



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA**

PEDRO HENRIQUE LIMA ALENCAR

**MEDIÇÃO E MODELAGEM DE VOÇOROCAS NO BIOMA CAATINGA:
O CASO DA BACIA REPRESENTATIVA DE MADALENA, CE**

FORTALEZA

2018

PEDRO HENRIQUE LIMA ALENCAR

MEDIÇÃO E MODELAGEM DE VOÇOROCAS NO BIOMA CAATINGA:
O CASO DA BACIA REPRESENTATIVA DE MADALENA, CE

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Ceará, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Agrícola.

Área de concentração: Manejo e Conservação de Bacias Hidrográficas no Semiárido.

Orientador: Prof. Dr. José Carlos de Araújo

FORTALEZA

2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

A354m Alencar, Pedro Henrique Lima.
Medição e modelagem de voçorocas no bioma caatinga : O caso da bacia representativa de madalena, ce /
Pedro Henrique Lima Alencar. – 2018.
80 f. : il. color.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências Agrárias, Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Fortaleza, 2018.
Orientação: Prof. Dr. José Carlos de Araújo.

1. Erosão linear. 2. Semiárido. 3. VANT. 4. Modelo de Foster e Lane. I. Título.

CDD 630

PEDRO HENRIQUE LIMA ALENCAR

MEDIÇÃO E MODELAGEM DE VOÇOROCAS NO BIOMA CAATINGA:
O CASO DA BACIA REPRESENTATIVA DE MADALENA, CE

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Ceará, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Agrícola.

Aprovado em: 16/02/2018

BANCA EXAMINADORA

Prof. Celso Augusto Guimarães Santos
Universidade Federal da Paraíba (UFPB)

Prof. Pedro Henrique Augusto Medeiros
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE)

Prof. Raimundo Nonato de Assis Júnior
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. José Carlos de Araújo (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

AGRADECIMENTOS

Ao retornar à Universidade para meu mestrado, numa área até então obscura, me senti muito inseguro de quão longe poderia chegar e se hoje este trabalho está pronto e razoável isto se deve muito antes e além de mim, ao grupo incrível que me recebeu no PPGEA.

Em primeiro lugar, o mestre, professor, amigo José Carlos de Araújo, que com sua simplicidade que só é igualada pela sua inteligência e mente inquieta me nortearam nestes últimos dois anos. Obrigado por acreditar no meu potencial.

Aos amigos do HIDROSED que me ajudaram em cada etapa deste trabalho, desde me explicar o que é voçoroca até a formatação final. Em especial Viana, Christine, Léa, Camila, Jairo, Thayslan, Paulilo, Emanuel e Vidal. Bem como os professores que foram mais que pacientes, Pedro, George, Teresa e especialmente Alexandre.

No PPGEA, imprescindível agradecer também ao prof. Nonato, bem como aos colegas Vinícius e Adriano, que tanto contribuíram nesse trabalho.

Agradecer a todos os servidores da universidade e pessoas que tiram seu sustento daqui. Às tias do R.U. pelo pedaço de carne a mais, à tia Graça pela simpatia, ao rapaz da biblioteca que sempre se lembra de mim apesar de ver milhares de estudantes diariamente (provavelmente pela frequência exagerada das minhas visitas) e ao Silvio e família na melhor gráfica da cidade (universitária).

Para além dos muros da UFC, um monte de gente me apoiou nesse trabalho.

Agradeço à minha família. Bruna, que é a razão do meu tempo, como diz o poeta: “a existência sem ti é como olhar para um relógio só com o ponteiro dos minutos, tu és a hora” e Demi, que sempre me recebe com lambidas e abano de rabo.

À minha outra família, obrigado mãe, pai, Kássia e Felipe. Vocês me ensinam a viver.

À outra família ainda, João, Ana, Júnior, Renata, Larissa e Eloá. Vocês me ensinam a viver também.

À outra família, aquela que gente escolhe e que escolhe a gente de volta, Iago, (Antônia) Renata, Lucas, Luana, Wendel, Bruno, Muniz, Marlon, Reuber, Sérgio, Marcela, e aqueles que ficaram na lista do outro poeta. Vocês fazem a vida mais leve e mais ébria. Listando assim, nem são muitos, mas são lindos.

Por fim, agradeço ao CNPq pelo financiamento. Podia ser mais? Podia, mas não vou reclamar também né?

“Deus dando a paisagem, metade do céu já é meu.”(Hermínio Bello de Carvalho e Zé Keti)

RESUMO

Em contraste com a erosão laminar, as voçorocas podem causar uma rápida e severa alteração da paisagem de uma região. No semiárido brasileiro, devido aos solos rasos, processos de voçorocamento são limitados a pequenas dimensões, sendo menos representativos em termos de produção de sedimento quando comparados com a erosão laminar. No entanto, voçorocas, ainda que de pequenas dimensões, exercem grande influência em processos sedimentológicos, alterando a dinâmica de sedimentos dentro da bacia. Devido a mudanças do uso de solo na Caatinga, com mecanização da agricultura, desmatamento para pastejo em pecuária extensiva e evolução da infraestrutura, como construção de novas estradas, a ocorrência de voçorocas vem tornando-se cada vez mais frequente. Este estudo tem como área de pesquisa a bacia representativa de Madalena (124 km², Ceará, Brasil), assentamento com população de 20 habitantes por km², cujas principais atividades econômicas são a agricultura (*Zea mays*), a pecuária extensiva (bovinos e ovinos) e a pesca. Na área da bacia existem 12 barragens com capacidade de armazenamento entre 6.10⁴ e 2.10⁷ m³. Foram realizados levantamentos topográficos de três voçorocas entre as oito identificadas no assentamento, utilizando-se Estação Total e VANT (Veículo Aéreo Não Tripulado), para obtenção do modelo digital de terreno e do volume erodido nos canais. Foram ainda coletadas amostras de solo para estimativa de parâmetros como erodibilidade e tensão crítica de cisalhamento. As voçorocas estudadas, classificadas como pequenas voçorocas clássicas possuem as seguintes dimensões ($\mu \pm \sigma$): área de projeção (317 \pm 165 m²), comprimento (38 \pm 6 m), volume (42 \pm 25 m³) e massa erodida (61 \pm 36 Mg). A modelagem também apontou uma estimativa de perda de solo da ordem de 5 \pm 3 Mg.ano⁻¹ na primeira década, e quase 16 Mg.ha⁻¹.ano⁻¹ nas bacias estudadas, cerca de quatro vezes maior que a erosão laminar média no Ceará. Utilizou-se o Modelo de Foster e Lane (1986) para voçorocas efêmeras. Devido a limitações do modelo original acerca da declividade das paredes do canal, foi proposto um fator de correção da área da seção em função da geometria da bacia. Obteve-se melhora da qualidade do modelo (NSE = 0,75; para *área da seção transversal*), indicando que o modelo pode ser aplicado para de predição do volume de voçorocas no semiárido, mesmo para pequenas voçorocas clássicas, uma vez que as analisadas iniciaram há aproximadamente 58 anos, quando ocorreu a construção de estradas vicinais. Identificou-se que a intensidade de chuva mais representativa para o processo de voçorocamento é a de 30 min, mesma da erosão laminar proposta por Wischmeier e Smith (1978).

Palavras-chave: Erosão linear. Semiárido. VANT. Modelo de Foster e Lane.

ABSTRACT

In contrast with inter-rill erosion, gullies can cause fast and severe changing on the landscape of a region. In the Brazilian semiarid region (a one-million km² area that coincides with the Caatinga biome), due to the shallow soils gully erosion processes are limited to small dimensions, being less representatives than sheet erosion, concerning total sediment yield. Nevertheless, gullies, even with small sizes, have a high influence on sedimentological processes, changing the sediment dynamics inside de watershed. Due to the land use change in the Caatinga, agricultural automation, deforestation for extensive cattle rising and development of infrastructure, as construction of new roads, gully occurrence has been becoming more frequent. This study focuses on the Madalena representative basin (124 km², state of Ceará, Brazil), a land-reform settlement with 20 inhabitants per km², whose main economic activities are agriculture (especially Zea mays), livestock and fishing. In the catchment area, where there are 12 dams (with storage capacity ranging from 6.10⁴ to 2.10⁷ m³). Topographic surveys were performed using Total Station and UAV (Unmanned Aerial Vehicle), to obtain digital terrain models and assess the volume of soil eroded in the channel. Soil samples were collected in order to estimate the rill erodibility and the critic shear stress. The studied gullies, classified as small classical (or permanent) gullies have the following dimensions ($\mu\pm\sigma$): projection area (317 \pm 165 m²), length (38 \pm 6 m), volume (42 \pm 25 m³) and eroded mass (61 \pm 36 Mg). The modelling pointed out an estimative of soil loss at 5 \pm 3 Mg.ano⁻¹ in the first decade of the gully process, and almost 16 Mg.ha⁻¹.ano⁻¹ on the sub-basins studied, which corresponds to more the thrice the average of laminar erosion production in the State of Ceará. We used the Foster and Lane model (1986) for ephemeral gullies. Due to limitations of the original model to tackle the slope of the channel walls we proposed a correction factor of the cross-section area in function of the watershed geometry, obtaining good positive responses from the modelling (NSE = 0.75; for the *Cross-section area*), implying that the model can be applied as tool of volume prediction of gully volume in the semiarid, even for small classical gullies, once the analyzed gullies began around 58 years ago, due to the construction of a new road. As secondary result we identified that the 30-minute intensity is the most representative for the gully process, the same for sheet erosion proposed by Wischmeier and Smith (1978).

Keywords. Inter-rill Erosion. Semiarid. UAV. Foster and Lane model.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Mapa simplificado do Nordeste Brasileiro e da região semiárida	16
Figura 2 - Voçorocas efêmeras	18
Figura 3 - Voçorocas clássicas	19
Figura 4 - Voçorocas de terraço.	19
Figura 5 - Processos de formação e crescimento de voçorocas.....	20
Figura 6 - Voçoroca clássica com drenagem de aluvião em Israel	22
Figura 7 - Gráfico comparativo da evolução no número de publicações sobre voçorocas e em todas as áreas.....	23
Figura 8 – Localização, contorno, hidrografia e principais agrovilas do Assentamento 25 de Maio	24
Figura 9 - Classes de solo no Assentamento 25 de Maio, Madalena, Ceará.....	25
Figura 10–Rede hidrográfica e locais de estudo no A25M	26
Figura 11 - VANT utilizado no levantamento (Inspire 1)	27
Figura 12 - Classificação de partículas (medidas em mm).....	29
Figura 13 - Proposta de classificação de regiões pluviométricas homogêneas no Ceará	30
Figura 14 – Planta e cortes de uma voçoroca hipotética e método para cálculo do volume	32
Figura 15 - Etapas do desenvolvimento da voçoroca	33
Figura 16 - Distribuição de tensões (normalizadas) na seção	34
Figura 17 - Função de transporte de sedimento crítico	35
Figura 18 - Gráfico do inverso da função de transporte de sedimento crítico.....	36
Figura 19 - Relação entre X^*c , W^* e Rh^*	37
Figura 20- Gráfico da função de transporte de sedimento crítico (etapa 2)	39
Figura 21 - Regressão dos valores tabelados de $1/g(X^*cf)$	39
Figura 22 - Calha Voçoroca 1 em 2017 (A) / Estado original 1958 (B) a partir de dados coletados com estação total e interpolação via <i>kriging</i>	43
Figura 23 - Calha Voçoroca 2 em 2017 (A) / Estado original em 1958 (B) a partir de dados coletados com estação total e interpolação via <i>kriging</i>	44
Figura 24 - Calha Voçoroca 3 em 2017 (A) / Estado original em 1958 (B) a partir de dados coletados com estação total e interpolação via <i>kriging</i>	45
Figura 25 - Imagem capturada pelo VANT - Voçoroca 1 em 2017	47
Figura 26 - Imagem capturada pelo VANT - Voçoroca 2 em 2017	47

Figura 27 - Imagem capturada pelo VANT - Voçoroca 3 em 2017	47
Figura 28 - Modelo Digital de Elevação da Voçoroca 1 – obtenção via VANT.....	48
Figura 29 – Modelo Digital de Elevação da Voçoroca 2 – obtenção via VANT	48
Figura 31 – Distribuição granulométrica das amostras de solo da área 1.	51
Figura 32 – Distribuição granulométrica das amostras de solo da área 2.	51
Figura 33 – Precipitação acumulada anual no município de Madalena para os anos 1958 à 2015	52
Figura 34– Correlações Lâmina x Intensidade de chuva; Aiuaba.....	53
Figura 35 - Dispersão Largura Medida x Largura Calculada das seções transversais das voçorocas pelo MFL	53
Figura 36 - Dispersão Área Medida x Área Calculada das seções transversais das voçorocas pelo MFL	55
Figura 37 – Diagrama de caixa de erros relativos na modelagem da área da seção transversal pelo MFL para cada Intensidade da chuva/Vazão de Pico	56
Figura 38 – Diagrama de caixa de erros relativos na modelagem da largura da seção transversal pelo MFL para cada Intensidade da chuva/Vazão de Pico	56
Figura 39 - Dinâmica do crescimento da área de uma seção típica de voçoroca (Seção 3, Voçoroca 1).....	58
Figura 40 - Relação Declividade x Razão de áreas	59
Figura 41 – Gráficos de correlações a) $K_c \times R$; b) $K_f \times R$; c) $l \times R$	59
Figura 42 - Dispersão de Área Medida x Área Calculada das seções transversais das voçorocas pelo MFL-Perm.....	60
Figura 43 - Seções de voçorocas medidas e modeladas.	61

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores do parâmetro <i>Curve Number</i> (CN).....	31
Tabela 2 – Dimensões das Voçorocas	46
Tabela 3 – Volume das voçorocas calculados a partir de dados de Estação Total (ET) e de VANT	46
Tabela 4 – Quadro resumo dos dados de granulometria e matéria orgânica das amostras.	50
Tabela 5 – Quadro resumo das larguras medidas (W_{obs}) e calculadas (W_{sim}) a partir de diferentes intensidades de chuva ($I_{méd}$, I_{60} , I_{30} e I_{15}) para as três voçorocas estudadas em Madalena, Ceará (2017).....	54
Tabela 6 – Quadro resumo das larguras medidas (A_{obs}) e calculadas (A_{sim}) a partir de diferentes intensidades de chuva ($I_{méd}$, I_{60} , I_{30} e I_{15}) para as três voçorocas estudadas em Madalena, Ceará (2017).....	55
Tabela 7 –Valores dos avaliadores estatísticos do MFL para a modelagem a área da seção transversal variando a Intensidade de chuva/Vazão de Pico.....	57
Tabela 8 – Valores dos avaliadores estatísticos do MFL e MFL-Perm na obtenção dos valores de área das seções das voçorocas.....	60
Tabela 9 – Resultados do volume da voçoroca obtidos por interpolação dos dados de área calculados pelo modelo MFL-Perm.....	62

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

PEM	Princípio da Entropia Máxima
MFL	Modelo de Foster e Lane - 1986
MDT	Modelo Digital do Terreno
VANT	Veículo Aéreo Não Tripulado
FUNCEME	Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos
CN	Número de Curva (<i>Curve Number</i>)
SCS	Serviço de Conservação do Solo (<i>SoilConservation Service</i>)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	13
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1	Hidrologia do Semiárido Brasileiro e seus reflexos na formação de voçorocas....	16
2.2	Voçorocas: classificação e características.....	17
2.3	Histórico da modelagem de voçorocas	20
2.4	Relevância do estudo da erosão em voçorocas	21
3	MATERIAL E MÉTODOS	24
3.1	Áreas de estudo	25
3.2	Levantamento topográfico e processamento de dados	26
3.3	Amostragem do solo e parâmetros K_r e τ_c	28
3.4	Dados de precipitação e parâmetros hidrológicos	29
3.5	Modelo de Foster e Lane	31
3.6	Modelo para pequenas voçorocas clássicas	41
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	43
4.1	Modelos Digitais de elevação (MDE)	43
4.2	Reconhecimento e análise do solo.....	50
4.3	Parâmetros e dados de chuva	52
4.4	Modelo de Foster e Lane	53
4.5	Modelo de Foster e Lane ajustado: MFL-Perm.....	58
5	CONCLUSÃO	63
	REFERÊNCIAS.....	64
	ANEXO A – TABULAÇÃO DOS GRÁFICOS QUE RELACIONAM X_{*c} E X_{*cf} COM AS GRANDEZAS W_* , R_* , $G(X_{*c})$ E $G(X_{*cf})$	69
	ANEXO B – CÓDIGO DO PROGRAMA EM FORTRAN-90.....	70
	ANEXO C – SEÇÕES MEDIDAS E MODELADAS.....	77

1 INTRODUÇÃO

Erosão é o processo de desgaste de rochas e solo, logo, erosão é um processo natural de modificação da paisagem, que vem ocorrendo ao longo de milênios produzindo o relevo que vemos hoje. Este processo pode ser lento ou rápido, a depender da natureza e dos mecanismos envolvidos no processo.

Na literatura, os processos erosivos são divididos em duas grandes categorias, a primeira é chamada de erosão laminar (em inglês, *inter-rill erosion* ou *sheet erosion*) caracteriza-se pela mobilização do solo provocada pela energia das gotas de chuva e/ou pelo escoamento superficial. O processo é lento e tende a causar bastante dano ao solo antes de ser detectado. Este processo é bastante maléfico para a lavoura uma vez que ao longo dos anos destrói a camada superficial e mais rica em nutrientes do solo. A segunda categoria é a erosão linear, que ocorre quando o escoamento se concentra em pequenos sulcos (*rills*) devido ao micro relevo (podendo ser naturais ou produzidas artificialmente pelo manejo) ou em canais de maior dimensão, conhecidos como voçorocas (em inglês, *gullies*). Voçorocas são caracterizadas por grandes incisões no solo com uma dimensão (comprimento) com ordem de grandeza superior às demais (largura e profundidade), que podem ocorrer de forma rápida devido à concentração do escoamento superficial e à grande energia deste em chuvas intensas.

Em contraste com a erosão laminar, que leva anos para modificar a superfície do terreno, as erosões lineares, em especial as voçorocas, são facilmente identificadas e podem alterar a paisagem rapidamente. Frequentemente observam-se voçorocas que atingem grandes dimensões após um único evento de escoamento, como o caso da voçoroca Chitolina (Mineiros, GO), que se iniciou em dezembro de 1983, atingindo 150 metros de comprimento e seis de profundidade após uma única enxurrada (EMBRAPA, 2007).

As erosões lineares de pequenas dimensões e sem contribuição de águas subterrâneas, com influência majoritária do escoamento superficial no seu processo de formação e crescimento, são conhecidas como voçorocas efêmeras (em inglês, *ephemeral gullies*), assim chamadas por serem facilmente mitigados pelo processo de lavoura anual. Entretanto, quando estas voçorocas permanecem sem o devido tratamento, devido à falta de interesse econômico e/ou social, outros processos – que serão discutidos adiante – passam a ser significativos, levando a classificar estes processos comuns no semiárido brasileiro, como pequenas voçorocas clássicas.

No Nordeste Brasileiro, mais especificamente em sua parcela ocupada pelo bioma Caatinga, devido aos solos rasos sobre leito cristalino e à baixa ocorrência de escoamento de base, as erosões lineares não se desenvolvem em grandes larguras e profundidades, diferentemente das observadas em outras regiões do país, como no Cerrado, onde é frequente a ocorrência de grandes voçorocas, ditas clássicas, com mais de dez metros de profundidade e centenas de metros de comprimento (HUNKE *et al.*, 2015; HUNKE, 2015).

Voçorocamento, independentemente de suas escalas (como clássicas ou efêmeras), têm grande impacto ambiental e econômico, devido ao custo de mitigação em áreas de produção agrícola, ao rebaixamento do lençol freático, à redução da armazenagem de água no solo, ao aumento da conectividade e ao assoreamento de reservatórios, reduzindo a segurança hídrica da região (POESEN *et al.*, 2003; VERSTRAETEN *et al.*, 2006; de ARAÚJO *et al.*, 2006; de ARAÚJO *et al.*, 2013; HUNKE *et al.*, 2015).

Há uma carência de estudos sobre erosão por voçorocas em todas as frentes: seja na modelagem do processo, em seus impactos ou nas técnicas de mitigação, com destaque especial para os biomas brasileiros do Cerrado, onde é comum a incidência de voçorocas de grandes dimensões e a Caatinga, onde são comuns processos de menor escala, mas igualmente deletérios (HUNKE *et al.*, 2015).

O presente trabalho visa contribuir com o desenvolvimento de pesquisas acerca de erosão por pequenas voçorocas na Caatinga dado o grande impacto social e ambiental que estes processos geram no contexto semiárido, como será discutido ao longo do texto e à demanda de literatura sobre o tema, principalmente em português.

Utilizou-se uma abordagem de modelagem e medidas de campo com aplicação e avaliação do modelo de Foster e Lane (MFL, 1983), uma vez que é um modelo de base física, generalista e flexível. A questão científica tratada nesta dissertação é “o modelo de Foster e Lane é capaz de avaliar a perda de solo em pequenas voçorocas, comuns no semiárido brasileiro?” Para tal questão, elaboramos a seguinte hipótese: uma vez que o modelo é de base física, este deve apresentar resultados satisfatórios para pequenas voçorocas. No entanto, há uma grande quantidade de incerteza nos parâmetros e nas variáveis do modelo. Posto isso, nossa segunda hipótese é que pode-se melhorar a eficiência do MFL a partir de alterações relativas as incertezas nos parâmetros e variáveis do processo.

O objetivo geral da presente dissertação é avaliar a eficiência do MFL na predição de erosão em pequenas voçorocas no semiárido brasileiro tendo, como base, medidas de três voçorocas da bacia representativa de Madalena, CE. São objetivos específicos:

1. Comparar técnicas de obtenção de modelo digital de elevação (MDE) para pequenas voçorocas;
2. Avaliar a aplicabilidade do MFL às voçorocas estudadas no semiárido brasileiro;
3. Propor alterações no MFL que considerem a incerteza das variáveis e dos parâmetros envolvidos no processo.

O texto da dissertação está organizado da seguinte forma: no primeiro capítulo é feita uma revisão do estado da arte sobre voçorocas, seus tipos, efeitos e modelos. No segundo capítulo é apresentada a metodologia adotada neste trabalho. A apresentação segue a sequência em que a pesquisa foi realizada, da definição dos locais de trabalho até a avaliação do modelo MFL. Foram desenvolvidos algoritmo e código computacional (Fortran 90) para o equacionamento detalhado do Modelo de Foster e Lane, inexistente – salvo melhor juízo – até então no Brasil. No terceiro capítulo, há a apresentação dos resultados e sua discussão, seguidos pelo quarto capítulo, no qual as conclusões e recomendações são apresentadas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Hidrologia do Semiárido Brasileiro e seus reflexos na formação de voçorocas

A região Nordeste Brasileira tem como clima predominante o semiárido (BSh) e abriga em grande parte de sua extensão o bioma Caatinga ($\sim 10^6$ km²). Na região há ocorrência frequente de secas. A evaporação potencial ultrapassa a precipitação em três a quatro vezes, os solos são rasos, de formação cristalina e com pouca ou nenhuma água subterrânea, fazendo os rios da região em sua maioria intermitentes (MALVEIRA *et al.*, 2012).

Em termos pluviométricos, a região possui precipitação anual da ordem de 500 a 1000 mm concentrados de janeiro a maio (mais de 80%) e alta variabilidade anual (coeficiente de variação da ordem de 0,40), não sendo incomuns eventos diários que ultrapassem 100 mm de chuva (de ARAÚJO, MEDEIROS, 2013), que sobrepõem em muitas vezes o limiar para início de voçorocamento proposto na literatura (14,5 mm, segundo POESEN *et al.*, 2011).

A vegetação predominante é nativa do Bioma Caatinga, arbustiva e caducifólia (de ARAÚJO, PIEDRA, 2009; FIGUEIREDO *et al.*, 2016) e as principais atividades econômicas são a agricultura familiar e pecuária extensiva. Cerca de 50% da área do Nordeste são utilizadas nessas atividades (IBGE, 2009).

Figura 1 – Mapa simplificado do Nordeste Brasileiro e da região semiárida (hachurada)



Fonte: ANA – Agência Nacional de Águas

Devido aos solos rasos, é rara a ocorrência de voçorocas de grande porte no Semiárido Brasileiro, do tipo clássica. Tais formações são encontradas no sul do Piauí, no leste da Bahia e no Maranhão, onde o clima é tropical (Aw) e onde há solos profundos. O clima, e a vegetação escassa fazem das regiões semiáridas áreas de fragilidade ambiental, nas quais processos erosivos ocorrem com altas velocidade e severidade após chuvas intensas (da Silva *et al.*, 2017). Além do clima da região, a ação antrópica promove acelerada degradação do solo, como apontado em 1902 por Euclides da Cunha em “Os Sertões”, que cita ainda voçorocas no folgado de Canudos após três anos de ocupação.

“Colaborando com os elementos meteorológicos, com o nordeste, com a sucção dos estratos, com as canículas, com a erosão eólica, com as tempestades subitâneas — o homem fez-se um componente nefasto entre as forças daquele clima demolidor. Se o não criou, transmudou-o, agravando-o. Deu um auxiliar à degradação das tormentas, o machado do caatingueiro; um supletivo à insolação, a queimada.” (CUNHA, 1901, p. 27).

2.2 Voçorocas: classificação e características

Voçorocas são processos erosivos causados por acúmulo e concentração do escoamento superficial. Num curto intervalo de tempo, as voçorocas removem uma camada considerável de solo na forma de um canal estreito (POESEN *et al.*, 2011). Além disso, são canais com vazão efêmera, com presença de escoamento durante e imediatamente após eventos de chuva devido ao escoamento superficial e/ou subsuperficial via drenagem (BRICE, 1966), o qual destaca ainda que voçorocas com paredes íngremes na região da cabeceira indicam que o processo é recente ou ativo, uma vez que o crescimento destas se dá de forma ascendente, em direção à cabeceira, num processo conhecido como movimento ascendente de cabeceira (do inglês *headwall cut* ou *knickpoint*).

Ainda, voçorocas são um tipo de erosão linear, diferenciando-se das ravinas pelas suas dimensões. No entanto, o critério de limiar entre voçoroca e ravina é subjetivo, havendo três classificações amplamente utilizadas. Trata-se de voçoroca se:

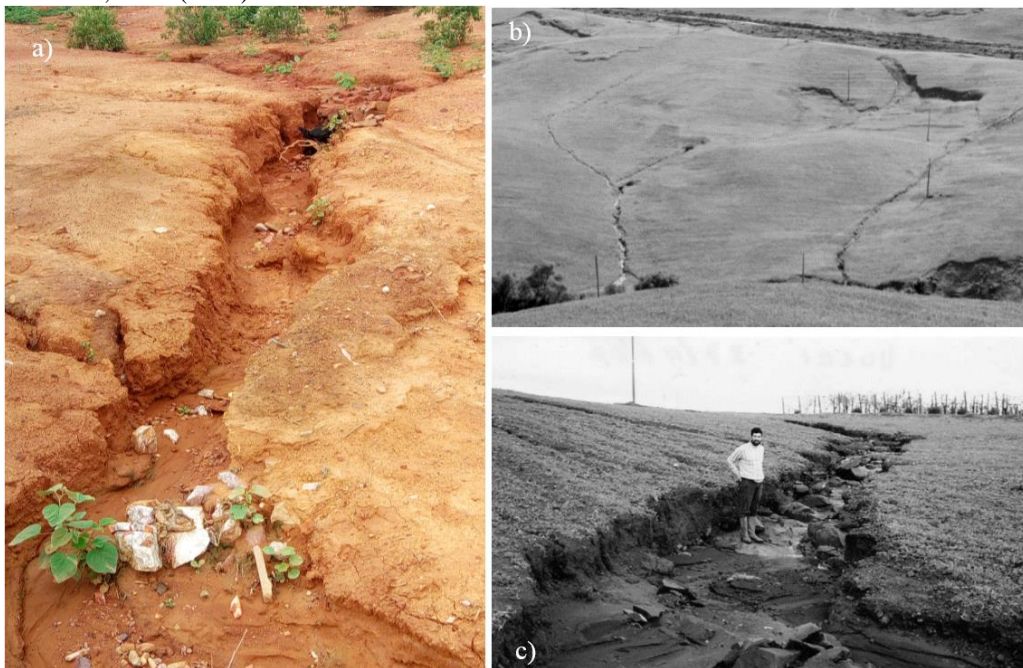
- | | |
|--|------------------------|
| 1) Largura $\geq 0,30$ m e Profundidade $\geq 0,60$ m | Brice (1966) |
| 2) Profundidade $\geq 0,50$ m | Imerson e Kwaad (1980) |
| 3) Área da seção ≥ 929 cm ² (1 ft ²) | Hauge (1977) |

Outra distinção entre ravinas e voçorocas é que as primeiras, por sofrerem grande influência do micro relevo, não tendem a ocorrer na mesma localização após serem remediadas, mas em locais, dimensões e espaçamentos diferentes a depender das práticas adotadas na área. Já voçorocas, uma vez remediadas, tendem a reaparecer no mesmo local e aproximadamente

com as mesmas características uma vez que estão ligadas ao macro relevo, às variáveis climatológicas e às características do solo (FOSTER, 1986; GRISSINGER, 1996; POESEN *et al.*, 2003).

