força resistente ou ainda remover a camada de apoio embaixo das vertentes. Dessa forma, locais suscetíveis a deslizamentos podem se tornar ainda mais, se o local for também suscetível a erosão.

As áreas mais suscetíveis à erosão estão delimitadas na carta de suscetibilidade à erosão. Conforme os resultados obtidos, a área com baixa erosão é predominante. Ela está situada principalmente em áreas mais planas, porém ocorre também em locais com declividades mais elevadas em função do tipo de solo e do uso do solo. O solo que apresenta suscetibilidades mais elevada à erosão é o cambissolo. Ela é mais sensível na região central da área de estudo. No entanto, ocorre também em cambissolos suscetibilidades médias e baixas. Os plintossolos possuem uma área extensa em classe de suscetibilidade média, principalmente próximo da área de crescimento urbano. O latossolo possui em grande parte áreas com baixa suscetibilidade a erosão. Com relação ao uso do solo, as classes que englobam a vegetação nativa, como os cerrados e as matas, possuem suscetibilidades bem menores. Por outro lado, os pastos e as culturas apresentavam os maiores valores, principalmente quando associados a declividades mais acentuadas.

Novamente, os cambissolos em conjunto com os vales dissecados são as camadas com maior suscetibilidade à erosão. Isso é explicado pela associação do processo erosivo com a declividade.

No entanto, embora os dois fenômenos dependam da declividade, eles geram resultados bastante distintos. A distinção mais característica ocorre na borda da região escarpada ao Leste. Nesse local, há altos valores de declividade e alta suscetibilidade a deslizamentos, porém a suscetibilidade a erosão é baixa. Os valores de suscetibilidade alta ficam restritos

ao entorno na região de chapada. Um outro local de análise corresponde ao oeste do vale do rio São Bartolomeu. Nesse local, a região ao norte da rodovia possui maiores valores de suscetibilidade ao deslizamento do que a sul, enquanto para a erosão essa relação se inverte. Ao comparar com o mapa de declividade, em ambas as regiões há declividades na ordem de terreno ondulado, porém na norte há mais valores de terreno forte ondulado e alguns até mesmo escarpado. Isso indica que o deslizamento de terra é mais fortemente condicionado pela declividade do que a erosão.

O elemento responsável por esse comportamento da suscetibilidade do processo erosivo é o uso do solo. No primeiro caso, a região escarpada é ocupada por matas e por cerrado, ao passo que a chapada em volta é ocupada por culturas que possuem valores para os fatores de uso do solo e manejo mais elevados. No segundo caso, a região ao norte da rodovia é ocupada por cerrado, enquanto a sul é por pastos. Dessa forma, manter a vegetação nativa em locais com altas declividades é um fator de controle tanto de deslizamentos quanto de erosão.

Com relação aos solos, os latossolos possuem a maior parte da sua área classificada como baixa suscetibilidade. Isso era o esperado, pois eles apresentam grandes permeabilidades, o que evita o acúmulo e o fluxo de água. As maiores suscetibilidades encontradas em latossolos são categorizadas como médias, à exceção de uma pequena área com alta suscetibilidade, e estão localizadas no aterro da rodovia. O latossolo vermelho, principalmente, apresentou os menores valores de suscetibilidade com apenas algumas áreas de culturas com suscetibilidade média.

A carta de risco à erosão é muito semelhante à carta de suscetibilidade, devido ao processo utilizado de reclassificação em função da tolerância. Inicialmente, é novamente verificado o problema da falta de dados, o que resultou em uma estimativa da tolerância para os plintossolos. Apesar de reduzir a confiabilidade da carta, ela ainda é útil como referência para os plintossolos e para o resto da área de projeto, pois a área ocupada pelos plintossolos é relativamente pequena.

Desse modo, o cambissolo é o tipo de solo que apresenta a maior área com risco alto em termos absolutos e as áreas de pasto e de cultura em conjunto com a declividade contribuem para riscos mais elevados. Entretanto, com base na tolerância adotada, uma importante área ocupada por plintossolo ultrapassa o limite. Os latossolos vermelhos escuros, situados em chapadas, e com pouca suscetibilidade a erosão, apresentam poucas áreas com riscos elevados e médios de erosão. Do ponto de vista geomorfológico se destaca a área de escarpa a Leste da área de estudo com baixo risco, apesar das elevadas declividades.

Além das considerações feitas para a carta de suscetibilidade é possível notar que a classe de risco alto associado a processos erosivos é bem mais relevante do que a de deslizamentos. A diferença notável com relação à carta de suscetibilidade está no lado leste da vale do rio do São Bartolomeu. Nessa região ao sul da rodovia, há uma grande área classificada como de média suscetibilidade, ocupada por campos e com relevo entre montanhoso e forte-ondulado. Na carta de risco, ela passa a ser de risco alto.

Ao comparar como o mapa de risco ecológico por perda de solos fornecidos por ZEE (2016), o presente trabalho possibilitou uma diferenciação melhor para as diferentes áreas da região estudo. Onde no mapa da ZEE (2016) está classificado somente como nível alto de risco, foi possível obter resultados mais variados e uma localização melhor das áreas com risco alto principalmente em função do tipo de solo, da declividade, do uso do solo e da vegetação.

Da mesma forma que deslizamentos, erosão é um fenômeno complexo que envolve muitas variáveis. Para esse trabalho, com os dados coletados, foi feita a análise da erosão laminar para a perda da camada superficial de solo, entretanto há outras manifestações que podem gerar graves consequências, como as voçorocas. Nesse trabalho, não foi possível analisar a suscetibilidade e o risco de voçorocas, nem o assoreamento de corpos hídricos e suas consequências.

Com relação à rodovia, foi possível observar como identificar e compreender sua alteração na paisagem e localizar áreas sensíveis à erosão, como o aterro. Contudo, a partir dos dados obtidos, é possível afirmar que a rodovia está bastante segura e ao longo do seu trecho não há nenhuma área, com base na metodologia adotada e verificação no GoogleStreet View, suscetível alta ou medianamente a deslizamentos e com risco de ser interditada ou de perder sua integridade. Porém, ela cria indiretamente áreas de risco alto. Isso ocorre, pois por ser indutora de crescimento e incentivar a ocupação de suas margens, áreas com alta declividades começam a ser ocupadas para residência ou para criação de pastagens. Esse último por remover a vegetação também reduz a estabilidade das encostas e aumenta os processos erosivos.

Dessa forma, com base nos princípios da Política Nacional de Transportes, a BR 251, no trecho selecionado, não apresenta nenhum local que ameaça a vida de seus usuários em função de risco de deslizamento.

Com relação aos impactos ambientais, há uma região com alta suscetibilidade à erosão causada pelo aterro da rodovia. Não foram identificados outros locais, cujo impacto ambiental é causado diretamente pela rodovia. Ela é responsável indiretamente por pelo

aumento da ocupação de áreas de vertentes, o que gera também impactos ambientais como desmatamento e aumento da erosão. Por isso controlar o uso e a ocupação das margens da rodovia é necessário para garantir sua eficiência e evitar impactos ambientais.

Com relação ao geoprocessamento e SIG, é possível afirmar que o uso do ArcGis, do georreferenciamento e a espacialização das informações contribuiu para a elaboração das cartas e para as análises posteriores. O programa possibilitou reunir em uma base de dados uma grande quantidade de dados de origens diferentes e criar a partir deles novas informações, como os mapas de declividade, de direção de fluxo e de acúmulo de fluxo que foram importantes para a construção dos modelos. Por fim, ele também possibilitou a apresentação dos dados finais de suscetibilidade e de risco à erosão e a deslizamentos na forma de cartas para facilitar a interpretação, a análise e a correlacionar os diferentes tipos de dados.

9. CONCLUSÃO

As rodovias são importantes obras engenharia necessárias para conectar cidades, promover o comércio e o crescimento econômico. Entretanto, por causa de suas características e grandes dimensões, elas atravessam ambientes com diferentes condições geológicas, geomorfológicas, topográficas, pedológicas e com diferentes espécies vegetais e animais. Todos esses processos compõem um sistema que é alterado pela implantação e operação de uma rodovia. Essa alteração pode ser indutora de fenômenos como deslizamentos e processos erosivos.

Este trabalho buscou compreender estes fenômenos para posterior análise de caso. A partir da revisão bibliográfica foram identificados os principais tipos de movimentos de terra e os parâmetros indutores e mitigadores, assim como para os processos erosivos. A partir disso, verificou-se a importância de compreender os fenômenos no espaço, assim como os conceitos de suscetibilidade e de risco. Por isso foram adotadas as cartas geotécnicas como ferramentas de análise. O uso de sistemas de informações geográficas se mostrou de grande auxílio para a elaboração destas.

Em seguida, foi feita a caracterização do Distrito Federal, com a descrição da sua criação, da geologia, da geomorfologia, da pedologia, da vegetação, do clima e da hidrogeologia. Isso ajudou na compreensão da situação do Distrito Federal e para a escolha da área de estudo.

Definida a área de estudo, então foi feita a coleta de dados para a elaboração das cartas geotécnicas de suscetibilidade e de risco. Essa fase apresentou as maiores dificuldades, por causa da falta de dados principalmente geotécnicos e das propriedades do solo e dos mapas com escala menores do que as desejadas.

Embora não foi possível obter a precisão desejada nos objetivos, foi possível elaborar as cartas geotécnicas de suscetibilidade e de risco para processos erosivos e para deslizamentos rasos, com base em modelos mais simples e em hipóteses efetuadas. Os resultados obtidos permitiram identificar as áreas mais suscetíveis com os possíveis danos e as relações entre a vegetação, a ocupação humana, a geomorfologia, os riscos, entre outras. Desse modo, é reconhecido o vínculo entre a declividade e as suscetibilidades ao deslizamento e à erosão. Nesta última, porém, é exercida também uma influência significativa do uso do solo.

Com base nos resultados observados foram identificadas também as áreas com alto risco de deslizamento e de erosão. Para o primeiro, esse resultado foi associado à ocupação inadequada de encostas com suscetibilidades médias de deslizamentos. Por isso, foi recomendado evitar a instalação de residências nesses locais. A carta de suscetibilidade e de risco a erosão possibilitou reconhecer que áreas com matas e cerrados estão menos sujeitas a erosão do que áreas para pastagem ou cultura. Por isso, foi sugerido preservar esses ambientes em locais com altas declividades e próximo dos córregos.

