



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE FLORESTAS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA FLORESTAL

CARLOS MAGNO MOREIRA DE OLIVEIRA

**MONITORAMENTO DE VOÇOROCAS NO MUNICÍPIO DE VASSOURAS, RJ,
UTILIZANDO-SE A TECNOLOGIA DO *LASER SCANNER***

Prof. Dr. MÁRCIO ROCHA FRANCELINO
Orientador

SEROPÉDICA, RJ
JANEIRO – 2014



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE FLORESTAS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA FLORESTAL

CARLOS MAGNO MOREIRA DE OLIVEIRA

**MONITORAMENTO DE VOÇOROCAS NO MUNICÍPIO DE VASSOURAS, RJ,
UTILIZANDO-SE A TECNOLOGIA DO *LASER SCANNER***

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Florestal, como requisito parcial para a obtenção do Título de Engenheiro Florestal, Instituto de Florestas da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro.

Prof. Dr. MÁRCIO ROCHA FRANCELINO
Orientador

SEROPÉDICA, RJ
JANEIRO – 2014

**MONITORAMENTO DE VOÇOROCAS NO MUNICÍPIO DE VASSOURAS, RJ,
UTILIZANDO-SE A TECNOLOGIA DO *LASER SCANNER***

CARLOS MAGNO MOREIRA DE OLIVEIRA

Monografia aprovada em 31 de janeiro de 2014.

Comissão Examinadora:

Prof. Dr. Márcio Rocha Francelino
UFRRJ / IF/ Departamento de Silvicultura
Orientador

Prof. Dr. Eduardo Vinícius da Silva
UFRRJ / IF / Departamento de Silvicultura
Membro

Prof. Dr. Leonardo Duarte Batista da Silva
UFRRJ / IT / Departamento de Engenharia
Membro

DEDICATÓRIA

À minha família por sempre me dar força e apoio nas minhas decisões. Em especial ao meu pai, pelos diversos ensinamentos da vida.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por sempre me dar força e esperança nos momentos difíceis que passei.

A minha família por todo carinho, companheirismo e todos os esforços em prol de mais essa etapa na minha vida.

Aos moradores do 512 por esses cinco anos de boa convivência.

A Tainá, por sempre está ao meu lado em todos os momentos.

Ao Prof. Márcio Rocha Francelino pela oportunidade de fazer parte de sua equipe no laboratório Geoflora – IF/ UFRRJ e por está me orientando nessa monografia.

Ao Prof. Alexandre Monteiro por sua atenção e tutoria no Grupo PET – Floresta.

Ao Erich, por sua dedicação e atenção nos trabalhos desenvolvidos na Secretaria Municipal de Meio Ambiente – Smac (RJ).

A UFRuralRJ por me conceder essa graduação no curso de Engenharia Florestal, dando o apoio necessário ao cumprimento das atividades e pela estrutura fornecida nesses anos, tanto ao corpo de docentes como de técnicos administrativos, que contribuíram de alguma forma na minha formação acadêmica.

A todos os meus amigos que participaram de forma direta ou indiretamente na minha formação.

Resumo

Na região tropical os processos erosivos são desenvolvidos pela atividade hídrica muito concentrada na estação chuvosa. Um dos mais impactantes processos erosivos é o voçorocamento, causado pelo carreamento de partículas do solo pela água da chuva formando ravinas profundas. É de grande importância o entendimento desses processos para se evitar problemas mais graves posteriormente, bem como o seu monitoramento. Existem vários métodos para o estudo de processos erosivos, mas em sua grande maioria apresentam elevados custos e longo tempo para suas execuções. A tecnologia do *laser scanner* possibilita a obtenção de informações tridimensionais de maneira rápida e precisa e pode ser uma importante ferramenta no levantamento espacial dessas feições. Esse trabalho teve como objetivo avaliar a eficiência do *laser scanner* no monitoramento de voçorocas na região de Vassouras-RJ. A partir dos dados obtidos na varredura com *laser scanner* e com os pontos coletados com GPS de precisão, utilizados para espacialização da nuvem de pontos, foi possível gerar modelos digitais de elevação (MDE), por meio da interpolação dos pontos. Com essas informações foi possível calcular o volume de solo perdido no período de um ano. Foi realizado, também, a modelagem das voçorocas nos programas ArcGIS, Microstation e FUSION para avaliar qual deles faz a melhor modelagem das feições erosivas, fornecendo dados com maior precisão.

Palavras-chave: Erosão; varredura; geoprocessamento.

Abstract

In the tropics the erosive processes are developed by highly concentrated water activity in the rainy season. One of the most striking is the gully erosion, caused by the entrainment of soil particles by rain water forming deep rill. It is very important to understand these processes in order to avoid more serious problems later, as well as its monitoring. There are several methods for the study of erosion processes, but mostly have high costs and long time to their executions. The technology allows the laser scanner to obtain three-dimensional information quickly and accurately and can be an important tool in spatial analysis of these features. This study aimed to evaluate the efficiency of the laser scanner monitoring of gullies in the region of Vassouras - RJ. From the data obtained in scanning laser scanner and the points collected with GPS precision, used for spatial point cloud, it was possible to generate digital elevation models (DEM), by means of interpolation points. With this information it was possible to calculate the volume of soil lost in one year. Was also done modeling of gullies in ArcGIS, Microstation and FUSION programs to evaluate which program is the best modeling of erosional features, providing data with greater accuracy.

Keywords: Erosion; scanning; geoprocessing.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
2. OBJETIVOS GERAIS.....	2
3. REVISÃO DE LITERATURA	3
3.1 Os processos erosivos	3
3.2 Erosão por salpicamento	3
3.3 Ravinamento.....	4
3.4 Voçorocamento.....	4
3.5 Metodologias utilizadas para quantificação da perda de solo em voçoroca.....	5
3.6 Sistema de varredura em 3D (<i>laser scanner</i>)	6
3.7 Modelos Digitais de Elevação (MDE).....	7
4. MATERIAS E MÉTODOS.....	7
4.1 Características da região e área de estudo	7
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	13
5.1 Voçoroca 1.....	13
5.1.1 Estimativas da área plana e do volume	13
5.1.2 Avaliação dos MDEs.....	15
5.2 Voçoroca 2.....	23
5.2.1 Estimativas da área plana e do volume	23
5.2.2 Avaliação dos MDEs.....	25
6. CONCLUSÃO.....	32
7. CONSIDERAÇÕES FINAIS	33
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	33

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Distância entre pontos e número de pontos coletados.	11
Tabela 2 - Dinâmica da área plana da voçoroca 1.....	13
Tabela 3 - Estimativa do volume da voçoroca 1.	14
Tabela 4 - Dinâmica da área plana da voçoroca 2.....	23
Tabela 5 - Estimativa do volume da voçoroca 2.	24
Tabela 6- Análise da distribuição granulométrica dos horizontes. Fonte: Moura (2010).	24

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Localização do Município de Vassouras no Rio de Janeiro.	8
Figura 2 - <i>Laser scanner</i> utilizado nesse estudo. Ao fundo pode-se observar uma das voçorocas que foram varridas.	9
Figura 3 - Voçoroca 1 na imagem do sensor Geoeye (Google Earth, 2011).	10
Figura 4 - Voçoroca 2 na imagem do sensor Geoeye (Google Earth, 2011).	10
Figura 5 - GPS geodésico.....	11
Figura 6- Exemplo de malha Lattice.	12
Figura 7- Nuvem de pontos da voçoroca 1 de maio de 2011.....	14
Figura 8 - Foto em maio de 2010.	14
Figura 9 - Mapa de declividade da voçoroca 1. Destaque em azul para áreas susceptíveis a expansão da voçoroca.	15
Figura 10 - Esquema de localização dos perfis topográficos.	16
Figura 11 - Perfil A – B dos MDEs dos softwares ArcGIS, FUSION e Microstation respectivamente. Destaque em azul para as áreas com variação entre os perfis topográficos.	17
Figura 12 - Perfil C – D dos MDEs dos softwares ArcGIS, FUSION e Microstation respectivamente.	18
Figura 13 - Perfil E – F dos MDEs dos softwares ArcGIS, FUSION e Microstation respectivamente.	19
Figura 14 - Representação gráfica da distribuição modular relativa dos resíduos no ArcGIS.	20
Figura 15 - Representação gráfica da distribuição modular relativa dos resíduos no FUSION.	21
Figura 16 - Representação gráfica da distribuição modular relativa dos resíduos no Microstation.	21
Figura 17 - Nuvem de pontos da voçoroca 1. Destaque em vermelho para área com menor recobrimento.....	22
Figura 18- Nuvem de pontos da voçoroca.	23
Figura 19 - a) Foto em maio de 2010 b) Foto de maio de 2011.....	24
Figura 20 - Fotografia da voçoroca sobreposta ao MDE.....	25
Figura 21 - Declividade da voçoroca 2.....	25
Figura 22- Perfis topográficos na voçoroca 2.	26
Figura 23 - Perfil A – B dos MDEs dos softwares ArcGIS, FUSION e Microstation respectivamente. Destaque em azul para as áreas com variação entre os perfis topográficos.	27
Figura 24 - Perfil C – D dos MDEs dos softwares ArcGIS, FUSION e Microstation respectivamente. Destaque em azul para as áreas com variação entre os perfis topográficos.	28
Figura 25 - Perfil E – F dos MDEs dos softwares ArcGIS, FUSION e Microstation respectivamente. Destaque em azul para as áreas com variação entre os perfis topográficos.	29
Figura 26 - Representação gráfica da distribuição modular relativa dos resíduos no ArcGIS.	30
Figura 27 - Representação gráfica da distribuição modular relativa dos resíduos no FUSION.	31
Figura 28 - Representação gráfica da distribuição modular relativa dos resíduos no Microstation.	31

1. INTRODUÇÃO

O manejo inadequado do solo como a retirada da cobertura vegetal para expansão de áreas para plantio de culturas e formação de pastos sem os devidos estudos e cuidados, tem aumentado de forma significativa a ação de processos erosivos no meio rural. Nas áreas urbanas esse processo é acelerado pela ocupação indevida de encostas de elevada declividade e com solos rasos, além do corte de estradas, que expõem horizontes do solo de fraca estruturação. Nas condições climáticas do Brasil, a erosão hídrica é a mais comum devido ao grande volume de chuvas que ocorre nas diferentes regiões do país. Dependendo da gravidade, os processos erosivos podem causar grandes prejuízos de ordem ambiental, econômica e social, como foi o caso das chuvas do verão de 2011 na região serrana fluminense.

Um dos resultados mais agressivos da erosão hídrica quando ocorre na forma de sulcos (ravinação) são as voçorocas, que, segundo Vieira (1978 apud FRANCISCO e NUNES, 2009), significa “rasgão na terra” e tendem a se formar onde grandes volumes de escoamento superficial são concentrados e descarregados em encostas com solos erodíveis (ARAÚJO et al., 2008).

Devido a características geomorfológica, pedológica e de histórico de uso, a região do Médio Vale do Paraíba do Sul apresenta alta susceptibilidade a erosão, onde os vales dissecados drenados para o rio Paraíba do Sul apresentam diversas áreas já afetadas por esse tipo de processo e que descarregam várias toneladas de solos no seu leito (MACHADO, 2007).

Para se entender como esses processos ocorrem é preciso conhecer o histórico do uso do solo da região. No final do século XVIII a região foi intensamente explorada através da implantação da monocultura de café, que ocasionou o desmatamento de extensas áreas da Floresta Atlântica. Posteriormente com a decadência do cultivo do café, no final do século XIX, a região passou a ser explorada pela pecuária extensiva (MACHADO, 2007). Em função desses fatores houve um desequilíbrio natural e formação de processos erosivos devido à falta de um manejo adequada das áreas (VITTE e GUERRA, 2007).

Alguns fatores como relevo acidentado e algumas características pedológicas como: textura siltosa e/ou arenosa, consistência friável, baixo teor de matéria orgânica e pequena estabilidade de agregados, deixa o solo susceptível a ação de processos erosivos. A ocorrência desse processo é natural, porém têm sido intensificada pela ação do homem, acarretando em diversos prejuízos. A retirada da cobertura original do solo, realização de práticas que promovem sua desagregação como: aração, gradagem, plantio morro abaixo, queima da pastagem, sobrepastejo, etc., acabam por deixar o solo exposto a impactos das gotas das chuvas, o que acarreta a desagregação, dispersão e transporte dos solos (EMBRAPA, 2006).

No Brasil as áreas localizadas no Noroeste do Paraná, Planalto Central, Oeste Paulista, Campanha Gaúcha, Triângulo Mineiro e Médio Vale do Paraíba do Sul, são as mais críticas quanto à incidência de processos erosivos, e correspondem também, as áreas que têm sido mais estudadas devido à grande relevância em termos de perda de solo e redução da produtividade (BOTELHO e GUERRA, 2003).

Em trabalho realizado por Marques (2004) para valorar economicamente os efeitos da erosão em uma bacia hidrográfica, foi observado que somente na bacia do Rio Atibaia (SP) o prejuízo é de aproximadamente 316.000 t/ano de solo perdido, sendo o valor monetário dessa perda estimado em US\$ 336.000,00.

As bacias hidrográficas podem ser consideradas sistemas abertos, expostos a ação de fatores naturais. Para mitigar a ação desses processos, técnicas de planejamento e

monitoramento podem ser de grande valia no combate à erosão dos solos. Segundo Botelho (1999), é possível se fazer um planejamento conservacionista, desde que seja priorizada a utilização racional dos recursos naturais, principalmente o solo e a água. Para que isso aconteça é preciso fazer o levantamento da capacidade de uso dos solos, ou classes de uso das terras.

Segundo EMBRAPA (2006), a formação de voçorocas está relacionada principalmente com a evolução de processos erosivos em locais que apresentam susceptibilidade a esses fenômenos, e estão diretamente ligados com o uso do solo. Em locais onde o voçorocamento já foi iniciado a alternativa é contê-la da maneira mais eficiente e econômica possível, evitando estragos maiores e acarretando em maiores prejuízos.

Devido a todos os prejuízos ambientais e econômicos, torna-se importante estudar mais detalhadamente todos os processos envolvidos na formação e desenvolvimento das voçorocas, visto que é o processo mais grave de erosão, visando recomendar o uso de técnicas preventivas e medidas de contenção mais adaptadas para cada situação, de forma a contribuir para a mitigação de seus impactos.

Existem várias técnicas para se quantificar a perda de solo por erosão. Segundo Bertoni e Lombardi Neto (1990), pelo método direto pode-se avaliar a erosão por impacto, erosão laminar e perdas por percolação, por meio do volume perdido através de coleta, fração ou registro de passagem. O método indireto leva em consideração a mudança do relevo (por meio de fotografias e topografia) e alterações na constituição do solo (análise física e mecânica). Dentre os métodos citados pelo autor, somente o método indireto é sugerido para o monitoramento da erosão em voçorocas. Outro método é o uso de pinos para o acompanhamento do desenvolvimento das voçorocas, porém é pouco preciso.

Machado (2007) menciona a falta de técnicas precisas para a avaliação de perdas de solo em voçorocas por método direto, devido à dificuldade de se trabalhar com grande quantidade de volume de sedimentos que se faz necessária a construção de instalações grandes coletoras, ficando mais difícil sua construção devido a morfologia de desembocadura de uma voçoroca, além do difícil acesso a elas.