Ainda segundo Grissinger (1996), a partir da década de 1980, relatórios do Departamento de Agricultura Estadunidense (USDA) introduziram o termo voçoroca efêmera (*ephemeral gully*) para distinguir incisões com dimensões superiores às das ravinas, mas pequenas o suficiente para serem eliminadas a partir de atividades simples de preparação da lavoura (Figura 2). A denominação efêmera, portanto, decorre da perspectiva de que essas voçorocas são eliminadas ano a ano na área de cultivo, tornando a aparecer sempre que fatores como escoamento e cobertura vegetal possibilitarem.

Figura 2 - Voçorocas efêmeras – (a) Voçoroca na zona rural de Aiuaba-CE (2017); (b) Encosta com duas voçorocas efêmeras e erosão por perda de estrutura em Villanueva de la Concepcion, sul da Espanha (2010); (c) Voçoroca efêmera em Vulci, Itália (1987)

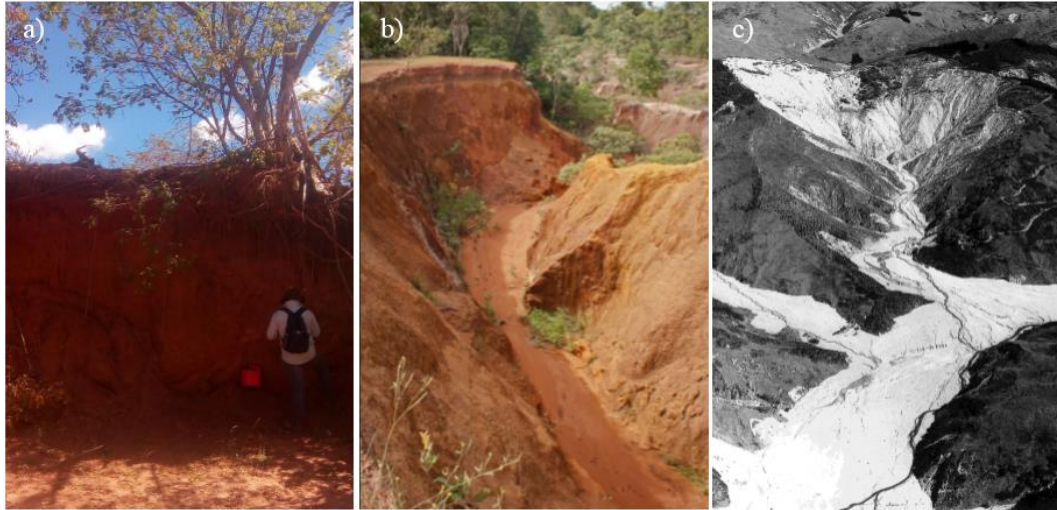


Fontes: (a) Acervo pessoal, (b) POESEN (2011); (c) POESEN *et al.*, (2003).

Outro tipo de é a clássica ou permanente (Figura 3). Estas podem ter grandes dimensões, atingindo centenas de metros de largura e dezenas de metros de profundidade, em casos extremos (DEROSE *et al.*, 1998). Voçorocas clássicas impõem uma mudança drástica na paisagem e afetam intensamente o ecossistema no entorno; promovendo drenagem da água no solo à grandes profundidades, tornando-se obstáculo físico para animais e comprometendo atividades agrícolas e a pecuária. Quando atingem grandes dimensões, são frequentemente associadas a desastres ambientais e podem impor riscos às vidas humanas por fornecerem uma

grande quantidade de detritos em eventos de enxurradas (JINFENG *et al.*, 2012; ABDULFATAI *et al.*, 2014).

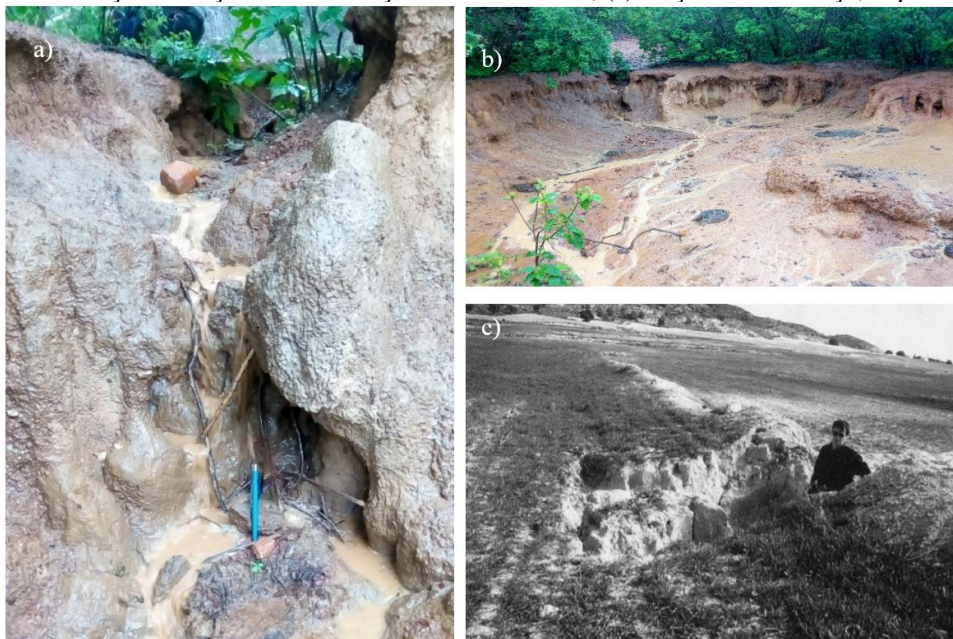
Figura 3 - Voçorocas clássicas – (a) Voçoroca em Gilbués-PI (bacia do rio Gurguéia), detalhe na remoção do solo na região das raízes (2017); (b) Voçoroca na bacia do rio Tenente Amaral, no Mato Grosso, com 15 m de profundidade e; (c) Voçoroca gigante em Whatatutu- NZ



Fonte: (a) Acervo pessoal; (b) HUNKE (2015); (c) DEROSE *et al.*, (1998).

Outro tipo é o das voçorocas de terraço (em inglês, *bank gully*), ilustradas na Figura 4, que consiste em voçorocas semelhantes às clássicas, porém, formadas nas margens de terraços ou rios efêmeros, quando uma trilha de escoamento concentrado cruza um banco de solo. Essas voçorocas têm como características baixa relação entre a área de contribuição do escoamento e a área afetada, alta declividade. Além disso, têm baixo comprimento e crescimento sem ramificações (POESEN, 1993; VANDEKERCKHOVE *et al.*, 2000).

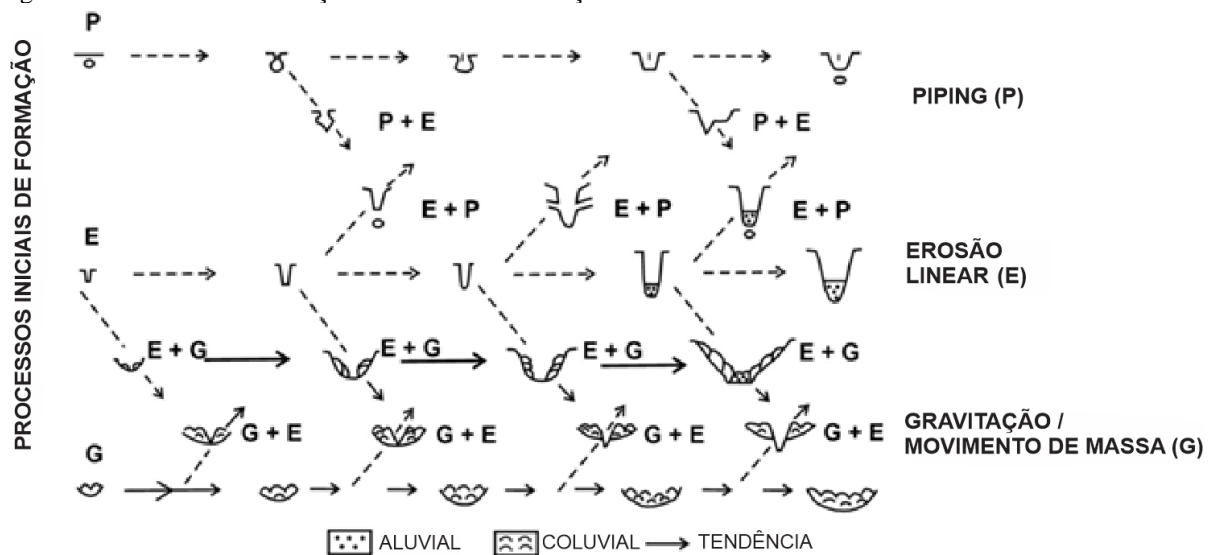
Figura 4 - Voçorocas de terraço – (a) detalhe de formação de voçoroca de terraço em Aiuaba-CE; (b) Área degradada com formação de voçorocas de terraço em Aiuaba-CE e; (c) Voçoroca de terraço, Espanha (1997)



Fontes: (a) Acervo pessoal; (b) Acervo pessoal; (c) POESEN *et al.*, (2002).

Voçorocas podem ainda ser classificadas pelos seus processos de formação, uma vez que um mesmo canal possui influência de diversos problemas simultaneamente (Starkel, 2011), como ilustrado na Figura 5. Starkel (2011) apresenta três processos básicos como gatilho do voçorocamento: tunelamento (P – em inglês, *pipping*), erosão linear (E – em inglês, *linear erosion*; já incluindo os mecanismos apresentados anteriormente, como erosão do fundo e paredes do canal devido a tensão cisalhante) e movimento de massa (G – em inglês, *gravitation/mass movement*; que inclui perda de estabilidade das paredes devido declividade excessiva e lavagem realizada pelo escoamento lateral). A Figura 5 também ilustra a interação entre os processos e as possíveis geometrias geradas a partir daí.

Figura 5 - Processos de formação e crescimento de voçorocas



Fonte: Adaptado de STARKEL, 2011.

2.3 Histórico da modelagem de voçorocas

Voçorocas, como apresentado anteriormente, são produtos das erosões na forma de canais devido à concentração de escoamento superficial (majoritariamente) e pelo macro relevo da área. Segundo Hann *et al.* (1998), o canal possui três fontes de solo erodido, sendo eles:

- degradação do fundo do canal devido ao cisalhamento;
- falha das paredes do canal; e
- movimento ascendente da parede da cabeceira.

Na literatura encontramos dois tipos diferentes de modelos usados com a tarefa de descrever a formação, o desenvolvimento e o tamanho de voçorocas, divididos em duas categorias:

i) Modelos empíricos: baseados em medidas de campo, dados hidrológicos e topográficos, buscam correlacionar largura e profundidade das seções com dados de vazão, declividade, tensão crítica, número de Manning, entre outros. São modelos empíricos relevantes os propostos por: Watson *et al.* (1986), Woodward (1999), Nachtergaele *et al.* (2001, 2002), Poesen *et al.* (2002), Yao *et al.* (2007) e Wells *et al.* (2013).

ii) Modelos de base física: o mais relevante modelo de voçorocas de base física é de Foster e Lane (1983), desenvolvido para modelagem de ocorrências efêmeras e de terraço. O modelo foi inicialmente proposto para cálculo da geometria da área da seção após um único evento de escoamento em uma área agrícola, mas tem potencial de ser aplicado a outros contextos, como as voçorocas permanentes de pequeno porte. Outros modelos de base física têm sido propostos, sempre tomando como ponto de partida o modelo de Foster e Lane. São modelos empíricos relevantes os propostos por: Storm (1990), Ascough *et al.* (1997), e Dabney *et al.* (2014), WEPP (*Water Erosion Prediction Project* – USDA, 1995) e CREAMS (*Chemicals, Runoff, and Erosion from Agricultural Management Systems*– USDA, 1980).

2.4 Relevância do estudo da erosão em voçorocas

Voçorocas ocorrem em diversos climas e paisagens ao redor do globo, sendo possível observá-las em diferentes escalas, formas e dinâmicas (POESEN *et al.*, 2011). No entanto, os modelos usuais de perda de solo por escoamento superficial não levam em conta os efeitos relativos à erosão por voçorocamento (POESEN *et al.*, 2003), como o grave dano causado ao solo – com perdas de 10 a 100 ton.ha⁻¹.ano⁻¹ (POESEN *et al.*, 2002) – ou a redistribuição do solo erodido e sua dinâmica dentro da bacia (VENTE, POESEN, 2005).

Esses processos erosivos podem representar até 90% do total de solo erodido numa dada bacia, a depender de fatores locais, como regime hidrológico, topografia, uso do solo e tipo de voçorocas (POESEN *et al.*, 2003). Além disso, voçorocas têm grande capacidade de transporte de sedimento, maior que do escoamento laminar desenvolvido nas encostas, chegando a transportar 80% do sedimento produzido nas áreas superiores da bacia (McCOOL *et al.*, 1989), gerando, portanto, um aumento da razão de aporte de sedimentos (em inglês, *Sediment Delivery Ratio* – SDR) e da conectividade (VERSTRAETEN *et al.*, 2006).

Voçorocas estão ainda relacionadas com intensificação da drenagem e agravamento de processos de desertificação, como na região sul de Israel, onde os canais promovem

drenagem de aluvião, causando uma perda de 80% da biomassa e significativa perda para a agricultura (AVNI, 2005).

Figura 6 - Voçoroca clássica com drenagem de aluvião em Israel



Fonte: Avni, 2005.

Somando-se aos graves impactos ambientais, voçorocas representam um obstáculo dentro de áreas de lavoura e pastejo, seja para o trânsito de pessoas, máquinas e animais, como observado historicamente na bacia do Rio Carrión, na Espanha (NAVARRO *et al.*, 2014). Segundo Valentin *et al.* (2005), a atividade de mitigação de voçorocas em lavouras representa em torno 5% do custo anual de produção e 7% das horas trabalhadas.

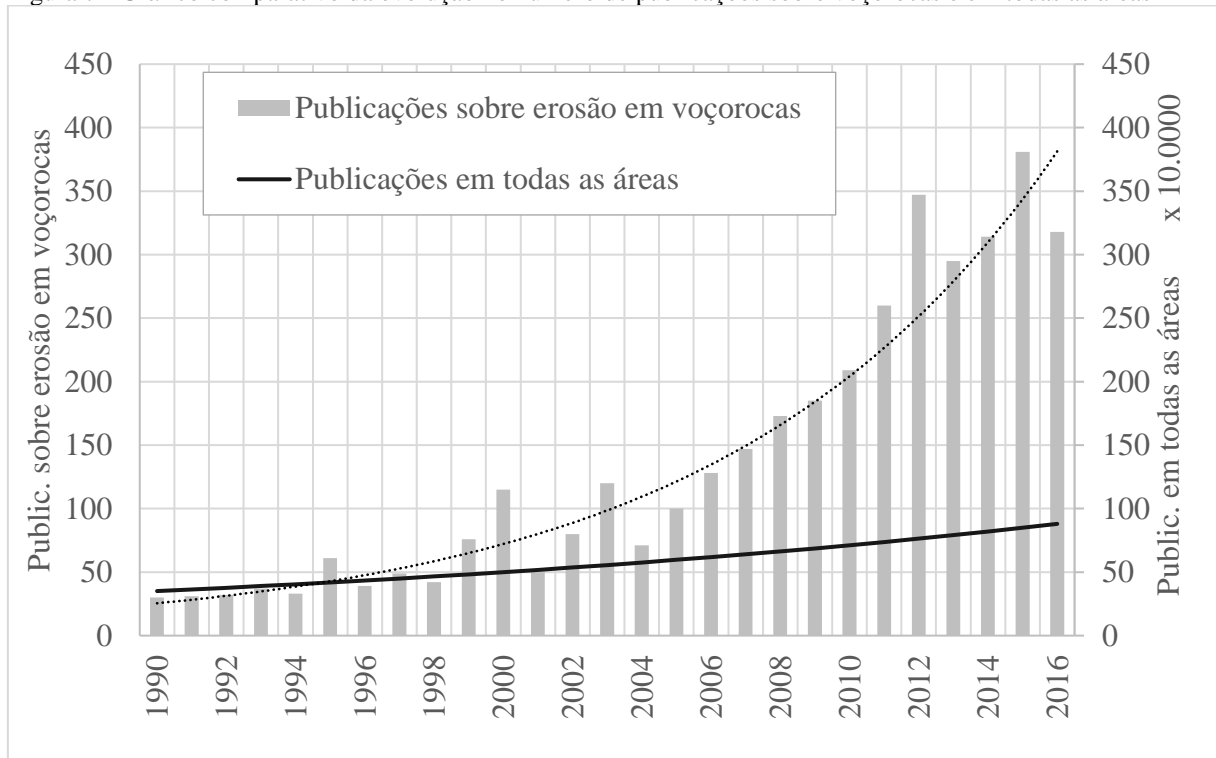
Apesar de todos os impactos causados pelo voçorocamento existe, uma carência a ser suprida quanto às pesquisas realizadas sobre o tema. Quanto ao monitoramento, na Europa, dados de mais de 2200 lotes.ano⁻¹ haviam sido publicados entre 1980 e 2006 (CERDAN *et al.*, 2006) sobre erosão laminar, ao passo que menos de 50 lotes.ano⁻¹ foram publicados sobre voçorocas. Ainda, uma consulta rápida ao Portal Periódicos², ao se realizar busca simples com o termo erosão laminar (em inglês, *sheet erosion*) obteve-se um total de 21.582 resultados; utilizando-se o termo erosão por voçoroca (em inglês, *gully erosion*) obteve-se apenas 7.167 resultados. No entanto, o interesse pelo tema vem crescendo ao longo das últimas duas décadas. A partir da base de dados Portal Periódicos observou-se uma taxa de aumento anual das

¹ O valor refere-se ao somatório de todos os lotes monitorados vezes a duração do monitoramento.

² Endereço: <<http://periodicos.capes.gov.br>>, acesso em 21 de agosto de 2017. O Portal Periódicos da Capes foi tomada como base de dados representativa pois figura como a maior biblioteca virtual de informação científica do mundo: <<https://goo.gl/uR7sVA>>

publicações de artigos sobre voçorocas em revistas de 10,1% a.a., já a produção científica anual total, em termos de publicações de artigos, tem crescido a uma taxa de 3,6% a.a. (LARSEN, von INS, 2010). Estes dados estão apresentados na Figura 7.

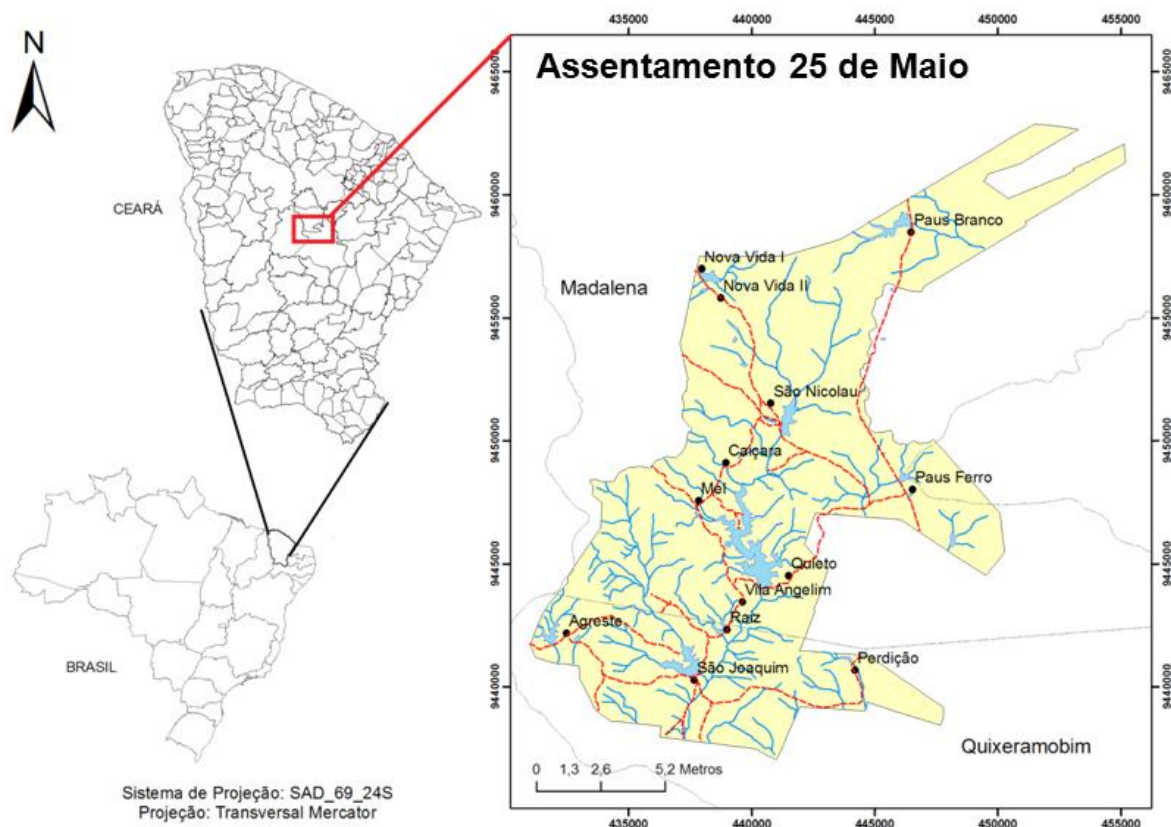
Figura 7 - Gráfico comparativo da evolução no número de publicações sobre voçorocas e em todas as áreas



3 MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi realizado no Assentamento 25 de Maio (A25M, Figura 8), no município de Madalena, Ceará. O assentamento está localizado entre as latitudes 4°40' e 5°00' Sul e longitudes 39°20' e 39°40' Oeste (UTM: 9437000 a 9463000; 430000 a 455000), a 170 km de Fortaleza, nos limites do município de Madalena com Quixeramobim e Boa Viagem. O assentamento possui uma área de 23.000 hectares (GORAYEB *et al.*, 2015). A área de estudo possui, segundo a classificação de Köppen, clima semiárido quente (BSh), com temperatura média entre 26 e 28 °C, estação chuvosa bem definida entre os meses de janeiro e abril (IPECE, 2015). A precipitação média anual é de 780 mm, com coeficiente de variação de 46%. A taxa de evaporação potencial é superior a 2.000 mm anuais (SCHRAMM, 2016).

Figura 8 – Localização, contorno, hidrografia e principais agrovilas do Assentamento 25 de Maio

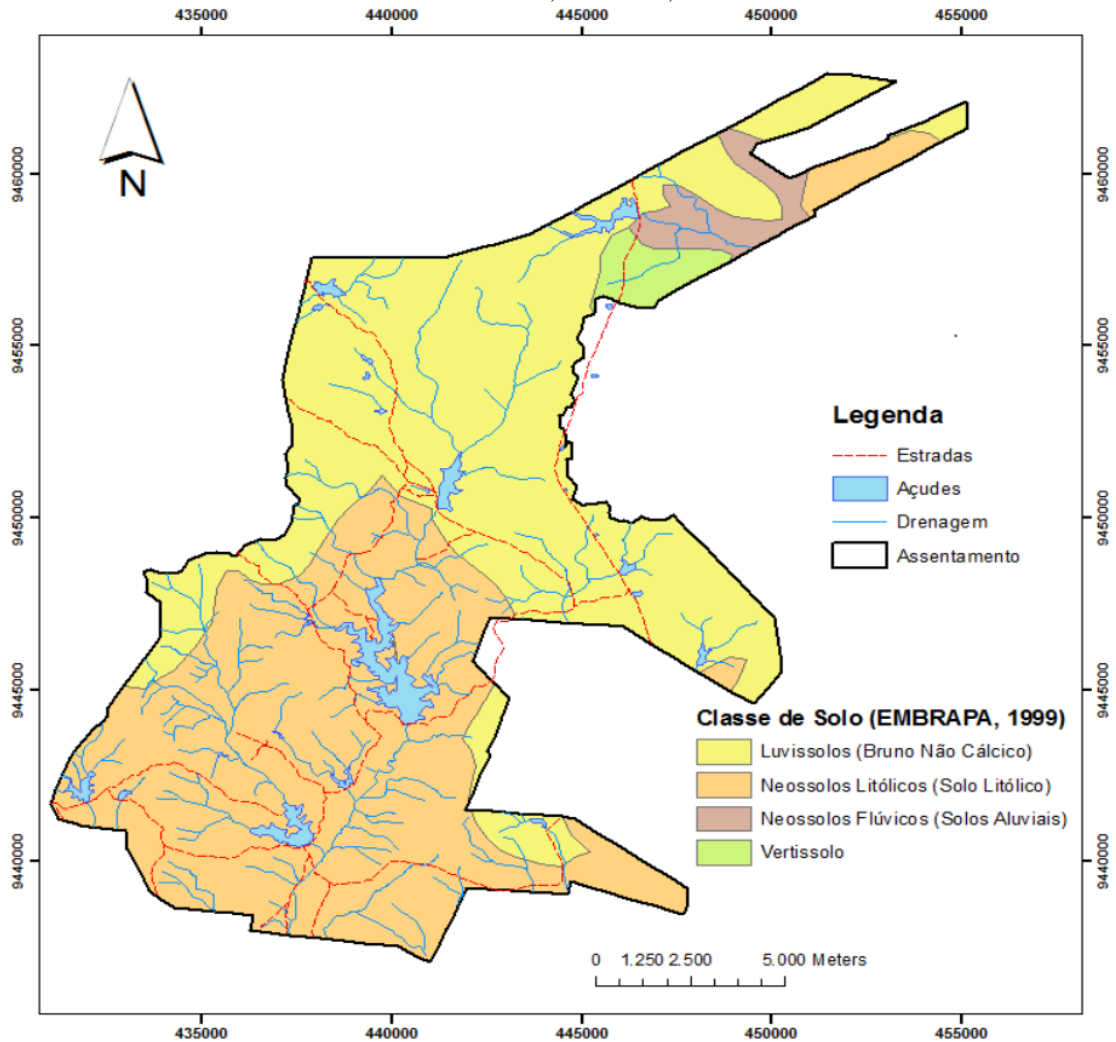


Fonte: Adaptado de Pinheiro (2011).

A região possui solos rasos com embasamento cristalino, compostos por luvisolos, Neossolos litólicos e flúvicos e vertissolos (Figura 9). Os três sítios escolhidos para o desenvolvimento do projeto encontram-se na região de Luvisolo (cuja denominação anterior era *Bruno Não Cálculo*). A cobertura vegetal é de Caatinga densa e floresta caducifólia

espinhosa (IPECE, 2015). As principais atividades econômicas desenvolvidas no assentamento são o plantio de milho e feijão em sequeiro, pecuária (extensiva), principalmente bovina (produção de leite) e ovina (corte), além da apicultura.

