



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

PAULO ROBERTO DE SOUZA SILVEIRA

**DINÂMICA DE SEDIMENTOS E GRANULOMETRIA EM AMBIENTE
SEMIÁRIDO**

FORTALEZA

2019

PAULO ROBERTO DE SOUZA SILVEIRA

DINÂMICA DE SEDIMENTOS E GRANULOMETRIA EM AMBIENTE SEMIÁRIDO

Tese submetida à banca examinadora aprovada pela Coordenação do Curso de Pós-graduação em Engenharia Agrícola, da Universidade Federal do Ceará, como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Agrícola. Área de concentração em Manejo e Conservação de Bacias Hidrográficas no Semiárido.

Orientador: Prof. George Leite Mamede

FORTALEZA

2019

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)

- S59d Silveira, Paulo Roberto de Souza.
Dinâmica de sedimentos e granulometria em ambiente semiárido / Paulo Roberto de Souza Silveira. –
2019.
171 f. : il. color.
- Tese (doutorado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências Agrárias, Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Agrícola, Fortaleza, 2019.
Orientação: Prof. Dr. George Leite Mamede.
1. Granulometria. 2. Modelo de Foster. 3. Bacia do Pentecoste. 4. Semiárido. I. Título.

CDD 630

PAULO ROBERTO DE SOUZA SILVEIRA

DINÂMICA DE SEDIMENTOS E GRANULOMETRIA EM AMBIENTE SEMIÁRIDO

Tese submetida à banca examinadora aprovada pela Coordenação do Curso de Pós-graduação em Engenharia Agrícola, da Universidade Federal do Ceará, como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Agrícola. Área de concentração em Manejo e Conservação de Bacias Hidrográficas no Semiárido.

Aprovada em: 29 / 01 / 2019.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. George Leite Mamede (Orientador)
Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-brasileira (UNILAB)

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

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

Prof. Dr. Luís César Aquino Lemos Filho
Universidade Federal Rural do Semiárido (UFERSA)

Prof(a). Dr(a). Andrea Almeida Cavalcante
Universidade Estadual do Ceará (UECE)

*Ao grande amor da minha vida, minha filha,
Maria Clara.*

AGRADECIMENTOS

Ao senhor Deus e a Virgem Maria Santíssima, louvado sejam vossos nomes.

Aos meus pais Carlenírio Carlos da Silveira e Maria Ivoneide de Sousa Silveira, e meus irmãos Fernando e Fábio, por todo o amor e apoio dado em toda minha carreira acadêmica.

Ao meu orientador George Leite Mamede, por todos os ensinamentos, incentivos, compreensão, amizade e orientação em todos os percursos desde minha entrada no programa até a defesa dessa tese.

Ao professor Pedro Henrique Augusto Medeiros por todos os ensinamentos e co-orientação.

Um agradecimento especial ao professor José Carlos de Araújo. Ter sido seu aluno foi uma das maiores honras de minha vida, pela sua inteligência, paixão de ensinar e simplicidade para com todos ao seu redor.

Ao senhor Newton de Oliveira Carvalho por todas as orientações.

À Irmã Maria Zelândia, do Colégio Sagrado Coração de Maria, pelo suporte dado a toda a minha família e por ter garantido a mim e meus irmãos o ensino fundamental.

Ao meu amigo Fábio e sua família, Andrea e Amanda, por ter me acolhido em sua casa. Parte dessa tese deve a vocês. Serei eternamente grato por esse apoio num dos momentos mais importantes de minha vida.

À toda a família Santiago, em especial, Waldenora, Seu Afonso (Tutu) e Margá, também por ter me acolhido em vossa casa.

Ao colega Emanuel pelo companheirismo e amizade durante as atividades de campo em Pentecoste.

Aos colegas Taislan, Josivan, Jairo e Ramon também por todo o apoio.

À todos que fazem parte da Fazenda Experimental do Vale do Curú (FEVC): Zé Hamilton, Zé Ayrton, Assis, Mário, Ciço, Seu Cleiton, Gleiciane, Dona Ana, Iron, Fran, Júlia, Iara, Socorro e Ana Celma

À minha esposa Camilla Santiago por todo o amor, carinho, compreensão, companheirismo, incentivo. Tê-la como minha esposa é, para mim, uma imensa alegria e satisfação que me realiza e completa como pessoa. Te amo.

E, finalmente, à minha amada filha Maria Clara. Razão de minha vida e a quem dedico essa tese. À você todo meu amor, carinho e atenção. Ser teu pai é a maior alegria de minha vida. Te amo com todas as minhas forças.

RESUMO

Granulometria é um dos principais fatores que afetam a dinâmica de sedimentos em bacias hidrográficas, desde seu desprendimento do solo matriz até o transporte ou deposição ao longo das encostas, na rede de drenagem e reservatório. Objetivou-se com esse trabalho analisar o comportamento granulométrico dos sedimentos em uma pequena bacia do semiárido brasileiro, no bioma Caatinga, desde as encostas até o exutório, e elaborar um método simplificado de estimativa do padrão granulométrico dos sedimentos numa bacia, como também da dinâmica granulométrica em reservatório. O estudo foi realizado na bacia hidrográfica do Pentecoste, situada no semiárido do Ceará. A parte experimental da pesquisa foi realizada na Bacia Experimental do Vale do Curú (BEVC) com coleta de dados pluviométricos e hidrossedimentológicos, amostras de solo da bacia de captação, precipitação diária e de escoamentos superficiais, durante a quadra chuvosa entre os anos de 2015 e 2017. Para uma série histórica de precipitação, o modelo *CN-SCS* foi aplicado para estimativa de séries sintéticas de vazões aportam ao Açude Escola, localizado no exutório da BEVC. Modelos de desprendimento de sedimentos divulgados na literatura foram testados e aplicados para a área de estudo. À partir de dados reais, foi feita uma estimativa do padrão de transporte de sedimentos pela bacia. No reservatório, foram aplicados os modelos de transporte propostos por Haan *et al.* (1994) e Fifield (2011) desenvolvidos em programa Fortran. Após calibração dos dados e análise dos resultados em comparação com os dados reais de granulometria de sedimentos em pontos específicos no reservatório da BEVC, o modelo foi aplicado numa amostra de reservatórios da bacia hidrográfica do Pentecoste. Foram escolhidas 14 sub-bacias para aplicação da metodologia proposta na BEVC. A análise física dos solos coletados foi realizada com e sem uso de dispersante. Os resultados mostraram que o modelo de desprendimento de sedimento da encosta proposto por Foster *et al.* (1981) apresentou os melhores resultados quando comparado aos demais, com coeficiente de Nash e Sutcliffe (NS) de 0,99, em ambiente de cobertura vegetal mista. Houve um enriquecimento dos componentes argila e silte, da ordem de 5 e 13, respectivamente, e diminuição das concentrações de areia, 0,4, entre os sedimentos contidos no solo matriz e os presentes no escoamento afluente ao reservatório. O modelo de Fifield (2011) para transporte de sedimentos em reservatório apresentou razoável acurácia quando os dados modelados foram comparados com dados granulométricos do interior do açude. Quando os modelos, desprendimento, transporte na bacia e no reservatório, foram aplicados em densa rede de reservatórios, 7 dos 14 reservatórios apresentaram resultados aceitáveis, de acordo com o

coeficiente NS calculado, e os demais classificados como inaceitáveis. Foi constatado também que os reservatórios do semiárido têm alta eficiência de retenção de sedimentos.

Palavras-chave: Granulometria. Modelo de Foster. Bacia do Pentecoste. semiárido.

ABSTRACT

Granulometry is one of the main factors affecting the sediment dynamics in watersheds, from their detachment from the soil to the transport or deposition along the slopes, in the drainage and reservoir network. The objective of this work was to analyze the sedimentation behavior of sediments in a small Brazilian semi-arid basin, in the Caatinga biome, from the slopes to the exudation, and to elaborate a simplified method to estimate the sedimentation standard of sediments in a basin, as well as the dynamics granulometric in reservoir. The study was carried out in the Pentecost basin, located in the semi-arid region of Ceará. The experimental part of the research was carried out in the Curv Valley Experimental Basin (BEVC) with rainfall and hydrosedimentological data collection, soil samples from the catchment basin, daily precipitation and surface runoff during the rainy season between 2015 and 2017. For a historical series of precipitation, the CN-SCS model was applied for the estimation of synthetic series of flows to the School Water, located in the exudate of the BEVC. Sediment detachment models published in the literature were tested and applied to the study area. Based on actual data, an estimate of the sediment transport pattern was made by the basin. In the reservoir, the transport models proposed by Haan et al. (1994) and Fifield (2011) developed in Fortran program. After calibration of the data and analysis of the results in comparison to the actual data of sediment granulometry at specific points in the BEVC reservoir, the model was applied to a sample of reservoirs in the Pentecoste basin. Fourteen sub-basins were chosen for the application of the methodology proposed in the BEVC. The physical analysis of the soils collected was performed with and without dispersant use. The results showed that the slope sediment detachment model proposed by Foster et al. (1981) presented the best results compared to the others, with a Nash and Sutcliffe (NS) coefficient of 0.99, under mixed vegetation cover. There was an enrichment of the clay and silt components, of the order of 5 and 13, respectively, and decrease of the sand concentrations, 0.4, between the sediments contained in the matrix soil and those present in the inflow to the reservoir. The model of Fifield (2011) for sediment transport in reservoir presented reasonable accuracy when the model data were compared with granulometric data from the interior of the reservoir. When the models, detachment, transport in the basin and the reservoir were applied in a dense network of reservoirs, 7 of the 14 reservoirs presented acceptable results, according to the calculated NS coefficient, and the others classified as unacceptable. It was also found that the semi-arid reservoirs have high sediment retention efficiency.

Keywords: Size grain. Foster model. Pentecost basin. semi-arid.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Localização da BEVC.....	33
Figura 2 - Elevação da bacia experimental.....	34
Figura 3 - Declividade da bacia experimental.....	34
Figura 4 - Mapa de solos da BEVC.....	35
Figura 5 - Açude Escola.....	35
Figura 6 - Equipamentos para monitoramento pluviométrico da BEVC.....	36
Figura 7 - Precipitação e evaporação média mensal na BEVC.....	37
Figura 8 - Vertedouro à montante do Açude Escola.....	38
Figura 9 - Parcelas Wishmeyer, P1 (a) e P2 (b), em ambos os períodos, seco e chuvoso.	39
Figura 10 - Tanques coletores de água e sedimento.....	40
Figura 11 - Tubos utilizados no método Tubo de Remoção pela Base.....	42
Figura 12 - Pontos de coleta de solo para análise granulométrica.....	44
Figura 13 - Padrão granulométrico dos sedimentos desde a bacia até o exutório, segundo Barfield <i>et al.</i> (1979).....	54
Figura 14 - Trajetórias de fluxo de sedimentos em um reservatório retangular idealizado de sedimentos (Haan <i>et al.</i> , 1994).....	55
Figura 15 - Ilustrativo das seções em que foi dividido o reservatório.....	60
Figura 16 - Ilustrativo à respeito da variação de área, volume e comprimento de água no Açude Escola.....	61
Figura 17 - Fluxograma de locais e respectivas medições da BEVC.....	62
Figura 18 - Precipitações para os anos de 2015, 2016 e 2017.....	65
Figura 19 - Precipitações, e suas respectivas intensidades, ocorridas em 2016.....	66
Figura 20 - Coeficientes de relação entre intensidades e precipitação.....	68
Figura 21 - Curvas granulométricas reais observadas dos sedimentos contidos nos escoamentos superficiais acontecidos na P1, curva granulométrica média da P1 e curvas obtidas através dos modelos propostos.....	84
Figura 22 - Coeficientes de correlação entre o modelado e o observado para os modelos avaliados.....	85
Figura 23 - Curvas granulométricas reais observadas dos sedimentos contidos nos escoamentos superficiais acontecidos na P2, curva granulométrica média da P2 e curvas obtidas através dos modelos propostos.....	87
Figura 24 - Coeficientes de correlação entre o modelado e o observado, na P2, para os	

modelos propostos.....	88
Figura 25 - Curva granulométrica média real observada nos sedimentos contidos nos escoamentos superficiais acontecidos na BEVC e curvas obtidas através dos modelos propostos.....	90
Figura 26 - Coeficientes de correlação entre o observado e o modelado.....	91
Figura 27 - Localização da bacia hidrográfica do Pentecoste.....	113
Figura 28 - Postos pluviométricos.....	114
Figura 29 - Precipitação média e evaporação da bacia do Pentecoste.....	114
Figura 30 - Mapa de solos da bacia do Pentecoste.....	115
Figura 31 - Mapa de vegetação da bacia do Pentecoste.....	116
Figura 32 - Sub-bacias monitoradas.....	117
Figura 33 - Pontos de coleta de solo na bacia do Pentecoste.....	121
Figura 34 - Dendograma com os grupos pertencentes a cada tipo de solo.....	122
Figura 35 - Disponibilização dos solos na bacia do Pentecoste e sub-bacias monitoradas..	122
Figura 36 - Padrão de coleta de solo no interior dos reservatórios.....	126
Figura 37 - Amostra indeformada de sedimento.....	127
Figura 38 - Curvas granulométricas do solo, <i>in natura</i> , no interior dos reservatórios monitorados na Bacia do Pentecoste.....	128
Figura 39 - Curvas granulométricas dos sedimentos desde a origem até o exutório, modelado, e padrão granulométrico real dos sedimentos no interior dos reservatórios.....	130
Figura 40 - Aspecto vegetacional da bacia do Pentecoste e sub-bacias estudadas.....	140
Figura 41 - Análise de sensibilidade do modelo.....	144