Nesse contexto, tecnologias modernas de obtenção de imagens, como o sensoriamento remoto, têm se tornado uma grande potência no estudo de áreas antropizadas. Uma ferramenta recente é o *laser scanner*, que possibilita a obtenção de informação tridimensional da cena, permitindo o reconhecimento de objetos, como prédios e vegetação (RIBEIRO et al., 2002).

A tecnologia do *laser scanner* mostra-se promissora para análise temporal de voçorocas, já que permite gerar dados com alta precisão, qualidade e rapidez, podendo ser uma ferramenta inovadora para estudos de problemas ambientais.

2. OBJETIVOS GERAIS

Avaliar o uso da ferramenta de *laser scanner* no levantamento de voçorocas, determinar características geomorfológicas das mesmas e calcular o volume de solos perdido no período de um ano, com base nos modelos digitais de elevação (MDE) gerados para cada voçoroca.

3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1 Os processos erosivos

A erosão é um processo natural que se instaura de modos e intensidades diferentes de acordo com as características de cada região. Por ser um processo natural, deve-se levar em consideração vários aspectos componentes dos ambientes, como a vegetação, o clima, a formação geológica e o relevo. A ação antrópica interfere de tal modo nesse processo, acelerando-os de forma que podem chegar a um estágio avançado de degradação, como uma voçoroca (SAUERESSIG; MEDEIROS, 2011).

Como um dos mais impactantes e cada vez mais frequente, os processos erosivos acelerados ou erosão antropogênica, predominam na dinâmica do relevo de clima tropical. Como resultado dessas atividades pode-se citar a perda de recurso natural, como o solo por meio da erosão e à degradação dos recursos hídricos, devido ao carreamento de partículas para calha dos rios (FARIA et al., 2013).

A perda do horizonte fértil do solo, o horizonte A, região onde se concentra boa parte da matéria orgânica incorporada aos constituintes minerais deste, ocasiona grande impacto na capacidade produtiva e na função ambiental dos solos (SAUERESSIG; MEDEIROS, 2011).

No ambiente rural esses processos de degradação estão relacionados à atividade agropecuária, resultado do uso do solo sem utilizar técnicas conservacionistas do meio físico, como por exemplo, a construção de estradas rurais sem critérios técnicos, manejo inadequado no plantio de determinadas culturas, uso de fogo no manejo da pastagem, entre outras (FARIA et al., 2013),

Júnior (2007) estudou a ação de processos erosivos em estradas de terra, também chamadas de vicinais, e observou o grande avanço de processos erosivos nesses processos visto a inexistência de uma camada protetora dos taludes. Esses processos, ao atingir as propriedades rurais se intensificavam ainda mais devido o solo ser menos compacto pelo seu emprego na agricultura. Resultando no comprometimento dessas áreas e também no carreando sedimentos para os cursos d'água ou para fundos de vale mais próximos, eliminando assim a região do solo com maior concentração de matéria orgânica, ocasionando a perda de solos agricultáveis.

3.2 Erosão por salpicamento

Considerado o primeiro estágio do processo erosivo, o salpicamento ou *splash* tem por característica preparar as partículas que compõem o solo, para serem transportadas pela ação do escoamento superficial (GUERRA, 1999 apud CASSETTI, 2005). Segundo Cassetti (2005), alguns trabalhos de cunho prático tem descrito a ação morfogenética das gotas de chuva, no que tange a separação dos agregados, principalmente em solos sem cobertura vegetal.

A ação do *splash* varia não apenas de acordo com a resistência do solo em relação ao impacto da chuva, mas também pela variação da força cinética das gotas de água. De acordo com a energia das gotas sobre a superfície, esta ocasionará o rompimento dos agregados com maior ou menor facilidade, resultando em crostas que cria uma selagem sobre o solo. Segundo Farres (1978), essa crosta superficial varia de 0,1 a 3,0 mm dependendo das características do solo, que pode reduzir a capacidade de infiltração em 50%.

3.3 Ravinamento

O processo erosivo que ocorre uniformemente na superfície do solo de uma área, propiciando a formação de sulcos, classifica-se como erosão laminar. Essa atividade não deixa traços aparentes e pode continuar sua ação durante anos, aparecendo o desgaste do solo ou o assoreamento de áreas a jusante. Os resultados desse processo são percebidos em zonas rurais, pois além de depauperar o solo pela perda de nutrientes, provoca instabilidade das plantações atingindo a cobertura do sistema radicular.

A concentração de filetes de água durante o escoamento superficial proporciona a formação de sulcos, que são pequenos canais abertos atingindo uma profundidade de 10 cm. Em um primeiro instante, na formação dos sulcos, não ocorrem grandes concentrações de água, sendo a sua distribuição dada de forma difusa. Em função de características de erodibilidade do solo, geomorfológicas e pelo tipo de cobertura vegetal, esse processo acarretará em maior ou menor concentração de água, evoluindo os sulcos para ravinas.

Segundo a Guerra (1997) ravinas são micro-canais, que são facilmente removidos por operações de aragem de solo, por serem muito pequenos. Horton (1945) considera essas feições como embriões de um sistema de drenagem, possuindo função de condutores de água e sedimento. Esse mesmo autor diz que quando a precipitação excede a capacidade de infiltração do solo, inicia-se o *runoff*, que é o acúmulo de água em depressões na superfície do solo, atingindo um ponto de escoamento que pode evoluir para ravina. A força de cisalhamento do *runoff* inicia a remoção de partículas. A partir dessa observação, Horton (1945) formula o conceito de área sem erosão, mostrando que na região próxima ao topo da encosta a força de cisalhamento imposta pelo fluxo laminar não é forte o suficiente para remover partículas, mas a medida que esse fluxo de água aumenta e acelera encosta abaixo, forma incisões no solo, onde ocorre uma tendência de acúmulo de água. Podendo as ravinas se expandir em relação ao comprimento, largura e profundidade, evoluindo para processos erosivos mais avançados como as voçorocas, ou formando uma malha de canais conectados, resultando num sistema de drenagem (MORGAN, 1986 apud HORTON, 1945).

Quando se refere as dimensões para classificação de ravinas para distingui-la das outras formas de processos erosivos, há uma controvérsia entre os estudiosos da área. Para Bergsma et al. (1996) a remoção de solo superficialmente em canais raso, que denomina de ravinas, deve atingir no máximo 20 ou 30 cm e são facilmente obliterados por meio de técnicas agrícolas, como a aragem do solo. Para Carvalho et al. (2001) o termo ravina deveria ser aplicado para canais com profundidade superior a 10 cm até o limite de 50 cm ou àquela para a qual inicia-se um processo de instabilidade dos taludes por falta de coesão entre os agregados componentes do solo.

3.4 Voçorocamento

A partir da profundidade estabelecida para as ravinas, citado no item anterior, tem-se a formação das voçorocas que podem ser caracterizadas pela profundidade que essas feições atingem e pelo seu alargamento, chegando a alcançar o lençol freático. As laterais dessas feições são íngremes, quase verticais, muito instáveis e onde ocorrem deslizamentos com frequência, ocasionando no recobrimento do fundo anterior da voçoroca, desviando ou acumulando água (STIPP, 2006). Para Bergsma (1996) a voçoroca é uma feição suficientemente profunda que não pode ser obliterada por operações normais de preparo do solo.

As voçorocas podem ser formadas por dois meios: através da evolução das ravinas, em função do alargamento e aumento da profundidade e por meio do desabamento da superfície

situada acima, em locais onde o escoamento subsuperficial ocasiona a formação de dutos em subsuperfície (*piping*) devido ao transporte interno de solo.

Atividades humanas, como o uso intensivo da terra para fins agrícolas e a formação de pastagens para a pecuária, características intrínsecas do ambiente como clima, pluviosidade, temperatura e características do solo, são fatores preponderantes para o aparecimento de voçorocas. Nestas ocorrem o processo de aprofundamento da base e nas laterais, ocorrendo o colapso desse material, tanto de região lateral como da parte superior, rumo ao topo da voçoroca. Esse material oriundo do processo erosivo, em muitos casos, é transportado e depositado nas partes baixas da paisagem (GUERRA, 1994 apud STIPP, 2006).

Para Bergsma (1996), as voçorocas podem ser classificadas quanto a sua profundidade em três categorias. As voçorocas rasas, onde sua profundidade é inferior a cerca de um metro e são formadas pelo escoamento intenso do fluxo concentrado, em encostas íngremes e em valas. É mais difícil a utilização de máquinas onde ocorre esse tipo de processo, mas o trânsito de veículos ainda é possível desde que seja feito alguns ajuste em pontos de cruzamento. As voçorocas classificadas como profundas atingem mais que um metro de profundidade e menos que 5 metros. Os sulcos ocorrem em um fluxo de escoamento pesado e muitas vezes em encostas íngremes e em valas. A incisão pode se estender até o horizonte C. Nesse caso não só o uso de máquinas é prejudicado, mas também os caminhos de acesso em fazendas são interrompidos. Na terceira categoria estão as voçorocas denominadas muito profundas, com mais de 5 metros até cerca de 10 metros. Essas voçorocas inviabilizam a utilização de máquinas, a comunicação de estradas na fazenda, assim como redução do lençol freático.

3.5 Metodologias utilizadas para quantificação da perda de solo em voçoroca

Os métodos de avaliação da perda de solos podem ser agrupados em diretos e indiretos. Os métodos diretos permitem avaliação da erosão por impacto, erosão superficial ou laminar e também perdas de solos por percolação. Essa metodologia se baseia na construção de coletoras ou tanques que captam os sedimentos erodidos, permitindo quantificar o volume e análise do material. A metodologia indireta avalia a mudança do relevo pela análise da topografia e fotografias e também pelas alterações na constituição do solo (BERTONI & LOMBARDI NETO, 1993).

No período de 1940 a 1954, experimentos desenvolvidos no meio-oeste americano resultaram em equações que relacionavam as perdas de solo com fatores como declividade e comprimento da rampa, práticas conservacionistas e fatores de uso de manejo de solo (WISCHMEIER; SMITH 1978).

Os primeiros trabalhos realizados no Brasil utilizando a Equação Universal de Perdas de Solo (EUPS) foram desenvolvidas por Bertoni et al. (1945, apud VITTE; VILELA FILHO, 2006), a partir de dados experimentais do Estado de São Paulo.

Vitte e Vilela Filho (2006) destacam a importância da utilização da EUPS, sendo um importante instrumento na predição de volumes de solos perdido por processos erosivos, bem como na determinação de áreas mais susceptíveis. Porém a limitação desta equação está nas dificuldades de determinação de parâmetros para a equação, pois esses dados são oriundos de parcelas experimentais que necessitam de um longo período de mensuração para se obter índices de predição confiáveis, elevando o custo do trabalho.

Fatores como propriedades das chuvas, práticas agrícolas, tempo de desenvolvimento da cultura, dentre outras variáveis, dificultaram a utilização dessa equação em outros locais. Em 1954, no *Runoff and Soil-Loss Data Center*, do *Agricultural Research Service* foi introduzido novos parâmetros a equação como erosão da chuva, métodos para avaliar os efeitos da cultura em função das condições locais, o fator erodibilidade solo, os efeitos de

variáveis como nível de produtividade, sucessão de culturas e manejo de resíduos. Essas alterações possibilitaram a ampla utilização do modelo (WICHMEIER; SMITH, 1978):

$A = R.K.L.S.C.P$, onde:

- A – perda média anual de solo ($t.ha^{-1}.ano^{-1}$);
- R – fator erosividade da chuva ($Mj.mm.ha^{-1}.h^{-1}.ano^{-1}$);
- K – fator erodibilidade do solo ($t.h.Mj^{-1}.mm^{-1}.ano^{-1}$);
- L - fator comprimento de rampa (adimensional);
- S - fator grau de declive do terreno (adimensional);
- C – fator uso/manejo dos solos (adimensional);
- P – fator práticas conservacionistas (adimensional);

Dentre os métodos de mensuração direta de processos erosivos mais utilizados são as parcelas com caixa de sedimentação (MORGAN, 1986; MUTTER e BURNHAM, 1990; GUERRA, 1991, 1995 e 1996 apud GUERRA e CUNHA) e a instalação de pinos graduados nas encostas (CUNHA, 1996). Segundo Guerra e Cunha (2004) os dois métodos citados podem não representar exatamente a evolução, em todos os detalhes, no desenvolvimento do processo erosivo.

Para Guerra e Cunha (2004) as estações experimentais que utilizam parcelas, com o objetivo de monitorar a perda de água e solo, podem incorrer em erros desde a seleção do local para montagem da estação, à sua própria manutenção e até o processo de instalação dos equipamentos. A atividade de animais no local pode também alterar os resultados, assim como o tempo de coleta das informações, sendo maior ou menor, pode acarretar em perda de dados ou subestimativas.

Höfle (2003) realizou um estudo sobre o monitoramento de processos erosivos em turfeiras no Peru usando como ferramenta o sensoriamento remoto para coleta de informações topográficas 3D e posteriormente elaborando modelos digitais de elevação (MDEs). Esses dados são a base para análise geomorfométrica por meio de GIS (Sistema de Informação Geográfico) e também para implementação de modelos de erosão. Para gerar resultados precisos é necessário fontes de dados adequadas. O LIDAR (Ligh Detection and Ranging) ou sistema de varredura a laser terrestre fornecem uma nuvem de pontos com informações tridimensionais precisas, gerando MDEs de alta resolução para estudos geomorfológicos. Dentre os sistemas de varredura a laser, o sistema de varredura terrestre oferece uma alta densidade de pontos, sendo aplicado para o estudo de relevo com pequena dimensão espacial e processos com mudanças de baixa magnitude.

3.6 Sistema de varredura em 3D (*laser scanner*)

Os sistemas de varredura com *laser scanner* possibilitam a representação de superfícies em três dimensões (x, y, z), a visualização e análise das estruturadas levantadas com rapidez, precisão e segurança.

Esses aparelhos emitem um pulso de laser, que registam a distância entre o aparelho e o objeto ou feição selecionado e a direção no espaço dessas observações. O pulso é emitido por meio de um transmissor e recebe o mesmo pulso refletido e a partir desse procedimento é possível calcular a distância entre o aparelho e o objeto ou feição (GONÇALVES, 2007).

Apesar de ser uma tecnologia recente, já existem no mercado vários tipos de *laser scanners*, variando desde as características do sistema de varredura, passando pelo princípio de medição da distância, até a velocidade e intervalos de medida. A exatidão e a quantidade de pontos medidos variam de acordo com o modelo do scanner (WUTKE, 2006). Pode-se

citar dois tipos de sistemas de varredura a laser: os sistemas estáticos e os sistemas dinâmicos aerotransportados por aeronaves e/ou helicópteros. O scanner utilizado neste trabalho é do tipo estático com sistema de intervalo de tempo decorrido desde o envio do pulso até o seu retorno. O instrumento registra o tempo e os parâmetros de altitude do feixe, que são coordenadas do ponto em relação ao referencial do laser. A partir dos dados coletados da varredura é possível calcular a distância e depois as coordenadas tridimensionais dos pontos medidos em relação ao sensor.

Existem sistemas que são baseados na diferença de fase, onde a distância é calculada em função da diferença de fase da onda modulada, onde a medida de diferença de fase, entre os sinais transmitidos e refletidos, da parte fracional do comprimento total, é menor que o valor da parte inteira do comprimento de onda modulada (MAIA, 1999).