Além disso, foi possível observar a relação da rodovia com a paisagem. Foram identificadas áreas de aterro e de corte que alteraram as condições iniciais do terreno. Isto gerou uma tendência de aumento da declividade transversalmente à rodovia e um aplaíamento longitudinalmente. Como efeito disso, foram reconhecidas áreas com suscetibilidades médias de erosão ao longo de determinado trecho da rodovia.

Dessa forma, apesar dos dados iniciais não tiverem sido com a precisão desejada, os outros objetivos desse trabalho foram atingidos. Foi possível elaborar as cartas de suscetibilidade a erosão e a deslizamentos rasos, assim como os mapas auxiliares. A partir disso, estabeleceu-se as relações entre a suscetibilidade e o risco dos fenômenos estudados, principalmente, com a declividade do terreno, com a pedologia, com a geomorfologia e com uso do solo.

Com base nisso, é sugerido para trabalhos futuros, para a obtenção de dados com melhor qualidade, a execução de ensaios para a obtenção de parâmetros mais confiáveis para os solos. Além disso, é recomendado também o estudo de eventos associados a estes fenômenos

que não puderam ser abordados neste trabalho como as voçorocas e outros tipos de deslizamentos.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICAS

- ALAMEDDINE, N. **Proposição de um Sistema Georreferenciado como Instrumento para a Gestão de Risco: Aplicação a partir do Plano Municipal de Redução de Riscos (PMRR) de Taboão da Serra, SP.** 2009. 130 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Tecnologia Ambiental, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, São Paulo, 2009.
- ARAÚJO, P. C. **Análise da Suscetibilidade a Escorregamentos: Uma Abordagem Probabilística.** 2004. 172 f. Tese (Doutorado) – Curso de Geociências e Meio Ambiente, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2004. 172 p.
- ARCAYA, S. G. C. **Avaliação dos Fatores Condicionantes dos Processos Erosivos no Distrito Federal.** 2007. 207 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Geotecnica, Universidade de Brasília, Brasília, 2007.
- AZEVEDO, G. F. **Sistema de Análise Quantitativa de Risco por Escorregamentos Rasos Deflagrados por Chuvas em Regiões Tropicais.** 2015. 430 f. Tese (Doutorado) - Curso de Geotecnica, Universidade de Brasília, Brasília, 2015.
- AZEVEDO, G. F. *et al.* Análise de Ameaça de Deslizamentos pelo Uso de Abordagem Probabilística Aplicada a um Modelo de Estabilidade de Taludes Tridimensional. **Geociências**, São Paulo, v. 37, n. 3, p.655-668, 2018.
- BAPTISTA, G. M. M.. **Diagnóstico Ambiental da Perda Laminar de Solos, no Distrito Federal, por meio do Geoprocessamento.** 1997. 132 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, Universidade de Brasília, Brasília, 1997.
- BLOISE, G. L. F *et al.* **Avaliação da suscetibilidade natural à erosão dos solos da bacia do Olaria-DF.** Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento 14. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2001. 33 p.
- BRAGA, L. **Análise Geomorfológica e Geotécnica em Encostas Suscetíveis a Processos Erosivos:** Bacia Hidrográfica do Ribeirão Contagem - DF. 2015. 67 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Geografia, Geografia, Universidade de Brasília, Brasília, 2015.

BRAGA, L *et al.* Mapeamento de Feições Erosivas e Análise dos Fatores Controladores da Erosão na Bacia Hidrográfica do Ribeirão Contagem - Distrito Federal. **Espaço & Geografia**, Brasília, v. 20, n. 1, p.99-121, 2017.

BRANDÃO, A. **Texto para discussão: Brasília Cidade Resiliente**. Brasília: CODEPLAN, 2016.

BRASIL. Constituição (1891). **Constituição da República dos Estados Unidos do Brasil**: promulgada em 24 de fevereiro de 1891. Disponível em:< http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/constituicao/constituicao91.htm > Acesso em: 19 de jun. de 2019.

BRASIL. Lei n. 12608, de 10 de abril de 2012. Institui a Política Nacional de Proteção e Defesa Civil – PNPDEC; ; dispõe sobre o Sistema Nacional de Proteção e Defesa Civil - SINPDEC e o Conselho Nacional de Proteção e Defesa Civil - CONPDEC; autoriza a criação de sistema de informações e monitoramento de desastres. Disponível em < http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2011-2014/2012/Lei/L12608.htm >. Acesso em: 25 nov. 2018.

CÂMARA, G.; DAVIS, C. Introdução. In: CÂMARA *et al.* **Introdução à Ciência da Geoinformação**. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2001. p. 1-5.

CÂMARA, G.; MONTEIRO, C. Conceitos Básicos da Ciência da Geoinformação. In: CÂMARA *et al.* **Introdução à Ciência da Geoinformação**. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2001. p. 6-41.

CÂMARA, G. et al. **Anatomia de Sistemas de Informação Geográfica**. Campinas: SBC, Escola de Computação, 1996. 193 p.

CAMPOS, J. E. G.. Hidrogeologia do Distrito Federal: Bases para a Gestão dos Recursos Hídricos Subterrâneos. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v. 34, p.41-48, mar. 2004

CARVALHO, C. S. *et al* (Org.) **Mapeamento de Riscos em Encostas e Margem de Rios** Brasília: Ministério das Cidades/ Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT, 2007. p. 176

CASCINI, L. **Applicability of Landslide susceptibility and Hazard Zoning at different Scales.** *Engineering Geology.* 102. 2008. p.164-177.

CASTRO, C.M. *et al.* **Riscos Ambientais e Geografia: Conceituações, Abordagens e Escalas.** Anuário do Instituto de Geociências -UFRJ. 2005. p. 11- 30.

CERRI, L.E.S. **Carta Geotécnica:** contribuições para uma concepção voltada às necessidades brasileiras. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA, 6, 1990, Salvador. Anais... Salvador: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, 1990, v. 1, p. 35-41.

CERRI, L. E. da S.; AMARAL, C. P. Riscos Geológicos. In: OLIVEIRA. A .M. dos S. , BRITO, S. N. A. (Eds). **Geologia de Engenharia.** São Paulo: ABGE. Cap. 18, p.301-310, 1998.

CHAVES, H. M. L. *et al.* Evolução da Erosão no Distrito Federal no Período de 1953 a 1991. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 8., 1996, Salvador.*Anais...* Salvador: INPE, 1996. p. 99 - 101.

CHRISTOFOLLETTI, A. **Geomorfologia.** São Paulo: Blucher, 1980. 188 p.

COMPANHIA DE PLANEJAMENTO DO DISTRITO FEDERAL (CODEPLAN). **Atlas do Distrito Federal - 2017.** Brasília, 2017.

COMPANHIA DE PLANEJAMENTO DO DISTRITO FEDERAL (CODEPLAN). **Distrito Federal em Síntese:** Informações Socioeconômicas e Geográficas. Brasília, 2013.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. (CNT) **Transporte rodoviário:** desempenho do setor, infraestrutura e investimentos. – Brasília : CNT, 2017. 67 p.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. (CNT) **Plano CNT de Transporte e Logística 2018.** – Brasília: CNT, 2018. 635 p.

COSTA, G. G. da. A Cartografia nos planos diretores do Distrito Federal. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE CARTOGRAFIA HISTÓRICA, 1., 2011, Paraty. *Anais...* Belo Horizonte: UFMG, 2011. p. 1 - 17. Disponível em:

<https://www.ufmg.br/rededemuseus/crch/simposio/trabalhos_completos.htm>.

Acesso em: 26 dez. 2019.

CRUDEN, D. M.; VARNES, D. J. **Landslide Types and Processes**. In: Turner, A. K.; Shuster, R. L. (eds.), *Landslides Investigation and Mitigation*, Transportation Research Board Special Report 247, National Research Council, Washington D. C., p. 36-75, 1996.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT)

Plano Nacional de Contagem de Tráfego. Disponível em: <<http://servicos.dnit.gov.br/dadospnt/ContagemContinua>>. Acesso em: 21 de jun. 2019.

DISTRITO FEDERAL. Lei nº 6269, de 29 de janeiro de 2019. **Institui O Zoneamento Ecológico-econômico do Distrito Federal - ZEE-DF**. Brasília, DF.

DISTRITO FEDERAL. **Plano Diretor de Ordenamento Territorial do Distrito Federal:** Documento Técnico. Brasília, 2017.

EMBRAPA. **Levantamento de Reconhecimento dos Solos do Distrito Federal.** Rio de Janeiro: Embrapa, 1978. 407 p.

FELL, R. *et al.* Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land-use planning. **Engineering Geology**, v.102, p. 83-111, 2008.

FELL, R. *et al.* A Framework for Landslide Risk Assessment and Management. In: HUNGR, O. **Landslide Risk Management, State of the Art Papers**. 1. 2005.

FERNANDES, F. M.; CERRI, L. E. S. Elaboração da Carta Geotécnica de Suscetibilidade de um Trecho da Rodovia Marechal Rondon – SP – 300 (SP, Brasil). **Geociências**, São Paulo: UNESP, v. 30, n. 3, p. 457-465, 2011.

FORNASARI FILHO, N. *et al.*. **Alterações no Meio Físico decorrentes de Obras de Engenharia.** / Fornasari Filho, coordenador *et al.* São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1992. 165 p.

FREIRE, E. S. M. Movimentos Coletivos de Solos e Rochas e sua Moderna Sistemática. In: LOPES, Ana Paula Rodrigues. **Mapeamento do potencial de instabilização de**

taludes rodoviários usando SIG e seções geológico-geotécnicas de campo com aplicação na rodovia SP-310. 2007. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

FREITAS-SILVA, F. H.; CAMPOS, J.E.G. Geologia do Distrito Federal. In: IEMA/SEMATEC/UnB. Inventário hidrogeológico e dos recursos hídricos superficiais do Distrito Federal. Brasília. V.1, parte I. 1988. 86p.