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Precipitação média na Bacia Experimental	36
Tabela 2 - Evaporação média na Estação de Pentecoste	37
Tabela 3 - Condições verificadas com suas respectivas características.	41
Tabela 4 - Fator de volume (FV) para cada uma das seções no Açude Escola.....	59
Tabela 5 - Descrição da instrumentação de monitoramento da BEVC	63
Tabela 6 - Intensidades das precipitações ocorridas em 2016.....	67
Tabela 7 - Vazões e CSS de eventos de escoamentos afluentes ao açude.....	69
Tabela 8 - Características de 6 eventos acontecidos em 2015.....	72
Tabela 9 - CN médio para cada condição escolhida.....	72
Tabela 10 - Padrão granulométrico dos sedimentos escoados nas parcelas em períodos distintos.....	75
Tabela 11 - Precipitação do dia (P), I30 e erosividade da chuva (EI ₃₀) para determinados eventos que tiveram amostragem de escoamento na parcela P1.	82
Tabela 12 - Valores de Coeficiente de Eficiência (E), ou Coeficiente de Nash e Sutcliffe, e Raíz do Erro Quadrático Médio (RMSE) gerais dos modelos avaliados.	86
Tabela 13 - Valores de Coeficiente de Eficiência (E), ou Coeficiente de Nash e Sutcliffe, e Raíz do Erro Quadrático Médio (RMSE) gerais dos modelos avaliados na P2. ...	89
Tabela 14 - Valores de Coeficiente de Eficiência (E), ou Coeficiente de Nash e Sutcliffe, e Raíz do Erro Quadrático Médio (RMSE) gerais dos modelos avaliados.	92
Tabela 15 - Padrão granulométrico de sedimentos contidos nas amostras escoadas à montante do açude no ano de 2015.	94
Tabela 16 - Comparação entre o PSE modelado, pelo proposto por Barfield <i>et al.</i> (1979) e observado.....	95
Tabela 17 - Fator de redução para cada classe de diâmetro entre a bacia e o padrão desprendido e transportado até o exutório.....	96
Tabela 18 - D ₅₀ do solo matriz, PSD e PSE.	97
Tabela 19 - Textura e taxa de enriquecimento para diferentes classes granulométricas	99
Tabela 20 - Coordenadas geográficas dos açudes monitorados	117
Tabela 21 - Característica textural do solo nos pontos coletados da bacia do Pentecoste.	119
Tabela 22 - Característica granulométrica do solo das 14 sub-bacias após a aplicação do fator de Área.	124
Tabela 23 - Granulometria real e modelada do solo no interior do reservatório, coeficiente	

RMSE e Nash e Sutcliffe (NS) para todos os reservatórios das sub-bacias estudadas.....	134
Tabela 24 - Valores reais e modelados para cada açude e respectivos valores de RMSE e NS após aplicado o \log_{10} nos diâmetros.....	136
Tabela 25 - Percentual de área verde das bacias de contribuição dos maiores açudes entre os analisados na pesquisa.	141
Tabela 26 - Densidade de drenagem das bacias de contribuição dos maiores açudes analisados na pesquisa.	142
Tabela 27 - Densidade de rios das bacias de contribuição dos maiores açudes analisados na pesquisa.....	143
Tabela 28 - D_{50} do solo dispersado e não dispersado.....	147

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	18
2	OBJETIVOS	20
3	REVISÃO DA LITERATURA.....	21
3.1	Erosão e dinâmica de sedimentos em bacias hidrográficas	21
3.2	Dinâmica e retenção de sedimentos em reservatórios	23
3.3	Granulometria de sedimentos.....	26
3.4	Modelagem da dinâmica de sedimentos	28
4	DINÂMICA DE SEDIMENTOS EM PEQUENA BACIA EXPERIMENTAL E RESERVATÓRIO NO BIOMA CAATINGA DO SEMIÁRIDO NORDESTINO	30
4.1	Introdução	30
4.2	Material e métodos	32
4.2.1	<i>Área experimental.....</i>	32
4.2.2	<i>Monitoramento hidrológico e sedimentológico na BEVC</i>	35
4.2.2.1	<i>Precipitação</i>	35
4.2.2.2	<i>Evaporação.....</i>	36
4.2.2.3	<i>Escoamento Superficial</i>	37
4.2.3	<i>Análise granulométrica do sedimento em suspensão.....</i>	41
4.2.4	<i>Análise física do solo da BEVC</i>	43
4.2.5	<i>Enriquecimento de Finos</i>	45
4.2.6	<i>Balanco hídrico diário do Açude Escola</i>	45
4.2.7	<i>Dinâmica de sedimentos na bacia - Modelos de previsão granulométrica do sedimento desprendido</i>	46
4.2.7.1	<i>Modelo de Frere et al. (1975)</i>	47
4.2.7.2	<i>Modelo de Young e Onstad (1976).....</i>	48

4.2.7.3	<i>Modelo de Young (1980)</i>	50
4.2.7.4	<i>Modelo de Foster et al. (1981)</i>	51
4.2.7.5	<i>Modelo de Foster et al. (1985)</i>	51
4.2.7.6	<i>Modelo de Carkovic et al. (2015)</i>	52
4.2.8	<i>Dinâmica de sedimentos na bacia - Modelos de previsão de sedimento transportado</i>	53
4.2.9	<i>Dinâmica de sedimentos no reservatório</i>	54
4.2.10	<i>Análise estatística</i>	61
4.3	Resultados e Discussão	64
4.3.1	<i>Síntese da precipitação e escoamento</i>	64
4.3.2	<i>Relação entre Vazão e Concentração de Sedimentos Suspensos (CSS)</i>	69
4.3.3	<i>Geração de série sintética de vazões afluentes ao açude Escola</i>	71
4.3.4	<i>Análise granulométrica de sedimentos na BEVC</i>	73
4.3.5	<i>Variação temporal da granulometria</i>	79
4.3.6	<i>Análise da aplicação de modelos de desprendimento de solo</i>	83
4.3.7	<i>Análise da aplicação de modelo de transporte de sedimento desprendido até o exutório</i>	94
4.3.8	<i>Taxa de enriquecimento (TE)</i>	98
4.3.9	<i>Modelagem da dinâmica de sedimento em reservatório</i>	102
5	ANÁLISE DA EFICIÊNCIA DE APLICAÇÃO DA MODELAGEM DE DINÂMICA DE SEDIMENTOS EM Densa REDE DE RESERVATÓRIOS NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO	111
5.1	Introdução	111
5.2	Material e Métodos	112
5.2.1	<i>Caracterização da bacia hidrográfica do Pentecoste</i>	112
5.2.2	<i>Caracterização granulométrica dos sedimentos na bacia hidrográfica do açude Pentecoste</i>	118

5.2.3	<i>Granulometria do sedimento desprendido</i>	125
5.2.4	<i>Granulometria do sedimento depositado nos reservatórios</i>	125
5.2.5	<i>Análise estatística</i>	127
5.3	Resultados e Discussão	127
6	RECOMENDAÇÕES	151
7	CONCLUSÕES	151
	REFERÊNCIAS	153

1 INTRODUÇÃO

Segundo Carvalho (2008), o termo sedimento se refere a uma partícula depositada ou em movimento, derivada da fragmentação das rochas, por processo físico ou químico, e que é transportada pela água ou pelo vento do lugar de origem aos rios e aos locais de deposição; é o material sólido em suspensão ou depositado no leito - sedimentos de fundo. O uso inadequado do solo, o desmatamento, a urbanização, a atividade agropecuária e a alteração dos cursos dos rios, segundo Brito *et al.*, (2009), são ações antrópicas que aceleram os processos sedimentológicos que ocorrem na natureza.

A mobilidade dos sedimentos em bacias hidrográficas é um processo complexo que depende de desde características de chuva e escoamento superficial até fatores relacionados a aspectos geomorfológicos da bacia, entre eles textura de solo, litologia, topografia, drenagem, cobertura vegetal e granulometria do sedimento, este último apontado como sendo um dos ou principal fator a afetar a dinâmica de sedimentos em bacias. A interferência desses fatores na mobilidade do sedimentos indicará se o mesmo será depositado ou transportado pela bacia até o exutório.

Nos recursos hídricos, tanto nos rios quanto nos reservatórios, fica mais evidente a dinâmica dessas partículas, onde parte é depositada ao longo do curso d'água e outra parte é transportada. As principais consequências da deposição desse material são o assoreamento de mananciais e a mudança nos padrões de qualidade da água. O aporte de sedimentos a reservatórios superficiais decorrente da erosão dos solos na bacia hidrográfica contribuinte tem impactos significativos na disponibilidade hídrica no Nordeste do Brasil, onde aproximadamente 90% da água utilizada para abastecimento humano são armazenados nessas estruturas (ARAÚJO *et al.*, 2004).

A deposição de sedimentos em tais reservatórios provoca, além de outras consequências, a redução de sua capacidade de armazenamento. Segundo Araújo *et al.* (2003), isso corresponde a 2% por década no estado do Ceará. Na atualidade, um grande número de reservatórios brasileiros se encontra parcialmente assoreados, principalmente os de pequeno e médio porte.

Especialistas recomendam que o processo de assoreamento faça parte do projeto de construção e manutenção de barragens e reservatórios, pois estes, independente de sua finalidade, destinação, tamanho e características estão fadados a terem sua capacidade de armazenamento parcial ou totalmente tomados pelos sedimentos (CABRAL, 2006). Dada a

quase inevitabilidade do assoreamento, embora em alguns casos é possível que haja algum controle, estudos vêm se desenvolvendo nas últimas décadas objetivando a preservação e manutenção da vida útil do reservatório.

O sedimento que atinge os reservatórios é fruto de dois processos: desprendimento destes da matriz do solo e transporte através da bacia. Assim sendo, o assoreamento de reservatórios é diretamente afetado pelos processos regentes à erosão do solo pertencente à bacia de contribuição. Se o entendimento do assoreamento em reservatórios, principalmente em ambiente semiárido, é de vital importância, devido à importância estratégica dos reservatórios no combate à escassez hídrica, quaisquer práticas e planejamentos de manejo dos recursos hídricos, devem atentar para os processos erosivos acontecidos na bacia de captação, principalmente no que diz respeito às suas causas e aos fatores que afetam direta ou indiretamente esse processo.

Afim de se entender com mais profundidade sobre erosão em bacias, modelos vêm sendo propostos afim de se tentar compreender sobre a dinâmica dos processos erosivos que mobilizam o sedimento pela bacia e reservatórios, são ferramentas que, se devidamente aplicados e calibrados, surgem como uma forte alternativa não só de entendimento dos processos, como também em simulações em diversos contextos, geomorfológicos ou climáticos, por exemplo.

O ambiente semiárido tem suas particularidades, ou seja, há fenômenos e processos hidrossedimentológicos característicos desse ambiente, principalmente no quesito variabilidade de precipitações, por isso há a necessidade de estudos que objetivem compreender a natureza dos processos erosivos ali presentes. Estudos referentes à retenção de sedimentos em reservatórios em regiões semiáridas, por exemplo, ainda são escassos e, dada a importância da compreensão do processo, a modelagem passa a ser uma ferramenta fundamental no planejamento do reservatório. Os avanços em quantidade e qualidade dos modelos são expressivos, no entanto a representação fiel dos processos físicos é tarefa difícil e que demora tempo, haja vista que a forma de representação do processo no sistema varia com o clima, o tempo de detenção do fluxo e a granulometria do sedimento.

2 OBJETIVOS

Objetivo Geral

Este estudo tem como objetivo geral propor uma metodologia de previsão da dinâmica de sedimentos em bacias hidrográficas do semiárido brasileiro desde o desprendimento de solo das encostas da bacia até a deposição em reservatórios. A técnica foi desenvolvida e testada para uma bacia experimental e aplicada para uma amostra de sub-bacias da Bacia Hidrográfica do Pentecoste, localizada no Estado do Ceará.

Objetivos Específicos

- Avaliar a eficiência de modelos de desprendimento e transporte de sedimentos em pequena bacia experimental locada na região semiárida do bioma Caatinga brasileiro;
- Estimar o potencial de retenção de sedimentos em pequeno reservatório;
- Elaborar um modelo simplificado de dinâmica de sedimentos em pequeno reservatório do semiárido brasileiro e avaliar sua eficiência em uma densa rede de reservatórios.