Outros sistemas são baseados no princípio da triangulação (BOEHLER et al, 2001). Um pulso de laser é emitido pelo sistema e a luz refletida pelo objeto é registrada por um ou mais sensores CCD's (Charge Coupled Device) de câmaras digitais. O ângulo de varredura dos pulsos é registrado no sistema *laser scanner* a cada pulso emitido. Conhecendo-se a base fixa entre o sensor laser e a câmara, por meio de um processo de calibração determina-se a posição dos pontos refletidos pelo objeto. A geometria entre o emissor laser e o sensor CCD é conhecida e permite o cálculo das coordenadas tridimensionais dos pontos iluminados pelo feixe laser utilizando os conceitos da intersecção fotogramétrica. A precisão da reconstrução do modelo do objeto depende de elementos geométricos semelhantes, como a relação base/distância (TOMMASELLI, 2003).

3.7 Modelos Digitais de Elevação (MDE)

Modelo Digital de Elevação (MDE) se define como uma estrutura numérica de dados que representa a distribuição espacial da altitude da superfície do terreno. De forma geral a unidade básica de informação de um MDE é um valor de altitude, z , a que acompanha os valores correspondentes de x e y , expressados em um sistema de projeção geográfica para uma precisa representação espacial. Os modelos digitais de elevação são divididos basicamente em dois grupos em função da concepção básica da representação dos dados: vetorial e raster. Os modelos vetoriais estão baseados em entidades, basicamente pontos e linhas, definidas por suas coordenadas. Nos modelos raster, os dados interpretam como o valor médio de unidades elementares de superfície não nula que tecem o terreno com uma distribuição regular, sem sobreposição e com recobrimento total da área representada (FELICÍSIMO, 1994).

No Brasil a fonte de dados mais comum para geração de MDEs ainda são as curvas de nível e, de forma complementar, a rede hidrográfica, obtidas em cartas topográficas, principalmente aquelas elaboradas pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE; entretanto, as escalas normalmente disponíveis não são adequadas para estudos mais detalhados; por esta razão, dados oriundos de imagens de sensores remotos estão sendo cada vez mais utilizados para a geração desses modelos (CHAGAS et al., 2010).

4. MATERIAS E MÉTODOS

4.1 Características da região e área de estudo

O município de Vassouras está localizado na região do Médio Vale do Paraíba do Sul (Figura 1). Tem uma população de aproximadamente 34.000 habitantes e uma extensão territorial de aproximadamente 552 km² (IBGE, 2009). Localiza-se na latitude de 22°24'14"

Sul e longitude 43°39'45" Oeste. A altitude média é de 434 metros e o clima, segundo metodologia de Köppen (1948), é Cwa – tropical de altitude. A precipitação média anual de 1.284 mm, com temperatura média anual de 20,8°C, sendo a temperatura máxima e mínima, respectivamente, 24,0°C e 17,2°C.

Com relação à vegetação, o município está inserido no domínio da Mata Atlântica, caracterizado por Floresta Estacional Semidecidual. Os solos predominantes na região são Latossolo, Cambissolo e Argissolo (CALDAS, 2006).

A geologia da região faz parte do Complexo Paraíba do Sul, do período arqueano (entre 3,85 a 2,5 bilhões de anos atrás), com ocorrência de gnaisses bandados predominantemente tonalíticos, migmatitos, em geral estromáticos, com ampla catáclase e recristalização, com foliação de plano axial de forte ângulo e evidências de transposição e lentes de quartzito (RADAMBRASIL, 1983). Atualmente o município tem sua economia sustentada pela área de serviços na educação, turismo, agricultura (olericultura), pecuária leiteira e por uma incipiente exploração silvicultural (IBGE, 2009).



Figura 1 - Localização do Município de Vassouras no Rio de Janeiro.

Para conhecer a dinâmica das feições erosivas no espaço e no tempo, foi delimitado, por meio de imagens orbitais disponíveis no Google Earth, a área plana das duas feições erosivas estudadas nos anos de 2002, 2006 e 2011 e então calculado a área das voçorocas.

Para o levantamento de dados no campo foram utilizados os equipamentos GNSS (*Global Navigation Satellite Systems*) da marca *Leica* modelo 1200x, que coleta pontos na área com alta precisão e um *laser scanner* modelo *Quarryman Pro* da marca MDL.

O *laser scanner* (Figura 2) gera uma nuvem de pontos com coordenadas X, Y e Z (latitude, longitude e altitude) sobre uma superfície. Através de pulsos de laser, que são gerados e emitidos pelo sistema, e com auxílio de um espelho de varredura, estes são direcionados, atingindo a superfície dos objetos em vários pontos. Estes objetos refletem o pulso incidente e parte do pulso volta para o sistema. Com isto, a distância entre o sensor e o objeto é determinada através do intervalo de tempo entre a emissão e a reflexão (retorno) do pulso (DALMOLIN; SANTOS, 2004).



Figura 2 - *Laser scanner* utilizado nesse estudo. Ao fundo pode-se observar uma das voçorocas que foram varridas.

O critério usado para escolha das voçorocas do presente estudo foi a dimensão da feição e a sua localização, já que muitas destas estão localizadas em áreas de difícil acesso e dentro de propriedades privadas. Foram escolhidas duas voçorocas, situadas no município de Vassouras, denominadas voçoroca 1 e voçoroca 2 (Figuras 3 e 4).



Figura 3 - Voçoroca 1 na imagem do sensor Geoeye (Google Earth, 2011).



Figura 4 - Voçoroca 2 na imagem do sensor Geoeye (Google Earth, 2011).

Coletou-se coordenadas com GPS geodésico nos locais onde foi estacionado o *laser scanner* e um ponto de referência para orientação do equipamento (Figura 5).



Figura 5 - GPS geodésico.

Na etapa seguinte foi realizada a configuração do equipamento para determinar a área de varredura do *laser scanner*. Na Voçoroca 1 e 2 foram feitas duas varreduras, sendo que o equipamento foi configurado usando o modelo de varredura em retângulo com distância entre pontos de 20cm, isto é, o aparelho fez o levantamento de pontos de 20 x 20 cm tanto na direção horizontal como na vertical (Tabela 1).

Tabela 1 - Distância entre pontos e número de pontos coletados.

Voçoroca	Varredura	Configuração	Número de pontos coletados
Voçoroca 1	1 ^a	20 x 20 cm	171.474
	2 ^a	20 x 20 cm	256.422
Voçoroca 2	1 ^a	20 x 20 cm	135.105
	2 ^a	20 x 20 cm	164.262

Após o trabalho de campo os dados foram transferidos para computador e processados no software da MDL Model 1.10. O arquivo gerado na varredura possui uma grande quantidade de pontos que foram refletidos fora da área de interesse devido a configuração de varredura do aparelho (retângulo). Os pontos gerados fora da região de interesse foram excluídos e então o arquivo resultante foi exportado para o formato dxf.

Para ter uma maior precisão das informações obtidas a partir dos modelos digitais de elevação é necessário um modelo confiável e que mais se aproxime da realidade. Para tanto, foram gerados três MDEs em programas diferentes, para cada voçoroca, e a partir desses foram retirados dados altimétricos de pontos com coordenadas x e y já conhecidos, tendo-se então valores reais que podem ser comparados com valores estimados pela interpolação de pontos.

Para avaliação da qualidade dos Modelos Digitais de Elevação (MDE) foram realizadas interpolações em três softwares, sendo: ArcGIS versão 10.0, desenvolvido pela ESRI; MicroStation versão 08.09, desenvolvido pela Bentley Systems; e FUSION versão

3.10, desenvolvido pelo Serviço Florestal do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos. O ArcGIS e o Microstation são softwares pagos e o FUSION possui licença gratuita.

A variação da interpolação em diferentes softwares possibilita uma avaliação da qualidade dos modelos gerados, isto porque cada software usa um algoritmo diferente para interpolação dos dados, fazendo com que os dados estimados sejam mais ou menos próximos ao seu valor real.

O programa ArcGIS 10 utiliza o algoritmo *Topogrid* e interpolou os pontos gerando um arquivo raster de células com dimensões de 10 cm de aresta.

Para geração do MDE no MicroStation foi utilizado a extensão Geopak, também elaborado pela Bentley Systems. Foi importado o arquivo de pontos no formato dwg, e então gerado um TIN (*Triangular Irregular Network*) a partir da nuvem de pontos. A partir do TIN foi gerado um Lattice, que propicia a suavização das complexidades do relevo, proporcionando um efeito visual mais próximo do real. O Lattice é uma malha de linhas georreferenciada com coordenadas nos planos x, y e z, variando sua complexidade de acordo com a necessidade de detalhes exigida pelo usuário (Figura 6). Quanto maior a riqueza de detalhes, maior é o tempo de processamento dos dados até o resultado final.

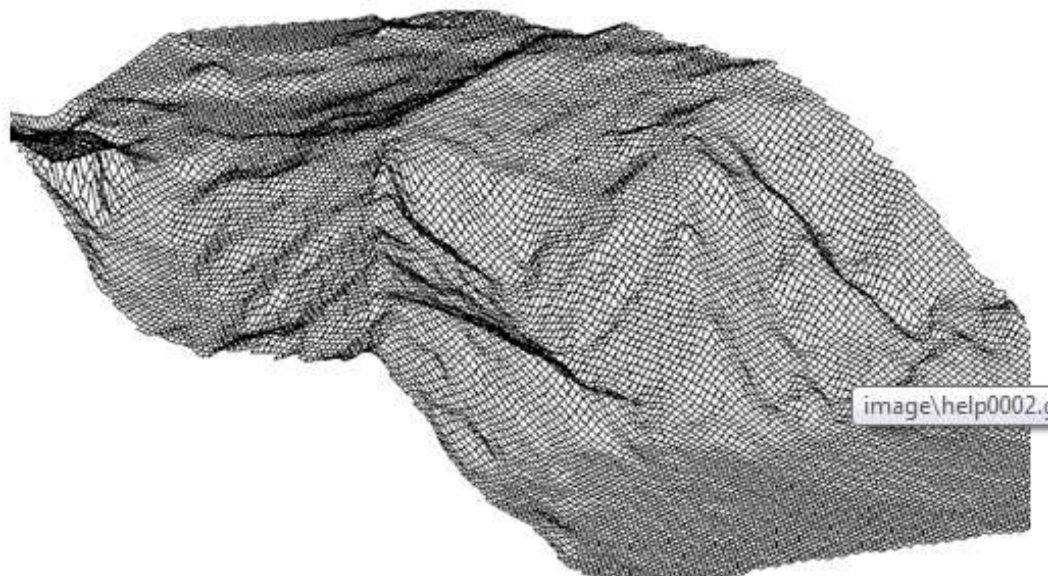


Figura 6- Exemplo de malha Lattice.

Para o processamento dos dados no software FUSION foi necessário a utilização de uma imagem georreferenciada, o que não é exigido nos outros softwares, para situar o arquivo de pontos. Para trabalhar com os dados, o arquivo deve estar no formato “.lda” ou “.LAS”. Gera-se a partir dos pontos um MDE, posteriormente exportado para ASCII. Esta última extensão possibilita o manuseio dos dados junto ao ArcGIS, podendo-se posteriormente lançar mão de ferramentas para extração de informações e avaliação dos modelos.

Os MDEs gerados por esses softwares foram então importados no ArcGIS para comparação dos resultados. Para tal procedimento foram extraídos pontos de controle da nuvem de pontos original, estando estes pontos situados do lado interno do limite traçado para cada voçoroca. Com a ferramenta *Extract Multi Values to Points* do ArcGIS, foi extraído os valores de elevação dos rasters gerados para então comparar estes valores estimados com os valores reais obtidos no escaneamento. Essa comparação foi realizada por meio da média dos resíduos em módulo. Para um melhor embasamento e comparação dos modelos digitais

obtidos, foram gerados perfis topográficos a partir dos MDEs para facilitar a comparação entre os modelos.

Para obtenção do volume de solo perdido no período em estudo, foi utilizado a ferramenta *surface volume* da caixa de ferramentas do ArcGIS. Foi adicionado o MDE recortado pelo limite da feição erosiva em *shapefile* para calcular apenas o volume da área de interesse.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Voçoroca 1

5.1.1 Estimativas da área plana e do volume

Através do uso das imagens de alta resolução espacial foi possível determinar que a área plana da voçoroca 1 nos anos de 2002, 2006 e 2011 apresentou um incremento positivo de 444 m², o que representa um aumento de 13% em nove anos, demonstrando tratar-se de uma feição extremamente ativa (Tabela 2).

Tabela 2 - Dinâmica da área plana da voçoroca 1.

Ano	Área (m ²)
2002	3.391
2006	3.534
2011	3.835

Nessa voçoroca, o *laser scanner* foi configurado para realizar varredura de 20 x 20 cm, gerando uma nuvem de pontos que continham informações tridimensionais de cada região onde o feixe de laser conseguiu atingir (Figura 7). Realizou-se uma varredura em junho de 2010, com 171.474 pontos e outra em maio de 2011, com 256.422 pontos. Essa diferença na quantidade de pontos se deve a fatores intrínsecos do programa de processamento (MDL), que diagnostica determinados números de pontos inconsistentes, denominados de “bad”, que ocorrem devido a variações nas propriedades de reflectância da superfície da voçoroca. Uma chuva, por exemplo, no dia anterior à leitura, pode diminuir essa propriedade da superfície do solo da voçoroca. Demattê et al. (1998) verificaram que o aumento no teor de umidade promoveu uma diminuição na magnitude da reflectância espectral nos solos entre 400 e 2500 nm, bem como bandas de absorção mais acentuadas em 1400 e 1900 nm.

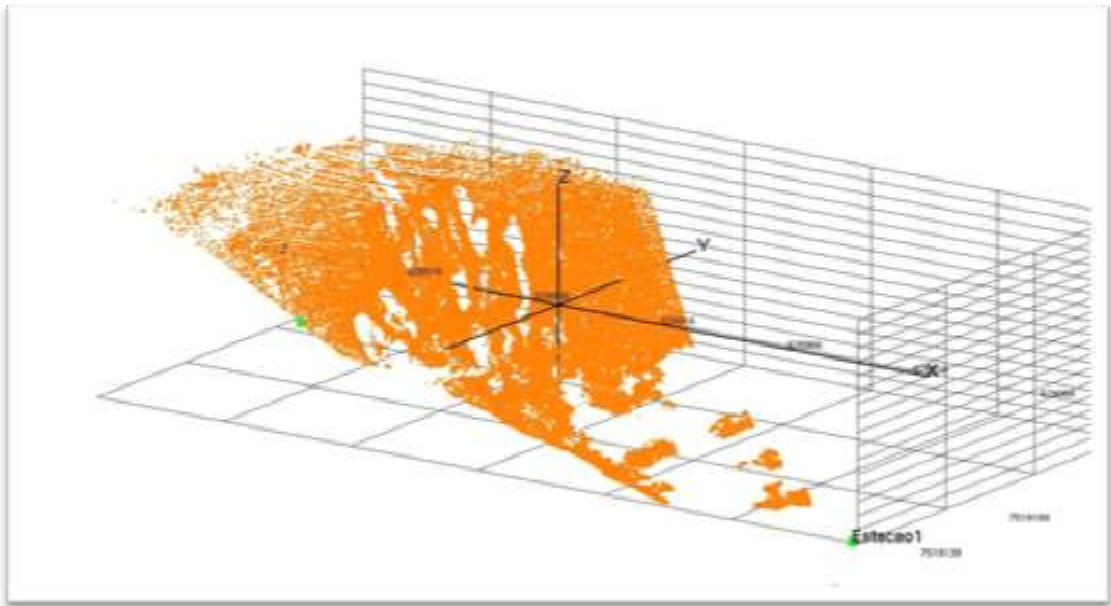


Figura 7- Nuvem de pontos da voçoroca 1 de maio de 2011.