GABERTI, M. M.; ROBAÍNA; L. E. de S. Análise da Suscetibilidade a Escorregamentos a partir do Estudo do Relevo, com Apoio de SIG, na Bacia do Arroio Veadinho, Rio Grande do Sul. Anais XVII Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada, Campinas: Instituto de Geociências – Unicamp, jul. de 2017

GARBER, N. J; HOEL, L. A. Traffic and Highway Engineering. 4.ed. Toronto: Cengage Learning, 2009. 1230p.

GARIBALDI, C. M.; SOARES, L.; AUGUSTO FILHO, O. Sistemática para Gestão de Passivos Ambientais Associados a Escorregamentos em Rodovias. **Revista Luso-Brasileira de Geotecnia**, São Paulo, n. 125, p. 41 – 68, jul. 2012.

GIANNINI, P.C.F.; MELO, M. S. de. Do Grão à Rocha Sedimentar: Erosão, Deposição e Diagênese. In: TEIXEIRA, W.; FAIRCHILD, T. R.; TOLEDO, C. M. de; TAIOLI, F. Decifrando a Terra. 2. Ed. São Paulo: Companhia Editora Nacional, 2009. p. 240- 277.

GOOGLE. Google Street View. Disponível em:< <https://www.google.com.br/maps/@-15.7633218,-47.9315865,2820m/data=!3m1!1e3>> Acesso em: 20 jun 2019

GUERRA, A. J. T. Dicionário Geológico-Geomorfológico. 2. ed. Rio de Janeiro: IBGE/CNG. 1966. 411 p.

HUSSEIN, Y.; CARVAJAL, H. M.. Microtremor Response of a Mass Movement in Federal District of Brazil. **Anuário do Instituto de Geociências**, Rio de Janeiro, v. 40, n. 3, p.212-221, 2017.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATISTICA (IBGE) Mapa de Solos da Folha SD. 23 – Brasília. Disponível em:< http://dados.gov.br/dataset/cren_pedologiasd23/resource/d47836e8-d6d3-4ed1-8f3b-2d412234519e?inner_span=True> Acesso em: 26 mar. 2019.

INSTITUTO BRASÍLIA AMBIENTAL. **Mapa Ambiental**. Brasília, 2014. 1 atlas. Escala 1:125.000.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET) **Dados Históricos**. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=bdmep/bdmep>>. Acesso em: 16 jun. 2019.

KARMANN, I. Água: Ciclo e Ação Geológica. In: TEIXEIRA, W.; FAIRCHILD, T. R.; TOLEDO, C. M. de; TAIOLI, F. Decifrando a Terra. 2. Ed. São Paulo: Companhia Editora Nacional, 2009. p.186-209.

LOPES, A. P. R. **Mapeamento do potencial de instabilização de taludes rodoviários usando SIG e seções geológico-geotécnicas de campo com aplicação na rodovia SP-310**. 2007. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

LOPES, J. A. U. **Condicionantes Geológico-Geotécnicos em Projetos Rodoviários**. Anais I Simpósio de Obras Rodoviárias, São Paulo, SP, Brasil, 10 a 13 de ago. de 1998, ABGE.

MÂCEDO, I. L. **Estudo de Modelos em Ambiente de Geoprocessamento para a Previsão de Erosão e Assoreamento de Reservatórios: o Caso da Bacia do Rio Indaiá – UHE Três Marias**, MG. 2009. Tese (Doutorado em Geotecnia) – Universidade de Brasília, Brasília, 2009.

MAGUIRE, D. J.. An Overview and Definition of GIS. In: RHIND, D. **Geographical Information Systems: Principles and Applications**. New York: John Wiley And Sons, 1991. p. 9-20.

MARTINS, E. O. **Cadastro Georreferenciado de Erosões no Distrito Federal**. 2005. 130 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Geotecnia, Universidade de Brasília, Brasília, 2005.

MARTINS, E. O. *et al.* Cadastro de Erosões. In: CAMAPUM DE CARVALHO *et al.* **Processos Erosivos no Centro-Oeste Brasileiro**. Brasília: Universidade de Brasília: FINATEC, 2006. Cap. 5. p.189-220.

Ministério dos Transportes, Portos e Aviação Civil. (MTPA) **Política Nacional de Transportes**: Caderno das Estratégias Governamentais. Brasília: MTPA, 2018a. 126 p.

Ministério dos Transportes, Portos e Aviação Civil. (MTPA) **Política Nacional de Transportes**: Livro de Estado. Brasília: MTPA, 2018b. 69 p.

MIRANDA, J. G. de. **Mapeamento geotécnico e estudo da suscetibilidade à erosão na bacia do Ribeirão Ponte de Pedra (MT), escala 1:100.000**. 2005. Tese (Doutor em Geotecnia) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

NETO, J. P. S; SOUZA, N. M. de. A Medida da Erosão do Solo por Meio da Atividade do Césio-137. In: CAMAPUM DE CARVALHO *et al.* **Processos Erosivos no Centro-Oeste Brasileiro**. Brasília: Universidade de Brasília: FINATEC, 2006. Cap. 8. p.271-282.

OLIVEIRA, B. E. N. de. **Mapeamento, Identificação e Análise dos Fatores Relacionados aos Processos Erosivos no Distrito Federal (DF) – Ênfase nas Voçorocas**. 2011. 180 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciências Florestais, Universidade de Brasília, Brasília, 2011.

PARRON, L. M. *et al.* **Reservas Ecológicas da Embrapa Cerrados**: Caracterização e Zoneamento. Planaltina, DF: Embrapa, 1998. 80 p.

PIERI, L. *et al.* Using the Water Erosion Prediction Project (WEPP) Model to Simulate Field-Observed Run-off and Erosion in the Apennines Mountain Range, Italy. Journal of Hydrology. 336, 2007. p. 84-97.

PINA, M. F de *et al.* Aquisição de Dados Digitais. In: PINA, M. F.; SANTOS, S. **Conceitos Básicos de Sistemas de Informação Geográfica e Cartografia aplicados à Saúde**. 20. ed. Brasília: Opas, 2000. Cap. 3. p. 67-89.

RAIA JUNIOR, A. A. **Acessibilidade e mobilidade na estimativa de um índice de potencial de viagens utilizando redes neurais artificiais e sistemas de informações geográficas**. 2000. 212 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Escola de Engenharia, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000.

REATTO, A. et al. **Mapa Pedológico Digital**: SIG atualizado do Distrito Federal Escala 1:100.000 e uma Síntese do Texto Explicativo. Planaltina, DF: Embrapa, 2004. 31 p.

RIBEIRO, J. F; WALTER, B. M. T. As Principais Fitofisionomias do Bioma Cerrado. In: SANO, S. M. et al. (Ed.). **Cerrado: ecologia e flora v. 2**. Brasília: EMBRAPA-CERRADOS, 2008. p. 152-212

RIDENTE JUNIOR, J.L. **Análise da utilização de cartas geotécnicas em diferentes escalas para a gestão ambiental de rodovia em operação**. Rio Claro, 2008. 182 p. Tese (Doutorado) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista.

RODRIGUES, R.; LOPES, J.A.U. Rodovias. In: OLIVEIRA, A.M.S.; BRITO, S.N.A. (Eds.), **Geologia de Engenharia**. São Paulo: ABGE, Cap. 25, p. 419-430, 1998.

ROMÃO, P. A.; SOUZA, N. M. de. Caracterização Ambiental. In: CAMAPUM DE CARVALHO et al. **Processos Erosivos no Centro-Oeste Brasileiro**. Brasília: Universidade de Brasília: FINATEC, 2006. Cap. 4. p.157-188.

ROQUE, W.V. & SOUZA, N.M. Análise da Estabilidade de Taludes pelo Método Racional na Região do Taquari (DF). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA E AMBIENTAL, 12, 2008, Porto de Galinhas. **Anais...** Porto de Galinhas: ABGE, 2008, p. 1-9.

ROSA, R. **Introdução ao Geoprocessamento**. Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, 2013. 142 p.

SANTORO, J. Erosão Continental. In: TOMINAGA, L. K. et al. **Desastres Naturais: Conhecer para Prevenir**. São Paulo (cidade): Instituto Geológico, 2009. Cap. 4. p. 53-70.

SANTOS, S. et al. Os Sistemas de Informações Geográficas. In: PINA, M. F. de; SANTOS, S. M. **Conceitos Básicos de Sistemas de Informação Geográfica e Cartografia aplicados à Saúde**. 20. ed. Brasília: Opas, 2000. Cap. 1. p. 13-40.

SECRETARIA DE ESTADO DO MEIO AMBIENTE DO DISTRITO FEDERAL (SEMA). **Mapa Hidrográfico do Distrito Federal -2016**. Brasília: SEMA, 2016. Escala 1:115.000.

SECRETARIA DE ESTADO DE DESENVOLVIMENTO URBANO E HABITAÇÃO (SEDUH). **GeoPortal**. Disponível em: <<https://www.geoportal.seduh.df.gov.br/mapa/>> Acesso em: 26 mar. 2019.

SILVEIRA, R. de M. Série de Cadernos Técnicos da Agenda Parlamentar: **Comportamento Geotécnico das Encostas**. CREA – PR. 2016. 62 p.

SIMÕES, S. J. C. SIG e Modelos de Escorregamentos: Avaliando Métodos para Reduzir as Incertezas de Dados de Solos e Precipitação. Revista Brasileira de Cartografia, Rio de Janeiro, n. 68/69, p. 1737 – 1746, out./ 2016.

SOETERS, R.; VAN WESTEN, C. J. Slope Instability Recognition, Analisys and Zonation. In: Turner, A. K.; Shuster, R. Landslides Investigation and Mitigation. Transportation Research Board Special Report, 247. National Academy Press: Washington, DC, 1996.

SOUZA, L. A.; SOBREIRA, F. G. Procedimentos para Elaboração de Cartas Geotécnicas no Planejamento Urbano. **Revista Brasileira de Cartografia**, Rio de Janeiro, n. 67, p. 141 – 156, jan./fev. 2015.

TANGESTANI, H. M. Comparison of EPM and PSIAC models in GIS for Erosion and Sediment Yield Assessment in a Semi-Arid Environment: Afzar Catchment, Fars Province, Iran. Journal of Asian Earth Sciences. 27. 2006. p. 585-597.