Figura 9 - Classes de solo no Assentamento 25 de Maio, Madalena, Ceará



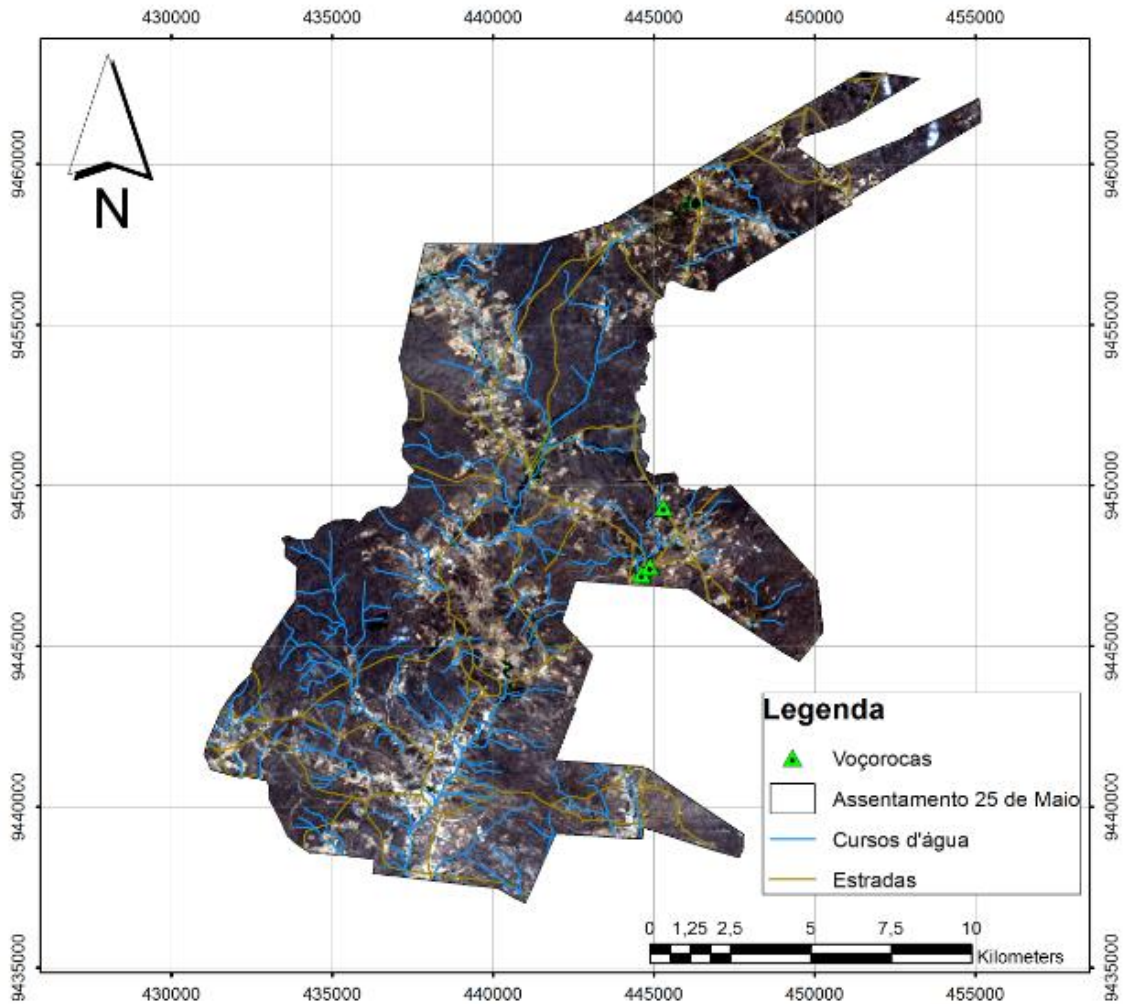
Fonte: Pinheiro (2011).

3.1 Áreas de estudo

No dia 10 de setembro de 2017, foi realizada campanha para escolha das áreas de estudo. Junto com moradores do assentamento, foram identificados oito sítios com ocorrência de voçorocamento dentro do A25M. Entre esses, foram selecionados aqueles que apresentavam maiores dimensões e, segundo informações coletadas, não tinham modificação considerável em sua geometria nos últimos dez anos (Figura 10). Também foi identificado o marco inicial do

processo erosivo, que coincide com a construção das estradas de terra na região, no ano de 1958.

Figura 10–Rede hidrográfica e locais de estudo no A25M



3.2 Levantamento topográfico e processamento de dados

Após a escolha dos locais de estudo, foi realizado levantamento topográfico utilizando estação total (Modelo Ruide RTS – 820R3). Foi realizado um levantamento com densa nuvem de pontos (~600 pontos por área), utilizando uma amostragem cobrindo toda a extensão da bacia hidrográfica das voçorocas, mas prezando por concentrar grande parte dos pontos sobre o canal e seus limites para uma boa definição de sua geometria e volume. Os demais pontos visaram delimitar a bacia hidrográfica, que é formada pela área de contribuição da voçoroca, dada a seção de controle escolhida em campo. Após o levantamento topográfico foram utilizados os softwares *DataGeosis* (V. Office 7.5) e *Surfer* (V. 11.0) para construção de

modelos digitais do terreno (MDT). Foi realizado um segundo levantamento com o auxílio de VANT (Veículo Aéreo Não Tripulado) para construção de MDTs mais precisos, o possibilitou a realização de comparação entre as técnicas de obtenção de dados.

O equipamento utilizado, fabricado pela DJI *Innovations*, foi o Inspire 1 (Figura 11 - VANT utilizado no levantamento (Inspire 1) embarcando uma câmera X5, com resolução de 16MP (4000 × 4000 pixels) e campo de visada (FOV – *Field Of View*) de 94°, pancromática.

Figura 11 - VANT utilizado no levantamento (Inspire 1), cujas dimensões são 48 cm × 45 cm × 30 cm



Fonte: Acervo pessoal (2017).

O equipamento possui um sistema que auxilia a aeronave a identificar sua posição utilizando sonares e dados de imagem obtidos pela câmera (em inglês, *Vision Positioning System*) que juntamente com o sistema GPS (em inglês, *Global Position System*) compõem um sistema de localização de alta precisão. O equipamento possui também um mecanismo de estabilização da câmera, que minimiza distorções durante o voo.

A definição da área do voo foi realizada em campo com o auxílio do software *Lichi*, no qual é possível programar parâmetros do voo do VANT, como a altura desejada, a rota e a velocidade de voo. Ao chegar a cada vértice da rota de voo, o VANT executou uma manobra denominada *Stop and Turn*, que se configura em um giro em seu próprio eixo antes de se encaminhar para o ponto seguinte. Foi adotada uma superposição de 80% frontal e 60% lateral. A altura de voo foi definida em 30 metros. Foi obtido MDE com densidade de 520 a 600 pixels por m²; e precisão de elevação da ordem de 0,4 centímetros.

O georreferenciamento das imagens aéreas obtidas foi realizado por meio de Pontos de Controle do Terreno (em inglês, GCP – *Ground Control Points*), através da atribuição a todos os pixels do ortomosaico de coordenadas tridimensionais referidas a projeção cartográfica Mercator, com sistema de coordenadas WGS 84 – UTM.

Foram distribuídas nas áreas de estudo placas de controle utilizadas para realizar o georreferenciamento do modelo digital, num total de quatro por voçoroca. As coordenadas de cada placa de controle foram obtidas utilizando sistemas GNSS Trimble® R4 - RTK, com precisão milimétrica.

3.3 Amostragem do solo e parâmetros K_r e τ_c

Após a escolha dos locais e execução do levantamento topográfico, foram coletadas amostras de solo a cada 20 cm de profundidade, até atingir-se uma profundidade equivalente à dos canais das voçorocas, para análise granulométrica e de teor de matéria orgânica. As amostras foram coletadas nas profundidades de 10, 30 e 50 cm em todas as três áreas de estudo, onde na profundidade de 50 cm foi encontrado material resistente e alteração de rocha.

As amostras foram coletadas em dois locais diferentes da bacia, sendo um próximo a voçoroca 1 e outro próximo as voçorocas 2 e 3, que são vizinhas.

Os ensaios de granulometria foram realizados de acordo com a norma DNER-ME 051/94 e de teor de matéria orgânica de acordo com a norma NBR13600/1996. Granulometria e matéria orgânica são dados de entrada para a obtenção dos parâmetros K_r (erodibilidade da voçoroca – $s.m^{-1}$) e τ_c (tensão crítica de cisalhamento – Pa) das funções de pedotransferência (FPT) do modelo WEPP dadas as Equações 1 e 2 abaixo.

$$K_r = 0,00197 + 0,00030 \cdot \%AMF + 0,038633 \cdot e^{(-1,84 \cdot \%MATORG)} \quad (1)$$

$$\tau_c = 2,67 + 0,065 \cdot \%C - 0,058 \cdot \%AMF \quad (2)$$

em que $\%AMF$ é o percentual de areia muito fina, $\%MATORG$ o percentual de matéria orgânica e $\%C$ o percentual de argila. Nessas equações, se o teor de areia muito fina for maior que 40%, usam-se 40%, de mesmo modo, se o percentual de argila for maior que 40%, adota-se 40%. Se o percentual de matéria orgânica for menor que 0,35%, usa-se 0,35%. Essas equações têm validade para solos com teor de areia maior que 30%. Caso o solo possua menos que 30% de areia em sua composição são utilizadas as equações abaixo (Equações 3 e 4) do modelo WEPP.

$$K_r = 0,0069 + 0,1340 \cdot e^{(-0,20 \cdot \%C)} \quad (3)$$

$$\tau_c = 3,5 \quad (4)$$

Nas Equações 3 e 4, o teor de argila deve ser maior que 10%. Caso não seja, deve-se adotar 10%. Abaixo temos a classificação das partículas quanto seus diâmetros (Figura 12).

Figura 12 - Classificação de partículas (medidas em mm)

Classificação USDA	Solo fino									
	Argila		Silte		Areia					
	fina	grossa	fina	grossa	mt. fina	fina	média	grossa	mt. grossa	
<i>milímetros:</i>	0.0002	0.002	0.02	0.05	0.1	0.25	0.5	1	2	

Fonte: Adaptado de USDA³

3.4 Dados de precipitação e parâmetros hidrológicos

Dados de chuva diária

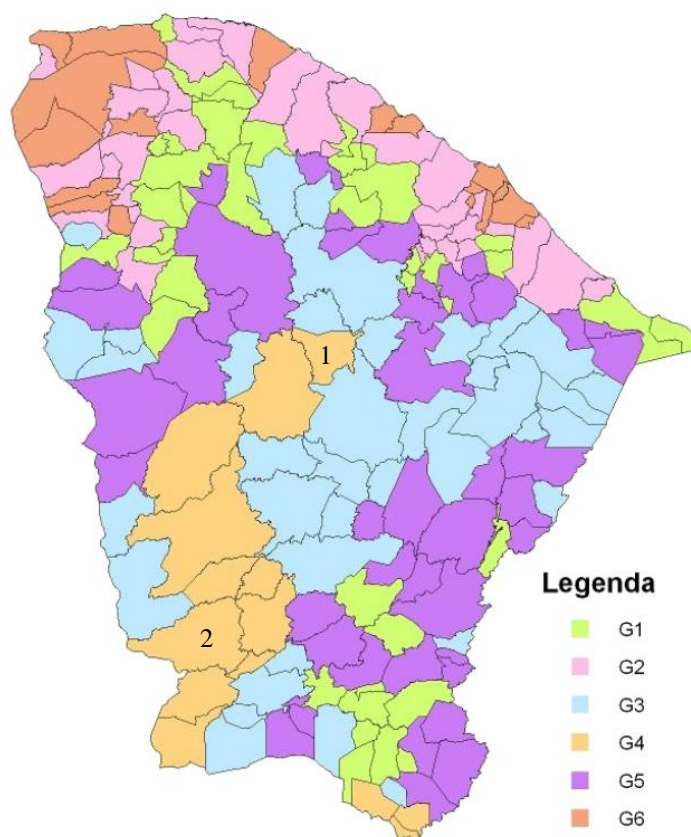
A partir do banco de dados da FUNCEME (2016), foram obtidos os dados diários de chuva para o município de Madalena a partir de 1958 até 2015. No período de 1958 a 1973 foram utilizados dados do posto pluviométrico de Coroatá operado pelo DNOCS (5,03° S; 39,33° W). De 1974 a 1987 foram utilizados dados da estação pluviométrica de Boa Viagem, operada pela FUNCEME (5,12° S; 39,73° W). A partir de 1988 foram utilizados dados de pluviômetro do posto de Madalena (4,85° S; 39,57° W). Para o desenvolvimento deste trabalho, foi tomado como pressuposto que todas as chuvas diárias aconteceram em um único evento, possibilitando a definição de funções de correlação entre chuva diária e intensidade, como será discutido à frente.

Dados de duração de chuva

Para se avaliar a duração de chuva, foram utilizados dados de intensidade de chuva coletados no município de Aiuaba (FIGUEREDO *et al.*, 2016). Madalena e Aiuaba compõem uma região pluviometricamente homogênea do estado (MENDES, 2010), como podemos ver na Figura 13 (Madalena – 1; Aiuaba – 2).

³ Disponível em <https://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detail/soils/ref/?cid=nrcs142p2_054253> Acesso em set. 2017

Figura 13 - Proposta de classificação de regiões pluviométricas homogêneas no Ceará



Fonte: Mendes (2010)

A partir dos dados de chuva de Aiuaba, foram obtidas equações de correlação entre lâmina total precipitada diária e duração de chuva, bem como intensidade máxima de 60, 30 e 15 minutos. Observou-se que há grande dispersão e que os índices de correlação são baixos; no entanto, pelo caráter de exploração da pesquisa e pela ausência de dados mais consistentes na região utilizaram-se estas curvas para estimativa da duração das chuvas e vazões na área de estudo.

Abstração inicial e produção de escoamento

Para avaliar a produção de escoamento, foi utilizado o método do CN (*Curve Number*) do *Soil Conservation Service* (SCS), amplamente utilizado e bem documentado na literatura (CHOW *et al.*, 1988; MAIDMENT, 1992; HAAN *et al.* 1994). Os valores obtidos foram comparados com resultados de outros trabalhos quanto à abstração inicial (I_a), ou seja, a lâmina mínima precipitada, necessária à ocorrência de escoamento (ALMEIDA *et al.*, 2012; FIGUEREDO *et al.*, 2016; GUYASSA *et al.*, 2017).

A partir de informações sobre o uso e ocupação do solo, assim como sobre o tipo de solo, foi possível avaliar o valor de CN (Tabela 1). O solo da região é da categoria C, ou

seja, solo franco-arenoso e raso, com baixo teor de matéria orgânica e teor significativo de argila (CHOW *et al.*, 1988).

Tabela 1 - Valores do parâmetro *Curve Number* (CN)

Uso e ocupação do solo	Condições da superfície	Tipo de Solo			
		A	B	C	D
Área cultivada	<i>Boa</i>	62	71	78	81
	<i>Ruim</i>	72	81	88	91
Pastagem	<i>Boa</i>	39	61	74	80
	<i>Ruim</i>	68	79	(86)	89

Fonte: CHOW *et al.*, 1988

Assumindo-se CN igual a 86, obtém-se abstração inicial igual a 7 mm (20% da armazenagem potencial, segundo o método). Este valor corrobora com outros valores encontrados na literatura para solos e usos similares, como 7,2 mm (ALMEIDA *et al.*, 2012), 12 mm (FIGUEREDO *et al.*, 2016) e 5 mm (GUYASSA, *et al.*, 2017). No presente trabalho, foi assumida abstração inicial de 7 mm. Uma vez estimados os parâmetros hidrológicos e do solo, é possível simular o desenvolvimento de voçorocas usando-se o MFL, como será descrito no próximo item.

3.5 Modelo de Foster e Lane

Estimativa do volume erodido

Para estimar a erosão linear deve-se procurar o volume do canal gerado pelo escoamento concentrado. Utilizando-se modelos computacionais tridimensionais é possível calcular o volume erodido pela subtração das superfícies (Equação 5).

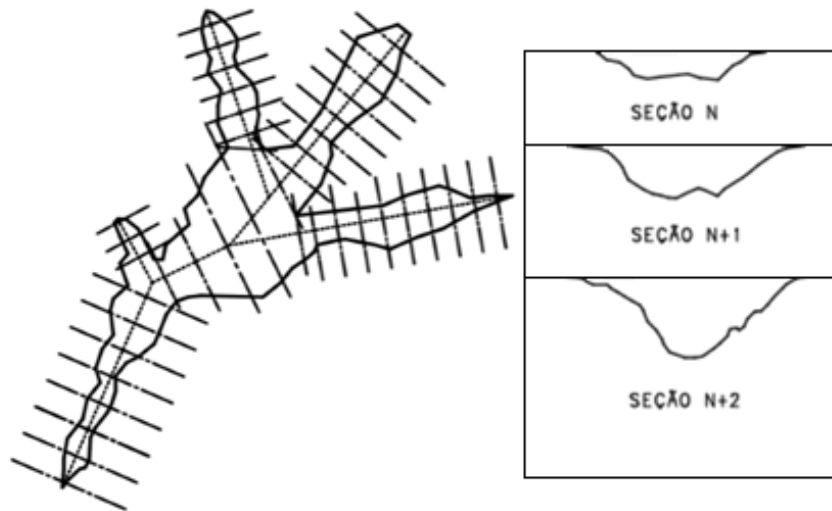
$$V = \iint [f_1(x, y) - f_0(x, y)] dx dy \quad (5)$$

em que V é o volume erodido, f_1 e f_0 são funções que representam a altura do terreno (topografia) em relação a um referencial fixo em dois instantes. Uma solução similar pode ser obtida de forma discreta através da Equação 6.

$$V = A_p \cdot \sum_{i=1}^{n_p} [h_1(i) - h_0(i)] \quad (6)$$

em que A_p é a área do pixel, n_p o número de pixels e $h_1(i)$ e $h_0(i)$ as alturas em dois momentos: anterior e posterior à erosão para cada pixel i . No entanto, nem sempre é possível construir uma superfície com um pixel suficientemente pequeno para obter uma boa precisão do volume erodido, seja por falta de equipamentos acurados ou pela presença de vegetação, por exemplo. Nesses casos, é possível calcular o volume seccionando-se o canal em um número suficiente de subdivisões de modo que cada faixa seja representada por uma seção transversal (Figura 14). O volume da voçoroca é calculado, então, pela Equação 7.

Figura 14 – Planta e cortes de uma voçoroca hipotética e método para cálculo do volume



$$V = \sum_{i=1}^n \frac{d}{3} (A_{i-1} + \sqrt{A_{i-1}A_i} + A_i) \quad (7)$$

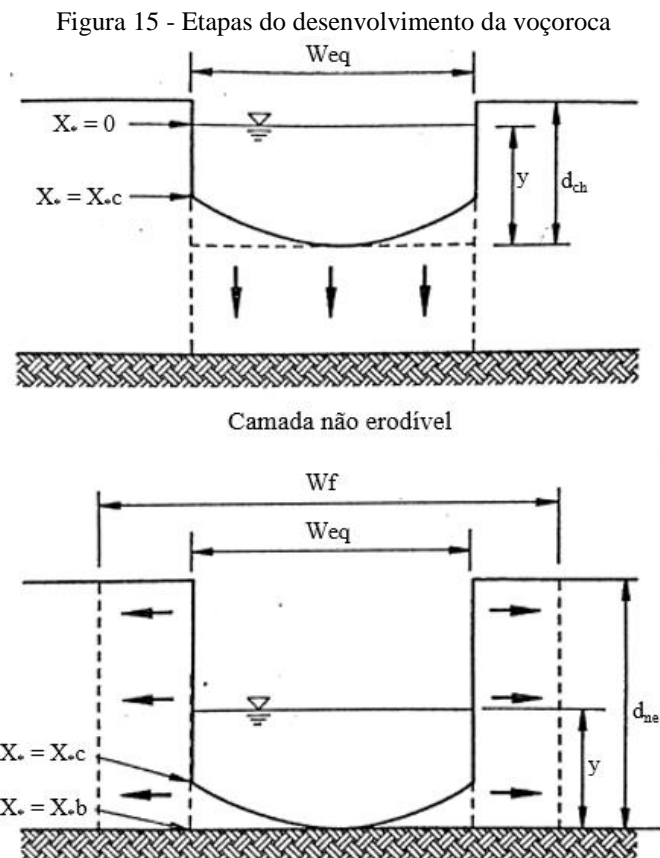
em que V é o volume de solo erodido, A_{i-1} e A_i são áreas de seções transversais consecutivas e n o número de parcelas obtidas (número de seções menos 1).

Conceitos gerais

Em ambos os casos citados, tratamos de como medir o volume de erodido numa dada voçoroca. Entretanto, quando se deseja trabalhar com regiões de grande extensão ou avaliação de mudança de cenários, a capacidade de predizer qual é o volume erodido em voçorocas independente de medidas de campo torna-se essencial. O Modelo de Foster e Lane (1983) permite calcular a área da seção transversal erodida na forma de voçoroca efêmera. A partir da área calculada podemos avaliar o volume erodido a partir da Equação 7.

O MFL baseia-se num canal retangular e na tensão crítica de cisalhamento. O modelo se baseia também na premissa de que a voçoroca se desenvolve em duas etapas (Figura

15). A primeira etapa ocorre até a erosão atingir a camada não erodível. Nesta etapa, o canal atinge rapidamente a largura de equilíbrio (W_{eq}) e desce com largura constante até a camada não erodível. A partir deste ponto inicia-se a segunda etapa, na qual a voçoroca cresce apenas para as laterais até uma largura suficientemente grande (W_f), na qual a tensão atuante é sempre menor que a tensão crítica. Quando esta condição é satisfeita a voçoroca não evolui mais (para aquele evento).



Fonte: adaptado de HAAN *et al.*, 1994

Equacionamento da primeira etapa

A seguir apresentamos o equacionamento do modelo para a primeira etapa. Todas as grandezas estão com suas unidades no sistema internacional.

$$D_r = K_r(\tau - \tau_c) \quad (8)$$

em que D_r é a razão de perda de solo ($\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$), K_r é o fator de erodibilidade para erosão linear ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$), τ e τ_c são a tensão atuante no ponto e a tensão crítica para início da erosão (Pa). Se τ_c for maior que τ , não ocorre erosão. No modelo foram definidas variáveis normalizadas adimensionais, na Equação 9 tem-se a tensão de cisalhamento normalizada (τ_*).

$$\tau_* = \frac{\tau}{\tau_a} = 1,35[1 - (1 - 2X_*)^{2,9}] ; 0 \leq X_* \leq 0,5 \quad (9)$$

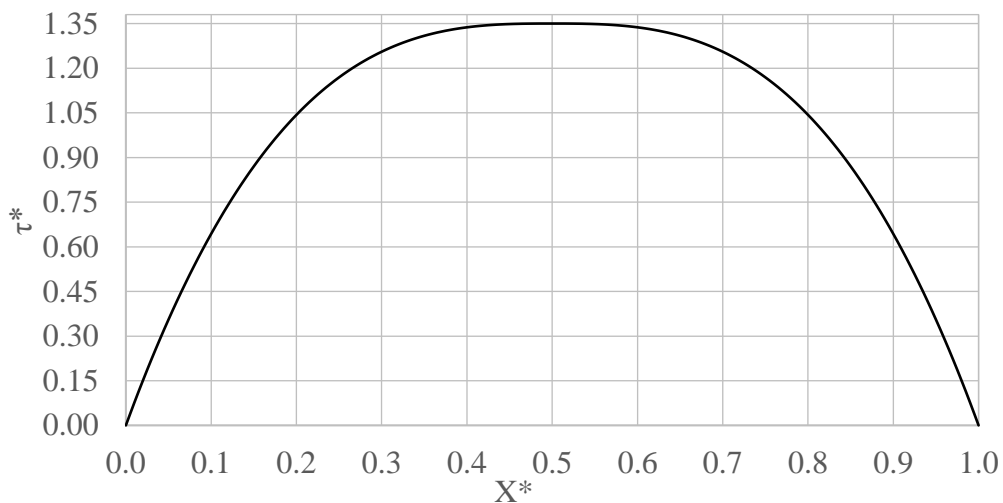
em que τ_a é a tensão média atuante na seção e X_* é a distância normalizada percorrida sobre o perímetro molhado WP (Equação(11)).

$$\tau_a = \gamma R_h S \quad (10)$$

$$X_* = \frac{X}{WP} ; 0 \leq X \leq WP \quad (11)$$

A distribuição de tensões normalizadas é simétrica e tem seu eixo de simetria em X_* igual a 0,5, ou seja, no ponto em que X é metade de WP . Na equação 10, γ é o peso específico da água e S é a declividade em valor absoluto. É fácil constatar, a partir das Equações 9, 10 e 11, que a distribuição das tensões normalizadas é a mesma. Na Figura 16 temos o gráfico X_* versus τ_* .

Figura 16 - Distribuição de tensões (normalizadas) na seção



Outras variáveis normalizadas são o raio hidráulico (R_h) e a largura de equilíbrio do canal (W_{eq}) de acordo com as equações 12 e 13.

$$R_{h*} = \frac{R_h}{WP} \quad (12)$$

$$W_* = \frac{W_{eq}}{WP} \quad (13)$$

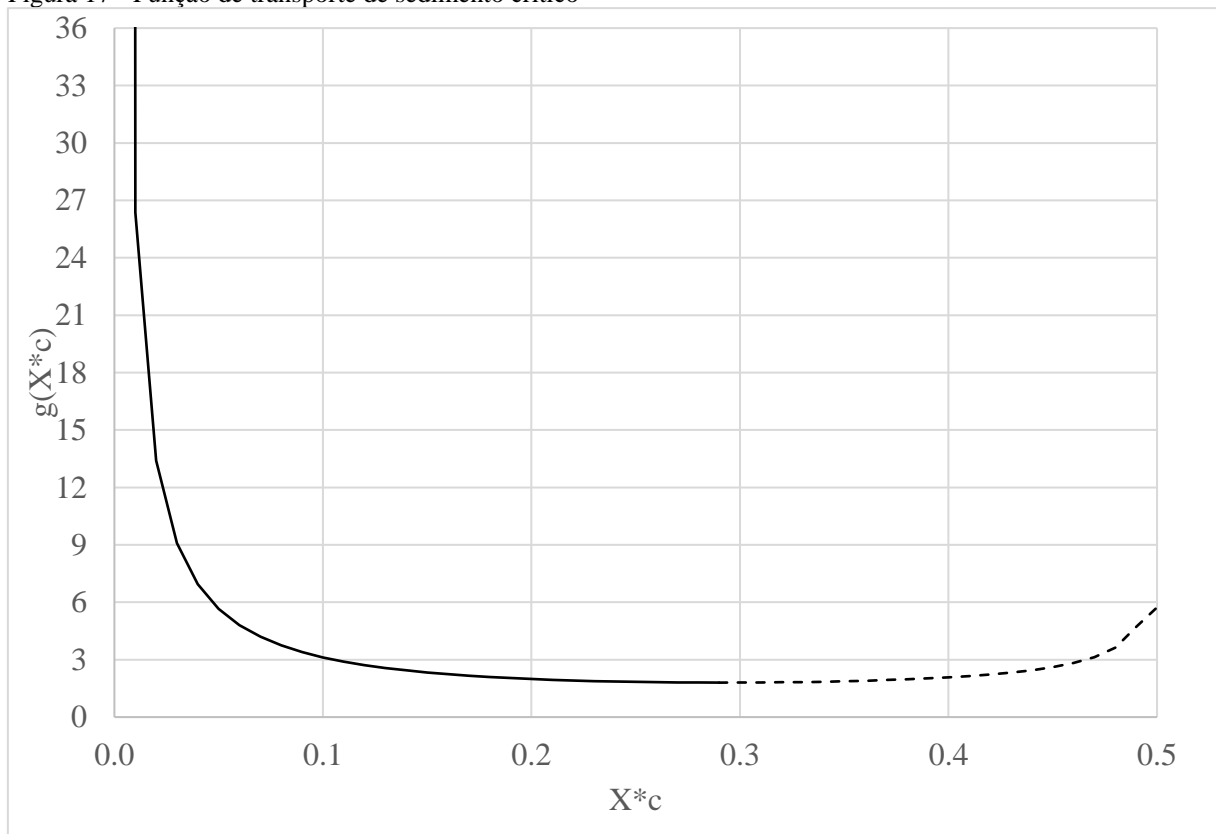
A partir da equação de Manning (Equação14) é possível obter uma função de transporte de sedimento, dada na Equação 15(15).

$$u = \frac{1}{n} \cdot \frac{R_h^{\frac{2}{3}}}{\sqrt{S}} \quad (14)$$

$$g(X_{*c}) = \frac{1}{\tau_{*c} R_{h*}^{3/8}} = \frac{\gamma S}{\tau_c} \left[\frac{nQ}{\sqrt{S}} \right]^{3/8} \quad (15)$$

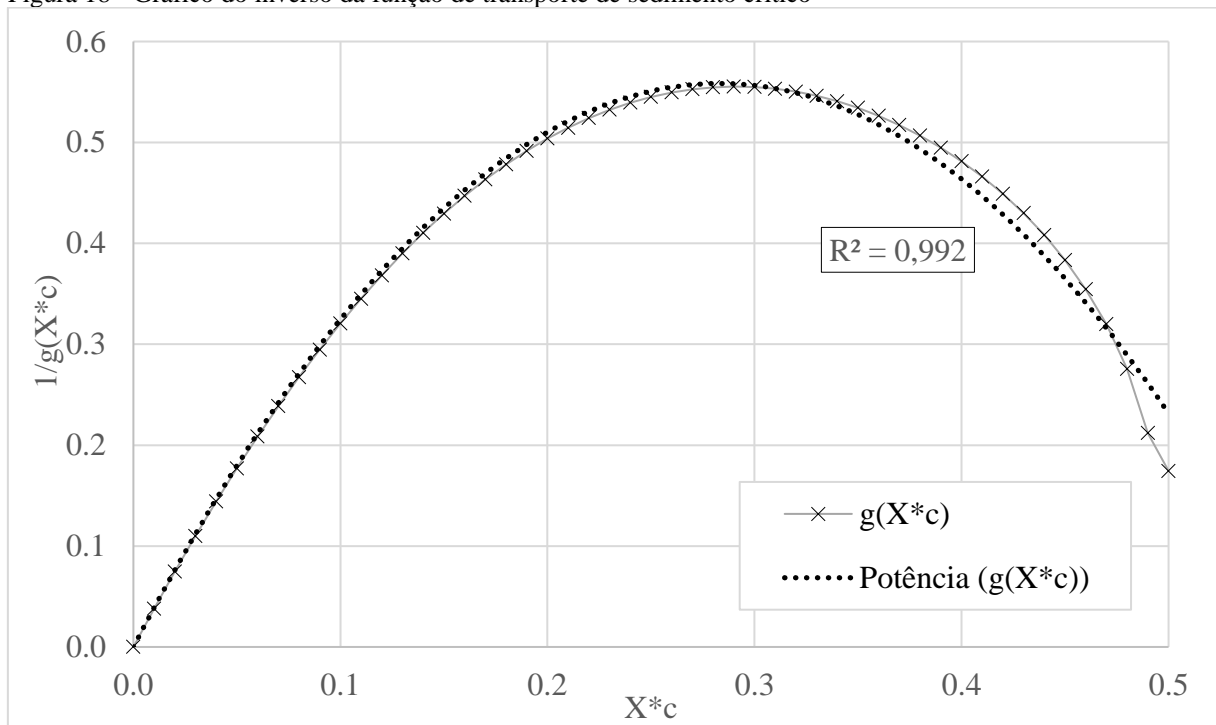
em que X_{*c} é a distância normalizada X^* e τ é igual a τ_c ; τ_{*c} é a tensão normalizada no ponto X_{*c} e n o coeficiente de Manning do canal (HAAN *et al.*, 1994). Vemos acima que a função de transporte aplicada ao ponto crítico pode ser descrita apenas por termos conhecidos (segunda parte da equação) e relacionada com termos desconhecido (τ_{*c} e R_{h*}). Não se conhece, a priori, o ponto X_{*c} . A partir das Equações 9 a 15, foram desenvolvidas relações entre as grandezas de geometria normalizada do canal W^* , R_{h*} , X_{*c} e a função de transporte $g(X_{*c})$. A tabulação dos dados é apresentada no Anexo 1. Na Figura 17 há a relação da função de transporte com a distância normalizada crítica.