3 REVISÃO DA LITERATURA

3.1 Erosão e dinâmica de sedimentos em bacias hidrográficas

Dentre os grandes problemas ambientais do planeta, a deterioração dos solos está entre eles, causado, principalmente, pela erosão hídrica. Bertoni e Lombardi Neto (2010) especificam como erosão o processo de retirada e transporte de partículas de solo pelos agentes erosivos: água e/ou vento. A erosão é causada pela tensão provocada pelo impacto das gotas de chuva e/ou pelo escoamento sobre o solo. Uma vez desprendidas da massa de solo, as partículas são carregadas predominantemente pelo escoamento superficial ao longo da vertente, quer seja em suspensão ou por arraste, havendo também uma pequena parcela transportada pelo próprio impacto da chuva.

Características da precipitação, topografia, vegetação e condutividade hidráulica saturada (K_{sat}) são atributos de suma importância, além de outros, para o entendimento do escoamento superficial, responsável direto pela erosão do solo em bacias hidrográficas. Tipos de solos diferentes terão provavelmente erosões distintas visto que as propriedades físicas, principalmente a textura, permeabilidade, densidade do solo e a porosidade, exercem diferentes influências na resistência do solo à erosão (SILVA *et al.*, 2007).

A quantificação das perdas de solo é de fundamental importância na adoção de práticas que visem minimizar a degradação do solo, uma vez que o uso e a ocupação do solo, juntamente com as características topográficas e climáticas irão determinar o balanço sedimentar da bacia hidrográfica (MARTINS *et al.*, 2003).

A compreensão do processo de erosão e transporte de sedimentos é complexa, pois envolve vários fatores de ordem física, meteorológica e antrópica/cultural. Os fatores exercem influência, de forma e magnitude variável, conforme o local de ocorrência.

O processo de dinâmica de sedimentos em bacias compreende desde o desprendimento de partículas do solo matriz, transporte pelo escoamento superficial através das encostas e rede de drenagem, até a deposição das mesmas, mais comumente no exutório. Esses processos dependem de fatores como características da precipitação (tamanho da gota, quantidade e intensidade), propriedades do solo (estabilidade de agregados, densidade, umidade, etc) e condições da superfície (declividade, cobertura vegetal, topografia, etc) (ISSA *et al.*, 2006).

Pesquisas à respeito da dinâmica e erosão do solo focaram principalmente em quantificar o material erodido em um determinado intervalo de tempo. Segundo Lima Neto *et*

al. (2011), muitas pesquisas formularam equações empíricas relacionadas a quantidade de sedimento numa bacia, combinada ou não com outros fatores como forma da bacia, topografia, escoamento, litologia e cobertura vegetal (WALLING, 1983; CHURCH e SLAYMAKER, 1989; VERSTRAETEN *et al.*, 2003; de VENTE *et al.*, 2005; MINEAR e KONDOLF, 2009). Outros apresentaram modelos hidrossedimentológicos distribuídos ou semi-distribuídos como WEPP (FLANAGAN *et al.*, 1995; RAMSANKARAM *et al.*, 2009), EUROSEM (MORGAN *et al.*, 1998; MATI *et al.*, 2006), SWAT (CHEN e MACKAY, 2004; ROSTAMIAN *et al.*, 2008), HIDROSED (de ARAÚJO e KNIGHT, 2005; de ARAÚJO, 2007), WATEM/SEDEM (VERSTRAETEN *et al.*, 2007; de VENTE *et al.*, 2008) e SEDNET (PROSSER *et al.*, 2001; WILKINSON *et al.*, 2009), para medição de erosão de solo e produção de sedimento em bacias hidrográficas.

Porém, estudos tem dirigido atenção às propriedades qualitativas do material erodido, incluindo estabilidade de agregado, mineralogia, matéria orgânica, densidade, forma da partícula e, principalmente, granulometria do sedimento. Tal atenção reside no fato de que, distribuição granulométrica e densidade do sedimento são fatores que determinam se os mesmos serão transportados ou depositados numa determinada condição de fluxo superficial (Di STEFANO e FERRO, 2002).

Segundo Walling (1983), é fato que apenas uma fração do sedimento erodido junto ao escoamento superficial chega ao exutório e é computado na equação de produção ou quantidade de sedimento. O comportamento de uma bacia hidrográfica em relação ao sedimento é muito variável, desde as partes altas até as planícies.

O termo SDR (Sediment Delivery Ratio) ou taxa de transporte de sedimento é o mais utilizado para representar a resultante dos processos envolventes desde o processo de destacamento de partículas do solo matriz até sua deposição no exutório. A magnitude do SDR é influenciada por um range de fatores geomorfológicos e ambientais, destaca-se natureza e localização da fonte de sedimento, relevo, e características de declividade, padrão de drenagem e condições do canal, cobertura vegetal, uso da terra e textura do solo (WALLING, 1983). O pesquisador ressalta que a variabilidade e magnitude dos processos envolventes no SDR fazem com que sua previsão seja falha ou pouco eficaz, afirmando que novas pesquisas sejam feitas visando o melhor entendimento dos processos envolventes e, conseqüentemente, melhor aprimoramento dos modelos existentes.

Textura, granulometria e quantidade de agregados do solo matriz influenciarão na quantidade de partículas desagregadas do solo e passíveis de serem erodidas. Alguns pesquisadores (SWANSON *et al.*, 1965; ALBERTS *et al.*, 1980; POESEN e SAVAT, 1980;

PARSONS *et al.*, 1991; SUTHERLE *et al.*, 1996) encontraram uma seletividade de granulometria nas partículas do solo erodido quando comparada ao solo matriz, ou seja, algumas partículas foram mais erodíveis e outras menos, segundo os pesquisadores, influenciado, em grande parte, pelos fatores mencionados acima.

O transporte e/ou deposição do material erodido pelos cursos d'águas ocorrem de maneira complexa e sua eficiência está também relacionada a atributos granulométricos, além de velocidade da corrente, vazão, tempo de residência e seção transversal do canal (GLYMPH, 1973; SUGUIO, 1973).

Caso as condições de transporte sejam favoráveis, os sedimentos são carreados a jusante, caso contrário ocorre deposição. Inicialmente são depositadas as partículas maiores, enquanto que as partículas finas apresentam maior possibilidade de atingir a rede de drenagem. Esse processo de seleção do tamanho das partículas a serem transportadas é denominado “enriquecimento de finos” (MEDEIROS, 2009).

O termo Taxa de Enriquecimento (*Enrichment Ratio*) pode ser denominado pela relação entre a quantidade, em %, de uma determinada classe granulométrica no material escoado e o material de origem, solo matriz.

Enriquecimento do sedimento erodido é frequentemente expresso em forma numérica como uma relação entre a quantidade do material de interesse no sedimento e a quantidade desse mesmo material no solo matriz. Frequentemente é observado que o solo erodido tem aspecto granulométrico mais fino do que o solo matriz. Isto é indicado por valores de Taxa de Enriquecimento (TE) maiores que 1, ao contrário do que ocorre, na maioria das vezes, com os materiais mais grosseiros, o qual tem TE menores que 1.

3.2 Dinâmica e retenção de sedimentos em reservatórios

Segundo Melboucy e Bouhadeh (2012), há dois fatores que são considerados quando se trata de sedimentos em reservatórios: quantidade de sedimentos depositados e eficiência de retenção. Ambos os métodos consideram apenas a deposição de sedimentos, porém um projeto de barragem deve ser otimizado considerando a distribuição dos mesmos, a fim de minimizar o efeito do assoreamento em sua vida útil.

A construção de uma barragem para formação de reservatórios, independente para qual finalidade, seja geração de energia elétrica, abastecimento de água, irrigação, faz com que a velocidade do fluxo que adentra o reservatório por ela formado seja drasticamente reduzida, devido ao aumento da seção transversal corrente. Isto provoca queda acentuada, ou

mesmo eliminação, da turbulência do fluxo, reduzindo a capacidade do transporte de sedimentos no rio, provocando a sedimentação da carga em suspensão e de arrasto ocasionando o processo de assoreamento. Uma parte dos sedimentos transportados pelo rio é retido no reservatório. Sedimentos mais grosseiros, com diâmetros maiores que 2 mm, são depositados na zona do estuário. Frações de sedimentos menores com diâmetros abaixo de 2 mm podem ser transportados através do reservatório e são depositados na parte central ou próximo à barragem (GLOWSKI e KARSPEREK, 2017)

Os sedimentos no interior dos reservatórios podem ser depositados em todas as direções e elevações, serem carregados junto com o fluxo ou ainda não se depositarem e saírem do reservatório numa possível vazão efluente. Morris & Fan (1998), destacam que a aplicação de um método empírico é mais rápida e menos complexa que a modelagem matemática, além de que necessita de menor quantidade de dados de entrada (CORTEZ, 2013).

De acordo com Dendy (1968), o tamanho e a forma de reservatório, as relações entre a capacidade e o tamanho da bacia hidrográfica e deflúvio afluente, a topografia da bacia, cobertura vegetal e uso da terra, declividade e densidade da rede de canais, assim como as características físicas e químicas do sedimento afluente, têm influência importante na taxa de sedimentação do reservatório (VENÂNCIO, 2009).

A previsão do padrão de deposição de sedimentos ajuda a prevenir ou diminuir alguns problemas, como a elevação da cota de fundo, possibilidades de inundação e entrada de sedimentos na entrada. Características do fluxo afluente, capacidade de transporte de sedimentos, carga suspensa ou carga de leito e geometria do reservatório, são os fatores que afetam distribuição de sedimentos em reservatórios (RAHMANIAN e BANIHASHEMI, 2012)

À medida que os sedimentos se depositam no fundo do reservatório, passam a ocupar um volume antes ocupado por água, conseqüentemente, reduzindo o volume hídrico do mesmo. Segundo Carvalho (1994), o fenômeno de deposição de sedimentos no reservatório, em escala temporal, influi negativamente na vida útil dessa estrutura hidráulica. Atribui-se a isso, segundo o pesquisador, fatores de contribuição como descarga sólida afluente, característica do sedimento, distribuição espacial e eficiência do reservatório em reter esses sedimentos.

Há uma variedade de problemas conseqüentes do assoreamento, destacam-se a perda de capacidade de armazenamento e, conseqüentemente, redução da vida útil do reservatório, aumento dos riscos de inundações, interrupção das turbinas em hidroelétricas, diminuição da

qualidade de água, aumento da complexidade da operação do reservatório e, conseqüentemente, aumento dos custos de operação do mesmo.

A deposição e a distribuição dos sedimentos dentro de um reservatório dependem de vários fatores como, declividade de escoamento, a geometria do reservatório, o modo como este é operado, as características minerais das partículas finas e a característica química das águas (CORTEZ, 2013).

Além de todos os problemas causados aos cursos de água, como o assoreamento e a contaminação, de acordo com Beasley (1972), em reservatórios de água de usinas hidrelétricas, uma parte de seu volume é destinada ao acúmulo de sedimentos, porém, na maioria dos reservatórios, a taxa de sedimentação é tão elevada que o reservatório chega a perder 5% de sua capacidade de armazenamento de água por ano, constituindo um grande problema para a geração de energia elétrica.

Há muitas barragens existentes no país para diferentes fins, tais como energia hidrelétrica e de abastecimento de água e outras para fins agrícolas e de irrigação. No entanto, o assoreamento desses reservatórios não é monitorado ao longo dos anos. Num futuro próximo, muitas outras barragens serão construídas e haverá necessidade de controlar o assoreamento ao longo do tempo. Se tal processo é o destino final de todos os reservatórios, há, portanto, necessidade de compreender melhor este processo e definir medidas que possa atenuá-lo (EZUGWU, 2013).

Segundo Borji (2013), reservatórios devem ser considerados como recursos insubstituíveis e têm de ser geridos e utilizados de forma sustentável. O objetivo fundamental dos estudos de assoreamento dos reservatórios deve se concentrar em alcançar a sustentabilidade do mesmo. A sustentabilidade dos reservatórios requer um equilíbrio a ser mantido entre o volume de sedimento depositado e o volume de sedimento removido. Na maioria dos casos, é difícil conseguir um equilíbrio completo, pois o processo é influenciado por vários fatores (MORRIS e FAN, 1998). Contudo, é possível otimizar os planos e através de diferentes estratégias de gestão de assoreamento (PALMIERI *et al.*, 2003).

A eficiência de retenção (ER) de sedimentos é o parâmetro mais importante para descrever o processo de assoreamento em reservatórios. Trata-se da porção dos sedimentos, dos que chegam por escoamento superficial, que são retidos ou depositados, expressa, na maioria dos casos, em porcentagem. Traduz informações importantes como tipo de sedimento que chega ao reservatório como também pode gerar uma estimativa da vida útil dos mesmos, estes de vital importância tanto para produção agrícola como para o suprimento hídrico de

peças e animais em ambientes de pouca disponibilidade de água para estes fins, como é o caso do sertão nordestino brasileiro.