TOMINAGA, L. K. *et al.*. **Desastres naturais: conhecer para prevenir**. São Paulo : Instituto Geológico, 2009. 196 p.

UNDRO – UNITED NATIONS DISASTER RELIEF OFFICE. **Natural Disasters and Vulnerability Analisys**. Genebra: 1980. 64 p.

UNDRO – UNITED NATIONS DISASTER RELIEF OFFICE. **UNDRO's approach to disaster mitigation**. UNDRO News, jan.-febr.1991. Geneva: Office of the United Nations Disasters Relief Co-ordinator. 20p.

VALLE JUNIOR, R. F. do. **Diagnóstico de áreas de risco de erosão e conflito de uso dos solos na bacia do rio Uberaba**. 2008. Tese (Doutorado em Agronomia) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2008.

VARNES, D. J. Slope movement types and processes. In: SCHUSTER & KRIZEK (eds.). **Landslides: analysis and control.** Transportation Research Board Special Report 176, National Academy of Sciences, Washington DC, 1978. p. 11-33.

VARNES, D. J. **The logic of Geological Maps, with Reference to Their Interpretation and Use for Engineering Purposes.** Washington: USGS, 1974. 48p.

VAZ, J. C. Geoprocessamento. **Dicas:** Ideias para Ação Municipal, São Paulo, Instituto Pólis-Ildesfes. n. 95, p.1-2, 1997.

WINGE, M. *et al* Erosão. Glossário Geológico Ilustrado. Disponível em: <<http://sigep.cprm.gov.br/glossario/>>. Acesso em 12 de nov. de 2018

WISCHMEIER, W. H.; SMITH, D. D. **Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning.** 58 p. (Agriculture Handbook, 537). Washington, DC: USDA, 1978.

ZEE - DF - ZONEAMENTO ECOLÓGICO E ECONÔMICO DO DISTRITO FEDERAL. **Execução técnica** - Greentec Consultoria e Planejamento Ltda, vencedora do processo licitatório - Solicitação de Proposta nº 004/2008, por meio do contrato de serviço nº 21/2009 (UGP/SEDUMA). 2011.

ZEE - DF - ZONEAMENTO ECOLÓGICO E ECONÔMICO DO DISTRITO FEDERAL.
Risco Ecológico de Perda de Solo por Erosão. Brasília, 2017. Mapa.

ZUQUETTE, L.V.; NAKAZAWA, V.A. Cartas de Geologia de Engenharia. In: OLIVEIRA, A.M.S. & BRITO, S.N.A. (Eds.), **Geologia de Engenharia.** São Paulo: ABGE, Cap. 17, p. 283-300, 1998.

(Apêndice 1) Carta Geológica

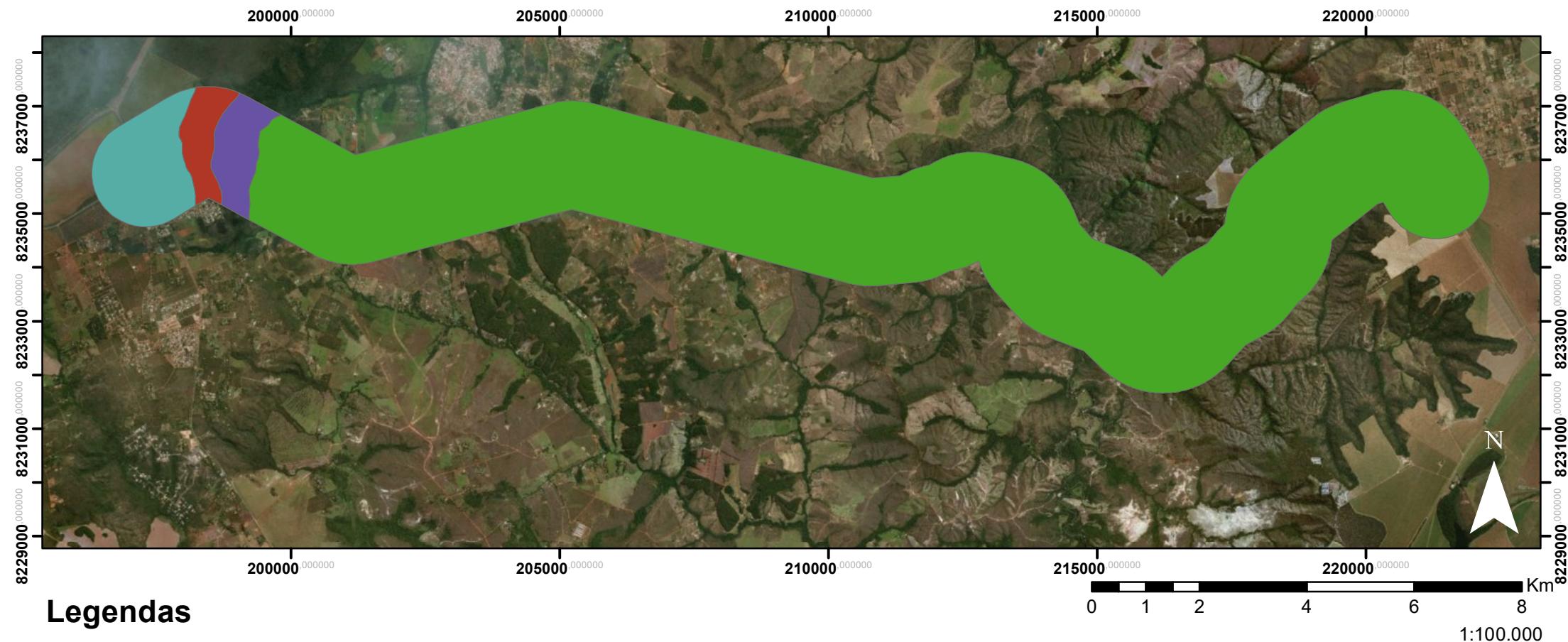
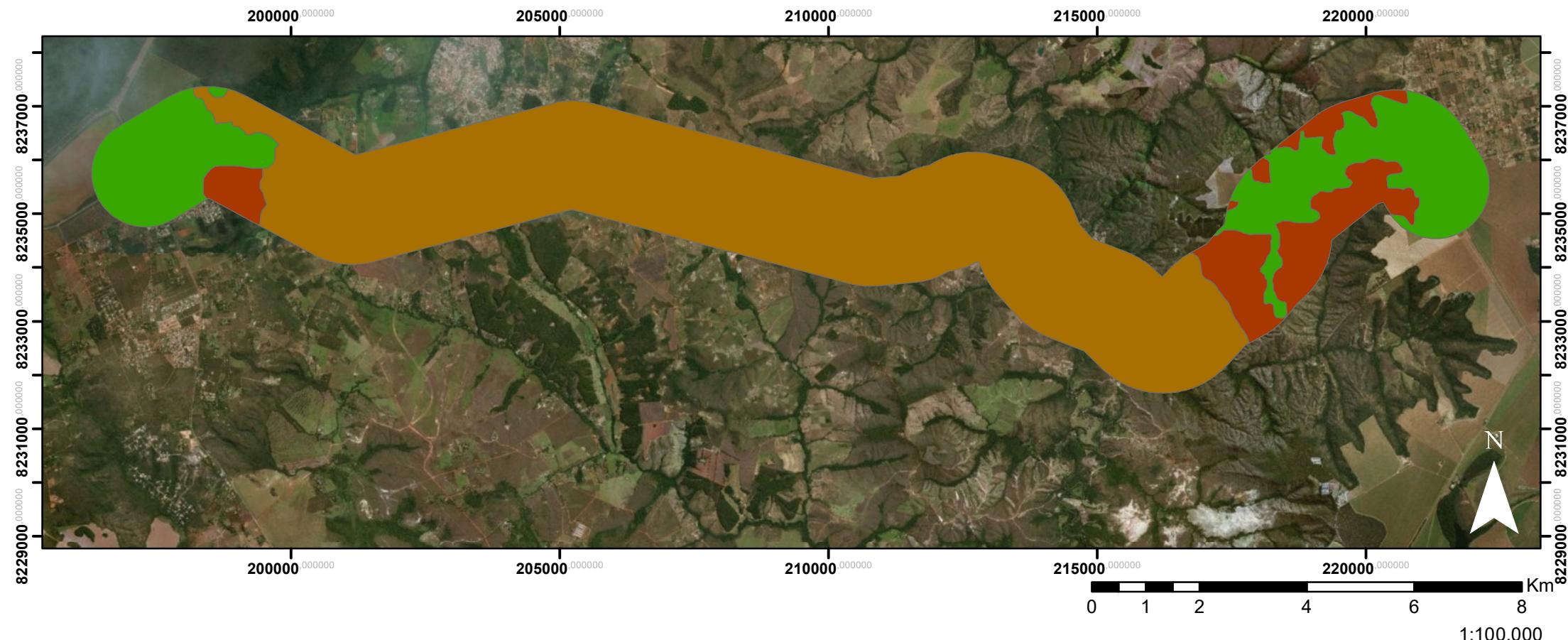


Imagen de base: Source: Esri, DigitalGlobe, GeoEye, Earthstar Geographics, CNES/Airbus DS, USDA, USGS, AeroGRID, IGN, and the GIS User Community

Autor: Pedro Baena de Mesquita
Orientador: Newton Moreira de Souza
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental
Universidade de Brasília
Fonte de dados: Freitas-Silva e Campos (1998)
Projeção UTM Zona 23 S

(Apêndice 2) Carta Geomorfológica



Legendas

Geomorfologia

Super Classe

- █ Chapada
- █ Escarpa
- █ Vale dissecado

Imagen de base: Source: Esri, DigitalGlobe, GeoEye, Earthstar Geographics, CNES/Airbus DS, USDA, USGS, AeroGRID, IGN, and the GIS User Community

