

Universidade Camilo Castelo Branco
Campus de Fernandópolis

RADOAN LUIZ RODRIGUES

**USO DE MAPA DE DECLIVIDADE E NDVI NA IDENTIFICAÇÃO DE
ÁREAS DE RISCO DE DESLIZAMENTOS**

**USE OF MAPS OF DECLIVITY AND NDVI AT THE IDENTIFICATION OF RISK
AREAS OF SLIPS**

Fernandópolis -SP
2015

RADOAN LUIZ RODRIGUES

USO DE MAPA DE DECLIVIDADE E NDVI NA IDENTIFICAÇÃO DE ÁREAS DE
RISCO DE DESLIZAMENTOS

Orientador: Prof. Dr. Luiz Sergio Vanzela

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais da Universidade Camilo Castelo Branco, como complementação dos créditos necessários para obtenção do título de Mestre em Ciências Ambientais.

Fernandópolis -SP

2015

FICHA CATALOGRÁFICA

RODRIGUES, Radoan Luiz

R616U Uso de Mapa de Declividade de NDVI na Identificação de Áreas de Risco de Deslizamentos / Radoan Luiz Rodrigues - São José dos Campos: SP / UNICASTELO, 2015.

52f. il.

Orientador: Prof. Dr. Luiz Sergio Vanzela

Dissertação de Mestrado apresentada no Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais da Universidade Camilo Castelo Branco, para complementação dos créditos para obtenção do título de Mestre em Ciências Ambientais.

1. Erosão. 2. Áreas Degradadas. 3. Sensoriamento Remoto.

I. Título

CDD: 574

Autorizo, exclusivamente, para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial desta dissertação, por processos xerográficos ou eletrônicos.

Assinatura do aluno:



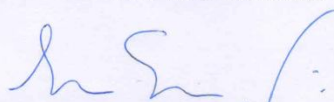
Data: 10.11.2015

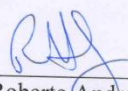
TERMO DE APROVAÇÃO

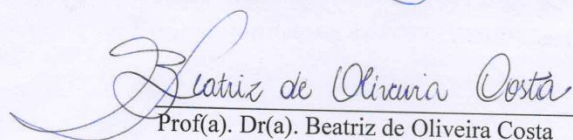
RADOAN LUIZ RODRIGUES

“USO DE MAPA DE DECLIVIDADE E NDVI NA IDENTIFICAÇÃO DE ÁREAS DE RISCO DE DESLIZAMENTOS”

Dissertação aprovada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre no Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais da Universidade Camilo Castelo Branco, pela seguinte banca examinadora:


Prof(a). Dr(a). Luiz Sérgio Vanzela (Presidente)


Prof(a). Dr(a). Roberto Andreani Júnior


Prof(a). Dr(a). Beatriz de Oliveira Costa

São José dos Campos, 07 de agosto de 2015.

Presidente da Banca Prof(a). Dr(a). Luiz Sérgio Vanzela

Agradecimentos

Agradeço a Deus, por me dar forças e condições emocionais para persistir no caminho, por mais árduo que este seja.

Ao meu orientador, Profº Dr. Luiz Sérgio Vanzela, que muito me ajudou em momentos de dificuldade e empecilhos ocorridos durante a pesquisa.

A minha esposa e meu filho Heitor por compreender os momentos de ausência e as palavras de coragem e fortalecimento.

A amiga Angela Miazaki que disponibilizou suas habilidades em geoprocessamento para me ajudar na confecção de imagens.

Ao amigo Jair Járade que formatou o trabalho.

Ao amigo Edilton que promoveu as correções ortográficas.

A todos os colegas da turma pelas inúmeras viagens juntos e momentos de descontração que vivenciamos.

A prefeitura Municipal de Caraguatatuba pela concessão da bolsa de mestrado.

Aos professores do curso de Mestrado em Ciências ambientais que nos ajudaram com seus conhecimentos e ensinamentos.

Ao pessoal da Defesa Civil de Caraguatatuba, sempre dispostos a me ajudar.

Aos meus pais que sempre acreditaram, incentivaram e sempre estiveram ao meu lado.

Enfim, a todos que me ajudaram a vencer mais esta etapa da minha vida, muito obrigado.

Não existe fracasso no erro,
o fracasso está na desistência.

Ralph Nadar

USO DE MAPA DE DECLIVIDADE E NDVI NA IDENTIFICAÇÃO DE ÁREAS DE RISCO DE DESLIZAMENTOS

RESUMO

O crescimento descontrolado e o expansionismo urbano desenfreado têm provocado inúmeros problemas socioambientais. Neste trabalho destaca-se os deslizamentos de terras no Planalto Atlântico Brasileiro, que são motivados pelas próprias características naturais do solo em questão e agravados e acelerados em virtude do uso inadequado do mesmo. O sensoriamento remoto e os Sistemas de Informações Geográficas (SIGs) são ferramentas imprescindíveis na análise das condições das áreas de risco de deslizamento e na prevenção de desastres naturais. Nesse contexto, avaliou-se a aplicação desses recursos no mapeamento e monitoramento de áreas vulneráveis a este tipo de acontecimento no município de Caraguatatuba-SP, utilizando imagens do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) e o Modelo Digital do Terreno (MDT), mitigando e amenizando os impactos resultantes. Após a confecção e formulação da imagem por meio desse método, foi realizado o cruzamento das informações disponibilizadas no mapa elaborado pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), encontrando 37% de coincidência nas áreas de risco, destacando nos bairros Jardim Francis (86,6%), Tinga (80,7%) e Caputera (76,8%). Já os percentuais de coincidência mais baixos foram encontrados nos bairros Jetuba (8,1%), Cocanha (12,0%) e Sertão dos Tourinhos (17,5%). No total o método encontrou mais áreas passíveis de deslizamento de terras que aquelas definidas pelo mapa de referência, IPT.

PALAVRAS-CHAVE: erosão, áreas degradadas e sensoriamento remoto.

USE OF MAPS OF DECLIVITY AND NDVI AT THE IDENTIFICATION OF RISK AREAS OF SLIPS

ABSTRACT

The uncontrolled growth and rampant urban expansionism have caused numerous environmental problems. In this work were highlight the landslides in the Brazilian Atlantic Highlands, which are motivated by their own natural characteristics of the soil itself, aggravated and accelerated due to the inappropriate use of it. Remote sensing and Geographic Information Systems (GIS) are essential tools in the analysis of the conditions of sliding risk areas and preventing natural disasters. In this context, we evaluated the application of these resources in mapping and monitoring of vulnerable areas to this kind of event in the city of Caraguatatuba-SP using images Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and the Digital Terrain Model (DTM), reducing and mitigating the resulting impacts. After the preparation and formulation of the image by using this method, the crossing of the information provided on the map prepared by the Institute for Technological Research (IPT) was performed, finding 37% of coincidence in risk areas, highlighting neighborhoods Garden Francis (86.6 %) Tinga (80.7%) and Caputera (76.8%). Already the percentage of lower coincidence were found in Jetuba neighborhoods (8.1%), Cocanha (12.0%) and Sertão dos Tourinhos (17.5%). In the gross the method had found more areas for landslides than those defined by the reference map, IPT.

KEY-WORDS: erosion, degraded areas and remote sensing.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Estrutura geológica de Caraguatatuba.....	21
Figura 2: Localização dos Limites Municipais de Caraguatatuba.....	29
Figura 3: Tipos de solo de Caraguatatuba	32
Figura 4: Mapa Hipométrico de Caraguatatuba.....	33
Figura 5: Detalhe das áreas de risco de deslizamento em “amarelo” mapeadas pelo IPT (2010)	34
Figura 6: Detalhe da imagem NDVI da área do mapa de referência.....	36
Figura 7: Detalhe da conversão do MDT para a grade de declividades.....	36
Figura 8: Declividade médias e os valores extremos máximos e mínimos observados em cada área de risco.....	38
Figura 9: NDVI médio e os valores extremos máximos e mínimos observados em cada área de risco.....	38
Figura 10: Mapa de referência de risco de deslizamento elaborado pelo IPT (2010)	40
Figura 11: Mapa de risco dedeslizamento de acordo com o cruzamento dos mapas de declividade e NDVI.....	40
Figura 12: Percentual de coincidência entre os mapasde referência e o obtido pela metodologia.....	41
Figura 13: Exposição de rocha com solo raso, no Morro Santo Antônio.....	38
Figura 14: Erosão no bairro Prainha	42
Figura 15: Distribuição espacial das classes de percentual de coincidência obtidas entre a metodologia empregada com mapa de referência.	43
Figura 16: Percentual de coincidência de área entre as quatro classes de combinação entre declividade média e NDVI médio, com mapa de referência.....	44
Figura 17: Detalhe de área identificada de risco pela metodologia adotada neste trabalho, localizada no bairro Martin de Sá.	435
Figura18: Detalhe de área identificada de risco pela metodologia adotada neste trabalho, localizada na praia Martin de Sá.....	45

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Condicionantes para a ocorrência dos escorregamentos.....	18
Tabela 2. Índices pluviométricos do município	31
Tabela 3. Descrição dos tipos de solo de Caraguatatuba	32
Tabela 4. Data de passagem e valores de MP, Ap e θ_{SE} , da cena LC82180762014128LGN00 do satélite Landsat 8.....	35
Tabela 5. Classes de ocorrência de declividade e NDVI dentro das áreas de risco de deslizamentos do mapa de referência.....	39

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Ap - fator de correção aditivo específico da banda.

ASTER - AdvancedSpaceborneThermalEmissionandReflectionRadiometer

CEMADEN- Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais

CEPAGRI - Centro de Pesquisas Meteorológicas e Climáticas Aplicadas à Agricultura

EMBRAPA- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

IPCC – Painel Intergovernamental sobre mudanças climáticas

IPT -Instituto de Pesquisas Tecnológicas

MDE - Modelo Digital de Elevação

MDT - Modelo Digital do Terreno

MNT – Modelo Numérico de Terreno

Mp - fator de correção multiplicativo específico da banda

NDVI -Índice de Vegetação por Diferença Normalizada

NIR - Reflectância do Infravermelho

PEMC - Política Estadual de Mudanças Climáticas

PNMC - Política Nacional sobre Mudança do Clima

Qcal - número digital do pixel quantizado e calibrado

R - Reflectância do vermelho

SE - Elevação Solar

SIG - Sistemas de Informações Geográficas

UTGCA - Unidade de Tratamento de Gás de Caraguatatuba

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
1.1. Objetivo geral	15
1.2. Objetivos específicos.....	15
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1. Deslizamentos.....	16
2.2. Urbanização e Deslizamentos em Caraguatatuba	18
2.3. Estrutura Geológica, Relevo e Solos.....	20
2.4. Cartografia e as novas tecnologias	24
2.4.1. O uso do NDVI no Mapeamento de Riscos de Deslizamentos	25
3. MATERIAL E MÉTODOS	29
3.1. Local (área) de Estudo	29
3.2. Características Climáticas	30
3.3. Solos e Topografia.....	31
3.4. Identificação das Áreas de Risco.....	33
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	38
5. CONCLUSÃO	47
REFERÊNCIAS	48

1. INTRODUÇÃO

A intensificação do crescimento urbano sem o adequado planejamento ocorrido no Brasil nas últimas décadas, gerou uma subestrutura carente de recursos básicos, sendo insuficiente para melhorar a qualidade de vida de uma parcela significativa da sociedade.

As regiões litorâneas são locais de alta densidade demográfica e ainda deve se preparar para absorver aqueles que, residentes no interior, que procuram atividades de turismo e lazer nas praias. De acordo com o relatório do IPCC(2007) essas zonas costeiras são consideradas as áreas de maior risco no mundo e as mais afetadas pelas mudanças ambientais globais.

As áreas de ocupação humana próximas a encostas côncavas, com pouca ou sem vegetação são as áreas mais propensas a sofrer com os deslizamentos e com grande probabilidade de danos e perdas diversificadas, pois a rocha encontra-se muito próxima a superfície, não permitindo a ação aderente do solo.

Os riscos e desastres que têm aumentado e tornando-se cada vez mais presentes nas cidades, apontam para dificuldades inerentes ao processo de desenvolvimento ligado à urbanização. O crescimento e a expansão urbana trazem, em seu próprio processo constitutivo, riscos e perigos que se expressam pela falta de ajuste e aderência da produção do espaço urbano aos sistemas naturais, desde o sítio até ritmos regionais de chuvas, ventos e biodiversidade (MARANDOLA JÚNIOR *et al.*, 2012).

Os deslizamentos e escorregamentos de terras estão intimamente ligados a modificações bruscas da paisagem como formação do relevo, do solo, condições de umidade e calor, ação humana remoção da cobertura vegetal e as diferentes formas de uso da terra, gerando o enfraquecimento do solo e resultando no transporte de sedimentos e detritos.

O principal evento de deslizamento de terras registrado pelo município de Caraguatatuba - SP, no ano de 1967, apresentou diferentes consequências como a erosão do solo, queda de barreiras, destruição da rodovia Tamoios no trecho de serra, assoreamento e alargamento do rio Santo Antônio, grandes perdas materiais além de ceifar a vida de muitos moradores.

