



TESE DE DOUTORADO EM GEOTECNIA

**ÍNDICE DE QUALIDADE DE ENCOSTAS: UMA
METODOLOGIA DE SUSCETIBILIDADE AO DESLIZAMENTO
PARA CORREDORES DE TRANSPORTE**

CARLOS ARTURO MORENO CEBALLOS

BRASÍLIA — DF, SETEMBRO de 2019

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA

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

**ÍNDICE DE QUALIDADE DE ENCOSTAS: UMA
METODOLOGIA DE SUSCETIBILIDADE AO DESLIZAMENTO
PARA CORREDORES DE TRANSPORTE**

CARLOS ARTURO MORENO CEBALLOS

NEWTON MOREIRA SOUZA

TESE DE DOUTORADO EM GEOTECNIA

**PUBLICAÇÃO: G.TD
BRASÍLIA — DF: SETEMBRO de 2019**

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

**ÍNDICE DE QUALIDADE DE ENCOSTAS: UMA
METODOLOGIA DE SUSCETIBILIDADE AO DESLIZAMENTO
PARA CORREDORES DE TRANSPORTE**

CARLOS ARTURO MORENO CEBALLOS

Tese de doutorado submetida ao Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Geotecnia

Examination Board:

Prof. NEWTON MOREIRA SOUZA, D.Sc., ENC-UnB
Orientador

Prof. RAFAEL CERQUEIRA SILVA, D.Sc., ENC-UnB
Examinador interno

Prof. MAURICIO MARTINES SALES, D.Sc., UFG
Examinador Externo

Prof. MARIA TÂMARA DE MORAIS GUIMARÃES SILVA,
D.Sc., IFG
Examinador Externo

Prof. LUÍS FERNANDO MARTINS RIBEIRO, ENC-UnB
Suplente

FICHA CATALOGRÁFICA

MORENO, CARLOS ARTURO

ÍNDICE DE QUALIDADE DE ENCOSTAS: UMA METODOLOGIA DE SUSCETIBILIDADE AO DESLIZAMENTO PARA CORREDORES DE TRANSPORTE [Distrito Federal] 2019. xvi, 81 p., 210 x 297 mm (ENC/FT/UnB, Doutor, Engenharia Civil, 2019).

Tese de Doutorado em Geotecnia — Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental

- | | |
|------------------------------------|-------------------------|
| 1. Índice de qualidade de encostas | 2. Estradas em montanha |
| 3. Suscetibilidade ao deslizamento | 4. Projetos de estradas |
| I. ENC/FT/UnB | II. Título (série) |

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

MORENO, C.A. (2019). *ÍNDICE DE QUALIDADE DE ENCOSTAS: UMA METODOLOGIA DE SUSCETIBILIDADE AO DESLIZAMENTO PARA CORREDORES DE TRANSPORTE*. Tese de Doutorado em Geotecnia, Publicação G.TD-156/19, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 81 p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: CARLOS ARTURO MORENO CEBALLOS

TÍTULO: ÍNDICE DE QUALIDADE DE ENCOSTAS: UMA METODOLOGIA DE SUSCETIBILIDADE AO DESLIZAMENTO PARA CORREDORES DE TRANSPORTE.

GRAU: Doutor em Geotecnia ANO: 2019

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

CARLOS ARTURO MORENO CEBALLOS

Depto. de Engenharia Civil e Ambiental (ENC) — FT

Universidade de Brasília (UnB)

Campus Darcy Ribeiro

CEP 70919-970 — Brasília — DF — Brasil

Dedicatória

Este trabalho de doutorado é dedicado em memória de meus avós que me ensinaram o essencial da vida com o seu exemplo.

CARLOS ARTURO MORENO CEBALLOS

Agradecimentos

Agradeço o acompanhamento do professor Newton que possibilitou a finalização desta tese.

A meus pais pelo apoio incondicional à distância.

Aos meus amigos Daniela, María Paz, Yina, Juliana, Nathaly, Julian, Helard, Jaime e Wilson que me acompanharam na vida e fizeram parte da minha família em Brasília.

CARLOS ARTURO MORENO CEBALLOS

ABSTRACT

The *Hillslope Quality Index HSQI* is a landslide susceptibility zonation method for transportation corridors in tropical mountain regions that takes into account the geometrical, geological/geotechnical and hydrogeological conditions of the infrastructure project. This method provides qualitative recommendations for stabilization solutions through a performance graphic, which takes into account the *HSQI* and transportation corridor importance and has the objective of being a guide in the infrastructure projects' preliminary stages. In this research, it was performed a method application into the BR-381 federal highway, in the Minas Gerais State, and also were incorporated quantitative recommendations for specific stabilization works, based on works' inventories collected from two *HSQI* method applications in Colombia and Costa Rica. As conclusions, the method application into the BR-381 allowed the establishment of a hydrological factor forecast procedure for application in strong bimodal regions, and the method also obtained acceptable results according to the hillslope stability founded in the region. The specific performance graphics can be useful tools for geotechnical professionals, planners, and developers in the decision making for preliminary stages of infrastructure projects.

RESUMO

O *Hillslope Quality Index HSQI* é um método de zoneamento de suscetibilidade a deslizamento para corredores de transporte em regiões montanhosas tropicais que leva em conta as condições geométricas, geológico/geotécnicas e hidrogeológicas dos projetos de infraestrutura. Este método fornece recomendações de obras de estabilização qualitativas mediante um gráfico de desempenho que leva em conta o *HSQI* e a importância do corredor de transporte e que tem o intuito de ser um guia nas etapas preliminares dos projetos de infraestrutura de transporte. Nesta pesquisa, realizou-se uma aplicação do método na Rodovia Federal BR-381, no estado de Minas Gerais, e também se incorporaram recomendações quantitativas para obras de estabilização específicas, baseadas nos inventários de obras coletados a partir de duas aplicações do método na Colômbia e na Costa Rica. Como conclusões, a aplicação do método na BR-381 permitiu estabelecer um procedimento de cálculo do fator hidrológico para aplicação em regiões com clima bimodal bem marcado, e também obteve resultados aceitáveis, tendo em vista que o comportamento de estabilidade estimado pelo método foi observado na região. Os gráficos de desempenho específicos podem ser ferramentas muito úteis para profissionais geotécnicos, planejadores e desenvolvedores na tomada de decisões para etapas preliminares de projetos de infraestrutura de transporte.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	JUSTIFICATIVA.....	1
1.2	PROBLEMA	2
1.3	OBJETIVOS DA PESQUISA.....	2
1.4	ORGANIZAÇÃO DO DOCUMENTO.....	3
2	REVISÃO DE LITERATURA	4
2.1	METODOLOGIAS DE ZONEAMENTO DA SUSCETIBILIDADE AO DESLIZAMENTO	4
2.1.1	ANÁLISE DE INVENTÁRIOS DE DESLIZAMENTOS	5
2.1.2	MÉTODOS HEURÍSTICOS DE ZONEAMENTO DA SUSCETIBILIDADE AO DESLIZAMENTO	6
2.1.3	MÉTODOS ESTATÍSTICOS DE ZONEAMENTO DA SUSCETIBILIDADE AO DESLIZAMENTO.....	7
2.1.4	MÉTODOS BASEADOS EM MODELOS DE BASE FÍSICA PARA ZONEAMENTO DA SUSCETIBILIDADE AO DESLIZAMENTO.....	8
2.2	ESTIMATIVA DA AMEAÇA DE DESLIZAMENTOS.....	8
2.2.1	ESTIMATIVA DA AMEAÇA DE DESLIZAMENTOS PARA ÁREAS.....	9
2.2.2	ESTIMATIVA DA AMEAÇA DE DESLIZAMENTOS PARA PROJETOS LINEARES	9
2.3	ESTIMATIVA DE RISCO DE DESLIZAMENTOS	10
2.3.1	ESTIMATIVA DA VULNERABILIDADE PARA AVALIAÇÃO DE RISCO DE DESLIZAMENTOS.....	10
2.3.2	GERENCIAMENTO DO RISCO DE DESLIZAMENTOS.....	11
2.4	AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DOS MÉTODOS DE ZONEAMENTO DE SUSCETIBILIDADE, AMEAÇA E RISCO DE DESLIZAMENTOS	12
2.5	PESQUISA <i>Web of Science</i>	13
2.6	TRABALHOS DE AUTORES BRASILEIROS.....	14
3	MÉTODO DE ZONEAMENTO DA SUSCETIBILIDADE AO DESLIZAMENTO DE ENCOSTAS <i>HSQI</i>	16
3.1	CÁLCULO DO <i>HSQI</i>	16
3.2	PROCEDIMENTO DO MÉTODO <i>HSQI</i>	19
3.2.1	COLETA DE INFORMAÇÃO	19
3.2.2	CARACTERIZAÇÃO GEOMÉTRICA	21
3.2.3	ZONEAMENTO <i>HSQI</i>	21
3.2.4	GRÁFICO DE DESEMPENHO	22
3.3	APLICAÇÕES DO MÉTODO <i>HSQI</i>	23

3.3.1	APLICAÇÃO DO MÉTODO <i>HSQI</i> NA RODOVIA <i>Las Palmas</i> , COLOMBIA....	24
3.3.2	APLICAÇÃO DO MÉTODO <i>HSQI</i> NA RODOVIA <i>Sifón-La Abundancia</i> , COSTA RICA	28
3.4	AVALIAÇÃO DAS APLICAÇÕES DO MÉTODO <i>HSQI</i>	32
4	METODOLOGIA	35
4.1	REVISÃO DE PROCEDIMENTOS DO MÉTODO <i>HSQI</i>	36
4.1.1	SISTEMATIZAÇÃO DOS PROCEDIMENTOS DE ZONEAMENTO	36
4.1.2	SISTEMATIZAÇÃO DOS PROCEDIMENTOS DA CARACTERIZAÇÃO GEOMÉTRICA	36
4.1.3	SISTEMATIZAÇÃO DO CÁLCULO DO <i>HSQI</i>	38
4.2	APLICAÇÃO DA MÉTODO <i>HSQI</i> NA RODOVIA BR-381	39
4.2.1	APLICAÇÃO DA MÉTODO <i>HSQI</i> NO TRECHO 1 DA BR-381/MG	39
4.2.2	APLICAÇÃO DA MÉTODO <i>HSQI</i> NO TRECHO 6 DA BR-381/MG	43
4.2.3	VALIDAÇÃO DO ZONEAMENTO <i>HSQI</i> DOS TRECHOS 1 E 6 DA BR-381 ...	46
4.3	MELHORAS FEITAS NO GRÁFICO DE DESEMPENHO <i>HSQI</i>	47
4.3.1	ANÁLISE ESTATÍSTICA DAS OBRAS DE ESTABILIZAÇÃO DE ENCOSTAS	47
4.3.2	QUANTIFICAÇÃO DAS OBRAS DE ESTABILIZAÇÃO PARA O GRÁFICO DE DESEMPENHO	48
4.4	ANÁLISE COMPLEMENTAR <i>Risk Lab</i>	49
5	AVALIAÇÃO DE RESULTADOS	52
5.1	RESULTADOS DA SISTEMATIZAÇÃO DOS PROCEDIMENTOS	52
5.2	RESULTADOS DA APLICAÇÃO DO MÉTODO <i>HSQI</i> NA BR-381	52
5.2.1	RESULTADOS DO ZONEAMENTO <i>HSQI</i> DO TRECHO 1 DA BR-381	53
5.2.2	RESULTADOS DO ZONEAMENTO <i>HSQI</i> DO TRECHO 6 DA BR-381	54
5.2.3	RESULTADOS DO ZONEAMENTO <i>HSQI</i> PARA A BR-381	56
5.2.4	RESULTADOS DA ANÁLISE <i>ROC</i> DA BR-381	57
5.3	MELHORAS DO GRÁFICO DE DESEMPENHO <i>HSQI</i>	58
5.3.1	RESULTADOS DA ANÁLISE ESTATÍSTICA DAS OBRAS DE ESTABILIZAÇÃO .	58
5.3.2	QUANTIFICAÇÃO DAS OBRAS DO GRÁFICO DE DESEMPENHO.....	61
5.4	RESULTADOS DA ANÁLISE COMPLEMENTAR <i>Risk Lab</i>	65
6	CONCLUSÕES	67
6.1	CONCLUSÕES SOBRE A CONCEPÇÃO DO MÉTODO <i>HSQI</i>	67
6.2	CONCLUSÕES SOBRE A APLICAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MÉTODO <i>HSQI</i>	68
6.3	CONCLUSÕES DA SISTEMATIZAÇÃO DO MÉTODO <i>HSQI</i>	69
6.4	CONCLUSÕES SOBRE AS ANÁLISES <i>Risk Lab</i>	70
6.5	RECOMENDAÇÕES DE PESQUISAS FUTURAS.....	70
	REFERENCES	72

LISTA DE FIGURAS

2.1	Métodos de zoneamento de suscetibilidade ao deslizamento	5
2.2	Citações anuais (fonte: <i>Web of Science</i>)	14
3.1	Análise de condições para encostas sem controle estrutural (adaptado de Chica, 1988)	17
3.2	Carta de cálculo HSQI para encostas sem controle estrutural (adaptado de Chica, 1988)	18
3.3	Condições de análise para encostas com controle estrutural (adaptado de Chica, 1988)	18
3.4	Carta de cálculo HSQI para encostas com controle estrutural (adaptado de Chica, 1988)	19
3.5	Condição hidrogeológica Hw/H vs. Fator de umidade normalizado Shn	20
3.6	Geometria típica de encosta.....	21
3.7	Gráfico de desempenho	23
3.8	Localização da rodovia <i>Las Palmas</i>	24
3.9	Pluviograma <i>Colegio Latino Latino</i> na rodovia <i>Las Palmas</i>	25
3.10	Zona 1, km 0+100 da rodovia <i>Las Palmas</i> . Fonte: Moreno (2015)	26
3.11	Zoneamento de suscetibilidade ao deslizamento HSQI da rodovia <i>Las Palmas</i> . Fonte: Moreno (2015).....	28
3.12	Localização da rodovia <i>Sifón-La Abundancia</i>	29
3.13	Pluviograma de estação <i>Ciudad Quesada</i> , na rodovia <i>Sifón-La Abundancia</i> . Fonte: Ocampo (2016)	30
3.14	Zoneamento de suscetibilidade ao deslizamentos da rodovia <i>Sifón-La Abundancia</i> . Fonte: Ocampo (2016).	31
3.15	Zona 28, km 17+450 da rodovia <i>Sifón-La Abundancia</i> . Fonte: Ocampo (2016)	31
3.16	Gráfico da análise <i>ROC</i>	34
4.1	Metodologia da pesquisa	35
4.2	Seção típica da rodovia utilizada	37
4.3	Detalhe seção transversal tipo corte-aterro	37
4.4	Exemplo de lista com as coordenadas	38
4.5	Localização do trecho 1 da BR-381.....	40
4.6	Formações superficiais do trecho 1 da BR-381	41
4.7	Polígonos de Tiessen	42
4.8	Pluviograma da estação Caratinga	43
4.9	Localização do trecho 6 da BR-381.....	44
4.10	Formações superficiais do trecho 6 da BR-381	45
4.11	Pluviograma da estação Belo Horizonte (Horto)	46

4.12	Fotografia do km 366 da BR-381. Fonte: <i>Google Street View</i> , 2019	47
5.1	Zoneamento <i>HSQI</i> do trecho 1 da BR-381	53
5.2	Zoneamento <i>HSQI</i> do trecho 6 da BR-381	55
5.3	Seção transversal da zona 72 do trecho 1 da BR-381 (Fonte: <i>Google street view</i> , 2019)	56
5.4	Seção transversal da zona 46 do trecho 6 da BR-381 (Fonte: <i>Google street view</i> , 2019)	57
5.5	Gráfico ROC das aplicações do método <i>HSQI</i>	58
5.6	Exemplo de muro de concreto na rodovia <i>Las Palmas</i> . Fonte: Moreno (2015)	61
5.7	Gráfico de desempenho de muros de concreto	62
5.8	Exemplo de muro de ancoragem na rodovia <i>Las Palmas</i> . Fonte: Moreno (2015)	62
5.9	Gráfico de desempenho de muros de ancoragem	63
5.10	Exemplo de canaletas transversais na rodovia <i>Las Palmas</i> . Fonte: Moreno (2015)..	63
5.11	Gráfico de desempenho de canaletas transversais	64
5.12	Exemplo de bermas na rodovia <i>Sifón-La Abundancia</i> . Fonte: Ocampo (2016)	64
5.13	Gráfico de desempenho de bermas	65
5.14	Comparação dos resultados do método <i>HSQI</i> com a probabilidade de ruptura na análise <i>Risk Lab</i> na rodovia <i>Las Palmas</i>	66
5.15	Comparação dos resultados do método <i>HSQI</i> com o índice de confiabilidade na análise <i>Risk Lab</i> na rodovia <i>Las Palmas</i>	66

LISTA DE TABELAS

2.1	Métodos de análise de inventário de deslizamentos.....	5
2.2	Métodos heurísticos.....	6
2.3	Métodos de avaliação da suscetibilidades baseados em dados	7
2.4	Métodos de avaliação de suscetibilidade baseados em modelos de base física	8
2.5	Estado da arte no Brasil.....	15
3.1	Classificação dos valores de precipitação média mensal.....	20
3.2	Fator de umidade (Sh).....	20
3.3	Valores $HSQI$ para o zoneamento do corredor de transporte	22
3.4	Fator de correção segundo a importância do corredor de transporte	22
3.5	Soluções de estabilização do gráfico de desempenho.....	23
3.6	Valores médios dos parâmetros geotécnicos para cálculo do $HSQI$ na rodovia <i>Las Palmas</i>	25
3.7	Análise dos resultados do zoneamento na rodovia <i>Las Palmas</i> . Fonte: Moreno (2015)	26
3.8	Inventário de deslizamento da rodovia <i>Las Palmas</i> (Muñoz & Martinez, 2013).....	27
3.9	Valores médios dos parâmetros geotécnicos para a análise $HSQI$ da rodovia <i>Sifón-La Abundancia</i> . Fonte: Ocampo (2016)	29
3.10	Resultado da análise de dados da rodovia <i>Sifón-La Abundancia</i> . Fonte: Ocampo (2016).....	30
3.11	Inventário de deslizamentos para a rodovia <i>Sifón-La Abundancia</i> . Fonte: Ocampo (2016)	30
3.12	Resultados da análise ROC do sistema $HSQI$	33
3.13	Análise ROC comparativo.....	33
4.1	Parâmetros geológicos/geotécnicos do trecho 1 da BR-381. Fonte: Oliveira et. al (2017)	41
4.2	Cálculo do fator Sh do trecho 1	43
4.3	Cálculo do fator Sh trecho 6	46
4.4	Parâmetros estatísticos da análise $FOSM$	51
5.1	Análise de resultados do zoneamento do trecho 1 da BR-381	54
5.2	Análise de resultados do zoneamento do trecho 6 da BR-381	55
5.3	Resultados da análise ROC do sistema $HSQI$ na BR-381	57
5.4	Análise ROC comparativa.....	58

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolos Latinos

c	Coesão	[kPa]
C_f	Fator de correção de altura	[adim.]
D	Distância	[m]
E	Valor médio	
H	Altura	[m]
i	Inclinação	[graus]
P	Profundidade do solo na potencial superfície de ruptura	[m]
S_h	Fator de umidade	[adim.]
S_{hm}	Fator de umidade normalizado	[adim.]
V	Variança	
Z_o	Profundidade da fenda de tração	[m]

Símbolos Gregos

α	Inclinação da encosta	[graus]
β	Ângulo da família de discontinuidades principal	[graus]
ϕ	Ângulo de atrito	[graus]
γ	Peso específico	[kN/m ³]
μ	Valor médio	
σ	Desvio padrão	

Subscritos

c	Crítico
d	Encosta abaixo
u	Encosta acima
w	do nível da água

Sobrescritos

'	Valor efetivo
–	Valor médio

Siglas

2D	Duas dimensões
3D	Três dimensões
ALOS	<i>Advanced Land Observing Satellite</i>
AHP	Processo Hierárquico Analítico
BR-381	Rodovia Federal Brasileira 381
C	Consequências associadas a um evento
CAD	<i>Computed Assisted Drawing</i>
CPRM	Serviço Geológico do Brasil
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte
FI, FII, FIII, FIV	Fluxos de detritos e/ou lamas de diferentes idades
FN	Falsos negativos
FOSM	<i>First Order Second Moment</i>
FP	Falsos positivos
FS	Fator de segurança
HSQI	<i>Hillslope Quality Index</i>
IDSSM	<i>Integrated Dynamic Slope Stability</i>
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
JgSD	<i>Stock</i> de San Diego
KuM	Dunitos de Medellín
MEL	Método de Equilíbrio Limite
MG	Minas Gerais
MVM	Mora-Vharson-Mora
P	Probabilidade de um evento ocorrer
PALSAR	<i>L-band Synthetic Aperture Radar</i>
PR	Probabilidade de ruptura
PraM	Anfibolitos de Medellín
QLPVF2	Fluxo vulcânico
QRCA	Depósito coluvial
QRVA	Cinza vulcânica recente
R	Risco associado a um evento
ROC	<i>Receiver Operating Characteristic</i>
SHALLSATAB	<i>Shallow Stability</i>
SHIA-LANDSLIDE	<i>Simulación Hidrológica Abierta</i>
SIG	Sistemas de Informação Geográfica
SQI	<i>Slope Quality Index</i>
SSR	<i>Slope stability rating</i>
TRIBS	<i>TIN-based real-time integrated basin simulator</i>
TMPV1	Tufo
TMPV2	Aglomerado vulcânico
TFN	Verdadeiros negativos
TP	Verdadeiros positivos
USGS	<i>United States Geological Service</i>
VBA	<i>Visual Basic</i>

1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, o rápido crescimento da população tem gerado uma expansão das cidades para zonas que apresentam maiores desafios para construção de infraestrutura. Em regiões de clima tropical e topografia acidentada, muitas vezes esse crescimento urbano se dá em zonas com alto potencial de catástrofes relacionadas a deslizamentos de encostas. Esta situação apresenta um grande desafio para os planejadores de corredores de transporte, uma vez que o principal obstáculo é encontrar um ponto de equilíbrio entre custos de execução e custos de manutenção.

É nesse contexto que surge a necessidade de uma nova infraestrutura de corredores de transporte. Sendo assim, os projetos de infraestrutura rodoviária devem ser compatíveis com os níveis de serviço requeridos, devendo também estar de acordo com a segurança mínima exigida pelos usuários. Ademais, fatores como risco, conforto e tempo de viagem devem ser levados em consideração. Neste capítulo, apresentam-se a justificativa, o problema a solucionar, os objetivos desta pesquisa e o escopo da tese.

1.1 JUSTIFICATIVA

Os movimentos de massa estão entre as principais causas de perdas econômicas por desastres geológicos, principalmente em países tropicais (Schuster & Turner, 1996). Os custos diretos dos deslizamentos que atingem corredores de transporte incluem as soluções do projeto, implementação e manutenção para evitar a instabilidade e para, no caso de ocorrerem deslizamentos, mitigar os seus efeitos. Os custos indiretos estão associados com a interrupção do transporte devido aos possíveis corredores de desvio, perdas econômicas devido à perda de negócios e a perda de confiança nos investimentos. Portanto, é importante desenvolver estudos preliminares na fase de pré-projeto, com o objetivo de compreender e minimizar os fatores que podem ocasionar perdas econômicas e sociais (Davis, 2015). Por estas razões, a aplicação de recursos que visam a pré-avaliação e zoneamento de corredores de transporte em função da suscetibilidade ao deslizamento de suas encostas é de extrema valia no direcionamento de decisões estratégicas. Com isso, é possível recomendar preliminarmente sistemas de estabilização em áreas de risco e, assim, estimar o custo do projeto contemplando a execução destes sistemas.

1.2 PROBLEMA

Atualmente, existe uma falta de métodos de zoneamento de suscetibilidade ao deslizamento em corredores de transporte em zonas tropicais. Existe uma necessidade de ferramentas que permitam aos planejadores de infraestrutura detectar regiões críticas em corredores de zonas montanhosas. O método *Hillslope Quality Index HSQI* desenvolvido por Moreno (2015), com base no trabalho de Chica (1988), é uma contribuição original que oferece uma análise simples de suscetibilidade ao deslizamento e um zoneamento ao longo de corredores de transporte usando o conceito de Índice de qualidade de encosta (*HSQI*), o qual é uma medida de como as encostas naturais são afetadas devido ao processo de construção de obras lineares. Este método fornece uma série de recomendações para obras de estabilização e permite ao planejadores e autoridades locais ter um guia para a tomada de decisões em etapas preliminares dos projetos (Moreno, 2015). O gráfico de desempenho fornece recomendações para obras de estabilização de uma maneira qualitativa, ou seja, só sugere os tipos de obras para cada zona de suscetibilidade. Esta pesquisa tem como intuito melhorar o método *HSQI* (principalmente o gráfico de desempenho), adicionando recomendações de obras quantitativas para cada zona de suscetibilidade em corredores de transporte.

1.3 OBJETIVOS DA PESQUISA

O objetivo principal da pesquisa é aperfeiçoar o método de zoneamento de suscetibilidade de encostas *HSQI*, focando nas recomendações quantitativas para obras de estabilização no gráfico de desempenho. Os objetivos específicos desta pesquisa são os seguintes:

- Sistematizar os processos de análise geométrica e a avaliação do índice de qualidade *HSQI*.
- Fazer uma aplicação do método *HSQI* na Rodovia Federal brasileira BR-381 para validá-lo.
- Estudar soluções de estabilização de encostas para gerar um gráfico de desempenho quantitativo e mais detalhado.
- Gerar gráficos de desempenho específicos para cada tipo de obra de estabilização que forneçam recomendações de quantidade de obras para diferentes níveis de suscetibilidade a deslizamentos.

1.4 ORGANIZAÇÃO DO DOCUMENTO

Este documento tem os seguintes capítulos:

- O primeiro capítulo apresenta uma introdução ao tópico da pesquisa, aos objetivos e ao escopo da tese.
- No segundo capítulo, é apresentada uma revisão bibliográfica para entender as diferentes abordagens dos métodos de zoneamento da suscetibilidade ao deslizamento para corredores de transporte.
- No terceiro capítulo, é explicado o método *HSQI*, os passos para sua aplicação, suas aplicações na Colômbia e na Costa Rica, o gráfico de desempenho, e uma análise da qualidade do método.
- O quarto capítulo mostra a metodologia utilizada na pesquisa: a sistematização dos procedimentos do método *HSQI*, a aplicação na Rodovia Federal brasileira BR-381, incluindo a indicação de obras a partir de gráficos de desempenho no produto final da metodologia.
- O quinto capítulo mostra os resultados obtidos na sistematização dos procedimentos do método *HSQI*, na aplicação do método na BR-381 e os gráficos de desempenho específicos para diferentes obras de estabilização.
- O sexto capítulo mostra as conclusões e recomendações para futuras pesquisas.

2 REVISÃO DE LITERATURA

Os deslizamentos são elementos cruciais no ciclo geológico da terra, tendo em vista a que o movimento das placas gera a ascensão da crosta terrestre e estas são constantemente erodidas pela ação da gravidade e do fluxo da água. Os terrenos inclinados são propensos frequentemente a fenômenos de deslizamentos devido às condições topográficas, climáticas e sísmicas. O aumento da presença das pessoas em locais próximos a encostas significa que, no futuro, poderá haver mais desastres provocados por deslizamentos. Os deslizamentos são uma das principais causas de perdas econômicas e humanas devidas a processos geológicos, especialmente em países de regiões tropicais (Schuster & Turner, 1996). Um estudo de deslizamentos detonados por eventos de chuvas intensas ao redor do mundo demonstrou que, em um período de aproximadamente 7 anos (entre os anos 2004 e 2010), houve uma média anual de 4.617 mortes (Petley, 2012).

No contexto de projetos de estradas ou corredores rodoviários, é fundamental realizar estudos de suscetibilidade na fase de pré-projeto para avaliação da topografia, geologia, hidrogeologia e geomorfologia da região, cobrindo todos os fatores que possam influenciar na execução do projeto, com o intuito de identificar os locais que tem maior possibilidade de apresentar deslizamentos e assim conseguir realizar um planejamento para evitar ou minimizar as perdas econômicas e sociais destes desastres. Este capítulo apresenta metodologias de zoneamento de suscetibilidade, estimativa da ameaça e do risco ao deslizamento, e uma revisão dos métodos de suscetibilidade ao deslizamento para corredores de transporte.

2.1 METODOLOGIAS DE ZONEAMENTO DA SUSCETIBILIDADE AO DESLIZAMENTO

A avaliação da suscetibilidade ao deslizamento permite dividir o terreno em zonas que têm diferentes potenciais de ocorrência de escorregamentos no futuro. O zoneamento compreende a classificação do deslizamento, medida de área e volume (magnitude) e a distribuição espacial dos deslizamentos existentes e potenciais dentro da região de estudo (Safeland, 2011). Um mapa de suscetibilidade ao deslizamento contém a subdivisão do terreno em zonas, as quais podem ser *pixels* individuais dentro de mapas baseados em sistemas de informação geográfica *SIG*, encostas individuais, unidades geológicas ou unidades administrativas, que podem ter potencial de ocorrência de deslizamentos. Este potencial pode ser indicado tanto qualitativamente (alto, médio, baixo) como quantitativamente (densidades por quilômetro quadrado, área afetada por quilômetro quadrado, fator de segurança ou probabilidade de ruptura) (Fell et al., 2008).

Revisões e classificações de métodos para zoneamento de suscetibilidade ao deslizamento podem ser encontrados em Soeters & Van Westen (1996), Carrara et al. (1999), Guzzetti et al. (1999), Aleotti & Chowdury (1999), Cascini et al. (1999), Chacon et al. (2006), Fell et al. (2008) e Cascini (2008). Os métodos de zoneamento de suscetibilidade ao deslizamento são mostrados na Figura 2.1. Eles são subdivididos em qualitativos (análise de inventários de deslizamentos e métodos heurísticos ou baseados na experiência) e quantitativos (métodos baseados em dados e modelos de base física).



Figura 2.1: Métodos de zoneamento de suscetibilidade ao deslizamento

2.1.1 Análise de inventários de deslizamentos

A abordagem mais direta para avaliar a suscetibilidade a deslizamento é o inventário de deslizamentos, que fornece a distribuição espacial, sendo os deslizamentos representados como pontos, em pequenas escalas, ou como polígonos, em grandes escalas. Os mapas de inventário de deslizamentos são a base para a maioria dos outros métodos de análise de suscetibilidade (Safeland, 2011). Uma revisão dos métodos e exemplos de referências são dados na Tabela 2.1.