Autor: Pedro Baena de Mesquita

Orientador: Newton Moreira de Souza

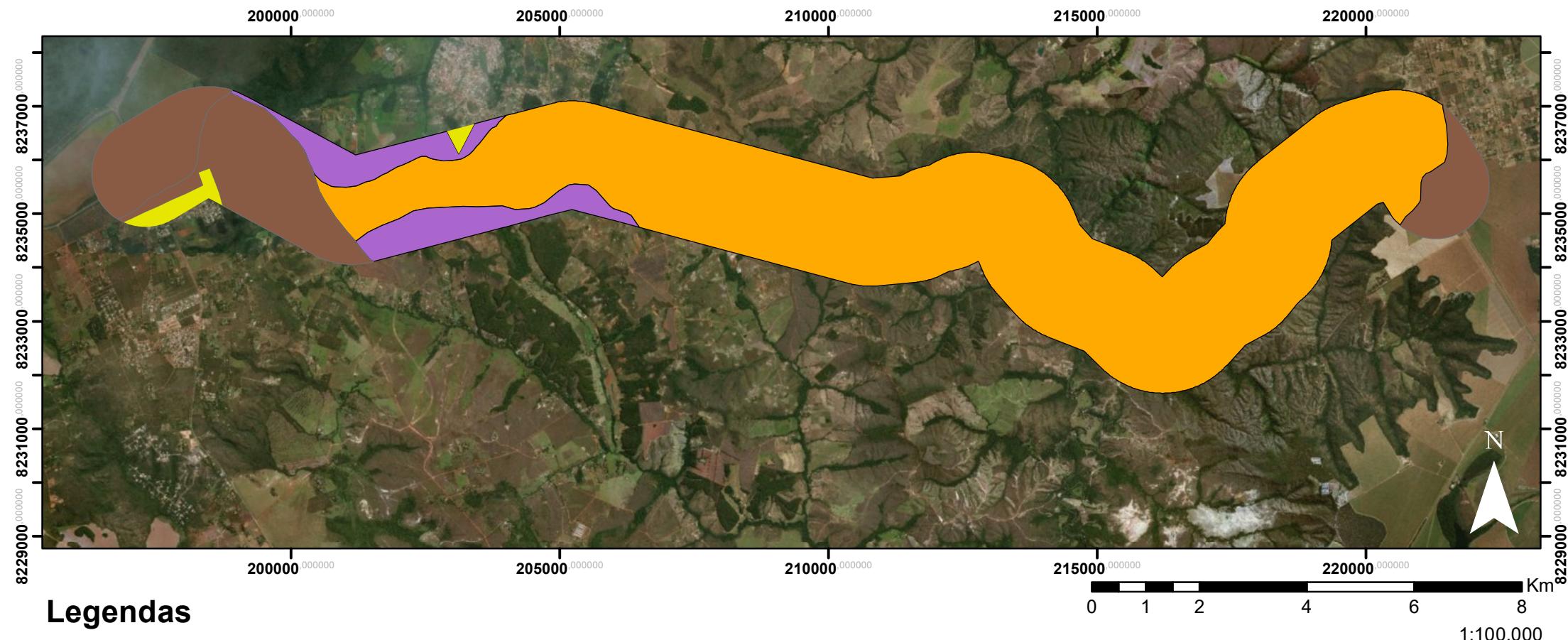
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental

Universidade de Brasília

Fonte de dados: ZEE (2011)

Projeção UTM Zona 23 S

(Apêndice 3) Carta Pedológica



Legendas

Pedologia

Ordem

- [Yellow] Área Urbana
- [Orange] Cambissolo
- [Brown] Latossolo
- [Purple] Plintossolo

Imagen de base: Source: Esri, DigitalGlobe, GeoEye, Earthstar Geographics, CNES/Airbus DS, USDA, USGS, AeroGRID, IGN, and the GIS User Community

Autor: Pedro Baena de Mesquita

Orientador: Newton Moreira de Souza

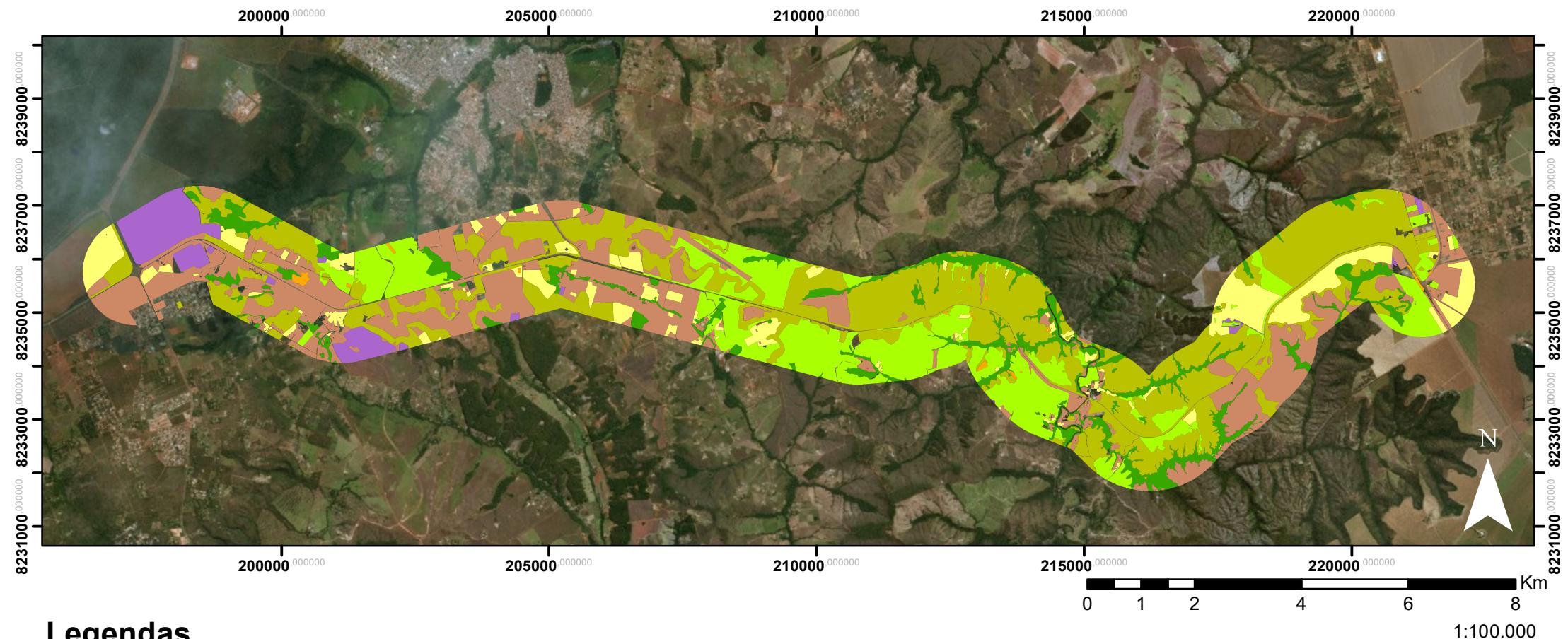
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental

Universidade de Brasília

Fonte de dados: IBGE (2019)

Projeção UTM Zona 23 S

(Apêndice 4) Carta de Vegetação



Legendas

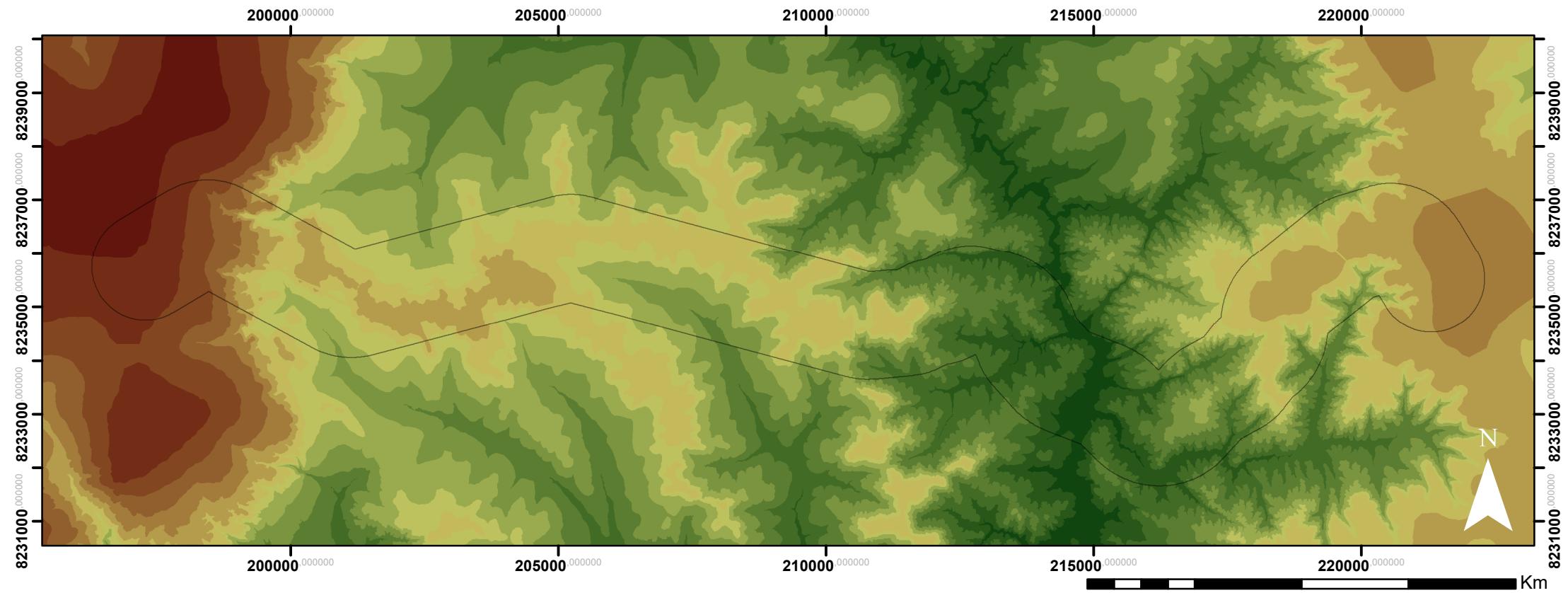
| Vegetação | |
|------------|----------------|
| Tipo | |
| AREA LIMPA | CULTURA |
| CAMPO | MATA |
| CERRADO | PASTO |
| | POMAR |
| | REFORESTAMENTO |