Dentre as variáveis determinantes dos riscos de deslizamentos, podem-se destacar a declividade (FERNANDES et al., 2001) e a ocupação do solo (FERNANDES et al., 1999), o que abre a possibilidade de utilizar o sensoriamento remoto com o auxílio de Sistemas de Informações Geográficas (SIG's) (BISPO et. al., 2011), como ferramenta de identificação dessas áreas em grandes escalas espaciais.

A declividade pode ser facilmente mapeada utilizando os modelos digitais do terreno (MDT's) a partir da geração de grades de declividade (CÂMARA E MEDEIROS, 1998), enquanto as degradações da vegetação nativa das encostas podem ser avaliadas com o uso dos índices de vegetação, utilizando as bandas espectrais do vermelho e do infravermelho (JENSEN, 2009).

Assim, considerando que a combinação da declividade e cobertura do solo das encostas estão fortemente relacionados ao risco de deslizamentos, o uso de imagens do NDVI (Índice de Vegetação por Diferença Normalizada) integradas com mapas de declividade, em geoprocessamento, pode ser uma ferramenta promissora na identificação de áreas de risco.

OBJETIVO GERAL

1.1. Objetivo geral

O objetivo deste trabalho foi avaliar o uso de mapas de declividade e imagens NDVI na identificação de áreas de riscos de deslizamentos no município de Caraguatatuba, Litoral Norte do Estado de São Paulo.

1.2. Objetivos específicos

Para atingir o objetivo geral foi necessário atingir os seguintes objetivos específicos:

- Produzir a imagem NDVI do município de Caraguatatuba;
- Produzir o mapa de declividade do município de Caraguatatuba;
- Obtenção de um mapa que integra as imagens de NDVI e de declividade;
- Realizar a correlação cruzada entre o mapa integrado NDV-Declividade com o mapa das áreas de risco de deslizamento produzido pelo IPT (Instituto de Pesquisas Tecnológicas).

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Deslizamentos

O termo popularmente conhecido por deslizamento ou escorregamento de terra, representa uma das denominações mais utilizadas para movimentos gravitacionais de massa de dimensões significativas e que anualmente provocam impactos sobre a infraestrutura de diversos municípios brasileiros.

Eventos deste porte fazem parte de um tipo de fenômeno natural denominado movimentos gravitacionais de massa. Tais movimentos caracterizam-se pela dissipação de significativa quantidade de energia, por vezes em curto espaço de tempo, e pelo deslocamento de grandes massas de materiais terrestres, como rochas, solo, podendo também envolver materiais não-terrígenos como troncos de árvores e elementos de construções humanas, sob a ação da gravidade, (SILVA, 2013).

Para Tominaga (2011) os escorregamentos ou deslizamentos, são processos de movimentos de massa envolvendo materiais que recobrem as superfícies das vertentes ou encostas, tais como solos, rochas e vegetação. Estes processos estão presentes nas regiões montanhosas e serranas em várias partes do mundo, principalmente naquelas onde predominam climas úmidos.

Deslizamentos são episódios de extrema importância, resultantes da atuação de processos geomorfológicos nas mais diversas escalas temporais causando, em geral, enormes prejuízos à sociedade. Dentre os diversos fatores condicionantes destacam-se os parâmetros morfológicos do terreno, os quais controlam diretamente o equilíbrio das forças e, indiretamente, a dinâmica hidrológica dos solos (FERNANDES et al., 2001).

Quando fenômenos naturais ocorrem no meio urbano, acabam recebendo o maior foco, visto que, muitas vezes, não estão associados somente a perdas materiais, mas a perdas humanas. No caso de deslizamentos, por exemplo, a maioria das ocorrências está associada ao uso de maneira inadequada e desordenada do solo urbano (COELHO, 2012).

Para o Departamento de Desenvolvimento Regional e Meio Ambiente Secretaria Executiva de Organização Assuntos Econômicos e Sociais dos Estados Americanos (1991), os deslizamentos de terra ocorrem quando a força da gravidade

puxa as rochas, detritos ou solo por um declive, assim os deslizamentos só ocorrerão quando a tensão produzida pela força da gravidade supera a resistência do material. Tais processos ainda podem ser divididos em dois grupos, permanentes, onde as características da paisagem se mantiveram inalteradas ou pouco variaram sobre uma perspectiva humana, os processos geológicos de decomposição são mais lentos, e variáveis, mudança rápida da paisagem provocados por intempéries naturais, terremotos, ou abalos sísmicos, aumento da umidade dos solos devido à precipitação intensa.

O termo genérico escorregamentos ou deslizamentos engloba uma variedade de tipos de movimentos de massa de solos, rochas ou detritos, gerados pela ação da gravidade, em terrenos inclinados, tendo como fator deflagrador principal a infiltração de água, principalmente das chuvas, (BUSTAMANTE, 2010).

Para o Ministério das Cidades (BRASIL, 2006) os “deslizamentos” – mais comumente denominados pelos técnicos de “escorregamentos” – são processos que podem ocorrer tanto em áreas de grandes dimensões (encostas), quanto em áreas restritas (taludes naturais ou artificiais). Há vários tipos de processos que recebem a denominação de escorregamentos, dentre eles destacando-se: escorregamento de solo, escorregamento de rocha, queda de blocos e rolamento de matacões.

A compreensão que o Plano Nacional de Defesa Civil (BRASIL, 2000) tem a respeito de dois itens de extrema importância nos deslizamentos de terras referem-se:

- Vulnerabilidade: Condição intrínseca ao corpo ou sistema receptor que, em interação com a magnitude do evento ou acidente, caracteriza os efeitos adversos, medidos em termos de intensidade dos danos prováveis.

- Risco: Medida de danos ou prejuízos potenciais, expressa em termos de probabilidade estatística de ocorrência e de intensidade ou grandeza das consequências previsíveis.

A tabela a seguir demonstra a relação dos fatores naturais e antrópicos que favorecem a presença de ocorrência de escorregamentos e erosão.

Tabela 1: Condicionantes para a ocorrência de escorregamentos.

Condicionantes naturais	Condicionantes antrópicos
Características dos solos e rochas	Adensamento da ocupação
Relevo (inclinação, forma e amplitude da encosta)	Cortes e aterros
Vegetação	Desmatamento / cultivo inadequado
Clima	Lançamento de lixo e entulho
Nível d'água	Vazamento de tubulação/lançamento de águas servidas na superfície/fossas sanitárias

Fonte: Ministério das Cidades (BRASIL, 2006)

2.2. Urbanização e Deslizamentos em Caraguatatuba

A concentração financeira gerou a apropriação dos melhores solos, paralelamente a isto levou alguns grupos a ocupar regiões com condições geográficas que apresentam fragilidades e requerem monitoramento e acompanhamento sistemático de áreas sujeitas a inundações e deslizamentos de terras.

Para Almeida (2012) a rápida urbanização da população brasileira, a partir da segunda metade do século XX, gerou uma desordenada expansão das cidades, sobretudo daquelas que compõem as regiões metropolitanas, representadas na maioria dos casos pelas capitais dos estados. As políticas incentivadoras da metropolização superpuseram infraestruturas urbanas sítios nem sempre adequados, com a ocupação de áreas susceptíveis às intensas precipitações que ocorrem em todo o país.

O processo de urbanização tem sido apontado, genericamente, como o grande responsável pelo desencadeamento de inúmeros problemas ambientais, particularmente nos setores costeiros caracterizados por condições naturais mais frágeis, como no caso do estado de São Paulo, onde a zona costeira concentra os últimos remanescentes da vegetação nativa do Estado e onde se encontram as escarpas da Serra do Mar, de alta sensibilidade erosiva e suscetibilidade a deslizamentos (SCIFONI, 2005).

O conflito entre urbanização, desenvolvimento e ambiente se manifesta no aumento de riscos, seja pela ocupação de áreas frágeis biofísicamente, o que produz áreas de risco no tecido urbano, seja na produção de vulnerabilidades a

camadas cada vez mais significativas da população(MARANDOLA JÚNIOR et al.,2012).

O crescimento e a expansão urbana tem sido algo muito presente nos últimos anos em Caraguatatuba principalmente com a chegada de alguns empreendimentos que tem atraído pessoas para o município, como as obras de duplicação da rodovia SP-99 (Tamoios) e contornos/alças de acesso a Ubatuba e São Sebastião, além da construção da Unidade de Tratamento de Gás de Caraguatatuba (UTGCA) base Petrobrás, as quais mudaram a caracterização do município.

Tais investimentos de acordo com Marandola Júnio et al. (2012) promoveram o aumento do ritmo de crescimento populacional na região, sem que as mudanças de infraestrutura ocorram no mesmo ritmo que a necessidade impõe. Essa nova realidade se soma aos já insuficientes serviços urbanos prestados no litoral.

Caraguatatuba atualmente possui uma extensa área de seu território destinada à expansão urbana, sendo que a maior parte dela localiza-se na planície entre a região central e sul do município. A urbanização desenfreada tem gerado uma malha urbana desarticulada e fragmentada, deixando o município enfrentar sérias implicações e consequências sobre a vegetação, tornando a área suscetível a novos deslizamentos e eventos trágicos como foi em 1967, quando o excesso de chuvas provocou danos consideráveis e ceifou vítimas por todo município, onde em um só dia as escarpas da Serra do Mar receberam 420mm de chuva, provocando deslizamentos de grandes proporções, com perdas humanas e naturais(SÃO PAULO, 2005).

O verão de 1967 apresentou chuvas abundantes promovendo o encharcamento dos solos e o transporte de sedimentos das áreas escarpadas para os leitos dos rios. A saturação dos solos e dos dispersores de água se dá entre os dias 17 e 18 de março quando, a ação de extensos e intensos processos de movimentos de massa causaram um grande impacto ambiental, em uma frente marítima de mais ou menos 40km de escarpas costeiras, mais concentrados em uma área de aproximadamente 180 km² em toda a cidade de Caraguatatuba (CRUZ, 1974), (FULFARO et al.,1976; AB'SABER, 1985 apud CRUZ, 1990).

A autora ainda ressalta que a maior concentração de escorregamentos durante a catástrofe de 1967 foi encontrado nas escarpas, vertentes de declividade

superior a 20-22°, com segmentos retilíneos de mais de 60m, caracterizados por amplitudes topográficas de, no mínimo, 40-60m.

Este evento, de 1967, é considerado até o hoje o maior desastre ambiental de Caraguatatuba, pois ocorreram diferentes tipos de escorregamentos e de grande intensidade. Sobre estes deslizamentos Silva (2013) enfatiza que, mobilizaram grandes quantidades de materiais das vertentes da serra de Caraguatatuba, ao passo que seus produtos foram depositados nos pés das vertentes e nas planícies subjacentes.

2.3.Estrutura Geológica, Relevo e Solos

O Litoral Norte de São Paulo apresenta diferentes formas e estruturas geológicas e tais formas ao longo do tempo nortearam a ocupação do solo e a expansão urbana. A variação da formação geocológica das escarpas Serras do Mar permite uma diferença da decomposição bioquímica, onde chuvas de igual intensidade ou proporções provocam consequências diferentes, e não é raro os setores que recebem mais precipitações conseguirem resistir à desestabilidade de suas vertentes (AB' SABER, 2004).

A região encontra-se inserida numa área marcada pela presença do Planalto Atlântico, caracterizado por um conjunto de escarpas que marcam a borda oriental dos terrenos pré-cambrianos desse planalto, (CRUZ, 1990). Assim, os tipos de rochas e suas características estruturais são importantes na compreensão dos processos erosivos e deslizamentos de terras, pois em função da presença ou ausência de minerais resistentes como o quartzo, determina-se o comportamento mecânico e mineralógico do regolito (LOPES, 1995, apud MARCELINO, 2004).

No município de Caraguatatuba ocorre o predomínio de estruturas granitóides em áreas de dobramentos antigos, escarpa erosiva, seu aplainamento dá origem as planícies onde se destacam os elementos estruturantes do embasamento pré-cambriano, destacando o caráter ígneo e metamórfico de sua composição (MARCELINO, 2004).

Os diferentes tipos de rochas são de suma importância no processo de erosão do solo, Bertoni e Lombardi Neto (1985) apud Lima (1990) enfatizam que as características do subsolo contribuem para a capacidade de armazenamento da

água no solo, ou seja, sob um solo arenoso um subsolo de textura média absorverá mais água do que o mesmo solo com um subsolo menos permeável. Isto proporcionará maiores taxas de escoamento de erosão em áreas onde o subsolo seja mais compacto.

A composição da estrutura geológica do município de Caraguatatuba apresenta o predomínio de rochas cristalinas, as quais sofrem o desgaste e a derruição de regolitos ou outros materiais originando as bacias sedimentares, conforme representado na Figura 1.