Tabela 2.1: Métodos de análise de inventário de deslizamentos

Abordagem	Referências
Mapas de distribuição de deslizamentos baseados em interpretação de imagens	(Wieczorek, 1984)
Mapas de atividade dos deslizamentos baseados em interpretação de imagens multitemporal	(Keefer, 2002), (Reid & Page, 2003)
Geração de inventários baseados em registros históricos	(Guzzetti et al., 2000), (Jaiswal & Westen, 2009)
Inventário de deslizamentos baseados em interferometria de radar	(Squarzoni et al., 2003), (Colesanti & Wasowski, 2006)
Representação de inventário de deslizamentos como informação de densidade	(Coe et al., 2000), (Bulut et al., 2000), (Valadao et al., 2000)

2.1.2 Métodos heurísticos de zoneamento da suscetibilidade ao deslizamento

Nos métodos heurísticos ou baseados na experiência, a opinião do especialista tem um papel decisivo. O mapa de suscetibilidade ao deslizamento pode ser feito pelo geomorfologista ou geotecnista diretamente em campo, ou pode ser feito no escritório, tendo como base o mapa do geomorfologista. Este método é usado extensivamente como base para mapas de suscetibilidade local para zoneamento de uso de solo em muitos países. O método é direto, tendo em vista que o especialista determina a suscetibilidade do terreno diretamente no campo, baseado em observações e no contexto geológico/geomorfológico. Esse mapa fornece informação precisa, já que a suscetibilidade pode ser avaliada separadamente para cada local específico, sem necessidade das simplificações que são usadas na maioria dos outros métodos.

Os métodos baseados na experiência também podem ser aplicados indiretamente, usando sistemas de informação geográfica *SIG* e combinando uma série de mapas de fatores importantes ou determinantes para a ocorrência de deslizamentos. Isso pode ser feito combinando todos os fatores relevantes usando ferramentas de *SIG* e atribuindo uma classe de suscetibilidade a cada combinação individual. Ou pode se atribuir um peso a cada classe dos mapas de fatores individuais e utilizá-los estes no mapa final. As condições do terreno são somadas de acordo com esses pesos, levando a valores de suscetibilidade, os quais podem ser agrupados em classes. Este método é muito aplicado no zoneamento de ameaça de deslizamento.

As classes de suscetibilidade resultantes (alta, moderada, baixa) podem ser caracterizadas pela densidade de deslizamento, obtida pela superposição do mapa de suscetibilidade e do inventário de deslizamentos. Esse pode ser um procedimento iterativo, no qual os especialistas podem ajustar os pesos até que o mapa de suscetibilidade forneça uma classificação aceitável, na qual a maioria dos deslizamentos deva ocorrer em zonas com alta suscetibilidade. Na Tabela 2.2 apresentam-se alguns métodos baseados em experiência.

Tabela 2.2: Métodos heurísticos

Abordagem	Referências
Mapeamento geomorfológico	(Kienholz, 1978), (Rupke et al.,1988), (Cardinali et al., 2002)
Método do mapeamento direto	(Barredo et al., 2000), (Van Westen et al.,2000)
Método dos pesos multiclasses	(Mora & Vahrson, 1994), (Budeta, 2004), (Malet et al., 2009) (Taherynia et al., 2014), (Pinheiro et al., 2015)
Análise espacial multicritério	(Ayalew et al., 2005), (Castellanos & Westen, 2005)
Processo hierárquico analítico (AHP)	(Yoshimatsu & Abe, 2005), (Yalcin, 2008)
Abordagem de lógica difusa	(Ercanoglu & Gokceolglu, 2001), (Chung & Fabbri, 2001)

2.1.3 Métodos estatísticos de zoneamento da suscetibilidade ao deslizamento

Os métodos estatísticos ou baseados em dados usam os registros históricos de ocorrências de deslizamentos para prever, espacial e temporalmente, futuros escorregamentos. Estes métodos são menos subjetivos e têm uma melhor replicabilidade, mas requerem muitos dados para fornecer resultados confiáveis. As três principais abordagens desses métodos são: estatística bivariada, multivariada e redes neurais artificiais, caracterizadas por:

- Nas análises estatísticas bivariadas, cada mapa do fator (inclinação, geologia, uso de solo, etc.) é combinado com um mapa de distribuição e os valores dos pesos baseados em densidades, são calculados para cada parâmetro (tipo de encosta, unidade geológica, tipo de uso de solo, etc.). Vários métodos estatísticos podem ser aplicados para calcular o valor para os pesos dos parâmetros, como lógica difusa ou sistema de combinação bayesiana, entre outros.
- Na estatística multivariada, avalia-se a relação entre uma variável dependente (ocorrência do deslizamento) e uma série de variáveis independentes (fatores que controlam o deslizamento). Ao contrário das análises bivariadas, os modelos multivariados levam em consideração a interação entre os fatores condicionantes do processo. Neste tipo de análise, todos os fatores relevantes são mostrados em uma grade ou em unidades morfométricas. A matriz resultante é depois analisada com regressão múltipla, regressão logística ou análise discriminante.
- As redes neurais artificiais são definidas como funções de aproximação não lineares, usadas extensivamente para reconhecimento de padrões e classificações. Os neurônios são as unidades básicas da rede, os quais são organizados dentro de uma função não linear levando em consideração os critérios de entrada. A estrutura de camadas, pesos e conexões, conhecida como rede topológica, determina o comportamento da precisão da rede.

Como os métodos estatísticos precisam de um inventário de deslizamentos substancialmente completo e de uma série de fatores de mapeamento, eles não podem ser aplicados em grandes áreas. Essas técnicas são as normalmente utilizadas em avaliações de suscetibilidade em escalas maiores. Na Tabela 2.3 são mostradas algumas referências de métodos estatísticos.

Tabela 2.3: Métodos de avaliação da suscetibilidades baseados em dados

Abordagem	Métodos	Referências
Método de estatística bivariada	Modelo de razão de probabilidade Método do valor da informação Funções de favorabilidade	(Lee, 2005) (Yin & Yan, 1988) (Luzi, 1985)
Métodos de estatística multivariada	Análise discriminante Regressão logística	(Carrara, 1983), (Gorsevski et al., 2000) (Ohlmacher & Davis, 2003)
Redes neurais artificiais	Redes neurais artificiais	(Lee et al., 2004), (Ermini et al., 2005)

2.1.4 Métodos baseados em modelos de base física para zoneamento da suscetibilidade ao deslizamento

Estes métodos são baseados na modelagem dos processos de deslizamento usando modelos de estabilidade de taludes de base física. A maioria dos modelos de base física que são aplicados a escala local utilizam o modelo de talude infinito e são portanto úteis somente para deslizamentos superficiais translacionais. Os mapas de suscetibilidade resultantes mostram o fator de segurança para cada *pixel* e cada cenário. Os resultados de tais modelos são mais concretos e consistentes que os modelos heurísticos e estatísticos, dada a sua abordagem da descrição dos processos físicos subjacentes que levam à modelagem dos fenômenos. Estes métodos têm uma capacidade preditiva maior e são mais adequados para avaliações quantitativas de influência de parâmetros individuais que contribuem para a iniciação de deslizamentos superficiais. Porém, frequentemente, estes modelos de base física consomem mais tempo e recursos do que outros métodos. As principais desvantagens deste método são o alto grau de simplificação e a necessidade de grandes quantidades de dados de entrada. Os métodos são aplicáveis apenas em grandes áreas somente quando as condições geomorfológicas e geológicas são homogêneas e os tipos de deslizamentos de terra são simples. Na Tabela 2.4, é mostrada uma relação dos métodos de base física.

Tabela 2.4: Métodos de avaliação de suscetibilidade baseados em modelos de base física

Tipo	Métodos	Referências
Métodos de equilíbrio limite baseado em SIG	Modelo estático de talude infinito Modelo dinâmico de talude infinito com a precipitação como agente deflagrante Modelo sísmico de talude infinito	(Pack et al., 1998), (Montgomery & Dietrich, 1994) (Baum et al., 2002), (Van Beek, 2002), (Casadei et al., 2003), (Simoni et al., 2008) (Aristizabal et al., 2016) (Jibson et al., 1998)
Análise cinemática para taludes em rochas	Rede estereográfica, análise de descontinuidades por GIS	(Gunter, 2003)
Métodos de equilíbrio limite 2D	MEL 2D com fluxo de água e análise de tensões	Programa GEO-Slope®
Modelos numéricos de equilíbrio limite 3D	Análise de estabilidade 3D Modelo contínuo e modelo descontínuo	(Gitirana et al., 2008) (Stead et al., 2001)

2.2 ESTIMATIVA DA AMEAÇA DE DESLIZAMENTOS

Converter os mapas de suscetibilidade em mapas de ameaça requer estimativas da probabilidade espacial, temporal e de magnitude dos deslizamentos (Guzzetti et al., 1999; Fell et al., 2008; Corominas and Moya, 2008; Van Westen et al., 2008). A diferença entre a suscetibilidade e a ameaça é a adição da probabilidade de ocorrência (temporal, espacial e de magnitude).

O objetivo da avaliação da ameaça de deslizamentos é determinar a ocorrência tanto espacial como temporal de deslizamentos dentro de uma área de estudo, incluindo seus atributos (tamanho, área, volume, características do movimento, velocidade do deslizamento, energia cinética, deslocamento diferencial), devido aos elementos deflagradores, que, no caso, são a precipitação crítica e os eventos sísmicos. A análise tem que levar em consideração todos os possíveis mecanismos, incluindo reativação e aceleração dos deslizamentos existentes. A estimativa de frequência ou probabilidade anual de deslizamentos é um componente crítico da avaliação de ameaça e, portanto, é fundamental a preparação das relações magnitude/frequência. Duas abordagens são tradicionalmente seguidas para avaliar a probabilidade de ocorrência de deslizamentos:

- A análise de condições presentes e a avaliação da potencial instabilidade das encostas e dos deslizamentos existentes no futuro.
- A observação das potenciais instabilidades dependendo da ocorrência de eventos passados, que são considerados repetitivos.

2.2.1 Estimativa da ameaça de deslizamentos para áreas

A avaliação de ameaça tem o intuito de determinar o potencial de deslizamentos que podem ocorrer em uma unidade de terreno. Para esse propósito, é necessário primeiro estabelecer a estabilidade das encostas e dos deslizamentos existentes. Essa avaliação geralmente é feita com modelos de estabilidade ou análise de suscetibilidade (probabilidade espacial). Depois, pode ser utilizada uma ampla variedade de técnicas de tratamento de dados, tais como análises discriminantes, lógica difusa, regressão lógica ou redes neurais, as quais apresentam os resultados principalmente como mapas de suscetibilidade, nos quais para cada região (*pixel*, unidade geomorfológica independente, zona), apresenta-se a probabilidade de ocorrência de deslizamentos. A ameaça pode ser calculada como a probabilidade condicional de ruptura de uma encosta uma vez que um gatilho (por exemplo chuva crítica ou sismo) ocorra (Cascini et al., 1999).

2.2.2 Estimativa da ameaça de deslizamentos para projetos lineares

As análises da ameaça de deslizamentos para projetos lineares são feitas, tipicamente, em corredores de transporte (Jaiswal & Van Westen, 2009; Pankal et al., 2010; Blaiss-Stevens et al., 2012; Devkota et al., 2013; Opiso et al., 2016; Pellicani et al., 2017; Bordoni et al., 2018). Esta é uma situação particular, na qual os elementos expostos (pessoas e veículos) são altamente vulneráveis à ocorrência de eventos de deslizamentos, seja por impacto dos detritos nos elementos expostos ou por colisão contra os detritos já depositados na infraestrutura de transporte. Dado que os eventos de baixa intensidade podem causar danos significativos, a análise da ameaça é geralmente feita sem nenhum cálculo de velocidade ou energia cinética. Geralmente, a magnitude do evento é usada para determinar o número de faixas da via afetadas e o comprimento do movimento em massa para calcular a probabilidade de encontro com a massa de detritos de um

deslizamento (Safeland, 2011) . Os valores da ameaça podem ser expressos em termos relativos (probabilidade anual de ocorrência de um dado evento com magnitude dada por unidade de comprimento) ou absolutos (número de eventos totais por ano).

2.3 ESTIMATIVA DE RISCO DE DESLIZAMENTOS

Uma abordagem generalizada para a quantificação do risco é a seguinte: o risco R , devido a um evento, é o produto entre a probabilidade P do evento ocorrer e as consequências C associadas a esse evento, como é mostrado na Eq 2.1:

$$R = PC \quad (2.1)$$

De acordo com Fell et al. (2008), comumente uma análise de risco tem como principal objetivo o conhecimento das possibilidades de danos e perdas na elaboração de projetos, na expectativa de tomadas de decisões que envolvam custos e no prazo previsto de execução. Uma análise de risco deve envolver: definição do escopo, identificação de perigo (ameaça), estimativa da probabilidade de ocorrência do evento, avaliação da vulnerabilidade dos elementos em risco, identificação de consequências e, finalmente, a estimativa de risco. A análise de risco pode ser de caráter qualitativo ou quantitativo:

- Análise qualitativa de riscos: análise que usa a forma de texto, de natureza descritiva ou por escalas numéricas, para descrever a magnitude das consequências potenciais e a probabilidade de que estas consequências ocorram.
- Análise quantitativa de risco: análise baseada em valores numéricos da vulnerabilidade, probabilidade e consequências, resultando em um valor numérico para o risco.

2.3.1 Estimativa da vulnerabilidade para avaliação de risco de deslizamentos

A estimativa da vulnerabilidade é um subcomponente da estimativa do risco. Uma ameaça tem o potencial de se converter em risco na condição de existirem elementos vulneráveis expostos na área de possível ocorrência, incluindo pessoas, estruturas e infraestruturas (Safeland, 2011). Existem dois conceitos importantes envolvidos na análise de consequências: exposição e vulnerabilidade. A exposição depende do local onde possa ser afetado um elemento vulnerável, enquanto a vulnerabilidade expressa o grau de dano que possa sofrer o elemento devido ao evento, independentemente do local onde possa ocorrer o evento. A exposição pode ser estimada sobrepondo os mapas de ameaça e os elementos potencialmente expostos. Já a vulnerabilidade requer análise mais profunda para seu cálculo. Dependendo do tipo de perda, a vulnerabilidade pode ser classificada dentro das seguintes categorias:

- Vulnerabilidade física: referente ao dano a prédios e infraestruturas.
- Vulnerabilidade de pessoas: referente à vida e saúde dos seres humanos.
- Vulnerabilidade socioeconômica: referente às consequências sociopolíticas e econômicas.
- Vulnerabilidade ambiental: referente ao impacto no meio ambiente devido ao evento.

No caso dos corredores de transporte, os principais elementos em risco são os veículos que transportam as pessoas e a própria infraestrutura. Alguns autores têm apresentado métodos para avaliar quantitativa e qualitativamente a vulnerabilidade desses elementos (Roberts, 2005; Uzzielli et al., 2008; Li et al., 2010).

2.3.2 Gerenciamento do risco de deslizamentos

Segundo Fell et al. (2008), o gerenciamento de risco de deslizamentos é a aplicação sistemática de políticas, procedimentos e práticas de gestão às tarefas de identificação, análise, avaliação, mitigação e monitoramento de risco de deslizamentos. O resultado final de uma análise de risco pode ser:

- Que os riscos são toleráveis ou inclusive aceitáveis e não é necessária nenhuma ação de mitigação ou reparação.
- Que os riscos são inaceitáveis e é preciso tomar medidas de mitigação de risco.

Dentro das medidas de mitigação de risco, encontram-se as seguintes:

- Reduzir a frequência de ocorrência de deslizamentos usando obras de estabilização de encostas, como drenagem, modificação da geometria, cortinas atirantadas, etc.
- Reduzir a probabilidade dos deslizamentos atingirem os elementos em risco mediante obras que permitam segurar os produtos do deslizamento que possam chegar até os elementos em risco, como, por exemplo, malhas metálicas, barragens de detritos, etc.
- Reduzir a probabilidade espacial e temporal do elemento em risco com medidas como re-locação de prédios, monitoramento de encostas que permitam fazer um sistema de alerta, etc.

2.4 AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DOS MÉTODOS DE ZONEAMENTO DE SUSCETIBILIDADE, AMEAÇA E RISCO DE DESLIZAMENTOS

Um tema importante no desenvolvimento de metodologias de suscetibilidade, ameaça e risco de deslizamentos é a avaliação de sua qualidade. Na prática, avaliações dos modelos são feitas mediante comparações com inventários de deslizamentos de períodos diferentes. Um método corriqueiro para testar a acurácia dos mapas de suscetibilidade ao deslizamento é compará-los com mapas de ocorrência de deslizamentos existentes e calcular a porcentagem dos deslizamentos dentro de cada categoria de ameaça (Carrara, 1983; Gee, 1992). Porém, os mapas de ocorrência de deslizamentos podem ter um grande nível de incerteza ou elementos subjetivos (Fookes et al., 1991; Carrara, 1992; Van Den Eeckhaut et al., 2007). Outro método de avaliar a confiabilidade dos mapas de ameaça é a comparação de mapas da mesma área feitos por diferentes equipes de pesquisadores. Esse é um exercício que requer preparação, conhecimento da área e tempo utilizado para desenvolver o mapa (Van Westen et al., 1999).

A robustez do modelo pode ser avaliada mediante uma análise sistemática da variação do modelo sob pequenas mudanças dos parâmetros de entrada ou das incertezas (Guzzetti et al., 2006). O critério mais relevante para avaliação da qualidade é a análise da acurácia do modelo, a qual é feita mediante a comparação dos resultados do modelo com os dados observados. No caso dos modelos de suscetibilidade ao deslizamento, os dados observados compreendem a presença ou ausência de deslizamentos em certa unidade do terreno usada nas análises.

Nos primeiros modelos de suscetibilidade, a acurácia era avaliada mediante comparação visual dos atuais deslizamentos com a classificação de suscetibilidade (Gökceoglu & Aksoy, 1996). Na última década, diferentes autores têm proposto métodos equivalentes para avaliar os modelos, alguns dos quais são:

- Em termos de densidade de deslizamento dentro de cada uma das classes, como “Densidade de deslizamento” (Montgomery & Dietrich, 1994; Crosta & Frattini, 2003), “Grau de ajuste” (Baeza & Corominas, 2003), e “Taxa de áreas com deslizamentos” (Lee et al., 2003).
- Outros autores decidiram representar o sucesso do modelo comparando a proporção das áreas com deslizamentos com a proporção das áreas de cada classe de suscetibilidade (Zinck et al., 2001), como as “Curvas de taxa de sucesso” (Chung & Fabbri, 2003; Lee, 2005; Guzzetti et al., 2006).
- O método mais recente é o modelo *Receiver Operating Characteristic ROC* (Yesilnacar & Topal, 2001; Van Den Eeckhaut et al., 2006; Fawcett, 2006).

Como foi mencionado anteriormente, a acurácia é avaliada mediante análise de concordância entre os resultados do modelo e os dados observados. Como os dados observados compreendem a presença ou ausência de deslizamentos dentro de certa unidade de terreno, um método simples para avaliar a acurácia é comparar essa informação com uma classificação binária de suscetibilidade em unidades estáveis e instáveis. Essa classificação requer um valor que separe os terrenos estáveis (suscetibilidade maior do que o valor de corte) dos terrenos instáveis (suscetibilidade menor do que o valor de corte).

A comparação entre os dados observados e os resultados do modelo em duas classes é representada mediante tabelas ou matrizes de confusão. A avaliação da acurácia analisa o desempenho do modelo combinando classificações positivas corretas ou incorretas (áreas instáveis) e classificações negativas (áreas estáveis). A taxa de verdadeiros positivos (*TP rate*) e a taxa de falsos positivos (*FP rate*) são estatísticas de desempenho insuficientes porque ignoram os verdadeiros negativos e os falsos negativos, respectivamente. Esses critérios podem ser usados só quando são combinados, por exemplo, nos gráficos *ROC*, nos quais é possível fazer comparações de desempenho e qualidade dos modelos em quanto a capacidade e efetividade de predição e avaliação dos dados.

2.5 PESQUISA WEB OF SCIENCE

Foi realizada uma pesquisa sobre o tema suscetibilidade ao deslizamento em rodovias na base *web of Science*, dando como resultado, que, nos últimos 20 anos e nas áreas de geologia, engenharia civil, geografia física e sensoriamento remoto, apenas 91 trabalhos foram encontrados. Dos quais:

- Os trabalhos mais recentes, na área específica utilizam diferentes metodologias para zoneamento de suscetibilidade ao deslizamento de encostas para corredores de transporte em diferentes regiões montanhosas ao redor do mundo (Pellicani et al., 2017; Bordoni et al., 2018; Gulzar et al., 2018; Meneses et al., 2019), mas não fornecem recomendações de obras de estabilização ou prevenção de deslizamentos.
- Os autores com mais trabalhos reconhecidos fazem comparações de métodos, alguns aplicados diretamente em projetos de infraestrutura, como rodovias e ferrovias (Das et al., 2012; Regmi et al., 2014; Ramesh et al., 2017), e outros realizam aplicações em grandes áreas (bacias hidrográficas, limites administrativos, etc.), utilizando a distância do corredor de transporte ao ponto de estudo como um elemento de análise de suscetibilidade (Ramesh & Anbazhagan, 2015; Chen et al., 2016; Tsangarados et al., 2017).
- Dentro das citações, pode-se observar, na Fig. 2.2 que nos últimos dez anos, o número de citações de artigos referentes ao tema, para a base científica pesquisada, tem sido muito

baixo (menos de 20 por ano), o que pode ser devido à falta de trabalhos na área.

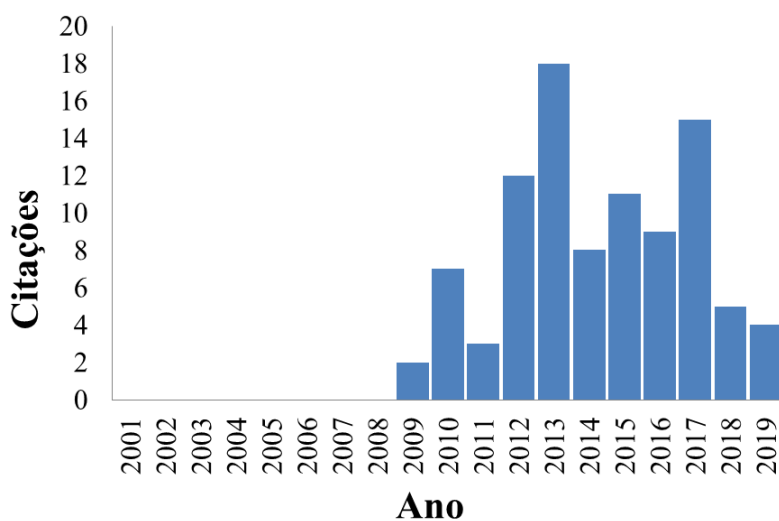


Figura 2.2: Citações anuais (fonte: *Web of Science*)

2.6 TRABALHOS DE AUTORES BRASILEIROS

Embora os autores europeus e asiáticos sejam os líderes no tema de métodos de análise de suscetibilidade, ameaça e risco de deslizamentos em encostas de corredores de transporte, o Brasil também tem avançado nessa área, com autores e contribuições referentes a esse tema, os quais são apresentados na Tabela 2.5.

Hidalgo (2013) apresentou uma metodologia para a avaliação do risco por movimentos em massa em rodovias localizadas em regiões tropicais montanhosas mediante uma metodologia probabilística, incorporando técnicas de tomada de decisões aplicada em 40 km da estrada Aburrá-Cauca, na região noroeste da Colômbia.

No trabalho de Fernandes (2015), foi desenvolvido um programa chamado *Risk Lab*, que permite quantificar o risco devido a escorregamentos rasos detonados por chuvas usando o modelo de base física para previsão de deslizamentos *SHIA-LANDSLIDE*, desenvolvido por Aristizábal et al. (2015) e aplicado na cidade de Medellín, Colômbia.

Barella (2016) fez um zoneamento ao suscetibilidade a deslizamento em duas áreas da região denominada Quadrilátero Ferrífero no estado de Minas Gerais, no Brasil, mediante diferentes métodos estatísticos, permitindo fazer um comparativo entre eles.

Donasollo (2017) propôs uma metodologia, aplicada na rodovia RS-115, para classificar o

Tabela 2.5: Estado da arte no Brasil

Autor	Contribuição
Soares et al., 2002	Método de probabilidade condicional aplicado na avaliação de suscetibilidade ao deslizamento no estado de São Paulo
Silveira et al., 2005	Classificação de unidades ecodinâmicas aplicada à análise de risco e ao planejamento territorial em Guaratuba, SP
Tominaga, 2007	Métodos geomorfológicos para a análise de risco em Ubatuba, SP
Fernandez & Cerri, 2011	Avaliação da suscetibilidade geológica na rodovia BR-300, SP
Nery, 2011	Suscetibilidade a deslizamentos translacionais na bacia Ultrafertil, SP
Hidalgo, 2013	Análise de risco de deslizamentos superficiais na conexão vial Aburrá-Cauca, CO
Silveira et al., 2014	Mapa de suscetibilidade a deslizamento baseado em uma análise digital do terreno na Serra do Mar, Paraná
Alves, 2014	Análise de risco geotécnico na ferrovia Estrada de Ferro, MG
Leal, 2014	Mapa de risco de deslizamentos na bacia do Rio Grande de Ubatuba, SP
Manfre, 2015	Sensoreamento remoto de imagens para identificação de deslizamentos na Via Anchieta, SP
Oliveira, 2015	Caracterização geológico-geotécnica e intervenção para estabilização de taludes na bacia do Córrego do Cravo, MG
Corteletti, 2015	Metodologia para diagnosticar e quantificar o risco geológico-geotécnico na ferrovia Estrada de Ferro, PA
Fernandes, 2015	Análise de risco FOSM para deslizamentos superficiais deflagrados por chuva em Medellín, CO
Moreno, 2015	Zoneamento de suscetibilidade ao deslizamento com o índice de qualidade de encosta HSQI na rodovia <i>Las Palmas</i> , CO
Barella, 2016	Abordagem estatística de mapeamento de suscetibilidade a deslizamentos na região do Quadrilátero Ferrífero, MG
Craig, 2016	Análise de suscetibilidade de taludes rodoviários usando talude infinito no ambiente <i>SIG</i>
Ocampo, 2016	Zoneamento de suscetibilidade a deslizamentos baseado no <i>HSQI</i> na rodovia <i>Sifón-La Abundancia</i> , CR
Donasollo, 2017	Classificação de risco de deslizamentos em rodovias usando o método AHP na rodovia RS-115, RS

perigo de movimentos de blocos, e gerar quantificação e aplicação de índices de perigo de escorregamento em taludes de corte e aterro, de movimentos de rastejo, além do movimento de queda de blocos que possam afetar a rodovia, ordenados em uma matriz de acordo com os princípios do método Analytic Hierarchy Process (AHP).

Destacam-se entre os autores de pesquisas no Brasil, os trabalhos de Moreno (2015) e Ocampo (2016), dissertações de mestrado que antecederam a presente tese de doutorado. No trabalho de Moreno, introduziu-se o método *HSQI*, aplicado na rodovia *Las Palmas*, da cidade de Medellín, na Colômbia, o qual terá uma abordagem completo no capítulo 3. No trabalho de Ocampo foi feita uma aplicação do método na rodovia *Sifón-La Abundancia*, na província de Alajuela, na Costa Rica. No capítulo 3, serão apresentados o método detalhado e os resultados detalhados das aplicações nas duas pesquisas.

3 MÉTODO DE ZONEAMENTO DA SUSCETIBILIDADE AO DESLIZAMENTO DE ENCOSTAS *HSQI*

O índice de qualidade de encostas em inglês, *Hillslope Quality Index (HSQI)* é um método de zoneamento de suscetibilidade de encostas, o qual considera parâmetros geométricos e geotécnicos para calcular a estabilidade das encostas. Este método é baseado nos procedimentos para análise de estabilidade de taludes expostos por Chica (1988). O *HSQI* modifica o termo fator de segurança, originalmente aplicado no talude pelo termo índice de qualidade (QI), o qual indica a suscetibilidade ao deslizamento de uma encosta influenciada pela construção de um corredor de transporte (Moreno, 2015). Uma vez feito o zoneamento de suscetibilidade ao deslizamento no corredor de transporte, o método *HSQI* fornece recomendações de obras de estabilização e prevenção de acordo com a importância do projeto. Este capítulo apresenta as principais características da método *HSQI*, suas aplicações em duas rodovias, na Colômbia e na Costa Rica, e uma avaliação da qualidade do método segundo o aferido nos trabalhos de campo.

3.1 CÁLCULO DO *HSQI*

Para calcular o valor do índice de qualidade de encostas *HSQI* utilizam-se duas funções que dependem tanto da geometria como dos parâmetros geotécnicos da encosta: a função X, que depende da inclinação da encosta, e a função Y, que depende do peso da encosta. Estas funções são o resultado de análises de estabilidade aplicadas a diferentes condições geológicas, hidrológicas e geotécnicas (Chica, 1988). Com os valores das funções X e Y, entra-se nas cartas de cálculo do *HSQI*. Primeiro, é preciso determinar se a encosta é ou não controlada estruturalmente, ou seja, se os processos de instabilidade são devidos à conformação do material da encosta ou às discontinuidades presentes no maciço. Caso não seja, deve-se determinar qual par de condições entre as mostradas na Fig. 3.1 serão usadas para o cálculo das funções X e Y. Depois utilizando a carta mostrada na Fig. 3.2, pode-se calcular o valor do índice de qualidade,

Em que: o termo H das fórmulas corresponde à altura de análise;

H_u é a altura da encosta acima do nível da pista do corredor de transporte;

H_d é a altura da encosta abaixo do nível da pista do corredor de transporte;

H_w é a altura estabilizada do lençol freático;

i é a inclinação da encosta;

Z_o é a profundidade da fenda de tração;

ϕ é o ângulo de atrito do material da encosta;

γ é o peso específico do material da encosta;

c é a coesão do material da encosta.