O valor da eficiência de retenção de sedimentos num reservatório pode ser obtido a partir de medições sistemáticas das descargas sólidas afluente e a jusante da barragem. No caso de estudos anteriores à construção da barragem utilizam-se curvas obtidas a partir de levantamentos de reservatórios existentes. (CARVALHO *et al.*, 2000b).

Segundo Lewis *et al.* (2013), ao avaliar a eficácia dos dois métodos dos mais utilizados, verificou que os mesmos superestimam, em cerca de 26%, o valor de ER quando utilizados, muito provavelmente pelo fato de terem sido elaborados em regiões que, normalmente, tem fluxo de água no reservatório distribuídos durante todo o ano. Segundo o pesquisador, há algumas razões para a discrepância nos valores, entre eles variabilidade de vazão afluente, tamanho das partículas e diferenças na estratificação da barragem.

Atualmente, poucas pesquisas, principalmente no ambiente semiárido, tem sido realizadas na tentativa de propor um modelo que estime de forma mais eficaz possível o valor da ER de sedimentos em reservatórios localizados em ambientes de condições climática e hidrossedimentológica características da região semiárida do bioma Caatinga. Tal estudo tem uma importância peculiar para a região pois ter-se-á, através dele, uma estimativa, principalmente, da vida útil do reservatório, servindo de respaldo às discussões sobre a gestão e sustentabilidade dos mesmos como também ao planejamento e manejo adequado na bacia hidrográfica na qual está inserido.

3.3 Granulometria de sedimentos

As partículas de sedimento apresentam dimensões com variabilidade muito elevada. Na natureza, encontram-se depósitos sedimentares constituídos por elementos com decímetros a metros de diâmetro, até sedimentos compostos por partículas extremamente pequenas, da ordem de alguns micra. Essa heterogeneidade de dimensão de partículas também é observada nas que constituem os depósitos em reservatórios.

A análise granulométrica consiste na determinação das dimensões das partículas que constituem as amostras, presumivelmente representativas dos sedimentos, e no tratamento estatístico dessa informação. Basicamente, o que é necessário fazer, é determinar as dimensões das partículas individuais e estudar a sua distribuição, quer pelo peso de cada classe dimensional considerada, quer pelo seu volume, quer ainda pelo número de partículas integradas em cada classe (DIAS, 2004).

O tamanho dos grãos é um dos parâmetros mais importantes para descrever o comportamento do sedimento em água; quando as partículas de sedimento são grandes e a velocidade de fluxo é baixa, ocorrendo deposição das mesmas. Características granulométricas do sedimento depositado podem ser descritas por uma curva de distribuição de granulométrica, que representa o peso seco da amostra acumulada em cada faixa de tamanho (MAMEDE, 2008).

O tamanho da partícula pode refletir ligações importantes entre a deposição e a saída de sedimentos em suspensão, e deve ser visto como uma característica fundamental da dinâmica dos sedimentos dentro do reservatório.

Uma outra relação facilmente perceptível ocorre entre o diâmetro dos grãos e sua mobilidade. Areias finas tendem a ter maior mobilidade, enquanto o oposto ocorre com areias grossas. Além disso, a correta determinação da distribuição granulométrica tem uma grande importância na elaboração de modelos de transporte de sedimentos.

Os sedimentos em suspensão compreendem as partículas de tamanho reduzido (silte e argila), as quais, por serem pequenas, se conservam em suspensão pelo fluxo turbulento. A carga em suspensão pode representar mais de 90% do material total transportado. As partículas de tamanho maior, como as areias e os cascalhos, tendem a se depositar, porém podem ser roladas ou deslizadas (VESTENA *et al.*, 2007), o que poderia provocar o seu deslocamento junto com o fluxo. De acordo com Rodrigues (2011), isso decorre do fato que o transporte das partículas depende não só da velocidade do escoamento, mas também da granulometria do material, da declividade do leito, da força de atrito entre as partículas e da profundidade do curso de água. Além disso, segundo Carvalho (2008), em períodos chuvosos e cheia dos cursos de água, as forças que atuam sobre as partículas de granulometria maior proporcionam transporte das mesmas.

De acordo com Mamede (2008), a granulometria influencia diretamente a velocidade de queda ou velocidade de sedimentação o qual é o fator determinante do comportamento dos sedimentos em um fluido. Uma partícula de sedimento só pode ser transportada se a sua velocidade de queda for menor do que a velocidade do fluxo. Velocidade de queda é também um fator que determina o padrão de distribuição de sedimentos ao longo do reservatório (MORRIS e FAN, 1997).

Apesar dos múltiplos trabalhos que, desde há mais de um século, têm sido efetuados com a finalidade de determinar as relações existentes entre a velocidade terminal e o diâmetro das partículas, bem como de compreender as relações existentes entre os muitos parâmetros físicos envolvidos na queda das partículas no seio de um fluido, não se conseguiu ainda obter,

por via teórica, uma lei de queda geral que fosse inteiramente comprovada na prática, na gama de dimensões das partículas sedimentares, isto é, desde décimos de micra até centímetros.

3.4 Modelagem da dinâmica de sedimentos

Compreender os processos que ocorrem em bacias é fundamental para o adequado manejo dos recursos naturais nela existentes. Nesse sentido, a modelagem dos processos hidrossedimentológicos constitui ferramenta importante para o entendimento destes. Um modelo pode ser considerado como uma representação simplificada da realidade, auxiliando no entendimento dos processos que envolvem esta realidade. Os modelos estão sendo cada vez mais utilizados em estudos ambientais, pois ajudam a entender o impacto das mudanças no uso do solo e prever alterações futuras nos ecossistemas (RENNÓ e SOARES, 2000).

Os modelos são ferramentas utilizadas para representar processos e elaborar prognósticos para gestão dos sistemas. Os modelos não são objetivos em si só, mas sim ferramentas que permitem analisar cenários, estudos de alternativas, prever a ocorrência de fenômenos, entre outros.

Modelos, se corretamente validados, constituem ferramentas poderosas para avaliar determinado processo. Em reservatórios, podem avaliar a eficácia de intervenções de engenharia e produzir uma redução de custo significativa no gerenciamento do assoreamento, da quantidade e qualidade de água de reservatórios, auxiliando na escolha e adoção de medidas preventivas e corretivas para mitigação destes problemas, e, conseqüentemente, levar ao prolongamento da vida útil dos mesmos (MIREA *et al.*, 2005).

Como dito anteriormente, não basta apenas quantificar o material erodido, mas também qualificá-lo de acordo com determinados fatores pré-estabelecidos, como padrão granulométrico dos sedimentos erodidos, por exemplo. Alguns estudos foram feitos visando estimar esse padrão (FRERE *et al.*, 1975; YOUNG e ONSTAD, 1975, YOUNG, 1980; FOSTER *et al.*, 1981, 1985) os quais utilizam atributos de solo da bacia, conteúdo de argila, silte, areia e matéria orgânica, como dados de entrada.

Em reservatórios, diferentes modelos numéricos empíricos e semi-empíricos foram desenvolvidos visando prever tanto a deposição de sedimentos bem como o padrão de distribuição destes no reservatório (CRISTOFANO, 1953; BORLE e MILLER, 1958; LARA, 1962; PEMBERTON, 1978, ANNANDALE, 1984; ANNANDALE e ROOSEBOOM, 1983), produzidos à partir de observações e dados de campo de diversos reservatórios ao redor do mundo. De todos os métodos atualmente disponíveis, os métodos de redução de área e de

incremento de área são considerados como os principais na previsão da distribuição granulométrica de sedimentos (HOSSEINJANZADEH *et al.*, 2015). Utilizam como dados de entrada fatores relacionados ao reservatório, como geometria, área, comprimento e volume.

Os métodos mais simples utilizados para determinar a distribuição de sedimentos no fundo dos reservatórios são baseados na suposição de que todo o sedimento se acumula na zona próxima à parade da barragem. Esta suposição é inconsistente com o que é entendido atualmente no processo, que é caracterizado por considerável irregularidade na distribuição de sedimentos ao longo do fundo do reservatório. A distribuição de sedimentos durante um longo período de operação requer cálculos em períodos consecutivos de fluxos característicos de água e carga sólida, no que diz respeito às condições de operação do reservatório (MICHALEC, 2014)

Para que um modelo matemático produza respostas satisfatórias é preciso que os parâmetros que alimentam o modelo e que descrevem o sistema modelado sejam obtidos apropriadamente. Estabelecer parâmetros confiáveis é uma tarefa complexa, pois eles dependem de coleta de dados, de ensaios de laboratório e de medições de campo, que podem ser fontes de imprecisões e incertezas. Além disso, os parâmetros determinados num determinado momento podem não ser representativos do processo de retenção que ocorre num período de tempo longo. Portanto, dada a variabilidade, a aleatoriedade e as incertezas dos parâmetros, a retenção de sedimentos em reservatórios deve ser tratado como um processo estocástico.

4 DINÂMICA DE SEDIMENTOS EM PEQUENA BACIA EXPERIMENTAL E RESERVATÓRIO NO BIOMA CAATINGA DO SEMIÁRIDO NORDESTINO

4.1 Introdução

Há uma gama de fatores que influenciam na dinâmica hidrossedimentológica em bacias hidrográficas tais como aspectos físicos do solo (estrutura, textura, permeabilidade), aspectos vegetacionais e características geomorfológicas da bacia. Estes fatores são imprescindíveis para se buscar entender os mecanismos que regem o processo e auxilia na tomada de decisões no que diz respeito ao manejo sustentável das bacias hidrográficas, bem como dos reservatórios.

Para esse manejo sustentável dos recursos naturais, mais precisamente solo e água, quantificar o fluxo de água e sedimentos numa determinada escala é necessário. Isso requer habilidade em observar respostas hidrossedimentológicas em diferentes sistemas e condições naturais, e com isso auxiliar na tomada de decisões (BRONSTERT *et al.* 2014).

Dinâmica de sedimentos induzida pelo escoamento superficial é um importante fator à considerar no manejo de bacias hidrográficas. Intensificação da erosão e transporte de sedimentos podem acarretar grandes problemas do ponto de vista ambiental, não apenas pela perda de solo e nutrientes mas também pela redução de água disponível devido ao assoreamento de reservatórios e degradação da qualidade de água (ARAÚJO *et al.*, 2003, MEDEIROS *et al.*, 2014), havendo assim uma urgente necessidade de se desenvolver métodos de controle de erosão e produção de sedimentos (FOSTER *et al.*, 1981).

Visando quantificar os sedimentos erodidos em uma área num determinado período de tempo e sob diversas condições, diversos modelos, de base física ou empírica, foram criados no passar dos anos. Além da erosão, são capazes de calcular capacidade de transporte e fazer simulações de distintas situações para anos ou até décadas. Muitos necessitam de um grande número de atributos da área de estudo, o que torna difícil a utilização quando determinados fatores são escassos ou difíceis de mensurar.

Além de quantificar o total de material erodido, elaborar modelos de previsão e analisar o fluxo de sedimentos em suspensão da bacia como um todo, as pesquisas tem dirigido atenção às propriedades dos materiais erodidos, características químicas e granulométricas principalmente, como também em relacionar tais propriedades com o material de origem (SLATTERY & BURT, 1997). Segundo Walling e Moorehead (1989), as

características granulométricas do sedimento suspenso são de fundamental importância para entender sua função dentro dos processos inerentes em bacias hidrográficas.

A qualidade das águas também são afetadas pelo transporte de sedimentos da bacia até o exutório, isso porque, alguns poluentes químicos, incluindo herbicidas, pesticidas e contaminantes radioativos estão associados com o sedimento (FOSTER *et al.*, 1985). Contaminantes adsorvidos no solo são transportados, principalmente, junto com as partículas finas do mesmo, sendo assim, concentração de contaminantes no sedimento transportado muda proporcionalmente com a mudança de concentração de finos no fluxo.

No reservatório, fica mais evidente a relação entre o diâmetro dos grãos e sua mobilidade. Do ponto de vista físico, o tamanho da partícula de sedimento exerce um fundamental controle em sua velocidade de queda, fator determinante na retenção ou não de determinada partícula. Nesse sentido, há uma tendência de deposição de frações de sedimento mais grosseiras e transporte de frações mais finas. Sendo assim, a eficiência de retenção de sedimentos e, conseqüentemente, taxa de assoreamento, estão diretamente ligadas ao padrão granulométrico dos sedimentos desprendidos e transportados da bacia e afluentes ao reservatório.

O primeiros estudos visando quantificar a relação entre a granulometria do solo matriz e o sedimento erodido foram feitos por Frere *et al.* (1975). Eles desenvolveram o modelo ACTMO (Agricultural Chemical Transport Model) o qual descreve o movimento de elementos químicos e incluem a relação entre os padrões de solo (matriz e erodido) em escala laboratorial com classes texturais de solo variando entre silte e argila. Young e Onstad (1976) elaboraram um modelo inserindo atributos como conteúdo de matéria orgânica e porcentagem de argila no solo matriz, para prever a porcentagem de argila, silte e areia no solo erodido, usando experimento laboratorial de pequena escala, parcela experimental com chuvas naturais e parcela experimental com chuvas simuladas com comprimento variando entre 0,45 e 46 m. Young (1980) propôs um modelo de previsão para cada classe de solo erodido baseado no padrão granulométrico primário, matriz, para três diferentes tipos de solo. O modelo CREAMS (Chemical, Runoff, e Erosion from Agricultural Management Systems) foi desenvolvido pelo USDA (U.S. Department of Agriculture) (Foster *et al.*, 1981, 1985). É capaz de simular erosão de solo e nutrientes em diversas escalas de bacias. Pode prever a porcentagem de areia, silte e argila, pequenos e grandes agregados do solo desprendido à partir apenas da distribuição das partículas constituintes do solo.