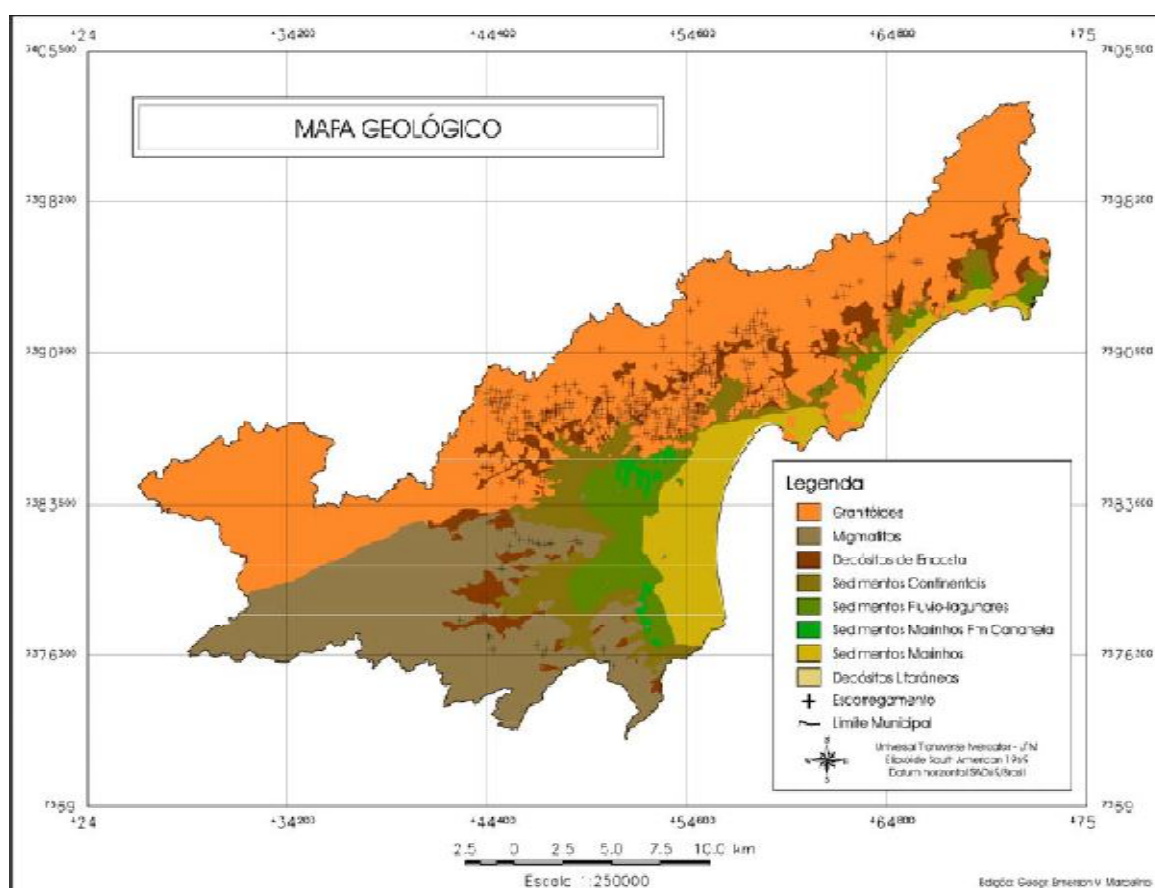


Figura 1. Estrutura Geológica de Caraguatatuba.
Fonte: INPE(2004).

A estrutura geológica do município apresenta amontante, altas vertentes escarpadasque oferecem segmentos retilíneos longos e declivosos, com

afloramentos rochosos e grandes amplitudes topográficas, criadas pelo entalhamento da drenagem fluvial (CRUZ, 1990).

O estudo das formas de relevo que influenciam o escoamento da água em diferentes trajetórias sobre o terreno é fundamental para o entendimento e quantificação da erosão e da variabilidade das principais propriedades dos solos, (SOUZA et al., 2003).

No Brasil, as formas atuais do relevo e seus variados padrões se deram devido às imposições estruturais e tectônicas e as variações climáticas causando os processos de intemperismo, do período Cenozóico. A grande variedade de estruturas geológicas de diferentes litologias e idades, junto aos tipos climáticos do presente e do passado gerou grande diversidade de formas de relevo e que, portanto, oferecem desafio para sua classificação (AB' SABER, 2004).

No município de Caraguatatuba o relevo é um dos elementos fundamentais na dinâmica natural, pois interfere de forma direta na distribuição geográfica da sociedade. Em Caraguatatuba, a urbanização já começou a avançar sobre as encostas mais íngremes das montanhas, o que é um fator preocupante (PÓLIS INSTITUTO, 2013).

Para Silva (2000), as escarpas costeiras apresentam áreas predominantemente de desgastes, com intenso movimento geomorfológico e elevada influência estrutural. Os declives mais íngremes, com índice superior a 40%, são predominantes nos altos das escarpas. Já as encostas mais suaves se apresentam nos baixos níveis, nos patamares intermediários e nas rampas de desgaste. Nessa área, a drenagem tem escoamento violento, formando corredeiras, lajeados e cachoeiras. Nos pontos mais elevados o escoamento é temporário, pois depende da intensidade das chuvas e da necessidade da alimentação do lençol aquífero.

A litologia é o fator controlador do tipo de solo e apresenta diferentes comportamentos quanto à resistência ao cisalhamento e permeabilidade (granulometria, teor de argila, óxidos de ferro, etc.). Frente aos fenômenos de instabilidade, cada litologia comporta-se de forma diferente. O contato entre os derrames ácidos e básicos representa uma quebra de relevo na região e, muitas vezes, encontra-se encoberto por colúvios ou pelo próprio corpo estradal, representando áreas de maior instabilidade (VANACÔR e ROLIM, 2012).

O relevo e a topografia são imprescindíveis para a compreensão dos

movimentos de massa, pois na região a altimetria sofre uma grande variação em poucos quilômetros sentido planície-escarpa, por ser inclinado esse relevo dificulta a acomodação de solo e vegetação o que consequentemente corrobora à elevada instabilidade.

O solo é entendido na visão de Espíndola (2010) como um corpo natural em evolução na paisagem repousando sobre determinada superfície nunca relativamente homogênea, situada em determinada posição do relevo estando sujeito à ação dos agentes exógenos, naturais e sociais, os quais atuaram e atuam expondo e camuflando formas de solo e relevo, o que demonstra toda a dinâmica existente na estrutura morfológica do solo bem como seus agentes modificadores.

Para a EMBRAPA (2006) o solo é uma coleção de corpos naturais, constituídos por partes sólidas, líquidas e gasosas, tridimensionais, dinâmicos, formados por materiais minerais e orgânicos que ocupam a maior parte do manto superficial das extensões continentais do nosso planeta, contém matéria viva e podem ser vegetados na natureza onde ocorrem, eventualmente, terem sido modificados por interferências antrópicas.

Cambissolos compreendem solos constituídos por material mineral, com horizonte B incipiente subjacente a qualquer tipo de horizonte superficial, desde que em qualquer dos casos não satisfaçam os requisitos estabelecidos para serem enquadrados nas classes Vertissolos, Chernossolos, Plintossolos, Organossolos. Enquanto os Latossolos compreendem solos constituídos por material mineral, com horizonte B latossólico imediatamente abaixo de qualquer um dos tipos de horizonte diagnóstico superficial, exceto hístico (EMBRAPA, 2006).

O tipo de solo, por meio de suas propriedades físicas (estrutura, textura, permeabilidade e densidade), bem como suas características químicas e biológicas é um fator condicionante da erosão (BERTONI e LOMBARDI NETO, 1985, apud LIMA, 1990).

Solos relativamente arenosos, devido à textura grosseira favorecem a infiltração em detrimento do deflúvio, mostrando um padrão pouco denso. Solos relativamente argilosos oferecem maior resistência à infiltração, favorecendo o deflúvio e criando um padrão de drenagem mais denso (MOURA et al., 2013).

A ação erosiva da água nos solos é extremamente presente, pois esta promove o encharcamento e a saturação dos solos, tornando-os sensíveis a movimentos de massa. A vegetação, de maneira geral, protege o solo de fatores que

condicionam os deslizamentos, como a compactação do solo pelo impacto de gotas de chuva e consequentemente aumento de escoamento superficial, pois a cobertura vegetal intercepta as águas pluviais reduzindo a energia cinética e favorecendo a infiltração, além de certos tipos de sistemas radiculares conterem a erosividade por manterem a agregação do solo (SESTINI, 2000).

2.4. Cartografia e as novas tecnologias

A cartografia sempre esteve presente na vida das pessoas por mais simples que tenha sido seus primeiros métodos de utilização pelas civilizações antigas, atualmente tem se propagado pelas diferentes áreas de estudo por meio dos diversos recursos tecnológicos.

No Brasil, a cartografia geotécnica como instrumento de apoio ao planejamento do uso do solo ganhou grande impulso no final dos anos 80, com uma crescente demanda por novas cartas. As cartas geotécnicas podem receber diferentes denominações de acordo com a metodologia empregada e os objetivos pretendidos (CERRI et al., 1995).

O autor ainda afirma que o desenvolvimento da informática e a facilidade de obtenção de equipamentos e de *software* têm favorecido a utilização dessa ferramenta cartográfica geotécnica, inclusive na elaboração de cartas de risco geológico.

Coelho (2012) enfatiza que os anos 80 do século passado conduziram ao estabelecimento da teledetecção como consequência lógica da evolução da fotointerpretação, assim como o desenvolvimento de técnicas de tratamento computadorizado de imagens digitais e o desenvolvimento da visão por computador.

Sobre as novas tecnologias disponíveis Virísimo et al. (2014) enfatizam que o uso da computação como ferramenta de apoio à gestão de riscos tem se intensificado nas últimas décadas. Riscos de desastres naturais são, por natureza, difíceis de medir, avaliar e monitorar, uma vez que dependem da organização, modelagem, aquisição e cruzamento de diversos dados e parâmetros. Para os

autores o sensoriamento remoto ambiental somado a sistemas de informação geográfica tem produzido diversas ferramentas de monitoramento ambiental.

As fotografias aéreas podem muito auxiliar no monitoramento das áreas passíveis de deslizamentos de terra, assim a escala da imagem utilizada, grande ou pequena, dependerá do tamanho da área em questão. Para Moura (2013) o sensoriamento remoto e os Sistemas de Informações Geográficas – SIG's vem, ao longo dos anos, sendo cada vez mais utilizados para estudos e levantamentos dos recursos naturais em função das vantagens que oferecem. Frente à necessidade crescente destas informações, essas novas tecnologias de imageamento foram colocadas à disposição dos usuários, possibilitando melhoria considerável nos resultados obtidos e proporcionando a redução de custos e a realização de trabalhos com maior agilidade.

Os SIG's permitem realizar análises complexas, ao integrar dados de diversas fontes e ao criar bancos de dados georreferenciados. Tornando-se ainda possível automatizar a produção de documentos cartográficos, sendo de importância para diferentes áreas como a própria cartografia, análise de recursos naturais, transportes, comunicações, energia e planejamento urbano e regional (CÂMARA e DAVIS, 2000, apud SILVA, 2013).

O desenvolvimento dos diferentes tipos de equipamentos ligados à cartografia geotécnica permitiu a elaboração das cartas temáticas, as quais tendem a fortalecer as medidas preventivas de movimentos de massa e/ou desastres ambientais, além de gerar o aperfeiçoamento de dados com maior precisão, possibilita ainda a mitigação dos impactos provenientes de deslizamentos.

2.4.1. O uso do NDVI no Mapeamento de Riscos de Deslizamentos

Os deslizamentos de terra são um dos principais riscos naturais causando sérios danos aos edifícios e a infraestrutura, bem como a perda de vidas em muitas regiões montanhosas em todo o mundo. Neste contexto, o uso de satélite RapidEye multitemporal abre a oportunidade para o desenvolvimento de métodos eficientes para mapeamento temporal sistemático de deslizamentos de terra em grandes áreas (BEHLING et al., 2014).

Atualmente muitas pesquisas estão voltadas para métodos de determinação da biomassa que sejam precisos como os convencionais, mas que também não agredam o meio ambiente e sejam de baixo custo. Dessa forma, o uso de algumas técnicas aliadas ao sensoriamento remoto vem se tornando uma alternativa importante para obtenção de estimativas precisas e confiáveis da atividade fotossintética em larga escala (BRANDÃO et al., 2007).

O uso dos mapas temáticos é de grande valia para se analisar e compreender os deslizamentos, conforme afirma o Departamento de Desenvolvimento Regional e Meio Ambiente Secretaria Executiva de Organização Assuntos Económicos e Sociais dos Estados Americanos (1991) sobre os mapas de perigo, o qual identifica as áreas de diferentes potenciais de deslizamentos mesmo sendo este relativo, por representar expectativas futuras de ocorrência com base nas condições particulares das áreas. Assim, a necessidade dessa informação do risco de deslizamento de terra pode variar de acordo com o uso desta, destacando que as medidas a serem adotadas visam evitar, prevenir ou mitigar os riscos de deslizamentos. A definição das “áreas alvo”, indica onde os estudos devem se concentrar, pois quanto maior o risco, mais ele pode moldar o potencial de desenvolvimento.

Segundo Sestini (2004), o sensoriamento remoto orbital pode ser utilizado para estudos de movimentos de massa tanto na detecção direta das consequências destes processos, cicatrizes devido à remoção da cobertura vegetal e exposição de camadas subsuperficiais do solo e deposição de material transportado formando leques de detritos, como na identificação de indicadores.