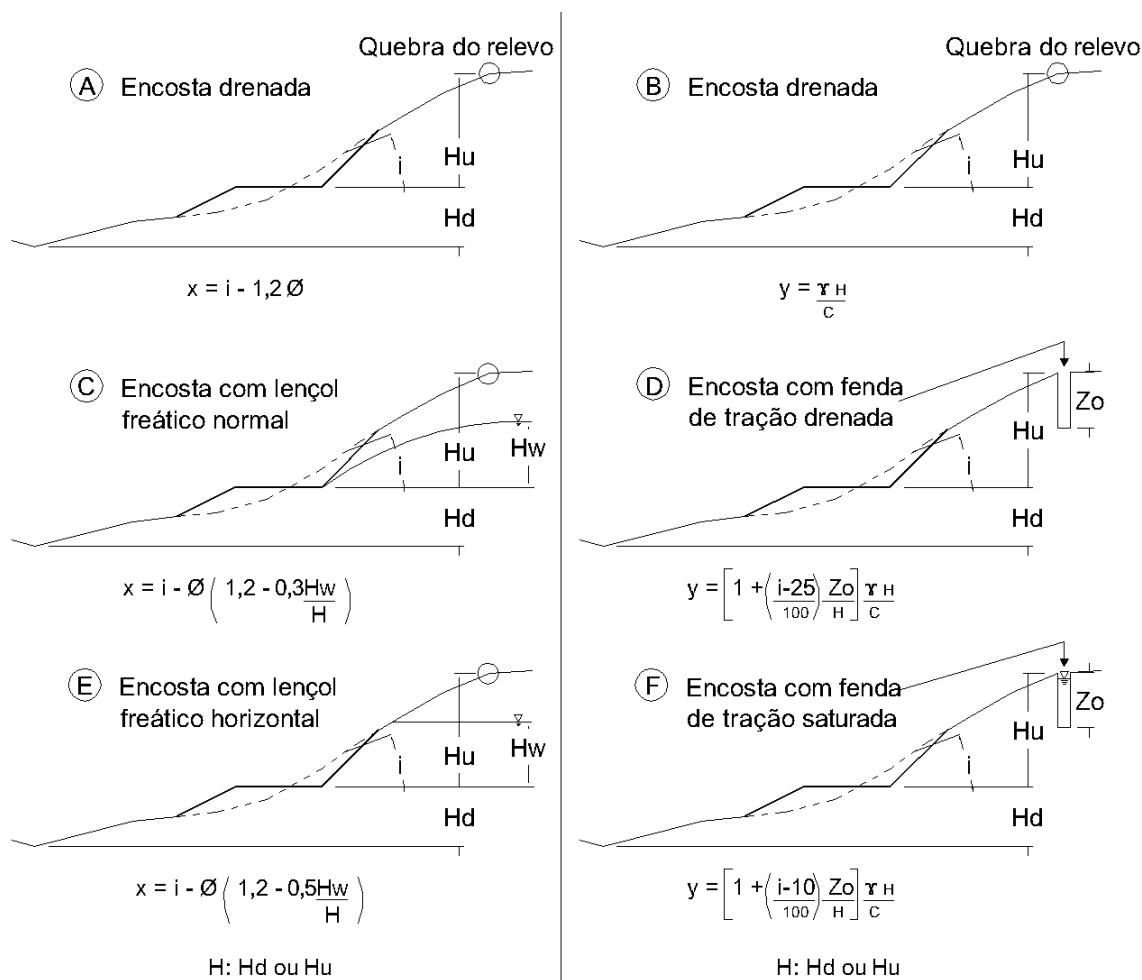


Figura 3.1: Análise de condições para encostas sem controle estrutural (adaptado de Chica, 1988)

As condições de análise estão relacionadas com a posição do lençol freático, baseada na condição hidrogeológica e na presença de fendas de tração na encosta, como evidência do começo de um processo de deslizamento. O mesmo procedimento é aplicado para os casos de encostas com controle estrutural. Na Fig. 3.3 são mostradas as condições de análise para o cálculo das funções X e Y. E na Fig. 3.4, apresenta-se a carta de cálculo do índice de qualidade,

Em que: β é o ângulo de mergulho da família principal de discontinuidades do maciço da encosta.

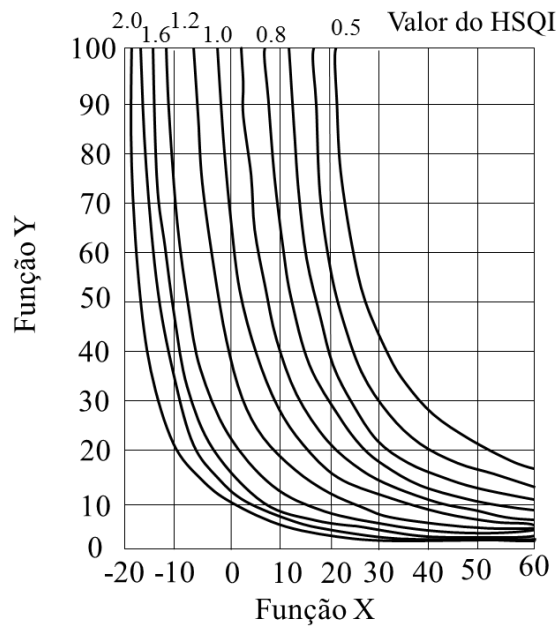


Figura 3.2: Carta de cálculo HSQI para encostas sem controle estrutural (adaptado de Chica, 1988)

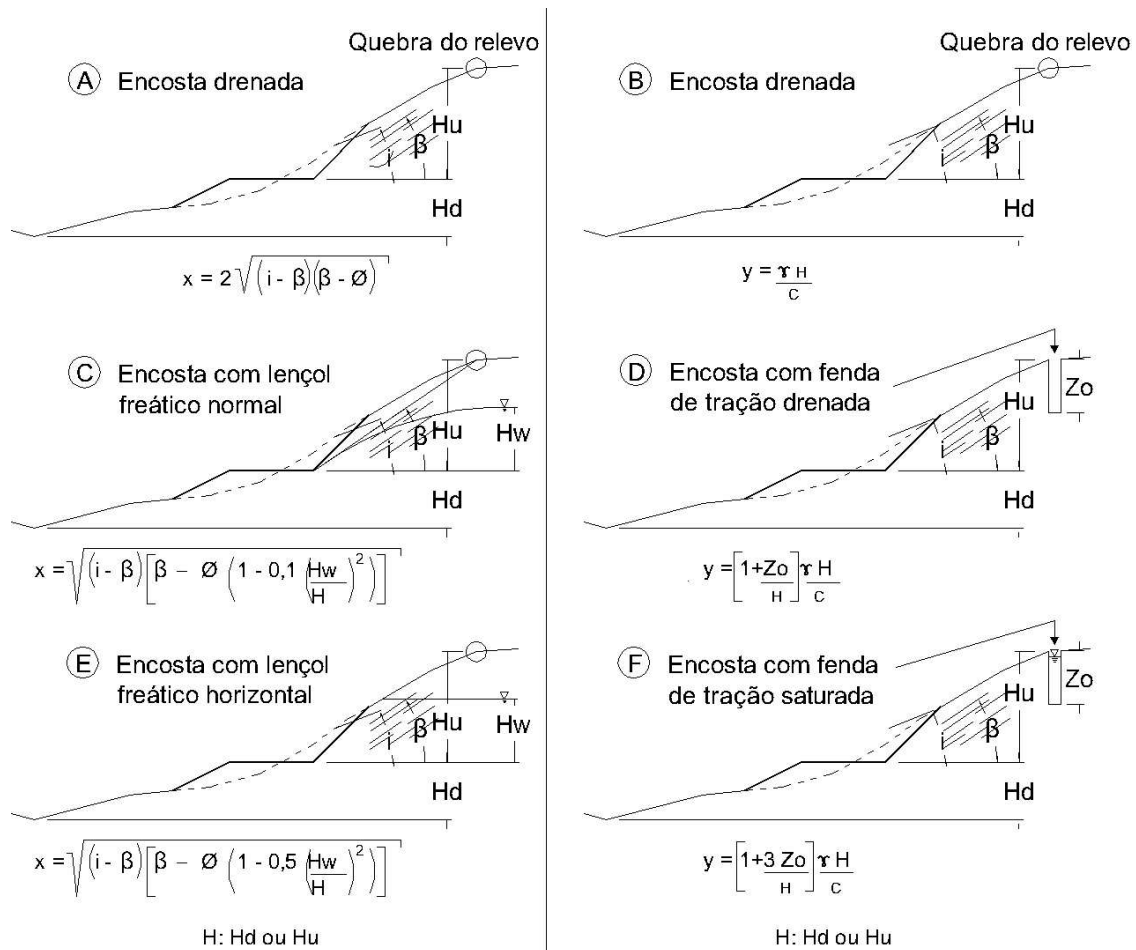


Figura 3.3: Condições de análise para encostas com controle estrutural (adaptado de Chica, 1988)

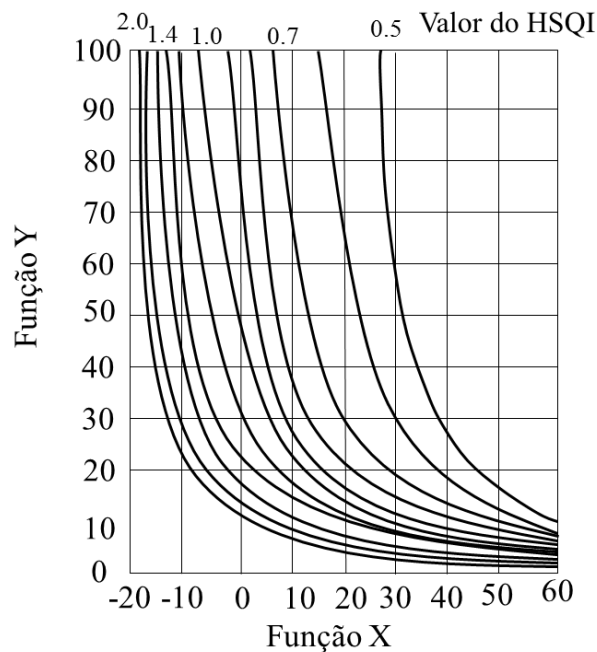


Figura 3.4: Carta de cálculo HSQI para encostas com controle estrutural (adaptado de Chica, 1988)

3.2 PROCEDIMENTO DO MÉTODO *HSQI*

O método *HSQI* compreende uma série de procedimentos a serem desenvolvidos adequadamente, entre os quais encontram-se a coleta de informação topográfica e geológica/geotécnica da zona do projeto, o zoneamento ou divisão do corredor de transporte, a caracterização geométrica de cada zona e o cálculo do índice de qualidade, para, finalmente, fazer o zoneamento de suscetibilidade e fornecer as recomendações de obras de estabilização e prevenção para o corredor. Para aplicar este método, é preciso ter o projeto geométrico da estrada para que se tenha a informação de largura das plataformas e das inclinações propostas para os taludes de corte e de aterros.

3.2.1 Coleta de informação

Uma vez definido o projeto do corredor de transporte, é necessário coletar a informação geológica/geotécnica (carta geológica e/ou de formações superficiais), os dados hidrológicos (registros de precipitação) e os dados de parâmetros físico-mecânicos dos materiais (coesão c , ângulo de atrito ϕ , peso específico γ), com o intuito de utilizá-los no cálculo do índice de qualidade. Com essa informação, é possível definir as unidades geológicas/geotécnicas dentro da área do projeto, assim como as propriedades físicas e mecânicas de cada uma.

Para o cálculo da condição hidrogeológica, é preciso determinar o fator de umidade Sh , o qual é baseado no método Mora-Vharon (1994). O fator Sh , que varia entre 0 e 5, representa as condições pluviométricas da região e é calculado de acordo com os registros de precipitações mensais. Para cada valor de precipitação média de cada mês, atribui-se um valor como é mostrado na Ta-

bela 3.1. Depois soma-se o valor dos índices de todos os doze meses e, com esse valor, pode-se avaliar o fator Sh de acordo com as categorias mostradas na Tabela 3.2. Uma vez calculado o fator Sh , a condição hidrogeológica é estimada de acordo com o princípio de proporcionalidade (Juarez-Badillo, 2010), como mostrado na Fig. 3.5, onde o fator de umidade normalizado Shn é atribuído à relação Hw/H . As condições geológicas não são considerados no cálculo da relação Hw/H .

Tabela 3.1: Classificação dos valores de precipitação média mensal

Precipitação média mensal (mm/mês)	Valor atribuído
≤ 125	0
125 – 250	1
≥ 250	2

Tabela 3.2: Fator de umidade (Sh)

Valor acumulado dos índices de precipitação	Qualificação	Fator Sh	Fator Shn
0 – 4	Muito baixo	1	0,2
5 – 9	Baixo	2	0,4
10 – 14	Médio	3	0,6
15 – 19	Alto	4	0,8
20 – 24	Muito Alto	5	1,0

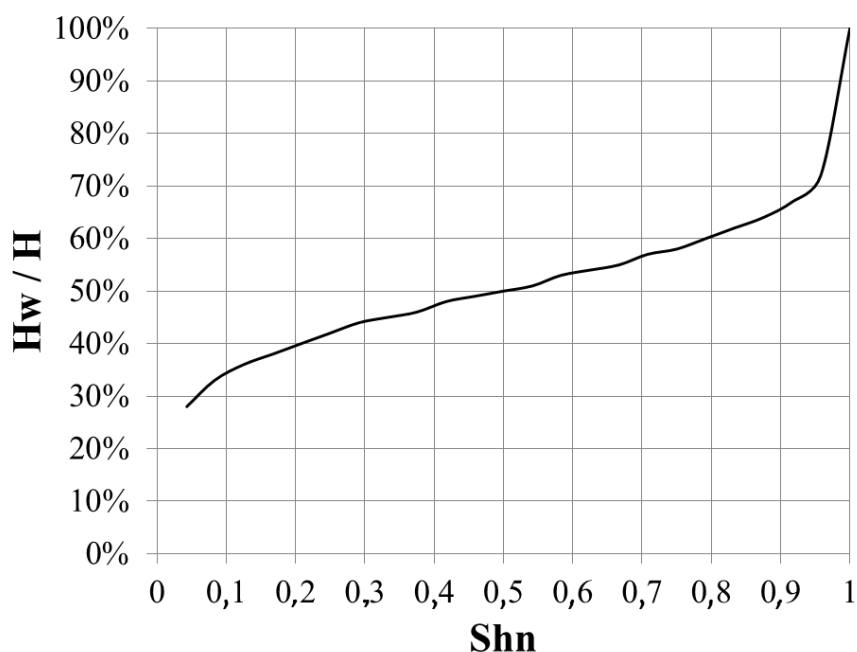


Figura 3.5: Condição hidrogeológica Hw/H vs. Fator de umidade normalizado Shn

3.2.2 Caracterização geométrica

A informação geométrica é um dos dados de entrada para a aplicação do método *HSQI*. Uma vez definidas cada uma das zonas do corredor de transporte e suas respectivas seções transversais, deve-se definir as características geométricas das encostas com base nas dimensões utilizadas no projeto de estrada, como mostrado na Fig. 3.6.

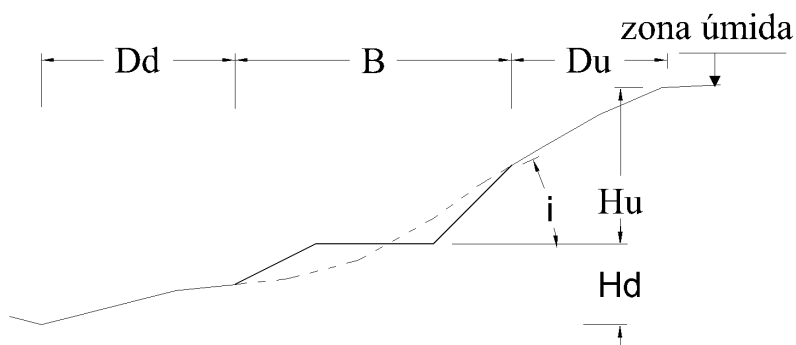


Figura 3.6: Geometria típica de encosta

As características geométricas utilizadas como dados de entrada no método são:

B é a largura da plataforma com os taludes do projeto;

H_d e D_d são a altura e a distância encosta abaixo, respectivamente;

H_u e D_u são a altura e a distância encosta acima, respectivamente.

3.2.3 Zoneamento *HSQI*

Para poder realizar a análise *HSQI* é preciso dividir o corredor de transporte em zonas, de acordo com as unidades geológicas/geotécnicas independentes. O comprimento mínimo de cada zona é a soma das distâncias B , D_u e D_d . Os dados de entrada geométricos e geológico/geotécnicos utilizados no cálculo do índice de qualidade são:

- Informação geométrica: inclinação i em graus e altura H em metros da encosta, a qual pode usar a maior entre H_u e H_d .
- Parâmetros geológico/geotécnicos do material do maciço que compreende a encosta: peso específico γ em kN/m^3 , coesão c em kPa , ângulo de atrito ϕ em graus.
- Condição hidrogeológica: relação H_w/H .

O valor do *HSQI* para cada zona do corredor de transporte pode ser calculado com as cartas apresentadas nas Fig. 3.2 e 3.4. Foram propostas três classes diferentes para o zoneamento de suscetibilidade ao deslizamento do corredor de transporte: valores do *HSQI* altos, médios e baixos.

Estes valores de categorias podem ser vinculados à condição de suscetibilidade de acordo com as hipóteses estatísticas: mais do que cinquenta por cento das encostas classificadas como com suscetibilidade alta apresentam ruptura e, no máximo, cinco por cento das encostas classificadas como com suscetibilidade baixa apresentam ruptura. Na Tabela 3.3 são mostrados os valores de *HSQI* para realizar o zoneamento do corredor de transporte.

Tabela 3.3: Valores *HSQI* para o zoneamento do corredor de transporte

Índice de qualidade de encosta	Condição de suscetibilidade ao deslizamento
$HSQI \leq 1,0$	Alta
$1,0 < HSQI < 1,4$	Média
$1,4 \leq HSQI$	Baixa

3.2.4 Gráfico de desempenho

O principal resultado do método *HSQI* é fornecer recomendações de obras de estabilização para as diferentes zonas, dependendo do grau de suscetibilidade ao deslizamento de cada uma delas. Para isso, foi criado o gráfico de desempenho: o qual tem dois eixos, o horizontal, onde se encontram os valores de índice de qualidade de encosta, e o vertical, com a altura da encosta corrigida H_c , já que leva em conta a importância do projeto de corredor de transporte, utilizando um fator de correção C_f , como apresentado na Eq. 3.1. Na Tabela 3.4, são apresentados os valores do fator de correção C_f , dependendo de cinco categorias de importância do projeto de corredor de transporte. Com essa informação, pode-se entrar no gráfico de desempenho mostrado na Fig. 3.7, onde se pode determinar as diferentes zonas que, junto com a Tabela 3.5 permitem definir as recomendações das obras de estabilização de uma maneira qualitativa.

$$H_c = \frac{H}{C_f} \quad (3.1)$$

Tabela 3.4: Fator de correção segundo a importância do corredor de transporte

Tipo	Importância do corredor de transporte	Fator de Correção C_f
<i>I</i>	Temporária	1,5
<i>II</i>	Permanente, com previsão de pouco fluxo veicular	1,3
<i>III</i>	Permanente, com previsão de fluxo veicular médio	1,0
<i>IV</i>	Permanente, com previsão de fluxo veicular alto	0,8
<i>V</i>	Fundamental, com previsão de fluxo veicular alto	0,6

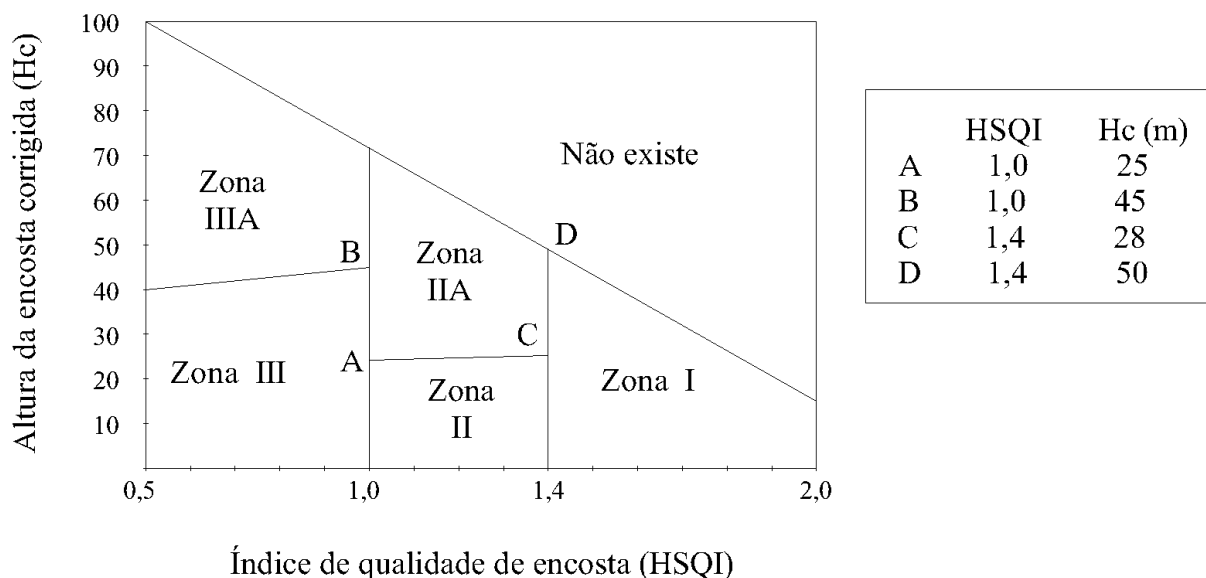


Figura 3.7: Gráfico de desempenho

Tabela 3.5: Soluções de estabilização do gráfico de desempenho

Índice de qualidade		Recomendações	Tipo de soluções
HSQI Baixo	Zona IIIA	subsuperficial	Reforço de solos, geossintéticos, bermas, concreto projetado, cortinas ancoradas, muros com ancoragem, ancoragem, malha metálica, canaletas transversais e longitudinais, filtros horizontais
	Zona III	Sistemas de estabilização conjuntos mais drenagem superficial e	Muros de concreto armado, muros de gravidade, concreto projetado, cortinas ancoradas, calhas transversais e longitudinais, filtros horizontais, malhas
HSQI Médio	Zona IIA	superficial e subsuperficial	Muros de concreto e de gravidade, concreto projetado, malhas metálicas, calhas transversais e longitudinais, filtros horizontais
	Zona II	Sistemas de estabilização mais drenagem	Proteção superficial, concreto projetado, revegetação, calhas transversais e longitudinais, filtros horizontais
HSQI Alto	Zona I	Controle de erosão e drenagem	Controle de erosão, calhas transversais e horizontais, revegetação

3.3 APLICAÇÕES DO MÉTODO *HSQI*

O método *HSQI* foi aplicado e validado em estudos de campo em duas estradas de regiões montanhosas na Colômbia e na Costa Rica, os quais consistiram em uma inspeção visual das encostas ao longo dos corredores de transporte por Moreno (2015), com o intuito de coletar as informações geométricas de altura e inclinação que seriam depois utilizadas no cálculo do índice *HSQI*. Também se verificou, em todas as encostas estudadas, a condição de estabilidade atual, junto com as obras de estabilização presentes, para fazer depois uma comparação com o zoneamento de suscetibilidade *HSQI* para avaliar a qualidade do método.

3.3.1 Aplicação do método *HSQI* na rodovia *Las Palmas*, Colombia

O sistema *HSQI* foi aplicado, em dezembro de 2014, em 14 km da rodovia *Las Palmas*, localizada na cidade de Medellín, na zona norte da Colômbia. Uma estrada que começou sua construção nos anos 1960 e que teve uma duplicação no ano de 2007, sendo uma via de acesso muito importante para a cidade, pois a comunica com a região do aeroporto internacional.

O zoneamento *HSQI* utilizou um comprimento sistemático de 100 m para avaliar a suscetibilidade das encostas ao longo do traçado da via. Portanto, foram geradas 129 zonas para a análise. Existem algumas seções sem dados porque dentro dos três primeiros quilômetros da rodovia, existiam algumas construções que não permitiram a avaliação geométrica do local. Na Fig. 3.8, é mostrada a localização da estrada *Las Palmas*.

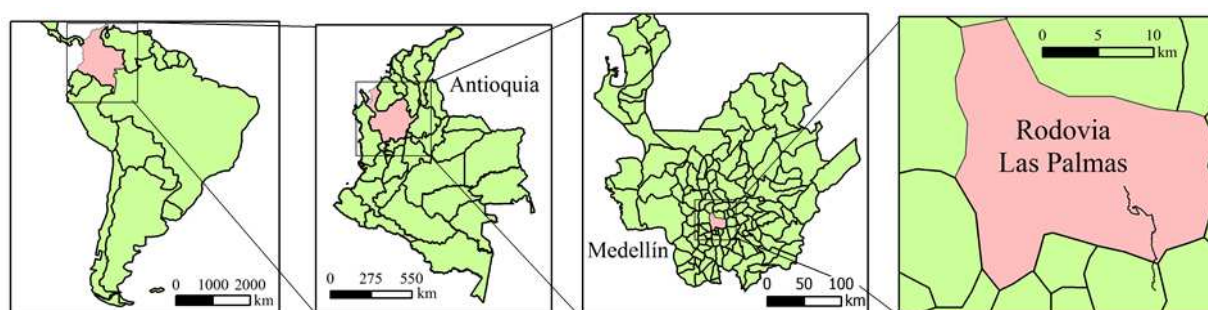


Figura 3.8: Localização da rodovia *Las Palmas*

A geologia da área de estudo caracteriza-se, principalmente, por ter presença de rochas metamórficas, em unidades como anfibolitos e migmatitos. E, nos primeiros seis quilômetros, encontram-se unidades ígneas pertencentes ao *Stock* de San Diego. Existem também depósitos de fluxos de detritos e/ou lamias de diferentes idades (AMVA, 2006). A seguir, cada uma das unidades geológico/geotécnicas encontradas será melhor detalhada:

- *Stock* de San Diego (JgSD) é um corpo ígneo que aflora no centro-leste da cidade de Medellín. Caracteriza-se por ter perfis de intemperismo bem profundos, de mais de 50 metros em algumas zonas. Os solos residuais maduros são areia siltosa, de cor marrom-avermelhada e baixa compressibilidade.
- Anfibolitos de Medellín (PraM) são um corpo metamórfico caracterizado por rochas densas, duras, de cor cinza-esverdeada, que geram solos residuais de areias siltosas com até 20 metros de profundidade. Podem ser localizados no km 12.
- Dunitos de Medellín (KuM) são rochas ígneas escuras que se tornaram verdes. Geram solos residuais de siltosos de cor marrom-avermelhada. Não geram perfil de solos profundos. Encontram-se localizados entre os quilômetros 8 a 10.

- Fluxos (FI, FII, FIII, FIV) são depósitos de fluxos de detritos e/ou lamas de diferentes idades. Geralmente com uma matriz castanho-amarelada e avermelhada e textura silto argilosa.
- Migmatitos de Puente Peláez (PRmPP) são uma formação composta principalmente por gnaisses, com profundidades de solo de até 3 m e solos siltosos de cor amarela. Encontram-se no trecho final de estudo da rodovia.

Na Tabela 3.6 são mostrados os valores médios das características geológico/geotécnicas usadas na avaliação das análises *HSQI*. Estes parâmetros foram obtidos de estudos anteriores mediante ensaios de laboratório de amostras dos solos da região (Restrepo, 1986; Sanchez, 2010; Integral, 2012).

Tabela 3.6: Valores médios dos parâmetros geotécnicos para cálculo do *HSQI* na rodovia *Las Palmas*

Formação Geológica	Parâmetros Geotécnicos		
	γ <i>kN/m³</i>	<i>c</i> <i>kPa</i>	ϕ °
Solos residuais de <i>Stock</i> de San Diego (JdSD)	18	17	23
Solos residuais de Dunitos de Medellin (KuM)	18	34	25
Fluxos de detritos e/ou lama (FI, FII, FIII, FIV, Fpre)	18	19	23
Solos residuais de Anfibolitos (PRaM)	20	25	28
Solos residuais de Migmatitos de Puente Peláez (PRmPP)	19	25	38

Quanto ao clima no trecho da estrada estudado, é importante observar que começa no km 0+000 com uma altitude de 1.500 m e acaba no km 14+500, a uma altitude de 2.400 m. Portanto, existe um grau de variabilidade das condições climáticas (principalmente de precipitação) entre os primeiros quilômetros da estrada e os finais. A região de estudo tem um clima montanhoso bimodal, com precipitações máximas nos meses de maio e outubro, com média de 1.750 mm por ano. Na Fig. 3.9 mostra-se o pluviograma da estação *Colegio Latino* localizada no km 9 da rodovia *Las Palmas*.

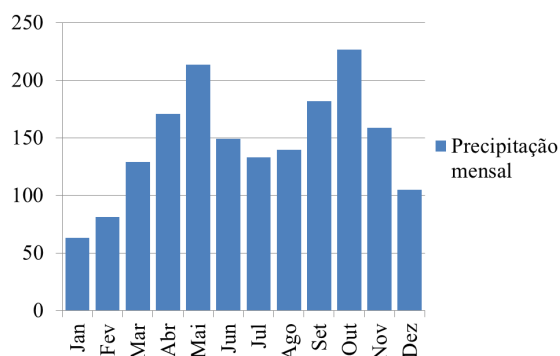


Figura 3.9: Pluviograma *Colegio Latino* Latino na rodovia *Las Palmas*

Foi criada uma base de dados com as características geométricas e geológico/geotécnicas de cada zona. Depois foi avaliado o índice de qualidade para cada uma e posteriormente foi realizada uma análise dos resultados, a qual é mostrada na Tabela 3.7. Pode-se ver que os resultados são coerentes com a hipótese probabilística para os 129 zonas de análise: 3% de encostas avaliadas como de suscetibilidade ao deslizamento baixa são instáveis e 61% das encostas classificadas com suscetibilidade alta são instáveis.

Tabela 3.7: Análise dos resultados do zoneamento na rodovia *Las Palmas*. Fonte: Moreno (2015)

Condição de suscetibilidade	Dados de campo		
	Número de encostas	Encostas instáveis	Porcentagem de encostas instáveis %
Suscetibilidade ao deslizamento baixa	32	1	3
Suscetibilidade ao deslizamento média	18	4	22
Suscetibilidade ao deslizamento alta	79	56	71
Total de encostas	129	61	47

Com o objetivo de verificar e avaliar a qualidade do resultado do zoneamento foi realizada uma comparação com um inventário de deslizamentos feito em 2013 na rodovia *Las Palmas* (Muñoz & Martinez, 2013). Os resultados da comparação são consistentes, em geral. A localização dos deslizamentos que coincidem com as zonas de suscetibilidade alta são:

- O primeiro quilômetro e meio foi classificado com suscetibilidade alta e apresentou no inventário quatro deslizamentos de pequena magnitude. Na Fig. 3.10 apresenta-se o estado da zona 1 no km 0+100, onde se pode observar que se fez um tratamento com ancoragem e concreto projetado.



Figura 3.10: Zona 1, km 0+100 da rodovia *Las Palmas*. Fonte: Moreno (2015)

- A zona que compreende os km 4+500 até 5+200 tem alta suscetibilidade e, no inventário podem ser observados 4 deslizamentos de menor magnitude e um de magnitude média.
- No km 6+600, que está classificado com alta suscetibilidade, existe um pequeno deslizamento.
- A zona de alta suscetibilidade entre os km 8+600 e 9+200 apresenta dois pequenos deslizamentos.
- A zona de baixa suscetibilidade dos km 11+000 até 12+000 apresentou, no inventário, quatro deslizamentos de tamanho médio.
- A zona de baixa suscetibilidade dos km 13+800 até 14+400 apresentou, no inventário, cinco deslizamentos de tamanho médio.

O zoneamento da rodovia como um dos produtos finais do cálculo do método *HSQI* para cada uma das zonas definidas ao longo do traçado é mostrado na Fig. 3.11, a qual está apresentada em três partes com a mesma escala, devido ao comprimento total do trecho estudado. Também são apresentadas as formações geológicas na zona de estudo. O inventário de deslizamentos é apresentado na Tabela 3.8.