Devido à posição do equipamento, alguns locais da voçoroca ficaram descobertos, o que foi compensado através da interpolação dos pontos, que gerou uma grade contínua. Porém, recomenda-se realizar três varreduras em diferentes posições, uma a esquerda e outra a direita a partir de um ponto central, de forma a cobrir o terreno em todos os ângulos possíveis. Outra recomendação é cobrir uma área maior que aquela ocupada apenas pela voçoroca, de forma a levantar também a área de contribuição.

A partir da nuvem de pontos foi gerado um modelo digital de elevação com células de 10 x 10 cm, possibilitando-se estimar o volume da voçoroca em cada varredura (Tabela 3).

Tabela 3 - Estimativa do volume da voçoroca 1.

Descrição	Área 2D (m ²)	Área 3D (m ²)	Volume (m ³)
1ª Varredura (06/2010)	3.030,13	7.210,10	92.257,38
2ª Varredura (05/2011)	5.027,40	10.859,82	181.971,10



Figura 8 - Foto em maio de 2010.

Nota-se que o incremento no volume no período foi de 89.713,72 m³, o que representa um aumento de aproximadamente 97%. Como o aumento da área plana foi de 39% no período de um ano, isso mostra um aprofundamento da voçoroca, o que pode ser verificado através de perfis topográficos mostrados mais adiante.

No trabalho realizado por Dean (2010) na Região da Costa Oeste na Ilha da Nova Zelândia no levantamento de voçorocas utilizando *laser scanner* terrestre, foi encontrado um volume de 95.198 m³ de solo perdido no período de 2007 a 2008, valor próximo ao encontrado para essa voçoroca.

Observa-se na Figura 8 a alta declividade ao redor da área da voçoroca, que são novas regiões susceptíveis a sofrerem degradação (marcadas com círculos azuis). A área com menor declividade na parte inferior da encosta refere-se a rampa de deposição pediplanada.

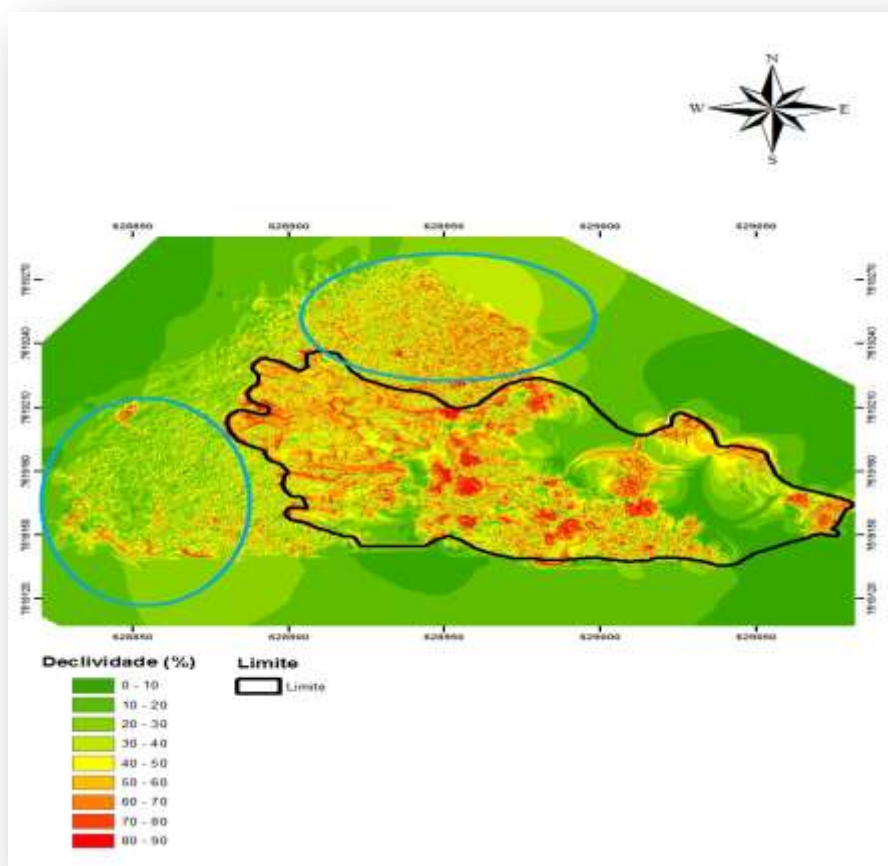


Figura 9 - Mapa de declividade da voçoroca 1. Destaque em azul para áreas susceptíveis a expansão da voçoroca.

5.1.2 Avaliação dos MDEs

Para o estudo do relevo acidentado dessas feições necessita-se da elaboração de MDEs para uma avaliação tridimensional da feição simulando a sua situação real. A partir desses modelos, pode-se acompanhar o aumento do volume, já que são estruturas dinâmicas e estão em constante modificação.

Foram gerados perfis topográficos por meio de transectos traçados em três regiões para analisar a variação do relevo em cada MDE, como apresentado a seguir (Figura 9).

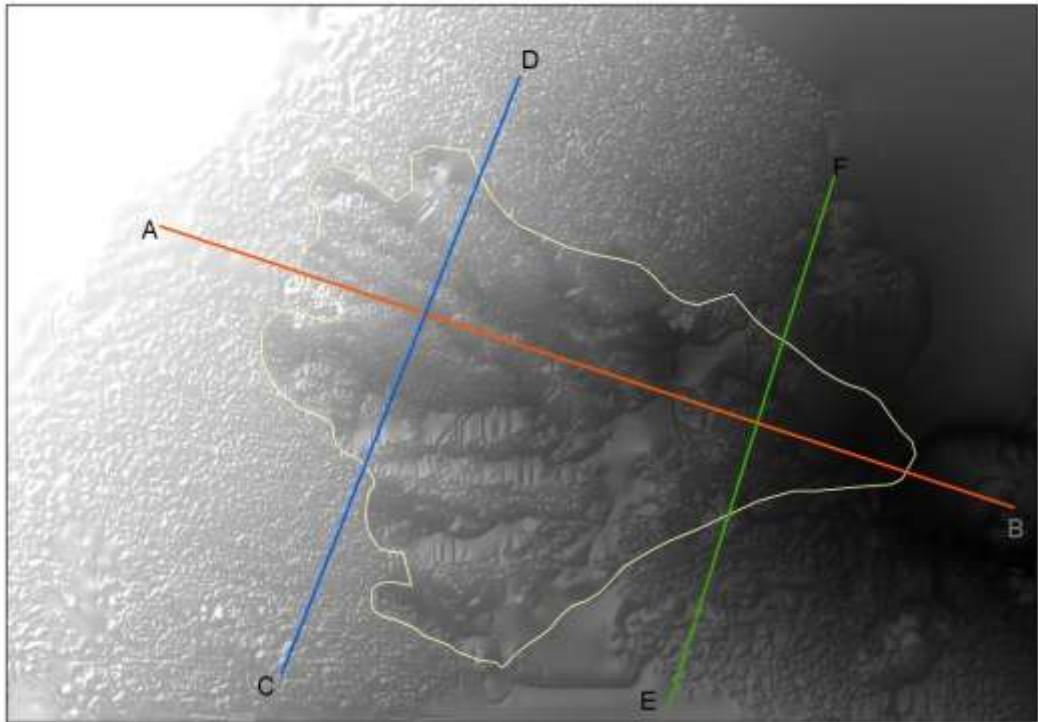


Figura 10 - Esquema de localização dos perfis topográficos.

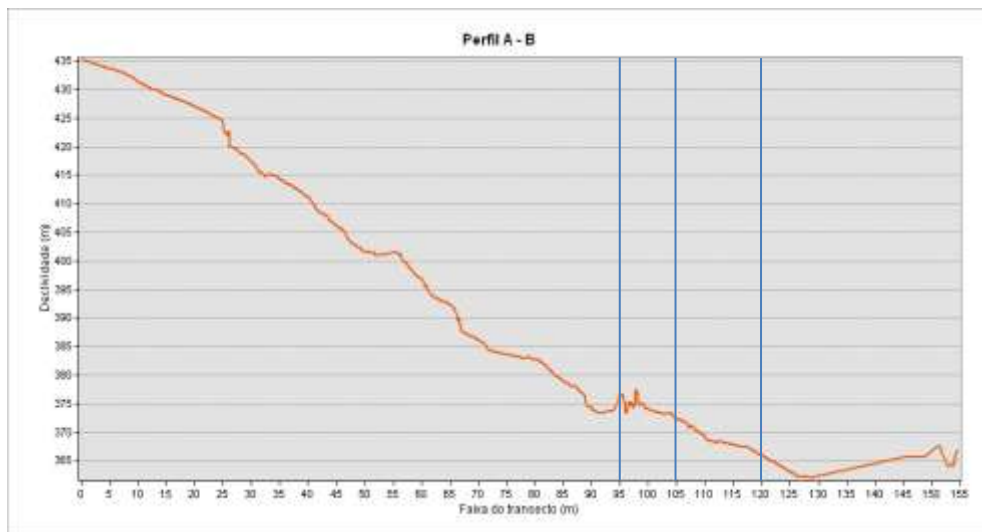
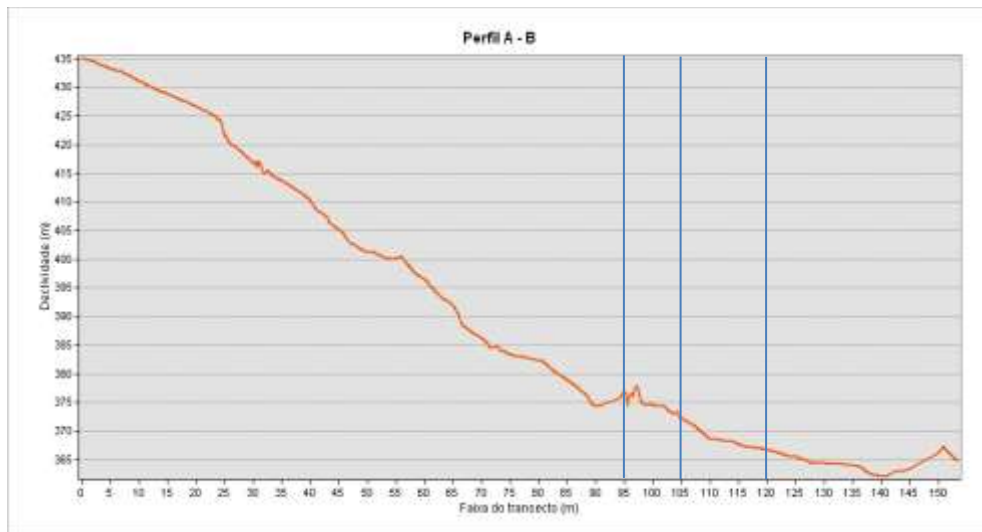
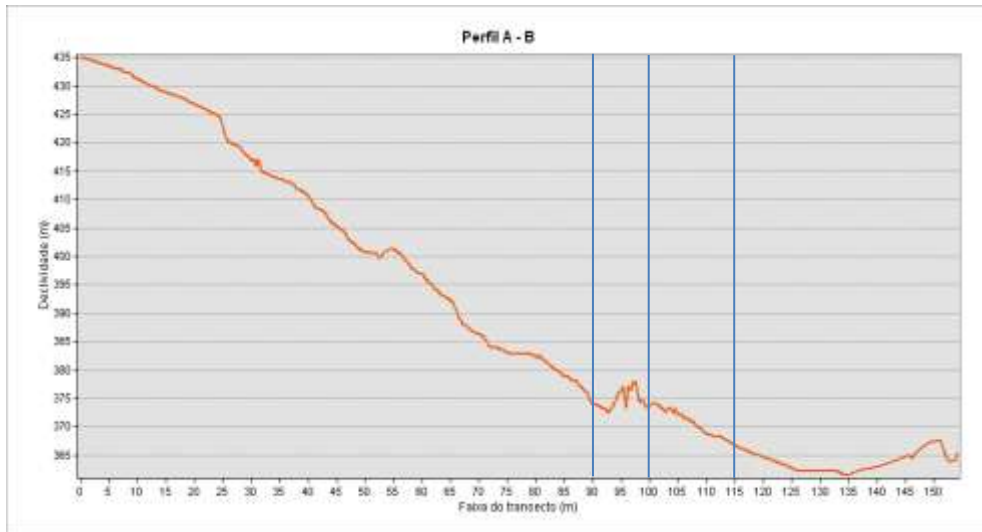


Figura 11 - Perfil A – B dos MDEs dos softwares ArcGIS, FUSION e MicroStation respectivamente. Destaque em azul para as áreas com variação entre os perfis topográficos.

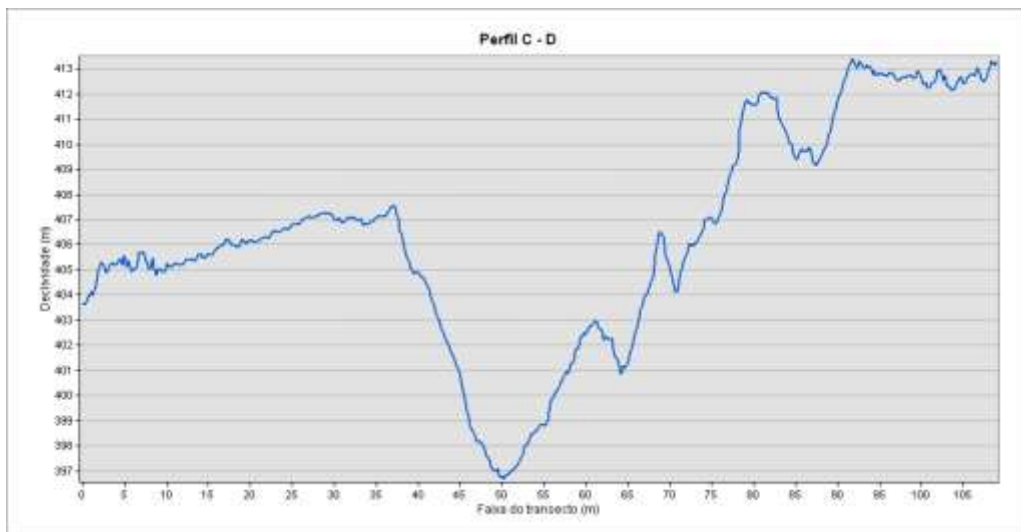
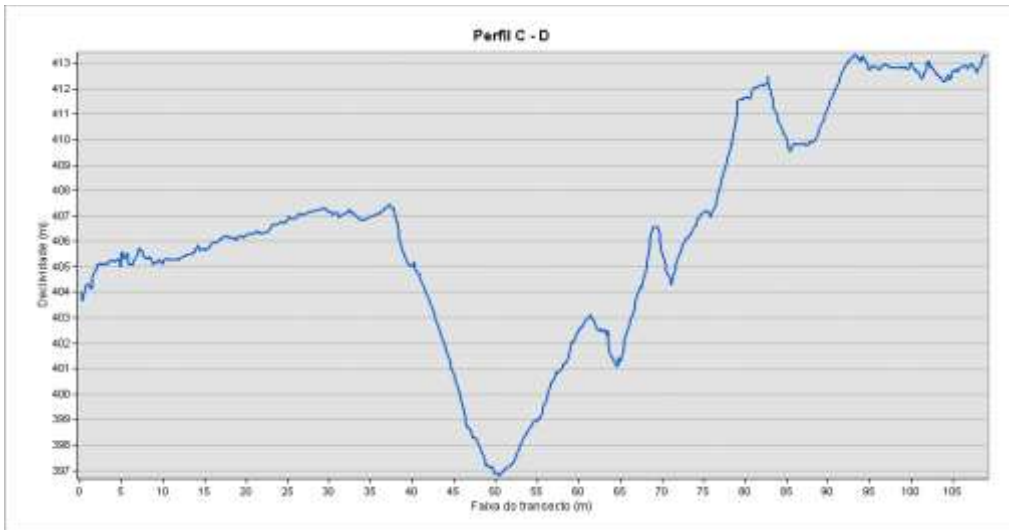


Figura 12 - Perfil C – D dos MDEs dos softwares ArcGIS, FUSION e MicroStation respectivamente.