Imagen de base: Source: Esri, DigitalGlobe,
GeoEye, Earthstar Geographics, CNES/Airbus
DS, USDA, USGS, AeroGRID, IGN, and the
GIS User Community

Autor: Pedro Baena de Mesquita
Orientador: Newton Moreira de Souza
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental
Universidade de Brasília
Fonte de dados: GeoPortal, SEDUH (2019)
Projeção UTM Zona 23 S



(Apêndice 5) Carta de Hipsometria



Legendas

Limites da Área de Projeto

975,0000001 - 1.000

Relevo (metros)

835 - 850

1.000,000001 - 1.025

850,0000001 - 875

1.025,000001 - 1.050

875,0000001 - 900

1.050,000001 - 1.075

900,0000001 - 925

1.075,000001 - 1.100

925,0000001 - 950

1.100,000001 - 1.125

950,0000001 - 975

1.125,000001 - 1.150

1.150,000001 - 1.175

Autor: Pedro Baena de Mesquita

Orientador: Newton Moreira de Souza

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental

Universidade de Brasília

Fonte de dados: GeoPortal, SEDUH (2019)

Projeção UTM Zona 23 S

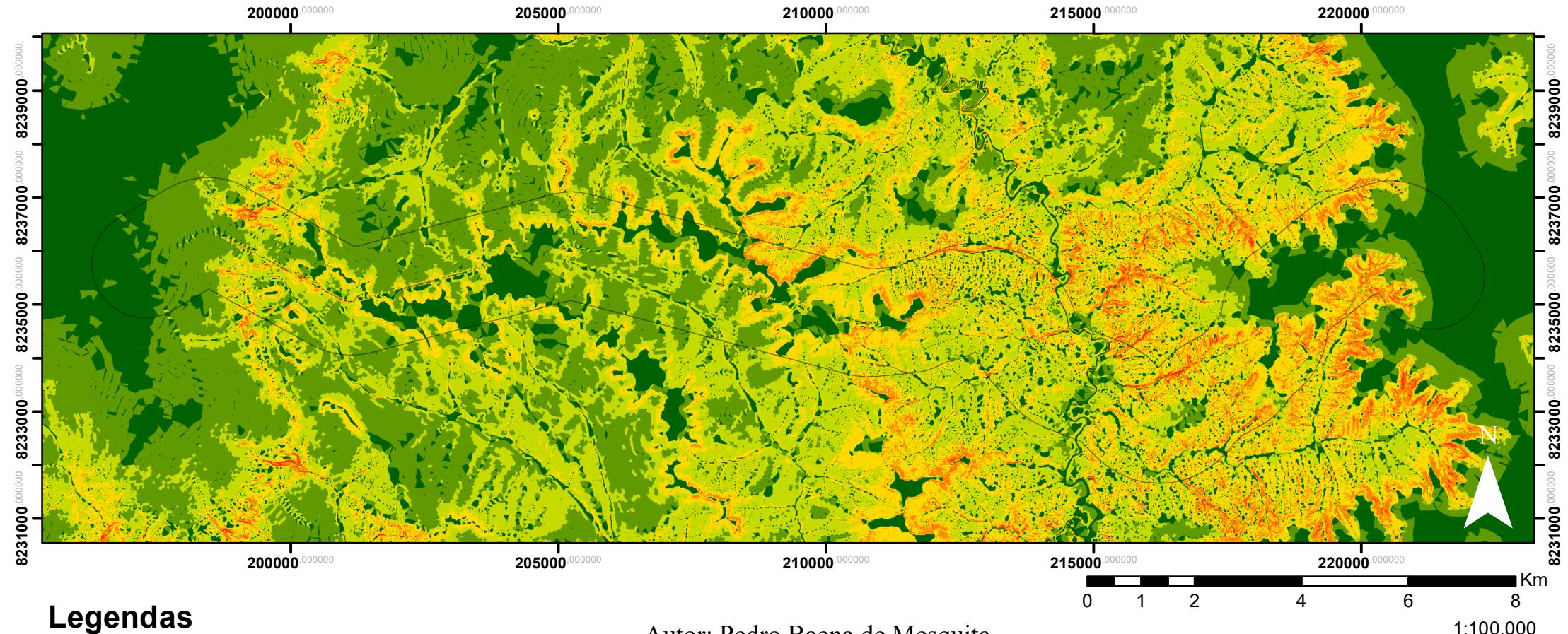
Imagen de base: Source: Esri, DigitalGlobe,
GeoEye, Earthstar Geographics, CNES/Airbus
DS, USDA, USGS, AeroGRID, IGN, and the
GIS User Community

0 1 2 4 6 8 Km

1:100.000



(Apêndice 6) Carta de Declividade



Legendas

Limites da Área de Projeto

Declividade

Plano 0 - 3%

Suave Ondulado 3,01 - 8%

Ondulado 8,01 - 20%

Forte Ondulado 20,01 - 45%

Montanhoso 45,01 - 75%

Escarpado >75%

Autor: Pedro Baena de Mesquita

Orientador: Newton Moreira de Souza

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental

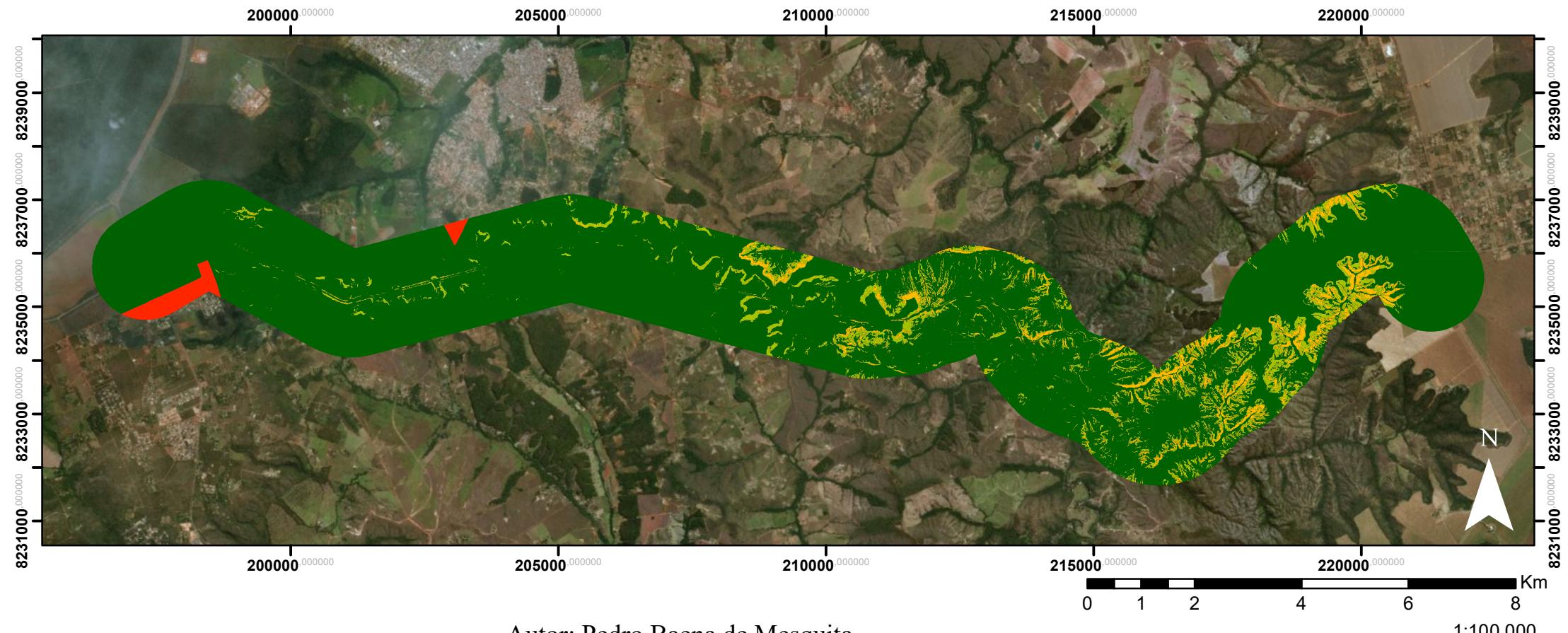
Universidade de Brasília

Fonte de dados: GeoPortal, SEDUH (2019)

Projeção UTM Zona 23 S

Imagen de base: Source: Esri, DigitalGlobe, GeoEye, Earthstar Geographics, CNES/Airbus DS, USDA, USGS, AeroGRID, IGN, and the GIS User Community

(Apêndice 7) Carta de Suscetibilidade a Deslizamentos Rasos



Legendas

Suscetibilidade Fator de Segurança

- Não possui informação
- Média: $1,3 < FS < 1,7$
- Baixa: $1,7 < FS < 2$
- Muito Baixa: $FS > 2$