Tabela 3.8: Inventário de deslizamento da rodovia *Las Palmas* (Muñoz & Martínez, 2013)

Localização	Área do deslizamento (m^2)	Localização	Área do deslizamento (m^2)
km 0+200	84	km 12+300	2.100
km 0+800	45	km 12+450	240
km 1+100	20	km 12+600	48
km 1+200	56	km 12+700	1.125
km 3+200	300	km 12+800	1.500
km 4+000	44	km 13+000	6.400
km 4+800	1.800	km 13+200	1.625
km 4+800	33	km 13+300	1.300
km 5+100	45,5	km 13+800	2.106
km 5+200	17,4	km 13+950	2.475
km 5+200	525	km 14+000	16.500
km 6+600	360	km 14+200	720
km 8+600	1.575	km 14+400	4.800
km 9+200	180	km 14+600	210
km 10+000	15	km 15+970	156
km 11+300	130	km 16+40	177
km 11+650	525	km 16+200	1.120
km 11+800	600	km 17+600	225
km 11+950	21	km 18+500	160

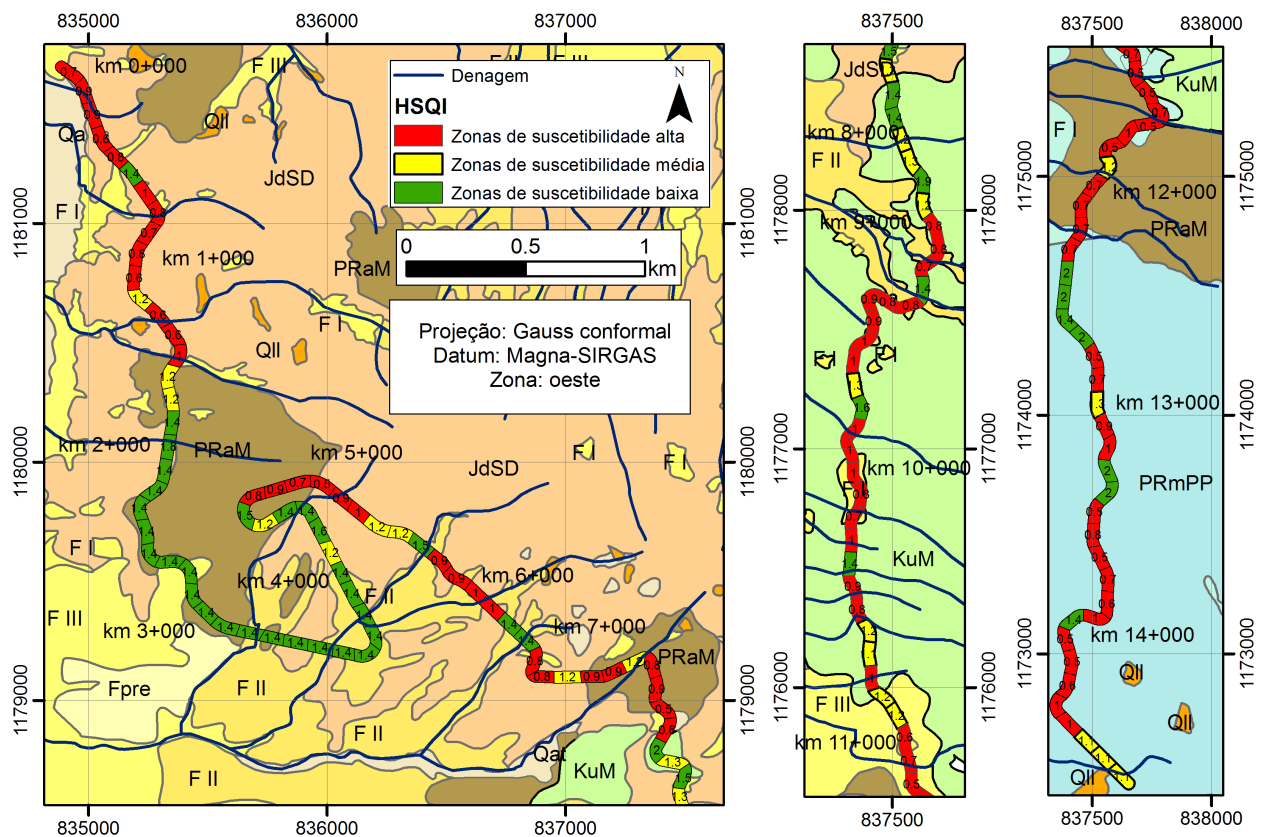


Figura 3.11: Zoneamento de suscetibilidade ao deslizamento HSQI da rodovia *Las Palmas*. Fonte: Moreno (2015)

3.3.2 Aplicação do método *HSQI* na rodovia *Sifón-La Abundancia*, Costa Rica

O sistema *HSQI* foi aplicado por Ocampo (2016), em julho de 2015, em 19 km da rodovia *Sifón-La Abundancia* localizada no estado de Alajuela, na Costa Rica. Uma estrada que faz parte de um projeto nacional de integração que começou no ano de 2013 e tem uma grande importância, pois comunica a zona central da Costa Rica com a zona norte.

Para o zoneamento *HSQI* o comprimento de cada zona de análise da suscetibilidade ao deslizamento foi definido dependendo de cada unidade geológica independente. Portanto, o trecho foi dividido em 84 zonas de análises (Ocampo, 2016). Na Fig. 3.12, é mostrada a localização da rodovia *Sifón-La Abundancia*, no vale central da Costa Rica.

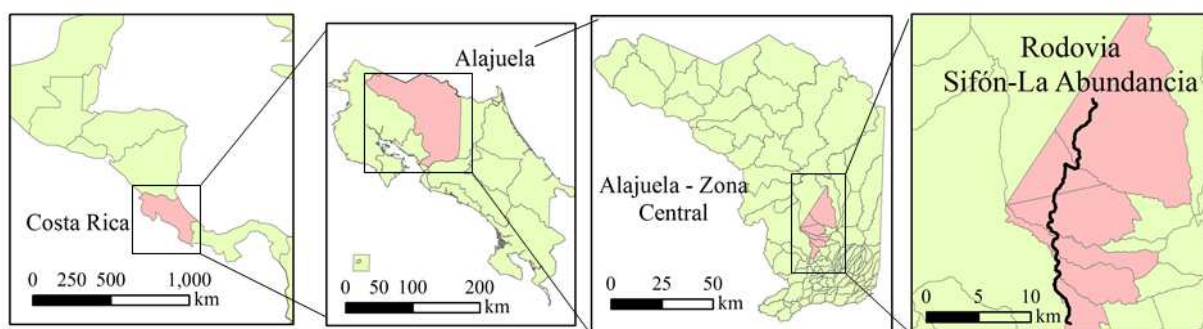


Figura 3.12: Localização da rodovia *Sifón-La Abundancia*

A geologia da zona de estudo está composta, principalmente por rochas vulcânicas como brecha piroclástica, tufo e lava de basalto. Os primeiros quilômetros são caracterizados por corpos de cinza vulcânica recente (QRVA) e tufo (TMPV1), seguidos de aglomerado vulcânico (TMPV2) e um quilômetro de depósito coluvial (QRCA). A feição geológica mais comum é o fluxo vulcânico (QLPVF2) localizado no último trecho da zona de estudo da rodovia. As formações anteriormente mencionadas geram solos muitos intemperizados com baixa resistência e alta compressibilidade (Ocampo, 2016). Na Tabela 3.9 são mostrados os valores médios dos parâmetros geotécnicos usados na análise *HSQI*. Esses parâmetros foram obtidos de estudos prévios mediante ensaios de laboratório de amostras de solos da região (Mora, 1998; Venegas, 2011).

Tabela 3.9: Valores médios dos parâmetros geotécnicos para a análise *HSQI* da rodovia *Sifón-La Abundancia*. Fonte: Ocampo (2016)

Formação geológica	Parâmetros geotécnicos		
	γ <i>kN/m³</i>	<i>c</i> <i>kPa</i>	ϕ °
Solos de cinzas vulcânicas recentes (QRVA)	16	3	33
Solos de tufo vulcânico recente (TMPV1)	16	8	32
Solos de aglomerado vulcânico (TMPV2)	16	5	31
Solos de depósitos coluviais (QRCA)	16	5	31
Solos de fluxos vulcânicos (QLPVF2)	16	0,1	26

O clima é caracterizado pelo regime do Caribe, com uma precipitação média anual de 3.500 mm (Solano & Villalobos, 1999). Na Fig. 3.13 é mostrado o pluviograma da estação *Ciudad Quesada* na rodovia *Sifón-La Abundancia* (Ocampo, 2016).

A Tabela 3.10 mostra os resultados do zoneamento da suscetibilidade *HSQI* para a rodovia *Sifón-La Abundancia*. A Fig. 3.14 mostra o zoneamento *HSQI* final dos quilômetros 14+600 ao 19+500 da rodovia *Sifón-La Abundancia*. Pode-se observar que os resultados são coerentes com a hipótese probabilística para as 84 zonas da rodovia: 10% das zonas classificadas com suscetibilidade baixa apresentaram instabilidade e 58% das zonas avaliadas como com suscetibilidade alta apresentaram instabilidade.

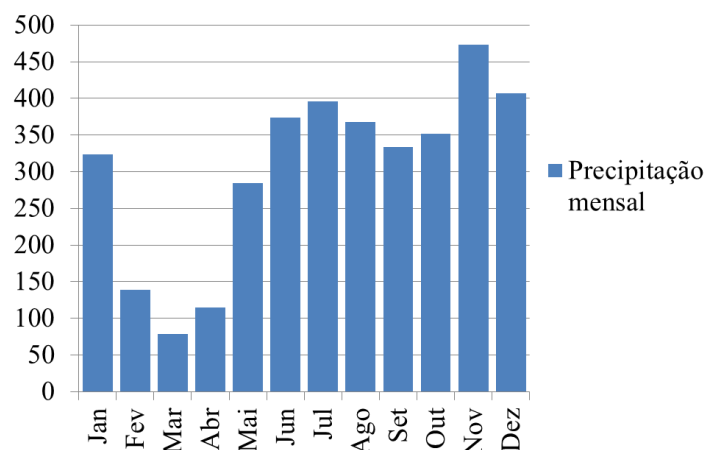


Figura 3.13: Pluviograma de estação *Ciudad Quesada*, na rodovia *Sifón-La Abundancia*. Fonte: Ocampo (2016)

Tabela 3.10: Resultado da análise de dados da rodovia *Sifón-La Abundancia*. Fonte: Ocampo (2016).

Condição de suscetibilidade	Dados de campo		
	Número de encostas	Encostas instáveis	Porcentagem de encostas instáveis %
Suscetibilidade ao deslizamento baixa	10	1	10
Suscetibilidade ao deslizamento média	27	10	37
Suscetibilidade ao deslizamento alta	50	29	58
Total de encostas	87	40	46

Na Tabela 3.11, é apresentado o inventário de deslizamento feito na rodovia *Sifón-La Abundancia* por Ocampo (2016). Comparando com o zoneamento feito pelo método *SHQI*, observa-se também uma coerência, pois a maioria dos deslizamentos foi encontrada nas zonas classificadas como suscetíveis, do km 17 até o km 21, onde, no inventário, havia cinco deslizamentos com magnitude entre média e grande. Na Fig. 3.15, é apresentada a seção transversal da zona 28, no km 17+450.

Tabela 3.11: Inventário de deslizamentos para a rodovia *Sifón-La Abundancia*. Fonte: Ocampo (2016)

Localização	Área do deslizamento (m^2)	Localização	Área do deslizamento (m^2)
km 13+000	7.920	km 21+850	26.930
km 13+750	4.887	km 22+800	491
km 14+150	1.645	km 24+550	6.780
km 15+000	349	km 24+980	21.232
km 15+150	1.291	km 25+600	2.371
km 17+650	145	km 26+450	27.680
km 17+850	5.380	km 27+700	2.133
km 20+250	1.011	km 29+000	2.406
km 20+850	1.3920		

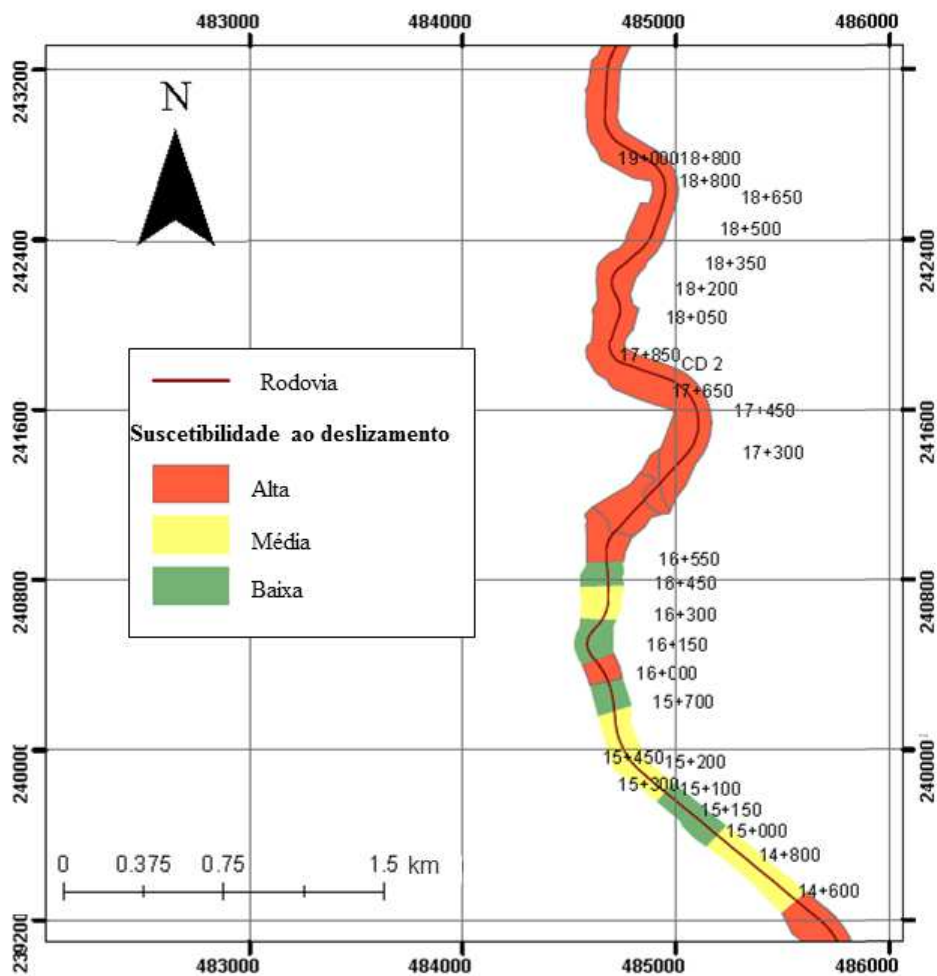


Figura 3.14: Zoneamento de suscetibilidade ao deslizamentos da rodovia *Sifón-La Abundancia*. Fonte: Ocampo (2016).



Figura 3.15: Zona 28, km 17+450 da rodovia *Sifón-La Abundancia*. Fonte: Ocampo (2016)

3.4 AVALIAÇÃO DAS APLICAÇÕES DO MÉTODO *HSQI*

Para avaliar a efetividade do método *HSQI* em suas duas aplicações nas rodovias *Las Palmas* e *Sifón-La Abundancia*, utilizou-se uma análise *Receiver Operating Characteristic ROC* (Fawcett, 2006), que permite comparar as taxas de verdadeiros positivos e falsos positivos, ou seja, os acertos na estimativa de suscetibilidade feitos pelo sistema *HSQI* quando comparados com o encontrado no trabalho de campo. Para uma avaliação *ROC* de duas categorias, foram considerados só os dados das zonas com alta e baixa suscetibilidade ao deslizamento. O *ROC* considera duas classes reais: positiva e negativa, as quais, para este caso, são encostas instáveis e estáveis, respectivamente; e duas classes previstas: verdadeiro e falso, as quais são as encostas com baixa e alta qualidade de encostas, dependendo do encontrado no campo. Existem quatro possíveis resultados:

- Se uma encosta é instável e classificada com um valor baixo de *HSQI*, é contada como um verdadeiro positivo *TP*;
- Se uma encosta é instável e classificada com um valor alto de *HSQI*, é contada então como um falso positivo *FP*;
- Se uma encosta é estável e classificada com um valor alto de *HSQI*, é contada como verdadeiro negativo *TN*;
- Se uma encosta é estável e classificada com um valor baixo de *HSQI*, é contada como um falso negativo *FN*.

Na Tabela 3.12 são mostrados os resultados da análise *ROC* para o método *HSQI* nas aplicações nas rodovias *Las Palmas* e *Sifón-La Abundancia*. Os números da diagonal principal representam as decisões corretas e os números na diagonal contrária representam os erros ou a confusão entre as duas categorias analisadas. Na rodovia *Las Palmas*: o acertos foram 78,4%, e os erros 21,6%. Na rodovia *Sifón-La Abundancia*: os acertos representaram um 91,7%, e os erros 8,3%. As análises *ROC* permitem avaliar e comparar a qualidade de diferentes métodos de classificação, de acordo com o comportamento das taxas de falsos positivos *FP*, verdadeiros positivos *TP* e verdadeiros negativos *TN*, como mostrado nas Eq. 3.2, 3.3 e 3.4.

$$\text{Taxa } FP = \frac{\text{Classificados incorretamente como estveis}}{\text{Total : estveis}} = \frac{FP}{TN + FN} \quad (3.2)$$

$$\text{Taxa } TP = \frac{\text{Classificados corretamente como instveis}}{\text{Total : instveis}} = \frac{TP}{TP + FP} \quad (3.3)$$

$$Taxa\ TN = \frac{\text{Classificados corretamente como estveis}}{\text{Total : estveis}} = \frac{TN}{TN + FN} \quad (3.4)$$

Tabela 3.12: Resultados da análise *ROC* do sistema *HSQI*

Qualidade de encosta estimada	Encostas observadas			
	<i>Las Palmas</i>		<i>Sifón-La Abundancia</i>	
	Positivo (Instável)	Negativo (Estável)	Positivo (Instável)	Negativo (Estável)
Valores <i>HSQI</i> baixos	<i>TP</i> 56	<i>FP</i> 23	<i>TP</i> 46	<i>FP</i> 4
Valores <i>HSQI</i> altos	<i>FN</i> 1	<i>TN</i> 31	<i>FN</i> 1	<i>TN</i> 9

O método *HSQI* foi comparado com outros dois métodos de suscetibilidade ao deslizamento mediante os dados da análise *ROC*: o *SHIA-LANDSLIDE* (Aristizábal et al., 2015) e o *SHALSTAB* (Montgomery e Dietrich, 1994), os quais são modelos de suscetibilidade ao deslizamento deflagrado por chuvas (o primeiro aplicado em bacias hidrográficas e o segundo para grandes áreas).

- O modelo *Simulación Hidrológica Abierta SHIA-LANDSLIDE* avalia respostas hidrológicas numa grade regular, simulando as componentes principais do ciclo hidrológico. Foi realizada uma análise de estabilidade de taludes para cada elemento computacional de acordo com o volume de água no solo, usando um módulo de equilíbrio limite para talude infinito (Aristizábal et al., 2015).
- O modelo *Shallow Landslides Stability SHALSTAB*, proposto por Montgomery & Dietrich (1994), caracteriza-se pelo controle topográfico na distribuição de deslizamentos superficiais. Este método aplica um índice topográfico para avaliar a saturação do solo em função da infiltração de chuva.

Na tabela 3.13, são mostrados os resultados da comparação da análise *ROC* do sistema *HSQI* com os modelos *SHIA-LANDSLIDE* e *SHALSTAB*, ambos os modelos aplicados na bacia hidrográfica *La Arenosa*, localizada no noroeste de Colômbia. Na Fig. 3.16, são mostrados os resultados da comparação da análise *ROC* dos diferentes métodos de classificação da suscetibilidade ao deslizamento graficamente, permitindo ter uma melhor perspectiva do desempenho dos métodos.

Tabela 3.13: Análise *ROC* comparativo

Análise ROC	<i>SHIA-LANDSLIDE</i> (Aristizábal, 2015)	<i>SHALSTAB</i>	<i>HSQI</i> <i>Las Palmas</i>	<i>HSQI</i> <i>Sifón-La Abundancia</i>
<i>FPrate</i>	22%	21%	43%	40%
<i>TPrate</i>	77%	29%	98%	69%
<i>TNrate</i>	76%	79%	57%	31%

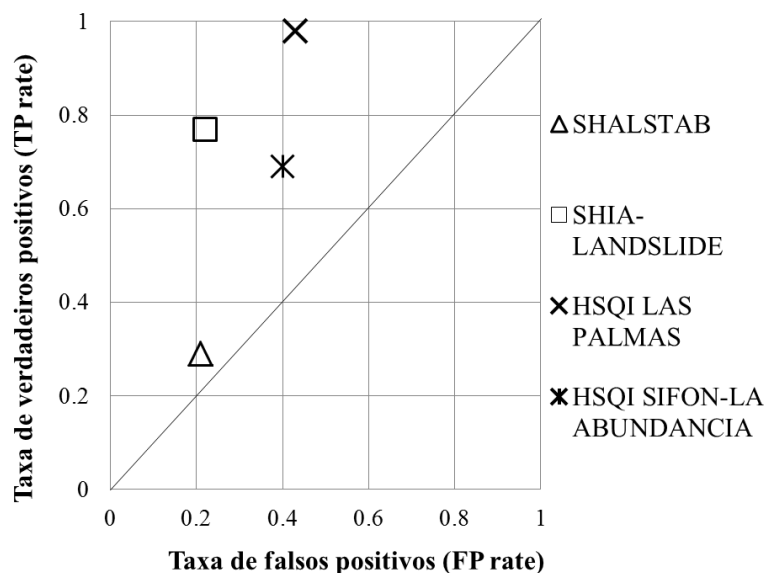


Figura 3.16: Gráfico da análise *ROC*

O gráfico *ROC* tem sua máxima avaliação no ponto (0,1), onde a taxa de verdadeiros positivos *TP* é a mais alta e a taxa de falsos positivos *FP* é zero. A diagonal no gráfico determina o ponto onde o método avaliado é aceitável. O gráfico *ROC* mostra que o método *SHALSTAB* são mais conservador, o que significa que estes qualificam como positivo com mais evidência. Por esta razão, suas taxas de *FP* são menores. Por outro lado, os método *HSQI* e *SHIA-LANDSLIDE* mostram um melhor comportamento na taxa *TP*. Os três modelos usam diferentes escalas para suas classificações. Portanto, a comparação considera só o espaço *ROC* e não os critérios analisados por cada modelo.

4 METODOLOGIA

A metodologia proposta no desenvolvimento da tese teve como objetivo principal alimentar o método *Hillslope Quality Index HSQI* e realizar uma melhora tanto no processo de zoneamento e cálculo, como nos resultados obtidos no gráfico de desempenho. Na Fig. 4.1, podem ser observados os principais meios para atingir o objetivo da pesquisa.

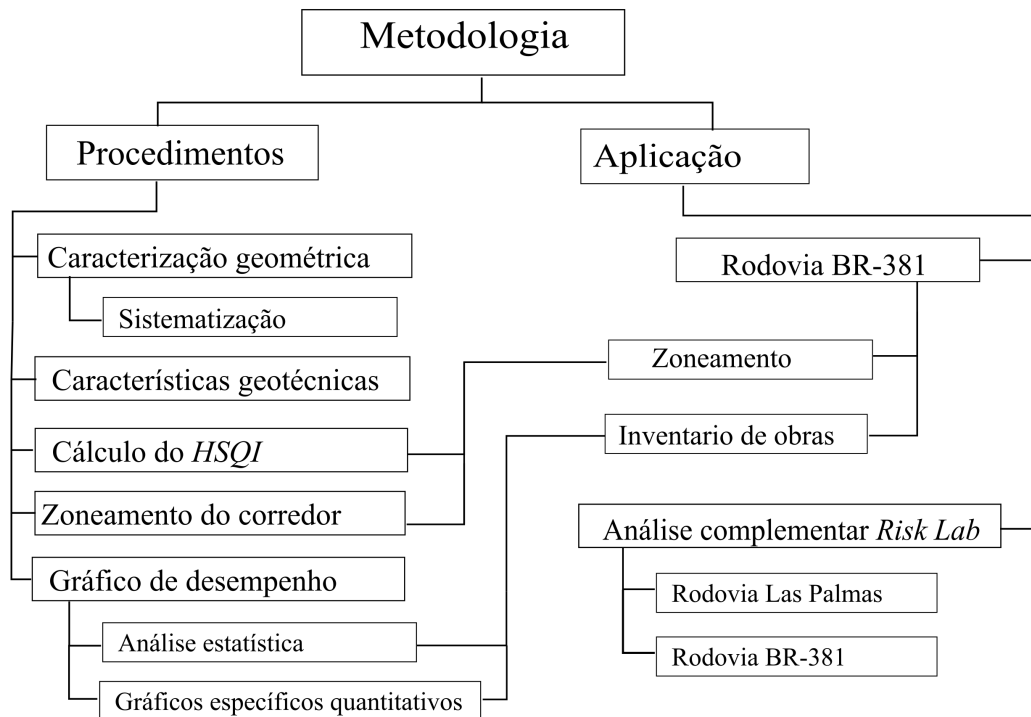


Figura 4.1: Metodologia da pesquisa

Inicialmente, foi realizada uma revisão bibliográfica dos métodos de avaliação da suscetibilidade ao deslizamento para corredores de transporte, com o intuito de chegar a um ponto de entendimento do problema que permitisse contextualizar e justificar o desenvolvimento desta pesquisa. A análise ou revisão do método *HSQI* e de seus procedimentos permitiu chegar a uma otimização dele mediante ferramentas que permitem ao usuário o zoneamento e a caracterização geométrica, etapas iniciais para o cálculo posterior dos índices de qualidade.

A fase de aplicação consistiu numa avaliação tanto da sistematização, como da suscetibilidade ao deslizamento pelo método *HSQI* de dois trechos do projeto de duplicação da Rodovia Federal BR-381, no estado de Minas Gerais. Foi feita uma comparação dos resultados do método das aplicações feitas nas rodovias BR-381, no Brasil; *Las Palmas*, na Colômbia; e *Sifón-La Abundancia*, na Costa Rica. Foi realizada uma etapa de aperfeiçoamento do gráfico de desempenho, com o intuito de materializar melhor as recomendações de obras de estabilização dentro de um

contexto de quantidade de materiais, facilitando um possível cálculo de custos. Esta etapa incluiu uma análise estatística dos métodos de estabilização com respeito aos principais insumos do método *HSQI*, e depois uma análise de inventários de obras encontradas nos trabalhos de campo das aplicações nas rodovias *Las Palmas* e *Sifón-La Abundancia*. Foi feita também uma análise complementar com um método de avaliação de suscetibilidade ao deslizamento diferente do *HSQI*, mediante o programa *Risk Lab*, como confirmação dos resultados de uma região da rodovia *Las Palmas*.

4.1 REVISÃO DE PROCEDIMENTOS DO MÉTODO *HSQI*

Com o intuito de facilitar o uso do método *HSQI* pelo usuário desde a etapa inicial de divisão do corredor de transporte até o zoneamento final de suscetibilidade, passando pela caracterização geométrica e o cálculo do índice de qualidade da encosta, foi desenvolvido um procedimento sistemático baseado em programas computacionais e em *SIG*.

4.1.1 Sistematização dos procedimentos de zoneamento

A caracterização geométrica e a definição da seção de análise precisam da divisão do corredor em zonas com características similares. O comprimento máximo depende da unidade geomorfológica independente, a qual é uma região com condições topográficas, geológicas e hidrológicas similares. O comprimento de zona mínimo para levar a conta a influência do corte da encosta sobre a estabilidade e é definido como a somatória das distâncias B , D_u e D_d . O zoneamento pode ser feito sistematicamente, usando algum programa como *AutoCAD* ou *ArcGIS*, colocando um comprimento de zona fixo e mandando traçar as seções transversais. Também pode ser feito de uma forma mais analítica, de acordo com o modelo digital do terreno e das zonas com características topográficas similares. Este procedimento gera menos seções e agiliza o procedimento de cálculo do índice de qualidade.

4.1.2 Sistematização dos procedimentos da caracterização geométrica

A caracterização geométrica de cada zona requer como principal insumo a informação topográfica, a qual, em muitos casos, é escassa ou nula. Nesses casos, é uma boa ideia obter essa informação de *sites* gratuitos como, por exemplo, o *Earth Explorer* — parte da *United States Geological Survey USGS*, no qual os modelos digitais de elevação tem 30 m de precisão altimétrica — ou o *site* de informação geográfica *ALASKA* — que fornece informação do programa de satélite japonês *ALOS PALSAR*, o qual tem modelos de elevação com precisão altimétrica de 12,5 m. Como o método *HSQI* tem o intuito de ser aplicado em etapas preliminares de projetos de corredores de transporte, essa precisão da informação é adequada.

4.1.2.1 Modelo digital de elevação do terreno e seções transversais

Para realizar a modelagem do terreno em 3D podem ser usados programas como o *AutoCAD Civil 3D* ou *ArcGIS*. Estas ferramentas computacionais possibilitam a modelagem do terreno natural, da superfície da rodovia (plataforma e taludes) e da fusão das duas superfícies, formando o modelo digital do terreno. Para modelar a superfície da rodovia, foi utilizada uma ferramenta presente no programa *AutoCAD Civil 3D* chamada *Assembly*. A Fig. 4.2 apresenta a seção típica utilizada para modelar a rodovia (plataforma e taludes de aterro e corte), identificada como *Primary Road Full Section* na biblioteca de *Assembly* do *AutoCAD Civil 3D 2014*.

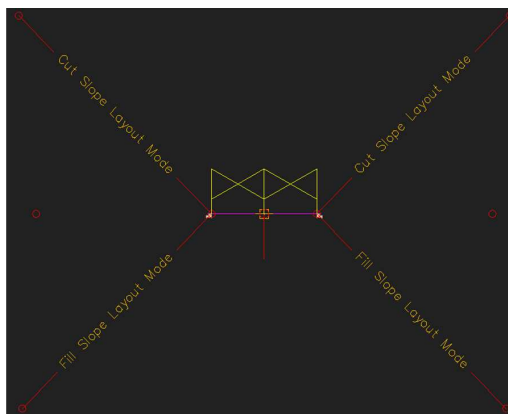


Figura 4.2: Seção típica da rodovia utilizada

A partir de uma seção típica previamente definida, essa ferramenta é capaz de percorrer tal seção ao longo de um alinhamento proposto, definido pelo traçado da rodovia em planta (x, y) e pelo seu perfil longitudinal (z). A Fig. 4.3 apresenta os detalhes da seção tipo corte-corte gerada pelo programa. Uma vez que o modelo digital tridimensional esteja completamente gerado, o programa permite a extração das seções transversais com uma distância específica.