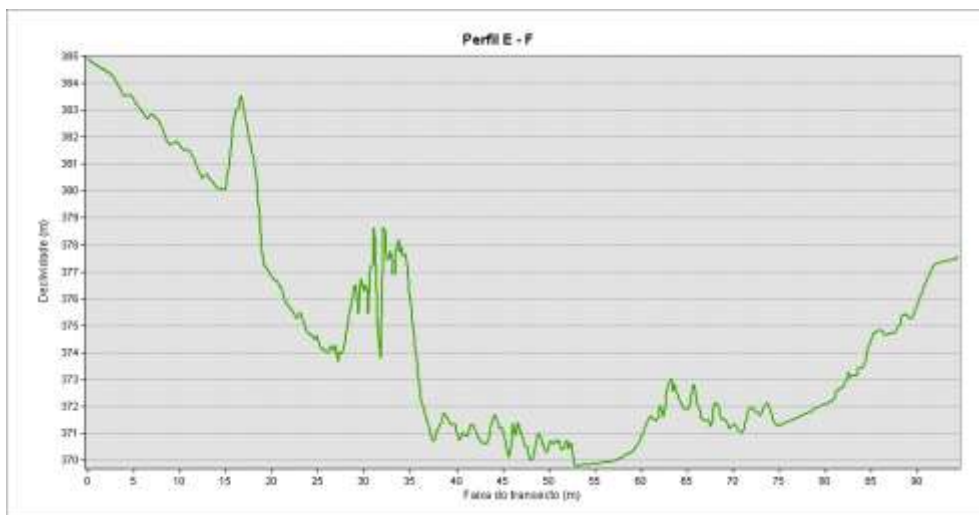
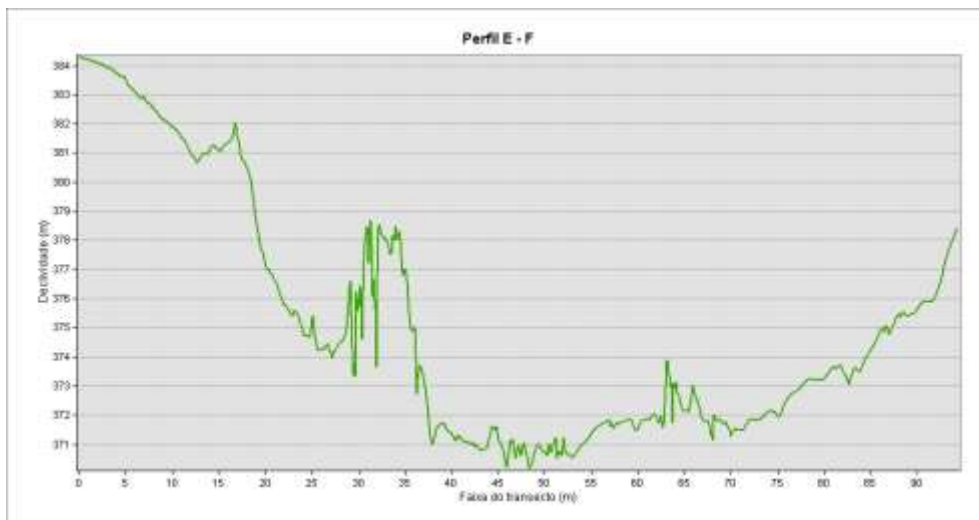


Figura 13 - Perfil E – F dos MDEs dos softwares ArcGIS, FUSION e MicroStation respectivamente.

Analisando os perfis topográficos do transecto A-B, entre os intervalos 90 a 100 metros, pode-se observar uma mudança suave na modelagem do terreno no terço inferior, na formação de um pequeno pico. Outro local que houve uma discrepância, ainda no transecto A-B, foi a partir do ponto 115m. Observa-se que essa foi a região com maior variação entre os três perfis topográficos com relação a esse transecto.

Os perfis topográficos gerados a partir do traçado feito no terço superior da voçoroca foram denominados de C-D. Observa-se que entre os três perfis gerados nos diferentes MDEs, o ArcGIS gerou um modelo que contém um maior detalhamento, mostrado pelas diversas irregularidades, já que se trata da representação de uma feição exposta a efeitos naturais, ainda mais quando esses efeitos são intensivos, como os processos erosivos. A angulação de alguns pontos é algo importante a ser observado, já que se espera curvaturas mais acentuadas e menos pontiagudas quando se trata de um solo.

O traçado feito no terço inferior da voçoroca, denominado de transecto E-F, apresentou uma grande variação em todo o seu trajeto, quando se compara os três gráficos. Essa grande variação será explicada posteriormente através da análise dos resíduos gerados.

Para compreender melhor da variação dos dados gerados, foram calculados os resíduos (em metros), que podem ser observados através da distribuição relativa dos resíduos nos gráficos construídos para esta voçoroca em cada software (Figura 13).

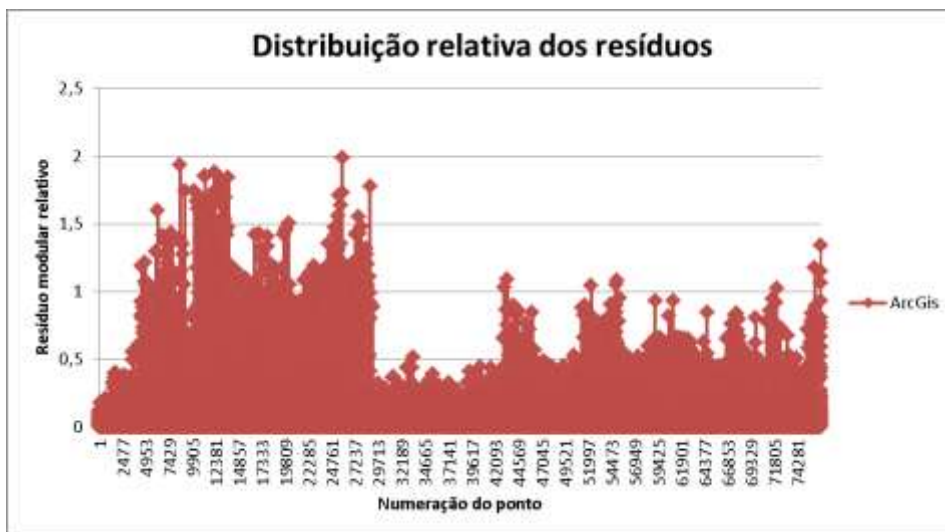


Figura 14 - Representação gráfica da distribuição modular relativa dos resíduos no ArcGIS.



Figura 15 - Representação gráfica da distribuição modular relativa dos resíduos no FUSION.



Figura 16 - Representação gráfica da distribuição modular relativa dos resíduos no MicroStation.

Os pontos foram ordenados em ordem crescente em função dos seus valores altimétricos. Pela distribuição dos resíduos nos gráficos apresentados, observa-se uma tendência dos maiores resíduos estarem concentrados na região mais baixa da voçoroca. No gráfico de distribuição dos resíduos gerados no ArcGIS, os pontos com maiores valores residuais chegaram a aproximadamente 2 metros. O gráfico de resíduos gerados no FUSION mostra que os outliers chegam a 3 metros, enquanto no MicroStation os outliers ficaram abaixo desse valor, porém com maior número de pontos, o que eleva a média do resíduo.

A tendência dos resíduos localizarem-se na parte mais baixa da voçoroca pode ser justificado pela distribuição dos pontos na nuvem, mostrando que as áreas com menor recobrimento no escaneamento se localiza na região mais baixa. Isto mostra que houve estimativas menos acuradas dos pontos altimétricos, durante a interpolação (Figura 16). Isso explica porque os perfis topográficos do terço inferior foram os que menos se aproximaram um do outro.

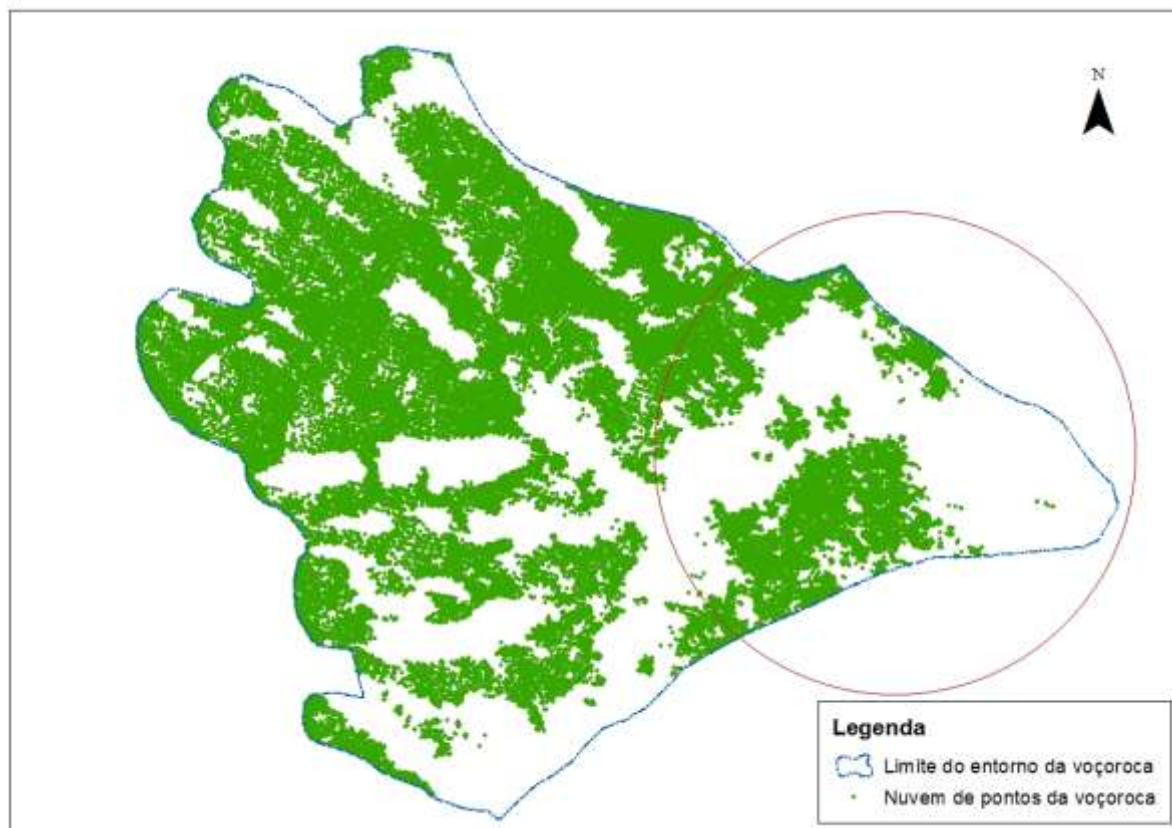


Figura 17 - Nuvem de pontos da voçoroca 1. Destaque em vermelho para área com menor recobrimento.

Lopes et al. (2006) realizou um trabalho similar e fez algumas observações na geração de modelos numéricos de terreno a partir de curvas de nível com equidistância de 5 m para uma bacia hidrográfica do Córrego das Pedras na Baixada Santista, no município de Cubatão, SP. Um aspecto importante no método de triangulação para criar Modelo Numérico de Terreno (MNT), a partir de mapas altimétricos, está relacionado à insuficiência de pontos cotados em regiões onde a topografia assume formas convexas e a distância entre as curvas torna-se grande, fazendo com que alguns triângulos tenham os mesmos valores de Z (cota) em seus vértices, os conhecidos “flat triangles”. Nestes casos, foram manualmente criados pontos com cotas intermediárias entre as isolinhas.

No caso do presente trabalho é inviável inserir pontos com cotas manualmente. Como proposto por Lopes et al. (2006), o ideal é realizar mais de uma varredura da voçoroca em outros dois ângulos, fazendo com que as nuvens de pontos geradas sejam amarradas e os locais antes descobertos em alguma varredura, sejam completados.

Foi calculada a média dos resíduos modulares relativos, para avaliar quais dos MDEs contêm informações tridimensionais mais próximas do valor real. O ArcGIS teve um resíduo modular relativo de 0,0598 m; o FUSION obteve 0,0891 m e 0,1355 m para o MicroStation. Dentre eles, o ArcGIS foi o que teve o menor valor, indicando que este seria o melhor resultado obtido em relação aos demais.

5.2 Voçoroca 2

5.2.1 Estimativas da área plana e do volume

O estudo da dinâmica da área plana no período de 2002 a 2011 para voçoroca 2 através de imagens de alta resolução espacial demonstrou (Tabela 4) um incremento de cerca de 778 m², o que representa 37% a mais. Esse aumento ocorreu principalmente na primeira fase, entre 2002 e 2006 provavelmente devido a um período com maior precipitação.

Tabela 4 - Dinâmica da área plana da voçoroca 2.

Ano	Área (m ²)
2002	2.075,43
2006	2.818,24
2011	2.853,85

A voçoroca 2 foi varrida usando-se a configuração de 20 x 20 cm, obtendo-se duas nuvens de pontos posteriormente interpolados para gerar uma malha contínua (Figura 17). Foram realizadas duas varreduras na voçoroca nos mesmos períodos da voçoroca 1 (Tabela5).

No período de um ano ocorreu um aumento de 8.712,53 m³ no volume de solos perdidos nessa voçoroca, o que representa um aumento de 14%. Esse forte incremento pôde ser verificado no campo, onde uma grande massa de solo desmoronou dessa voçoroca durante o último período chuvoso (Figuras 18a e 18b).

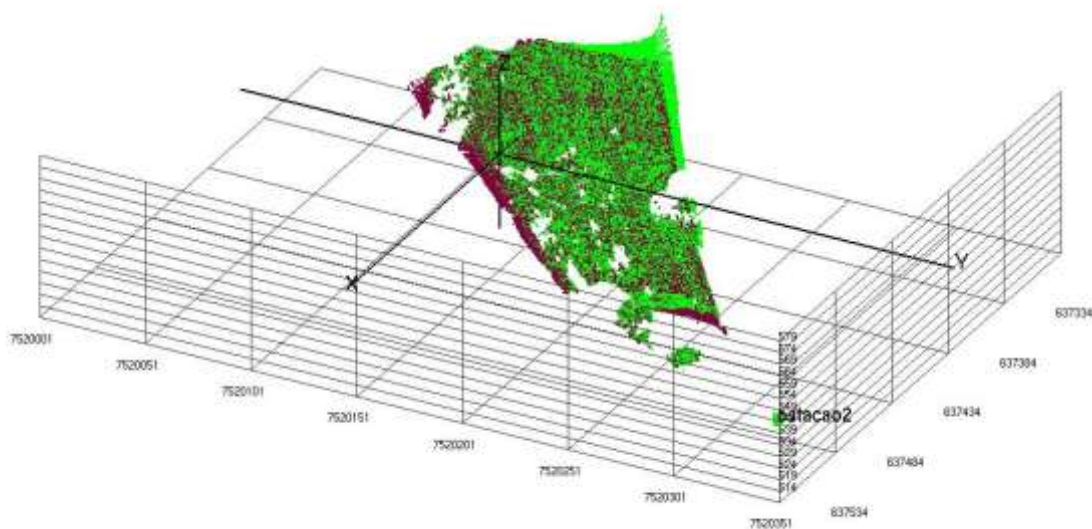


Figura 18- Nuvem de pontos da voçoroca.