Figura 17 - Função de transporte de sedimento crítico



Para obter uma relação numérica entre $g(X_{*c})$ e X_{*c} foi utilizado o inverso da função de transporte e utilizada uma regressão polinomial de ordem 2. Na Figura 18 podemos ver esta relação.

Figura 18 - Gráfico do inverso da função de transporte de sedimento crítico



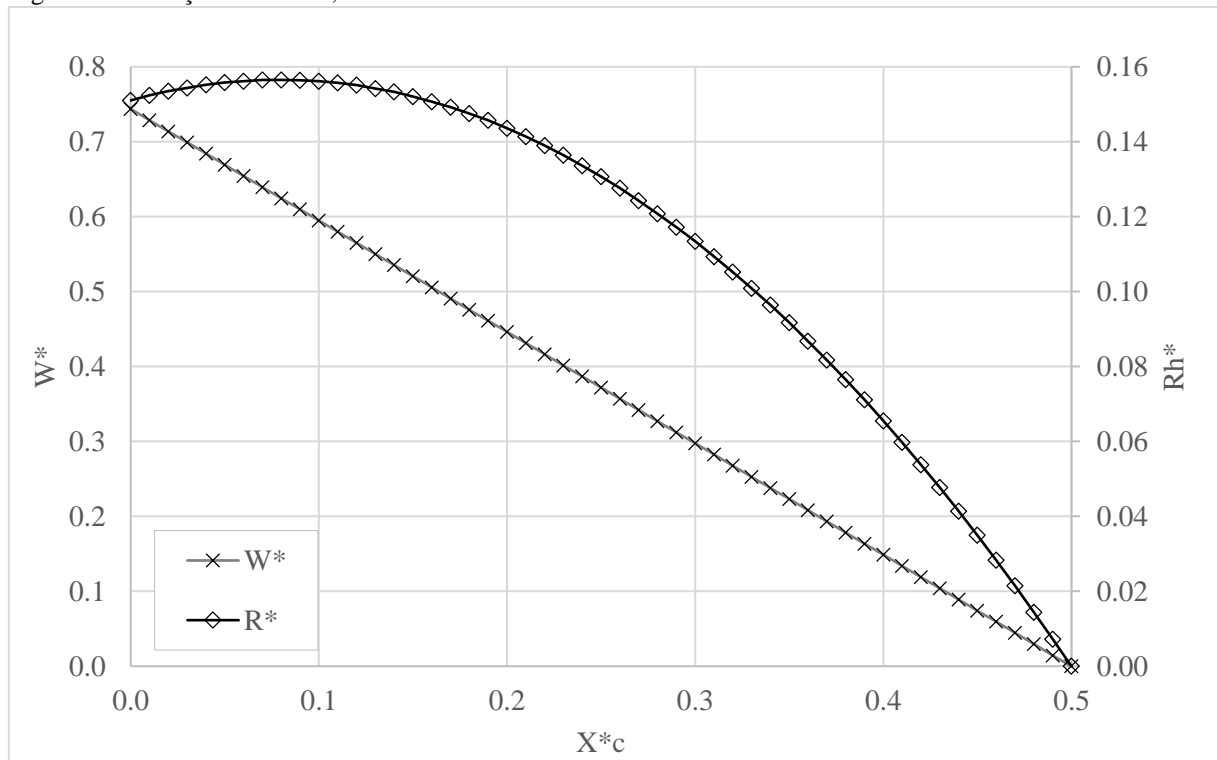
A partir da relação acima, foi possível obter o valor de X^*c a partir da Equação 16.

$$6,9594X_{*c}^2 - 3,9429X_{*c} + \left(\frac{\gamma S}{\tau_c} \left[\frac{nQ}{\sqrt{S}} \right]^{\frac{3}{8}} \right)^{-1} = 0 \quad (16)$$

A Equação 16 possui duas raízes, entretanto apenas uma é válida (valores menores que 0 e maiores que 0,5 não são raízes devido interpretação física e simetria), quando há duas raízes possíveis verifica-se a que atende à igualdade na Equação 15. Da equação 10 temos que X^*c está entre zero e 0,5 e podemos checar qual das soluções aproxima-se mais da primeira parte da Equação 14, uma vez que podemos calcular os valores de τ_{*c} e R_{h*} . O processo para o cálculo de τ_{*c} e R_{h*} é descrito a seguir. Tendo o valor de X^*c podemos determinar os valores de W_* e R_{h*} a partir das relações obtidas por Foster e Lane (1983). As relações estão expressas graficamente na Figura 19. Foram obtidas regressões dadas pelas Equações 17 e 18 para permitir a implantação em linguagem de programação.

$$R_{h*} = -1,4873X_{*c} + 0,7436 \quad (17)$$

$$W_* = -0,8834X_{*c}^2 + 0,1395X_{*c} + 0,1510 \quad (18)$$

Figura 19 - Relação entre X^*c , W^* e Rh^* 

Uma vez que foi assumida a geometria retangular para o canal, WP pode ser escrito da seguinte forma (Equação 19):

$$WP = \frac{W_{eq}^2}{W_{eq} - 2R_h} \quad (19)$$

A partir da equação de Manning (Equação 14) podemos reescrever a equação acima em função do raio hidráulico normalizado (Equação 20):

$$WP = \left[\frac{nQ}{\sqrt{S}} \right]^{\frac{3}{8}} R_{h*}^{-5/8} \quad (20)$$

A partir das Equações 12 e 13, é possível calcular o raio hidráulico e a largura de equilíbrio. Com o raio hidráulico é possível calcular a tensão crítica normalizada a partir da Equação 9, em que τ é igual a τ_c . Todas as variáveis agora estão determinadas e podemos calcular o total erodido de solo no canal. Foram definidas três grandezas para representar o processo erosivo e sua intensidade: a taxa de erosão ($E_r - \text{kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$), a velocidade de erosão no sentido descendente ($V_e - \text{m.s}^{-1}$) e a massa de solo erodido por unidade de comprimento ($P_e - \text{kg.m}^{-1}$), expressos nas Equações 21 a 23.

$$E_r = D_r W_{eq} = K_r (1.35\tau_a - \tau_c) W_{eq} \quad (21)$$

$$V_e = \frac{E_r}{W_{eq}\rho_s} \quad (22)$$

$$P_e = E_r \cdot t_p \quad (23)$$

em que ρ_s é a massa específica aparente seca do solo (em inglês, *bulk density*) e t_p é a duração da vazão de pico.

Equacionamento da segunda etapa

Abaixo é apresentado o equacionamento da segunda etapa. Diferentemente da etapa anterior, em que se supunha uma largura constante e uma taxa de perda de solo constante apenas no fundo do canal (E_r , P_e e V_e), nessa etapa a largura varia com o tempo assim como as demais grandezas. Na Equação 24, é dada a taxa de variação da largura com o tempo.

$$\left(\frac{dW}{dt}\right)_{in} = K_r \frac{(\tau_b - \tau_c)}{\rho_s} \quad (24)$$

em que τ_b é a tensão na interseção do fundo do canal com as paredes.

A largura final (W_f) é alcançada quando a distância normalizada do ponto crítico (X_{*c}) é tal, que a tensão atuante ao longo do perímetro molhado é sempre inferior à τ_c (X_{*cf}).

$$X_{*cf} = \frac{y_f}{WP} \quad (25)$$

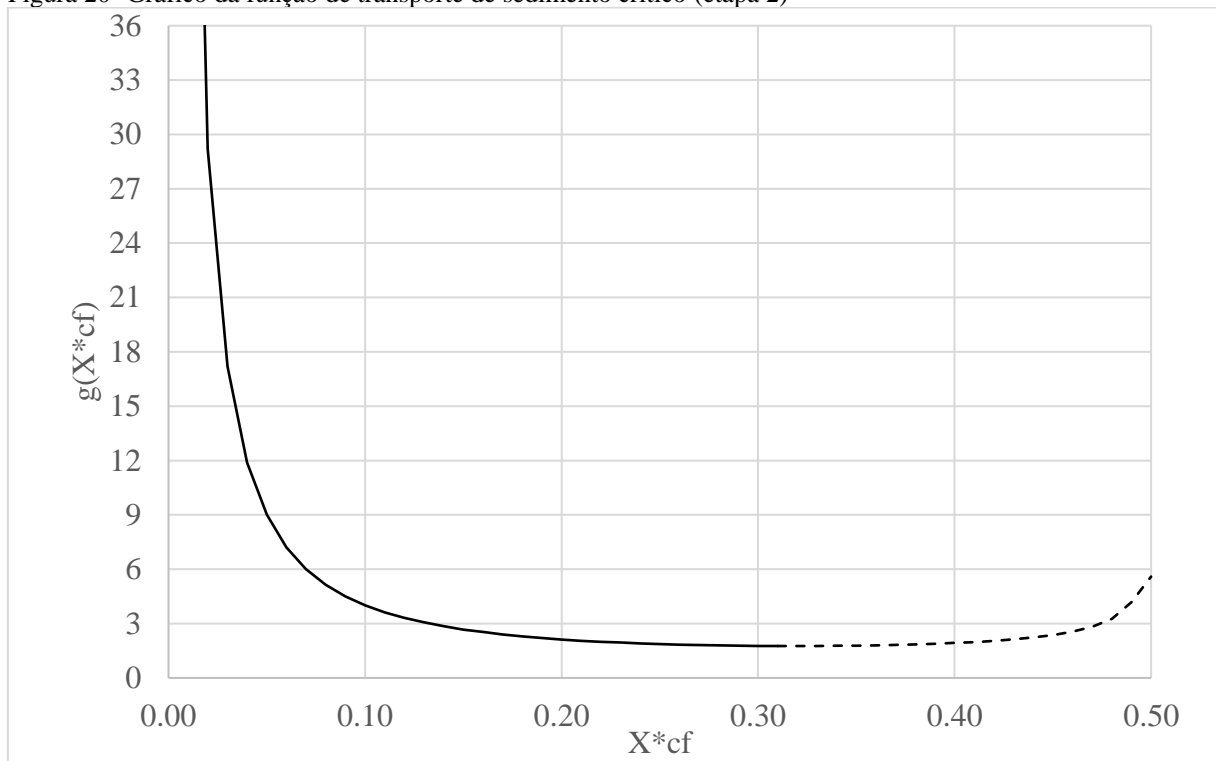
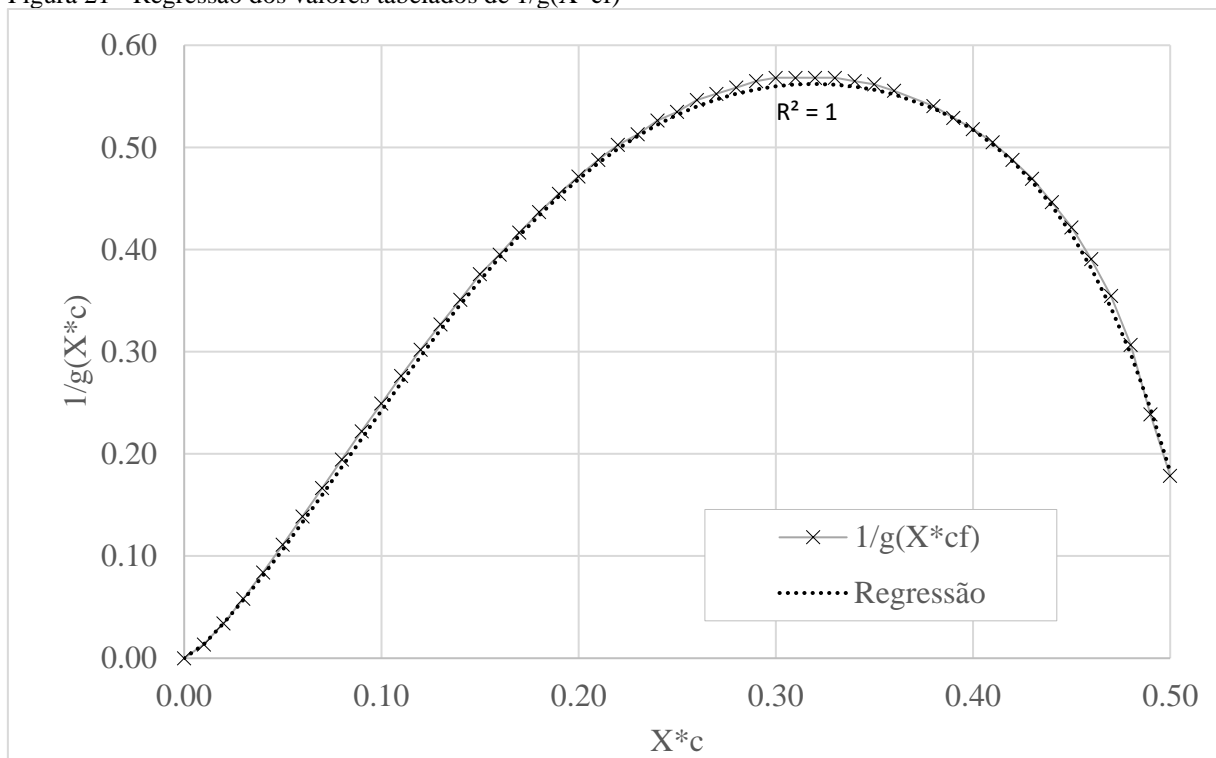
em que y_f é a altura da lâmina do escoamento. Assumindo-se uma geometria retangular para o canal, pode-se reescrever a Equação 25 da seguinte forma:

$$\frac{W_f}{WP} = 1 - 2X_{*cf} = \frac{R_*}{X_{*cf}} \therefore R_* = X_{*cf}(1 - 2X_{*cf}) \quad (26)$$

Substituindo R_* na Equação 15, obtém-se uma nova expressão para a função de transporte, dada pela Equação 27. Apesar da similaridade, esta possui soluções distintas para a Equação 15, como apresentadas a seguir.

$$g(X_{*c}) = \frac{1}{\tau_{*c}[X_{*cf}(1 - 2X_{*cf})]^{3/8}} = \frac{\gamma S}{\tau_c} \left[\frac{nQ}{\sqrt{S}} \right]^{3/8} \quad (27)$$

Figura 20- Gráfico da função de transporte de sedimento crítico (etapa 2)

Figura 21 - Regressão dos valores tabelados de $1/g(X^*_{cf})$ 

A curva de regressão foi obtida pela equação abaixo e suas raízes foram determinadas pelo método de Newton-Raphson.

$$1/g(X_{*c}) = -321,29X_{*cf}^6 + 249,02X_{*cf}^5 + 9,059X_{*cf}^4 - 58,033X_{*cf}^3 + 13,012X_{*cf}^2 + 1,7199X_{*cf} - 0,004883 \cos(X_{*cf}) \quad (28)$$

O raio hidráulico R e a largura final W_f foram obtidos pelas que ações abaixo:

$$R = \left[\frac{nQ}{\sqrt{S}} X_{*cf} (1 - 2X_{*cf}) \right]^{3/8} \quad (29)$$

$$W_f = \left[\frac{nQ (1 - 2X_{*cf})}{\sqrt{S} X_{*cf}^{5/3}} \right]^{3/8} \quad (30)$$

Foster (1983) define equações adimensionais para o tempo e a largura durante a fase de transição entra a largura inicial e final.

$$t_* = t \cdot \frac{(dW/dt)_{in}}{W_f - W_{in}} \therefore t = t_* \frac{(W_f - W_{in})}{(dW/dt)_{in}} \quad (31)$$

$$W'_* = \frac{W - W_{in}}{W_f - W_{in}} \therefore W = W'_* (W_f - W_{in}) + W_{in} \quad (32)$$

$$\frac{dW'_*}{dt_*} = e^{-t_*} \quad (33)$$

em que W_{in} equivale à largura de equilíbrio calculada na etapa inicial. A Equação 33 é premissa do MFL. A partir das equações acima podemos deduzir uma equação para a taxa de variação da largura com o tempo e conseqüentemente uma equação da taxa de erosão instantânea.

$$\frac{dW}{dt} = \left(\frac{dW}{dt} \right)_{in} e^{-t_*} \quad (34)$$

$$E_r = \rho_s d_{ne} \frac{dW}{dt} \quad (35)$$

em que d_{ne} é a profundidade da camada não erodível. Uma vez que o modelo foi codificado, pode-se submetê-lo a uma série de dados e avaliar o desenvolvimento das seções estudadas. Uma novidade do modelo proposto é o uso de todos os eventos de escoamento no cálculo do volume de solo erodido. O modelo original, por tratar apenas dos casos de voçoroca efêmera considera apenas o evento extremo como responsável pela formação de desenvolvimento do canal. Repetindo-se o processo para diversas seções, tem-se uma estimativa de volume (e, portanto, massa), profundidade, comprimento e largura da voçoroca. De posse desses dados, pode-se avaliar o quanto o modelo foi bem (ou mal) sucedido em prever a situação de campo. A avaliação a eficiência do modelo foi feita através do coeficiente de Nash-Sutcliffe (1970), a raiz do erro médio quadrado (RMSE), a razão RMSE – Desvio Padrão das Observações (RSR) e o percentual de viés (PBIAS), dadas pelas Equações 36 a 39 (MORIASI *et al.*, 2009).

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\pi_o^i - \pi_m^i)^2}{\sum_{i=1}^n (\pi_o^i - \bar{\pi}_o)^2} \quad (36)$$

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^n (\pi_o^i - \pi_m^i)^2} \quad (37)$$

$$RSR = \left(\sum_{i=1}^n (\pi_o^i - \pi_m^i)^2 \right)^{1/2} \cdot \left(\sum_{i=1}^n (\pi_o^i - \bar{\pi}_o)^2 \right)^{-1/2} \quad (38)$$

$$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^n (\pi_o^i - \pi_m^i)}{\sum_{i=1}^n (\pi_o^i)} \cdot 100 \quad (39)$$

em que π_o^i representa uma grandeza observada e π_m^i a grandeza modelada para o mesmo estado i e $\bar{\pi}_o$ a média dos dados observados.

3.6 Modelo para pequenas voçorocas clássicas

O Modelo de Foster e Lane (MFL, 1983) foi desenvolvido para prever a área de uma seção em uma voçoroca efêmera após um único evento. Um avanço do presente trabalho foi o desenvolvimento do MFL para uma série consecutiva de chuvas. Entretanto, ao mudarmos a premissa do modelo, algumas de suas hipóteses básicas devem ser revistas. A partir de observação das voçorocas medidas no campo, ficou claro que as seções não se mantêm retangulares. Isto se deve à perda de estabilidade lateral das paredes do canal (solo arenoso) e à erosão promovida pelo escoamento lateral. No entanto, as declividades observadas nas paredes do canal foram muito inferiores às esperadas se tivesse acontecido apenas a movimentação devido à perda de estabilidade da seção retangular. Isso nos levou a considerar que, uma vez que o processo na bacia de estudo teve início há mais de cinquenta anos, a erosão devido ao escoamento gerado na bacia antes de atingir o canal desempenha um papel importante na redução da declividade das paredes do canal.

Para representar esse efeito, foi gerada uma equação empírica que utiliza o Coeficiente de Compacidade (K_c – Equação 40), o Coeficiente de Forma (K_f – Equação 41) e a extensão média do escoamento superficial (l – Equação 42) como variáveis representativas do efeito do escoamento sobre o modelo.

$$K_c = 0.28 \cdot \frac{P}{A} \quad (40)$$

$$K_f = \frac{A}{L^2} \quad (41)$$

$$l = \frac{A}{4L'} \quad (42)$$

em que P é o perímetro, A é a área e L o comprimento da bacia hidrográfica de uma dada seção da voçoroca. L' é a soma do comprimento de todos os cursos d'água da bacia. K_c indica o quão circular é a forma da bacia e K_f o quão quadrada é a forma da bacia. Ambos os parâmetros são amplamente utilizados para avaliar se uma bacia é propensa ou não a enchentes, no entanto, em nosso caso de estudo, dado que a bacia da voçoroca possui apenas um canal representativo existe uma forte correlação entre K_f e l , uma vez que $L' \rightarrow L$, pois as voçorocas não possuem ramificações significativas.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir dos levantamentos de campo foram obtidos modelos digitais de terreno e elevação, bem como dados das propriedades do solo e dados hidrológicos que estão listados a seguir. Além disto, o processamento destes dados na forma de informação de entrada para o MFL, ou na sua validação forneceu uma visão ampla dos processos em desenvolvimento na região.

A seguir apresentamos as imagens, mapas, tabelas e gráficos resultantes destes levantamentos e análises.

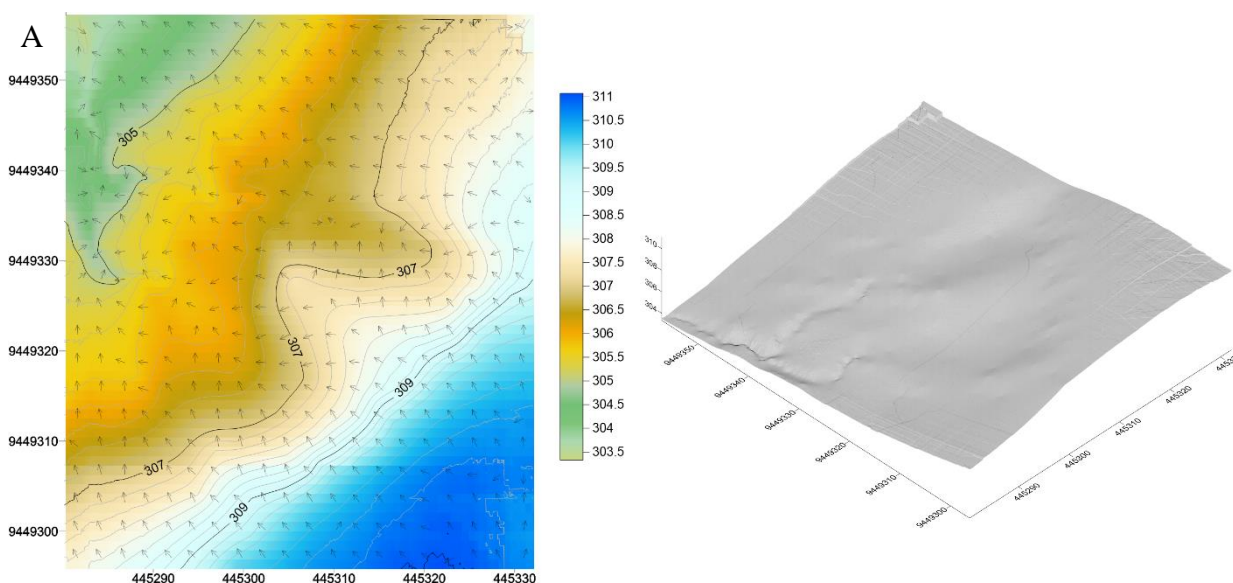
4.1 Modelos Digitais de elevação (MDE)

A seguir apresentam-se os resultados do levantamento topográfico para obtenção dos MDE's utilizando Estação Total e VANT.

MDE obtidos com estação total

Nas Figura 22 a Figura 24 estão ilustrados os MDE para as três voçorocas e as respectivas simulações de estado original do terreno antes do início do processo. À esquerda (A) pode-se identificar a calha das voçorocas obtidas a partir do uso de Estação Total (ET). À direita é indicada a suposta topografia anterior ao início do processo erosivo (B), obtido a partir de interpolação (*kriging*) dos pontos coletados nas margens do canal.