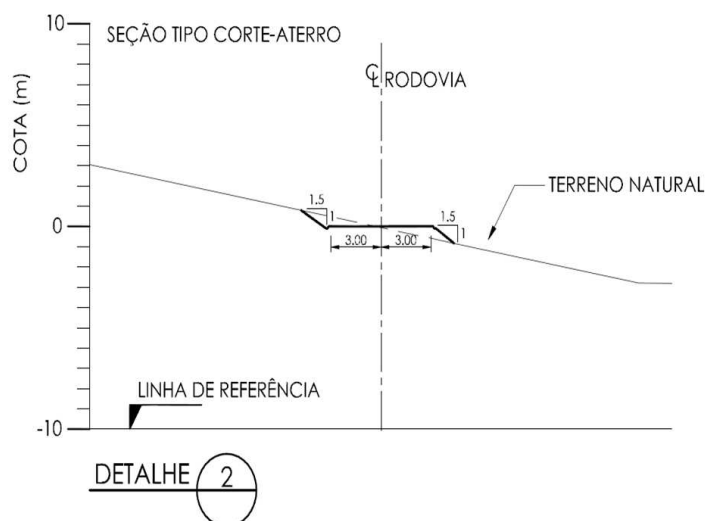


Figura 4.3: Detalhe seção transversal tipo corte-aterro

4.1.2.2 Determinação dos parâmetros geométricos

As seções extraídas do programa *AutoCAD Civil 3D* são compostas por retas que ligam os diversos pontos provenientes da intersecção com a superfície 3D. Dessa forma, cada seção pode ser traduzida no formato de coordenadas (x,y), as quais podem ser utilizadas para calcular a inclinação de cada reta ligadas por esses pontos. Utilizando este princípio é possível determinar todas as características geométricas requeridas para o cálculo do *HSQI*. A Fig. 4.4 ilustra um trecho da lista de coordenadas extraídas de uma das seções.

```
Command: LIST
Select objects: 1 found
Select objects:
LWPOLYLINE Layer: "C-ROAD-SECT"
Space: Model space
Color: 1 (red) Linetype: "Continuous"
LineWeight: Default
Handle = b870
Open
Constant width 0.000
area: please use AREA command for self-intersecting polylines
length 818.793
at point X= -400.000 Y= 13.429 Z= 0.000
at point X= -387.243 Y= 16.742 Z= 0.000
at point X= -370.940 Y= 21.016 Z= 0.000
at point X= -370.555 Y= 21.116 Z= 0.000
at point X= -369.831 Y= 21.298 Z= 0.000
at point X= -355.548 Y= 24.371 Z= 0.000
at point X= -346.341 Y= 26.446 Z= 0.000
at point X= -328.548 Y= 28.735 Z= 0.000
at point X= -326.757 Y= 29.031 Z= 0.000
at point X= -314.282 Y= 31.298 Z= 0.000
at point X= -298.493 Y= 31.505 Z= 0.000
at point X= -288.343 Y= 31.601 Z= 0.000
at point X= -284.477 Y= 31.646 Z= 0.000
at point X= -267.553 Y= 31.408 Z= 0.000
at point X= -265.283 Y= 31.379 Z= 0.000
at point X= -259.321 Y= 31.298 Z= 0.000
at point X= -247.514 Y= 28.251 Z= 0.000
at point X= -237.949 Y= 25.991 Z= 0.000
at point X= -226.721 Y= 23.565 Z= 0.000
```

Figura 4.4: Exemplo de lista com as coordenadas

Foi desenvolvida uma nova ferramenta computacional no programa *Microsoft Excel*® que permite a avaliação de todas as seções transversais obtidas do programa *CAD*. O procedimento consiste na extração de todas as coordenadas x, y e z, e no posterior cálculo de todas as alturas e distâncias das encostas mediante relações geométricas, mediante uma rotina em linguagem *Visual Basic VBA*, a qual utiliza as coordenadas, extraídas no formato *.csv*, como dados de entrada para efetuar os cálculos necessários.

4.1.3 Sistematização do cálculo do *HSQI*

Foi utilizado o *Microsoft Excel* para criar um programa em *visual basic VBA*, que permite tomar os dados geométricos da etapa anterior e fornecer os dados geológicos/geotécnicos para conseguir calcular sistematicamente os valores de índice de qualidade de todas as zonas. Foram utilizados os valores das cartas *HSQI* para gerar uma função que tem como variáveis de entrada: os parâmetros geométricos (altura *H* e inclinação *i* da encosta), os parâmetros geológicos/geotécnicos (coesão *c* e ângulo de atrito ϕ) e a informação hidrológica (relação *H_w/H*) para fornecer o valor do índice de qualidade *HSQI*.

4.2 APLICAÇÃO DA MÉTODO *HSQI* NA RODOVIA BR-381

Decidiu-se fazer uma aplicação do método *HSQI* numa rodovia federal brasileira para analisar o desempenho do método no Brasil. A BR-381 é uma rodovia federal brasileira que se inicia na cidade de São Mateus-Espírito Santo, no entroncamento com a BR-101, chegando até a cidade de São Paulo, no entroncamento com a BR-116. A rodovia em questão possui ao todo 1.181 km, dos quais, 95 km encontram-se no estado de São Paulo, 950 km, em Minas Gerais, e 136 km, no Espírito Santo. É uma estrada muito importante devido ao grande fluxo de veículos e aos locais de produção que atravessa. O projeto da duplicação está sendo construído atualmente no estado de Minas Gerais. Para a região de estudo, foram escolhidos dois trechos devido à facilidade da informação fornecida pelo DNIT, 2012:

- O trecho 1, que compreende os primeiros 75 km do LOTE 1 da BR-381/MG, o qual se encontra entre as cidades de Governador Valadares e Ipatinga.
- O trecho 6, que compreende 26 km do LOTE 6 da BR-381/MG, o qual se encontra entre as cidades de João Monlevade e São Gonçalo do Rio Abaixo, próximo a cidade de Belo Horizonte.

4.2.1 Aplicação da método *HSQI* no trecho 1 da BR-381/MG

O trecho 1 começa na cidade de Governador Valadares no km 155+000 e finaliza no município de Ipatinga no km 230+000. Na Fig. 4.5 se pode observar a localização do trecho de estudo. Este trecho compreende uma variação desde o 170 m aos 240 m de altitude. A informação topográfica, hidrológica e geológico/geotécnica foi obtida do projeto de duplicação da estrada federal BR-381 (DNIT, 2012), os dados pluviográficos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais INPE, e a informação geológico/geotécnica foi complementada com o mapa de geodiversidade do estado de Minas Gerais (CPRM, 2006).

4.2.1.1 Caracterização geométrica do trecho 1

A informação topográfica foi obtida dos dados topográficos da base de dados da *ALASKA*, que tem uma precisão altimétrica de 12,5 m. O modelo 3D foi desenvolvido usando o comando *Assembly* no programa *AutoCAD Civil 3D*®, o qual permitiu definir as características geométricas da rodovia para fazer a junção com o modelo digital do terreno e gerar as seções transversais, que foram geradas a cada 20 m. Para obter os parâmetros geométricos de cada seção, foram usadas as coordenadas como um insumo da rotina *VBA* rodada no *Microsoft Excel*. Também se fez um zoneamento analítico no programa *ArcGIS*, no qual, tendo o modelo digital do terreno, se avaliaram as zonas de acordo com as características topográficas similares, gerando menos zonas com um comprimento maior.

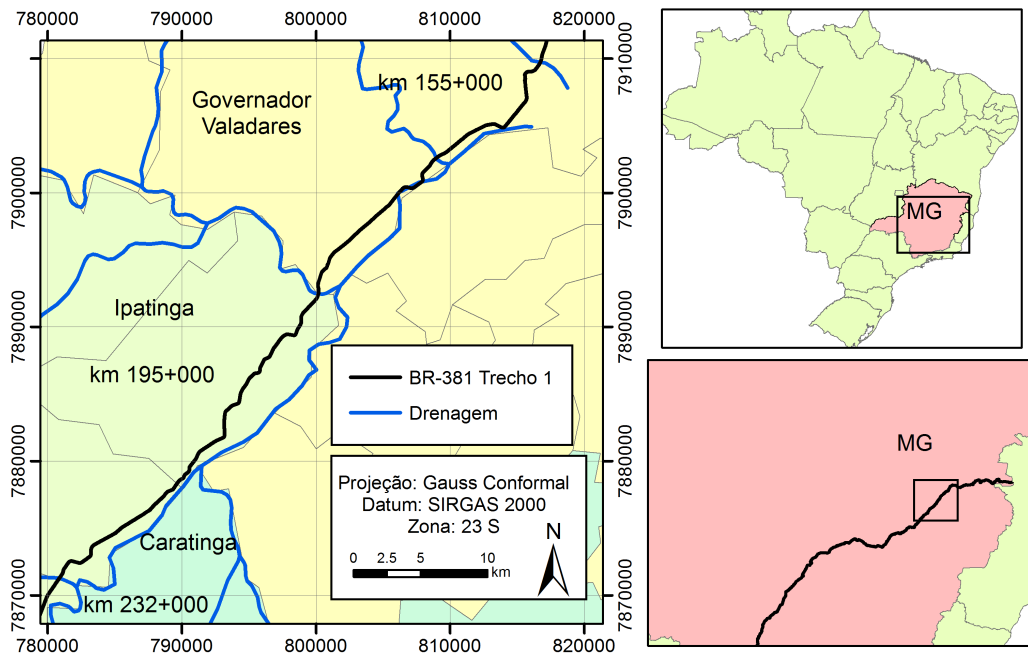


Figura 4.5: Localização do trecho 1 da BR-381

4.2.1.2 Caracterização geológico/geotécnica do trecho 1

A geologia superficial da área de estudo é composta principalmente por solos residuais derivados de rochas graníticas, gnaisses e depósitos aluviais. Na Fig. 4.6 são apresentadas as principais feições geológicas, tomadas do Mapa de Geodiversidade do estado de Minas Gerais (CPRM, 2006), as quais, de acordo com Féboli (2000), são:

- O Complexo da Mantiqueira, com idade arqueana, é composto principalmente por solos residuais de gnaisses e migmatitas.
- O Complexo Borrachudos, com idade paleoproterozoica, é composto pelas formações de gnaisses Juiz de Fora e Açucena.
- O Supergrupo Rio das Velhas, composto pelas formações de gnaisses São Tomé, Piedade, Governador Valadares e Tumirintingá.
- Batolitos granitoides, de idade neoproterozoica, compostos pela suíte Galileia, e as formações: Bom Jesus do Galho, tonalítica, e Limeira, granitoide.
- Coberturas sedimentares de depósitos aluviais e coluvionares.

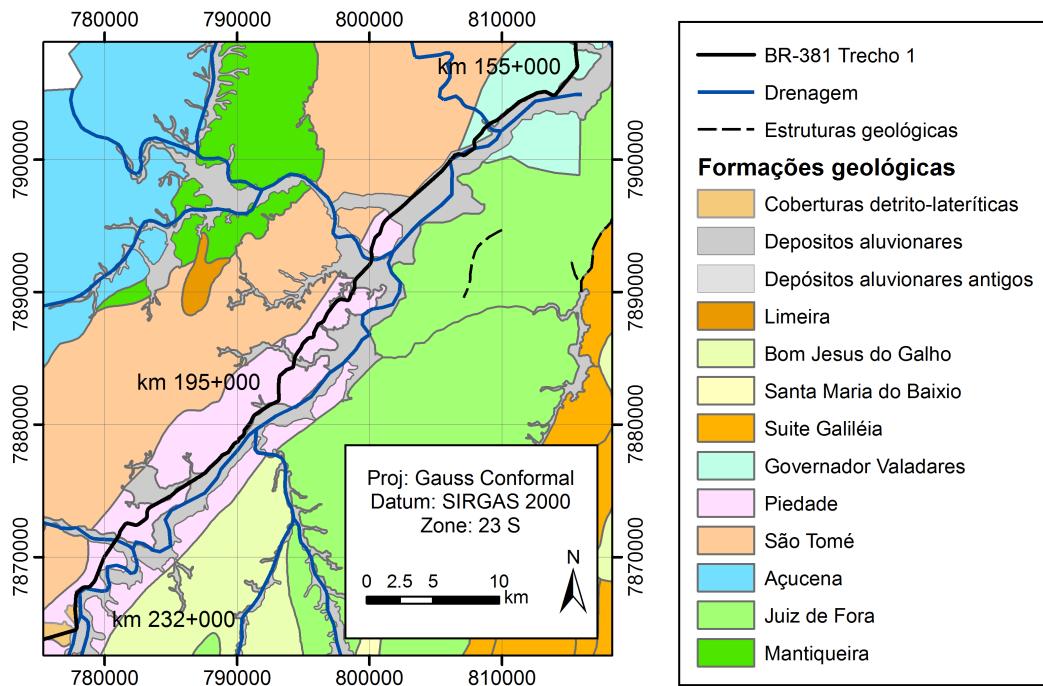


Figura 4.6: Formações superficiais do trecho 1 da BR-381

No trabalho de Oliveira et. al (2017) foi feita uma compilação de parâmetros geológicos/geotécnicos de diferentes solos residuais a partir de uma base de dados mundial de ensaios de laboratório de ensaios *in situ* de 500 amostras para servir como guia para diferentes trabalhos de pesquisa. Esses dados foram utilizados para determinar parâmetros geológicos/geotécnicos do trecho de estudo, como insumo para a aplicação da metodologia *HSQI*. Na Tabela 4.1, é mostrado a informação geológico/geotécnica, em que μ é o valor médio e σ o desvio padrão do parâmetro.

Tabela 4.1: Parâmetros geológicos/geotécnicos do trecho 1 da BR-381. Fonte: Oliveira et. al (2017)

Formação geológica	Parâmetros geológico/geotécnicos					
	γ		c		ϕ	
	kN/m^3		kPa		$^\circ$	
	μ	σ	μ	σ	μ	σ
Solos residuais de granitos ou granitoides	18,7	2,6	13,7	12	33,1	8,4
Solos residuais de gnaisses ou migmatitos	17,8	2,1	19,7	19,2	29,0	5,9

4.2.1.3 Dados hidrológicos do trecho 1

Foi realizada uma avaliação dos dados de precipitação, tomados do *site* do INPE, de 10 estações pluviométricas na área de estudo da BR-381/MG: Aimorés, Caratinga, Conceição do Mato Dentro, Viçosa, Belo Horizonte (Horto), Ibirité, Barbacena, Sete Lagoas, Florestal e Divinópolis. Com esta informação, foram feitos os polígonos de Thiessen para determinar em que zona se encontravam os trechos de estudo da BR-381, como é mostrado na Fig 4.7. Pode-se observar

que o trecho 1 entra no polígono da estação Caratinga e o trecho 6 no polígono da estação Belo Horizonte (Horto).

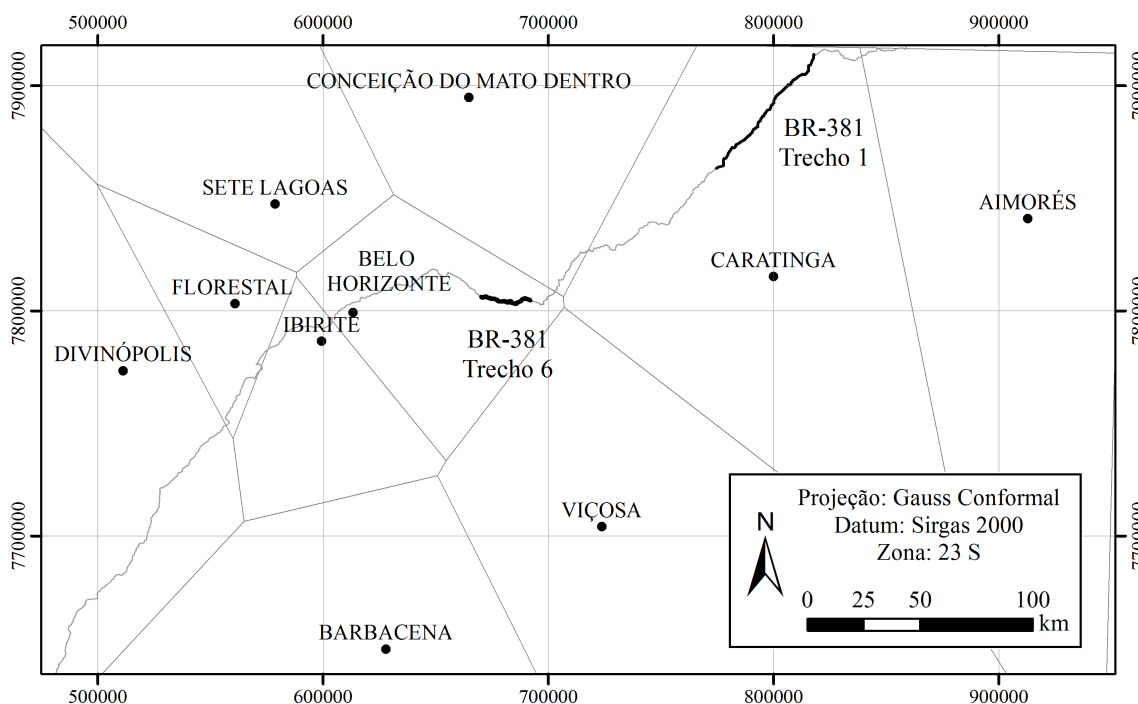


Figura 4.7: Polígonos de Thiessen

O regime de chuvas é único, com precipitação máxima na época de novembro a março e mínima, de maio até agosto. Os registros históricos de precipitação foram processados de forma a obter, para cada estação pluviométrica do corredor, informações relevantes sobre intensidades, duração e frequência dos eventos de chuva. A precipitação média mensal na região é de 100 mm. Para o cálculo do fator H_w/H , foram tomadas em conta os dados de precipitação da estação Caratinga, mostrados na Fig. 4.8. Cada mês tem um valor, dependendo do valor de precipitação, como é mostrado na Tabela 4.2. Foi encontrado o valor Sh de 4, o qual, segundo o método $HSQI$ é um valor muito baixo para o cálculo do índice de qualidade, foi atribuído fator H_w/H de 0,2.

As características climáticas da zona de estudo são diferentes das encontradas nas zonas onde se aplicou o método $HSQI$, que foram a Colômbia e a Costa Rica, devido à existência de um grande período de seca. Portanto, para levar em conta esse comportamento climático, foram tomados os meses com uma precipitação maior que o valor 125 mm/mês para dividir doze por esse valor, de forma a encontrar um fator de ponderação do valor atribuído no cálculo do fator de umidade Sh . Assim, foi atribuído um valor de Sh de 12 e, portanto, um valor de H_w/H de 0,6. Uma vez coletada a informação geométrica, geológico/geotécnica e hidrológica, foi possível avaliar o valor do índice de qualidade para cada uma das zonas, usando o programa desenvolvido para avaliar sistematicamente o $HSQI$.

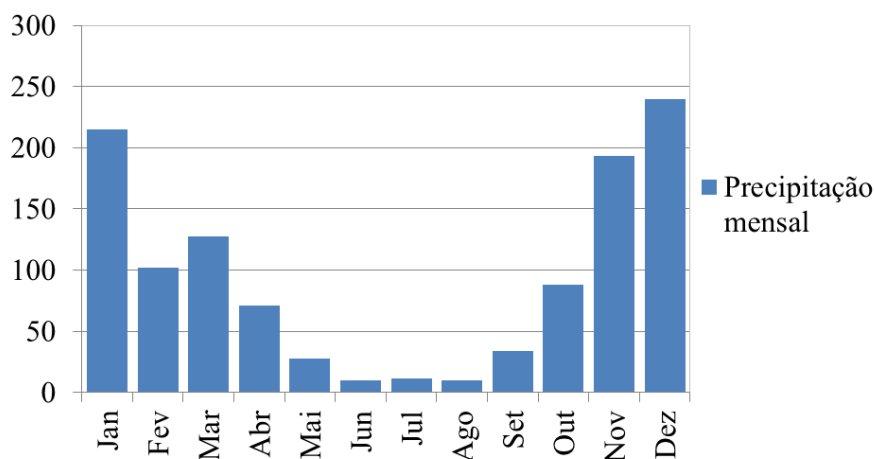


Figura 4.8: Pluviograma da estação Caratinga

Tabela 4.2: Cálculo do fator Sh do trecho 1

Mês	Precipitação média mensal (mm/mês)	Valor atribuído
Janeiro	215	1
Fevereiro	102	0
Março	128	1
Abril	71	0
Mai	28	0
Junho	10	0
Julho	11	0
Agosto	10	0
Setembro	34	0
Outubro	88	0
Novembro	194	1
Dezembro	240	1
Total	1.130	4

4.2.2 Aplicação da método *HSQI* no trecho 6 da BR-381/MG

O trecho 6 da duplicação da Estrada Nacional BR-381/MG começa na cidade de João Monlevade, no km 356+000, e finaliza no município de São Gonçalo do Rio Abaixo, no km 382+000. Na Fig. 4.9, pode-se observar a localização da região de estudo. A altitude do trecho varia dos 650 m até os 920 m. A informação topográfica, hidrológica e geológica/geotécnica foi obtida do DNIT (2012), os dados de precipitação do INPE, e a informação geológico/geotécnica complementar do mapa de geodiversidade do estado de Minas Gerais (CPRM, 2006).

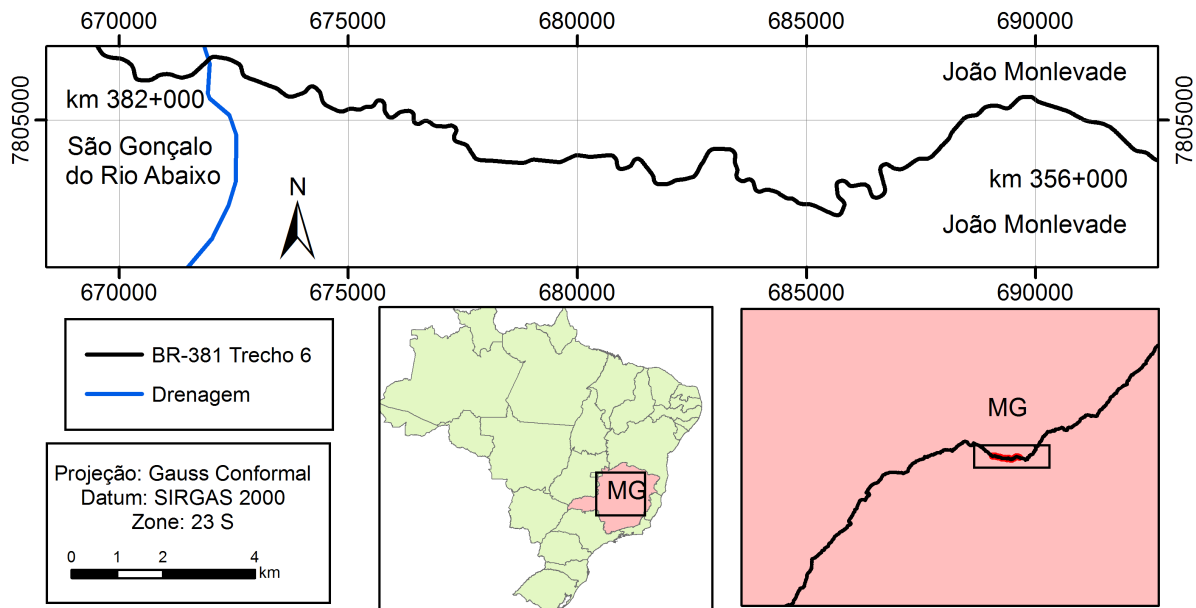


Figura 4.9: Localização do trecho 6 da BR-381

4.2.2.1 Caracterização geológica/geotécnica do trecho 6

A área de estudo é composta principalmente por rochas graníticas, gnaisses e depósitos aluviais. Na Fig. 4.10 são apresentadas as principais feições geológicas, tomadas do Mapa de Geodiversidade do estado de Minas Gerais (CPRM, 2006). Féboli (2000) caracteriza as formações superficiais de seguinte forma:

- Formação Belo Horizonte: solos residuais de granodiorito e migmatito;
- Formação Peti: solos residuais de rochas ígneas graníticas;
- Formação Bicas: solos residuais de rochas ígneas graníticas;
- Formação Caraça: solos residuais de quartzitos;
- Formação Itabira: solos residuais de xistos e filitos;
- Formação Nova Lima: solos residuais de xistos e filitos;
- Formação Nova Lima ressedimentada: solos residuais de gnaisses graníticos, anfibolitos e quartzitos.

Do trabalho de Oliveira et.al (2017) foram tomados os dados dos parâmetros para os solos residuais de origem gnaissica ou granítica.

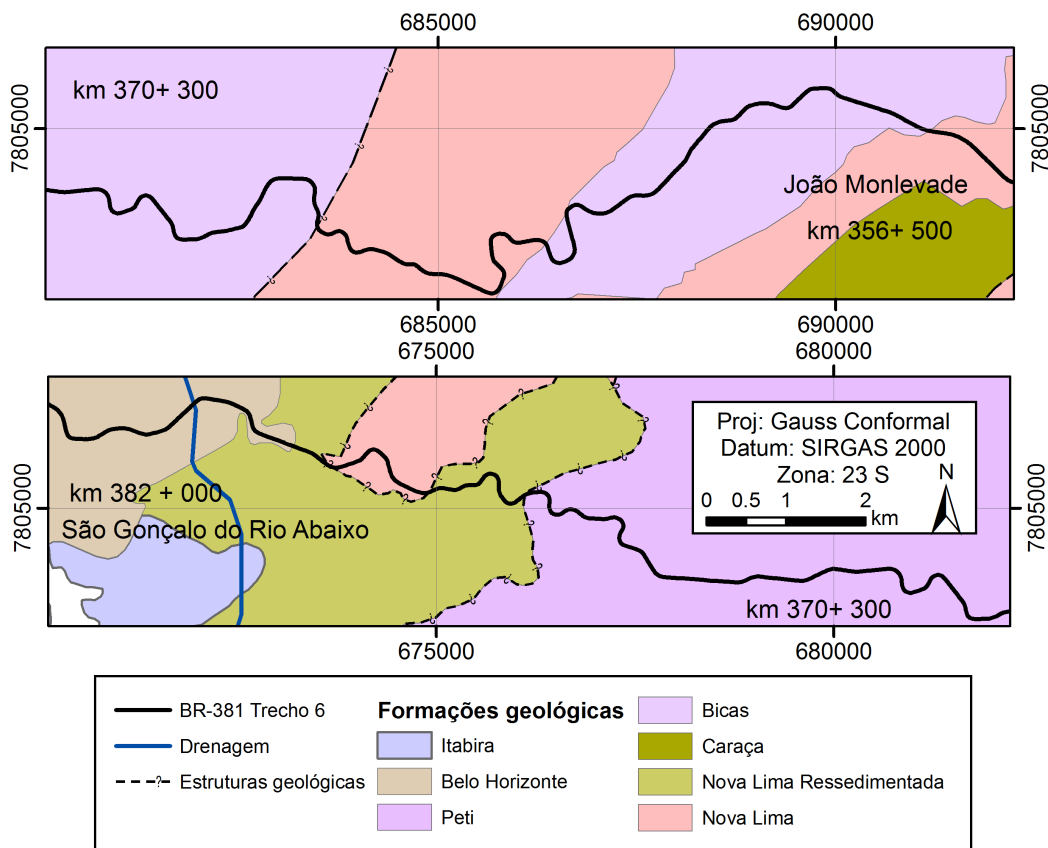


Figura 4.10: Formações superficiais do trecho 6 da BR-381

4.2.2.2 Dados hidrológicos do trecho 6

Dos polígonos de Thiessen apresentados na Fig. 4.11, pode-se ver que a estação pluviográfica que influencia o comportamento de precipitação do trecho 6 é a estação Belo Horizonte (Horto), cujo pluviograma é mostrado na Fig. 4.11. Com estes valores foi feito o cálculo do Sh de acordo com os valores da Tabela 4.3. Foi encontrado que o valor Sh de 7 que, segundo o método $HSQI$, é um valor baixo e atribuído o fator H_w/H de 0,4.

Como comentado anteriormente, para levar em conta o comportamento climático da região, foram tomados os meses com uma precipitação maior que o valor 125 mm/mês para dividir doze por esse valor, de forma a encontrar um fator de ponderação do valor atribuído no cálculo do fator de umidade Sh . Assim, foi atribuído um valor de Sh de 17 e, portanto, um valor de H_w/H de 0,8. Uma vez coletada a informação geométrica, geológico/geotécnica e hidrológica, foi possível avaliar o valor do índice de qualidade para cada uma das zonas, usando o programa desenvolvido para avaliar sistematicamente o índice de qualidade $HSQI$.

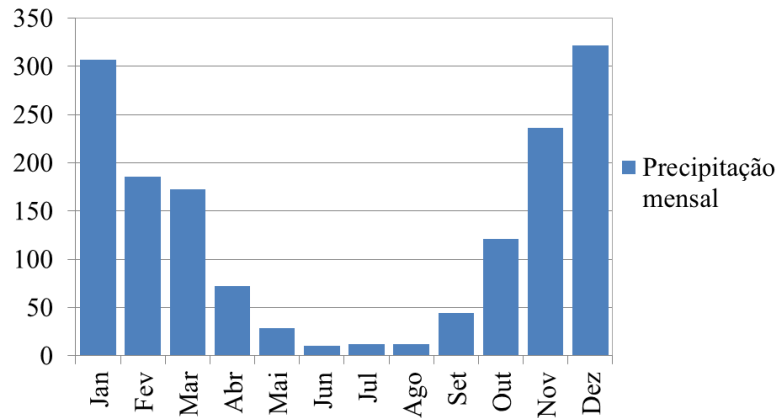


Figura 4.11: Pluviograma da estação Belo Horizonte (Horto)

Tabela 4.3: Cálculo do fator *Sh* trecho 6

Mês	Precipitação média mensal (mm/mês)	Valor atribuído
Janeiro	306	2
Fevereiro	185	1
Março	173	1
Abril	72	0
Mai	29	0
Junho	10	0
Julho	12	0
Agosto	12	0
Setembro	45	0
Outubro	121	0
Novembro	236	1
Dezembro	322	2
Total	1.524	7

4.2.3 Validação do zoneamento *HSQI* dos trechos 1 e 6 da BR-381

Foi feita a validação dos dados gerados pela aplicação da metodologia *HSQI* nos trechos 1 e 6 da rodovia BR-381 mediante um trabalho de inspeção visual, no qual se realizou a comprovação das zonas suscetíveis utilizando o programa *Google Street View GSV*, no qual a plataforma *Google* disponibiliza gratuitamente fotografias na perspectiva de um veículo viajando ao longo de várias rodovias, como fotografias aéreas multitemporais. O procedimento foi o seguinte: o *shapefile* do zoneamento dos trechos 1 e 6 foi exportado em formato *.klm* para o *Google Earth* e, posteriormente, foi feita a inspeção visual da estabilidade, com respeito tanto às fotografias das seções transversais, como às fotografias aéreas históricas. No *GSV*, as imagens foram tiradas no período de dezembro de 2018 e, no *Google Earth*, as fotografias aéreas tem um histórico desde 2004. Na Fig. 4.12 é mostrada uma seção tomada do km 366 da BR-381. Uma vez importado o zoneamento, verificou-se a estabilidade atual e histórica de cada zona de forma visual.