Segundo Morris e Fan (1998), deposição de sedimentos é principal problema que afeta a vida útil dos reservatórios. O conhecimento, tanto da quantidade como do padrão de

deposição de sedimentos, se torna importante tanto para estimar possíveis danos futuros como também para traçar estratégias ou medidas mitigadoras no gerenciamento do mesmo.

O objetivo desse capítulo foi avaliar a dinâmica de sedimentos em pequena bacia experimental do semiárido cearense, desde as encostas até sua deposição no reservatório localizado no exutório. Como objetivos específicos, propõe-se avaliar a acurácia de modelos de previsão granulométrica do sedimento desprendido e transportado, em diferentes tipos de cobertura vegetal, como também na bacia em geral, e elaborar uma metodologia para estimativa do padrão de distribuição de sedimentos em pequeno reservatório.

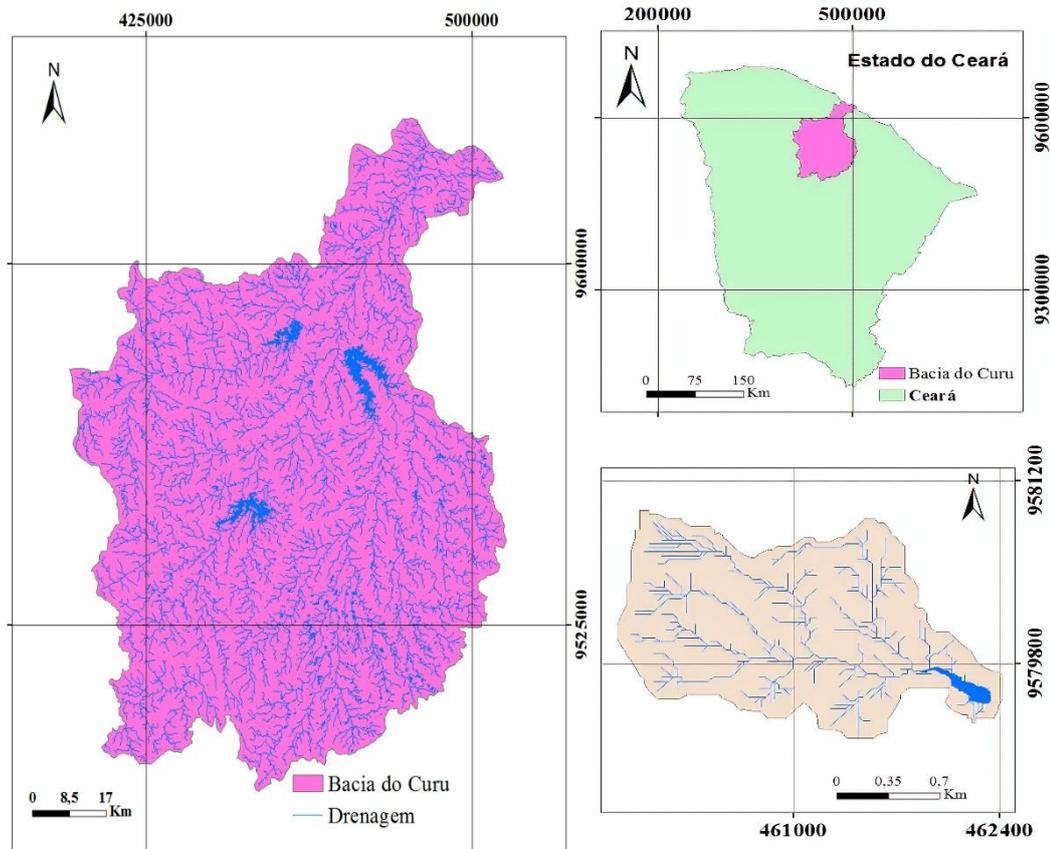
4.2 Material e métodos

4.2.1 Área experimental

O estudo da dinâmica de sedimentos foi realizado na Bacia Experimental do Vale do Curú (BEVC), Figura 1, na zona rural do município de Pentecoste, pertencente a Universidade Federal do Ceara. No Exutório da referida bacia, encontra-se o açude Escola o qual apresenta uma bacia hidráulica de cerca de 2,4 ha e capacidade de armazenamento de aproximadamente 51.600 m³. O Açude está situado nas coordenadas 3°48'12" S e 39°20'24" O. Segundo dados locais, o reservatório teve a construção concluída no ano de 1952, para fins de abastecimento humano e irrigação.

A BEVC compreende uma área de 284,5 ha, dividida em subunidades (Figura 1) de forma que se possa melhor monitorá-las. A subunidade Fazenda Fontineli com área de 156,3 ha possui um pequeno reservatório em seu exutório controlando aproximadamente 55% da BEVC; a área de escoamento direto da BEVC está a jusante da Fazenda Fontinele, e a montante do Açude Escola, perfazendo uma área de 100 ha.

Figura 1 - Localização da BEVC.



O município de Pentecoste está localizado geograficamente na Microrregião do Médio Curú, no Estado do Ceará, com coordenadas de $6^{\circ}47'34''$ de latitude sul e a $39^{\circ}16'13''$ de longitude oeste do Meridiano de Grandenwich, a uma altitude média de 60 metros (Brasil, 1973), à 100 Km da capital Fortaleza e o acesso se dá, primeiramente, pela BR-222 e posteriormente, pela CE-235.

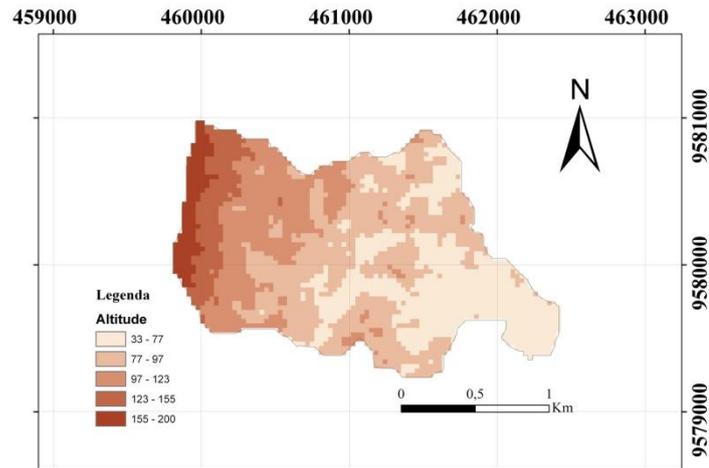
A classificação climática da região segundo Köppen é do tipo Aw' : tropical semi-árido sendo influenciada por duas estações no ano, chuvosa no verão-outono e seca no inverno e primavera. As temperaturas médias anuais variam de 22°C a 28°C . Apresenta, em média, umidade relativa do ar em torno de 74% ao longo do ano e evaporação de 1552,4 mm. A precipitação média anual é de 806 mm e com alta variabilidade espacial e temporal (PONCE, 1995).

Segundo o Atlas de Geologia e Recursos Hídricos (CPRM, 2003), a bacia experimental está inserida em rochas do embasamento cristalino e aluviões, representativos de duas unidades litológicas, referentes aos Períodos Pré-Cambriano e Quaternário.

Na bacia, a elevação varia de 33 a 200 metros acima do nível do mar, sendo as maiores altitudes verificadas nos planaltos situados nas bordas a oeste da bacia. Nessas áreas,

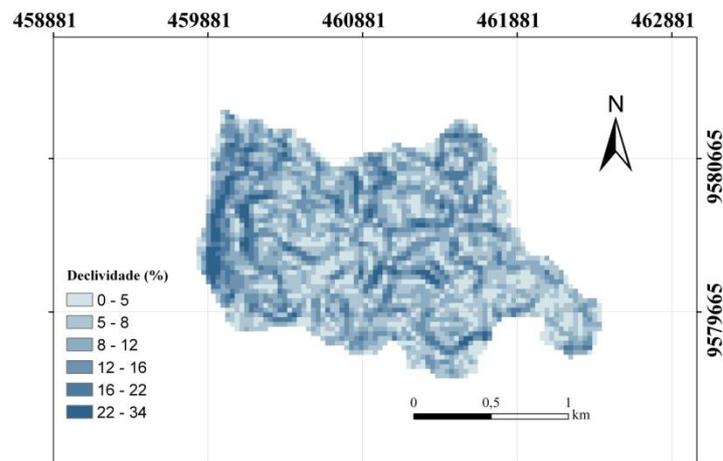
predominam declividades de 45%. Nas proximidades do exutório também se verificam baixas declividades, até 0,4%, enquanto que em grande parte da bacia, as declividades variam entre 8 e 28% (Figura 2).

Figura 2 - Elevação da bacia experimental.



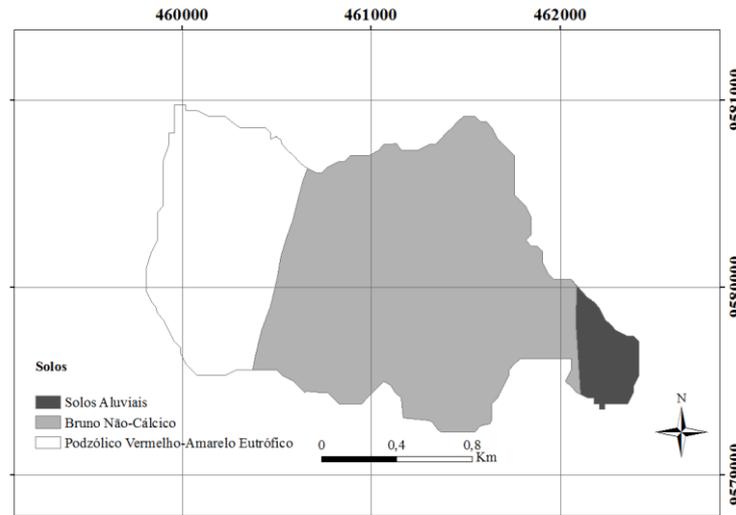
A vegetação predominante é a Caatinga, de caráter hiperxerófilo, termo que, segundo Lemos (2006), é utilizado no Nordeste brasileiro “para designar qualquer comunidade vegetal padronizada pelo seu aspecto fisionômico, resultante da caducifolia de suas espécies no período seco, assumindo caráter tropofítico e refletindo a semiaridez no chamado Polígono das Secas”. A declividade varia entre 0,4 a 45% (Figura 3).

Figura 3 - Declividade da bacia experimental



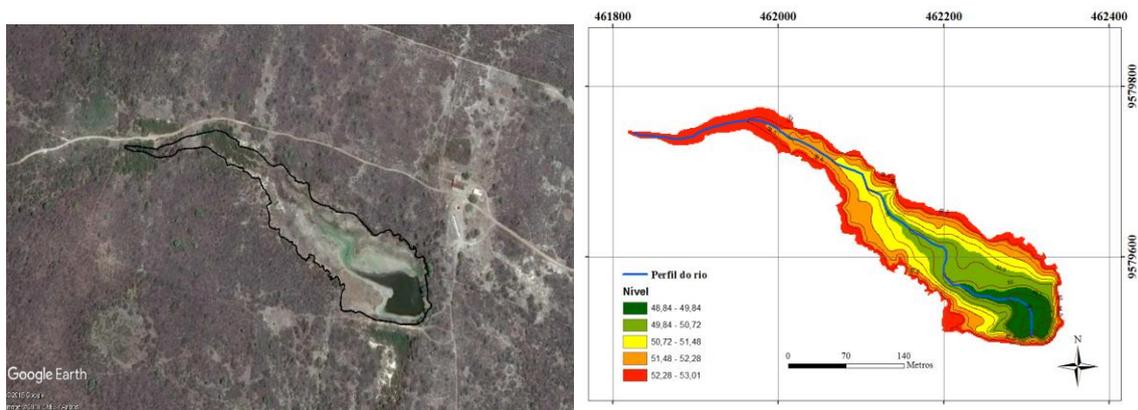
De acordo com o mapa base de Reconhecimento dos Solos do Ceará na escala de 1:600.000, que contém as classes de solo para todo o Estado, identificaram-se três diferentes tipos de solo dentro da bacia. Sendo eles bruno não cálcio (LUVISSOLOS), podzólico vermelho-amarelo eutrófico (ARGISSOLOS) e solos aluviais (NEOSSOLOS) (Figura 4).

Figura 4 - Mapa de solos da BEVC



A BEVC possui um pequeno reservatório (Açude Escola) locado em seu exutório, como mostrado na Figura 5. O açude possui volume estimado em 51.600 m³.