Figura 22 - Calha Voçoroca 1 em 2017 (A) / Estado original 1958 (B) a partir de dados coletados com estação total e interpolação via *kriging*



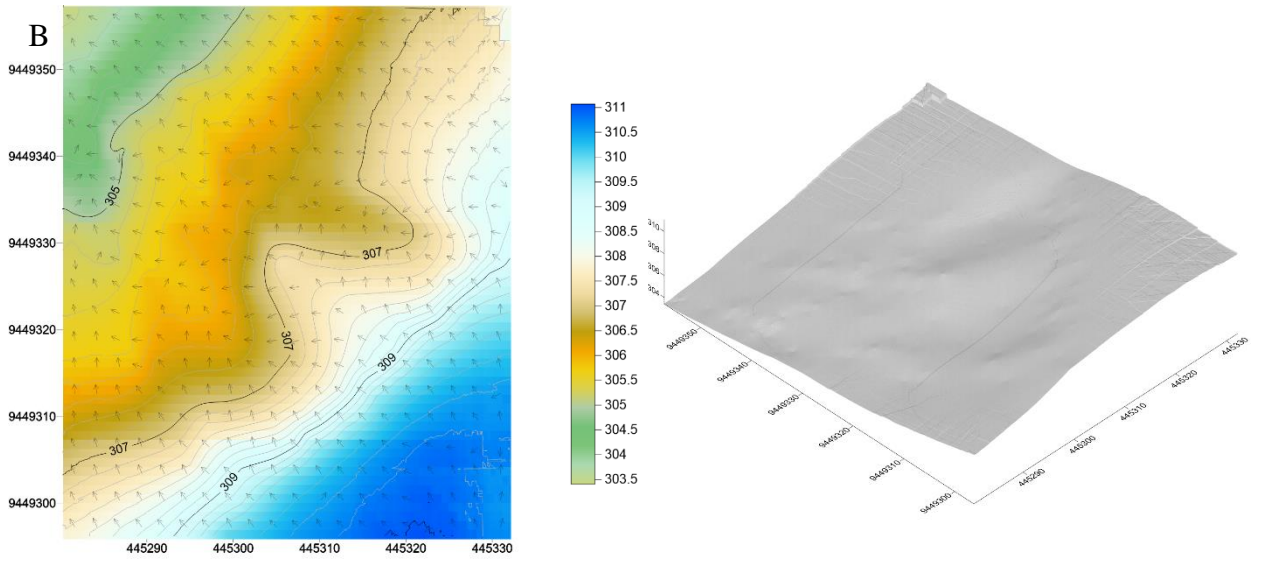


Figura 23 - Calha Voçoroca 2 em 2017 (A) / Estado original em 1958 (B) a partir de dados coletados com estação total e interpolação via *kriging*

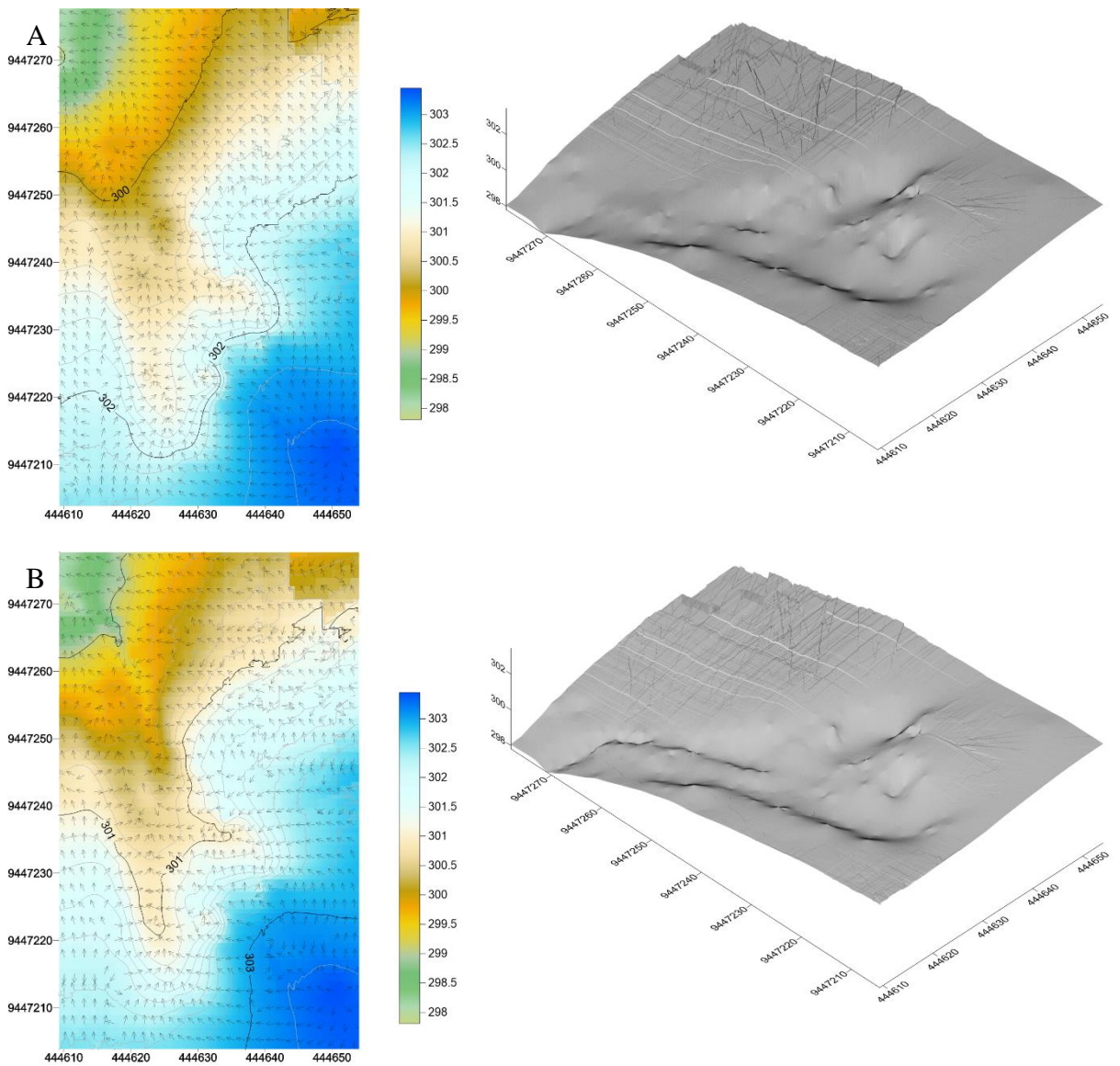
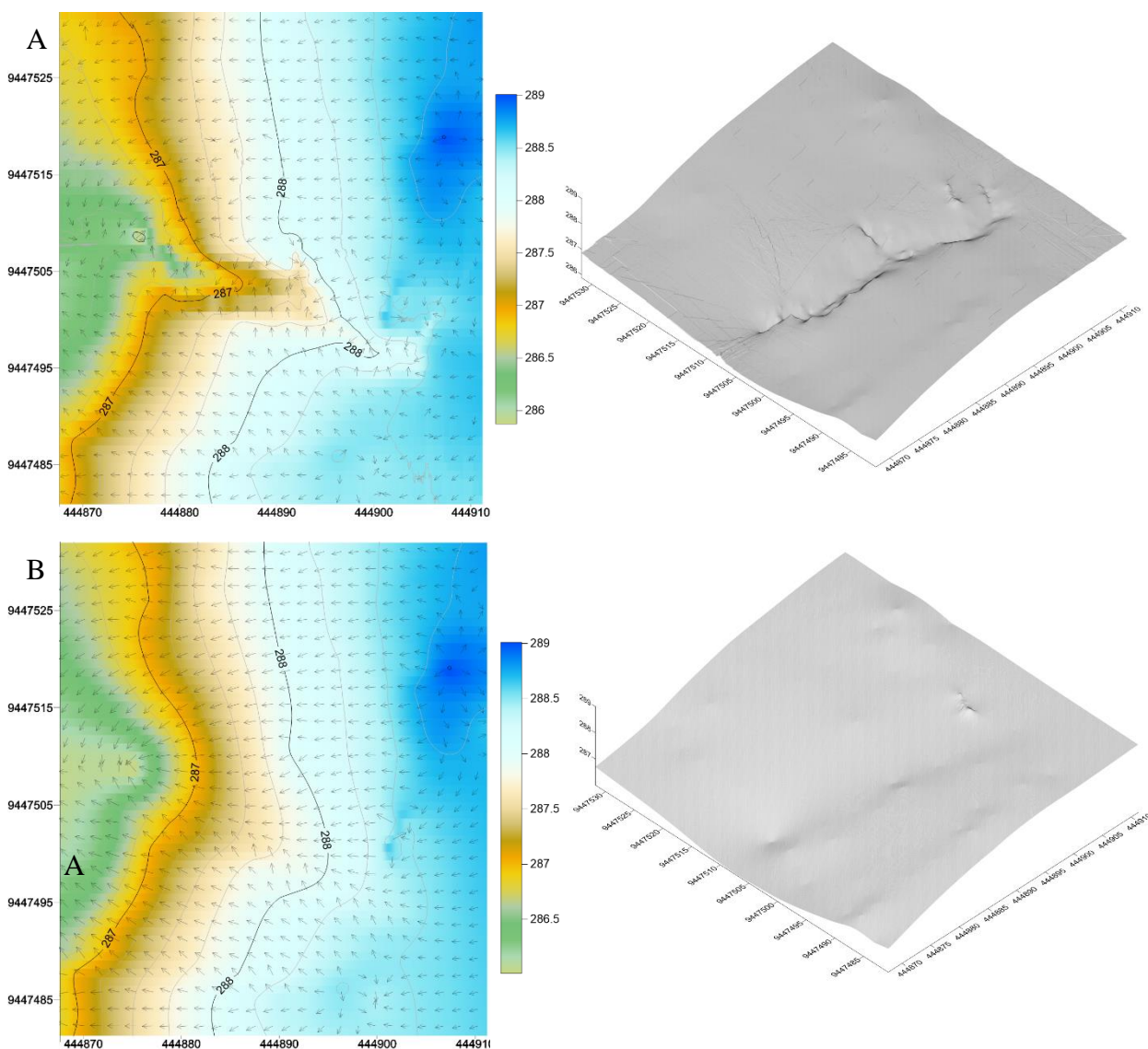


Figura 24 - Calha Voçoroca 3 em 2017 (A) / Estado original em 1958 (B) a partir de dados coletados com estação total e interpolação via *kriging*



Nota-se das Figuras 22 a 24 que nas três encostas, as redes de fluxo não são significativamente alteradas pelas voçorocas, mas sim que estas se formam nas redes de fluxo devido à concentração do escoamento superficial. Ainda, sabemos a partir de conversas com a população local que as voçorocas tiveram seu início após a construção da estrada local no ano de 1958, onde as áreas das voçorocas 1 e 2 serviram como área de empréstimo de solo e a área da voçoroca 3 está localizada em uma curva acentuada que drena (sem controle ou estrutura apropriada) a água de chuva.

Estas observações apontam a importância na mudança do uso do solo no surgimento e desenvolvimento de voçorocas. Numa abordagem relativa a riscos, podemos dizer que toda encosta que possua solo erodível tem um risco associado à voçorocamento, que é função da topografia, pluviometria (lâmina e intensidade do evento), cobertura vegetal, uso do solo e

propriedades físicas do solo; este risco pode aumentar ou reduzir de a cada alteração dessas variáveis. A partir desta ótica, uma vez equacionado esse risco torna-se possível o desenho de cenários a partir de mudanças bruscas nessas variáveis, como grandes eventos pluviométricos, urbanização, incêndios florestais e etc.

Na Tabela 2 tem-se as dimensões obtidas a partir do levantamento via estação total. As três voçorocas possuem pequenas dimensões, sendo classificadas, como citado anteriormente, como Pequenas Voçorocas, não podendo ser ditas efêmeras devido ao longo período do processo.

Tabela 2 - Dimensões das Voçorocas

Voçoroca	Volume (m³)	L (m)	Wmax (m)	Dmax (m)	Área (m²)
1	20	45,5	3,7	0,44	150
2	38	33,1	5,8	0,61	320
3	69	37,4	8,4	0,70	480

MDE obtidos com VANT

A seguir apresentam-se os resultados dos levantamentos topográficos realizados com VANT. Nas Figuras 25 a 27 temos o imageamento realizado e nas Figuras 28 a 30 os MDE's obtidos após processamento. Além de possibilitar a rápido levantamento topográfico, o VANT permitiu observar o entorno das voçorocas e o grau de desmatamento da vizinhança.

Foram comparados os volumes totais erodidos nas voçorocas por contraste dos levantamentos topográficos com Estação Total (ET) e VANT (Tabela 3). Não foi possível avaliar o volume da Voçoroca 3 com dados do VANT devido à elevada concentração de vegetação arbustiva dentro do canal.

Tabela 3 -Volume das voçorocas calculados a partir de dados de Estação Total (ET) e de VANT

Voçoroca	Volume ET (m³)	Volume VANT (m³)	Erro relativo (%)
1	20,0	22,5	11%
2	38,0	33,5	13%
3	69,0	n.d.*	n.d.*

* n.d. = não definido

Figura 25 - Imagem capturada pelo VANT - Voçoroca 1 em 2017 (canais em destaque)



Figura 26 - Imagem capturada pelo VANT - Voçoroca 2 em 2017 (canais em destaque)



Figura 27 - Imagem capturada pelo VANT - Voçoroca 3 em 2017 (canais em destaque)



Figura 28 - Modelo Digital de Elevação da Voçoroca 1 – obtenção via VANT (mar/2017)

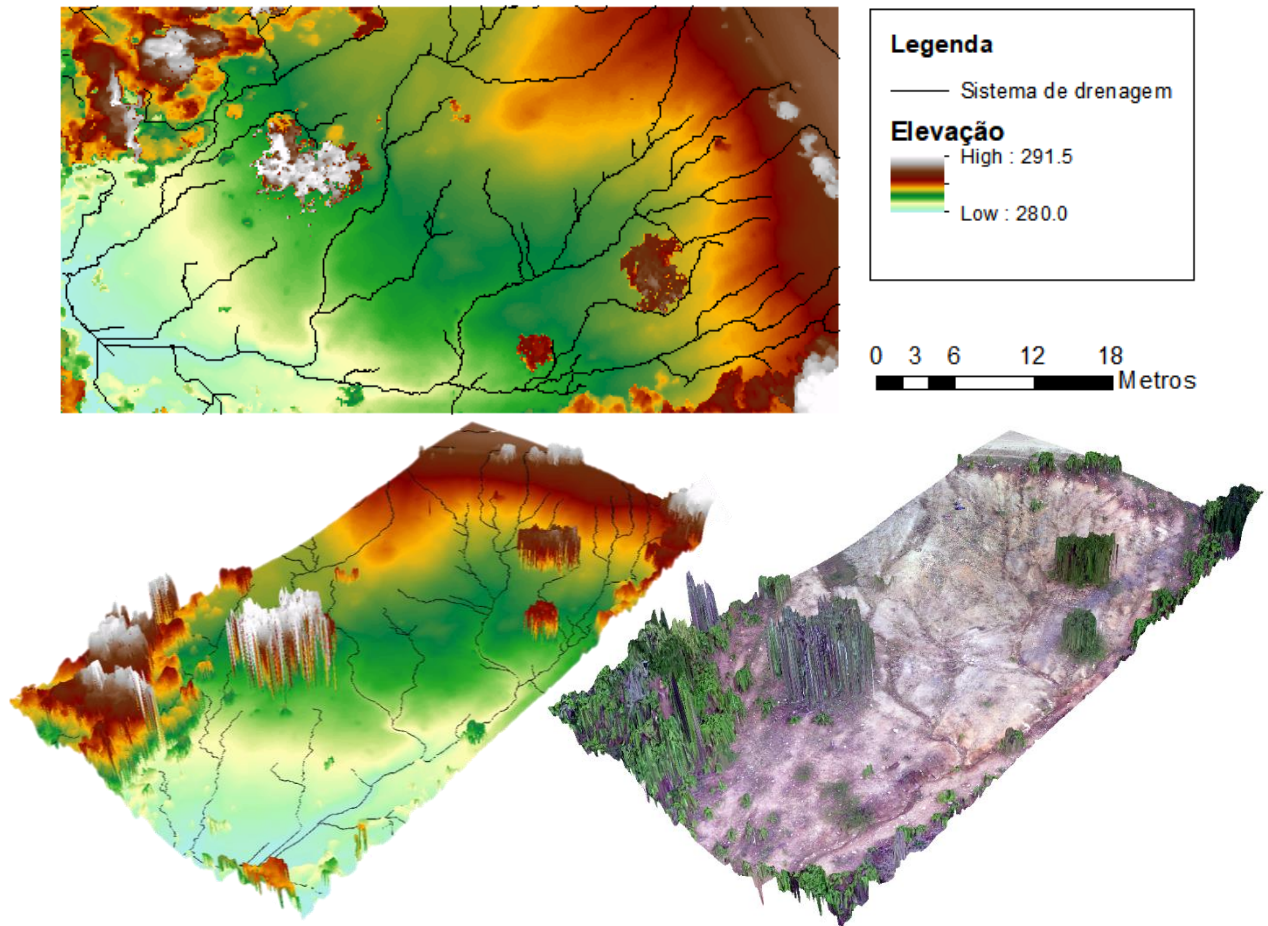


Figura 29 – Modelo Digital de Elevação da Voçoroca 2 – obtenção via VANT (mar/2017)

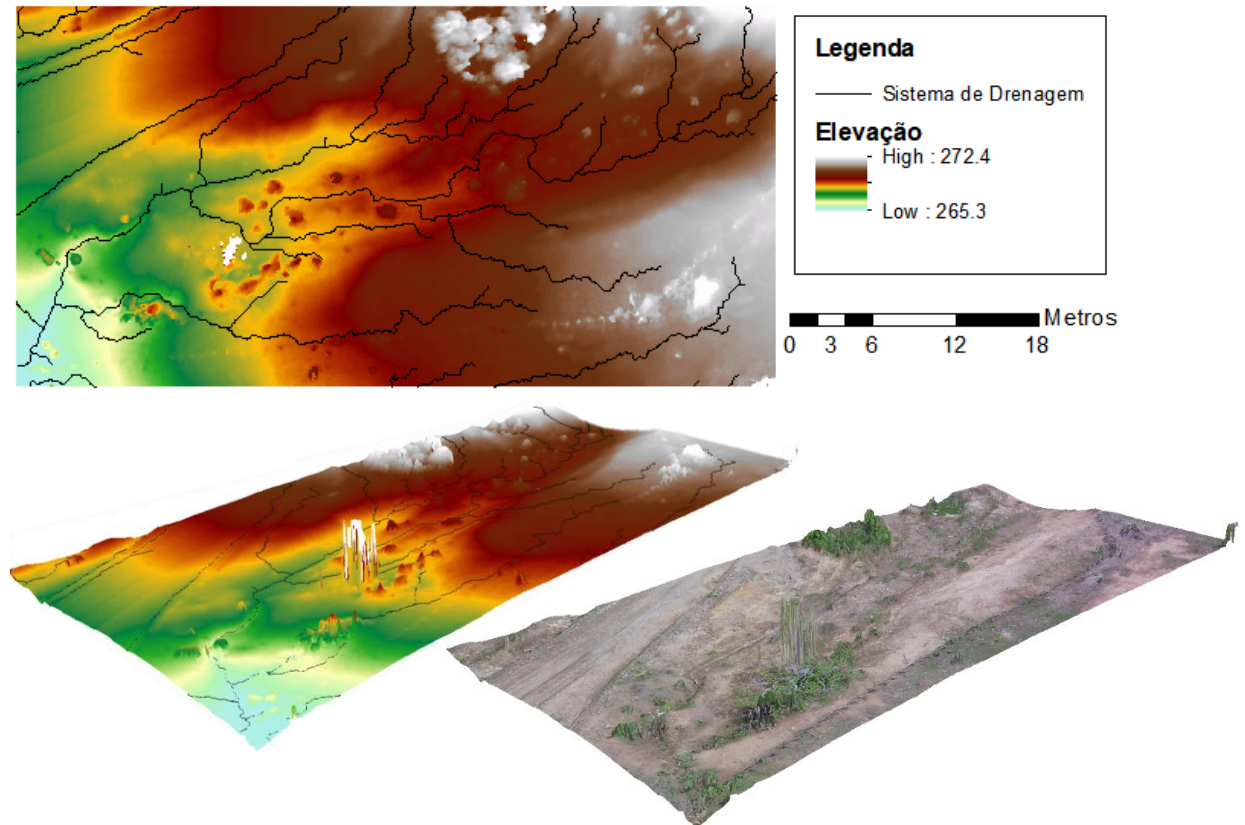
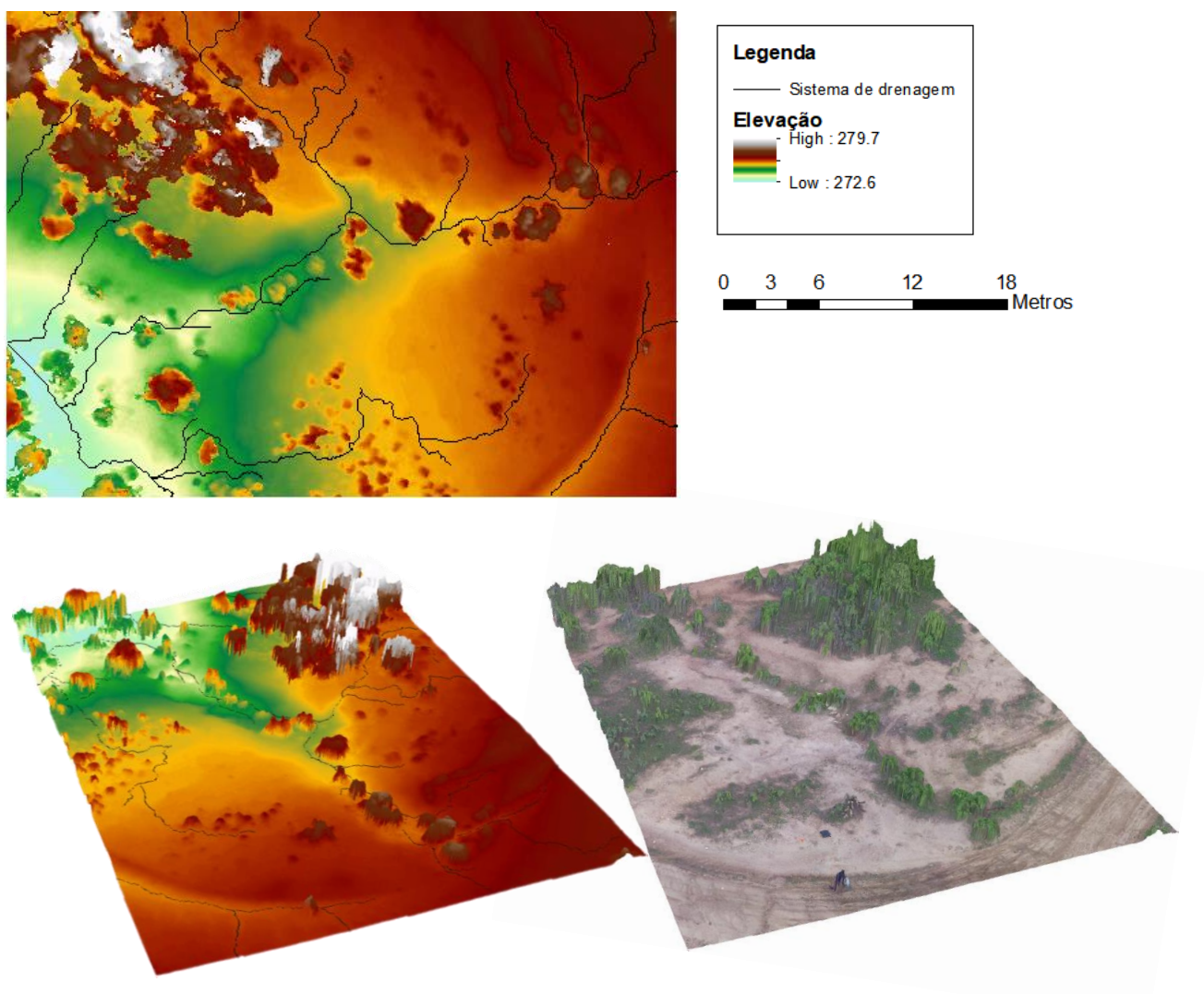


Figura 30 – Modelo Digital de Elevação da Voçoroca 3 – obtenção via VANT (mar/2017)



O VANT é uma ferramenta poderosa para levantamento topográfico, permitindo um levantamento detalhado das seções e não dependendo de métodos de interpolação, como *kriging* ou *splines*. Apesar dessa vantagem, o método VANT apresenta uma dificuldade: a presença de vegetação torna-se um obstáculo que pode ser frequentemente encontrado. Assim, para simples levantamentos de volume de solo erodido em voçorocas o uso de ET, apesar de mais lento pode ser aplicado para primeiras avaliações da área de estudo. Devido ao erro da ordem de 10%, no entanto, não é indicado para monitoramento continuado da área.

Na modelagem das seções das voçorocas foram utilizados exclusivamente os dados obtidos por VANT uma vez que o número de pontos é muito maior. Uma vez que a modelagem foi baseada na modelagem de seções transversais foi possível identificar diversas seções sem interferência da vegetação.

4.2 Reconhecimento e análise do solo

As amostras de solo coletadas foram analisadas em laboratório para a obtenção dos parâmetros das equações do modelo WEPP. Foram realizados, portanto, ensaios para classificação granulométrica a fim de determinar as frações de solo classificadas como areia (< 2.0 mm), areia muito fina (< 0.1 mm) e argila (< 0.002 mm). Foi avaliada também a quantidade de matéria orgânica do solo por camada. Nas Figuras 31 e 32 observam-se as curvas granulométricas e na Tabela 1Tabela 4 um resumo com as informações relevantes para a modelagem.

Como apresentado na metodologia, foram coletadas amostras em duas áreas (A1 e A2), sendo a primeira na periferia da voçoroca 1 (S1) e a segunda próximo as voçorocas 2 e 3 (S2 e S3). É possível observar uma diferença significativa no teor de argila entre os dois solos, que pode ser consequência do solo da área 1 (A1) ter sido utilizado para a construção da estrada, removendo as camadas mais superficiais de solo.

Os solos coletados em A1 são da classe textural franco-arenoso (em inglês, *Sandy loam*, pela classificação textural do USDA), bem como em A2-50. Em A2-10 o solo é franco-arenoso-argiloso e em A2-30 franco-argiloso. A granulometria também confirma a classe do solo como luvisolo, apresentando uma camada superficial (horizonte A) com baixa concentração de argila e com presença de areia grossa e pedregulhos, bem como na camada abaixo (horizonte B), uma alta concentração de argila (EMBRAPA, 2010).

Tabela 4 - Quadro resumo dos dados de granulometria e matéria orgânica das amostras.

A1	Areia	Areia muito fina	Argila	Matéria Orgânica	A2	Areia	Areia muito fina	Argila	Matéria Orgânica
A1-10	66%	21%	10%	3,1%	A2-10	55%	22%	17%	4,9%
A1-30	62%	16%	18%	3,3%	A2-30	35%	6%	37%	5,7%
A1-50	83%	20%	6%	2,2%	A2-50	53%	15%	25%	1,4%
E(A1)	70%	19%	11%	2,9%	E(A2)	48%	14%	26%	4,0%

Figura 31 – Distribuição granulométrica das amostras de solo da área 1. S1 e S2 indicam os locais de coleta, na vizinhança da voçoroca 1 (S1) e na vizinhança das voçorocas 2 e 3 (S3). Os índices 10, 30 e 50 indicam a profundidade da coleta da amostra

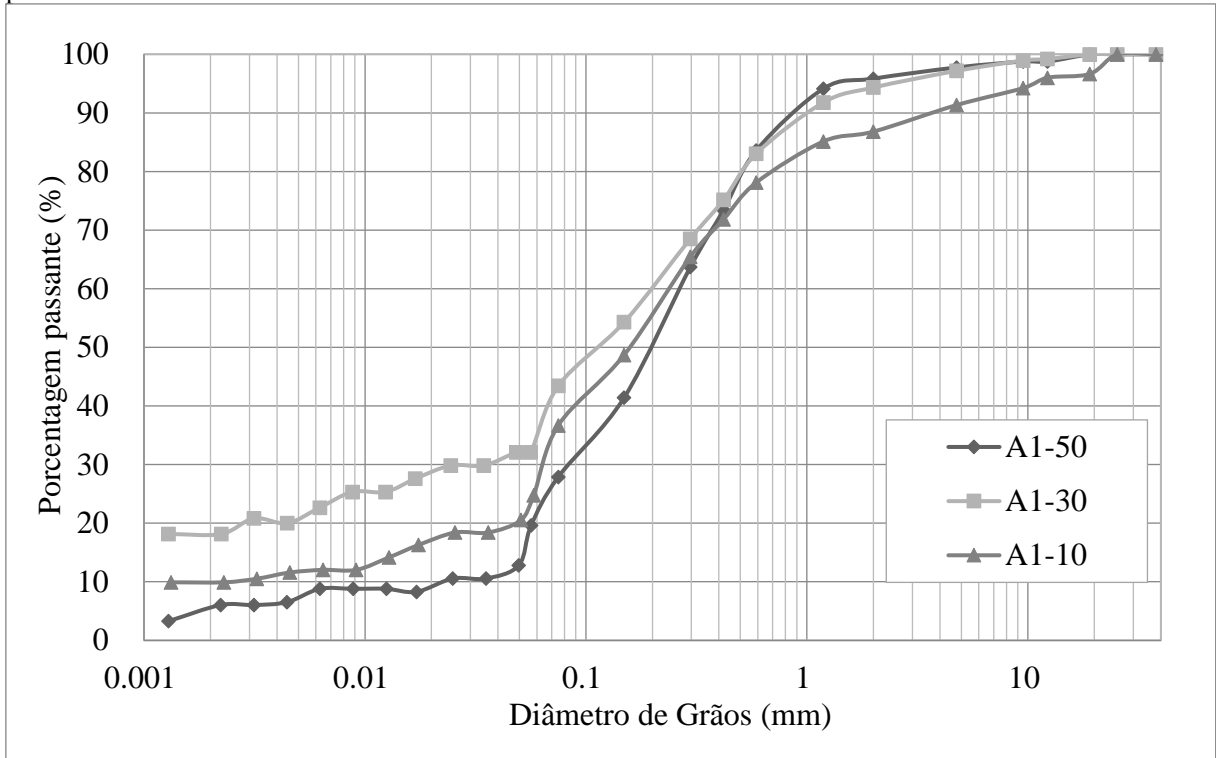
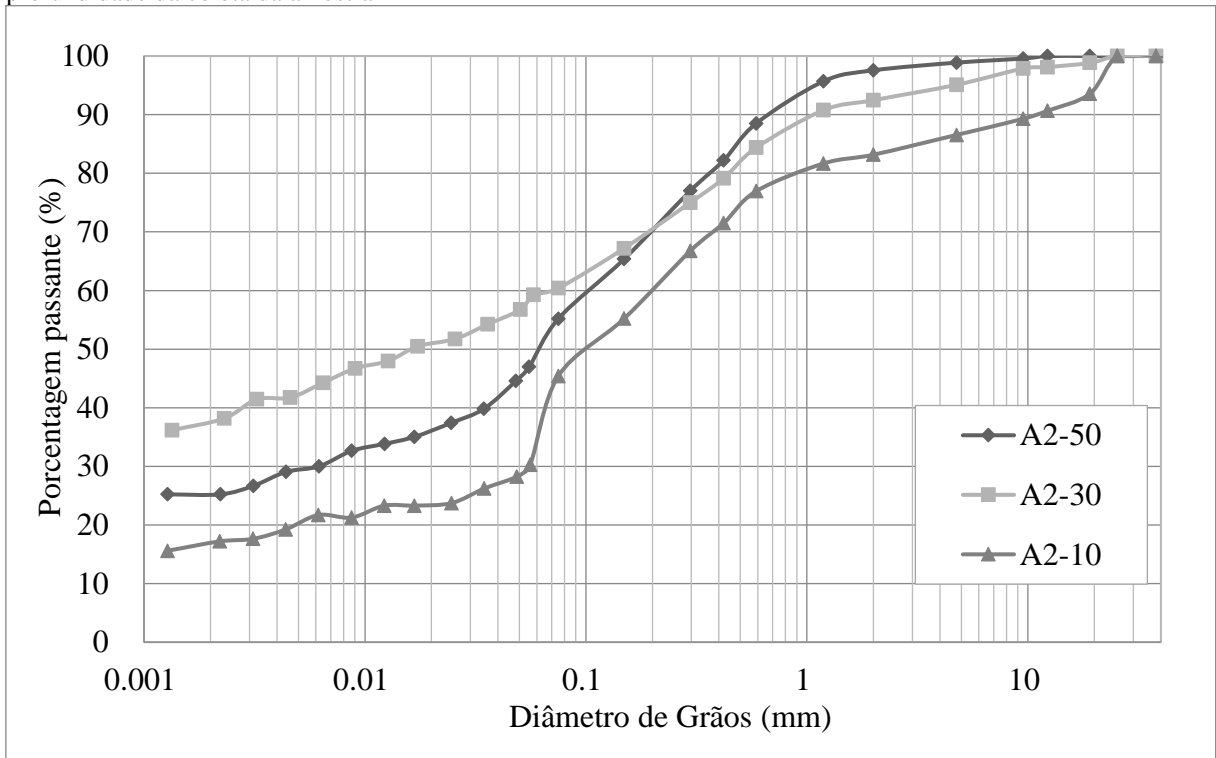