Figura 4.12: Fotografia do km 366 da BR-381. Fonte: *Google Street View*, 2019

4.3 MELHORAS FEITAS NO GRÁFICO DE DESEMPENHO *HSQI*

O gráfico de desempenho é um dos produtos finais da aplicação do método *HSQI*, o qual foi concebido inicialmente de uma forma qualitativa, de forma a fornecer uma série de recomendações das obras de estabilização e prevenção que podiam ser feitas em cada zona do corredor de transporte, dependendo do nível de suscetibilidade ao deslizamento. O intuito desta pesquisa foi introduzir recomendações quantitativas, nas quais se forneça não só o tipo de obra para cada zona, mas também uma aproximação da quantidade de obras que serão necessárias, dependendo do grau de suscetibilidade das encostas e da importância da rodovia de aplicação do método. Para isso, realizou-se uma análise estatística com os dados dos trabalhos de campo para determinar a influência dos parâmetros geométricos, geológico/geotécnicos e hidrológicos do método *HSQI* na escolha do tipo de solução. Também foram analisadas as aplicações do método nas rodovias *Las Palmas* e *Sifón-La Abundancia* para determinar os tipos de solução e a quantidade de material a ser utilizada em cada caso, e para gerar os gráficos de desempenho específicos para cada de tipo de obra de estabilização.

4.3.1 Análise estatística das obras de estabilização de encostas

Foi feita uma análise de estatística multivariada com a informação coletada nos trabalhos de campo feitos nas rodovias *Las Palmas* e *Sifón-La Abundancia* para entender melhor a influência das características geométricas, geológicas e hidrogeológicas na escolha das soluções de estabilização. As variáveis analisadas foram:

- Informação geométrica: inclinação i e altura H da encosta.
- Parâmetros geológicos/geotécnicos: coesão c e ângulo de atrito ϕ
- Condição hidrogeológica: fator S_h .

- Soluções de estabilização: muros de concreto reforçado, muros de pilares, ancoragem, drenagem superficial e subsuperficial, e bermas. Esses foram os tipos de solução encontradas nos inventários de deslizamentos das aplicações nas rodovias *Las Palmas* e *Sifón-La Abundancia*.

4.3.2 Quantificação das obras de estabilização para o gráfico de desempenho

Foi feita uma avaliação quantitativa das obras de estabilização para melhorar e complementar o gráfico de desempenho e o tipo de recomendações de obras de estabilização para futuras aplicações do método *HSQI* em novos projetos de corredores de transporte. Foram analisados os inventários de obras de estabilização e os registros fotográficos dos trabalhos de campo realizados nas rodovias *Las Palmas* e *Sifón-La Abundancia* para determinar padrões nas quantidades dos diferentes tipos de obras, tendo em vista a influência do nível de suscetibilidade da zona onde foi realizada a obra. Com a informação obtida, foram desenvolvidos gráficos de desempenho específicos para cada tipo de obra: muros de gravidade de concreto e gabiões, ancoragem, drenagem superficial e drenagem subsuperficial, e bermas.

O método utilizado para conseguir realizar os gráficos de desempenho específicos foi o seguinte:

- Primeiro, foram revistos os registros fotográficos dos trabalhos de campo das rodovias *Las Palmas* e *Sifón-La Abundancia* para identificar os tipos de obras em cada zona e também determinar algumas dimensões importantes dessas obras.
- Depois, foi utilizada a ferramenta do *Goggle street view* para complementar a informação tomada das fotografias de seções transversais e fotografias aéreas multitemporais.
- Foi realizado um formato do inventário de deslizamento, no qual se identificaram a localização da zona, os elementos geométricos (altura H , inclinação i , índice de qualidade *HSQI*) e os elementos que ajudam no desenvolvimento do gráfico de desempenho (a altura corrigida H_c e o tipo de obras encontradas em cada zona, junto com as dimensões principais). Em alguns casos, não foi possível identificar dimensões das obras de estabilização — principalmente, nas obras de drenagem subsuperficial porque não era evidente, nem visível, por exemplo, o comprimento, nem a espaçamento dos tubos de drenagem.
- Foram colocados esses valores de dimensões no gráfico de desempenho para determinar zonas com valores iguais.

4.4 ANÁLISE COMPLEMENTAR *RISK LAB*

Como elemento comparativo para os resultados fornecidos pelo método *HSQI*, utilizou-se a aplicação de um modelo de bases físicas conjugado com um método probabilístico capaz de fornecer a estabilidade de taludes em termos de probabilidade de ruptura (PR) para uma região delimitada a partir da área inicial de estudo. O procedimento adotado utilizou o método probabilístico *First Order Second Moment (FOSM)* de forma conjugada a uma função de desempenho, com a finalidade principal de gerar mapas com indicativos de estabilidade das encostas. Considerou-se uma função de desempenho que fornece valores de fator de segurança (FS), tomando-se como base um modelo de talude infinito para solos homogêneos, considerado em termos de uma análise de tensões efetivas (Biondi et al., 2000). O modelo encontra-se representado na Eq. 4.1:

$$SF = \frac{c'}{\gamma P \sin \alpha \cos \alpha} + \frac{\tan \phi'}{\tan i} \quad (4.1)$$

Em que:

c' é a coesão efetiva, em kPa;

ϕ' é o ângulo de atrito efetivo, em graus;

γ é o peso específico do solo, em kN/m^3 ;

P é a profundidade do solo na potencial superfície de ruptura, em metros;

i é a inclinação da encosta, em graus.

O modelo de talude infinito, apesar de ter uma abordagem simplificada, permite uma análise rápida e fornece resultados satisfatórios para áreas de grande extensão. Este método tem o intuito de fornecer uma análise complementar ao modelo de base física proposto no programa *RiskLab* desenvolvido por Fernandes (2015). O modelo de talude infinito fornece uma boa compreensão da distribuição do fenômeno de ruptura. A análise foi feita em termos de resistência efetiva tendo em vista que não se dispunha de uma estimativa espacial do nível da água. As etapas para execução do método FOSM estão ligadas ao cálculo do valor médio ($E[FS]$) e da variância ($V[FS]$) para o fator de segurança, conforme definido pelas próximas Eqs. 4.2 e 4.3:

$$E[FS] = FS(\bar{c}, \bar{\phi}, \bar{H}, \bar{\alpha}, \bar{\gamma}) \quad (4.2)$$

$$V[FS] = \sum_{i=1}^2 \left(\frac{\partial FS}{\partial x_i} \right)^2 V(x_i) \quad (4.3)$$

Em que:

x_i está ligado a cada uma das variáveis independentes utilizadas com características estatísticas;

$V(x_i)$ referem-se às suas variâncias;

$\partial FS/\partial x_i$ são as derivadas de FS em relação a cada uma das variáveis estatísticas independentes.

Neste estudo, estabeleceram-se a coesão efetiva e a tangente do ângulo de atrito efetivo como as variáveis independentes de FS que possuiriam uma natureza estatística na formulação probabilística. Como hipótese, considerou-se que, tanto os parâmetros acima mencionados quanto o fator de segurança apresentariam distribuições estatísticas e probabilísticas normais, respectivamente. O desvio padrão do FS é obtido a partir da raiz quadrada da variância calculada, enquanto as derivadas do FS são definidas analiticamente a partir da Eq. 4.2.

O valor médio e o desvio padrão de FS calculados definem a distribuição de probabilidade da variável dependente. Com isso, é possível determinar a probabilidade de ruptura associada a uma encosta pelo cálculo da área que se encontra sob a curva normal unitária em relação aos valores de FS inferiores a unidade. Também se definiram, com base na expressão abaixo, valores de índices de confiabilidade (β) na Eq. 4.4:

$$\beta = \frac{E[FS]}{\sigma_{FS}} \quad (4.4)$$

Em que:

σ_{SF} corresponde ao desvio padrão calculado para FS .

A estruturação computacional desta análise foi realizada com o auxílio do software (*Matrix Laboratory Matlab*) de forma que os dados de entrada correspondem a uma série de matrizes, as quais representam uma discretização da área de estudo. O processo de cálculo pelo método FOSM é realizado de forma individual para cada *pixel* que faz parte da região analisada, resultando na definição das grades numéricas de probabilidade de ruptura PR e β nas mesmas dimensões das matrizes dos *inputs*. A dimensão do *pixel* é 2 x 2 m.

A delimitação da área de estudo específica para a análise comparativa de resultados entre o índice de qualidade HSQI e o modelo probabilístico foi realizada com base na existência de trechos classificados com todas as categorias de qualidade estabelecidas pelo modelo HSQI. A área em questão apresenta 102 ha e localiza-se na parte sul da rodovia *Las Palmas*, entre o km 12+500

e o km 13+300. A espessura do solo para a região de estudo foi considerada de 2 m.

Nessa área, encontram-se três unidades geológicas. Os valores médios dos parâmetros geológico/geotécnicos e sua dispersão foram obtidos de ensaios de cisalhamento para cada unidade geológica (Restrepo, 1986; Solingral, 2010; Integral, 2012). A Tabela 4.4 mostra os parâmetros usados na análise:

Tabela 4.4: Parâmetros estatísticos da análise *FOSM*

Parâmetros de resistência	Parâmetros estatísticos	Unidades geológico/geotécnicas		
		Depósitos de fluxos de lamas e detritos	Anfibolitos de Medellín	Migmatitos de Puente Peláez
Coesão	Média	38,6 kPa	24,6 kPa	28,0 kPa
	Desvio padrão	27,9 kPa	13,6 kPa	19,5 kPa
	Coefficiente de variação	72%	55%	70%
Ângulo de atrito	Média	28,9°	28,3°	30,5°
	Desvio padrão	6,0°	5,3°	5,3°
	Coefficiente de variação	21%	19%	17%

Considerou-se a profundidade de solo (P) de 2 m como um valor constante para a área de estudo. Este valor foi definido com base nos registros históricos de deslizamentos superficiais da Colômbia em áreas com condições geológico/geotécnicas similares (Aristizabal, 2016).

5 AVALIAÇÃO DE RESULTADOS

Este capítulo tem o intuito de apresentar os resultados da pesquisa em relação à sistematização do método *HSQI*, obtida da aplicação nos trechos 1 e 6 da rodovia BR-381/MG, assim como a validação do método *HSQI* mediante uma inspeção visual utilizando a ferramenta *Google street view* e a comparação com as aplicações do método nas rodovias *Las Palmas* e *Sifón-La Abundancia*. Também é mostrada a análise dos inventários de obras de estabilização obtidas dos trabalhos de campo feitos na Colômbia e na Costa Rica para a geração de gráficos de desempenho específicos para alguns tipos de obras de estabilização, assim como os resultados da análise do método de talude infinito aplicado na rodovia *Las Palmas*.

5.1 RESULTADOS DA SISTEMATIZAÇÃO DOS PROCEDIMENTOS

A sistematização dos procedimentos do método *Hillslope Quality Index HSQI* permitiu comprovar a simplicidade e praticidade do método, o qual é passível de sistematização mediante programas de tratamento de dados geográficos como *ArcGIS* ou *AutoCAD civil 3D*. Conseguiu-se, então, mediante esses programas, realizar o zoneamento de suscetibilidade a deslizamento dos trechos 1 e 6 da Rodovia Federal BR-381. Em seguida, são apresentados os resultados da sistematização do zoneamento e do cálculo do índice de qualidade *HSQI*.

Sobre o tipo de zoneamento, observou-se que o zoneamento sistemático, ou seja, o realizado mediante o programa *AutoCAD civil 3D*, no qual são geradas automaticamente as seções transversais cada 20 m, obtendo uma maior quantidade de zonas, a maioria com os mesmos valores de parâmetros geométricos, geológico/geotécnicos e hidrológicos e portanto, de índice de qualidade. O zoneamento analítico, desenvolvido mediante a avaliação de feições geomorfológicas, foi mais efetivo pois permitiu dividir o terreno em menos zonas com características geométricas, geológico/geotécnicas e hidrológicas similares, facilitando o trabalho de cálculo e chegando ao mesmo resultado do zoneamento sistemático. A aplicação do método no trecho 6 da BR-381 foi realizada de forma analítica no programa *ArcGis* com resultados adequados.

5.2 RESULTADOS DA APLICAÇÃO DO MÉTODO *HSQI* NA BR-381

A aplicação do método *HSQI* na Rodovia Federal BR-381 no estado de Minas Gerais permitiu fazer uma comparação com as aplicações feitas anteriormente em países equatoriais com condições climáticas, geológico/geotécnicas e topográficas diferentes. Foram escolhidos dois trechos

da BR-381: o trecho 1, de 75 km, localizado em uma região mais plana, e o trecho 6, de 26 km, localizado em uma região mais ondulada. A seguir, são apresentados os dados da aplicação do método *HSQI* nos trechos 1 e 6 da BR-381/MG.

5.2.1 Resultados do zoneamento *HSQI* do trecho 1 da BR-381

Um dos produtos finais do método *HSQI* é o zoneamento de suscetibilidade ao deslizamento, que permite ter uma visão geral da estabilidade das encostas ao longo do traçado da rodovia. Na Fig. 5.1 é mostrado o zoneamento final do trecho 1 da BR-381, o qual é apresentado em três seções consecutivas da rodovia com a mesma escala, que, em razão do comprimento se fizeram necessárias. O norte foi rotacionado para facilitar a visualização do mapa.

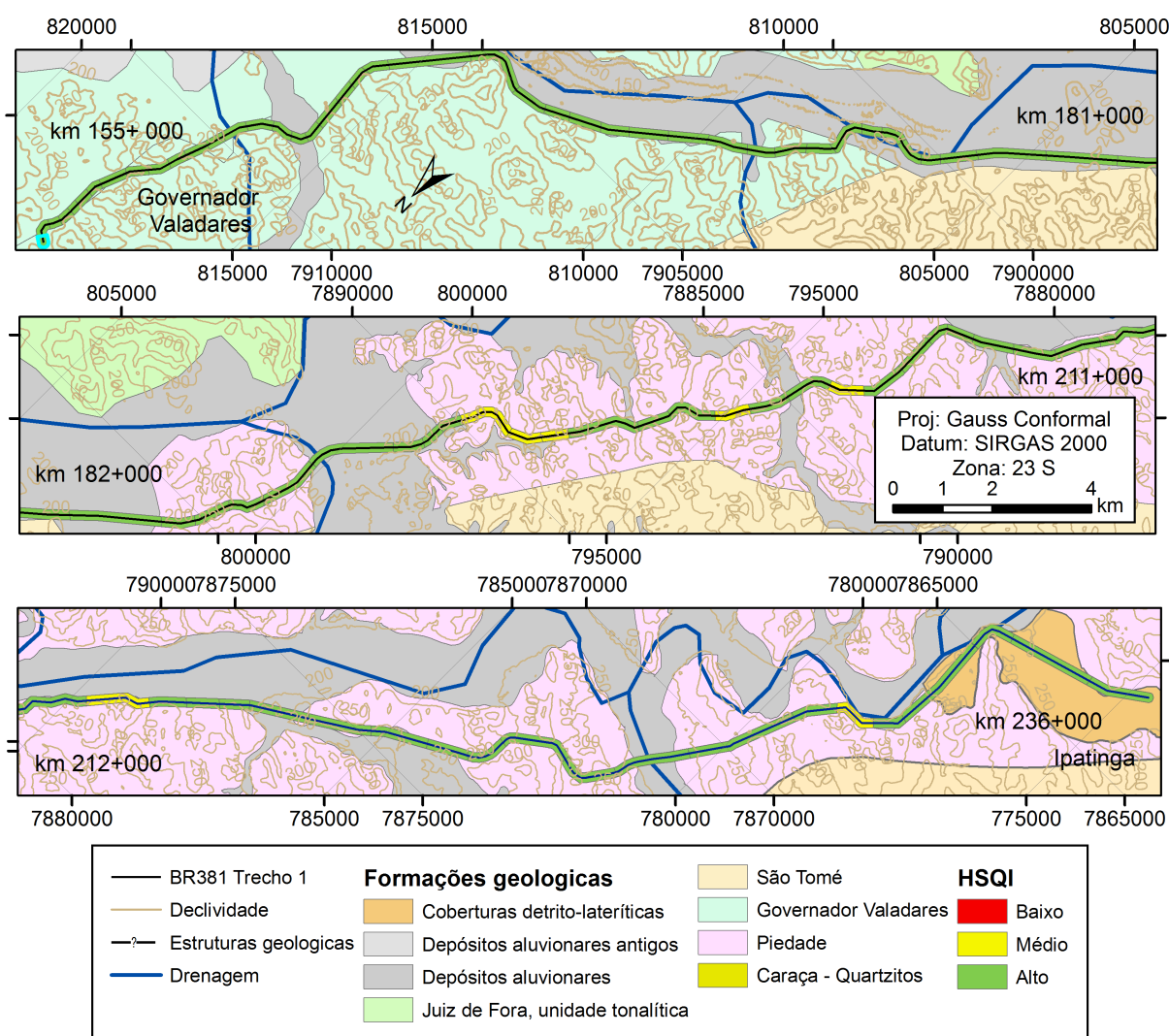


Figura 5.1: Zoneamento *HSQI* do trecho 1 da BR-381

No total, foram obtidas e avaliadas 91 zonas *HSQI*, com comprimentos variáveis de em média um quilômetro. Pode-se observar que as zonas com suscetibilidade média foram sete, localizadas entre o km 195+700 e o km 198+800, no km 202+000, no km 204+600 e no km 214+000. Como a topografia e o clima da região são favoráveis em termos de estabilidade de encostas, não se observou nenhuma zona com suscetibilidade ao deslizamento alta, ou seja, com *HSQI* baixo.

Na Tabela 5.1, são apresentados os resultados do zoneamento em termos de zonas instáveis, obtido das análises de fotografias feita com a ferramenta *Google street view*. Do total de 91 zonas de análise, foram observadas apenas duas zonas com instabilidade na inspeção visual, sendo 3,3 por cento do total de zonas do trecho. Com respeito às zonas com suscetibilidade média ao deslizamento, as quais foram sete, só uma delas apresentou instabilidade, o que representa 14,3 por cento — valor dentro do estabelecido com as hipóteses probabilísticas do método. Com respeito às zonas com suscetibilidade baixa ao deslizamento, as quais foram 84, só duas apresentaram instabilidade, o que representa 2,4 por cento — valor que também concorda com as hipóteses probabilísticas originais.

Tabela 5.1: Análise de resultados do zoneamento do trecho 1 da BR-381

Condição de suscetibilidade	Dados do <i>Google Street View</i>		
	número de zonas	Zonas instáveis	Percentagem de zonas instáveis %
Suscetibilidade ao deslizamento baixa	84	2	2,4
Suscetibilidade ao deslizamento média	7	1	14,3
Suscetibilidade ao deslizamento alta	0	0	0
Total de zonas	91	3	3,3

5.2.2 Resultados do zoneamento *HSQI* do trecho 6 da BR-381

Na Fig. 5.1, é mostrado o zoneamento final do trecho 6 da BR-381. são apresentadas duas seções consecutivas da rodovia com a mesma escala. Foram obtidas 114 zonas de análise *HSQI*. Pode-se observar que as zonas mais suscetíveis encontram-se no km 358+000 ao km 366+000 e no km 373+000 ao km 374+000. Foram obtidas duas zonas com suscetibilidade alta ao deslizamento e doze zonas com suscetibilidade média.

Na Tabela 5.2, são apresentados os resultados do zoneamento. Do total de 114 zonas de análise, foram observadas seis zonas com instabilidade na inspeção visual, sendo 5,2 por cento do total de zonas do trecho. Com respeito às zonas com suscetibilidade alta ao deslizamento, as duas zonas estimadas apresentaram instabilidade, o que representa cem por cento — valor que concorda com as hipóteses probabilísticas do método. Com respeito às zonas com suscetibilidade média ao deslizamento, as quais foram doze, três delas apresentaram instabilidade, o que representa 25 por cento — valor dentro do estabelecido com as hipóteses probabilísticas do mé-

todo. Quanto às zonas com suscetibilidade baixa ao deslizamento, as quais foram 100, só uma foi instável, o que representa um por cento — valor que também concorda com as hipóteses probabilísticas originais.

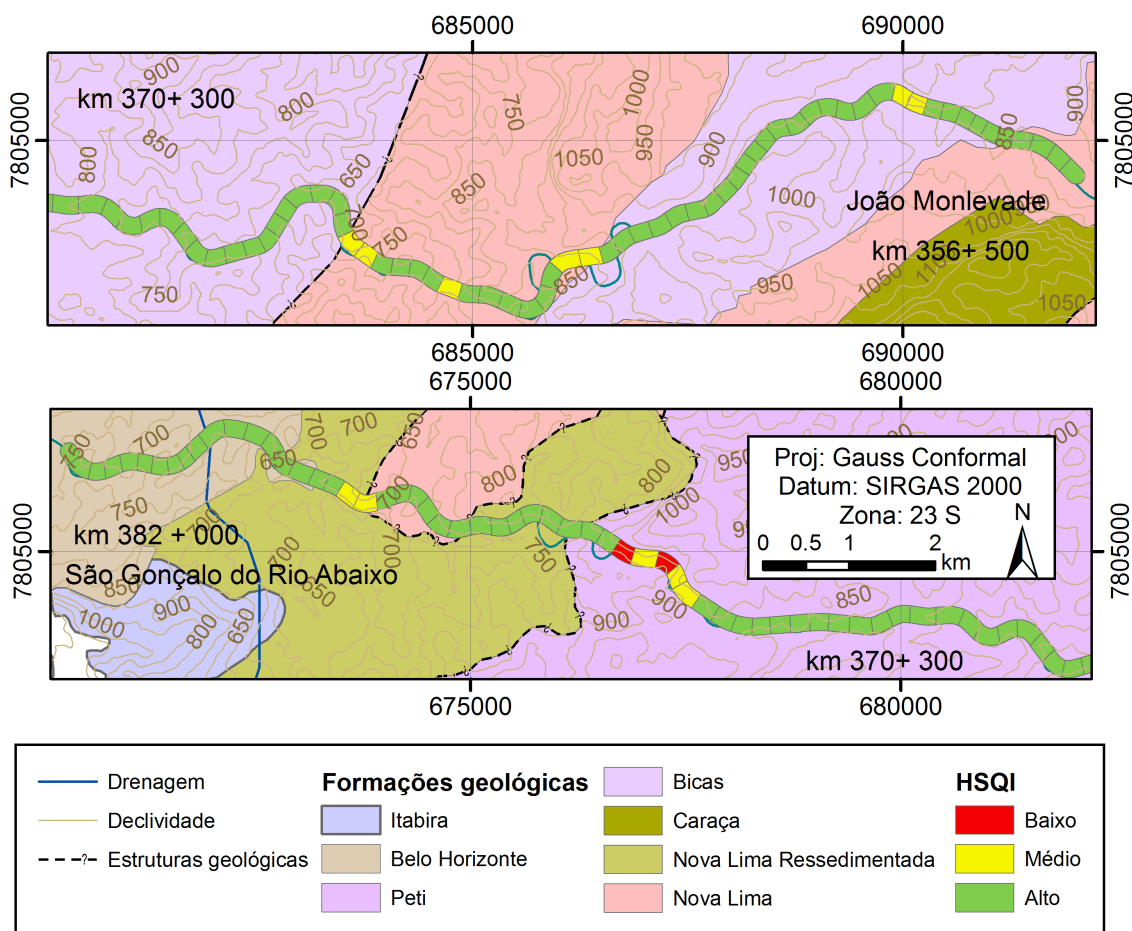


Figura 5.2: Zoneamento *HSQI* do trecho 6 da BR-381

Tabela 5.2: Análise de resultados do zoneamento do trecho 6 da BR-381

Condição de suscetibilidade	Dados do GSV		
	Número de zonas	Zonas instáveis	Percentagem de zonas instáveis %
Suscetibilidade ao deslizamentos baixa	100	1	1
Suscetibilidade ao deslizamentos média	12	3	25
Suscetibilidade ao deslizamentos alta	2	2	100
Total de zonas	114	6	5,2

5.2.3 Resultados do zoneamento *HSQI* para a BR-381

Do zoneamento dos trechos 1 e 6 da BR-381/MG, importados no *Google street view*, determina-se que:

- O trecho 1 é menos montanhoso do que o trecho 6. Portanto, tem menos zonas com suscetibilidade média e nenhuma com suscetibilidade alta.
- O trecho 1 tem uma topografia ondulada, com grandes áreas em zonas relativamente planas. Na Fig. 5.3 é mostrada a seção transversal da zona 72, que vai do km 213+900 ao km 214+700 do trecho 1 da BR-381.



Figura 5.3: Seção transversal da zona 72 do trecho 1 da BR-381 (Fonte: *Google street view*, 2019)

- O trecho 6 percorre uma topografia com maiores acidentes geomorfológicos. Em algumas zonas, houve necessidade de intervir nas encostas devido a processos de instabilidade. Na Fig. 5.4 é mostrada a zona 46, que foi classificada como de suscetibilidade média e observa-se que houve uma intervenção com um muro de gabião.
- Verificou-se que o *Google street view* é uma boa ferramenta para avaliar a estabilidade atual e histórica da rodovia, pois fornece fotografias tanto da seção transversal como de uma vista aérea da zona analisada e com uma boa resolução, que permite identificar instabilidades de uma forma multitemporal.
- Nada substitui o trabalho de campo, onde se podem ver maiores evidências geomorfológicas de instabilidade. Mas, neste caso, como havia a ferramenta do *Google street view*, ela foi utilizada. Geralmente, em uma rodovia nova, isso não existirá. Portanto, é importante um bom trabalho de campo.



Figura 5.4: Seção transversal da zona 46 do trecho 6 da BR-381 (Fonte: *Google street view*, 2019)

5.2.4 Resultados da análise ROC da BR-381

Foi realizada uma análise *Receiver Operating Characteristics ROC*, combinando os dados dos trechos 1 e 6 da estrada BR-381 e utilizando unicamente os dados das zonas com alta e baixa suscetibilidade, tendo em vista que é um tipo de análise com dois avaliadores. Os resultados são mostrados na Tabela 5.3. Pode-se observar que ambos os trechos apresentam encostas estáveis, com baixa suscetibilidade ao deslizamento, o que foi comprovado pelo número de verdadeiros negativos TN , ou seja, as zonas com encostas que verdadeiramente foram classificadas como de suscetibilidade baixa ao deslizamento pelo método *HSQI*. Também se pode ver que apenas três zonas ao longo dos dois trechos apresentaram instabilidade evidente no trabalho de campo executado com ajuda da ferramenta *Goggle street view*.

Tabela 5.3: Resultados da análise ROC do sistema *HSQI* na BR-381

Qualidade estimada da encosta	Zonas observadas BR-381 trechos 1 e 6	
	Positivo (Instável)	Negativo (Estável)
Valores <i>HSQI</i> baixos	TP 2	FP 0
Valores <i>HSQI</i> altos	FN 3	TN 183

Na Tabela 5.4, é realizado o comparativo com o método aplicado nas rodovias *Las Palmas* e *Sifón-La Abundancia*. Na Fig. 5.5, é mostrado o gráfico *ROC*. Pode-se ver que, para a BR-381, foram obtidos resultados muito bons em comparação com as outras rodovias, devido, principalmente, às características da região que são menos extremas, tanto em clima como em geomorfologia. O método *HSQI* apresentou um bom desempenho na região em termos de qualidade dos resultados.

Tabela 5.4: Análise *ROC* comparativa

Análise ROC	Las Palmas	Sifón-La Abundancia	BR-381 trechos 1 e 6
<i>FPrate</i>	43%	40%	0%
<i>TPrate</i>	98%	69%	100%
<i>TNrate</i>	57%	31%	2%

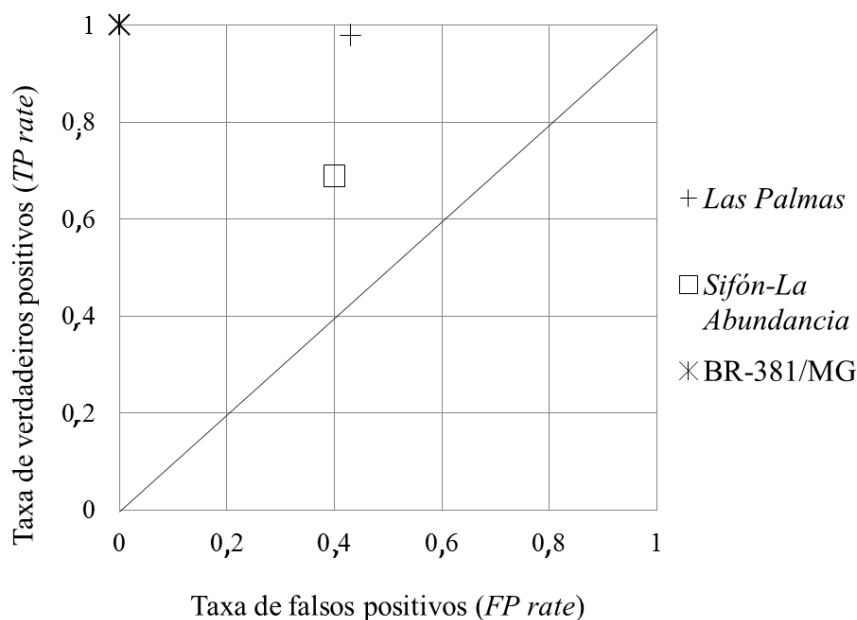


Figura 5.5: Gráfico ROC das aplicações do método *HSQI*

5.3 MELHORAS DO GRÁFICO DE DESEMPENHO *HSQI*

Nesta seção são apresentados os resultados da análise estatística de obras de estabilização dos trabalhos de campo feitos nas rodovias *Las Palmas* e *Sifón-La Abundancia*. Também são apresentados os resultados das análises de obras de estabilização e os gráficos de desempenho específicos para cada tipo de obra, além dos resultados da aplicação do método *Risk Lab* para uma zona da rodovia *Las Palmas*.

5.3.1 Resultados da análise estatística das obras de estabilização

As análises de estatística multivariada foram realizadas com as informações coletadas no trabalho de campo feito nas rodovias *Las Palmas* e *Sifón-La Abundancia* com intuito de entender a influência das características geométricas, geológico/geotécnicas e hidrológicas na escolha das obras de estabilização das encostas. Os métodos escolhidos para a análise estatística foram a

avaliação das matrizes de covariância e de correlação, as quais permitem relacionar as seguintes variáveis:

- Informação geométrica: inclinação i e altura H da encosta.
- Parâmetros geológicos/geotécnicos: coesão c e ângulo de atrito ϕ .
- Condição hidrogeológica: fator S_h .
- Obras de estabilização do inventário: muros de concreto reforçado, muros com ancoragem, muros de solo grampeado, drenagem superficial e subsuperficial, e bermas.

5.3.1.1 Muros de concreto reforçado

Os muros de concreto reforçado tendem a ser econômicos para encostas com pequenas alturas, no máximo de 3 m. Com valores acima disso a obra tende a ser economicamente inviável. De acordo com a análise estatística, a altura H da encosta tem uma influência direta na escolha deste tipo de solução. Mas, todos os muros encontrados no campo tinham menos de 3 m de altura. A estabilidade dos muros de concreto depende dos parâmetros geológico/geotécnicos: coesão c e ângulo de atrito ϕ e inclinação i da encosta. Com as análises estatísticas, foi constatado que essas três variáveis têm uma influência direta na escolha desse tipo de obra.