Autor: Pedro Baena de Mesquita

Orientador: Newton Moreira de Souza

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental

Universidade de Brasília

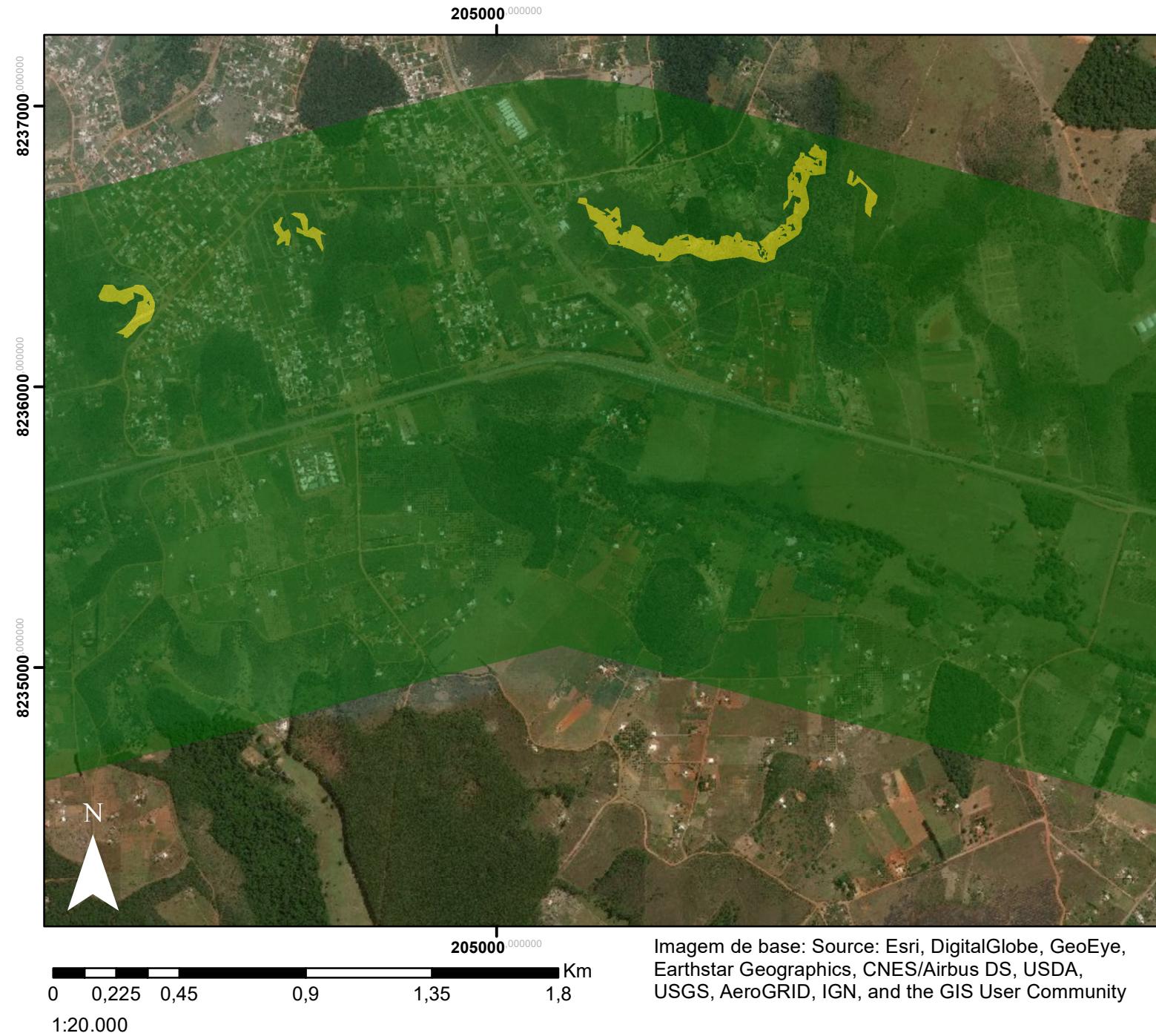
Fonte de dados: GeoPortal, SEDUH (2019) e IBGE (2019)

Projeção UTM Zona 23 S

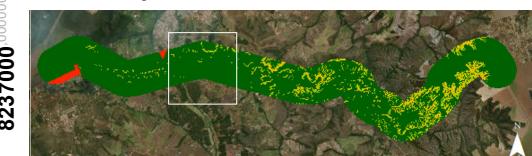
Imagen de base: Source: Esri, DigitalGlobe,
GeoEye, Earthstar Geographics, CNES/Airbus
DS, USDA, USGS, AeroGRID, IGN, and the
GIS User Community



(Apêndice 8) Carta de Risco de Deslizamento Raso (Trecho 1)



Localização na carta de suscetibilidade



Legendas

Risco

| |
|-------|
| Alto |
| Médio |
| Baixo |

Autor: Pedro Baena de Mesquita

Orientador: Newton Moreira de Souza

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental

Universidade de Brasília

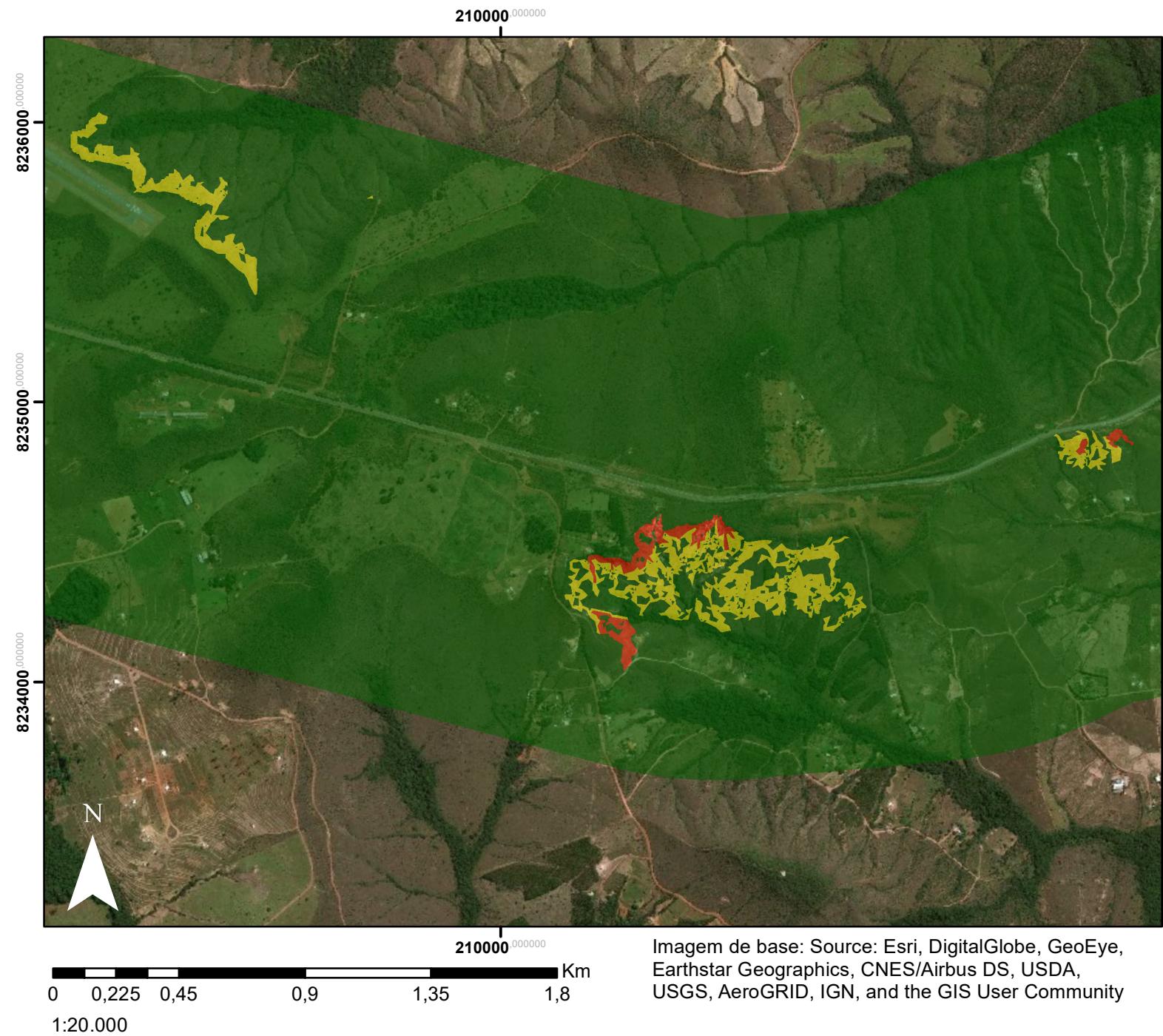
Fonte de dados: GeoPortal (2019) e IBGE (2019)

Projeção UTM Zona 23 S

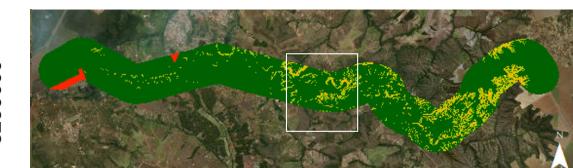
 **faculdade de tecnologia**



(Apêndice 9) Carta de Risco de Deslizamento Raso (Trecho 2)