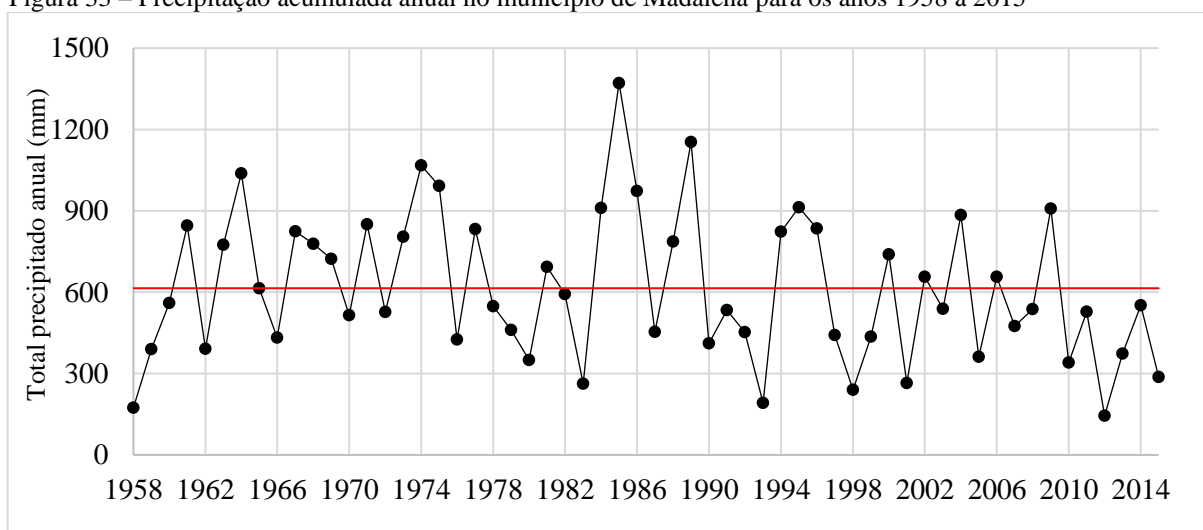
Figura 32 – Distribuição granulométrica das amostras de solo da área 2. A1 e A2 indicam os locais de coleta, na vizinhança da voçoroca 1 (S1) e na vizinhança das voçorocas 2 e 3 (S3). Os índices 10, 30 e 50 indicam a profundidade da coleta da amostra



4.3 Parâmetros e dados de chuva

Foram utilizados dados de chuva diários do município de Madalena de 1958 até 2015, a partir dos dados dos postos pluviométricos de Coroatá, Boa Viagem e Madalena (Figura 33). Os dados anuais apresentam grande coeficiente de variação ($CV = 0,43$) típico da região semiárida brasileira (DE ARAÚJO e MEDEIROS, 2013).

Figura 33 – Precipitação acumulada anual no município de Madalena para os anos 1958 à 2015



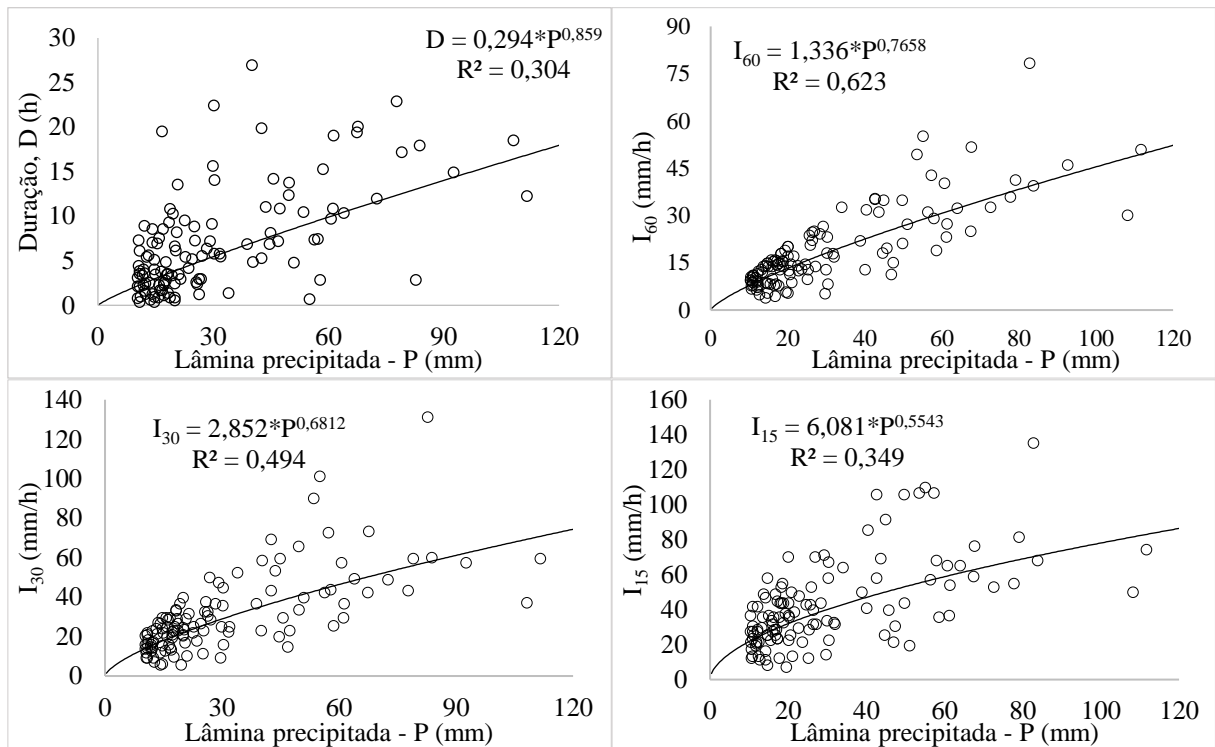
Fonte: FUNCEME (2016)

Devido à inexistência, na região, de dados de chuva subdiária cobrindo o período de estudo (1958 a 2015), ou mesmo de períodos mais curtos, mas ainda longos o suficiente para permitir seu uso na modelagem, foi necessário lançar mão de dados disponíveis para a Bacia Experimental de Aiuaba (BEA), monitorada continuamente desde 2005 com dados de chuva com precisão de cinco minutos.

As áreas, como mostrado anteriormente (Figura 13), possuem comportamento pluviométrico homogêneo. Entende-se ainda que dado o longo período de análise desvios locais são desprezíveis frente ao comportamento médio da regressão.

A partir dos dados de chuva de Aiuaba (FIGUEREDO *et al.*, 2016), foram obtidas correlações entre lâmina precipitada diária, duração (D) e intensidades de chuva (para 60, 30 e 15 minutos – I_{60} , I_{30} e I_{15}), expressas nos gráficos abaixo (Figura 34). Note-se que I_i representa maior intensidade da chuva dentro de um intervalo de tempo i (minutos), ou ainda, a máxima lâmina precipitada num intervalo i .

Figura 34– Correlações Lâmina x Intensidade de chuva; Aiuaba – dados coletados 2005 a 2014



4.4 Modelo de Foster e Lane

Foram calculadas duas grandezas a partir do MFL: a largura e a área das 15 seções escolhidas. Na Tabela 5 e na Figura 35 encontra-se o comparativo entre as larguras medidas e modeladas das seções selecionadas.

Figura 35 - Dispersão Largura Medida x Largura Calculada das seções transversais das voçorocas pelo MFL

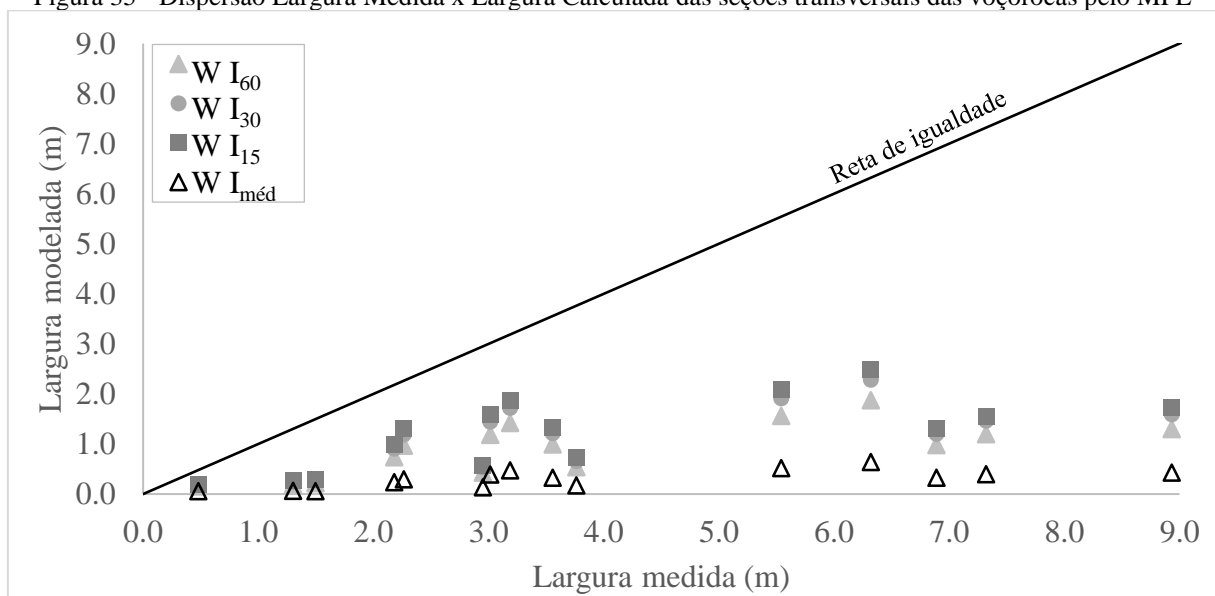


Tabela 5 - Quadro resumo das larguras medidas (W_{obs}) e calculadas (W_{sim}) a partir de diferentes intensidades de chuva ($I_{méd}$, I_{60} , I_{30} e I_{15}) para as três voçorocas estudadas em Madalena, Ceará (2017)

Voçoroca	Seção	Área (m ²)	W_{obs} (m)	W_{sim} (m) $I_{méd}$	W_{sim} (m) I_{60}	W_{sim} (m) I_{30}	W_{sim} (m) I_{15}
Voçoroca 1	1	3200	2,26	0,30	0,97	1,19	1,31
	2	3080	3,19	0,48	1,42	1,72	1,88
	3	1183	3,56	0,33	0,99	1,21	1,33
	4	491	3,76	0,17	0,54	0,66	0,73
	5	78	1,50	0,06	0,22	0,27	0,30
Voçoroca 2	1	3500	8,93	0,43	1,30	1,59	1,74
	2	3400	7,32	0,40	1,20	1,47	1,56
	3	1000	6,89	0,33	0,98	1,21	1,32
	4	56	2,95	0,14	0,43	0,53	0,58
	5	2230	0,48	0,06	0,15	0,19	0,20
Voçoroca 3	1	2000	6,32	0,64	1,88	2,29	2,49
	2	1870	5,54	0,52	1,56	1,91	2,09
	3	1470	2,18	0,24	0,74	0,91	0,99
	4	252	1,30	0,07	0,19	0,24	0,27
	5	40	3,02	0,39	1,18	1,45	1,58

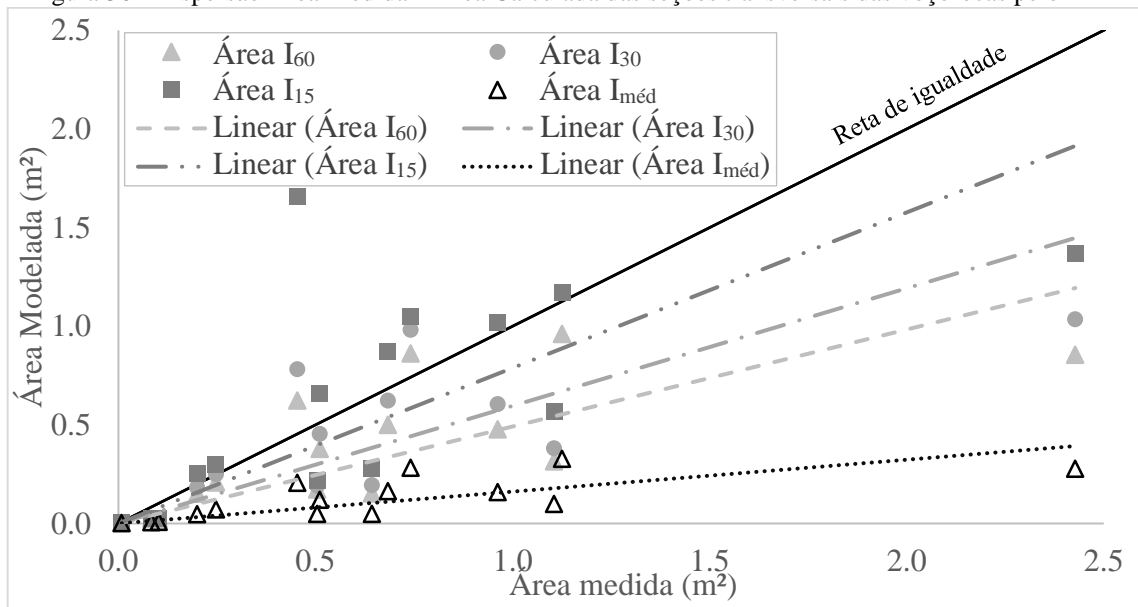
É possível constatar, a partir da Figura 35, o limitado desempenho do modelo MFL na predição da largura das seções (valores de NSE ≈ -1 e PBIAS $\approx 76\%$), corroborando com o resultado de Nascimento (2017), com aplicação do MFL a voçorocas na bacia do Riacho do Exu, em Pernambuco, observando baixo desempenho do modelo na predição da largura das seções transversais. A grande dispersão existente pode ser devida à falta de precisão na escolha dos limites do canal existente, como observado por Carollo *et al.*, (2015) em estudo similar na modelagem de ravinas, podendo acarretar em dimensões superestimadas do canal (CASALÍ *et al.*, 2015; CASTILLO *et al.*, 2017). A tendência de subestimativa dos valores de largura pelo MFL pode estar relacionada, entretanto, a processos erosivos não considerados pelo MFL, como será discutido adiante.

A seguir são apresentados os resultados obtidos com a aplicação do MFL para a área erodida das seções em foco. Na Tabela 6 e na Figura 36, temos o valor calculado da área para cada uma das cinco seções de cada voçoroca.

Tabela 6 - Quadro resumo das larguras medidas (A_{obs}) e calculadas (A_{sim}) a partir de diferentes intensidades de chuva ($I_{méd}$, I_{60} , I_{30} e I_{15}) para as três voçorocas estudadas em Madalena, Ceará (2017)

Voçoroca	Seção	Área (m ²)	A_{obs} (m ²)	A_{sim} (m ²) $I_{méd}$	A_{sim} (m ²) I_{60}	A_{sim} (m ²) I_{30}	A_{sim} (m ²) I_{15}
Voçoroca 1	1	3200	0,248	0,071	0,208	0,301	0,288
	2	3080	0,742	0,283	0,862	1,047	1,106
	3	1183	0,684	0,165	0,500	0,871	0,866
	4	491	0,505	0,050	0,172	0,216	0,210
	5	78	0,084	0,006	0,023	0,028	0,039
Voçoroca 2	1	3500	1,126	0,328	0,961	1,171	2,003
	2	3400	0,962	0,160	0,478	1,021	0,914
	3	1000	0,200	0,048	0,152	0,254	0,234
	4	56	0,103	0,008	0,022	0,028	0,031
	5	2230	0,511	0,120	0,379	0,660	0,582
Voçoroca 3	1	2000	2,998	0,207	0,624	1,658	1,142
	2	1870	2,428	0,278	0,855	1,369	1,474
	3	1470	1,105	0,100	0,315	0,567	0,505
	4	252	0,644	0,049	0,153	0,279	0,211
	5	40	0,008	0,002	0,005	0,006	0,007

Figura 36 - Dispersão Área Medida x Área Calculada das seções transversais das voçorocas pelo MFL

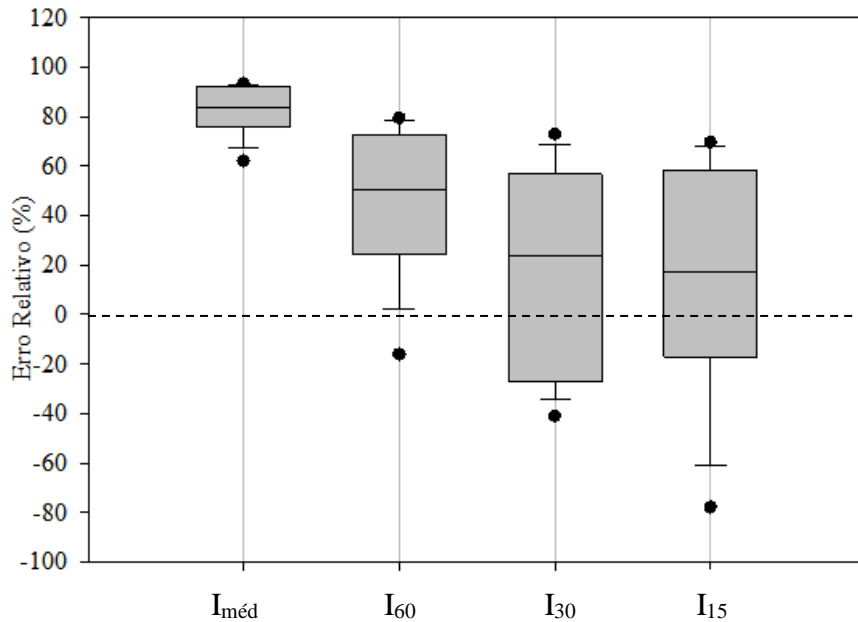


A partir da Figura 36 é possível identificar uma tendência do modelo a subestimar a área das seções independentemente da vazão de pico adotada, no entanto, interpretando este resultado com o auxílio do diagrama de caixas da Figura 37 é possível ver uma menor dispersão do modelo utilizando o I_{30} . O erro relativo é dado pela Equação 43.

$$\text{Erro Relativo (\%)} = \frac{A_{obs} - A_{sim}}{A_{obs}} \quad (43)$$

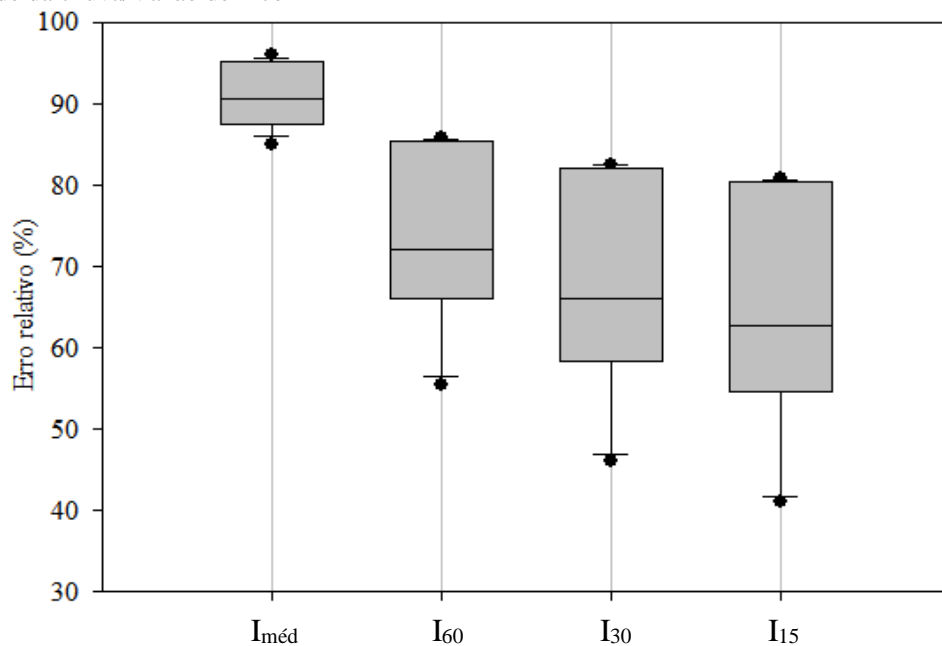
em que A_{obs} é a grandeza (área e largura, para esta análise) observada ou medida e A_{sim} é esta mesma grandeza modelada.

Figura 37 – Diagrama de caixa de erros relativos na modelagem da área da seção transversal pelo MFL para cada Intensidade da chuva/Vazão de Pico



Na Figura 38 temos o diagrama de caixas para a dos erros relativos na modelagem da largura, em que é possível observar a forte tendência de subestimar os valores de largura independentemente da vazão adotada.

Figura 38 – Diagrama de caixa de erros relativos na modelagem da largura da seção transversal pelo MFL para cada Intensidade da chuva/Vazão de Pico



Para selecionar a vazão de pico que mais influencia o processo erosivo por voçorocas foram utilizados avaliadores estatísticos de modelos, sendo eles a eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE), o raiz do erro médio quadrado (RMSE), a razão RMSE – Desvio padrão das observações (RSR) e o percentual de viés (PBIAS). Os valores estão listados na Tabela 7.

Tabela 7 –Valores dos avaliadores estatísticos do MFL para a modelagem a área da seção transversal variando a Intensidade de chuva/Vazão de Pico

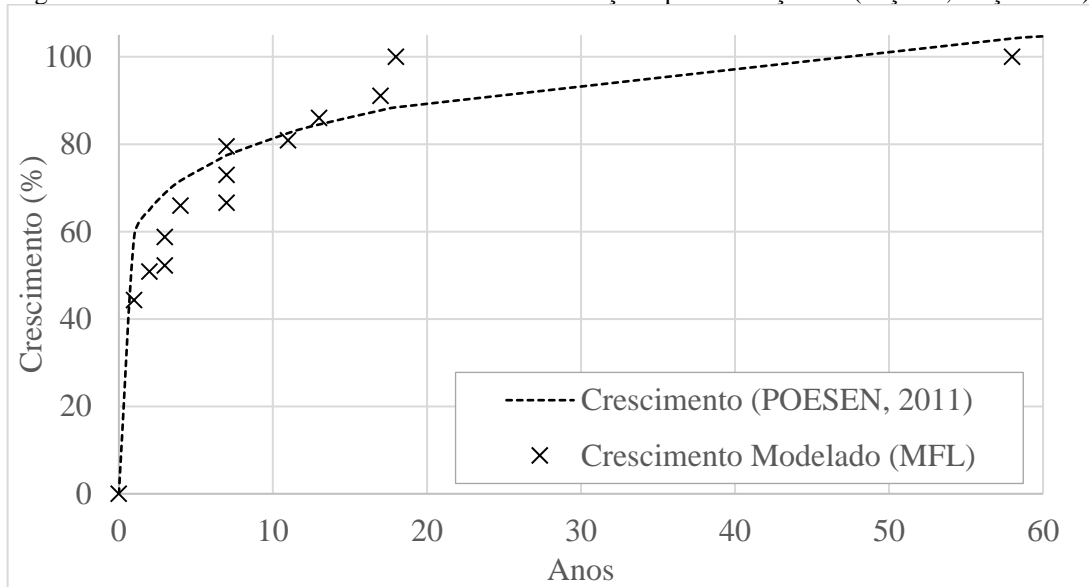
Intensidade	NSE	RMSE	RSR	PBIAS
<i>I_{méd}</i>	-0,565	3,996	1,251	84,8%
<i>I₆₀</i>	0,076	3,070	0,961	53,8%
<i>I₃₀</i>	0,648	1,896	0,593	23,2%
<i>I₁₅</i>	0,418	2,438	0,763	22,1%

A vazão que gerou melhores resultados em todas as avaliações, exceto o PBIAS – corroborando com a tendência já observada na Figura 36 – foi a de 30 minutos. A intensidade de 30 minutos é amplamente utilizada na modelagem de processos erosivos (WISCHMEIER e SMITH, 1978; USDA, 1997, FOSTER *et al.*, 2003). Foi ainda realizado Teste-T e constatada inexistência de diferença estatística entre os conjuntos de dados de área medida e simulada pelo MFL das seções transversais.

Modelagem do desenvolvimento da voçoroca

O crescimento do volume de voçorocas é mais intenso nos primeiros anos de erosão tendo um comportamento de função monótona crescente (POESEN *et al.*, 2011). O mesmo comportamento foi observado pelo MFL quanto à variação do crescimento da área da seção, em que após certo intervalo de tempo (um terço do total observado) apresentou estagnação do crescimento e permaneceu em estase até que um evento de escoamento fosse grande suficiente para ativar os mecanismos de erosão. Na Figura 39 ilustra-se este efeito sobre a seção 3 da voçoroca 1 (ver apêndices).

Figura 39 - Dinâmica do crescimento da área de uma seção típica de voçoroca (Seção 3, Voçoroca 1)



Na Figura 39, o eixo horizontal indica os anos passados desde o início do processo; logo a origem se encontra no ano de 1958. O valor de cem por cento no eixo vertical indica a área da seção medida atualmente, este valor não representa um limite para o desenvolvimento da seção. Ainda, apesar dos dados utilizados serem da variação da área seção e não do volume, comportamento similar é esperado para a variação do volume da voçoroca.

4.5 Modelo de Foster e Lane ajustado: MFL-Perm

Como dito anteriormente, a declividade das paredes do canal, não previstas no modelo original de Foster e Lane, são fontes significativas de sedimento. Na Figura 40 temos um gráfico que indica a tendência de redução do erro (R), razão entre Área medida (A_m) e Área calculada (A_c), à medida que a declividade⁴ das paredes diminui (aumenta a verticalidade).

Não foi encontrada boa correlação entre declividade e R, mas dado que a declividade das paredes, sofre grande influência da formação de escoamento as margens do canal, foram calculadas correlações entre a razão R e parâmetros de forma da bacia. A seguir (Figura 41) temos as correlações observadas entre os parâmetros de forma das bacias e a razão entre Área observada (A_{obs}) e Área simulada (A_{sim}). O Coeficiente de Compacidade foi o que apresentou a melhor correlação com a razão R.

⁴ A declividade adotada foi a mínima da seção, ou seja, a menor dentre as duas paredes.