O uso dos SIG's tem introduzido novos métodos para o levantamento e mapeamento de solos por meio de modelagens, a partir da utilização de mapas temáticos básicos e MNT ou MDE, que possibilitam, principalmente, a compreensão das relações entre paisagem e os tipos de solos, (MOURA, 2013).

Ainda de acordo com Marcelino (2004), novos mapeamentos de áreas suscetíveis a escorregamentos são fundamentais, tanto nas áreas de densa ocupação como naquelas de expansão urbana, procurando orientações nas formas de uso e ocupação da terra. O sensoriamento remoto e o SIG buscam reduzir a subjetividade e aumentar cada vez mais a objetividade e o índice de confiabilidade destes mapas.

Ainda sobre tais recursos, Vanacôr e Rolim (2012) afirmam que pode ser de grande importância, pois compreende desde a geração e análise dos dados, até a obtenção dos resultados, facilitando e agilizando o processo de elaboração dos mapas temáticos e mapas de suscetibilidade, pois a sobreposição de diversos mapas gerados a partir de bases em diferentes escalas se torna fácil.

O zoneamento e o mapeamento com imagens de satélite permitem analisar a presença de cobertura vegetal bem como a degradação do solo em seus diferentes estágios mantendo analogias as áreas suscetíveis à ocorrência de risco de deslizamentos, obtendo índice de vegetação por diferença normalizada baixo.

A presença da cobertura vegetal torna-se imprescindível para o fortalecimento do solo a ocorrência do cisalhamento, conforme afirmam Vanacôr e Rolim (2012), áreas sem cobertura vegetal são mais propícias a deslizamentos, pois com cobertura vegetal tende a reduzir a infiltração de água meteórica reduzindo o incremento da pressão neutra no solo, prevenindo a erosão devido à ação das raízes das árvores, aumentando a resistência do solo.

O mapeamento e a identificação de prováveis áreas de deslizamento com as técnicas aqui citadas são possíveis por meio do projeto de Lei Federal Nº 12.187, de 29 de dezembro de 2009 que instituiu a Política Nacional sobre Mudança do Clima – PNMC, enquanto no estado de São Paulo a Lei Nº 13.798, de 09 de novembro 2009 instituiu a Política Estadual de Mudanças Climáticas – PEMC, ambos os projetos ligados às mudanças climáticas possibilitaram a identificação das áreas vulneráveis e consequentemente a adoção de diretrizes norteadoras.

Estudos têm demonstrado a utilidade do uso de índices ópticos, obtidos por meio de ferramentas de sensoriamento remoto, na avaliação das características biofísicas da vegetação (BRANDÃO et al., 2005 apud BRITO NETO et al., 2008), no caso do NDVI permite analisar as diferenças entre a vegetação existente na superfície, sua distribuição e degradação espacial ao longo do tempo, por meio da reflectância, variando entre os valores de -1 a 1, sendo que mais próximo a -1, menor será a cobertura vegetal, e mais próximo a 1, a cobertura vegetal será maior.

Os índices de vegetação são modelos numéricos que envolvem razões ou combinações (lineares ou não) das respostas espectrais nas porções do vermelho e infravermelho próximo do espectro eletromagnético, estes os mais simples e utilizados, visam inferir a densidade de vegetação (LIMA, 1990).

Áreas que possuem coberturas vegetais florestais apresentam NDVI positivos e normalmente acima de 0,5, enquanto coberturas vegetais ralas e/ou esparsas apresentarão índices próximos a zero ou mesmo negativo, dependendo de suas características.

Para a produção dos mapas de risco o Departamento de Desenvolvimento Regional e Meio Ambiente Secretaria Executiva de Organização Assuntos Económicos e Sociais dos Estados Americanos (1991) afirma que deve ser considerado, mapear os deslizamentos de terra existentes e preparar um mapa para combinar os fatores permanentes, como formações rochosas, declividade, e, quando disponível os fatores hidrológicos, (em unidades individuais de mapas) sobrepor o inventário deslizamento de terra no mapa fator combinado, preparar uma análise de fatores combinados de forma que definem os quatro níveis de risco de deslizamento, baixo, moderado, elevado e de perigo extremo, sendo a escala representada de forma ordinal e quantitativa, produzir um mapa com as quatro zonas de risco de deslizamento de terra.

Os mapas de risco representam os resultados da avaliação de risco, a qual se refere à estimativa da extensão dos prováveis danos decorrentes de um desastre natural (perigo). Os danos podem ser na forma de perdas de vidas ou ferimentos, danos aos recursos da terra e propriedades (TOMINAGA, 2011).

A autora ainda afirma que a avaliação de risco é de fundamental importância para o planejamento e desenvolvimento das estratégias de redução de desastres. Os procedimentos utilizados na avaliação de risco diferem conforme a natureza do fenômeno abordado. De modo geral, avaliação de risco envolve o uso sistemático de informações para determinar a probabilidade de que certos eventos ocorram e a dimensão de suas possíveis consequências.

Para Lima (2013) os mapas de suscetibilidade possuem características de indicar a potencialidade de ocorrência de movimentos de massa, torna-se, assim, imprescindível em medidas de planejamento. Uma área que dispõe de um mapa de suscetibilidade a deslizamentos pode ser explorada de acordo com esses graus, proporcionando uma maior segurança a população na medida em que se conhecem as encostas instáveis.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Local(área) de Estudo

O trabalho foi executado no município de Caraguatatuba (Figura 2), que compreende a região metropolitana juntamente com os municípios do vale do Paraíba e litoral norte, com franca expansão populacional. Localiza-se entre as latitudes $23^{\circ}27'05,22''$ e $23^{\circ}47'38,07''$ Sul e longitudes $45^{\circ}13'44,71''$ e $45^{\circ}47'22,45''$ de longitude Oeste, no Datum WGS84.

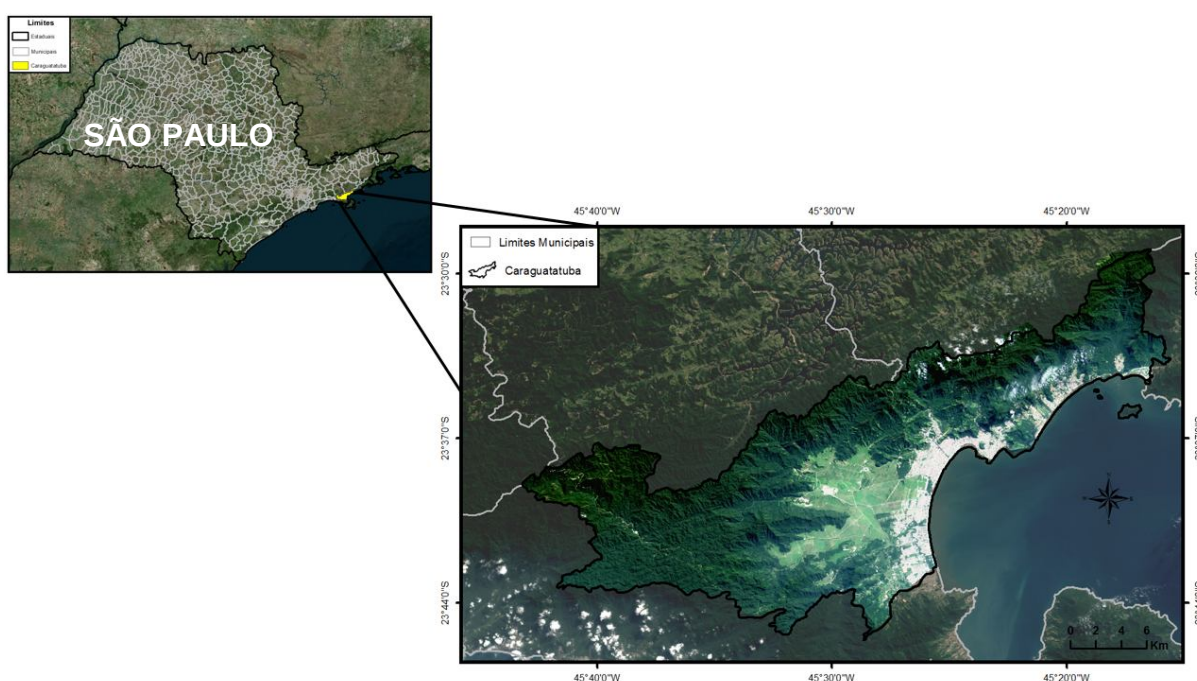


Figura 2: Localização dos limites municipais de Caraguatatuba.

O município possui uma área territorial que abrange 483,95 km² (IBGE, 2010), sendo a maior parte de seu território formado pelas escarpas da Serra do Mar, sua faixa litorânea destinada ao crescimento e expansão urbana é pequena compreendendo apenas o litoral e uma planície na região centro-sul. De acordo com o último Censo do IBGE (2010), a população fixa de Caraguatatuba é de 100.889 habitantes.

3.2. Características Climáticas

O clima da região apresenta elevados índices de pluviosidade distribuídos ao longo do ano sem apresentar períodos secos. Segundo a classificação climática de Köppen, o município apresenta clima do tipo Af (Clima Tropical com ausência de estação seca e chuvas o ano todo) com precipitações superiores a 60 mm nos períodos mais secos e precipitação média anual de 1760 mm (CEPAGRI, 2013 apud Santos e Galvani, 2014).

A precipitação intensa que acomete o Litoral Norte de São Paulo ocorre devido a latitude, a elevada umidade presente na região e principalmente ao relevo, onde a Serra do Mar atua como uma barreira impedindo a movimentação dos fluxos atmosféricos oriundos do Oceano Atlântico em direção ao interior, ocorrendo à saturação das massas de ar úmidas e consequentemente sua precipitação.

A distribuição da chuva no Estado de São Paulo é marcada por uma faixa de alta precipitação pluviométrica no litoral, que segue ordem própria e discrepante as demais áreas. Isto se deve ao relevo da região, com a presença da Serra do Mar se dispondo mais ou menos paralelamente à linha da costa, concordante as vertentes a barlavento, lado de onde sopra o vento, mais expostas aos ventos úmidos, que geram a queda de precipitação do tipo orográfico ou de relevo, (TAVARES, 2010).

As medidas de pluviosidade fornecem uma aproximação da intensidade de chuva. Com uma precipitação pluvial prolongada, a infiltração é contínua, o que satura o solo, reduzindo a coesão do material da vertente e a resistência desse material à erosão, devido a expansão de cisalhamento em rochas ou contato rocha-solo e de interstícios do solo, o que favorece os deslizamentos (SESTINI, 2000).

Os dados anuais referentes a variação da temperatura e dos índices pluviométricos do município encontram-se dispostos na Tabela 2.

O clima do município de Caraguatatuba é determinado pelas massas equatoriais e tropicais. A massa de ar tropical, representada pelo anticiclone semifixo do Atlântico Sul, possui temperaturas medianas a elevadas e forte umidade específica, devido à intensa evaporação marítima. Já a massa equatorial caracteriza-se por temperaturas elevadas, podendo ser seca, quando formada sobre o continente, e úmida quando formada sobre o Oceano Atlântico (CRUZ, 1974 apud FERREIRA, 2013).

Tabela 2: Índices Pluviométricos do Município.

Mês	Temperatura do ar (°C)			Chuvas (mm)
	Mínima	Máxima	Média	Média
Janeiro	21,8	34,2	28,0	251,6
Fevereiro	22,1	34,5	28,3	216,9
Março	21,3	33,9	27,3	217,5
Abril	18,5	31,7	25,1	139,1
Maio	15,8	29,3	22,5	100,4
Junho	14,3	27,9	21,1	64,3
Julho	13,5	28,2	20,9	62,5
Agosto	15,0	30,5	22,8	65,1
Setembro	17,0	30,8	23,9	117,3
Outubro	18,4	31,9	25,2	160,0
Novembro	19,6	33,2	26,4	160,3
Dezembro	21,1	33,3	27,2	202,9
Ano	18,2	31,6	24,9	1757,9
Mínima	13,5	27,9	20,9	62,5
Máxima	22,1	34,5	28,3	251,6

Fonte: CEPAGRI (2014)

3.3. Solos e Topografia

A instabilidade do solo provocada pelos fatores naturais é agravada pela sua exposição e principalmente pela ação do intemperismo físico, no caso a chuva onde a duração e sua intensidade de ocorrência são impactantes para os efeitos erosivos. Assim, encontra-se diferentes tipos de solo no município de Caraguatatuba (Figura 3 e Tabela 3).