O fator S_h tem uma influência inversa na escolha desse tipo de obra. Não parece a melhor opção para regiões mais chuvosas. Isso tendo em conta que os dados foram obtidos do inventário de obras de estabilização das duas rodovias, na Colômbia e na Costa Rica. O fator S_h tem uma relação indireta na aplicação de ancoragens, tendo em vista que essa é uma solução muito mais comum na rodovia *Las Palmas* do que na rodovia *Sifón-La Abundancia*, que tinha um clima mais chuvoso.

5.3.1.2 Muros de solo grampeado

Em geral, os muros de solo grampeado apresentam um custo mínimo em taludes de solo escavado. É uma solução facilmente aplicável em encostas muito íngremes ou verticais. O projeto de muros de solo grampeado requer características geométricas e geológico/geotécnicas de acordo com a seguinte análise:

- A altura de encosta H tem uma relação inversa à escolha desse tipo de solução. Isto pode significar que, nas rodovias estudadas, os muros de solo grampeado eram comuns para encostas com alturas menores.
- A inclinação da encosta i tem uma influência direta na escolha desse tipo de obra de estabilização, o que está de acordo com a teoria.

- O fator S_h tem uma relação indireta na aplicação de solo grampeado, tendo em vista que esta é uma solução mais comum na rodovia *Las Palmas* do que na rodovia *Sifón-La Abundancia*.

5.3.1.3 Muros de ancoragem

O cálculo dos muros de ancoragem requer características geométricas e parâmetros geotécnicos de acordo com a análise estatística a seguir:

- A coesão c tem uma relação direta com esse tipo de obra, ou seja, quanto maior a coesão do material mais comum a utilização de muros de ancoragem.
- O ângulo de atrito ϕ tem uma relação inversa a esse tipo de obra, ou seja, quanto menor o ângulo de atrito maior a possibilidade de ser feito um muro de ancoragem.
- A altura de encosta H tem uma relação direta na escolha desse tipo de solução. Isto significa que, para as encostas mais altas, essa solução era mais frequente.
- A inclinação da encosta i tem pouca influência na escolha desse tipo de obra de estabilização.
- Com respeito ao fator S_h , a relação é inversa, tendo em vista que esse tipo de solução foi mais comum na rodovia *Las Palmas* que na rodovia *Sifón-La Abundancia*.

5.3.1.4 Drenagem subsuperficial

A drenagem subsuperficial que se observou que nas rodovias estudadas consistia principalmente em drenos horizontais. As análises mostram que na rodovia *Las Palmas*, com baixo fator S_h , havia maior presença de drenos horizontais do que na rodovia *Sifón-La Abundancia*, com um maior fator S_h . A coesão c e a inclinação i da encosta têm uma influência considerável e direta na escolha desse tipo de solução.

5.3.1.5 Drenagem superficial

A drenagem superficial encontrada nas duas rodovias consistiu principalmente em canaletas transversais e valas na base das encostas. De acordo com a análise estatística, o fator S_h tem uma influência direta na escolha dessa obra. O que quer dizer que era mais comum na rodovia *Sifón-La Abundancia* do que em *Las Palmas*. Os parâmetros geológico/geotécnicos têm uma relação indireta na escolha deste tipo de solução,. Isto significa que quanto menor o valor desses parâmetros melhor terá que ser a drenagem superficial. A inclinação i tem uma relação inversa a essa obra, ou seja, para encostas menos inclinadas é mais frequente essa solução devido a favorecer o estancamento da água.

5.3.1.6 Bermas

A coesão c e a inclinação i são as variáveis que mais afetam a escolha desse tipo de obra de retaludamento. Para materiais melhores e encostas mais inclinadas, regularmente planeja-se essa obra. Já a altura da encosta H e o ângulo de atrito ϕ não têm influência na escolha desse tipo de solução.

5.3.2 Quantificação das obras do gráfico de desempenho

Com a informação dos inventários de obras de estabilização das rodovias *Las Palmas* e *Sifón-La Abundancia* foram desenvolvidos os seguintes gráficos de desempenho para muros de concreto, muros de ancoragem, drenagem superficial e bermas. A realização desses gráficos específicos para cada caso é uma proposta original para complementar o método *HSQI* e não pretende apresentar uma solução definitiva para cada tipo de obra. Porém, tem o intuito de ser uma referência para as equipes de planejadores de rodovias na estimação de quantidades de obras e custos de projeto preliminares.

5.3.2.1 Muros

Com respeito aos muros, é importante levar em consideração as dimensões da altura H e da espessura e . Na Fig. 5.6, é apresentado um exemplo de muro de concreto na rodovia *Las Palmas*. Na Fig. 5.7, é mostrado o gráfico de desempenho de muros de concreto. A faixa de variação da altura dos muros vai de dois a cinco metros, que foi o valor máximo encontrado nos inventários de obras de estabilização. Em alguns casos, foram encontrados dois muros,. Mas, isso não foi suficientemente representativo para ser adicionado no gráfico de desempenho.



Figura 5.6: Exemplo de muro de concreto na rodovia *Las Palmas*. Fonte: Moreno (2015)

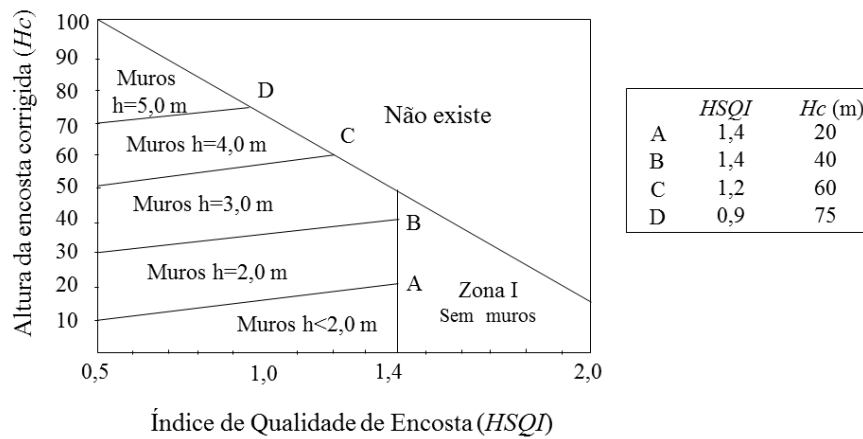


Figura 5.7: Gráfico de desempenho de muros de concreto

5.3.2.2 Ancoragem

Na ancoragem, é importante o espaçamento e o comprimento. Na Fig. 5.8, é apresentado um exemplo de ancoragem na rodovia *Las Palmas*. Como não existem dados dos comprimentos, só foi incluído no gráfico de desempenho o espaçamento. Na Fig. 5.9, é mostrado o gráfico de desempenho de muros de ancoragem. A faixa de variação do espaçamento começa em três metros nas encostas de baixa altura até meio metro para encostas de grande altura e baixo índice de qualidade.

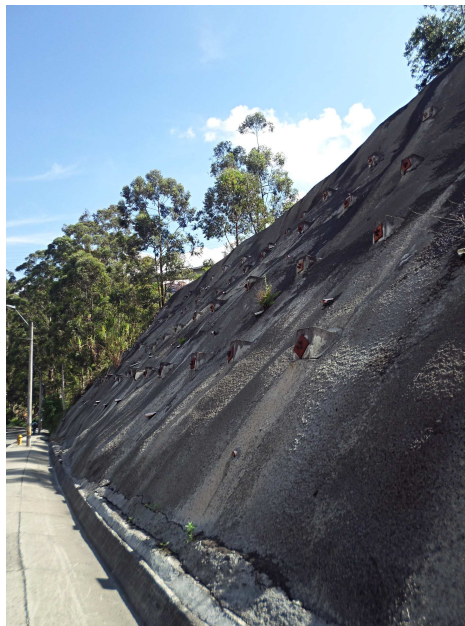


Figura 5.8: Exemplo de muro de ancoragem na rodovia *Las Palmas*. Fonte: Moreno (2015)

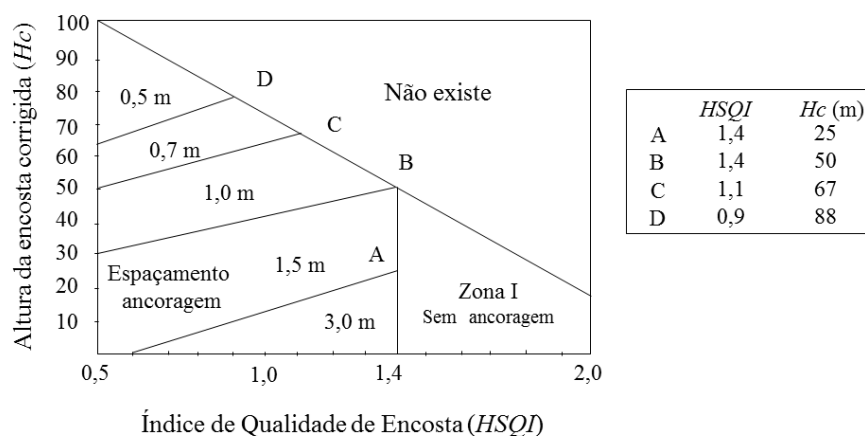


Figura 5.9: Gráfico de desempenho de muros de ancoragem

5.3.2.3 Drenagem superficial

Dentro da drenagem superficial, o tipo de obra mais observado nos inventários das rodovias *Las Palmas* e *Sifón-La Abundancia* foram as canaletas transversais de diversas formas,; retangulares, semicirculares, triangulares, etc. Na Fig. 5.10, é apresentado um exemplo de canaleta transversal na rodovia *Las Palmas*. Foi padronizado o gráfico de desempenho com a área equivalente de canaletas. Na Fig. 5.11, é mostrado o gráfico de desempenho de canaletas transversais. A faixa de variação vai de $0,2 m^2$ para encostas de baixa altura e boa qualidade até $10 m^2$ para encostas de grande altura e baixo índice de qualidade.



Figura 5.10: Exemplo de canaletas transversais na rodovia *Las Palmas*. Fonte: Moreno (2015)

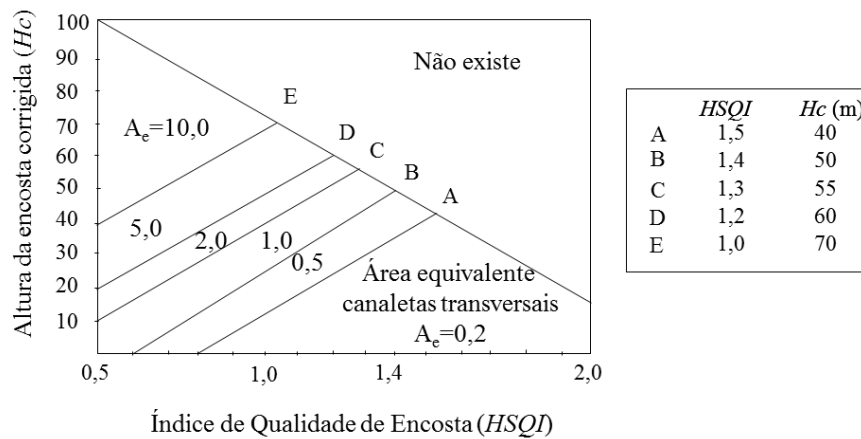


Figura 5.11: Gráfico de desempenho de canaletas transversais

5.3.2.4 Bermas

As bermas foram uma solução muito utilizada na rodovia *Sifón-La Abundancia*, onde a altura corrigida H_c define a quantidade das bermas e também a dimensão delas. Na Fig. 5.12, é apresentado um exemplo de bermas na rodovia *Sifón-La Abundancia*. Na Fig. 5.13, é mostrado o gráfico de desempenho de bermas. Os valores de variação do número de bermas vão desde uma única berma com um metro de comprimento para encostas com baixa altura a até 5 bermas, ou mais, com quatro ou mais metros de comprimento para encostas com grande altura e baixo índice de qualidade.



Figura 5.12: Exemplo de bermas na rodovia *Sifón-La Abundancia*. Fonte: Ocampo (2016)

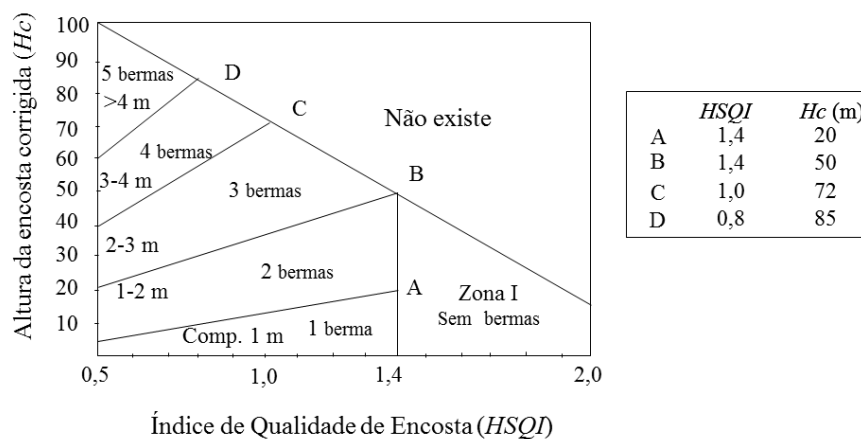


Figura 5.13: Gráfico de desempenho de bermas

5.4 RESULTADOS DA ANÁLISE COMPLEMENTAR *RISK LAB*

Existe uma consistência entre os resultados do método *HSQI* e as análises no *Risk Lab* da zona estudada da rodovia *Las Palmas*. A Fig. 5.14 mostra que os maiores valores da probabilidade de ruptura *PR*, incluindo o mais considerável (23%) foram encontrados na parte norte da área analisada, correlacionando muito bem com o valor de qualidade de encosta *HSQI*, que foi baixo para essa zona. A zona central apresenta uma condição de estabilidade média, com valores de *PR* entre 1% e 11%, exatamente como os valores baixos de suscetibilidade fornecidos pelo método *HSQI*. A parte sul da área de estudo mostra também valores de alta suscetibilidade pelo método *HSQI*, o que se confirma com a tendência da *PR* de até 21%.

As comparações descritas anteriormente são bem representadas em termos de índice de confiabilidade. Como mostrado na Fig. 5.15, os menores valores que representam uma distância pequena entre o fator de segurança médio *FS* e o crítico *FS_c* encontram-se exatamente nas zonas de mais alta suscetibilidade de acordo com o método *Las Palmas*. Na zona central, existe uma grande área com baixo nível de suscetibilidade e valores médios do índice de confiabilidade de aproximadamente 1,3.

As análises *Risk Lab* avaliam a suscetibilidade das encostas sem intervenção e dos terrenos naturais, sem nenhuma influência dos corredores de transporte sobre a estabilidade das encostas. Os resultados dessa análise são adequados comparados com os resultados da aplicação do método *HSQI* e fornecem uma informação complementar interessante, tendo em vista que o método *HSQI* considera a influência de corredores de transporte. Portanto, se o terreno natural é instável sem nenhuma influência externa, é lógico pensar que, com a intervenção devido às obras para a construção de uma rodovia e dependendo do tipo de obra, as encostas resultantes serão instáveis.

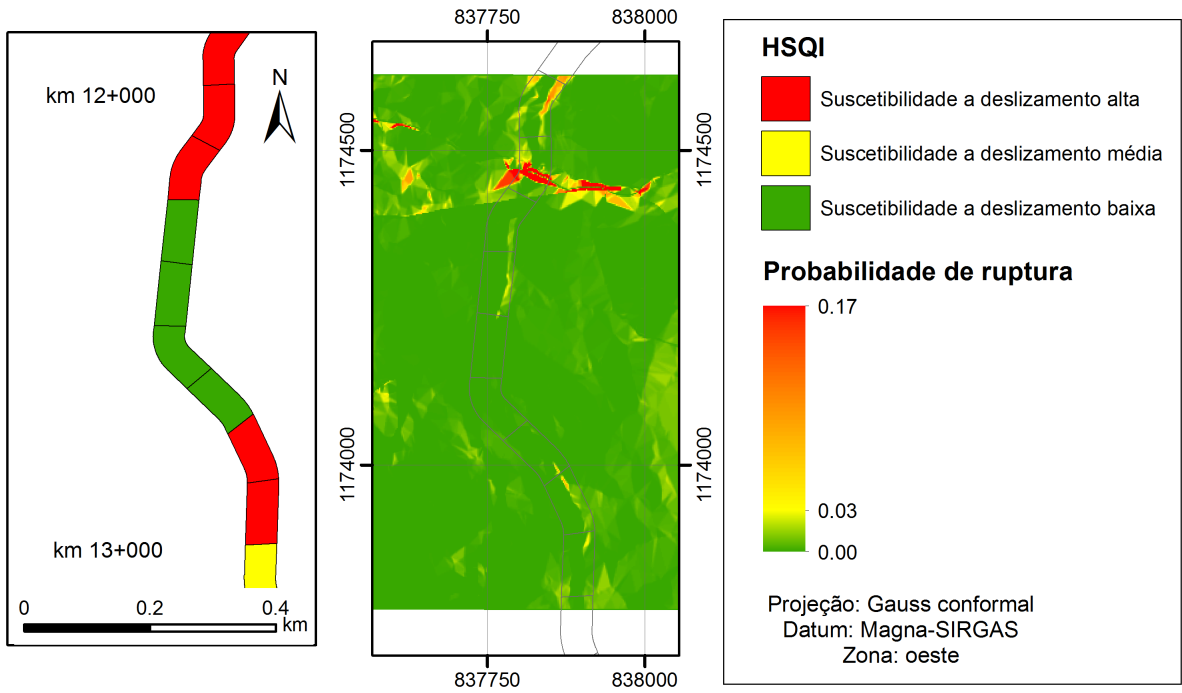


Figura 5.14: Comparação dos resultados do método *HSQI* com a probabilidade de ruptura na análise *Risk Lab* na rodovia *Las Palmas*

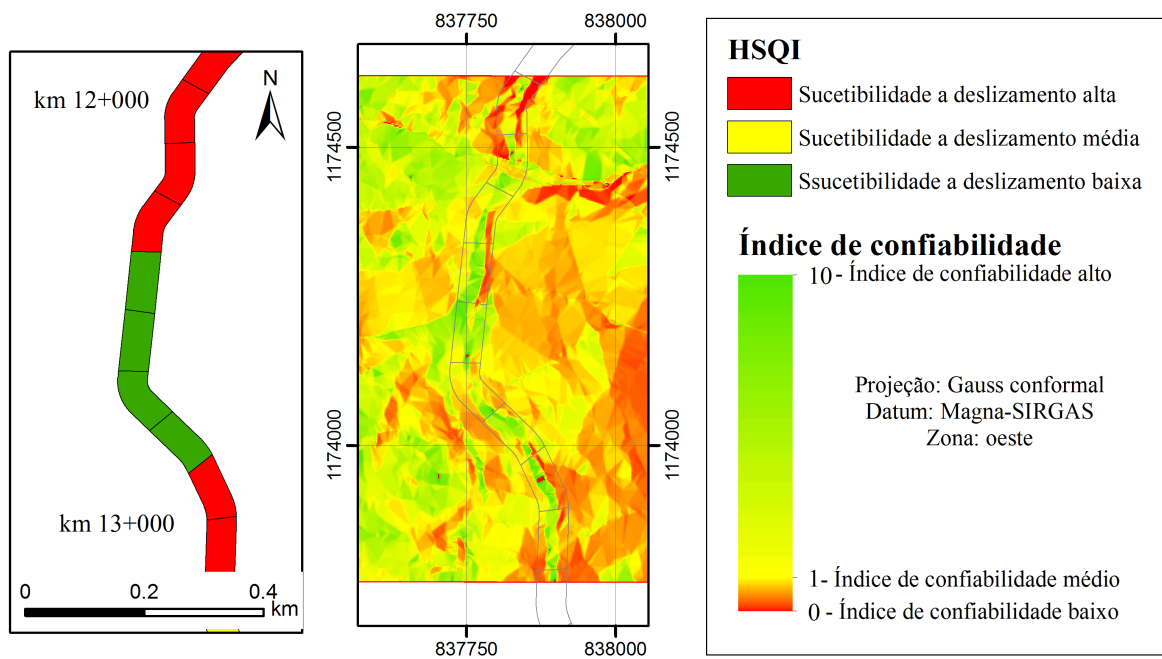


Figura 5.15: Comparação dos resultados do método *HSQI* com o índice de confiabilidade na análise *Risk Lab* na rodovia *Las Palmas*

6 CONCLUSÕES

Neste capítulo são apresentadas as principais conclusões relacionadas com a concepção do método *HSQI*, a validação e aplicação do método *HSQI*, a sistematização dos procedimentos do método *HSQI*, as análises complementares com o método *Risk Lab* e as recomendações para pesquisas futuras.

6.1 CONCLUSÕES SOBRE A CONCEPÇÃO DO MÉTODO *HSQI*

Nesta pesquisa, foi apresentado um aperfeiçoamento de um método original, ou seja, uma abordagem própria criada pelo autor, que permite avaliar e zonestar a suscetibilidade de encostas afetadas por projetos de rodovias chamado, *Hillslope Quality Index (HSQI)*, o qual possibilita obter um índice que avalia a qualidade das encostas afetadas por cortes durante a construção de projetos de quaisquer corredores de transporte. Com esse índice, é possível fazer um zoneamento de suscetibilidade ao longo de todo o corredor e propor medidas de estabilização específicas para cada uma das zonas de suscetibilidade ao deslizamento.

O método *HSQI* pode ser aplicado sem necessidade de dados topográficos, geológico/geotécnicos, nem hidrológicos detalhados, o que é uma vantagem, tendo em vista que, nas etapas preliminares — por exemplo, a de concepção do traçado do corredor —, se conta com pouca informação da zona do projeto, o que muitas vezes dificulta um estudo detalhado de estabilidade das encostas. O *HSQI* torna-se, então, uma ferramenta útil e fácil de ser usada nas etapas preliminares dos projetos de infraestrutura.

O método *HSQI* é uma ferramenta atrativa para instituições públicas e privadas que tenham planejamento de projetos de estradas em regiões montanhosas devido, pois fornece, no nível preliminar do projeto, um zoneamento de suscetibilidade ao deslizamento e recomendações de obras específicas. O zoneamento de suscetibilidade é um dos produtos finais do método, o qual fornece uma visão geral do comportamento da qualidade das encostas ao longo da rodovia, permitindo aos planejadores estar cientes das zonas de maior suscetibilidade ao deslizamento e tomar decisões de uma maneira assertiva. O gráfico de desempenho é um dos produtos finais do método, o qual fornece recomendações de obras de estabilização para cada uma das zonas de suscetibilidade ao deslizamento da rodovia, permitindo estabelecer critérios de quantidades de obra e custos nas etapas iniciais de projetos de corredores rodoviários.

6.2 CONCLUSÕES SOBRE A APLICAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MÉTODO *HSQI*

O método foi aplicado em três rodovias de diferentes países, com condições topográficas, geológico/geotécnicas e climáticas diferentes. A primeira aplicação foi feita em 14 km da rodovia *Las Palmas*, na cidade de Medellín, na região andina norte da Colômbia, região com geomorfologia escarpada, condições geológico/geotécnicas compostas principalmente por solos residuais derivados de rochas metamórficas e migmatitos, e precipitação anual média de 1.750 mm. A segunda aplicação, realizada em 19 km da *Sifón-La Abundancia*, na província de Alajuela, no vale central da Costa Rica, caracterizada por uma geomorfologia de ondulada a escarpada e uma geologia/geotecnia composta por solos residuais de cinzas vulcânicas, e precipitação anual média de 3.500 mm. A terceira aplicação foi feita na Rodovia Federal BR-381, no estado de Minas Gerais, no Brasil, região com geomorfologia de plana a ondulada, geologia/geotecnia caracterizada por solos residuais de rochas graníticas e gnaisses, e precipitação média mensal de 100 mm no trecho 1 e 124 mm no trecho 6. O método foi avaliado com trabalhos de campo físicos nas rodovias *Las Palmas*, em 2014, e *Sifón-La Abundancia*, em 2015. Para os dois trechos, 1 e 6, da BR-381, foi feita uma inspeção visual com ajuda da ferramenta *Google street view*, em 2019, a qual tinha imagens da rodovia em janeiro de 2018, por meio das quais foram analisadas as condições reais de estabilidade e zonas de suscetibilidade *HSQI*, com os valores estimados pelo método, além de feitos inventários de obras de estabilização que permitiram alimentar e melhorar o gráfico de desempenho. As três aplicações do método apresentaram resultados consistentes.

Segundo as análises do método *HSQI* mediante o sistema *ROC*, obteve-se uma taxa de estimação ou de verdadeiros positivos (*TP rate*), ou seja, o método estimou corretamente as zonas instáveis, com índices de qualidade baixos, com um valor maior que setenta por cento nas três aplicações — o que é um valor aceitável comparado com métodos de zoneamento de suscetibilidade ao deslizamento para grandes áreas como o *SHIA-LANDSLIDE* e o *SHALSTAB*. No que diz respeito à taxa de falsos negativos (*FP rate*), o método estimou incorretamente as zonas instáveis, com valores de índice de qualidade altos, com um valor de, aproximadamente 40 por cento, nos casos de *Las Palmas* e *Sifón-La Abundancia*, mas um valor de zero por cento no caso da aplicação na BR-381. Isso deve-se principalmente, às mudanças na declividade das rodovias na Colômbia e na Costa Rica, que era muito maior do que em ambos os trechos da BR-381. Para a BR-381, o resultado é o mais alto possível na análise do gráfico *ROC*, equivalente a 100 por cento de efetividade na predição de zonas suscetíveis.

Na aplicação do método *HSQI* na Rodovia Federal BR-381, foi identificada uma grande diferença nas condições climáticas em comparação com as duas aplicações nas rodovias *Las Palmas* e *Sifón-La Abundancia*, devido ao grande período de seca na região do estado de Minas Gerais. Portanto, decidiu-se avaliar o fator de umidade da condição hidrológica mediante um valor ponderado, que relaciona os meses do ano com os meses que apresentaram uma precipitação maior

do que 125 mm, para obter resultados mais representativos no caso da BR-381. Dos dois trechos analisados, atestou-se que o trecho 1 tinha uma condição hidrogeológica mais favorável que o trecho 2, devido a condições de precipitação diferentes.

O método *HSQI* foi aplicado na Rodovia Federal BR-381 mediante uma inspeção visual, sem visita presencial à zona. Primeiro, com a utilização de informações de imagens de satélite e de fontes como o DNIT e o INPE. Para validar a metodologia foi utilizada a ferramenta *Google street view*, que estava disponível, de forma gratuita, devido à importância da BR-381. Em aplicações em projetos de novas rodovias nos quais não se possa contar com esse tipo de ferramenta, é preciso realizar um trabalho de campo para a identificação visual de aspectos topográficos, geométricos, geomorfológicos e geológico/geotécnicos, informação de entrada essencial para a correta aplicação do método.

O gráfico de desempenho específico para cada obra foi produto de uma análise dos inventários de obras de estabilização nos registros fotográficos dos trabalhos de campo das rodovias *Las Palmas* e *Sifón-La Abundancia*. Essas informações foram utilizadas para gerar gráficos específicos de tipos de obras de estabilização, como, por exemplo: muros de concreto, muros de ancoragem, canaletas transversais e bermas. Esses gráficos específicos fornecem um critério para os planejadores escolherem os tipos de obras mais adequados e avaliarem os custos preliminares, que direcionam a tomada de decisões para etapas de projeto mais detalhadas, como, por exemplo, a etapa de projeto executivo.

6.3 CONCLUSÕES DA SISTEMATIZAÇÃO DO MÉTODO *HSQI*

O método *HSQI* é um método de zoneamento de suscetibilidade ao deslizamento aplicado a corredores de transporte, que pode ser sistematizado e otimizado com ajuda de plataformas de sistemas de informação geográfica *SIG* e ferramentas de programas computacionais. Por exemplo, a informação topográfica utilizada na aplicação do método, em aproximadamente 100 km da Rodovia Federal BR-381, teve como fonte um modelo digital de elevação tirado de imagens de satélite de uma agência japonesa. Com essa informação, conseguiu-se extrair todas as informações geométricas de seções transversais feitas por programas como *AutoCAD Civil 3D* ou *ArcGIS*. A sistematização do cálculo do índice de qualidade do método *HSQI* foi feita com um programa de *Visual Basic* em *Microsoft Excel*, mas poderia ter sido utilizado qualquer outro programa ou até um sistema de informação geográficas como o *ArcGIS*, para calcular o índice de qualidade de cada zona e gerar o mapa de suscetibilidade ao deslizamento de forma automática.

6.4 CONCLUSÕES SOBRE AS ANÁLISES *RISK LAB*

Quando introduzida a análise de equilíbrio limite com a base probabilística para uma análise complementar aos resultados do método *HSQI*, foi possível verificar a concordância das duas respostas metodológicas. Os níveis de suscetibilidade propostos pelo *HSQI* foram equivalentes à estabilidade determinada pelo método *Risk Lab* com respeito à probabilidade de ruptura e ao índice de confiabilidade. Mesmo numa comparação entre o método *HSQI*, que é baseado numa análise de suscetibilidade por zonas, e o método *Risk Lab*, que faz uma análise por *pixels*, com uma resolução superior, os resultados dos dois métodos mostraram boa concordância, ratificando a aplicabilidade do método *HSQI*.

6.5 RECOMENDAÇÕES DE PESQUISAS FUTURAS

Esta tese de doutorado deixa em aberto algumas áreas de pesquisa que podem ser desenvolvidas em trabalhos futuros. A seguir são apresentadas algumas propostas de temáticas para pesquisas futuras:

- Os gráficos de recomendação específicos para as obras de muros, ancoragem, canaletas transversais e bermas foram propostos levando em consideração os dados dos inventários de obras de estabilização das rodovias *Las Palmas* e *Sifón-La Abundancia* unicamente. Recomenda-se fazer uma coleta de informação de inventários de obras de estabilização de uma quantidade de projetos de corredores de transporte mais representativa, para alimentar os gráficos já produzidos e aumentar os tipos de obras específicas para os gráficos de desempenho.
- O mapa final do zoneamento foi realizado com a ajuda dos programas *AutoCAD Civil 3D* e *ArcGIS*, cada um de forma independente. Recomenda-se fazer uma pesquisa sobre ferramentas computacionais como sistemas de informação geográfica que permitam desenvolver uma automatização tanto dos procedimentos geométricos e topográficos como do cálculo *HSQI* para chegar ao mapa final de zoneamento *HSQI*.
- O método *HSQI* foi aplicado em três rodovias de países diferentes, com índices de importância similares. Recomenda-se realizar aplicações do método em rodovias de importância baixa para avaliar como funcionam os gráficos de desempenho nesses casos. Por exemplo, em rodovias temporárias de obras mineiras ou hidrelétricas.
- A aplicação do método *HSQI* no Brasil demonstrou resultados adequados devido, principalmente, às condições topográficas e climáticas da região de estudo da BR-381, no estado de Minas Gerais. Recomenda-se realizar aplicações do método em zonas com condições diferentes de suscetibilidade ao deslizamento das da BR-381, como a região serrana do Rio de Janeiro ou a Serra do Mar, no sul do país.