Figura 40 - Relação Declividade × Razão de áreas

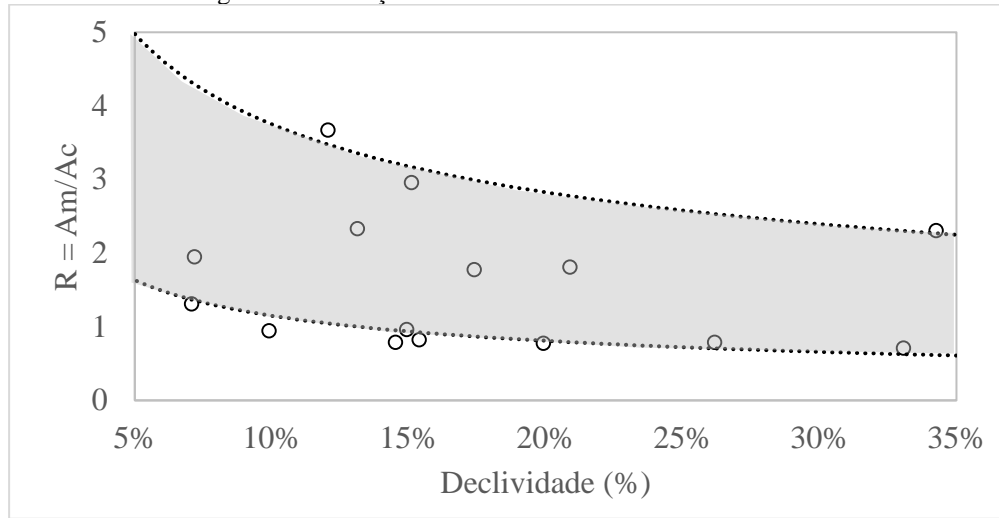
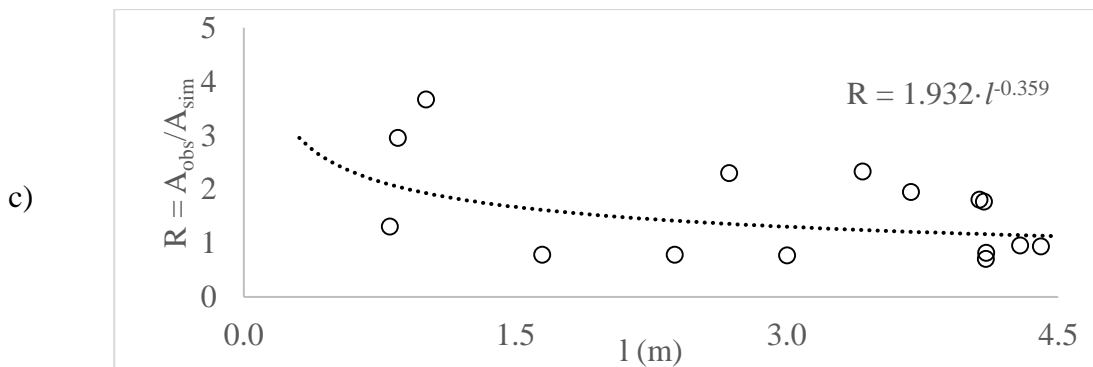
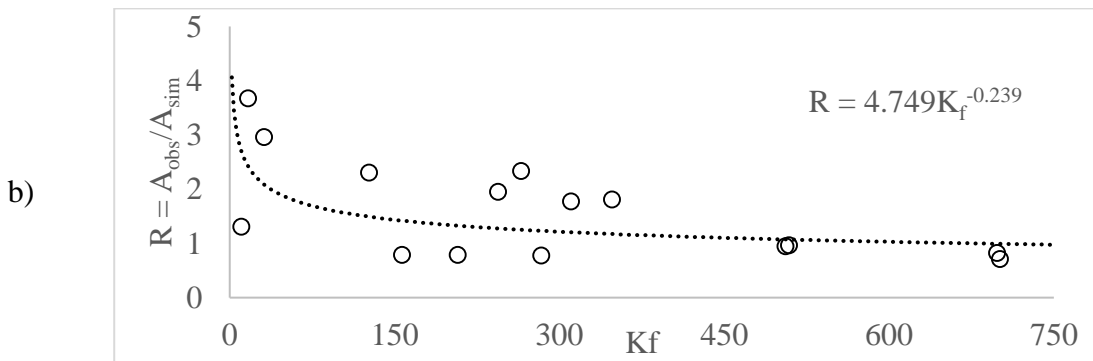
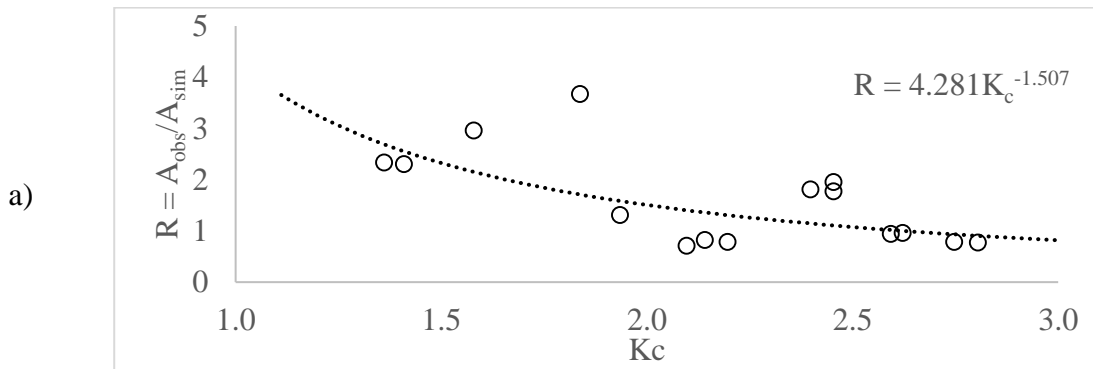


Figura 41 – Gráficos de correlações a) $K_c \times R$; b) $K_f \times R$; c) $l \times R$



A partir das equações obtidas na Figura 41 a área calculada pelo modelo fica descrita como abaixo:

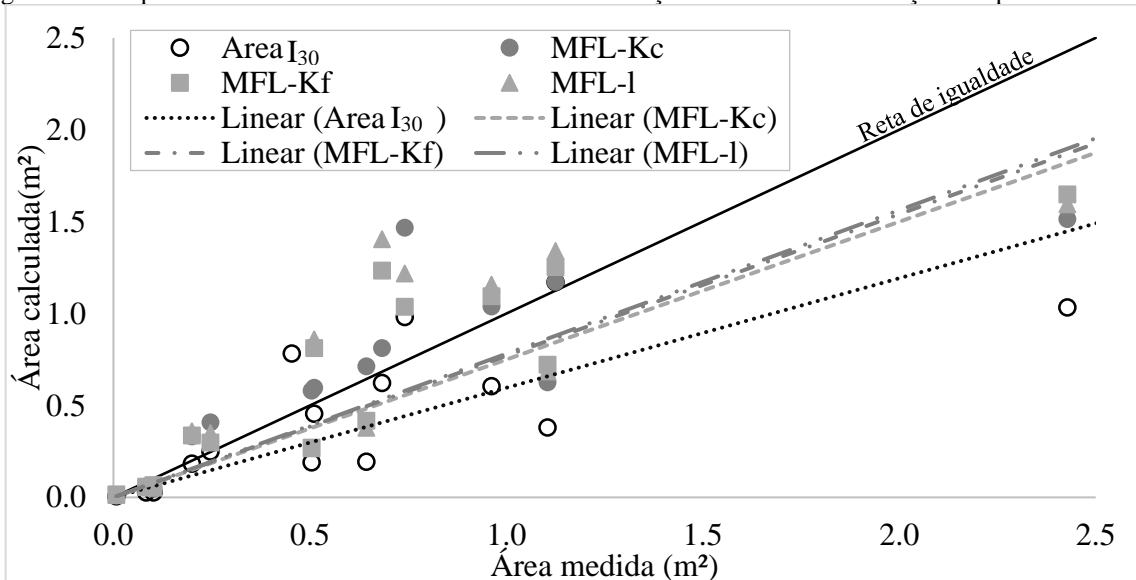
$$A_c^{MFL-Perm} = A_c^{MFL} \cdot 4,281 \cdot K_c^{-1,507} \quad (44)$$

$$A_c^{MFL-Perm} = A_c^{MFL} \cdot 4,749 \cdot K_f^{-0,239} \quad (45)$$

$$A_c^{MFL-Perm} = A_c^{MFL} \cdot 1,932 \cdot l^{-0,359} \quad (46)$$

Na Figura 42, temos a dispersão de valores de área medida e calculada pelos modelos MFL (I_{30}) e MFL-Perm utilizando os multiplicadores em função de K_c , K_f , e l . É possível observar que os três possuem aproximadamente o mesmo resultado, no entanto o MFL- K_f apresentou menor Desvio-Padrão e Média mais próxima de um para a variável $R = A_m \cdot A_c^{-1}$.

Figura 42 - Dispersão de Área Medida x Área Calculada das seções transversais das voçorocas pelo MFL-Perm



Portanto, o modelo proposto é realizado em duas etapas, na primeira calcula-se a área da seção através do MFL já apresentado, utilizando o I_{30} como vazão de pico e após isto, na segunda etapa, o resultado é corrigido por um fator uma função de K_f . O modelo ajustado com o acréscimo do termo relativo a forma da bacia apresentou uma melhora significativa em relação ao modelo original, como apresentado na Tabela 8.

Tabela 8 - Valores dos avaliadores estatísticos do MFL e MFL-Perm na obtenção dos valores de área das seções das voçorocas

	NSE	RMSE	RSR	PBIAS
<i>MFL</i>	0,648	1,896	0,593	23,2%
<i>MFL – Perm – K_c</i>	0,717	1,699	0,532	8,6%
<i>MFL – Perm – K_f</i>	0,754	1,584	0,496	9,1%
<i>MFL – Perm – l</i>	0,695	1,765	0,553	5,4%

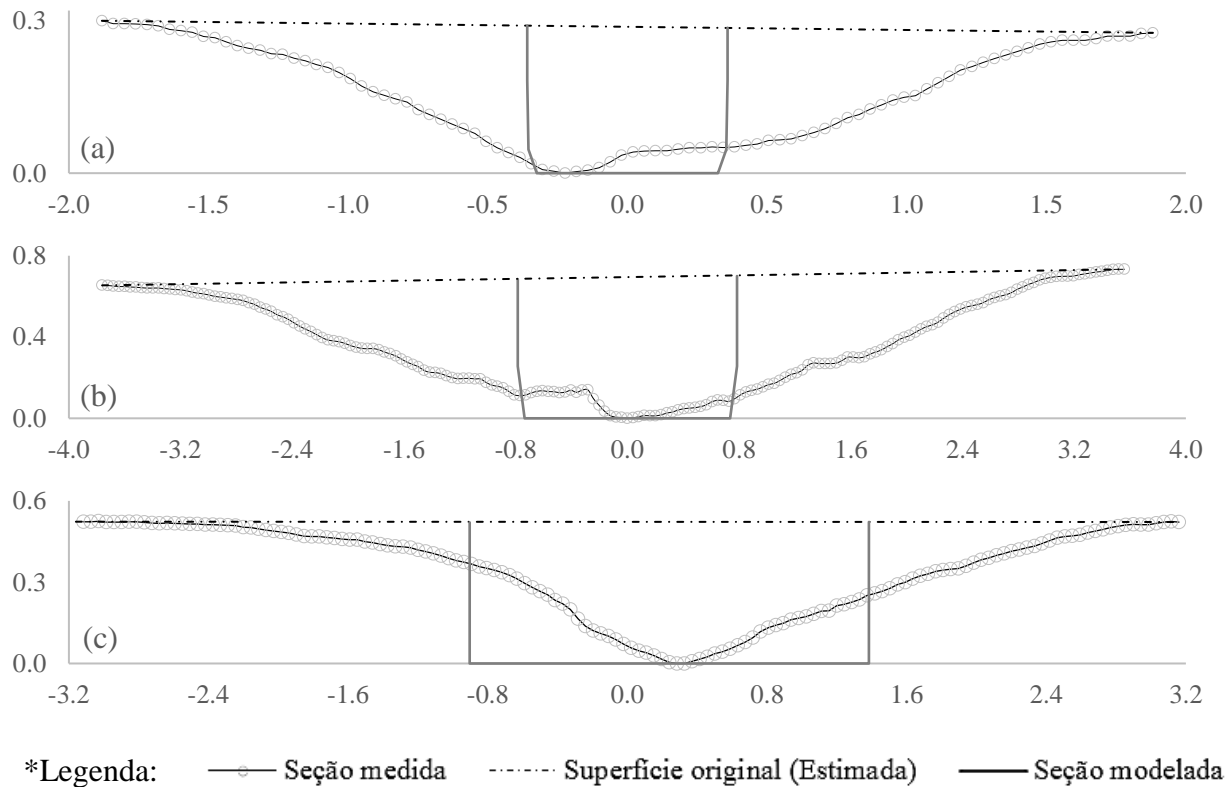
Vale observar que estes resultados motivam uma nova hipótese, que não pôde ser testada ao longo deste projeto, sendo ela:

- **H1:** O solo desprendido das paredes da voçoroca, seja por movimento de massa, ou por erosão provocada pelo escoamento superficial produzido nas bordas do canal, é transportado para o exultório da mesma.

A hipótese é necessária pois não se avaliou deposição e ressuspensão de sedimentos no canal da voçoroca, ou seja, assumiu-se na modelagem que o fluxo de água sempre possui energia suficiente para remover todo o sedimento mobilizado.

A seguir (Figura 43) temos alguns exemplos de seções medidas e calculadas pelo modelo em escalas diferentes. Todas têm em comum a disparidade entre a geometria da seção calculada (aproximadamente retangular) com a seção medida. É possível observar que, em maior ou menor escala, houve desprendimento de solo nas paredes, além de eventual acomodação no leito do canal (seção “c”)⁵ devido a geometria não trapezoidal da seção; corroborando com a hipótese de erosão nas paredes do canal devido ao escoamento gerado nas margens e ao acréscimo do parâmetro de correção em função da forma da bacia.

Figura 43 - Seções de voçorocas medidas e modeladas. (a) seção 3 da voçoroca 1; (b) seção 2 da voçoroca 2; e (c) seção 1 da voçoroca 3



⁵Nos anexos (A3) são registradas todas as 15 seções medidas e modeladas.

A geometria das seções indica ainda um forte efeito da erosão linear e do movimento de massa, como ilustrado no Capítulo 1 (Figura 5), onde observamos acentuada incisão central com declividades pequenas nas extremidades e transição suave entre canal e superfície.

As áreas calculadas foram utilizadas para aproximar o volume da voçoroca utilizando a Equação 7. Obteve-se um erro significativo na previsão do volume total. Esse erro pode ser consequência do pequeno número de seções utilizadas no processo de interpolação (apenas cinco por voçoroca), o que não é necessariamente suficiente para descrever a complexidade da geometria do canal, bem como das incertezas inerentes ao modelo. Os resultados são apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 - Resultados do volume da voçoroca obtidos por interpolação dos dados de área calculados pelo modelo MFL-Perm.

Voçoroca	Volume Estação total (m ³)	Volume VANT (m ³)	Volume Interpolado (m ³)	Erro Rel, ⁶ (%)
1	20	22,5	32,6	45%
2	38	33,5	33,1	1%
3	69	-	52,6	24%

⁶ O Erro Relativo foi calculado tomando como termo exato o Volume VANT, exceto para a voçoroca 3, onde foi utilizado o Volume ET, por não ter sido possível calcular o volume utilizando de dados de VANT

5 CONCLUSÃO

Conclui-se que o modelo final proposto (MFL-Perm-Kf) neste trabalho pode ser aplicado como método de estimativa do volume erodido em pequenas voçorocas.

Conclui-se ainda que o Modelo de Foster e Lane (1983), como proposto originalmente pelos autores, foi capaz de prever o volume de solo erodido em pequenas voçorocas permanentes no semiárido quando implementado para uma série de eventos erosivos, em que mesmo com tendência a subestimar a área das seções, os valores obtidos pertencem à mesma população dos valores medidos, indicando que há ausência de processos relevantes na modelagem, mas os utilizados são significativos. Esse resultado foi obtido, mesmo considerando-se que o modelo original tenha sido proposto para voçorocas efêmeras, em que apenas o evento mais erosivo do período entre lavouras seja levado em conta.

O modelo ajustado com os parâmetros de forma da bacia, que inseriu mudança do paradigma original (uma vez que passou a ponderar processos fora do canal da voçoroca), acresceu um termo que busca representar o efeito da erosão do escoamento lateral. Tal alteração melhorou significativamente os resultados do modelo, indicando que este subprocesso é, de fato, relevante para o processo de voçorocamento como se observa em Madalena-CE.

Como conclusão complementar, obteve-se que, para as pequenas voçorocas permanentes estudadas, a intensidade de chuva que melhor representa o processo é aquela de 30 minutos (I_{30}). Essa duração característica (30 minutos) coincide com a duração proposta na literatura para processos de erosão laminar (WISCHMEIER e SMITH 1978). Essa conclusão pode, se comprovada sua validade em outras regiões, ser útil quando os dados de chuvas instantâneas não forem acessíveis ou forem inexistentes.

Recomendações

São propostas para pesquisas futuras, tendo como base a presente dissertação:

- a) Avaliar a potência de corrente e a capacidade de transporte em voçorocas a fim de avaliar quanto do solo erodido, inclusive nas paredes, é transportado para fora do sistema, estimando a razão de aporte de sedimentos do sistema;
- b) Aprimorar a modelagem a partir de abordagens físico-probabilísticas, lançando mão de ferramentas robustas, como o Princípio da Entropia Máxima;
- c) Avaliar os fatores chave que levam ao início do voçorocamento, permitindo assim a avaliação de cenários e geração de ferramentas de manejo de bacias;
- d) Avaliar detalhadamente o uso do MFL na previsão do processo de evolução da geometria de voçorocas.

REFERÊNCIAS

- ABDULFATAI, I. A., I. A. OKUNLOLA, W. G. AKANDE, L. O. MOMOH, AND K. O. IBRAHIM. Review of Gully Erosion in Nigeria: Causes, Impacts and Possible Solutions. **Journal of Geosciences and Geomatics**. v. 2, no. 3: 125-129. 2014
- ALMEIDA, C. de L.; OLIVEIRA, J. G. B. de; ARAÚJO; J. C. Hydrological and sedimentological impact of the restoration of a degraded area in a semiarid environment. **Water Resources and Irrigation Management**, v. 1, p. 39 – 50, 2012.
- ASCOUGH, J. C. II; BAFFAUT C.; NEARING M.A.; LIU, B.Y. The WEPP watershed model: I. Hydrology and erosion. **Trans ASAE**, v. 40, p. 921–93, 1997.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 13600: SOLO – Determinação do teor de matéria orgânica por queima a 440°C. Rio de Janeiro. 1996.
- AVNI, Y. Gully incision as a key factor in desertification in na arid environment, the Negev highlands, Israel, **Catena**, v 63, p. 185-220, 2005.
- BINGNER, R. L., *et al.* Ephemeral gully channel width and erosion simulation technology. **Nat Hazards**, v. 80, p. 1949 – 1966, 2016.
- BRICE, J.B. Erosion and deposition in the loessmantled Great Plains, Medicine Creek drainage basin, Nebraska. US Geological Survey Professional Paper 352H: 235–339. 1966.
- CAROLLO, F.G.; Di STEFANO, C; FERRO, V.; PAMPALONE, V. Measuring rill erosion at plot scale by a drone-based technology, **Hydrological Processes**, 2015. DOI: 10.1002/hyp.10479
- CASALÍ, J.; GIMÉNEZ, R.; CAMPO-BESCÓS, M.A. Gully geometry: what are we measuring?, **SOIL**, v. 1, p. 509-513, 2015.
- CASTILLO, C.; CAMPO-BESCÓS, M.A.; CASALÍ, J.; GIMÉNEZ, R. A new automated method for the determination of cross-section limits in ephemeral gullies. Em: EGU – General Assembly European Geosciences Union, 2017, Viena. Geophysical Research Abstracts, EGU2017, v. 19, p. 5340.
- CERDAN, O., POESEN, J., GOVERS, G., *et al.* (2006) Sheet and rill erosion. In Boardman, J. & Poesen, J. (eds), *Soil Erosion in Europe*. John Wiley & Sons, Chichester, UK: 501–13.
- CHOW, V.T. *et al.* Applied Hydrology. New York: McGraw-Hill, 572 p., 1988.
- d’OLEIRE-OLTMANN, S. *et al.* Unmanned Aerial Vehicle (UAV) for Monitoring Soil Erosion in Morocco, **Remote Sensing**, v. 4, p. 3390 – 3416, 2012.
- Da CUNHA, E. **Os Sertões**. São Paulo: Três, 270p., 1984.
- Da SILVA, R.M.; SANTOS, C.A.G.; Dos SANTOS, J.Y.G. Evaluation and modeling of runoff and sediment yield for different land covers under simulated rain in a semiarid region of Brazil. **International Journal of Sediment Research**, v. 32, p. 1-9, 2017.

DABNEY, S.M. *et al.* Spatially distributed sheet, rill, and ephemeral gully erosion. **J HydrolEng**, v. 20 p.C4014009 (12p.), 2014.

De ARAÚJO, J.C.; GÜNTNER, A.; BRONSTERT, A. Loss of reservoir volume by sediment deposition and its impact on water availability in semiarid Brazil, **Hydrological Sciences**, v. 51, p 157-170, 2006.

De ARAÚJO, J.C.; MEDEIROS P.H.A. Impact of dense reservoir networks on water resources in semiarid environments, **Australian Journal of Water Resources**, v. 17, No. 1. 2013.

De VENITE, J.; POESEN, J. (2005) Predicting soil erosion and sediment yield at the basin scale: Scale issues and semi-quantitative models. *Earth Science Reviews* 71: 95–125.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNER-ME 051/94. Solos: Análise granulométrica - Método de ensaio. Rio de Janeiro. 1994.

DEROSE, R.C.; GOMEZ, B.; MARDEN, M.; TRUSTRUM, N. A. Gully erosion in Mangatu forest, New Zealand, estimated from digital elevation models, **Earth Surf. Process. Landforms**, v. 23, p. 1045–1053, 1998.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Disponível em: <http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/agricultura_e_meio_ambiente/arvore/CONTA_G01_61_210200792814.html>. Acesso em: 16 jan. 2018.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Disponível em: <http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/bioma_caatinga/arvore/CONT000g5twggzh02wx5ok01edq5scvvo0oy.html>. Acesso em: 18 mar. 2018.

FEITOSA, L.S. **Manejo da mata ciliar e eutrofização de reservatórios do semiárido nordestino**. 2016. Tese (Doutorado em Desenvolvimento e Meio Ambiente) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016.

FIGUEREDO, J. V.; ARAÚJO, J. C.; MEDEIROS, P. H. A.; COSTA; A. C. Runoff initiation in a preserved semiarid Caatinga small watershed, Northeastern Brazil. **Hydrological Processes**, v. 30, p. 2390 – 2400, 2016.

FOSTER, G. R. Modeling the erosion process. **Hydrology Modeling of Small Watersheds**. Monograph No. 5. American Society of Agricultural Engineers, St. Joseph MI, 1982.

FOSTER, G. R.; LANE, L. J. Erosion by concentrated flow in farm fields. **Proceedings of the D. B. Simons Symposium on Erosion and Sedimentation**, p.9.65 – 9.82, 1983.

FOSTER, G.R. Understanding Ephemeral Gully Erosion. **Soil Conservation: An Assessment of the National Resources Inventory**, v. 2, p. 90 – 118, 1986.

FOSTER, G.R.; TOY, T.J.; RENARD, K.G. Comparison of the USLE, RUSLE1.06c, and RUSLE2, for application to highly disturbed land. Em: First Interagency Conference on Research in the Watersheds. USDA-Agricultural Research Service. Washington, D.C. p. 154-160, 2003.

FUNCEME. Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos. Disponível em: <<http://www.funceme.br>>. Acesso em: 20 nov. 2016.

GORDON, L. *et al.* REGEM: The revised ephemeral gully erosion model. **Proceedings of the Eighth Federal Interagency Sedimentation Conference**, p. 313 – 319, 2006.

GRISSINGER, E. **Rill and gullies erosion**. In Agassi, M. (ed.), *Soil Erosion, Conservation, and rehabilitation*. Marcel Dekker, New York: 153–67. 1966.

GRISSINGER, E. **Reclamation of gullies and channel erosion**. In Agassi, M. (ed.), *Soil Erosion, Conservation and Rehabilitation*. Marcel Dekker, New York: 301–13. 1966.

GUYASSA, E. *et al.* Effects of check dams on runoff characteristics along gully reaches, the case of Northern Ethiopia. **Journal of Hydrology**, v. 545, p. 299 – 309, 2017.

HAAN, C.T.; BARFIELD, B.J.; HAYES, J.C. *Design Hydrology and Sedimentology for Small Catchments*. California: Academic Press, 588 p., 1994.

HAUGE, C. Soil erosion definitions. **California Geology**, v. 30: 202–3. 1977.

HUNKE, P. **The Brazilian Cerrado: Ecohydrological assessment of water and soil degradation in heavily modified meso-scale catchments**. 2015. Tese (Doutorado em Mathematisch-Naturwissenschaftlichen) – Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät, Universität Potsdam, Potsdam, 2015.

HUNKE, P.; MUELLER, E.N.; SCHRÖDER, B.; ZEILHOFER, P. The Brazilian Cerrado: assessment of water and soil degradation in catchments under intensive agricultural use. **Ecohydrology**, v. 8, p 1154 - 1180, 2015.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. *Censo Agropecuário 2006*. Rio de Janeiro: IBGE, 2009.

IMERSON, A.C. & KWAAD, F.J.P.M. Gully types and gully prediction. **Geografisch Tijdschrift**, v. 14, p. 430–41, 1980.

INSTITUTO DE PESQUISA E ESTRATÉGIA ECONÔMICA DO CEARÁ (IPECE). *Perfil Básico Municipal 2015 – Madalena*. Disponível em: <http://www.ipece.ce.gov.br/perfil_basico_municipal/2015/Madalena.pdf> Acesso em: 03 jan. 2017.

KIRKBY, M. J.; BRACKEN, L. J. Gully processes and gully dynamics. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 34, p. 1841 – 1851, 2009.

LIU, J.; NAKATANI, K.; MIZUYAMA, T. Hazard Mitigation Planning for Debris flow Based on Numerical Simulation Using Kanako Simulator, **Journal of Mountain Science**, v. 9, p. 529-537, 2012.

MAIDMENT, D.R. *Handbook of Hydrology*. New York: McGraw-Hill, 1424 p., 1992.
MALVEIRA, V.T.C.; De ARAÚJO, J.C.; GÜNTNER, A. Hydrological Impact of a High-Density Reservoir Network in Semiarid Northeastern Brazil. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 17, p. 109-117, 2012.

McCOOL, D.; FOSTER, G.; MUTCHLER, C.; MEYER, L., Revised slope length factor for the universal soil loss equation, **Trans. ASAE**, v. 32, p. 1571–1576, 1989.

MENDES, F.J. **Uma proposta de reclassificação das regiões pluviometricamente homogêneas do Estado do Ceará**. 2010. Dissertação (Mestrado em Ciências Físicas Aplicadas) Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2010.

NACHTERGAELE, J.; POESEN, J.; L. VANDEKERCKHOVE, L.; WIJDENES, D. O.; ROXO, M. Testing the ephemeral gully erosion model (EGEM) for two mediterranean environments, **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 26, p. 17 – 30, 2001.

NACHTERGAELE, J.; POESEN, J.; SIDORCHUCK, A.; TORRI, D. Prediction of concentrated flow width in ephemeral gullychannels. **Hydrological Processes**, v. 16, p. 1935-1953, 2002.

NASCIMENTO, R.C. **Modelagem de erosão em voçoroca de base física em bacia hidrográfica semiárida**. 2017. 88f. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal Rural de Pernambuco, 2017.

NAVARRO, J.; de ARAÚJO, J.C.; MONGIL, J. Assessment of 80 years of ancient-badlands restoration in Saldaña, Spain. **Earth Surface Processes and Landforms**, Doi: 10.1002/esp.3541, 2014.

NASH, J. E.; SUTCLIFFE, J. V. River flow forecasting through conceptual models: Part 1. A discussion of principles. **J. Hydrology**. V.10, p. 282-290, 1970.

PINHEIRO, L. S. **Proposta de índice de priorização de áreas para saneamento rural: estudo de caso Assentamento 25 de Maio, Ceará**. 2011. 135f. Dissertação Mestrado. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza. 2011.

POESEN, J. Gully typology and gully control measures in the European loess belt, **Farm Land Erosion**, p. 221-239, 1993.

POESEN, J.; VANDEKERCKHOVE, L.; NACHTERGAELE, J.; WIJDENES, D.O.; GYSSELS, GVERSTRAETEN, G.; Van WESEMAEL, B. Gully erosion in dryland environments, em: **Dryland Rivers: Hydrology and Geomorphology of Semi-arid Channels** England: Willey, 398 p., 2002.