Tabela 5 - Estimativa do volume da voçoroca 2.

Descrição	Área 2D (m ²)	Área 3D (m ²)	Volume (m ³)
1ª Varredura (06/2010)	2.000,72	3.613,45	61.242,29
2ª Varredura (05/2011)	2.187,48	3.632,21	69.954,82

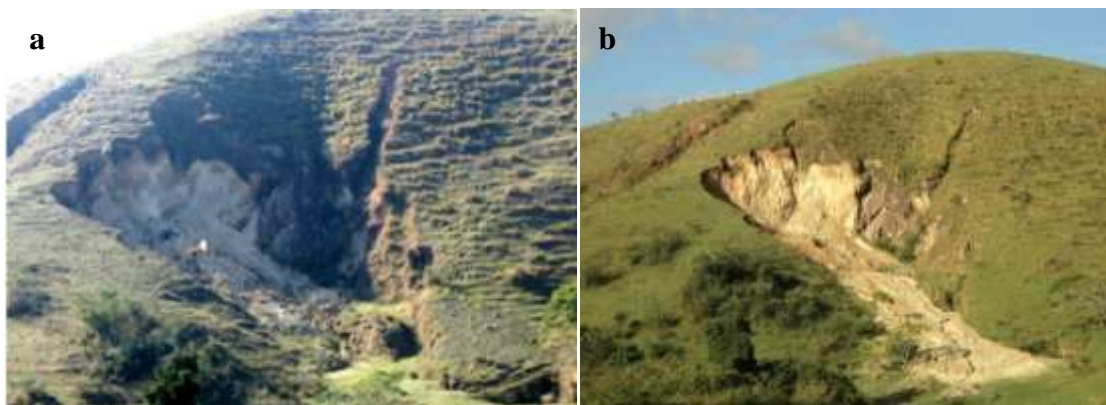


Figura 19 - a) Foto em maio de 2010 b) Foto de maio de 2011.

O tipo de curvatura da encosta é côncava e o solo é raso e sem estrutura, do tipo Cambisso Háplico Tb distrófico. Moura (2010) realizou um estudo na mesma área (Tabela 6) e observou que o solo apresenta estrutura dos agregados muito fraca e elevado teor de areia, além de ser raso, com profundidade de 25 cm.

O uso de pastagem com constante uso de fogo ao longo de muitos anos e o sobrepastejo favoreceu a aceleração do processo erosivo. O grande volume de solo perdido cobriu outras áreas com pasto, além de criar uma barreira à drenagem pluvial natural na microbacia.

Tabela 6- Análise da distribuição granulométrica dos horizontes. Fonte: Moura (2010).

Análise textural				
Horizonte	Profundidade (cm)	% Areia	% Silte	% Argila
Ap	0 – 7	55	24	20
BI	7 – 25	58	11	31
CR1	25 – 65	70	5	25
CR2	65 - 100 +	65	17	17

Silva et al. (2005) estudou os processos erosivos em Cambissolo Háplico Tb distrófico e Latossolo Vermelho distroférico, onde foi comparado as perdas de solo em diferentes estações chuvadas. Observou que houve maior perda nos Cambissolos, devido ao fato de serem rasos, ocasionando uma rápida saturação, favorecendo maior escoamento superficial e maior arraste de partículas. Essas características associadas a uma área sem cobertura vegetal e com uma declividade acentuada são muito propícias à ação de processos erosivos.

Pela nuvem de pontos foi possível gerar um modelo digital de elevação, com células de 10 x 10 cm. Foi sobreposto ao MDE uma imagem da voçoroca para melhorar a visualização da área em 3D com maior representatividade (Figura 19).



Figura 20 - Fotografia da voçoroca sobreposta ao MDE.

Um dos produtos obtidos através de MDEs são mapas de declividade. Para voçoroca 2 observa-se que a parte inferior do lado esquerdo da voçoroca é uma região com grande potencial para sua expansão devido também ao aumento da declividade, o que pode ocasionar novos colapsos dos solos dessa região (Figura 20).

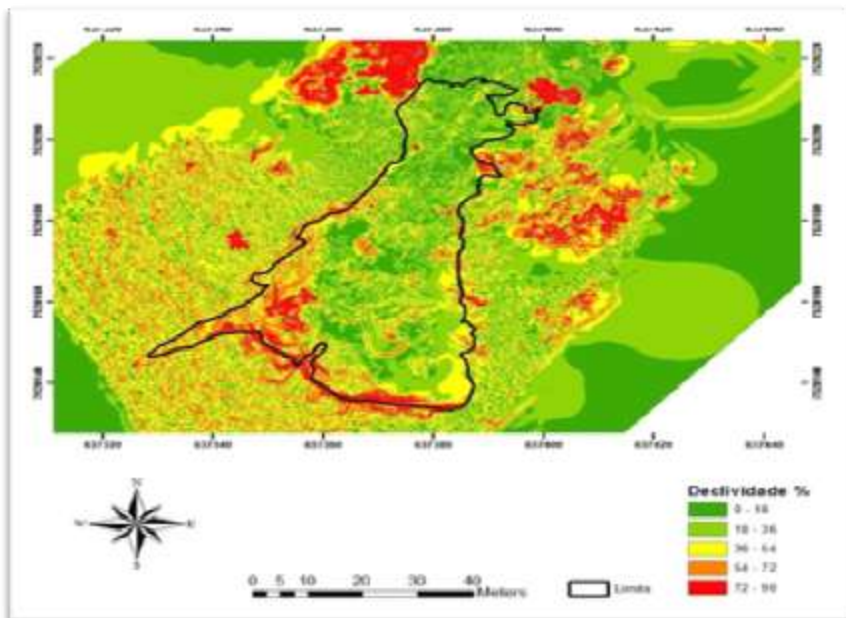


Figura 21 - Declividade da voçoroca 2.

5.2.2 Avaliação dos MDEs

O procedimento realizado para geração dos MDEs para voçoroca 2, foram os mesmos utilizados para voçoroca 1. Utilizou-se os três programas propostos, assim como para

avaliação dos resultados foram traçados três transectos e calculados os resíduos gerados (Figura 21).

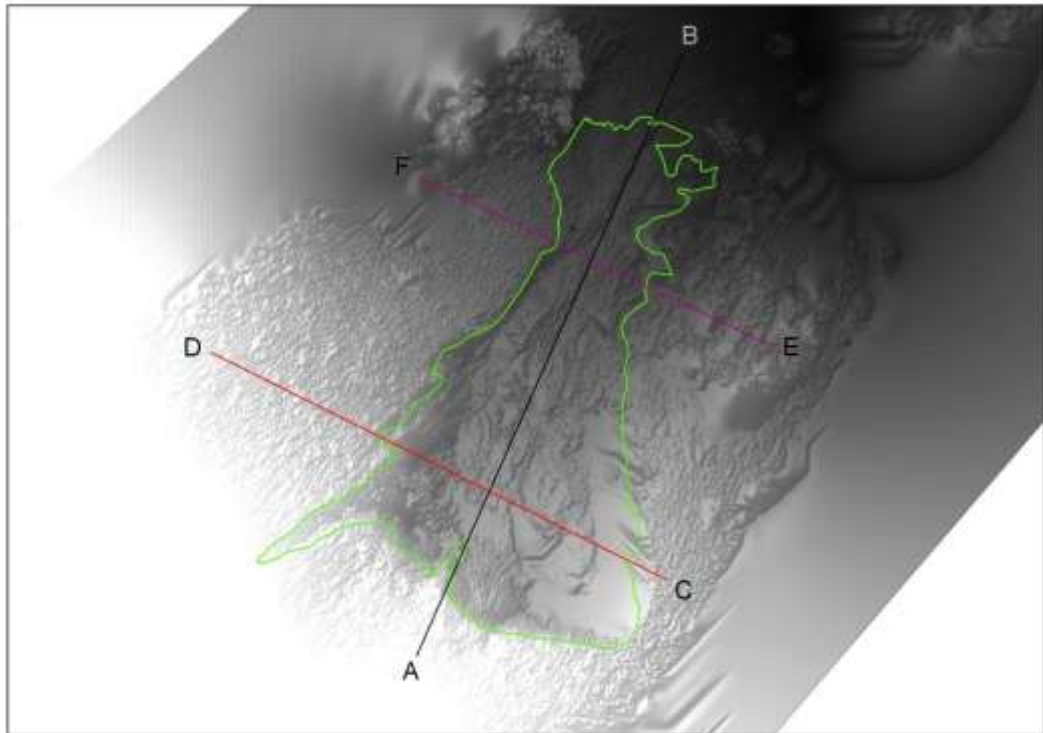


Figura 22- Perfis topográficos na voçoroca 2.

Os perfis topográficos gerados pelo transecto A-B não apresentaram uma diferença visualmente muito distintas entre eles. Como na voçoroca 1, no perfil topográfico gerado sobre MDE do ArcGIS observou-se um detalhamento maior do relevo, através de suaves ondulações presentes na voçoroca. Ondulações estas, que não foram bem representadas nos outros perfis (Figura 22).

O transecto C-D foi traçado na parte superior da voçoroca. Com relação aos perfis produzidos a partir deste transecto, percebe-se uma variação no trecho que vai de 10 a 18 metros. Esta região ficou bem desenhado pelo ArcGIS e pelo MicroStation, e pouco representada pelo FUSION (Figura 23).

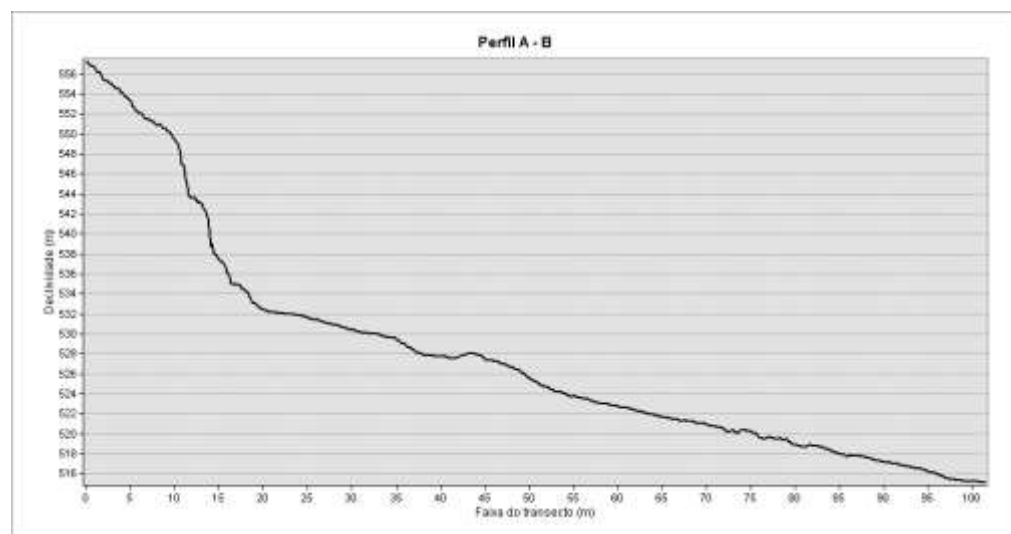
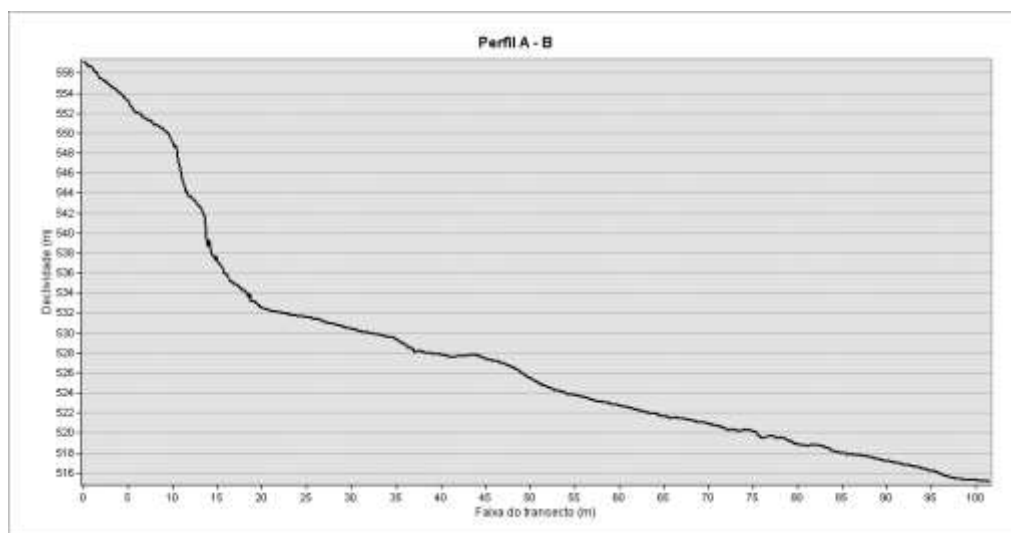
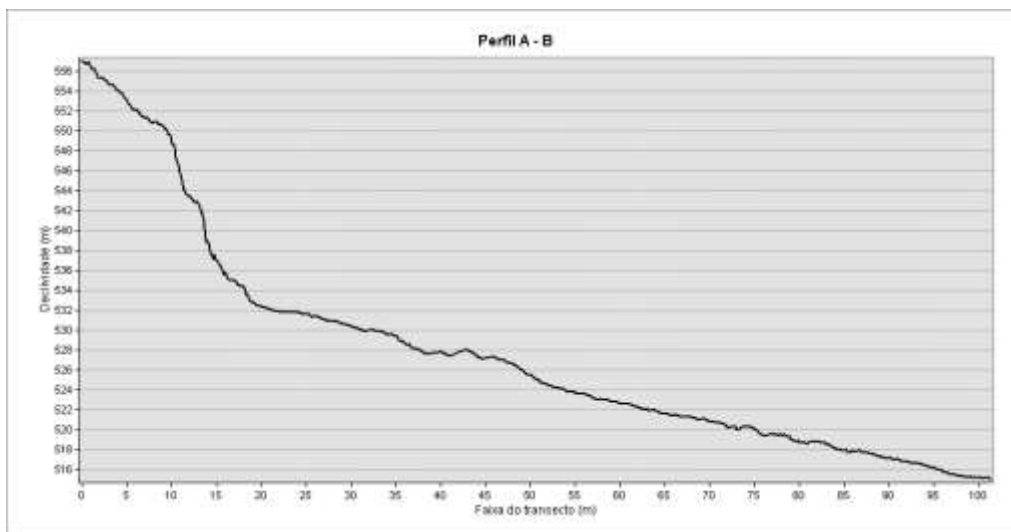


Figura 23 - Perfil A – B dos MDEs dos softwares ArcGIS, FUSION e MicroStation respectivamente. Destaque em azul para as áreas com variação entre os perfis topográficos.