- Nesta pesquisa, foram desenvolvidos os gráficos de desempenho específicos para obras de estabilização com respeito à quantidade de obras. Recomenda-se analisar a questão econômica ou de custos aplicada a esses gráficos específicos para fornecer aos planejadores de corredores de transporte mais um critério para a tomada de decisões.

REFERÊNCIAS

- ALEOTTI, P.; CHOWDHURY, R. 1999, Landslide hazard assessment: summary review and new perspectives. *Bull. Eng. Geol. Env.*, Springer, v. 21, n. 1, p. 21–44.
- ALVEZ, S. 2014, Metodologia para análises de riscos geotécnicos em taludes de ferrovias. Estudo de caso: Estrada de ferro Vitória-Minas. Universidade Federal de Ouro Preto, Dissertação de mestrado, p. 109.
- AMVA. 2006, Microzonificación sísmica detallada de los municipios de Barbosa, Girardota, Copacabana, Sabaneta, La Estrella, Caldas y Envigado. Informe final.
- ARISTIZABAL, E.; GARCIA, E.; CARVAJAL, H. 2015, Susceptibility assessment of shallow landslides triggered by rainfall in tropical basins and mountainous terrains. *Natural Hazards*, Springer, v. 15, n. 78, p. 621–634.
- ARISTIZABAL, E.; GARCIA, E.; CARVAJAL, H.; JABOYEDOFF, M. 2016, Shia landslide: a distributed conceptual and physically based model to forecast the temporal and spatial occurrence of shallow landslides triggered by rainfall in tropical and mountainous basins. *Landslides*, Springer-Verlag, v. 13, n. 1, p. 497–517.
- AYALEW, L.; YAMAGISHI, H.; MARUI, H.; KANNO, T. 2005, Landslide in Sado island of Japan: Part ii. GIS-based susceptibility mapping with comparison of results from two methods and verifications. *Engineering Geology*, Elsevier, v. 81, n. 1, p. 432–445.
- BAEZA, C.; COROMINAS, J. 2003, Assessment of shallow landslide susceptibility by means of multivariate statistical techniques. *Earth Surface Processes and Landforms*, v. 26, n. 12, p. 1251–1263.
- BARELLA, C. 2016, Abordagens estatísticas aplicadas ao mapeamento de suscetibilidade a movimentos de massa: análise de diferentes técnicas no contexto do Quadrilátero Ferrífero. Universidade de Ouro Preto, Tese de doutorado, p. 253.
- BARREDO, J.; BENAVIDES, A.; HERVAS, J.; WESTEN, C. van. 2000, Comparing heuristic landslide hazard assessment techniques using GIS in the Tirajana basin, Gran Canaria island, Spain. *International journal of applied Earth observation and geoinformation*, Elsevier, v. 2, n. 1, p. 9–23.
- BAUM, R.; SAVAGE, W.; GODT, J. 2002, TRIGRS - A Fortran program for transient rainfall infiltration and grid based regional slope stability analysis. *Open file report 02-424: Colorado, USA*, U.S. Department of the Interior and U.S. Geological Survey.
- BIONDI, G.; CASCONI, E.; MAUGERI, M.; MOTTA, E. 2000, Sismic response of saturated cohesionless slopes. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Missouri University of Science and Technology, v. 20, n. 4, p. 209–215.
- BLAIS-STEVENS, A.; BEHNIA, P.; KREMER, M.; PAGE, A.; KUNG, R.; BONHAM-CARTER, G. 2012, Landslide susceptibility mapping of the sea to sky transportation corridor,

British Columbia, Canada: comparison of two methods. *Bull Eng Geol Environ*, Springer, v. 71, p. 447–466.

BORDONI, M.; PERSICILLO, M.; MEISINA, C.; CREMA, S.; CAVALLI, M.; BARTELLETTI, C.; GALANTI, Y.; BARSANTI, M.; GIANNECCHINI, R.; G.D, A. 2018, Estimation of the susceptibility of a road network to shallow landslides with the integration of the sediment connectivity. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, Copernicus Publications, v. 18, n. 1, p. 1735–1758.

BUDETTA, P. 2004, Assessment of rockfall risk along roads. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, European Geosciences Union, v. 4, n. 1, p. 71–81.

BULUT, F.; BOYNUKALIN, S.; TARHAN, F.; ATAOGU, E. 2000, Reliability of isopleth maps. *Eng Geol Environ*, Springer, v. 58, p. 95–98.

CARDINALI, M.; REICHENBACH, P.; GUZZETTI, F.; ARDIZZONE, F.; ANTONINI, G.; GALLI, M.; CACCIANO, M.; CASTELLANI, M.; SALVATI, P. 2002, A geomorphological approach to the estimation of landslide hazards and risks in Umbria, central Italy. *Nat Hazards Earth Syst Sci*, Springer, v. 2, p. 57–72.

CARRARA, A. 1983, Multivariate models for landslide hazard evaluation. *Mathematical Geology*, v. 15, n. 3, p. 403–426.

CARRARA, A.; CARDINALI, M.; GUZZETTI, F. 1992, Uncertainty in assessing landslide hazard and risk. *ITC-Journal*, v. 2, p. 172–183.

CARRARA, A.; GUZZETTI, F.; CARDINALI, M.; REICHENBACH, P. 1999, Use of GIS technology in the prediction and monitoring of landslide hazard. *Natural Hazards*, Springer, v. 20, n. 2–3, p. 117–135.

CASADEI, M.; DIETRICH, W.; MILLER, N. 2003, Testing a model for predicting the timing and location of shallow landslide initiation on soil mantled landscapes. *Earth Surface Processes and Landforms*, v. 28, n. 9, p. 925–950.

CASCINI, L. 2008, Applicability of landslide susceptibility and hazard zoning at different scales. *Engineering Geology*, Elsevier, v. 102, n. 3–4, p. 164–177.

CASCINI, L.; BONNARD, C.; COROMINAS, J.; JIBSON, R.; MONTERO-OLARTE, J. 1999, Landslide hazard and risk zoning for urban planning and development. *Landslide Risk Management*, Taylor and Francis, Eds, n. 1, p. 199–235.

CASTELLANOS, E.; WESTEN, C. V. 2005, Qualitative landslide susceptibility assessment by multicriteria analysis: a case study from San Antonio del Sur, Guantánamo, Cuba. *Geomorphology*, Elsevier, v. 94, n. 3–4, p. 453–466.

CHACON, J.; IRIGARAY, C.; T, F.; HAMDOUNI, R. E. 2006, Engineering geology maps: landslides and geographical information systems. *Bull. Eng. Geol. Env.*, Springer, v. 65, n. 1, p. 341–411.

CHEN, W.; CHAI, H.; SUN, X.; WAN, Q.; DING, X.; HONG, H. 2016, A GIS-based comparative study of frequency ratio, statistical index and weight of evidence models in landslide susceptibility mapping. *Arabian journal of geosciences*, Springer, v. 9, n. 3, p. 204–215.

CHICA, A. 1988, Anotaciones geotécnicas. *Reporte técnico*, Universidad Nacional de Colombia, v. 1, p. 175.

CHUNG, C.; FABBRI, A. 2001, Prediction models for landslide hazard using fuzzy set approach. *Geomorphology and environmental impact assessment*, A.A. Balkema, v. 1, p. 31–47.

CHUNG, C.; FABBRI, A. 2003, Validation of spatial prediction models for landslide hazard mapping. *Natural Hazards*, Elsevier, v. 30, n. 3, p. 451–472.

COE, J.; MICHAEL, J.; CROVELLI, R.; SAVAGE, W. 2000, Preliminary map showing landslides densities, mean recurrence intervals, and exceedance probabilities as determined from historic records, Seattle, Washington. *USGS Open-File report*, Elsevier, v. 1, p. 303.

COLESANTI, C.; WASOWSKI, J. 2006, Investigating landslides with space-borne synthetic aperture radar (SAR) interferometry. *Engineering Geology*, Elsevier, v. 88, n. 3–4, p. 173–199.

COROMINAS, J.; MOYA, J. 2008, A review of assessing landslide frequency for hazard zoning purposes. *Engineering geology*, Elsevier, v. 102, p. 193–213.

CORTELETTI, C. 2015, Proposta de metodologia para análise de riscos geológico-geotécnicos em ferrovias: estudo de caso: Estrada de ferro Carajás (EFC). Universidade Federal de Ouro Preto, Tese de Doutorado, p. 135.

CPRM; BRASIL, S. G. do; MME, S. qand. 2006, Mapa geodiversidades do Brasil. Escala 1:2500000. Legenda expandida. *Brasília*, p. 68 p.

CRAIG, A. 2016, Análise de suscetibilidade a instabilização de taludes rodovários utilizando o método do talude infinito em ambiente SIG. Universidade de São Paulo, Dissertação de Mestrado, p. 123.

CROSTA, G.; FRATTINI, P. 2003, Distributed modeling of shallow landslides triggered by intense rainfall. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, Elsevier, v. 3, n. 1–2, p. 81–93.

DAS, I.; STEN, A.; KERE, N.; PADHAL, B. 2012, Landslide susceptibility mapping along road corridors in the Indian Himalayas using bayesian logistic regression models. *Geomorphology*, Elsevier, v. 179, p. 116–125.

DAVIS, T. 2015, Landslide hazards, risks, and disasters: Introduction. *Landslide Hazards, Risks, and Disasters*, Elsevier, Volume editor, p. 475.

DEVKOTA, K.; REGMI, A.; POURGHASEMI, H.; YOSHIDA, K.; PRADHAN, B.; RYU I.C, D. M.; ALTHUWAYNEE, O. 2013, Landslide susceptibility mapping using certainty factor, index of entropy and logistic regression models in gis and their comparison at Mugling–Narayanghat road section in Nepal Himalaya. *Nat Hazards*, Springer, v. 65, p. 135–165.

DNIT. 2012, Projeto executivo de restauração e melhoramentos da BR-381. *Report*, DNIT, v. 1, n. 1, p. 1–320.

DONOSOLLO, A. 2017, Classificação de perigo de movimentos de massa em rodovias utilizando o método Analitic Hierarchy Process (AHP). Estudo de caso: Rodovia RS-115, Taquara-Gramado, RS. Universidade de Ouro Preto, Dissertação de Mestrado, p. 180.

ECKHAUT, M. V. D.; POESEN, J.; VERSTRAETEN, G.; VANACKER, V.; NYSSSEN, J.; MOEYERSONS, J.; BEEK, L. V.; VANDEKERCKHOVE, L. 2007, The use of lidar-derived images for mapping old landslides under forest. *Earth surface processes and landforms*, v. 32, p. 754–769.

ECKHAUT, M. V. D.; VANWALLEGHEM, T.; POESEN, J.; GOVERS, G.; VERSTRAETEN, G.; VANDEKERCKHOVE, L. 2006, Prediction of landslide susceptibility using rare events logistic regression: a case-study in the Flemish Ardennes (Belgium). *Geomorphology*, Elsevier, v. 76, n. 3–4, p. 392–410.

ERCANOGLU, M.; GOKCEOLGLU, C. 2001, Assessment of landslide susceptibility for a landslide-prone area (north of Yenice, NW Turkey) by Fuzzy approach. *Environmental Geology*, Springer, v. 41, n. 1, p. 720–730.

ERMINI, L.; CATANI, F.; CASAGLI, N. 2005, Artificial neural networks applied to landslide susceptibility assessment. *Geomorphology*, Elsevier, v. 66, p. 327–343.

FAWCETT, T. 2006, An introduction to ROC analysis. *Pattern Recognition Letters*, Elsevier, v. 27, n. 8, p. 861–874.

FEBOLI, W. 2000, Mapeamento geológico e cadastramento de recursos minerais da região leste de Minas Gerais. *SEME/COMIGCPRM*, v. 11, p. 63.

FELL, R.; COROMINAS, J.; BONNARD, C.; CASCINI, L.; LEROI, E.; SAVAGE, W. 2008, Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land use planning. *Engineering Geology*, WA Hustrulid and RL Bullock (eds) Society of Mining Metallurgy and Exploration, v. 102, n. 3, p. 83–98.

FERNANDES, G. 2015, Sistema de análise quantitativa de risco por escorregamentos rasos deflagrados por chuvas em regiões tropicais. *Tese de Doutorado*, Universidade de Brasília, v. 1, n. 1, p. 1–399.

FERNANDEZ, F.; CERRI, L. 2011, Elaboração da carta geotécnica de suscetibilidade da rodovia Marechal Rondon- SP-300 (SP, Brasil). *Geociências*, Editora UNESP, v. 30, n. 3, p. 457–465.

FOOKES, P.; DALE, S.; LAND, J. 1991, Some observations on a comparative aerial photography interpretation of a landslipped area. *Quarterly Journal of Engineering Geology*, v. 24, p. 249–265.

GEE, M. 1992, Classification of landslide hazard zonation methods and a test of predictive capability. *Proceedings 6th International Symposium on Landslides, Christchurch, New Zealand*, v. 2, p. 947–952.

GITIRANA, G.; SANTOS, M.; FREDLUND, M. 2008, Three-dimensional analysis of the lodalen landslide. *GeoCongress, New Orleans, LA, USA*.

GökCEOGLU, C.; AKSOY, H. 1996, Landslide susceptibility mapping of the slopes in the residual soils of the Mengen region (Turkey) by deterministic stability analyses and image processing techniques. *Engineering Geology*, Elsevier, v. 44, p. 147–161.

GORSEVSKI, P.; GESSLER, P.; FOLTZ, R. 2000, Spatial prediction of landslide hazard using discriminant analysis and GIS. *GIS in the Rockies 2000 Conference and Workshop: applications for the 21st Century, Denver, Colorado*, v. 1.

GULZAR, H.; YUDHIDIR, S.; M.B., G. 2018, Landslide susceptibility mapping along the national highway-1d, between Kargil and Lamyuru, Ladakh region, Jammu and Kashmir. *Journal Geotechnical society of India*, Geotechnical society of India, v. 91, p. 457–466.

GUNTER, A. 2003, Slopemap: programs for automated mapping of geometrical and kinematical properties of hard rock hill slopes. *Computers and Geoscience*, p. 865–875.

GUZZETTI, F.; CARDINALI, M.; REICHENBACH, P.; CARRARA, A. 2000, Comparing landslide maps: A case study in the upper Tiber river basin, central Italy. *Environmental Management*, Springer, v. 25, n. 2, p. 247–363.

GUZZETTI, F.; CARRARA, A.; CARDINALI, M.; REICHENBACH, P. 1999, Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study, central Italy. *Geomorphology*, Elsevier, v. 31, n. 1–4, p. 181–216.

GUZZETTI, F.; REICHENBACH, P.; ARDIZZONE, F.; CARDINALI, M.; GALLI, M. 2006, Estimating the quality of landslide susceptibility models. *Geomorphology*, Elsevier, v. 81, n. 1–2, p. 166–188.

HIDALGO, C. 2013, Incertezas, vulnerabilidade e avaliação de risco devido a deslizamentos em estradas. *Tese de Doutorado*, Universidade de Brasília, v. 1, n. 1, p. 1–250.

INTEGRAL. 2012, Reporte geotécnico de la carretera Las Palmas: Puente 9, sector Doña Rosa, Medellín. *Reporte técnico*, Integral S. A., v. 1, p. 225.

JAISSWAL, P.; WESTEN, C. V. 2009, Estimating temporal probability for landslide initiation along transportation routes based on rainfall thresholds. *Geomorphology*, Elsevier, v. 112, n. 1, p. 96–105.

JAISSWAL, P.; WESTEN C.J, J. V. V. 2010, Quantitative landslide hazard assessment along a transportation corridor in southern India. *Engineering Geology*, Elsevier, v. 116, p. 236–250.

JIBSON, R.; HARP, E.; MICHAEL, J. 1998, A method for producing digital probabilistic seismic landslide hazard maps: An example from the Los Angeles, California area. *US Geological Survey Open File Report 98-113*, US Geological Survey.

JUAREZ-BADILLO, E. 2010, Theoretical geoscience. *Theoretical geoscience*, Sociedad Mexicana de Ingeniería Geotécnica A.C., v. 19.

KEEFER, D. 2002, Investigating landslides caused by earthquakes – a historical review. *Surveys in Geophysics*, Springer, v. 23, n. 1, p. 473–510.

KIENHOLZ, H. 1978, Maps of geomorphology and natural hazard of Grindewald, Switzerland, scale 1:10,000. *Arctic Alpine Res*, Allen Press, Inc, v. 10, n. 2, p. 169–184.

LEAL, P. 2014, Mapeamento de perigo a escorregamento na bacia hidrográfica do rio Grande de Ubatuba - Ubatuba (SP): comparação dos métodos anlíticos e sintético. Universidade de São Paulo, Dissertação de mestrado, p. 100.

- LEE, S. 2005, Application of logistic regression model and its validation for landslide susceptibility mapping using GIS and remote sensing data. *Int J Remote Sens*, Taylor and Francis, v. 26, n. 1, p. 1477–1491.
- LEE, S.; RYU, J.; MIN, K.; WON, J. 2003, Landslide susceptibility analysis using gis and artificial neural network. *Earth Surface Processes and Landforms*, v. 28, p. 1361–1376.
- LEE, S.; RYU, J.; WON, J.; PARK, H. 2004, Determination and application of the weights for landslide susceptibility mapping using an artificial neural network. *Eng Geol*, Elsevier, v. 71, n. 3–4, p. 289–302.
- LI, Z.; NADIM, F.; UZZIELLI, M.; LACASSE, S. 2010, Quantitative vulnerability estimation for scenario-based landslide hazards. *Landslides*, Springer, v. 7, n. 2, p. 125–134.
- LUZI, L. 1985, Application of favourability modelling to zoning of landslide hazard in the Fabriano area, central Italy. *Proceedings of the first joint European conference and exhibition on geographical information, The Hague, Netherlands*, v. 1, n. 1, p. 398–402.
- MALET, J.; THIERY, Y.; HERVAS, J.; GUNTHER, A.; PUISSANT, A.; GRANDJEAN, G. 2009, Landslide susceptibility mapping at 1:1m scale over France: exploratory results with a heuristic model. *Proc. Int. Conference on Landslide Processes: from Geomorphologic Mapping to Dynamic Modelling*, CERIG Editions, v. 1, p. 315–320.
- MANFRE, L. 2015, Identificação e mapeamento de áreas de deslizamentos associadas a rodovias utilizando imagens de sensoriamento remoto. Universidade de São Paulo, Tese de Doutorado, p. 117.
- MENESES, B.; PEREISA, S.; REIS, E. 2019, Effects of different land use and land cover data on the landslide susceptibility zonation of road networks. *Nat. Hazards and Earth Syst. Sci.*, Copernicus, v. 19, p. 471–487.
- MONTGOMERY, D.; DIETRICH, W. 1994, a physically based model for topographic control on shallow landsliding. *Water Resources Research*, American Geophysical Union, v. 30, n. 4, p. 1153–1179.
- MORA, R. 1998, Propiedades físicas, hidráulicas y mecánicas de los suelos de origen volcánico. *Revista Geológica de América Central*, Scielo, v. 19, n. 1, p. 81–98.
- MORA, S.; VAHRSON, W. 1994, Macrozonation methodology for landslide hazard determination. *Bulletin of the Association of Engineering Geologists*, Springer, v. 31, n. 1, p. 49–58.
- MORENO, C. 2015, Sistema de classificação geotécnica de encostas para projetos de estradas baseado no índice de qualidade HSQI: Proposta metodológica e validação. Universidade de Brasília, Dissertação de Mestrado, p. 104.
- MUNOZ, E.; MARTINEZ, H. 2013, Propiedades estadísticas de un inventario de deslizamientos en la ciudad de Medellin, Colombia. *10 Simposio Internacional de Estructuras, Geotécnia y Materiales de Construcción, At Santa Clara, Villa Clara, Cuba*, RG, v. 1, n. 1, p. 1–9.
- NERY, T. 2011, Avaliação da suscetibilidade a escorregamentos translacionais rasos na bacia da Ultrafértil, Serra do Mar (SP). Universidade de São Paulo, Dissertação de Mestrado, p. 156.

- OCAMPO, M. 2016, Sistema de classificação geotécnica de encostas para projetos de estradas baseado no índice de qualidade HSQI: Aplicação na Costa Rica. *Dissertação de Mestrado*, Universidade de Brasília, v. 1, n. 1, p. 1–176.
- OHLMACHER, C.; DAVIS, C. 2003, Using multiple logistic regression and GIS technology to predict landslide hazard in northeast Kansas, USA. *Eng Geol*, Elsevier, v. 69, n. 3–4, p. 331–343.
- OLIVEIRA, M. 2015, Caracterização geológico-geotécnica e propostas de intervenções para estabilização de taludes na boçoroca do Córrego do Cravo - Nazareno (MG). Universidade de São Paulo, *Dissertação de Mestrado*, p. 143.
- OLIVEIRA, D.; DIEDERICHS, M.; RASMUSSEN, L.; CECILIO, M. 2017, Tropical residual soil data compilation as guidance for laboratory tests and EPB excavation process simulation. *Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground*, Taylor and Francis, v. 1, p. 185–193.
- OPISO, E.; PUNO, G.; ALBURO, J.; DETALLA, A. 2016, Landslide susceptibility mapping using GIS and FR method along the Cagayan de Oro-Bukidnon-Davao city route corridor, Philippines. *KSCE Journal of Civil Engineering*, Springer, v. 20, n. 6, p. 2506–2512.
- PACK, R.; TARBOTON, D.; GOODWIN, C. 1998, The sinmap approach to terrain stability mapping. *8th Congress of the International Association of Engineering Geology: Vancouver, British Columbia, Canada*, International Association of Engineering, v. 8.
- PELLICANI, R.; ARGENTIERO, I.; SPILOTRO, G. 2017, Gis-based predictive models for regional-scale landslide susceptibility assessment and risk mapping along road corridors. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, Taylor and Francis Group, v. 8, n. 2, p. 1012–1033.
- PETLEY, D. 2012, Global patterns of loss of life from landslides. *Geology*, Geological Society of America, v. 40, n. 10, p. 927–930.
- PINHEIRO, M.; SANCHES, S.; MIRANDA, T.; NEVES, A.; TINOCO, J.; FERREIRA, A.; CORREIA, A. 2015, A new empirical system for rock slope stability analysis in exploitation stage. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Elsevier, v. 76, n. 1, p. 182–191.
- RAMESH, V.; ANBAZHAGAN, S. 2015, Landslide susceptibility mapping along Kolli hills chat road section (India) using requiancy ratio, relative effect and fuzzy logic models. *Environmental Earth Sciences*, Springer, v. 73, n. 12, p. 8009–8021.
- RAMESH, V.; MANI, S.; BASZAR, M.; KAVTHA, G.; ANBAZHAGAN, S. 2017, Landslide hazard zonation mapping and cut slope stability analysis along Yercaught road (Kuppanur-Yercaud) section, Tamil Nudu, India. *International journal of geo-engineering*, Springer, v. 8, n. 1, p. 1–10.
- REGMI, A.; DEVKOTA, K.; YOSHIDA, K.; PRADHAN, B.; POURHASEMI, H.; KUMAMOTO, T.; AKGUN, A. 2014, Application of frequency ratio, statistical index, and weights-of-evidence models and their comparison in landslide susceptibility mapping in central Nepal Himalaya. *Arabian journal of sciences*, Springer, v. 7, n. 2, p. 725–742.
- REID, L.; PAGE, M. 2003, Magnitude and frequency of landsliding in a large New Zealand catchment. *Geomorphology*, Elsevier, v. 49, n. 1, p. 71–88.

- RETREPO, J. 1986, Metamorfismo en el sector norte de la cordillera central de Colombia. *Reporte técnico*, Universidad Nacional de Colombia, v. 1, p. 195.
- ROBERDS, W. 2005, Estimating temporal and spatial variability and vulnerability. *Landslide risk management*, Taylor and Francis, p. 129–158.
- RUPKE, J.; CAMMERAAT, E.; SEIJMONSBERGEN, A. 1988, Engineering geomorphology of the Widentobel catchment, Appenzell and Sankt Gallen, Switzerland : a geomorphological inventory system applied to geotechnical appraisal of slope stability. *Engineering Geology*, Elsevier, v. 28, n. 1, p. 36–68.
- SAFELAND. 2011, Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning. *Living with landslide risk in Europe: Assessment, effects of global change, and risk management strategies*, SAFELAND, v. 3, n. 1, p. 1–173.
- SANCHEZ, D.; RESTREPO, L. 2010, Zonificación de la aptitud geológica y caracterización geotécnica para el uso y ocupación del suelo del polígono La Asomadera. *Reporte técnico*, Solingral S.A., v. 1, p. 43.
- SCHUSTER, R.; TURNER, K. 1996, Investigation and mitigation: National research council. *Transportation Research Board Special Report 247*, National Academy Press, National Academy Press, p. 673.
- SILVEIRA, C.; FIORI, A.; FIORI, C. 2005, Estudo das unidades ecodinâmicas da instabilidade potencial na APA de Guaratuba: subsídios para o planejamento ambiental. *Boletim Paranaense de Geociências*, Editora UFPR, v. 57, p. 9–23.
- SILVEIRA, C.; FIORI, A.; SCHILIPACK, P.; MANZOLI, S. 2014, Mapeamento preliminar da suscetibilidade natural a movimentos de massa da serra do mar paranaense apoiado na análise digital do relevo. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, UGB, v. 15, n. 1, p. 3–22.
- SIMONI, S.; ZANOTTI, F.; BERTOLDI, G.; RIGON, R. 2008, Modelling the probability of occurrence of shallow landslides and channelized debris flows using GEOTop-FS. *Hydrological Processes*, v. 22, n. 4, p. 532–545.
- SOARES, P.; SOARES, A.; FIORI, A. 2002, Raciocínio probabilístico aplicado à suscetibilidade de escorregamentos: um estudo de caso em Campo Largo, Paraná, Brasil. *Boletim Paranaense de Geociências*, Editora UFPR, v. 50, p. 61–76.
- SOETERS, R.; WESTEN, C. V. 1996, Slope instability recognition, analysis and zonation. *Landslides, Investigation and Mitigation.*, Turner, A.K., Schuster, R.L., (Eds.), Ed, n. 1.
- SOLANO, J.; VILLALOBOS, R. *Regiones e subregiones climáticas de Costa Rica*. [S.l.]: Instituto Meteorológico Nacional, 1999. 1–32 p.
- SQUARZONI, C.; DELACOURT, C.; ALLEMAND, P. 2003, Nine years of spatial and temporal evolution of the La Vallette landslide observed by SAR interferometry. *Engineering Geology*, Elsevier, v. 68, n. 1–2, p. 53–66.
- STEAD, D.; EBERHARDT, E.; COGGAN, J.; BENKO, B. 2001, Advanced numerical techniques in rock slope stability analysis – applications and limitations. *LANDSLIDES – Causes, Impacts and Countermeasures*, p. 615–624.

- TAHERYNIA, M.; MOHAMMADI, M.; AJALLOEIAN, R. 2014, Assessment of slope instability and risk analysis of road cut slopes in Lashotor Pass, Iran. *Journal of Geological Research*, Hindawi Publishing Corporation, v. 14, n. 1, p. 1–12.
- TOMINAGA, K. 2007, Avaliação de metodologias de análise de risco a escorregamentos: aplicação de um ensaio em Ubatuba, SP. Universidade de São Paulo, Tese de Doutorado, p. 220.
- TSANGARATOS, P.; ILIA, I.; HONG, H.; CHEN, W. 2017, Applying information theory and a GIS-based quantitative methods to produce landslide susceptibility maps in Ianchung county, China. *Landslides*, Elsevier, v. 14, n. 3, p. 1091–1111.
- UZZIELLI, M.; NADIM, F.; ; LACASSE, S.; KAYNA, A. 2008, A conceptual framework for quantitative estimation of physical vulnerability to landslides. *Eng. Geol.*, Elsevier, v. 102, p. 251–256.
- VALADAO, P.; GASPAR, J.; QUEIROZ, G.; FERREIRA, T. 2000, Landslides density map of S. Miguel island, Azores archipelago. *Nat Hazard Earth Syst Sci*, Springer, v. 2, p. 51–56.
- VAN-BEEK, L. *Assessment of the influence of changes in Landuse and Climate on Landslide Activity in a Mediterranean Environment*. Tese (Doutorado) — University of Utrecht, 2002.
- VENEGAS, D. 2011, Caracterización de la deformabilidad y resistencia de suelos lateríticos en tres puntos de la nueva carretera San Ramón–San Carlos. *Proyecto de grado*, Universidad de Costa Rica, v. 1, p. 176.
- WESTEN, C. V.; CASTELLANOS, E.; SEKHAR, L. 2008, Spatial data for landslide susceptibility, hazards and vulnerability assessment: an overview. *Engineering geology*, Elsevier, v. 102, n. 2–3, p. 112–131.
- WESTEN, C. V.; SOETERS, R.; SIJMONS, K. 2000, Digital geomorphological landslide hazard mapping of the Alpago area, Italy. *International journal of applied earth observation and geoinformation*, Elsevier, v. 2, n. 1, p. 51–60.
- WESTEN, C. van; SEIJMONSBERGEN, A.; MANTOVANI, F. 1999, Comparing landslide hazard maps. *Natural hazards: journal of the international society for the prevention and mitigation of natural hazards*, Elsevier, v. 20, n. 2–3, p. 137–158.
- WIECZOREK, G. 1984, Preparing a detailed landslide-inventory map for hazard evaluation and reduction. *Bulletin of the Association of Engineering Geologists*, Elsevier, v. 21, n. 3, p. 377–342.
- YALCIN, A. 2008, Gis-based landslide susceptibility mapping using analytical hierarchy process and bivariate statistics in Ardesen (Turkey): comparisons of results and confirmations. *Catena*, Elsevier, v. 1, n. 1, p. 1–12.
- YESILNACAR, E.; TOPAL, T. 2001, Landslide susceptibility mapping: a comparison of logistic regression and neural networks methods in a medium scale study, Hendek region (Turkey). *Engineering Geology*, Elsevier, v. 79, n. 3–4, p. 251–266.
- YIN, K.; YAN, T. 1988, Statistical prediction model for slope instability of metamorphosed rocks. *Proceedings 5th International Symposium on Landslides, Lausanne, Switzerland*, v. 2, n. 1, p. 1269–1272.

YOSHIMATSU, H.; ABE, S. 2005, A review of landslide hazards in Japan and assessment of their susceptibility using an analytical hierarchic process (AHP) method. *Landslides*, Elsevier, v. 3, n. 1, p. 1–10.

ZINCK, J.; LOPEZ, J.; METTERNICHT, G.; SHRESTHA, D.; VAZQUEZ-SELEM, L. 2001, Mapping and modelling mass movements and gullies in mountainous areas using remote sensing and GIS techniques. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, v. 2, n. 1, p. 43–53.