Localização na carta de suscetibilidade



Legendas

Risco

| |
|-------|
| Alto |
| Médio |
| Baixo |

Autor: Pedro Baena de Mesquita

Orientador: Newton Moreira de Souza

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental

Universidade de Brasília

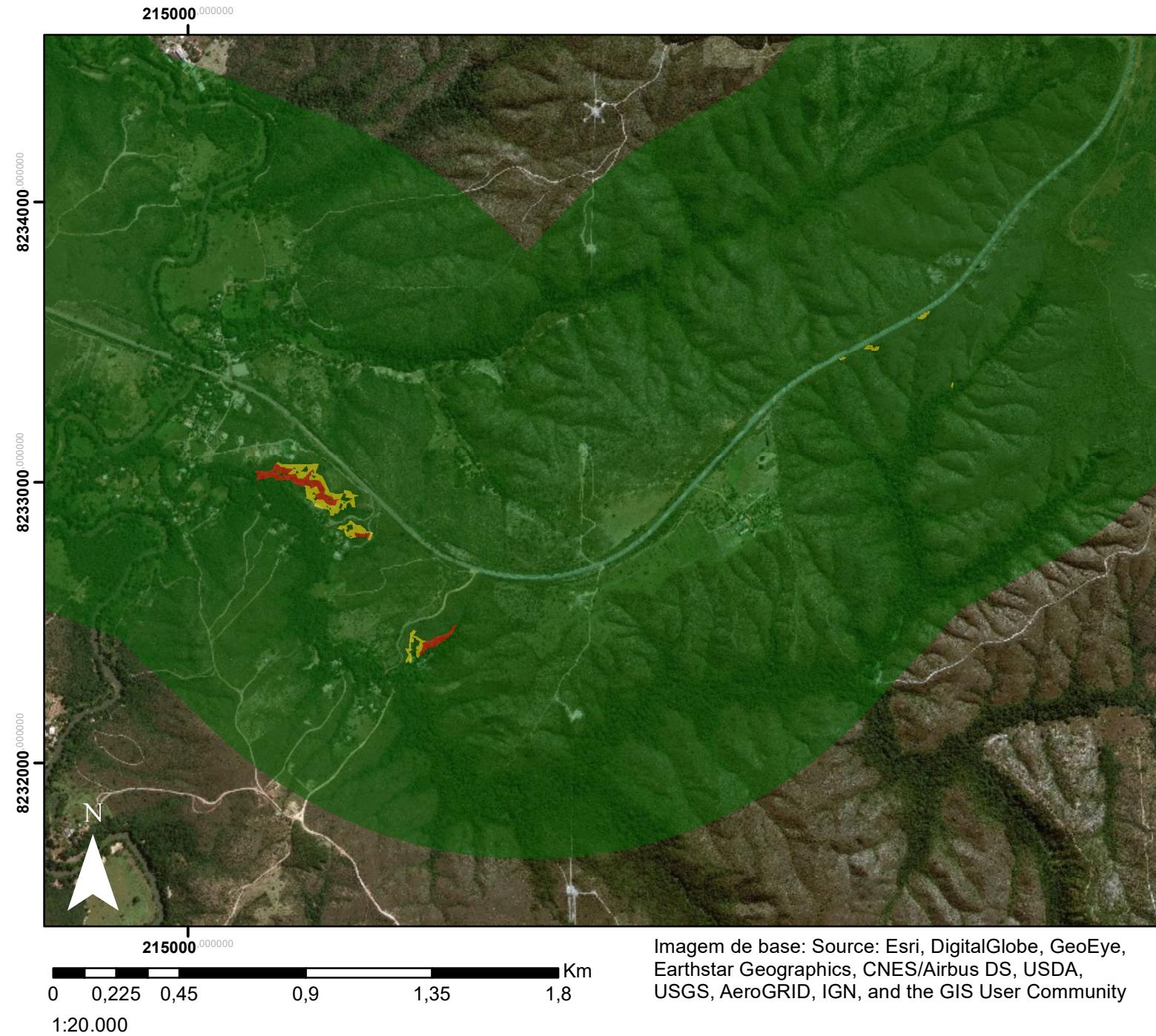
Fonte de dados: GeoPortal (2019) e IBGE (2019)

Projeção UTM Zona 23 S

 **faculdade de
tecnologia**



(Apêndice 10) Carta de Risco de Deslizamento Raso (Trecho 3)



Localização na carta de suscetibilidade



Legendas

Risco

- Alto (Red)
- Médio (Yellow)
- Baixo (Green)

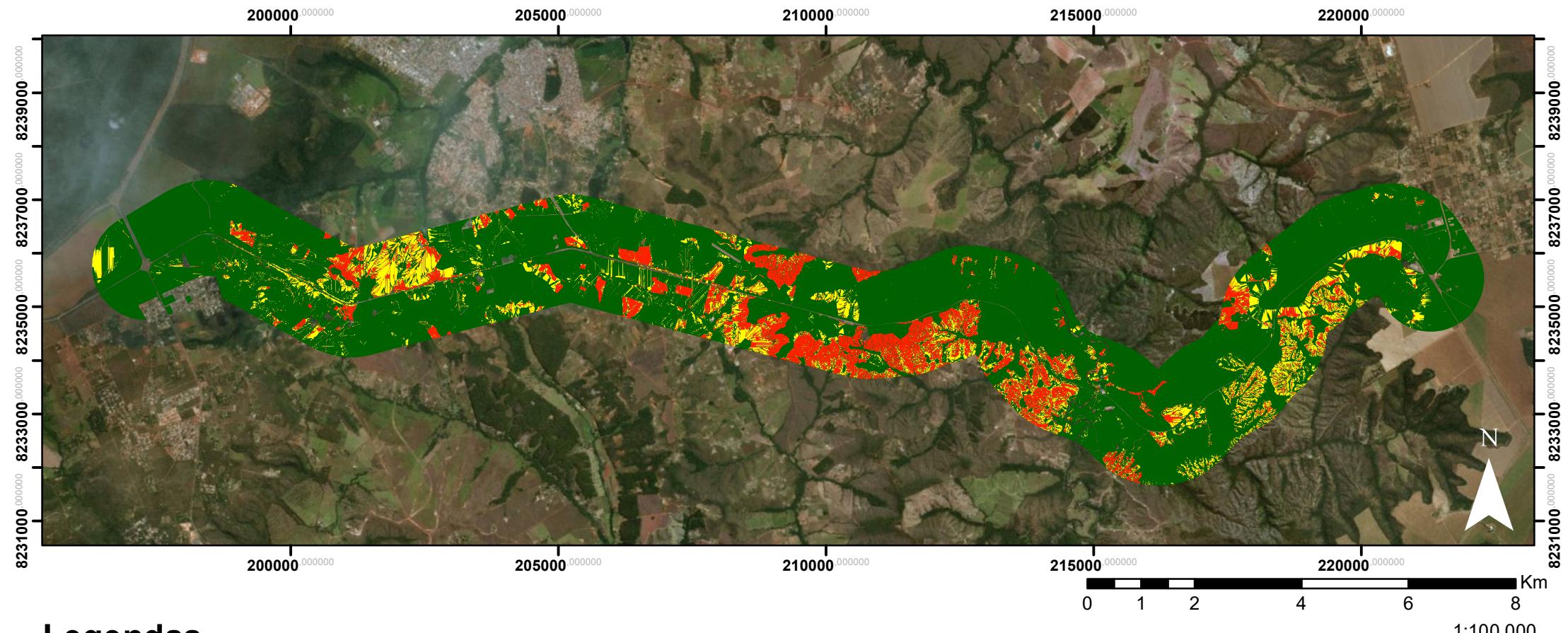
Autor: Pedro Baena de Mesquita
Orientador: Newton Moreira de Souza
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental
Universidade de Brasília
Fonte de dados: GeoPortal (2019) e IBGE (2019)
Projeção UTM Zona 23 S

 **faculdade de
tecnologia**



116

(Apêndice 11) Carta de Suscetibilidade à Erosão



Legendas

Suscetibilidade

- Baixa <10 t/(ha.ano)
- Média 10-30 t/(ha.ano)
- Alta >30 t/(ha.ano)

Autor: Pedro Baena de Mesquita

Orientador: Newton Moreira de Souza

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental

Universidade de Brasília

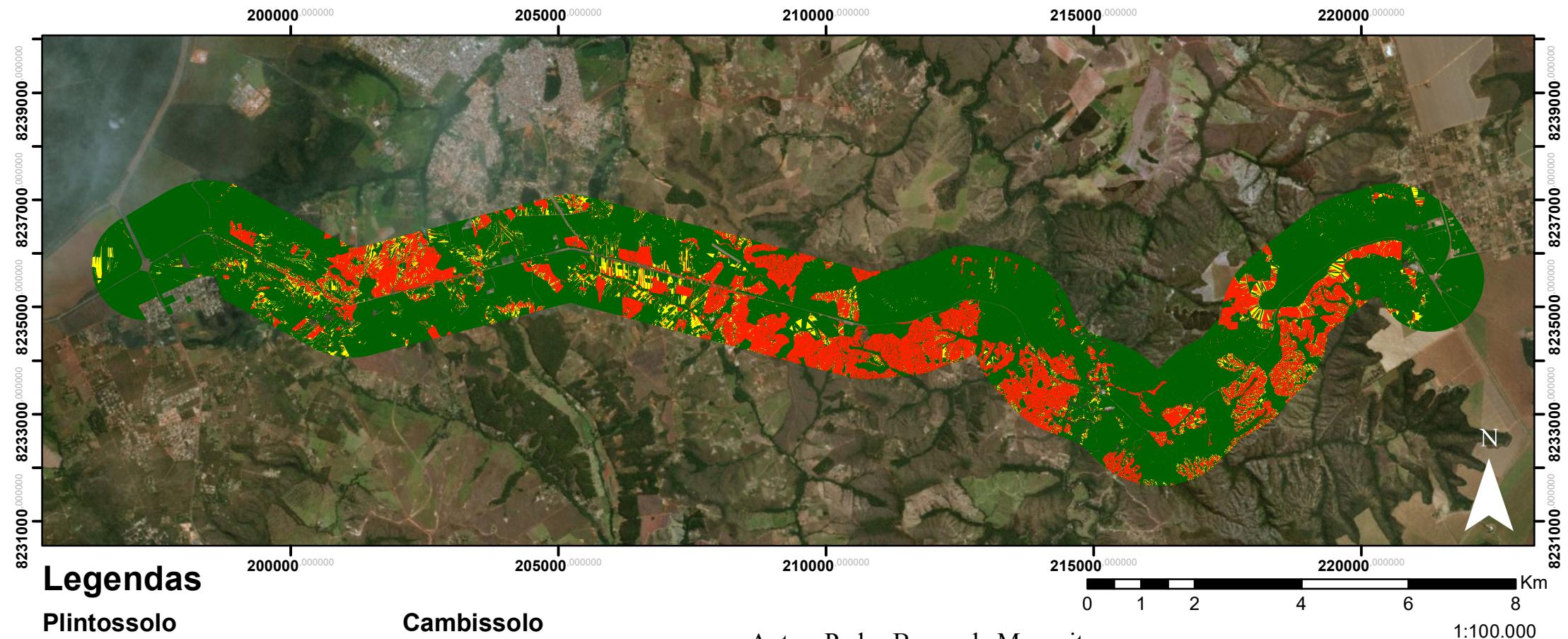
Fonte de dados: GeoPortal, SEDUH (2019) e IBGE (2019)

Projeção UTM Zona 23 S

Imagem de base: Source: Esri, DigitalGlobe, GeoEye, Earthstar Geographics, CNES/Airbus DS, USDA, USGS, AeroGRID, IGN, and the GIS User Community



(Apêndice 12) Carta de Risco de Erosão



Autor: Pedro Baena de Mesquita
 Orientador: Newton Moreira de Souza
 Departamento de Engenharia Civil
 e Ambiental
 Universidade de Brasília

Fonte de dados: GeoPortal, SEDUH (2019)
 e IBGE (2019)
 Projeção UTM Zona 23 S

Imagen de base: Source: Esri, DigitalGlobe, GeoEye,
 Earthstar Geographics, CNES/Airbus DS, USDA,
 USGS, AeroGRID, IGN, and the GIS User Community