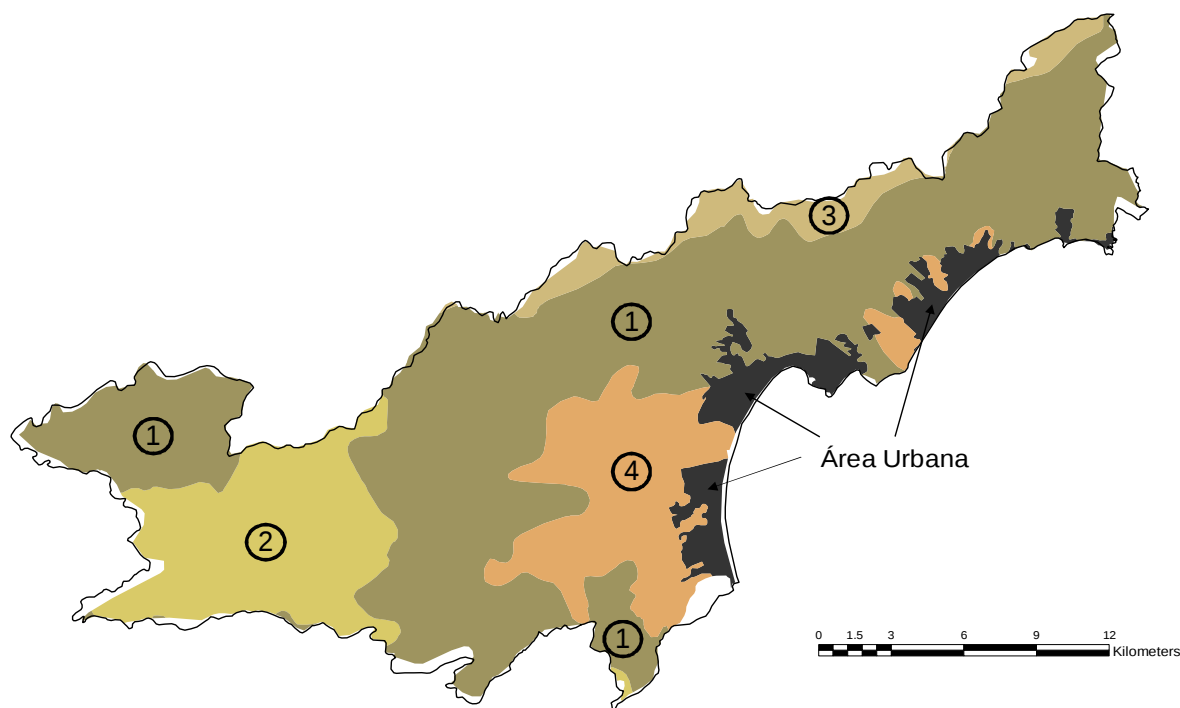


Figura 3: Tipos de solo de Caraguatatuba.

Tabela 3: Descrição dos tipos de solo de Caraguatatuba.

Número	Grupo	Descrição
1	CX11	CambissolosHáplicosdistróficos textura argilosa e média fase não rochosa e rochosa relevo montanhoso e escarpado + Latossolos Vermelhos-Amarelos distróficos textura argilosa relevo montanhoso e forte ondulado ambos A moderado e A proeminente.
2	CX10	CambissolosHáplicos distróficos A moderado e A proeminente relevo forte ondulado e montanhoso + Latossolos Vermelhos-Amarelos distróficos A moderado relevo forte ondulado ambos textura argilosa.
3	LVA19	Latossolos Vermelhos-Amarelos distróficos textura argilosa + CambissolosHáplicos distróficos textura argilosa e média fase não pedregosa e pedregosa ambos A moderado relevo forte ondulado e montanhoso.
4	ES1	EspodossolosFerrocárbicosórticos A proeminente e A moderado textura arenosa + NeossolosQuartzarênicosórticos distróficos A moderado ambos relevo plano.

O perfil hipsométrico encontrado no município apresenta características extremamente *sui generis*, pois encontra-se grandes regiões escarpadas e aplainamentos moderados receptores de sedimentos erodidos (Figura 4).

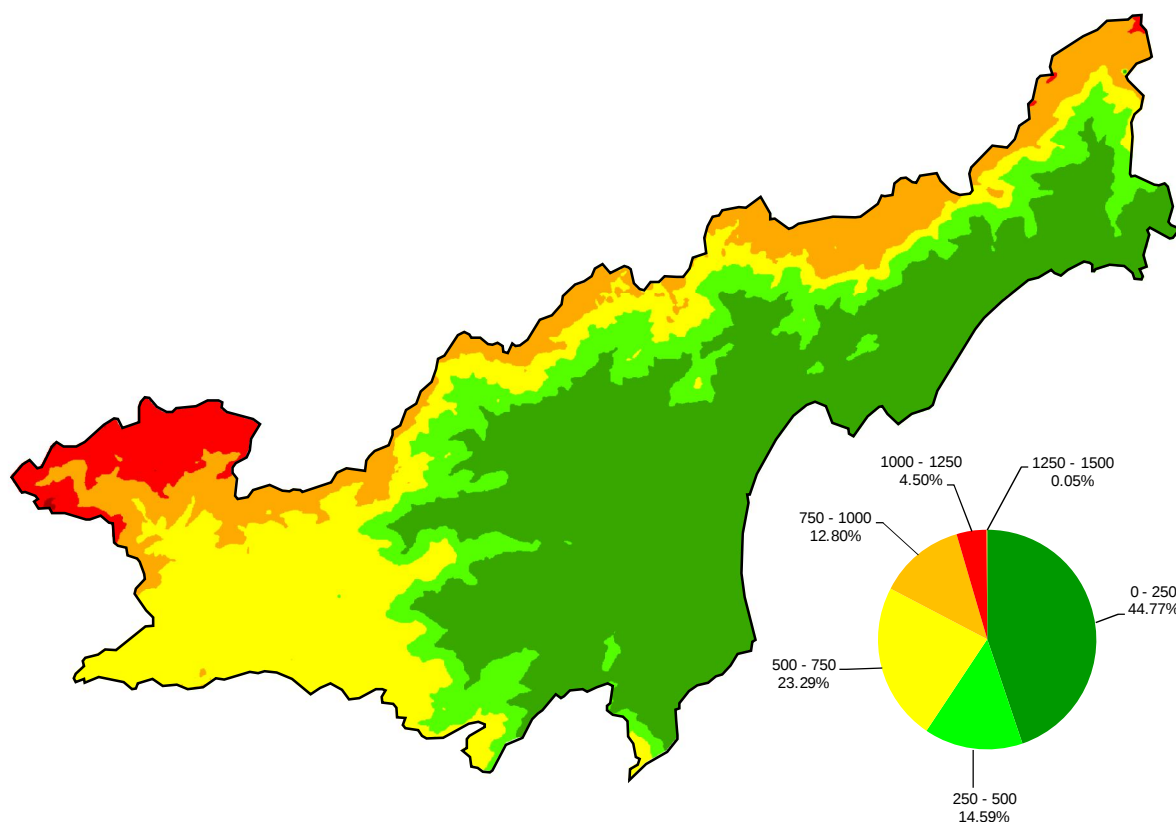


Figura 4: Mapa Hipsométrico de Caraguatatuba-SP.

Percebe-se o predomínio de áreas localizadas em até 250 metros de altitude onde se encontra a zona urbana, sendo esta área receptora de sedimentos provenientes das cotas demaiores altitudes.

3.4. Identificação das áreas de Risco

A avaliação da identificação de áreas de risco foi realizada por meio de correlação cruzada da imagem NDVI e do mapa de declividades com o mapa de risco de deslizamento elaborado pelo IPT (2010), mapa este que foi denominado de mapa de referência (Figura 5).

As variáveis utilizadas para identificação das áreas de risco podem ser ascaracterísticas físicas, tipo de solo, altura e inclinação do morro, ocupação da área, os tipos de moradias, existência de água, presença ou não de vegetação e ainda evidências de erosão (PMSP/IPT, 2011).



Figura 5: Detalhe das áreas de risco de deslizamento em “amarelo” mapeadas pelo IPT (2010).

A imagem NDVI foram obtidas das bandas do infravermelho (banda 5) e vermelho (banda 4) do satélite LANDSAT 8 (USGS, 2014), resolução espacial de 30 m, a partir da seguinte equação:

$$NDVI = \frac{\rho\lambda_{NIR} - \rho\lambda_R}{\rho\lambda_{NIR} + \rho\lambda_R}, \text{ sendo:}$$

NDVI - Índice de Vegetação por Diferença Normalizada;

$\rho\lambda_{NIR}$ - reflectância no topo da atmosfera do infravermelho corrigida com o ângulo solar;

$\rho\lambda_R$ - reflectância no topo da atmosfera do vermelho corrigida com o ângulo de elevação solar.

A correção da reflectância no topo da atmosfera com o ângulo de elevação solar foi realizada com a seguinte equação:

$$\rho\lambda = \frac{\rho\lambda'}{\sin(\theta_{SE})}, \text{ sendo:}$$

$\rho\lambda$ - reflectância no topo da atmosfera corrigida com o ângulo de elevação solar;

$\rho\lambda'$ - reflectância no topo da atmosfera sem a correção com o ângulo de elevação solar;

θ_{SE} - ângulo de elevação solar.

O cálculo da reflectância no topo da atmosfera sem a correção com o ângulo de elevação solar foi realizado a partir da seguinte equação:

$$\rho\lambda' = Mp \cdot Qcal + Ap, \text{ sendo:}$$

$\rho\lambda'$ - reflectância no topo da atmosfera sem a correção com o ângulo solar;

Mp - fator de correção multiplicativo específico da banda;

$Qcal$ - número digital do pixel quantizado e calibrado;

Ap - fator de correção aditivo específico da banda.

Na Tabela 4 estão apresentados os valores de Mp , Ap e θ_{SE} , de cada cena utilizada, bem como a data de passagens do satélite.

Tabela 4. Data de passagem e valores de Mp , Ap e θ_{SE} , da cena LC82180762014128LGN00 do satélite LANDSAT 8.

Data	Banda	Mp	Ap	θ_{SE}
08/05/2014	B4 (0,64 - 0,67 μm) B5 (0,85 - 0,88 μm)	0,00002	-0,1	40,51820474°

Todos os cálculos para a geração da imagem NDVI foram realizados com o auxílio da ferramenta “Rastercalculator” do software ArcGIS 10 (Figura 6), somente para a área de abrangência do mapa de referência do IPT.

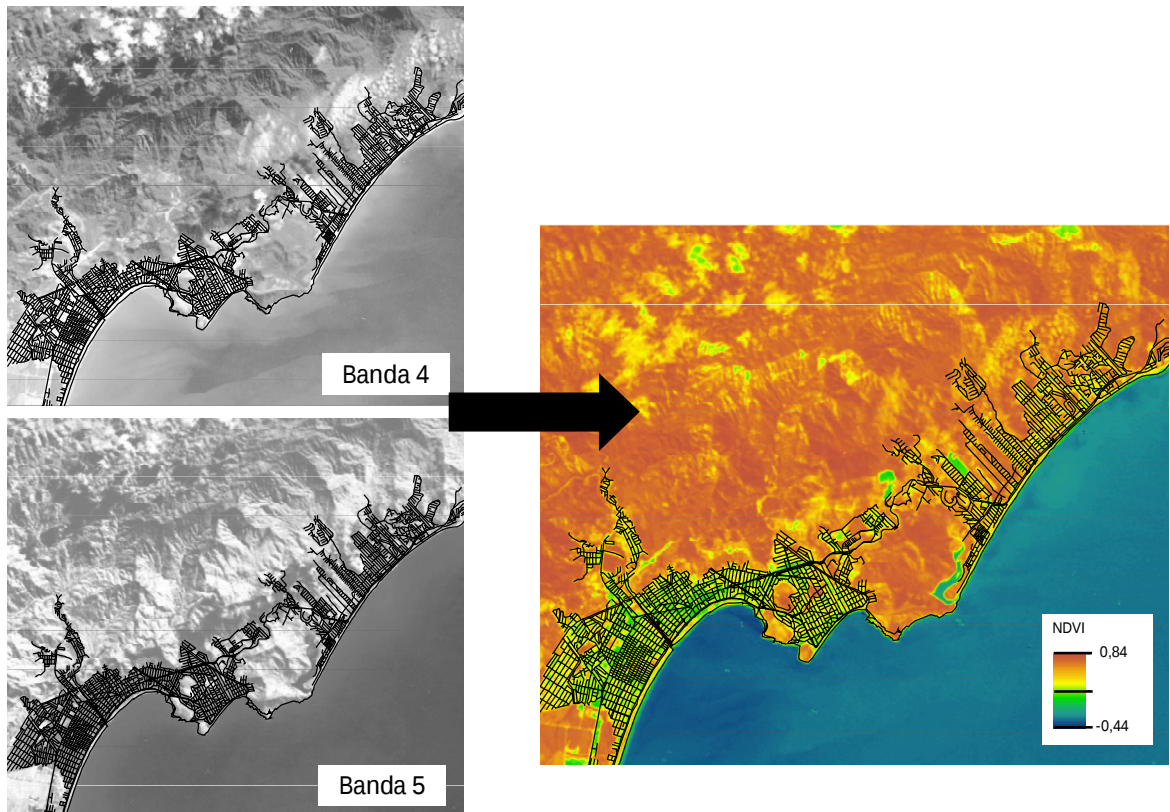


Figura 6: Detalhe da imagem NDVI da área do mapa de referência

A grade de declividades foi gerada a partir do MDT do satélite ASTER, com resolução espacial de 30 m (NASA, 2011). O MDT foi importado para o software ArcGIS 10, a partir do qual, a grade de declividade foi gerada com o auxílio da ferramenta “slope” (Figura7).