Figura 5 - Açude Escola.



4.2.2 Monitoramento hidrológico e sedimentológico na BEVC

4.2.2.1 Precipitação

Os dados pluviométricos na BEVC foram obtidos em uma estação pluviométrica automatizada instalada na área de estudo, que contém um pluviógrafo de Bâscula, com aquisição de dados a cada 5 minutos e dois pluviômetros *Ville de Paris* (Figura 6). Também contará com dados de uma estação meteorológica que funciona na FEVC pertencente a Universidade Federal do Ceará – UFC.

Figura 6 - Equipamentos para monitoramento pluviométrico da BEVC.



A Tabela 1 abaixo mostra os valores médios de precipitação mensal na BEVC calculadas à partir de dados de monitoramento da fazenda experimental.

Tabela 1 - Precipitação média na Bacia Experimental

Pm	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
mm	81,32	113,94	204,04	198,02	116,88	63,27	31,80	9,22	4,33	4,49	5,53	20,72

Pm: Precipitação mensal

4.2.2.2 Evaporação

A evaporação anual observada em tanque do tipo classe “A” é de 1.463,7 mm, distribuída ao longo dos meses segundo a Tabela 2. O trimestre que apresenta os maiores valores de evaporação corresponde a agosto, setembro e outubro, ocorrendo o máximo em outubro (170,7 mm), e a mínima em março (63,7).

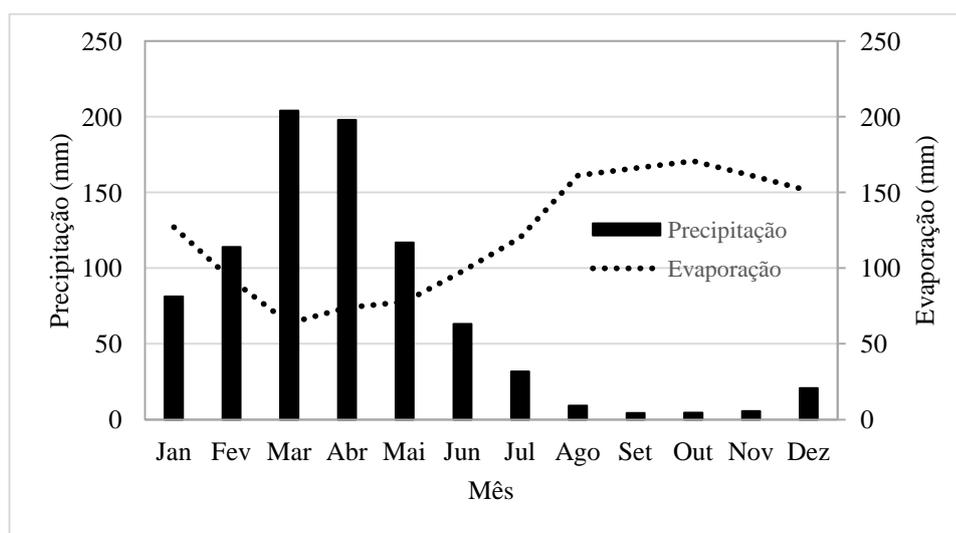
Tabela 2 - Evaporação média na Estação de Pentecoste

Evap.	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
mm	127,0	92,6	63,7	74,0	77,8	98,0	120,1	161,2	166,2	170,7	161,2	151,2

Fonte: Adaptado de Aguiar et. al. (2004)

A Figura 7 abaixo mostra a variação anual de precipitação e evaporação na BEVC.

Figura 7 - Precipitação e evaporação média mensal na BEVC.



4.2.2.3 Escoamento Superficial

O escoamento superficial foi monitorado por meio de uma estação hidrossedimentológica instalada imediatamente à montante do Açude escola. O escoamento superficial foi quantificado por meio do vertedouro, já existente, sendo esse confeccionado em alvenaria (Figura 8), sendo as coletas realizadas por evento desde a quadra chuvosa de 2015 a 2017.

A vazão foi calculada por meio da curva chave definida para vertedouro instalado na seção. Nesta seção, foi instalado um sensor automático de nível da marca HOBOWater Level Logger em um poço tranquilizador conectado à rede de drenagem por vasos comunicantes. O equipamento mede pressão da coluna de água, quando submerso, adicionado à pressão atmosférica. Por diferença de pressão em relação a outro equipamento similar localizado fora da bacia, na sede da Fazenda da UFC, onde se monitora apenas pressão atmosférica, determina-se o nível de água com intervalo de medições de 5 minutos.

Figura 8 - Vertedouro à montante do Açude Escola.



Para o cálculo de vazão no vertedouro, foi utilizada a Equação 1.

$$Q = \frac{8}{15} \cdot \sqrt{2g} \cdot \tan \frac{\alpha}{2} \cdot H^{2,5} \quad \text{Equação 1}$$

Sendo:

Q = a vazão escoada, ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$);

H = a altura de água passando no vertedouro;

α = ângulo de abertura do vertedouro.

Sendo esta a equação fundamental da vazão para os vertedores triangulares de parede delgada, como demonstrado por Porto (2006). A cada evento de escoamento afluente ao reservatório, no vertedouro triangular, amostras de água foram coletadas manualmente, etiquetadas e enviadas para laboratório onde foi possível realizar as análises granulométricas e a concentração de sedimentos suspensos (CSS). As amostras foram coletadas usando um amostrador de sedimentos em suspensão DH-48, em integração de profundidade, com uso de uma haste a vau.

Amostras de escoamento também foram coletadas em locais específicos da BEVC. A área conta com duas Parcelas Wischmeyer, parcelas de erosão para quantificação da perda de água e solo em escala de lote, com dimensões de 4 x 22 m. A cobertura vegetal das parcelas estudadas é composta por uma vegetação de Caatinga com oito anos de pousio na Parcela P1 (Figura 9a) e, na Parcela P2 (Figura 9b), uma Caatinga preservada com 40 anos de pousio.

Figura 9 - Parcelas Wishmeyer, P1 (a) e P2 (b), em ambos os períodos, seco e chuvoso.



Destacam-se, na P1, plantas do tipo marmeleiro com altura variando entre 2 a 3 metros. Já na P2 as plantas variam em altura entre 5 e 7 metros. A declividade média das parcelas, determinada com auxílio de um nível de mangueira, é de 8,9% e de 9,7% para P1 e P2, respectivamente.

As parcelas foram contornadas com chapa de aço galvanizada com 0,30 m de largura, que foi enterrada a 0,15 m (Figura 10). A parte inferior da parcela foi conectada a um sistema coletor, constituído de 3 tanques com capacidade de 25, 200 e 200 L, respectivamente. O primeiro tanque é composto de um sistema de 7 janelas. Após o enchimento do primeiro tanque, 1/7 do escoamento superficial da parcela é canalizado para o segundo tanque, que uma vez cheio, o excedente é conduzido para o terceiro tanque.

Figura 10 - Tanques coletores de água e sedimento.



Para se obter resultados de vazões de séries históricas, o modelo CN-SCS, desenvolvido na década de 1950 pelo Serviço de Conservação dos Solos (SCS-USDA), foi utilizado, com dados de precipitação do posto pluviométrico do município de Pentecoste, monitorado pela FUNCEME, desde 1970 até os dias atuais.

Por ser simples e largamente utilizado nas mais variadas bacias hidrográficas ao redor do mundo, o método do Número de Curva (CN) foi aplicado à pesquisa. Segundo Chow *et al.* (1988) o método pressupõe que em eventos de chuva há uma chamada precipitação escoada, a qual é sempre menor ou igual a precipitação; considera que uma bacia contém um determinado potencial de retenção de água e que há uma determinada quantidade de chuva, chamada abstração inicial, a qual não ocorre escoamento.

Segundo Araújo Neto *et al.* (2012), o método do *CN-SCS* baseia-se no conceito de que a lamina de escoamento superficial produzida em um dado evento e uma função da altura total da lâmina precipitada e das abstrações iniciais, que representa as perdas que ocorrem, principalmente, devido a infiltração, a interceptação vegetal e a retenção em depressões do terreno.

Analisando dados de precipitação e precipitação escoada em determinadas bacias, o SCS plotou algumas curvas, denominadas curvas número CN, cujos valores variam entre 0 e 100; para águas impermeáveis $CN = 100$; para superfícies naturais $CN < 100$. O CN é relacionado com o potencial de armazenamento do local ou bacia, sendo que altos valores de CN indicam altas probabilidades de escoamento superficial e, conseqüentemente, baixos índices de armazenamento de água no solo, e vice-versa. O CN também está relacionado às condições de umidade antecedente do solo, seco (AMC I) ou úmido (AMC III).

Os valores de CN são obtidos para cada uso e cobertura do solo em tabela padrão do SCS. As tabelas foram desenvolvidas para as condições de uso e cobertura do solo dos EUA,

em conjunto com quatro grupos de solos classificados de acordo com a taxa de infiltração, textura e estrutura (LIMA *et al.* 2007).

À partir da análise das precipitações e escoamentos superficiais ocorridos na BEVC, foi possível estimar as abstrações iniciais dos eventos, além de precipitação escoada e coeficiente de escoamento da bacia. Verificou-se assim a ocorrência de quatro condições distintas para a BEVC, destacados na Tabela 3 abaixo.

Tabela 3 - Condições verificadas com suas respectivas características.

Condição	Característica
1	Solo seco com baixa precipitação acumulada e baixa precipitação diária
2	Solo seco com baixa precipitação acumulada e elevada precipitação diária
3	Solo parcialmente úmido com média precipitação acumulada
4	Solo úmido com alta precipitação

4.2.3 Análise granulométrica do sedimento em suspensão

A análise granulométrica da carga de sedimentos, tanto nos tanques coletores das parcelas quanto no vertedouro à montante do Açude Escola, transportado, em suspensão, foi feito através do método de análise do TUBO DE REMOÇÃO PELA BASE ou *Bottom*. Segundo Carvalho (2008), esse método, comum às análises do material de suspensão e de fundo, objetiva a determinação da granulometria e da concentração do material contido na amostra. O método é descrito por Carvalho (1994) e objetiva a determinação da granulometria como também da CSS contida na amostra através da precipitação das partículas. O processo é baseado na teoria de Oden e na lei de Stokes.

O processo é baseado na Teoria de Oden e na Lei de Stokes. A determinação granulométrica é feita à partir de precipitação do material coletado em aparelhagem especial. Uma série de três a cinco tubos de vidro (Figura 11), de extremidades afuniladas, de diâmetros internos conhecidos e de pouco mais de um metro de comprimento, constitui a aparelhagem, onde são efetuadas as citadas precipitações. Os tubos, de aproximadamente 1 metro cada, são instalados em peças presas à parede e de forma a permitirem fácil remoção.

Figura 11 - Tubos utilizados no método Tubo de Remoção pela Base.



Assim, à partir de garrafas de amostragem, é feita a transferência de 50 cm^3 da parte sobrenadante de cada uma das garrafas para um béquer, visando à determinação do teor de sólidos dissolvido na água natural do rio, observada a técnica usual para essas retiradas. Deve-se proceder a redução da amostra, já que ela não poderá ultrapassar o volume do tubo, onde se processará a precipitação das partículas.

É recomendado que o tubo não seja plenamente preenchido com a amostra. Em seguida, após se anotar o nível atingido pela amostra na graduação do tubo, o que corresponde ao volume de amostragem, dever-se-á completar até a graduação 100 cm, com água destilada, a porção de amostra ali contida.

Arrolha-se devidamente o tubo para perfeita dispersão do sedimento, ele será basculado repetidamente, durante 5 minutos. Começam-se, então, as retiradas da amostra, em diferentes intervalos de tempo, determinado em função do diâmetro das partículas que se precipitam.

São feitas retiradas sucessivas e contadas a partir do início, nos seguintes intervalos de tempo, após a retirada da rolha: 30 segundos, 1 minuto, 2 minutos, 5 minutos, 13 minutos, 32 minutos, 1 hora e 20 minutos, 2 horas e 40 minutos, 5 horas e 30 minutos e 5 horas e 31 minutos. Esses tempos de retiradas são função da granulometria do sedimento, quanto mais fino o sedimento, menores devem ser os tempos iniciais escolhidos a fim de permitir o bom traçado da Curva de Oden.

Sendo as amostras de volumes iguais, cada uma das retiradas corresponderá a 10 cm da graduação do tubo. A essa operação sucede-se a evaporação das dez porções colhidas, feitas em estufa, por um período de 24 horas com temperatura entre 100 e 105 °C. Em seguida, são levadas à temperatura ambiente em dessecadores à vácuo. Estão, assim, prontas para a pesagem.

O primeiro registro do método mencionado acima é através do Report N° 7 conduzido pela Office of Indian Affairs, Bureau of Reclamation Tennessee Valley Authority, Corps of Engineers Geological Survey, Department of Agriculture e Iowa Institute of Hydraulic Research, publicado em 1943. O estudo objetivou elaborar um método eficaz de medição de análise granulométrica de sedimentos suspensos, visto a deficiência dessa análise pelos métodos existentes na época do estudo, incapazes, segundo os autores, de mostrar resultados confiáveis frente a grande variabilidade de tamanho das partículas e concentração em que são encontrados no fluxo.