POESEN, J.; TORRI, D.B.; VANWALLEGHEM, T. Gully Erosion: Procedures to Adopt When Modelling Soil Erosion in Landscapes Affected by Gullying, em: **Handbook of Erosion Modelling**, Blackwell Publishing Ltd. 2011.

POESEN, J.; VANWALLEGHEM, T.; De VENTE, J.; *et al.* Gully erosion in Europe. In Boardman, J. & Poesen, J. (eds) *Soil Erosion in Europe*. John Wiley & Sons, Chichester, UK: 515–36. 2006.

POESEN, J.; NACHTERGAELE, J.; VERSTRAETEN, C.; VALENTIN, C. Gully erosion and environmental change: importance and research needs. **Catena**, v. 50, p. 91 – 133, 2003.
SILVA, E. V.; GORAYEB, A.; DE ARAÚJO, J. C. Atlas socioambiental do Assentamento 25 de Maio, Madalena - Ceará. Fortaleza: Ed. Expressão Gráfica, 44 p., 2015.

STARKEL, L. Paradoxes in the development of gullies. **Landform Analysis**, v. 17, p. 11 – 13, 2011.

STORM, D.E., BARFIELD, B.J., ORMSBEE, L.E. Hydrology and sedimentology of dynamic rill erosion. **Erosionmodel for dynamicrill networks**, Relatório de pesquisa n. 178. Kentucky Water Resources Research Institute, University of Kentucky, Lexington, KY, 1990.

UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE. WEPP User Summary. 143p., 1995.

USDA. Examination and Description of Soil Profiles. Disponível em: <https://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detail/soils/ref/?cid=nrcs142p2_054253> Acesso em: 22 set. 2017.

USDA. CREAMS: A field scale model for chemical, runoff, and erosion from agricultural, management systems, **Conservation Research Report 26**, 1972.

USDA. Predicting soil erosion by water: A guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE), Agriculture Handbook 703, 407p., 1997.

USDA. WEPP - Water Erosion Prediction Project - User summary, Disponível em: <<https://www.ars.usda.gov/ARUserFiles/50201000/WEPP/usersum.pdf>>. Acesso em: 22 set. 2017.

VALENTIN, C.; POESEN, J.; LI, Y. Gully erosion: Impacts, factors and control. **Catena**, v. 63, p. 132 – 153, 2005.

VANDEKERCKHOVE, L.; POESEN, J.; WIJDENES, D.O.; GYSSELS, G. Short-term bank gully retreat rates in Mediterranean environments, **Catena**, v. 44, p. 133-161, 2001.

VERSTRAETEN, G., BAZOFFI, P., LAJCZAK, A., *et al.* Reservoir and pond sedimentation. In Boardman, J. & Poesen, J. (eds), Soil Erosion in Europe. Wiley, Chichester, UK: 759–74. 2006.

WATSON D.A., LAFLEN J.M., FRANTI T.G. Estimating ephemeral gully erosion. **American Society of Agricultural Engineers**, v. 86, p. 1–16, 1986.

WELLS, R.R. *et al.* An empirical investigation of gully widening rates in upland concentrated flows. **Catena**, v. 101, p. 114–121, 2013.

WISCHMEIER, W.H.; SMITH, D.D. Predicting rainfall erosion losses - A guide to conservation planning. Washington D.C.: USDA, 1978.

WOODWARD, D.E. Method to predict cropland ephemeral gully erosion. **Catena**, v. 37, p. 393 – 399, 1999.

YAO, C. *et al.* Critical Conditions For Rill Initiation. **American Society of Agricultural and Biological Engineers**, v. 51, p. 107 – 114, 2008.

**ANEXO A – TABULAÇÃO DOS GRÁFICOS QUE RELACIONAM X_{*C} E X_{*CF} COM
AS GRANDEZAS W_* , R_* , $G(X_{*C})$ E $G(X_{*CF})$.**

X_{*C}/X_{*CF}	W_*	R_*	$g(X_{*C})$	$1/g(X_{*C})$	$g(X_{*CF})$	$1/g(X_{*CF})$
0.00	0.7438	0.1510	1.00E+30	1.00E-30	1.00E+30	0.0000
0.01	0.7287	0.1524	26.3603	0.0379	73.75	0.0136
0.02	0.7138	0.1535	13.3985	0.0746	29.21	0.0342
0.03	0.6990	0.1544	9.0856	0.1101	17.19	0.0582
0.04	0.6841	0.1552	6.9351	0.1442	11.89	0.0841
0.05	0.6692	0.1558	5.6497	0.1770	9.00	0.1111
0.06	0.6543	0.1562	4.7971	0.2085	7.21	0.1387
0.07	0.6395	0.1565	4.1918	0.2386	6.00	0.1667
0.08	0.6246	0.1565	3.7413	0.2673	5.14	0.1946
0.09	0.6097	0.1564	3.3941	0.2946	4.50	0.2222
0.10	0.5949	0.1562	3.1194	0.3206	4.01	0.2494
0.11	0.5800	0.1557	2.8974	0.3451	3.62	0.2762
0.12	0.5651	0.1551	2.7152	0.3683	3.31	0.3021
0.13	0.5502	0.1542	2.5637	0.3901	3.06	0.3268
0.14	0.5354	0.1533	2.4365	0.4104	2.85	0.3509
0.15	0.5205	0.1521	2.3288	0.4294	2.66	0.3759
0.16	0.5056	0.1507	2.2371	0.4470	2.53	0.3953
0.17	0.4908	0.1492	2.1587	0.4632	2.40	0.4167
0.18	0.4759	0.1475	2.0915	0.4781	2.29	0.4367
0.19	0.4610	0.1457	2.0340	0.4916	2.20	0.4545
0.20	0.4461	0.1436	1.9849	0.5038	2.12	0.4717
0.21	0.4313	0.1414	1.9439	0.5144	2.05	0.4878
0.22	0.4164	0.1390	1.9076	0.5242	1.99	0.5025
0.23	0.4015	0.1364	1.8781	0.5325	1.95	0.5128
0.24	0.3867	0.1336	1.8539	0.5394	1.90	0.5263
0.25	0.3718	0.1307	1.8345	0.5451	1.87	0.5348
0.26	0.3569	0.1276	1.8197	0.5495	1.83	0.5464
0.27	0.3420	0.1243	1.8092	0.5527	1.81	0.5525
0.28	0.3271	0.1208	1.8029	0.5547	1.79	0.5587
0.29	0.3123	0.1172	1.8005	0.5554	1.77	0.5650
0.30	0.2974	0.1134	1.8021	0.5549	1.76	0.5682
0.31	0.2826	0.1093	1.8076	0.5532	1.76	0.5682
0.32	0.2677	0.1052	1.8172	0.5503	1.76	0.5682
0.33	0.2528	0.1009	1.8309	0.5462	1.76	0.5682
0.34	0.2379	0.0964	1.8490	0.5408	1.77	0.5650
0.35	0.2231	0.0917	1.8718	0.5342	1.78	0.5618
0.36	0.2082	0.0868	1.8998	0.5264	1.80	0.5556
0.38	0.1785	0.0765	1.9736	0.5067	1.85	0.5405
0.39	0.1636	0.0711	2.0212	0.4948	1.89	0.5291
0.40	0.1487	0.0655	2.0778	0.4813	1.93	0.5181
0.41	0.1338	0.0598	2.1454	0.4661	1.98	0.5051
0.42	0.1190	0.0538	2.2267	0.4491	2.05	0.4878
0.43	0.1041	0.0477	2.3260	0.4299	2.13	0.4695
0.44	0.0892	0.0414	2.4497	0.4082	2.24	0.4464
0.45	0.0743	0.0350	2.6083	0.3834	2.37	0.4219
0.46	0.0595	0.0283	2.8209	0.3545	2.56	0.3906
0.47	0.0446	0.0215	3.1272	0.3198	2.82	0.3546
0.48	0.0296	0.0144	3.6289	0.2756	3.26	0.3067
0.49	0.0145	0.0072	4.7181	0.2119	4.19	0.2387
0.50	0.0000	0.0000	5.7322	0.1745	5.59	--

Fonte: HAAN *et al.* 1994

**ANEXO B – CÓDIGO DO PROGRAMA EM FORTRAN-90 DO MODELO MFL,
DESENVOLVIDO PELO AUTOR NO ÂMBITO DA PRESENTE DISSERTAÇÃO DE
MESTRADO**

```

1      !programa com modelo de Foster and Lane (Erosion by concentrated flow in farm fields - 1983)
2      !e Haan et.al. (Desing hydrology and sedimentology for small catchments -1994)
3
4
5      program Foster_Lane
6      IMPLICIT NONE
7      CHARACTER arquivo*30,arquivo1*30,arquivo2*30
8      integer cont,No,i,steps
9      REAL      Q(1500),n,S,Kr,Ds,Pa,Tc,Xnc,Gc,Rn,WP,Rh,Ta,Wn,Weq,Er,Pse,Le,Delta,Param,Tmax,
      tm(1500), t(1500), tn
10     REAL NEL,tne,Tb,dWin,Erin,Gcf,Xncf,Ctn,Soma_Er,Erm,Xnc1,Xnc2,Gc1,Gc2,Rn1,Rn2,WP1
11     REAL WP2,Rh1,Rh2,Ta1,Ta2,Dg1,Dg2,Tnc1,Tnc2,Xncf1,Xncf2,gcf1,gcf2,tnf1,tnf2,dgf1,dgf2
12     REAL wi(1500),wf,dp(1500),depth,DeltaW,PerimF,Areal,AreaF,Rh_S,Max_wi,Max_W,dW
13     COMMON /grand1/Gcf,Xncf1,Xncf2
14
15     !Q = peak discharge (m3/s)
16     !tm = discharge's duration (min)
17     !n = Manning's number
18     !S = Slope (abs) - (not in degrees or percentage)
19     !Kr = rill erodibility factor (s/m)
20     !Tc = Critical shear stress (Pa)
21     !Xnc = Normalized distance in the WP where T=Tc (abs)
22     !Gc = Conveyance function at Xnc (abs)
23     !Rn = Normalized Hydraulic Radius (abs)
24     !WP = Wet Perimeter (m)
25     !Rh = Hydraulic Radius (m)
26     !Ta = Average shear stress (Pa)
27     !Wn = Normalized width (abs)
28     !Weq = equilibrium width (m)
29     !Er = Erosion rate (kg/m.s)
30     !Ve = Velocity of movement down (m/s)
31     !Pse = Weigth of soil eroded in the event (kg)
32     !Le = Sheet thickness of eroded soil(m)
33     !Param = A parameter that is repeated throughout the calculations
34     !t = time (s)
35     !NEL = Depth of nonerodible layer(m)
36     !Tb = Tension when the erosion reach the NEL (Pa)
37     !Gcf = conveyance funcion final (abs)
38     !Wf = final width of the channel (m)
39     !tne = time to reach the NEL (s)
40
41     WRITE(*,*)'*****'
42     WRITE(*,*) Foster_Lane program
43     WRITE(*,*)

```

```

44     WRITE(*,*)' Calculates the final total of soil '
45     WRITE(*,*)'   eroded in an ephemeral gully '
46     WRITE(*,*)'   for a time-serie rainfall '
47     WRITE(*,*)'
48     WRITE(*,*)'   Universidade Federal do Ceara '
49     WRITE(*,*)'   Departamento de Engenharia Agricola '
50     WRITE(*,*)'   Mestrado em Engenharia Agricola '
51     WRITE(*,*)'
52     WRITE(*,*)'   Pedro Alencar, 2017 '
53     WRITE(*,*)'
54     WRITE(*,*)'*****'
55
56     !Calcula a taxa de erosão para uma vazão de pico e o total erodido durante a vazão
57     !Apenas até atingir a camada não erodível
58
59     write(*,*)'Digite o numero de eventos de escoamento observados:'
60     Read(*,*)No
61     write(*,'(a)')'Digite o nome do arquivo com dados de escoamento (vazao e duracao):'
62     Read(*,'(a30)')arquivo1
63     write(*,'(a)')'Digite o nome do arquivo com as propriedades do canal:'
64     Read(*,'(a30)')arquivo2
65     WRITE(*,'(a)',advance='no') 'Digite o nome do arquivo de saida: '
66     READ(*,'(a30)')arquivo
67
68     i=1
69     open(50,file=arquivo1)
70         do i=1,No
71             read(50,*)Q(i),tm(i)
72             write(*,*)Q(i),tm(i)
73         t(i)=tm(i)*60.
74         end do
75     close(50)
76
77     open(60,file=arquivo2)
78         read(60,*)n,S,Tc,kr,Ds,NEL
79     write(*,*)'O numero de Manning do canal e.....',n
80     write(*,*)'A declividade do canal e.....',S
81     write(*,*)'A tensao critica de erosao.....',Tc
82     write(*,*)'O coeficiente de erodibilidade e....',Kr
83     write(*,*)'A densidade do solo e.....',Ds
84     write(*,*)'A prof. da camada naoerodivel e....',NEL
85     close(60)
86
87     Pa = 9803. !N/m3
88     !Param = 0
89     !Gc = 0
90     !Delta = 0
91     !Xnc1 = 0

```



```

92     !Xnc2 = 0
93     !Rn1 = 0
94     !Rn2 = 0
95     !WP1 = 0
96     !Rh1 = 0
97     !Tnc1 = 0
98     !Gc1 = 0
99     !Dg1 = 0
100    i = 1
101    depth = 0.
102    Areal = 0.
103    Max_wi = 0.
104    Max_W = 0.
105
106    open(40,file=arquivo)
107
108    do while(i.le.No)
109
110    Param = (n*Q(i)/(S**(0.5)))**0.375
111
112    if (depth.lt.NEL) then
113    !Calculo do Xnc
114    Gc = Pa*S*Param/Tc
115    if (Gc.lt.1.79) then
116    i=i+1
117    else
118
119    Delta = sqrt(3.9429**2 - 4*6.9594*(1/Gc))
120    Xnc1 = (3.9429-Delta)/(2*6.9594)
121    Xnc2 = (3.9429+Delta)/(2*6.9594)
122    Rn1 = -0.8834*Xnc1+0.1395*Xnc1+0.151
123    Rn2 = -0.8834*Xnc2+0.1395*Xnc2+0.151
124    !Write(*,*)'Gc ',Gc
125    !Write(*,*)'delta ',Delta
126    !Write(*,*)'Xnc1 ',Xnc1
127
128    end if
129
130    if (Rn1.gt.0) then
131    WP1 = Param/Rn1**(0.625)
132    Rh1 = Rn1*WP1
133    Ta1 = Pa*Rh1*S
134    Tnc1 = Tc/Ta1
135    Gc1 = 1./(Tnc1*(Rn1**0.375))
136    Dg1 = abs(Gc-Gc1)
137
138    else
139    Gc1 = 0

```

```

140         Dg1 = abs(Gc-Gc1)
141     end if
142
143     if (Rn2.gt.0) then
144         WP2 = Param/Rn2**(0.625)
145         Rh2 = Rn2*WP2
146         Ta2 = Pa*Rh2*S
147         Tnc2 = Tc/Ta2
148         Gc2 = 1/(Tnc2*(Rn2**(0.375)))
149         Dg2 = abs(Gc-Gc2)
150
151     else
152         Gc2 = 0
153         Dg2 = abs(Gc-Gc2)
154     end if
155
156     if (Dg1.gt.Dg2) then
157     Xnc = Xnc2
158     else
159     Xnc = Xnc1
160     end if
161     ! Write(*,*)'Xnc ',Xnc
162     !FimcalculoXnc
163
164     Wn = -1.4873*Xnc+0.7436
165     Rn = -0.8834*Xnc**2+0.1395*Xnc+0.151
166     WP = Param/Rn**(0.625)
167     Weq = WP*Wn
168     Rh = Rn*WP
169     Ta = Pa*Rh*S
170     Tmax = 1.35*Ta
171
172     ! Write(*,*)'param ',Param
173     ! Write(*,*)'Wn ',Wn
174     ! Write(*,*)'Rn ',Rn
175     ! Write(*,*)'WP ',Wp
176     ! Write(*,*)'Weq ',Weq
177     ! Write(*,*)'Rh ',Rh
178     ! Write(*,*)'Ta ',Ta
179     ! write(*,*)'cont',i
180
181     if (Tmax.lt.Tc) then
182     ! Write(*,*)'O evento não provoca erosao.'
183     wi(i) = 0.
184     dp(i) = 0.
185     else
186     wi(i) = Weq
187     Le = Kr*(Tmax-Tc)*t(i)/Ds

```

```

188         if (Le.gt.NEL) then
189     dp(i) = NEL
190         else
191     dp(i) = Le
192         end if
193     depth = depth + dp(i)
194     if (Max_wi.lt.Weq) then
195     Max_wi = wi(i)
196     Max_W = wi(i)
197     end if
198     Areal = Areal+wi(i)*dp(i)
199
200     !WRITE(*,*)'AREAI',AREAI
201
202     Write(40,*)'Fase1-dados',i,wi(i),dp(i),Max_wi,Areal
203     end if
204 end if
205
206     if (depth.ge.NEL) then
207     Gcf = Pa*S*Param/Tc
208     if (Gcf.lt.1.78) then
209     i=i+1
210     else
211     CALL Newton_NEL
212     end if
213
214     tnf1 = 1.35*(1-(1-2.*xncf1)**2.9)
215     gcf1 = 1/(tnf1*(xncf1*(1-2*xncf1)**(0.375))
216     dgf1 = abs(gcf-gcf1)
217     tnf2 = 1.35*(1-(1-2.*xncf2)**2.9)
218     gcf2 = 1/(tnf2*(xncf2*(1-2.*xncf2)**(0.375))
219     dgf2 = abs(gcf-gcf2)
220
221     if (dgf1.gt.dgf2) then
222     xncf = xncf2
223     else
224     xncf = xncf1
225     end if
226
227     Tb = 1.35*Ta*(1-(1-2*xncf)**2.9)*Pa*S*Param*(xncf*(1-2*xncf)**0.375
228     if (Tb.le.Tc)then
229     dW = 0
230     else
231     dW = Kr*(Tb-Tc)/Ds
232     end if
233
234     wf = Param*((1-2.*xncf)/(xncf**1.667))**0.375
235

```

```

236         if (Max_W.ge.Wf) then
237     tn = 0.
238         else
239     tn = t(i)*dW/(Wf-Max_W)
240         end if
241
242     Max_W = (1-exp(-tn))*(Wf-Max_W)+Max_W
243
244         write(40,*)'Fase2-dados',i,Max_W,Wf,tn,dw,tb,xncf,Gcf
245     end if
246     i = i+1
247 end do
248
249     DeltaW = Max_W-Max_Wi
250     AreaF = Areal + DeltaW*depth
251     PerimF = Max_W + 2.*depth
252     Rh_S = AreaF/PerimF
253
254     write(40,*)'A area da secao e: ',AreaF,' m2'
255     write(40,*)'O perimetro da secao e: ',PerimF,' m'
256
257     if (depth.lt.NEL) then
258     write(40,*)'A profundidade e: ',depth,'m'
259         write(40,*)' '
260     write(40,*)'A erosao atingiu a camada naoerodivel!'
261     else
262     write(40,*)'A profundidade e: ',NEL,'m'
263         write(40,*)' '
264     write(40,*)'A erosao atingiu a camada nao erodivel!'
265     end if
266
267     write(*,*)' '
268     write(*,*)'Veja arquivo de saida'
269
270 end program
271
272
273 Subroutine Newton_NEL
274 !Subrotina para calcular as raizes da equação de Xncf
275 implicit none
276
277 integer i,j
278 real x,xa,xb,f,df,erro,gcf,xncf1,xncf2
279 COMMON /grand1/Gcf,Xncf1,Xncf2
280
281     Xa = 0.1
282     Xb = 0.4
283     i=0




```

```

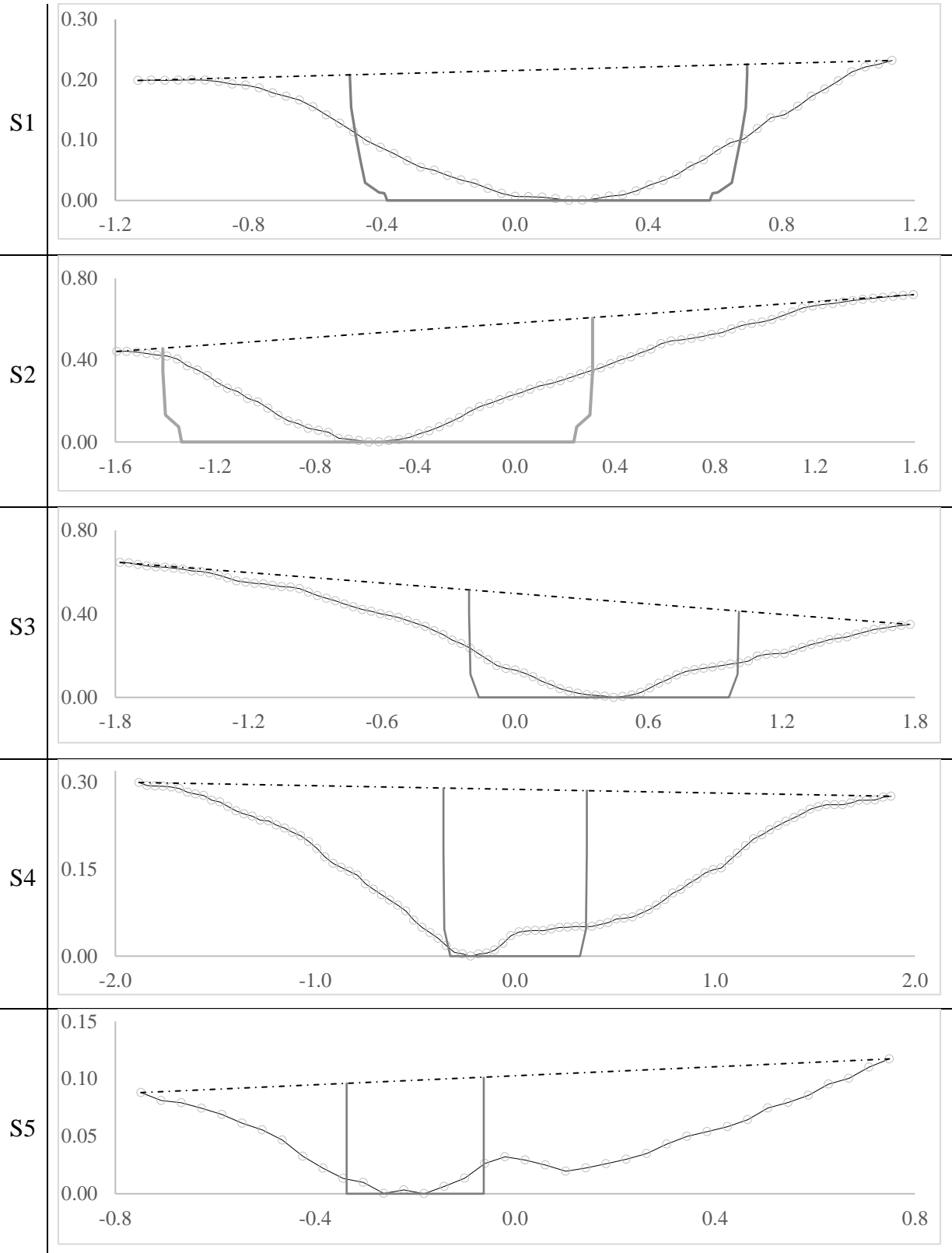
284     j=0
285
286     erro=1000000.
287     X=Xa
288     do while (erro.gt.0.000001)
289
290     f      =      -321.29*x**6+249.02*x**5+9.059*x**4-58.033*x**3+13.012*x**2+1.7199*x-
0.004883*COS(x) -1/Gcf
291     df      =      -321.29*6*x**5+249.02*5*x**4+9.059*4*x**3-
58.033*3*x**2+13.012*2*x+1.7199+0.004883*sin(x)
292
293     x = xa - f/df
294     erro = abs(x-xa)/xa
295     xa=x
296     i=i+1
297     end do
298
299     erro=1000000.
300     x=Xb
301     do while (erro.gt.0.000001)
302
303     f      =      -321.29*x**6+249.02*x**5+9.059*x**4-58.033*x**3+13.012*x**2+1.7199*x-
0.004883*COS(x) -1/Gcf
304     df      =      -321.29*6*x**5+249.02*5*x**4+9.059*4*x**3-
58.033*3*x**2+13.012*2*x+1.7199+0.004883*sin(x)
305
306     x = xb - f/df
307     erro = abs(x-xb)/xb
308     xb=x
309     j=j+1
310     end do
311
312     Xncf1 = xa
313     Xncf2 = xb
314
315     !write(*,*)xncf1,i
316     !write(*,*)xncf2,j
317
318     end subroutine

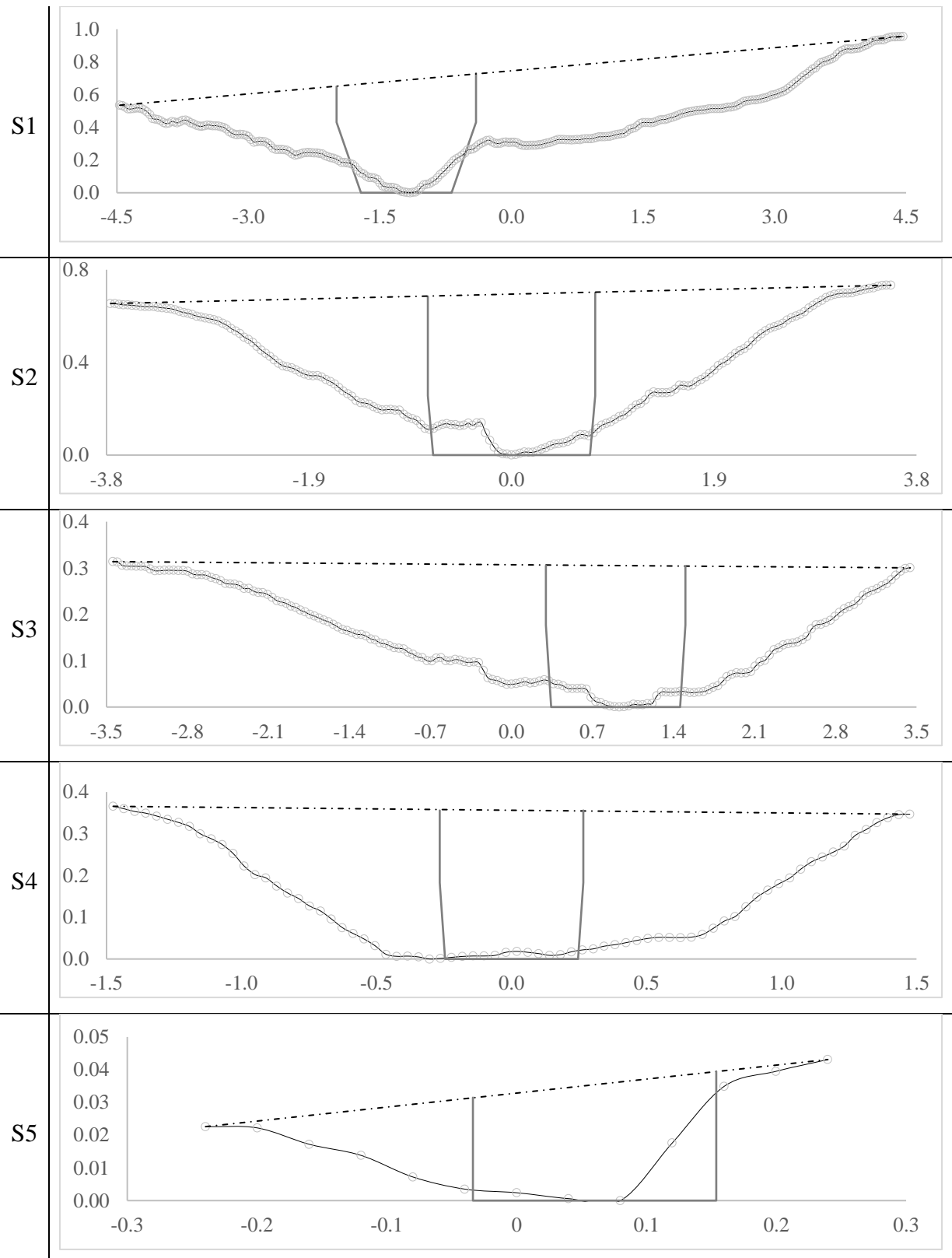
```

ANEXO C – SEÇÕES MEDIDAS E MODELADAS.

*Legenda:  Seção medida  Superfície original (Estimada)  Seção modelada

Vocoroca 1 (Coordenadas UTM: 445297;9449332):



Vocoroca 2 (Coordenadas UTM: 444614;9447240):

Vocoroca 3 (Coordenadas UTM: 444883;9447479):