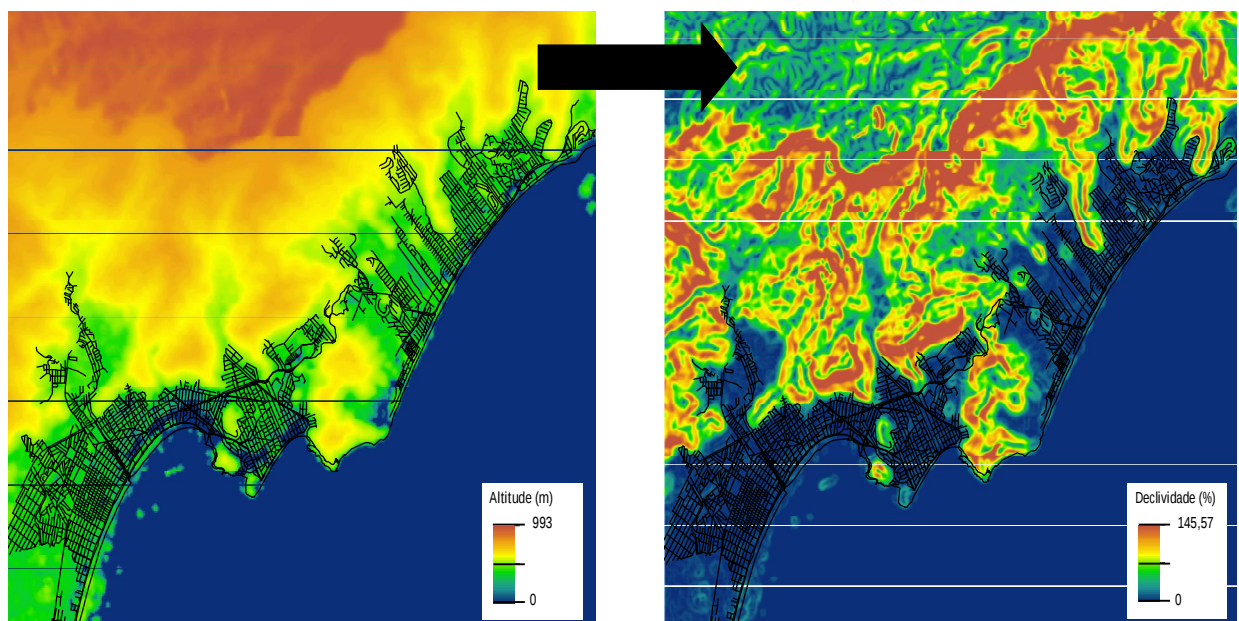


Figura 7: Detalhe da conversão do MDT para grade de declividades.

Após obtidas as imagens NDVI e de declividades, realizou-se o cruzamento destes com do mapa de referência, utilizando-se do software ArcGIS 10. Para a obtenção de possíveis padrões dessas variáveis nas áreas de risco de deslizamentos, inicialmente determinaram-se as médias acompanhadas do intervalo de confiança ao nível de 5% de significância estatística, para declividade e NDVI dentro das áreas no mapa de referência. Em seguida, foram estabelecidas classes de padrões de ocorrência de declividade e NDVI nas áreas de risco de deslizamento.

Com as classes definidas, obteve-se o mapa de risco de deslizamentos utilizando técnicas de álgebra de mapas, que permite o somatório de todas as classes em um único mapa. Posteriormente, realizou-se o cruzamento dos mapas de risco de deslizamentos obtidos pelas duas metodologias. A precisão do mapeamento obtido por geoprocessamento foi avaliada de acordo com o percentual de coincidência em áreas identificadas, determinada pela seguinte equação:

$$C = \left(\frac{AR_i}{AR_i'} \right) \cdot 100, \text{ sendo:}$$

C – coincidência em áreas identificadas (%);

AR_i – área de risco “i” do mapa de referência (ha);

AR_i' – área mapeada por geoprocessamento dentro da área de risco “i” (ha).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os valores médios de declividade e NDVI encontrados nas 20 áreas de risco de deslizamento do mapa de referência estão apresentados nas Figuras 8 e 9.

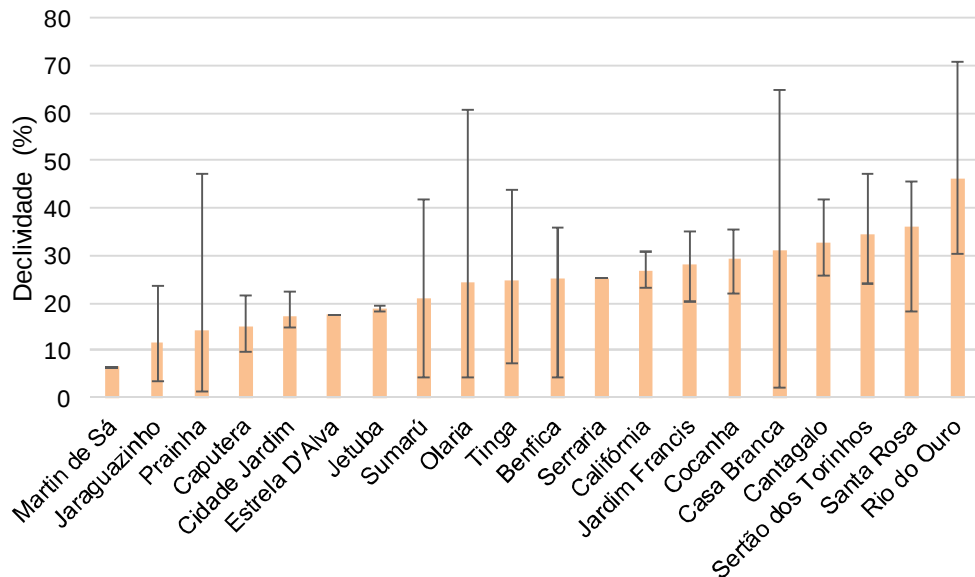


Figura 8: Declividades médias e os valores extremos máximos e mínimos observados em cada área de risco.

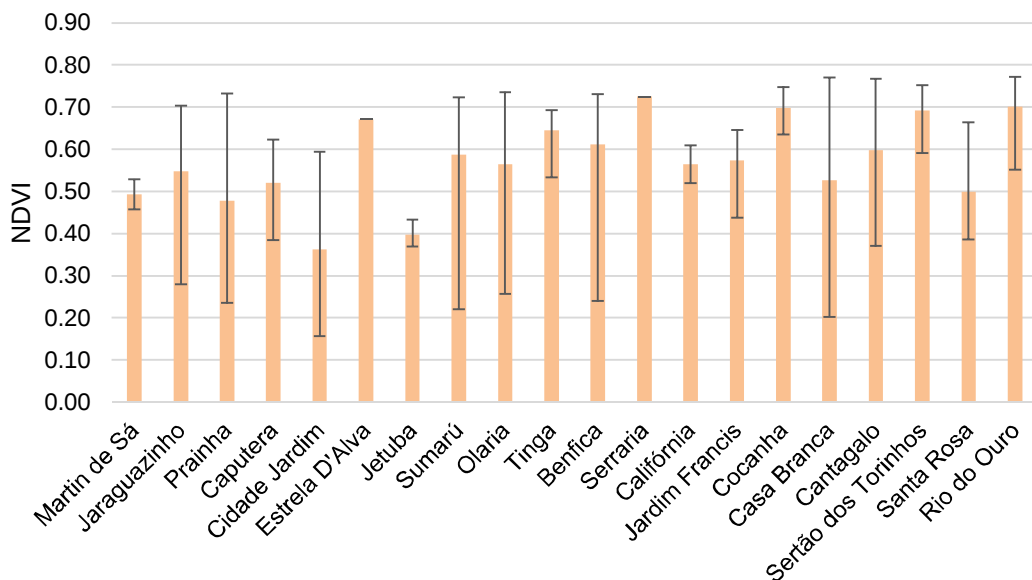


Figura 9: NDVI médio e os valores extremos máximos e mínimos observados em cada área de risco.

As declividades médias observadas dentro das áreas de risco de deslizamento variaram de 6,5 a 46,1%, com média geral e intervalo de confiança de $24,3 \pm 4,1\%$ ao nível de 5% de significância. Para o NDVI, nas mesmas áreas de risco, os valores médios variaram de 0,3626 a 0,7248, com média geral e intervalo

de confiança de $0,5726 \pm 0,0436$. Considerando a variação dentro dos intervalos de confiança, estes resultados demonstram que as áreas de risco de deslizamentos ocorrem nos locais com padrão de declividade média de 20,1 a 28,4% e NDVI médio de 0,5290 a 0,6163, ao nível de 5% de probabilidade.

A partir do cruzamento entre os mapas de declividade e NDVI com o de referência foi possível identificar 4 classes de combinação entre declividade e NDVI que ocorrem individualmente nas 20 áreas de risco de deslizamento (Tabela 5).

Tabela 5: Classes de ocorrência de declividade e NDVI dentro das áreas de risco de deslizamentos do mapa de referência.

Classes	Declividade (%)	NDVI
1	6,5 - 17,1	0,42 - 0,54
2	17,5 - 24,8	0,48 - 0,67
3	25,2 - 29,1	0,57 - 0,70
4	31,1 - 46,1	0,52 - 0,68

O NDVI é um indicador sensível da quantidade e das condições da vegetação da superfície (BRITO NETO et al., 2008), que está diretamente relacionada com a suscetibilidade do solo em resistir aos deslizamentos.

As áreas de risco de deslizamentos identificadas pelo mapa de referência e pelo mapa do somatório das 4 classes de combinação entre declividades e NDVI padrões, podem ser observadas nas Figuras 10 e 11.

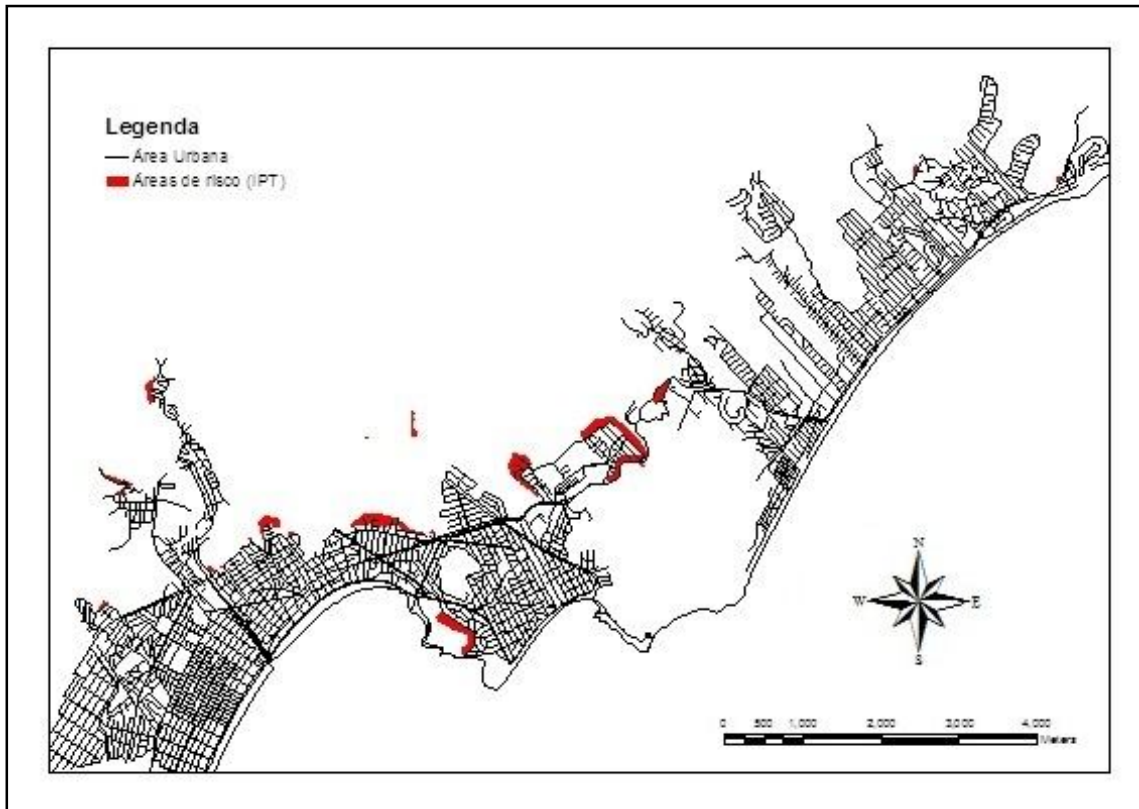


Figura 10: Mapa de referência de risco de deslizamento elaborado pelo IPT (2010).