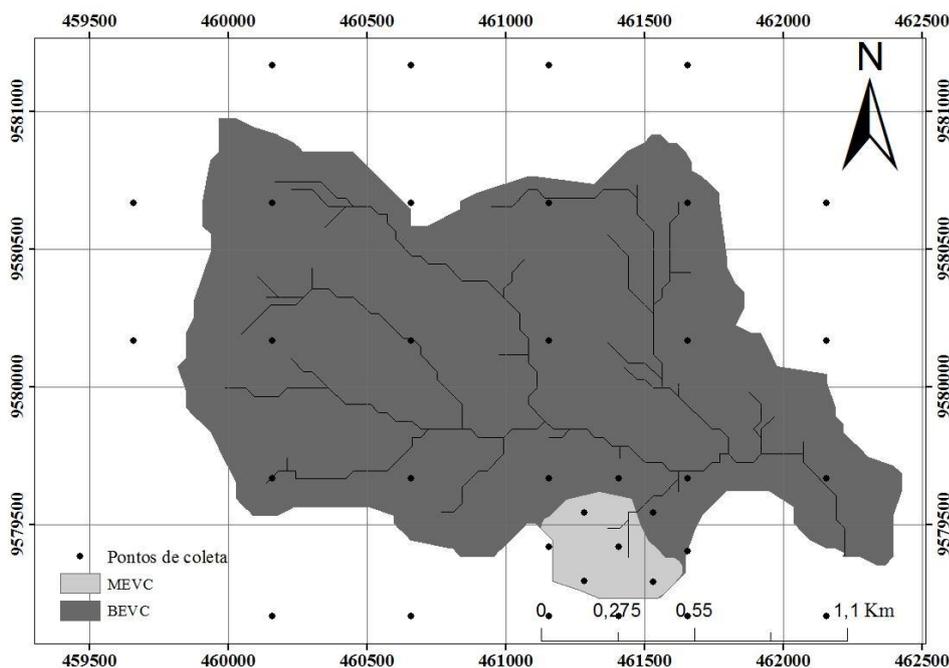
Nesse estudo, concluiu-se que o método do tubo de remoção pela base apresenta resultados confiáveis para partícula de diâmetro até 1mm e fluidos com concentração entre 300 e 30.000 ppm.

4.2.4 Análise física do solo da BEVC

Foram realizadas coletas de amostras deformadas, nas localidades informadas na Figura 12, na profundidade de 0 a 20 cm, para análise de granulometria e matéria orgânica. As amostras foram acondicionadas em sacos plásticos e levadas ao Laboratório de Mecânica dos Pavimentos da Universidade Federal do Ceará (UFC), onde os ensaios foram conduzidos.

As amostras para a análise granulométrica foram preparadas de acordo com a NBR6457, que dispõe sobre o preparo de amostras para compactação e ensaios de caracterização. O ensaio para determinação da curva granulométrica dos solos foi realizado de acordo com os procedimentos recomendados pela norma NBR7181, sendo este procedimento constituído de duas etapas: o peneiramento dos grãos com diâmetro equivalente maior que 0,075 mm; e a sedimentação das partículas menores que 2,0 mm. Nesta metodologia, a fase de sedimentação é realizada após a desfloculação química e mecânica das partículas.

Figura 12 - Pontos de coleta de solo para análise granulométrica.



Fonte: GOMES (2016)

O monitoramento do nível açude Escola foi realizado com periodicidade diária, utilizando-se réguas linimétricas já instaladas. O levantamento topográfico deste açude para construção da curva cota-área-volume foi realizado usando uma estação total quando o mesmo estava completamente vazio, o que é comum neste tipo de estrutura, com profundidades pequenas (inferior a 5 m) e elevadas perdas por evaporação e infiltração.

A área do reservatório (A_i) foi estimada através de levantamento de pontos ao longo de seu contorno, utilizando um instrumento de posicionamento global (GPS-Garmin), de navegação com precisão média de 3 m. Já a área máxima do reservatório (A_{max}), por sua vez, foi obtida à partir do processamento de imagens do Google Earth escolhido um período dentro da quadra chuvosa de um ano com chuvas maiores ou iguais à média histórica.

De posse dos valores de profundidade e áreas correspondentes, estimou-se o volume dos reservatório a partir do emprego da fórmula de tronco de cone (Equação 2). O procedimento consiste no cálculo do volume do cone (V_i) representado pela altura h_i e área A_i . Em seguida calcula-se o volume máximo do reservatório (V_{max}), como sendo a soma do volume V_i e o tronco de cone (ΔV) representado pelas áreas A_i e A_{max} e pela diferença entre as alturas h_i e h_{max} .

$$\Delta V = \frac{1}{3}(h_{max} - h_i)(A_i + A_{max} + (A_i \cdot A_{max})^{1/2}) \quad \text{Equação 2}$$

em que:

$$V_{max} = V_i + \Delta V$$

Equação 3

O monitoramento de vazões durante vertimentos foi realizado com auxílio de molinete para calibração da curva-chave na seção de vertimentos com perfil irregular já levantado usando um nível topográfico.

4.2.5 Enriquecimento de Finos

Taxa de enriquecimento é uma relação entre a quantidade, ou concentração, de uma determinada classe granulométrica no sedimento escoado com a mesma classe no solo matriz da bacia. Sendo assim, a taxa de enriquecimento (TE) foi determinada pela Equação 4 abaixo:

$$TE = \frac{PSE}{PSM}$$

Equação 4

Em que:

PSE = porcentagem de sedimento de uma determinada classe no escoamento superficial;

PSM = porcentagem de sedimento de uma determinada classe no solo matriz.

TE maior do que 1,0 representa enriquecimento, ou seja, uma dada classe granulométrica apresenta maiores proporções no escoamento superficial do que no solo matriz. TE menor do que 1,0 representa diminuição, ou seja, uma dada classe granulométrica apresenta maiores proporções no solo matriz do que no escoamento superficial. Informações relevantes sobre a dinâmica hidrossedimentológica da bacia podem ser tiradas dos resultados obtidos dessa relação, como mobilidade de determinada classe granulométrica, a capacidade de transporte de poluentes e, indiretamente, a taxa de assoreamento de reservatórios e vida útil do mesmo.

4.2.6 Balanço hídrico diário do Açude Escola

De acordo com Mamede (2008), o balanço hídrico do reservatório quantifica as interações entre o fluxo da água que entra e sai do reservatório para um determinado intervalo de tempo. O balanço hídrico pode ser estimado de acordo com a equação abaixo, assumindo a densidade específica do fluido sendo constante:

$$dV/dt = Q_{in} + Q_{Prec} + Q_{gr} - (Q_{evap} + Q_{inf} + Q_{over} + Q_{ws}) \quad \text{Equação 5}$$

Onde Q_{in} é o volume de água afluyente ao reservatório fruto do escoamento superficial; Q_{prec} é o volume de água referente à precipitação direta no reservatório; Q_{gr} é à contribuição, em volume, pelo lençol freático; Q_{evap} é a evaporação direta de água no reservatório; Q_{inf} é referente ao volume de água que sai do reservatório por infiltração; Q_{over} é referente ao volume que sai do reservatório por vertimento; Q_{ws} é o volume retirado para suprir necessidades humanas e animais. Assumiu-se que as perdas por infiltração são desprezíveis.

Esse balanço hídrico tem as seguintes particularidades:

- As vazões de saída, quando o volume do reservatório num determinado período exceder a capacidade de armazenamento do mesmo, é numericamente igual a vazão de entrada.
- Quantificação da redução no volume pela evaporação direta ao reservatório.
- Quantificação do aumento no volume armazenado proveniente de precipitação direta ao reservatório. Se a capacidade de armazenamento é excedida, calcula-se o volume vertido.
- Não houve retirada de água para abastecimento humano ou animal.
- Quantificação do volume do reservatório em determinado período de tempo, nível do reservatório e respectiva área superficial são calculadas utilizando a curva cota-área-volume do reservatório.

4.2.7 Dinâmica de sedimentos na bacia - Modelos de previsão granulométrica do sedimento desprendido

Erosão do solo envolve dois processos ditos como principais: desprendimento de solo causado pelo impacto das gotas de chuva e/ou tensão de cisalhamento causado pelo escoamento superficial, e transporte do material desprendido nas encostas e rede de drenagem até o exutório.

Qualificação granulométrica do sedimento desprendido do solo matriz pode ser prevista utilizando modelos empíricos. Nessa pesquisa, 6 modelos foram avaliados: Frere *et al.* (1975); Young e Onstad (1976); Young (1980), Foster *et al.* (1981); Foster *et al.* (1985) e Carkovic *et al.* (2015).

4.2.7.1 Modelo de Frere et al. (1975)

Frere *et al.* (1975) desenvolveram uma relação entre a área superficial específica de cada classe granulométrica e a textura do solo matriz para estimar a distribuição granulométrica do sedimento, ou Padrão Granulométrico de Sedimento Desprendido (PSD), erodido da encosta, como parte do modelo ACTMO (Agricultural Chemical Transport Model). O modelo foi desenvolvido à partir de dados de perda de solo e classificação textural de solos matriz e material erodido de 56 solos. Nesse estudo, os pesquisadores assumiram uma área superficial específica para cada faixa granulométrica.

Argila – 200 m²/g

Silte – 40 m²/g

Areia – 0,5 m²/g

A área específica para cada tipo de solo foi estabelecida como sendo:

$$SS_m = 200 \cdot Cl + 40 \cdot Si + 0,5 \cdot Sa \quad \text{Equação 6}$$

Sendo:

Cl = porcentagem de argila no solo matriz;

Si = porcentagem de silte no solo matriz;

Sa = porcentagem de areia no solo matriz.

A taxa de argila (*clay ratio*, CR), pode ser calculada como sendo:

$$CR_i = \frac{Cl}{Si + Sa} \quad \text{Equação 7}$$

Através de regressão, o pesquisador encontrou duas equações:

$$SS_e = 14,6 + 0,84 \cdot SS_m \quad \text{Equação 8}$$

e

$$CR_e = 0,021 + 1,08 \cdot CR_m \quad \text{Equação 9}$$

Os subscritos *e* e *m* referem-se a material erodido e solo matriz, respectivamente

Assumindo-se que a soma das porcentagens de areia, silte e argila no material erodido tem que ser igual a 100%.

4.2.7.2 Modelo de Young e Onstad (1976)

Young e Onstad (1976) desenvolveram equações para prever a composição granulométrica do solo erodido, levando em consideração a distribuição granulométrica do solo matriz, o conteúdo de matéria orgânica e a umidade do solo.

As equações propostas são:

$$SS_m = -2,36 + 7,96 \cdot (W) - 4,49 \cdot (OM_m) \quad \text{Equação 10}$$

Onde:

SS_m = área superficial do solo matriz ($m^2 \cdot g^{-1}$);

W = a umidade do solo à pressão de 15 Bar (%);

OM_m = conteúdo de matéria orgânica no solo matriz (%).

O modelo considera também o tipo de argila presente no solo, sendo os mais comuns caulinita, ilita e montmorilonita, a primeira dita como não expansiva e as duas últimas, expansivas. Os pesquisadores observaram que ilita e montmorilonita eram mais predominantes e concluíram que seria plausível inserir tal fator no modelo. Através de múltiplas análises de regressão, encontraram a equação que leva em consideração a textura do solo matriz e a área superficial do solo para se determinar a quantidade de montmorilonita do mesmo.

$$SS_m = 0,116 \cdot (Sa) + 0,185 \cdot (Si) + 0,33 \cdot (Cl) + 0,107 \cdot (M_m) \cdot (Cl) \quad \text{Equação 11}$$

Onde:

M_m = quantidade de montmorilonita (%).

Analisando solos de Indiana e Minnesota, os pesquisadores obtiveram uma relação, por regressão, entre a área superficial do solo matriz e do solo erodido (SS_e), chegando a equação:

$$SS_e = -3,868 + 1,15 \cdot SS_m \quad \text{Equação 12}$$

O modelo inclui a susceptibilidade do solo à erosão, erodibilidade. Através do estudo de Young e Wiersman (1973), a textura e conteúdo de matéria orgânica foram testadas para se verificar se tais atributos influenciavam na erodibilidade, em experimento com chuva simulada em laboratório. Em três solos testados, o fator erodibilidade do solo matriz (F_m) variou com a quantidade de areia, argila e matéria orgânica do solo matriz da seguinte forma:

$$F_m = \frac{Sa \cdot Cl}{100 \cdot OM_m} \quad \text{Equação 13}$$

Onde:

OM_m = conteúdo de matéria orgânica no solo matriz (%).