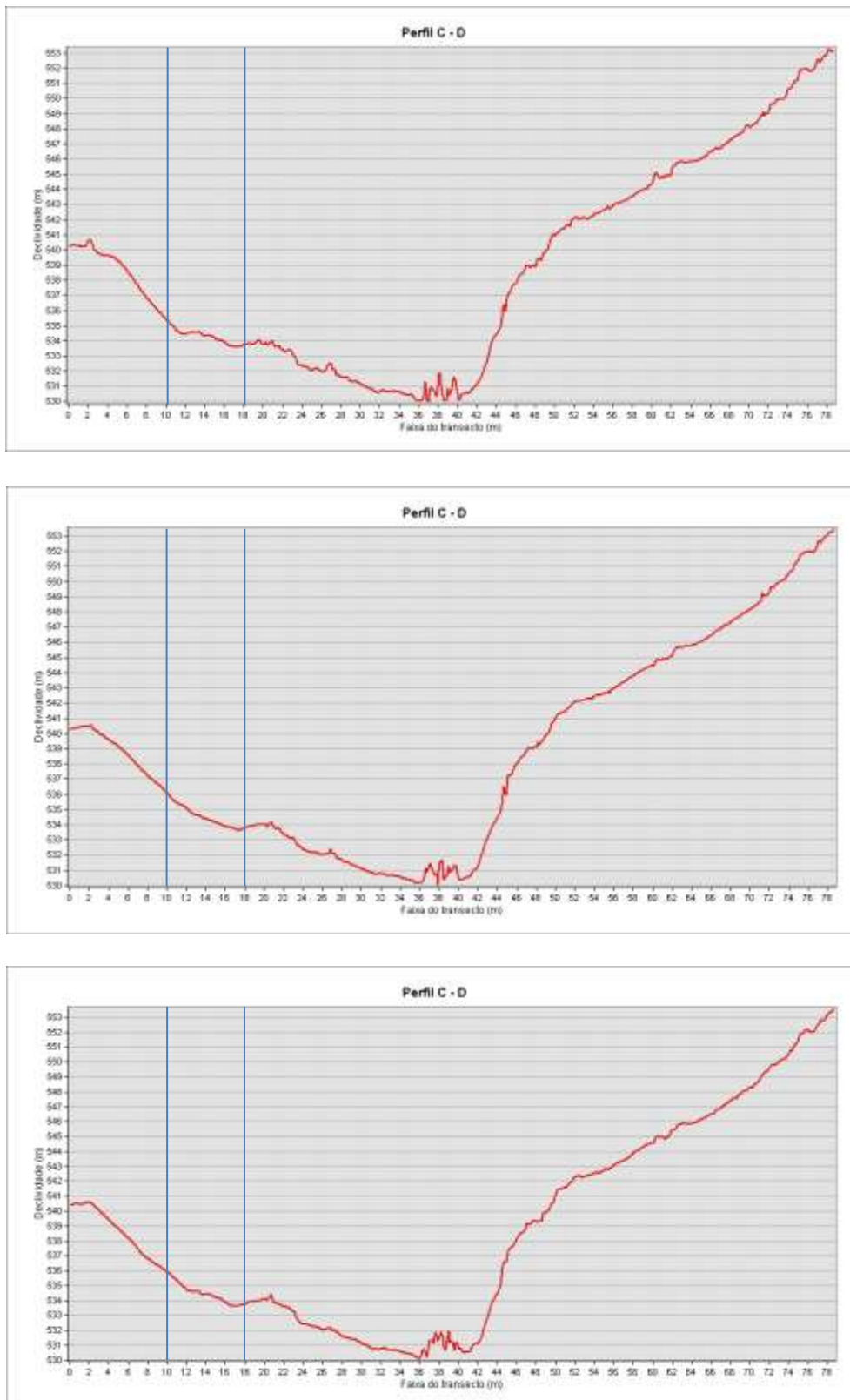


Figura 24 - Perfil C – D dos MDEs dos softwares ArcGIS, FUSION e MicroStation respectivamente. Destaque em azul para as áreas com variação entre os perfis topográficos.

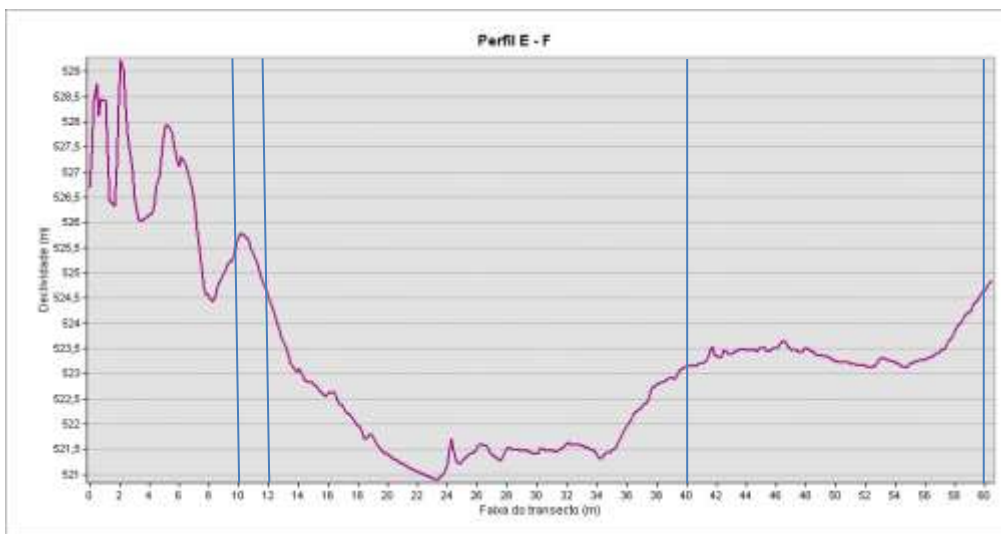
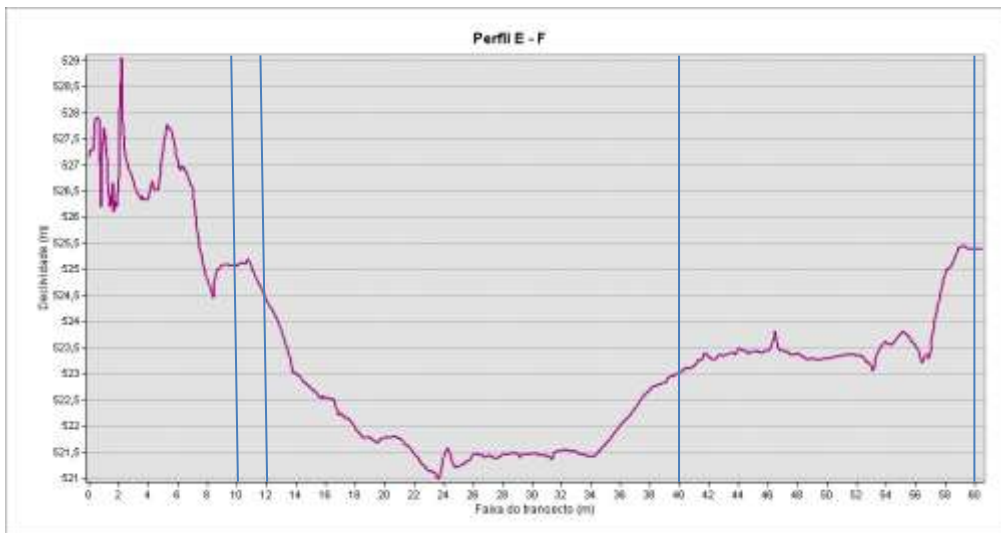
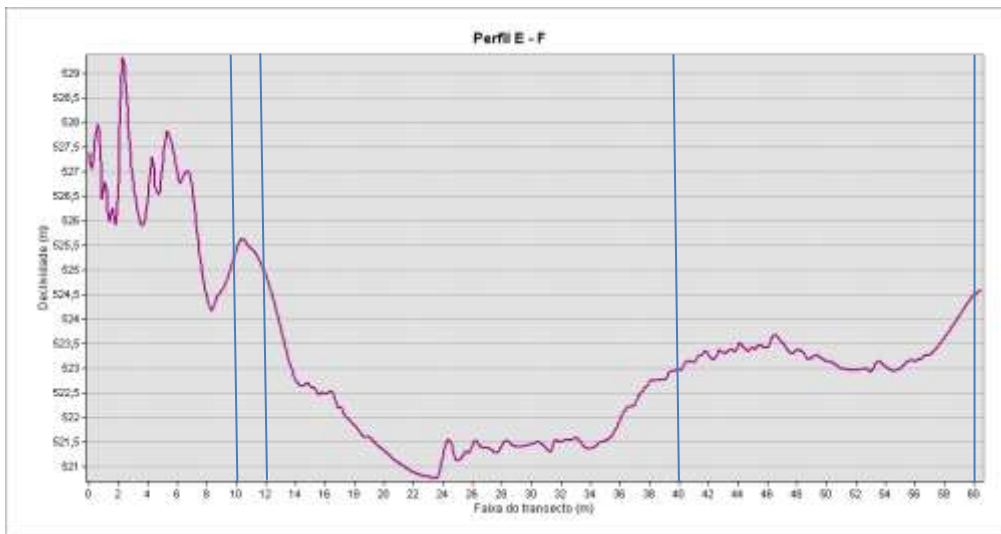


Figura 25 - Perfil E – F dos MDEs dos softwares ArcGIS, FUSION e MicroStation respectivamente. Destaque em azul para as áreas com variação entre os perfis topográficos.

Pela faixa compreendida de 10 a 12 metros representada nos perfis traçados a partir do transecto E-F, observa-se uma similaridade entre o traçado do ArcGIS e do MicroStation. Seguindo um pouco a diante, esta semelhança também se mostra do trecho 40 a 60 metros nestes mesmos softwares e variando no software FUSION (Figura 24).

Através dos perfis topográficos não se pode compreender qual foi a região da voçoroca que obteve maior diferenciação dos dados estimados em relação aos dados reais. Para tanto, foi calculado o resíduo modular dos MDEs elaborados em cada software, como realizado para voçoroca 1.

Usou-se os mesmos critérios adotados para voçoroca 1, quanto ao ordenamento dos dados altimétricos para o cálculo do resíduo. Estes estão ordenados do ponto de menor altitude para o de maior altitude.

Pelos gráficos apresentados nas Figuras 25, 26 e 27 logo se observa que os resíduos não ficaram tão tendenciosos como na voçoroca1, mas também não foram distribuídos uniformemente.

Os resíduos provenientes dos MDEs elaborados no ArcGIS mostra que os maiores resíduos ficaram na faixa próxima dos 0,6 metro. Enquanto que os maiores resíduos gerados da interpolação do FUSION ficaram próximos a faixa de 1 metro, sendo observado o mesmo para o MicroStation.

Os maiores resíduos ficaram situados na parte mais alta da voçoroca, a partir do ponto de número 13.105, aproximadamente. Isto pode ser observado no mapa logo abaixo, onde está sinalizado através de um círculo verde a área com menor recobrimento no escaneamento (Figura 28).

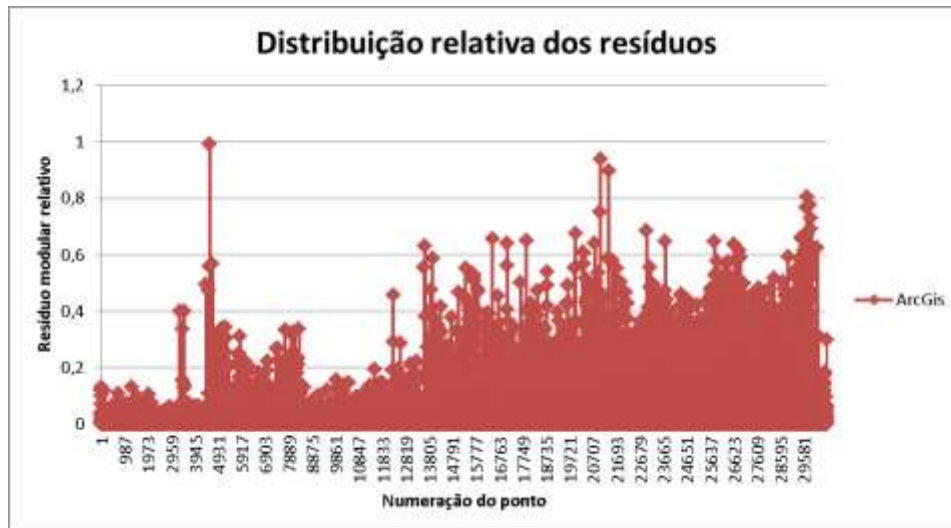


Figura 26 - Representação gráfica da distribuição modular relativa dos resíduos no ArcGIS.

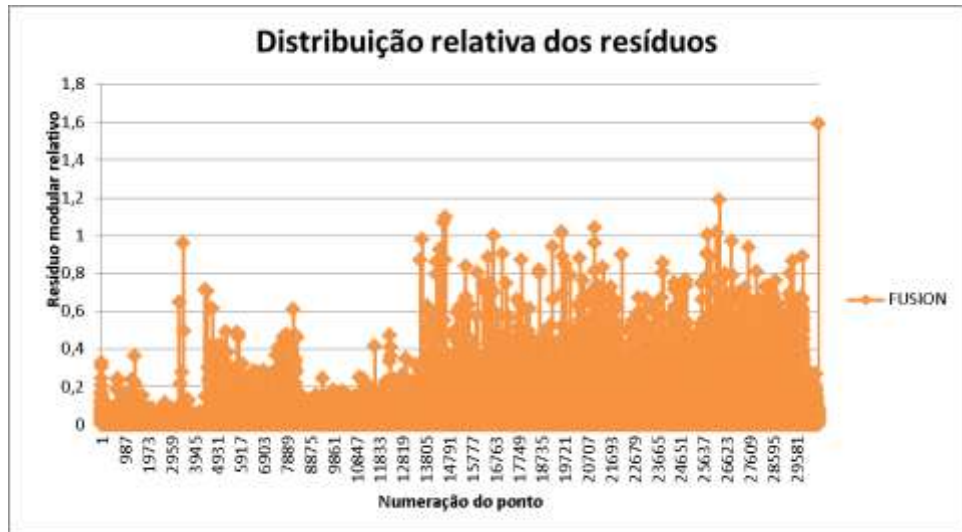


Figura 27 - Representação gráfica da distribuição modular relativa dos resíduos no FUSION.



Figura 28 - Representação gráfica da distribuição modular relativa dos resíduos no MicroStation.