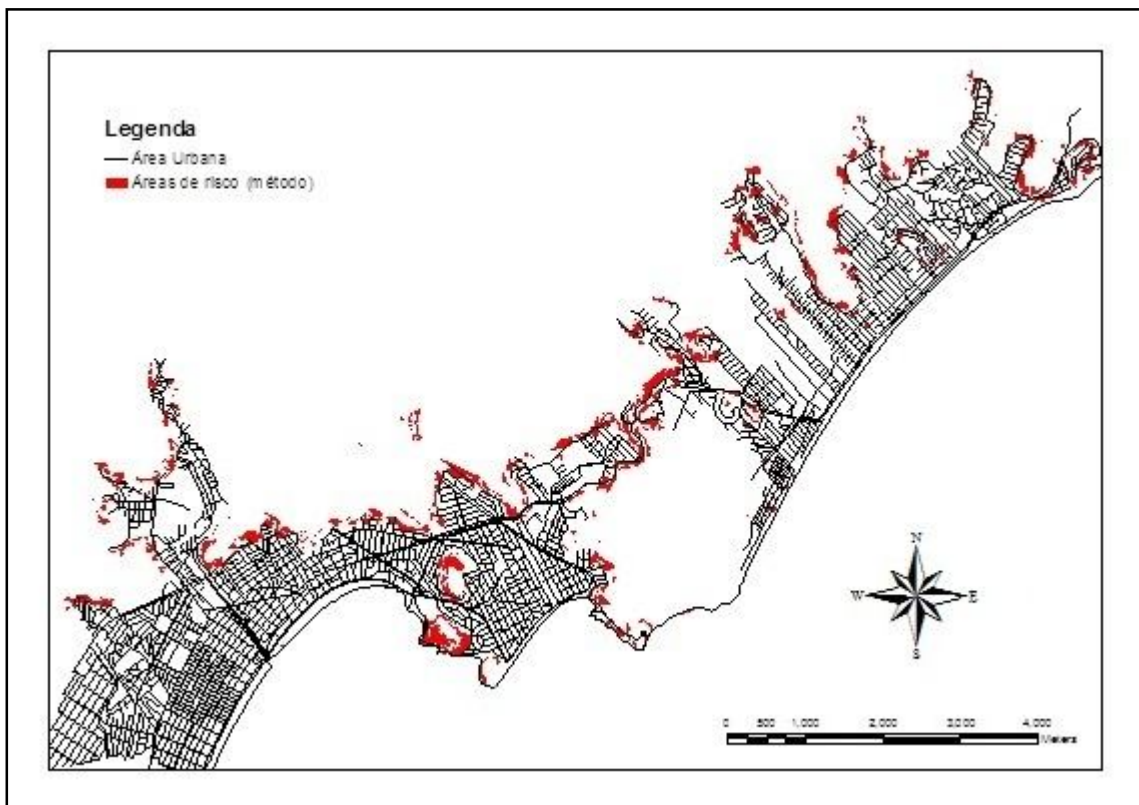


Figura 11: Mapa de risco de deslizamento de acordo com o cruzamento dos mapas de declividade e NDVI.

Comparando-se visualmente os dois mapas, pode-se verificar que a metodologia empregada neste trabalho identificou mais áreas de risco do que aquelas estabelecidas pelo IPT. A área total estimada pelo método foi de 265,41 ha, que é superior em mais de 4,5 vezes ao do mapa de referência, que é de 58,43 ha. O percentual de coincidência entre as áreas de risco pelo mapa de referência e o da metodologia avaliada apresentou índices de coincidência que oscilam de 8,1 a 86,6% (Figura 12).

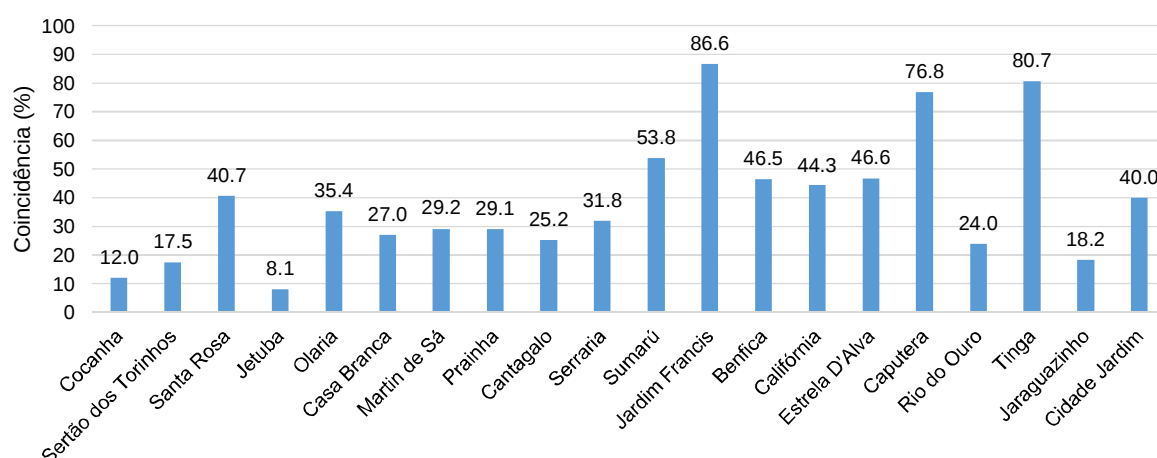


Figura 12: Percentual de coincidência entre os mapas de referência e o obtido pela metodologia.

No total, a metodologia empregada no trabalho para identificação de áreas de risco, utilizando a declividade e o NDVI, foi de 37% de coincidência. As áreas de risco com maior percentual de coincidência obtido foram as localizadas nos bairros Jardim Francis (86,6%), Tinga (80,7%) e Caputera (76,8%), cujos locais se encontram na parte oeste do município, onde tem ocorrido expansão urbana descontrolada. Já os percentuais de coincidência mais baixos foram encontrados nas áreas de risco localizadas nos bairros Jetuba (8,1%), Cocanha (12,0%) e Sertão dos Tourinhos (17,5%), todos estes pertencentes a região norte.

As Figuras 13 e 14 corroboram com os índices de coincidência encontrados e diagnosticados a partir da análise das áreas definidas pelo IPT e pela metodologia adotada neste trabalho.



Figura 13: Exposição de rocha com solo raso, Morro Santo Antônio.



Figura 14: Erosão no bairro Prainha.

A degradação da vegetação arbórea tem sido intensificada pela expansão de moradias e/ou exploração de terra para construção civil, conforme imagens acima. Behling et al. (2014) afirma que em casos de deslizamentos profundos dificilmente qualquer (re)vegetação poderá ser vista no local mesmo que tenha se passado cerca de três anos após o desastre, já nos deslizamentos de terra rasa o processo de(re)vegetação será mais rápido.

A distribuição dos percentuais de coincidência com as áreas de risco de deslizamentos do mapa de referência, estão apresentados na Figura 15.

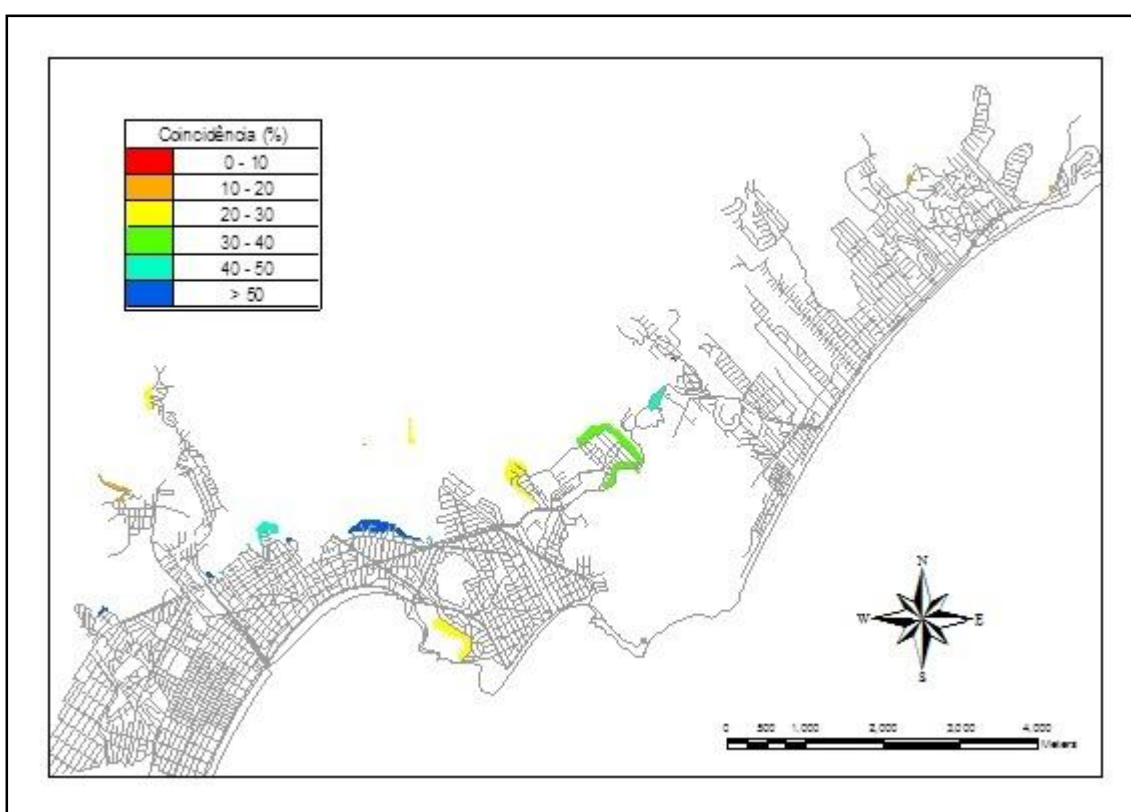


Figura 15: Distribuição espacial das classes de percentual de coincidência obtidas entre a metodologia empregada com o mapa de referência.

Pode-se observar que os maiores percentuais de coincidência entre as duas metodologias (mapa de referência e geoprocessamento) ocorreram na região central do município.

Das 4 classes de combinação declividade e NDVI identificadas nas áreas de risco, as classes 4 (declividade média de 31,1 - 46,1% com NDVI médio de 0,52 - 0,68) e a classe 2 (declividade média de 17,5 - 24,8% com NDVI médio de 0,48 - 0,67) foram as que mais apresentaram percentual de coincidência (Figura 16).

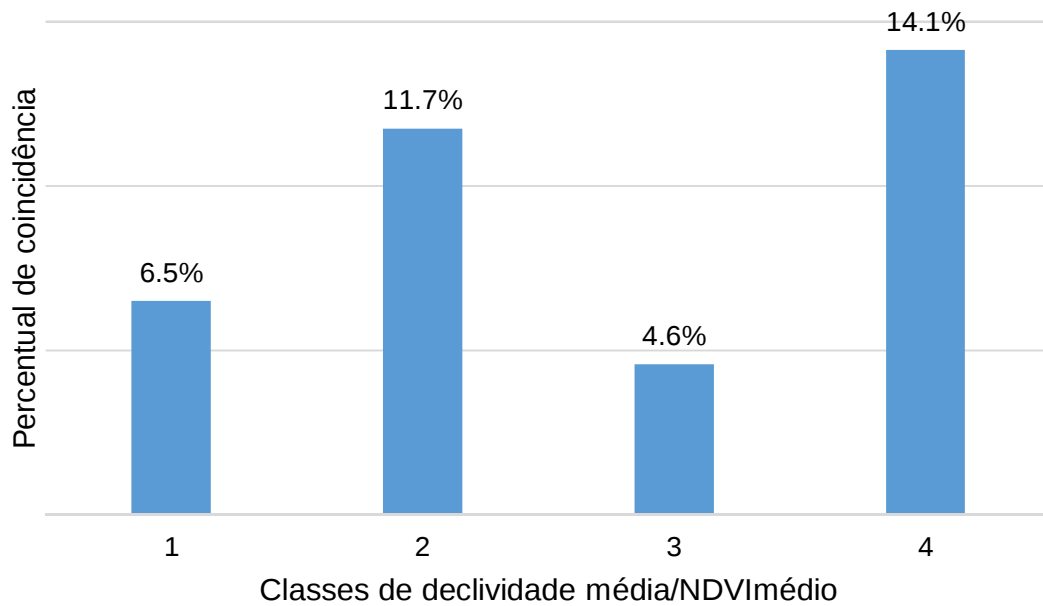


Figura 16: Percentual de coincidência de área entre as 4 classes de combinação entre declividade média e NDVI médio, com o mapa de referência.

As Figuras 17 e 18, a seguir, representam exemplos de áreas identificadas pela metodologia adotada neste trabalho de não coincidência como mapa de referência do IPT, apresentando solo totalmente exposto e a vegetação quando presente encontra-se de forma rasteira, sendo estas regiões propícias ao desenvolvimento de processos erosivos.



Figura17:Detalhe de área identificada de risco pela metodologia adotada neste trabalho, localizada no bairro Martin de Sá.



Figura 18:Detalhe de área identificada de risco pela metodologia adotada neste trabalho, localizada na praia Martin de Sá.

No sul do Quirguistão, vale do Fergana, entre 2009 e 2013, região que apresenta altos índices de deslizamento de terras devido à presença de relevo montanhoso, um trabalho desenvolvido por Behling et al. (2014) com o intuito de identificar prováveis áreas com risco de deslizamento utilizando imagens de NDVI, observaram que o método convencional de levantamento a campo contabilizou cerca de 0,25 a 0,50 km² (25 a 50 ha), enquanto a área total afetada pelos deslizamentos pode abranger cerca de 1 km², ou seja, quase o dobro do que estabelecido anteriormente.

Em outro estudo desenvolvido por Alharbiet et al. (2014) nas montanhas de Faifa, Arábia Saudita, utilizando SIG, concluíram que as áreas com alto NDVI são menos propensas a fluxos de detritos, ocorrendo o contrário com as áreas de baixo NDVI, favoráveis a deslizamentos de escombros, com exceção dos terraços, áreas íngremes das montanhas que sofreram com as intervenções do homem com construções procurando melhorar a infiltração e reduzir o escoamento.

Partindo do princípio que as características naturais do clima, do relevo e o subsolo são previamente definidas, não estando sujeitos a oscilações em curtos espaços de tempo, o monitoramento por meio de sensoriamento remoto quanto a presença da vegetação permite maior aproximação das áreas passíveis de risco de deslizamento.

Como pode ser observado, a metodologia de identificação de áreas de risco baseada na combinação entre a declividade média e o NDVI médio, no total, apresentou 37% de coincidência de área. Entretanto, o método foi efetivo em identificar a localização de 100% das áreas indicadas no mapa de referência, sendo que este resultado demonstra a possibilidade de melhores aproximações para melhorar a precisão do método ou, ainda, o uso como ferramenta auxiliar nos mapeamentos de campo.

5. CONCLUSÃO

O uso combinado de imagem NDVI e mapa de declividade proporcionou 37% de coincidência entre as áreas, variando de 8,1 a 86,6% de coincidência em área. Entretanto, cabe ressaltar que o método foi efetivo para localizar 100% das áreas de risco de deslizamento.

Assim, o uso de sensoriamento remoto no mapeamento e monitoramento das áreas de risco, conforme a metodologia proposta neste trabalho, pode ser considerado como ferramenta rápida, de baixo custo e de boa precisão na localização, características que a tornam promissora na identificação de áreas de risco de deslizamentos.

REFERÊNCIAS

AB', SABER. **São Paulo: Ensaios Entreveros**. São Paulo: Edusp, Imprensa Oficial de SP. 2004, 522 p

ALHARBI, T.; SULTAN, M.; EIKADIRI, R. et al. Anassessmentoflandslidesusceptibility in theFaifaarea, Saudi Arabia, usingremotesensingand GIS techniques. **Natural Hazards Earth System Sciences**. 14: 1553–1564, 2014.

ALMEIDA, L. **Riscos Ambientais e Vulnerabilidades nas Cidades Brasileiras: Conceitos, Metodologias e Aplicações**. São Paulo-SP: Cultura Acadêmica: 2012, 215 p

BEHLING, R.; ROESSNER, S.; KAUFMANN, H. et al. AutomatedSpatio Temporal LandslideMapping over LargeAreasUsingRapidEye Time Series Data. **Remote Sens**. 6: 8026-8055; 2014.

BISPO, P.; ALMEIDA, C.; VALERIANO, M. et al. Análise da Suscetibilidade aos Movimentos de Massa em São Sebastião (SP) com o uso de métodos de Inferência Espacial. São Paulo, UNESP. **Geociências**, 30: 467-478, 2011.

BRANDÃO, Z.; BEZERRA, M.; SILVA, B. da. Uso de NDVI para determinação da biomassa na chapada do Araripe. In: XIII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, INPE, 75-81. 2007. **Anais do ...** Florianópolis-SC: 2007.

BRASIL, Ministério da Integração Nacional, **Plano Nacional de Defesa Civil**. Brasília: Secretaria de Defesa Civil, 2000, 57 p

BRASIL. **LEI Nº 12.187, Institui a Política Nacional sobre Mudança do Clima - PNMC e dá outras providências**. Brasília, 29 de dezembro de 2009. Disponível em http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2009/lei/l12187.htm acesso em 06 de fevereiro de 2014.

BRITO NETO, R. T. de; BARROS FILHO, M. B. B.; LOPES, H. L.; Pacheco, A. da P.; A determinação de valores físicos de imagens TM/LANDSAT-5 utilizando a linguagem legal para obter índices de vegetação. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE CIÊNCIAS GEODÉSICAS E TECNOLOGIAS DA GEOINFORMAÇÃO, 2008. **Anais do ...** Recife-PE. 2008.

BUSTAMANTE, T. **Impactos da chuva na ocorrência de deslizamento de terra e inundações no estado de São Paulo**. 2010. 132p. Dissertação de Mestrado – INPE, São José dos Campos.

CÂMARA, G.; MEDEIROS, J.S. de. **Mapas e suas representações computacionais**. In: ASSAD, E. D. **Sistema de informações geográficas: aplicações na agricultura**. Brasília: EMBRAPA-CPAC, 1998, 434 p

CARVALHO, C. GALVÃO, T. (org.) **Prevenção de Riscos de Deslizamentos em Encostas**: Guia para elaboração de Políticas Municipais, Ministério das Cidades, (Brasil). Brasília, 2006. 113 p

CEPAGRI - CENTRO DE PESQUISAS METEOROLÓGICAS E CLIMÁTICAS APLICADAS A AGRICULTURA. **Dados Pluviométricos**. Campinas: Disponível em: <http://www.cepagri.unicamp.br> Acesso em 11 de outubro de 2014.

CERRI, L.; SILVA, V. da; AUGUSTO FILHO, O. Considerações sobre a representação cartográfica de riscos geológicos. **Revista do Instituto Geológico**. São Paulo; 45-49, 1995.

COELHO, A. **Aplicação da Geocomputação a Estudos de Susceptibilidade Deslizamentos de terra**. 2012. 187p. Tese de Doutorado. Universidade do Estado do Rio de Janeiro.

CRUZ, O. Contribuição Geomorfológica ao Estudo de Escarpas da Serra do Mar. **Revista do Instituto Geológico**, São Paulo, 9-20, 1990.

Departamento de Desenvolvimento Regional e Meio Ambiente Secretaria Executiva de Organização Assuntos Económicos e Sociais dos Estados Americanos. Disponível em: <http://www.oas.org/dsd/publications/Unit/oea66e/bein.htm#Contents> Acesso em 17 de outubro de 2014.

EMBRAPA, Centro Nacional de Pesquisas de Solos. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 2ª ed. Rio de Janeiro: Embrapa-SPI, Solos, 2006, 306 p
ESPINDOLA, C. A Pedologia e a evolução das paisagens. **Revista do Instituto Geológico**, São Paulo. 31 (1/2): 67-92, 2010.

FERNANDES, M.C.; LAGUENS, J.V.M.; COELHO NETTO, A.L. O processo de ocupação por favelas e sua relação com os eventos de deslizamentos no Maciço da Tijuca/RJ. **Anuário do Instituto de Geociências**, 22: 45-59, 1999.

FERNANDES, N.F.; GUIMARÃES, R.F.; GOMES, R.A.T.; et al. Condicionantes Geomorfológicos dos Deslizamentos nas Encostas: Avaliação de Metodologias e Aplicação de Modelo de Previsão de Áreas Susceptíveis. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, 2 (1): 51-71, 2001.

FERREIRA, F.S. **Análise da Influência das Propriedades Físicas do Solo na Deflagração dos Escorregamentos Translacionais Rasos na Serra do Mar (SP)**. 2013. 113p. São Paulo. Dissertação de Mestrado- Faculdade de Filosofia e Ciências Humanas da Universidade de São Paulo

IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística). **Análise de censo demográfico**. Brasília: Disponível em: <http://www.ibge.gov.br> acesso 22 de novembro de 2014.

IPCC - INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **WorkingGroup II – ClimateChangeImpacts**, AdaptationandVulnerability. Cambridge University Press, 2007. Disponível em <https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=TNoSeGpn7wC&oi=fnd&pg=PA81&dq=+IPCC++INTERGOVERNMENTAL+PANEL+ON+CLIMATE+CHANGE.+Working+Group+II+2007.&ots=vP4wseVtrD&sig=5ZKY9vmuDVpzi3TjE7qAmFUmt4Q#v=onepage&q=IPCC%20%20INTERGOVERNMENTAL%20PANEL%20ON%20CLIMATE%20CHANGE.%20Working%20Group%20II%202007.&f=false> acesso em 29 de janeiro de 2015.

JENSEN, J.R. **Sensoriamento Remoto do Ambiente: Uma Perspectiva em Recursos Terrestres** (Tradução da Segunda Edição). São José dos Campos: Parêntese Editora, 2009. 598 p

LIMA, E. **Mapa de Risco de Erosão do Solo: Uma Abordagem Usando Sistema de Informações Geográficas e Imagens Orbitais**. 1990. 174p. Dissertação de Mestrado – INPE, São José dos Campos-SP

LIMA, G. **Análise da Suscetibilidade a deslizamentos por critérios topográficos: Um estudo no alto da Bacia do Ribeirão Belchior, Gaspar-SC**. 2013. 114p. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis-SC

MARANDOLA JÚNIOR, E.; MARQUES, C; PAULA, L. T. de; CASSANELI, L. B.; Crescimento urbano e áreas de risco no Litoral Norte de São Paulo, Brasil. In: V CONGRESSO DA ASOCIACIÓN LATINOAMERICANA DE POBLACIÓN, 18. 2012. **Anais do ...** Montevideu, Uruguai, 2012.

MARCELINO, E. **Mapeamento de áreas susceptíveis a escorregamento no município de Caraguatatuba (SP) usando técnicas de sensoriamento remoto**. 2004, 230p. Dissertação de Mestrado – INPE.São José dos Campos-SP

MOURA, L; FERNANDES, M.; SOUZA, J. de. Análise Comparativa entre Mapeamentos Convencional e por Modelagem em SIG para solos. **Revista Caminhos da Geografia**, Uberlândia-MG. 14 (45): 54-63. 2013.

PÓLIS INSTITUTO. **Diagnóstico Urbano Socioambiental-Município de Caraguatatuba**. Convênio Petrobras- Relatório nº 6. 2013. 505 p

SANTOS, D. dos; GALVANI. E. Distribuição sazonal e horária das precipitações em Caraguatatuba-SP e a ocorrência de eventos extremos nos anos de 2007 a 2011. **Revista do Centro de Ciências Naturais e Exatas** – UFSM. 36 (2): 214–229, 2014.

SÃO PAULO. LEI Nº 13.798.**Institui a Política Estadual de Mudanças Climáticas** – (PEMC) São Paulo: DE 9 DE NOVEMBRO DE 2009. Disponível em http://www.ambiente.sp.gov.br/wp-content/uploads/2013/01/lei_13798_portugues.pdf acesso em 30 de janeiro de 2015.

SÃO PAULO. Secretaria do Meio Ambiente. **Coordenadoria de Planejamento Ambiental Estratégico e Educação Ambiental. Litoral Norte**. São Paulo: SMA/CPLEA, 2005. 55 p

SCIFONI, S. Urbanização e proteção ambiental no litoral do estado de São Paulo. In: **X Encontro de Geógrafos da América Latina**. 13926-13941. 2005, São Paulo. **Anais do ...** Universidade de São Paulo. 2005.

SESTINI, M. **Variáveis geomorfológicas no estudo de deslizamentos em Caraguatatuba-SP utilizando imagens TM-Landsat e SIG**. 2000. 170p. Dissertação de Mestrado – INPE. São José dos Campos-SP

SESTINI, M.; FLORENZANO, T. Caracterização de Cicatrizes de Deslizamentos por Processamento de Dados TM Landsat em Caraguatatuba – SP. **Revista do Instituto de Geociências-USP**, São Paulo, 4 (2) 57-69, 2004.

SILVA, R. da. **Análise de magnitude e Frequência Espacial de Movimentos de Massa em Caraguatatuba-SP**. 2013. 109p. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de São Paulo. São Paulo

SILVA, V. Introdução: Geografia e Meio Ambiente. CAMPOS, J. **Santo Antônio de Caraguatatuba: Memória e Tradições de um Povo**. Caraguatatuba-SP: FUNDACC, 2000. P 16-29

SOUZA, C.; MARQUES JÚNIOR, J.; MARTINS FILHO, M. et al. Influência do relevo e erosão na variabilidade espacial de um Latossolo em Jaboticabal (SP). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 27 (6): 1067-1074, 2003.

TAVARES, R. **Imbricações entre os ritmos do clima e os ritmos da urbanização na formação de risco e vulnerabilidade socioambientais a deslizamentos de terra na serra do mar- Ubatuba-SP**. 2010. 263p. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Paraná (UFPR)

TOMINAGA, L. Análise e mapeamento de risco. In Tominaga, L.; Santoro, J.; Amaral, R. **Desastres Naturais: Conhecer para prevenir**. São Paulo: Instituto Geológico. Governo do Estado de São Paulo, (2011b), p 147-178

TOMINAGA, L. Escorregamentos. In: TOMINAGA, L.; SANTORO, J.; AMARAL, R. **Desastres Naturais: Conhecer para prevenir**. São Paulo: Instituto Geológico. Governo do Estado de São Paulo, (2011a), p 25-38

UNITED STATES NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION - NASA. **ASTER Global Digital Elevation Map Announcement**. Pasadena: NASA, 2010. Disponível em: <http://asterweb.jpl.nasa.gov/gdem.asp>. Acesso em: agosto de 2011.

VANACÔR, R.; ROLIM, S. Usando técnicas de estatísticas bivariada e sistema de informações geográficas na região nordeste do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, 13 (1): 15-28, 2012.

VIRÍSSIMO, D.; RUSSO, M.; OGURA, A. NIAGRISK: Gestão de risco de desastres naturais. In: XXXIV CONGRESSO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE COMPUTAÇÃO, 1185-1188, 2014, São Paulo. **Anais do ...** Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 2014.