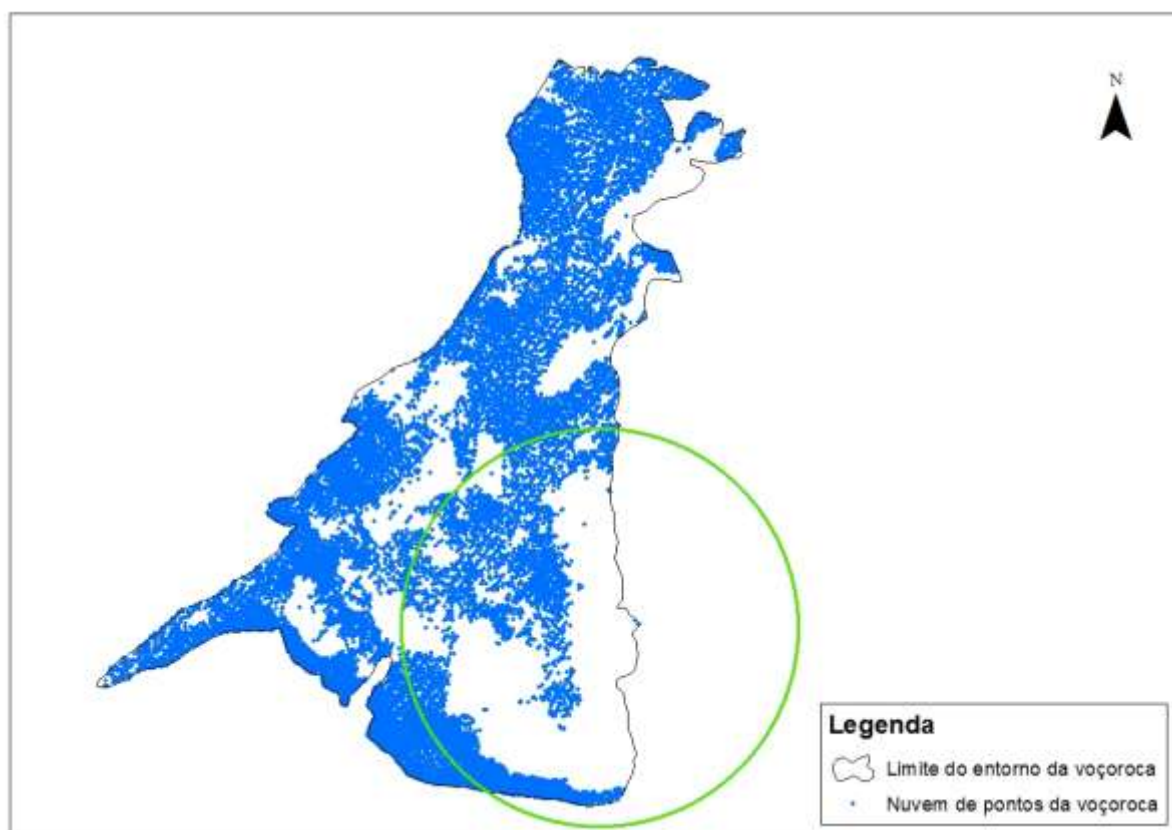


Figura 29 - Nuvem de pontos da voçoroca 2. Destaque em verde para área com menor recobrimento.

Para esta voçoroca também foi calculado a média dos resíduos modulares relativos, para avaliar quais dos MDEs contém informações tridimensionais mais próximas do valor real. O ArcGIS obteve um resíduo modular relativo de 0,0360 m; o FUSION obteve 0,0577 m e 0,0828 m para o MicroStation. Assim como para a voçoroca 1, para esta o ArcGIS se mostrou como o melhor software para produção de MDEs, por obter o menor resíduo modular relativo.

6. CONCLUSÃO

O *laser scanner* mostrou-se uma ferramenta potencial para o estudo de voçorocas em virtude de sua alta precisão e rapidez na coleta de dados no campo, gerando modelos digitais de elevação com alta precisão. Algumas regiões das feições erosivas ficaram descobertas durante a varredura, em função da presença de arbustos ou árvores e até mesmo pela morfologia da voçoroca, diminuindo assim a quantidade de informações na varredura. Isso pode ser minimizado realizando mais duas varreduras em ângulos oposto ao centro da feição, a direita e esquerda, o que irá aumentar a área de recobrimento da varredura nas voçorocas.

As duas voçorocas estudadas apresentaram perdas consideráveis de solo no intervalo de um ano, demonstrando que estão ativas e que podem ocasionar mais impactos ambientais e econômicos caso não seja adotada nenhuma medida mitigatória.

A voçoroca 1 apresentou um aumento de aproximadamente 97% no volume, isto devido a sua declividade acentuada em torno de 47%. Enquanto que a voçoroca 2 teve um

aumento de aproximadamente 14% no seu volume em uma declividade de 42%. Apesar da declividade das duas voçorocas serem próximas, a voçoroca 1 aumentou praticamente o dobro do volume no intervalo estudado, provavelmente por fatores como tipo de solo, que pode ser mais propício a instalação e o desenvolvimento de processos erosivos.

Visualmente os três modelos digitais de elevação (MDE) demonstraram boa representação das feições estudadas.

Levando-se em consideração o tempo de processamento dos dados e o valor da média dos resíduos modulares relativos, o ArcGIS com seu algoritmo *Topogrid* mostrou-se uma ferramenta potencial para a elaboração de modelos digitais de elevação com boa acurácia e alta qualidade de informações para voçorocas.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ressalta-se que este é um trabalho início de um trabalho que necessita de outros levantamentos no campo com maiores repetições, aumentando o número de informações do terreno e obtendo-se resultados mais precisos. O aumento no número de varreduras nos anos seguintes é necessário para fornecer maiores detalhes sobre o desenvolvimento do processo de voçorocamento nas áreas em estudo.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARAUJO, S. H. G.; ALMEIDA, R. J.; GUERRA, T. J. A. **Gestão ambiental de áreas degradadas**. 3. ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2008. 320p.

BERGSMAN, E.; CHARMAN, P.; GIBBONS, F.; HURNI, H.; MOLDENHAUER, W.C.; PANICHAPONG, S.. **Terminology for soil erosion and conservation: Concepts, definitions and multilingual list for soil erosion and conservation in English, Spanish, French and German**. Holanda: International Society Of Soil Science, 1996. 313 p.

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do solo**. 2.ed. São Paulo: Ícone, 1990. 355p.

BOEHLER, W.; HEINZ, G.; MARBS, A. The Potential of Non-Contact Close Range Laser Scanners for Cultural Heritage Recording. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL CIPA, 2001, Potsdam. **Anais eletrônicos...** Potsdam: Alemanha, 2001. Disponível em: <<http://cipa.icomos.org/fileadmin/template/doc/potsdam/2001-11-wb01.pdf>> Acesso em: 18 dez. 2013.

BOTELHO, R. G. M. Planejamento ambiental em microbacia hidrográfica. In: GUERRA, A. J. T.; SILVA, A. S.; BOTELHO, R. G. M. **Erosão e conservação dos solos**. 6. ed. Rio de Janeiro: Bertrand, 1999. p. 269-300,.

BOTELHO, R. G. M.; GUERRA, A. J. T. Erosão dos solos. In: CUNHA, S. B. da; GUERRA, A. J. T. **Geomorfologia do Brasil**. 3. ed. Rio de Janeiro: Bertrand, 2003. p. 181-220.

CALDAS, S. F. J. A. **Geoprocessamento e análise ambiental para determinação de corredores de habitat na Serra da Concórdia, Vale do Paraíba – RJ**. 2006. 122f.

Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais e Florestais) - Instituto de Florestas, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica.

CARVALHO, J. C. de; LIMA, M. C.; MORTARI, D.. Considerações sobre prevenção e controle de voçorocas. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE CONTROLE DE EROSIÃO, 7., Goiânia. **Anais eletrônicos...** Goiânia: Simpósio Nacional de Controle de Erosão, 2001. p. 1 - 10. Disponível em: <http://www.labogef.iesa.ufg.br/links/simposio_erosao/>. Acesso em: 21 dez. 2013.

CASSETI, V. **Geomorfologia**. [S.l.]: [2005]. Disponível em: <<http://www.funape.org.br/geomorfologia/>>. Acesso em: 27 dez. 2013.

CHAGAS, C.S.; FERNANDES FILHO, E.I.; ROCHA, M.F.; CARVALHO JÚNIOR, W.; SOUZA NETO, C. Avaliação de modelos digitais de elevação para aplicação em um mapeamento digital de solos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.14, n. 2, p. 218–226, 2010.

DALMOLIN, Q.; SANTOS, D. R. **Sistema Laser scanner: Conceitos e Princípios deFuncionamento**. 3. ed. Curitiba: UFPR, 2004. 97 p.

DEAN, J. F.; FULLER, I. C.; PHILLIPS, E.; MASSEY, C.; MARDEN, M. *Quantifying slope-channel coupling in an active gully and fan complex at Tarndale, Waipaoa catchment, New Zealand*. **Revista GeoScience**. Disponível em: <<http://mro.massey.ac.nz/handle/10179/1856>>. Acesso em: 20 dez. 2013.

DEMATTE, J.A.M.; SOUSA, A.A.; NANNI, M.R. Avaliação espectral de amostras de solos e argilo-minerais em função de diferentes níveis de hidratação. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 9., Santos. **Anais...** Santos, 1998. p. 1295-1298.

EMBRAPA – **Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Recuperação de Voçorocas em Áreas Rurais**. Rio de Janeiro, 2006. Disponível em: <<http://www.cnpab.embrapa.br/publicacoes/sistemasdeproducao/vocoroca/recuperacao.htm>>Acesso: 05 nov. 2010.

FARIA, T. O.; VECCHIATO, A. B.; SALOMÃO, F. X. T.; SANTOS JÚNIOR, W. A. Abordagem morfopedológica para diagnóstico e controle de processos erosivos. **Revista Ambiente & Água**, v. 8, n. 2, p. 215-232, 2013. (<http://dx.doi.org/10.4136/ambi-agua.1007>)

FARRES, P. The role of time and aggregate size in the crusting processes. **Revista Earth Surface Processes**, v. 3, n. 3, p. 243-254, 2007.

FELICÍSIMO, A. M. **Modelos digitais del terreno: Introducción aplicaciones en las ciencias ambientales**. Oviedo: Universidad de Oviedo, 1994. Disponível em : <<http://www.etsimo.uniovi.es/~feli>>. Acesso em: 07 nov. 2005.

FRANCISCO, A. B.; NUNES, J. O. R. Aplicação de metodologia de estaqueamento para estudo do processo de voçorocamento no município de Rancharia - SP. **Caderno Prudentino de Geografia**, Presidente Prudente (sp), v. 1, n. 31, p.183-189, 2009.

FRANCO, F. S.; COUTO, L.; CARVALHO, A. F. de; JUCKSCH, I.; FERNANDES FILHO, E. I.; SILVA, E.; MEIRA NETO, J. A. A. M. Quantificação de erosão em sistemas

agroflorestais e convencionais na Zona da Mata de Minas Gerais. **Revista Árvore**, v. 26, n.6, p. 751-760, 2002.

GERLACH, T. Hillslope troughs for measuring sediment movement. **Revista Geomorphologie Dynamique**, v. 17, n. 3 p. 173-174, 1967.

GONÇALVES, R. **Dispositivo de varredura laser 3D terrestre e suas aplicações na Engenharia, com ênfase em túneis**. 2007. 95 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

GUERRA, A. J. T. Ravinas: processo de formação e desenvolvimento. **Anuário de do Instituto de Geociências**, Rio de Janeiro, v. 20, n. 1, p. 9-26, 1997.

GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B. da. **Geomorfologia e Meio Ambiente**. 5. ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2004. 381 p.

HÖFLE, B.; GRIESBAUM, L.; FORBRIGER, M. GIS-Based Detection of Gullies in Terrestrial LiDAR Data of the Cerro Llamoca Peatland (Peru). **Revista Remote Sensing**, v. 5, n. 11, p. 5851-5870, 2013.

HORTON, R. E. Erosional Development of Streams and Their Drainage Basins; Hydrophysical Approach to Quantative Morphology. **Boletim da Sociedade Geológica da América**, v. 56, p. 275-230, 1945.

JÚNIOR, H. H. S. **PROCESSOS EROSIVOS E PERDA DE SOLO EM ESTRADAS VICINAIS**. 2007. 20 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia Ambiental, Departamento de Departamento de Engenharia , Universidade Católica de Goiás, Goiás.

LOPES, E.S.S.; RIEDEL, P.S.; VIDOTTI, M.; MERINO, E.R. Análise de Modelos Numéricos de Terreno para Modelos Geomorfológicos. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE GEOMORFOLOGIA, 6., 2006, Goiânia. **Anais eletrônicos...** Goiânia: UFG, 2006. Disponível em: <<http://www.labogef.iesa.ufg.br/links/sinageo/index/articles/406.pdf>>. Acesso em: 24 out. 2012.

MACHADO, R.L. **Perda de solo e nutrientes em voçorocas com diferentes níveis de controle e recuperação no médio vale do rio Paraíba do Sul, RJ**. 2007. 101 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia-Ciência do Solo) - Instituto de Agronomia, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica.

MAIA, T. C. B. **Estudo e Análise de Poligonais Segundo a NBR 13.133 e o Sistema de Posicionamento Global**. 1999. 217 f. Dissertação (Mestrado em Transportes) - Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos.

MARQUES, J.F.; PEREIRA, L.Ch. **Valoração econômica dos efeitos da erosão: estudo de caso em bacias Hidrográficas**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2004. n. 40, 21 p.

MOURA, T. A. Uso de Georradar no estudo de camadas compactadas por pisoteio animal. **Relatório final**, PROIC – DPPG/UFRRJ, 2009-2010.

PROJETO RADAM BRASIL. Folhas. SF23/24. Levantamento de recursos naturais. Rio de Janeiro, 1983. V. 32., 775p.

RIBEIRO, S.R.A.; SANTOS, D.R.; CENTENO, J.S. Aplicação da metodologia de dados orientados a objeto na classificação de uma área urbanizada, utilizando uma imagem digital obtida por meio da tecnologia do laser scanner. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOMÁTICA, **Anais eletrônicos...** Presidente Prudente - SP, 2002,. Disponível em: <<http://www.lidar.com.br/arquivos/ClassAreaUrba.pdf> >. Acesso em: 03 dez. 2013.

SAUERESSIG, S. R.; MEDEIROS, E. R. Educação ambiental: o estudo dos processos erosivos com a utilização de recursos didáticos alternativos. **Revista Cnext**, v. 2, n. 1, p.1-14, 2011.

SILVA, A. M.; SILVA, M. L.; CURI, N.; LIMA, J. M.; AVANZI, J. C.; FERREIRA, M. M. Perdas de solo, água, nutrientes e carbono orgânico em Cambissolo e Latossolo sob chuva natural. **Pesquisa Agropecuária brasileira**, v. 40, n. 12, p. 1223-1230, 2005.

TOMMASELLI, A.M.G. Um Estudo sobre as Técnicas de Varredura a Laser e Fotogrametria para Levantamentos 3d a curta Distância. **GEODÉSIA** online 4/2003. <http://geodesia.ufsc.br/Geodesia-online/arquivo/2003/04.1/AT2003.htm>.

VITTE, A. C.; VILELA FILHO, L. R. Estimativa de perdas de solos em uma bacia hidrográfica sob o cultivo de frutíferas, no município de Valinhos (SP). **Revista GEOUSP: Espaço e Tempo**, v. 20, n. 4, p.45-64, 2006.

VITTE. A. C.; GUERRA A.J.T. **Geografia Física no Brasil**. 2. ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2007. 280 p.

WISCHMEIER, W. H.; SMITH, D.D. **Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning**. 1. ed. United States: Department of Agriculture, 1978. 67 p.

WUTKE, D. J. **Métodos para avaliação de um sistema laser scanner terrestre**. 2006. 98f. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas) – Faculdade de Geomática, Universidade Federal do Paraná, Paraná.