E por regressão, os pesquisadores obtiveram uma equação relacionando o fator erodibilidade do solo matriz com o fator erodibilidade do solo erodido (F_e):

$$F_e = -0,023 + 0,866 \cdot F_m \quad \text{Equação 14}$$

Diversos pesquisadores (Martin, 1941; Massey e Jackson, 1952; Massey *et al.*, 1953; Slater e Carleton, 1938; Young, 1972, Bertol *et al.* 2017) observaram enriquecimento da matéria orgânica, relação entre o conteúdo de matéria orgânica no solo erodido e no solo matriz. Os pesquisadores destacam que solos arenosos tendem a ter baixas taxas de enriquecimento de matéria orgânica. Os mesmos obtiveram uma equação relacionando a matéria orgânica do solo matriz e do solo erodido (OM_e):

$$OM_e = 0,30 + 1,08 \cdot OM_m \quad \text{Equação 15}$$

Sendo assim:

$$F_e = \frac{Sa_e \cdot Cl_e}{100 \cdot OM_e} \quad \text{Equação 16}$$

Onde:

Sa_e e Cl_e = quantidades de areia e argila no solo erodido (%).

Considerando que a soma das quantidades de areia, silte e argila no solo erodido tem um máximo de 100%, faz-se uma resolução do sistema linear com as equações 15 e 16 e obtém-se o valor dos percentuais dos componentes no solo erodido.

4.2.7.3 Modelo de Young (1980)

Young (1980) também sugeriu um modelo para se estimar a granulometria do material desprendido. O autor destaca que os componentes do solo, argila, silte e areia, são transportados, em sua maior parte, na forma de agregados, principalmente a argila. Porém, o autor frisa que, geralmente, em solos arenosos, pelo fato de haver baixo nível de agregação, os mesmos tendem a erodir como partículas primárias, ou seja, material erodido com granulometria similar à do solo matriz.

O modelo propõe as seguintes equações:

a) Para solos arenosos

$$Clay_e = 0,5 \cdot Cl \quad \text{Equação 17}$$

$$Se_e = Sa \quad \text{Equação 18}$$

$$Silt_e = 100 - Sa - 0,5 \cdot Cl \quad \text{Equação 19}$$

b) Para solo argilosos

$$Clay_e = 0,22 \cdot Cl \quad \text{Equação 20}$$

$$Se_e = 1,53 \cdot (Si - Sa) - 14,91 \quad \text{Equação 21}$$

$$Silt_e = 100 - Sa - Cl \quad \text{Equação 22}$$

c) Para solos siltosos

$$Clay_e = 1,2 + 0,2 \cdot Cl \quad \text{Equação 23}$$

$$\text{Silt}_e = 0,14 + 0,67 \cdot \text{Si} \quad \text{Equação 24}$$

$$\text{Se}_e = 100 - \text{Cl} - \text{Si} \quad \text{Equação 25}$$

4.2.7.4 Modelo de Foster et al. (1981)

Foster *et al.* (1981) propuseram um método desenvolvido como componente do modelo CREAMS (*Chemicals, Runoff e Erosion from Agricultural Management Systems*) (USDA, 1980; Knisel, 1980). O método avalia a produção de sedimento sobre várias práticas de manejo da bacia e incorpora princípios fundamentais de erosão, deposição e transporte de sedimentos.

Segundo os autores, sedimentos erodidos são uma mistura de partículas primárias e agregados. A granulometria e frequência destas partículas no solo desprendido é função das propriedades e manejo do solo, bem como características de chuva e escoamento. O método leva em consideração a granulometria do solo matriz para se estimar a granulometria do solo erodido usando as seguintes equações:

$$P_{\text{Sa}} = \text{Sa} \cdot (1,0 - \text{Cl})^{2,49} \quad \text{Equação 26}$$

$$P_{\text{Si}} = 0,13 \cdot \text{Si} \quad \text{Equação 27}$$

$$P_{\text{Cl}} = 0,2 \cdot \text{Cl} \quad \text{Equação 28}$$

$$\text{SAG} = 2 \cdot \text{Cl} \quad \text{p/Cl} < 0,25 \quad \text{Equação 29}$$

$$\text{SAG} = 0,28 \cdot (\text{Cl} - 0,25) + 0,5 \quad \text{p}/0,25 \leq \text{Cl} \leq 0,50 \quad \text{Equação 30}$$

$$\text{SAG} = 0,57 \quad \text{p/Cl} > 0,5 \quad \text{Equação 31}$$

$$\text{LAG} = 1,0 - P_{\text{Sa}} - P_{\text{Si}} - P_{\text{Cl}} - \text{SAG} \quad \text{Equação 32}$$

Onde as variáveis Cl_m , SI_m , SA_m , P_{Cl} , P_{Si} , P_{Sa} , SAG e LAG são, respectivamente, frações de argila, silte e areia primários no solo matriz, e argila, silte, areia primários, pequenos e grandes agregados na massa de solo desprendido.

4.2.7.5 Modelo de Foster et al. (1985)

Foster *et al.* (1985) elaboraram uma série de equações empíricas, baseadas em dados coletados de 28 solos dos EUA, relacionando a textura do solo matriz com a composição granulométrica do sedimento desprendido. Nas equações, o sedimento é dividido em partículas primárias (argila, silte e areia), pequenos e grandes agregados. A explicação para

divisão dos agregados reside no fato de que os pesquisadores também corroboram com Young (1980) em relação à parte do sedimento ser transportado na forma de agregado, sendo plausível quantificá-lo.

As equações empíricas propostas pelos pesquisadores para quantificar a granulometria do sedimento desprendido são:

$$F_{Cl} = 0,26 \cdot O_{Cl} \quad \text{Equação 33}$$

$$F_{Si} = O_{Si} - F_{Sg} \quad \text{Equação 34}$$

Em que:

$$F_{Sg} = 1,8 \cdot O_{Cl} \quad \text{p/ } O_{Cl} < 25\% \quad \text{Equação 35}$$

$$F_{Sg} = 0,45 - 0,6 \cdot (O_{Cl} - 0,25) \quad \text{p/ } 25\% < O_{Cl} < 50\% \quad \text{Equação 36}$$

$$F_{Sg} = 0,6 \cdot O_{Cl} \quad \text{p/ } O_{Cl} > 50\% \quad \text{Equação 37}$$

$$F_{Sa} = O_{Sa} \cdot (1 - O_{Cl})^5 \quad \text{Equação 38}$$

$$F_{Lg} = 1 - F_{Cl} - F_{Si} - F_{Sg} - F_{Sa} \quad \text{Equação 39}$$

Sendo:

O_{Cl} = quantidade de argila no solo matriz (decimal);

O_{Si} = quantidade de silte no solo matriz (decimal);

O_{Sa} = quantidade de areia no solo matriz (decimal);

F_{Cl} = fração de argila primária no solo desprendido;

F_{Si} = fração de silte primário no solo desprendido;

F_{Sa} = fração de areia primária no solo desprendido;

F_{Sg} = fração de agregado pequeno no solo desprendido;

F_{Lg} = fração de agregado grande no solo desprendido.

4.2.7.6 Modelo de Carkovic et al. (2015)

Carkovic *et al.* (2015) avaliaram as equações empíricas propostas por Foster *et al.* (1985) para desenvolver novas equações de previsão da granulometria do solo desprendido pelos processos erosivos em terrenos não cultivados e afetados por queimadas, equações mais adequadas para as condições do local de estudo. Abaixo, segue as equações propostas pelos pesquisadores:

$$F_{Cl} = 0,005 \cdot O_{Cl} \quad \text{Equação 40}$$

$$F_{Si} = 1 - F_{Cl} - F_{Sg} - F_{Lg} - F_{Sa} \quad \text{Equação 41}$$

$$F_{Sg} = 1,593 \cdot O_{Cl} \quad \text{Equação 42}$$

$$F_{Sa} = O_{Sa} \cdot (1 - O_{Cl})^{0,83} \quad \text{Equação 43}$$

$$F_{Lg} = 4,548 \cdot O_{Cl} \quad \text{Equação 44}$$

Algumas considerações devem ser observadas sobre o método. A estimativa da fração de agregados pequenos e silte no solo desprendido são difíceis de prever devido a baixa quantidade de materiais de faixa $< 53 \mu\text{m}$. Em casos como esse, é necessário um ajuste do F_{Sg} , calculado como sendo a diferença entre a fração de sedimento do solo matriz $< 53 \mu\text{m}$ e a F_{Cl} . Assim sendo, a fração de silte (F_{Si}) é igual a zero.

A quantidade de silte inserido nos agregados pequenos foi considerada ser a mesma quantia do solo matriz, e F_{Sa} foi estimada assumindo que a fração de areia do sedimento $> 53 \mu\text{m}$ foi o mesmo do solo matriz, considerações também assumidas no estudo de Foster *et al.* (1985), o F_{Lg} foi obtido pela diferença entre 1 e a soma das frações de todas as partículas.

4.2.8 Dinâmica de sedimentos na bacia - Modelos de previsão de sedimento transportado

Após o processo de desprendimento ocasionado pelos processos erosivos na bacia, é necessário saber como essa composição granulométrica se comporta quando transportada pelas encostas e redes de drenagem até o exutório ou ponto de deposição. É fato que parte do sedimento erodido ficará retido ou depositado na bacia e outra parte continuará até o exutório ou depositado em reservatório. Esse processo é controlado por diversos fatores entre eles se destacam a vazão escoada, declividade do canal, topografia e granulometria do sedimento. Materiais mais grosseiros tendem a serem depositados por terem maior velocidade de queda da partícula, ao contrário do que ocorre com materiais menores, que tendem a serem transportados pelo fluxo superficial, processo denominado enriquecimento de finos.

Segundo Heyes *et al.* (1982), essa deposição ou transporte de partículas pelo fluxo é altamente dependente da capacidade de transporte do mesmo, se a capacidade de transporte diminui partículas maiores se depositam primeiro e se tal capacidade continua a diminuir, a granulometria das partículas remanescentes no fluxo também diminuem.

Barfield *et al.* (1979) propôs um procedimento baseado na suposição de que partículas maiores no fluxo sedimentam primeiro. Sendo assim, a granulometria do solo transportado

pode ser estimada se a granulometria do material erodido e o coeficiente de transporte da bacia (SDR) forem conhecidos.

A distribuição granulométrica do material que sai da sub-bacia e atinge o exutório da bacia pode ser estimada pela seguinte equação:

$$PF_3 = \frac{PF_2}{D_2}; \quad PF_3 \leq 100 \quad \text{Equação 46}$$

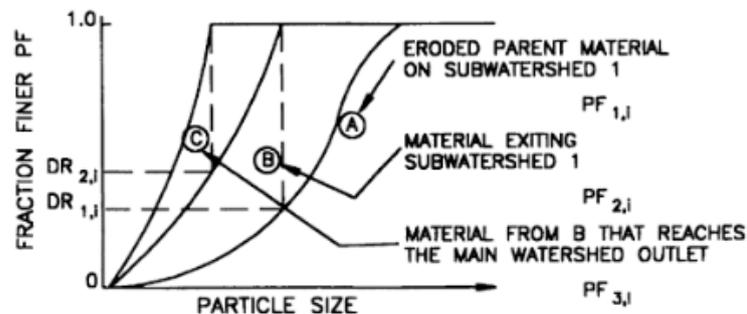
Onde D_2 é a fração do material que sai da sub-bacia e atinge o exutório. O autor destaca um método para cálculo do D_2 através da equação de Williams:

$$D_2 = e^{BT\sqrt{D_{50}}} \quad \text{Equação 47}$$

Onde B é o coeficiente de descarga e T é o tempo de deslocamento de partícula entre a sub-bacia e o exutório.

Porém, nessa pesquisa, o coeficiente D_2 foi substituído pelo SDR, taxa de transporte de sedimentos na bacia experimental.

Figura 13 - Padrão granulométrico dos sedimentos desde a bacia até o exutório, segundo Barfield *et al.* (1979)



Fonte: Haan (1994)

4.2.9 Dinâmica de sedimentos no reservatório

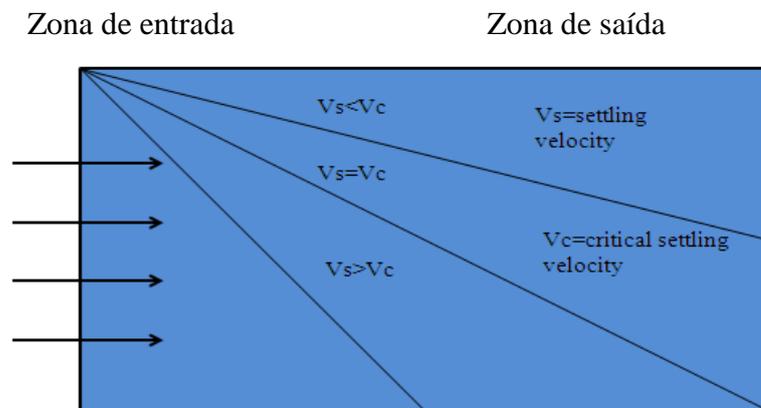
O balanço dos sedimentos no Açude Escola foi feito utilizando o modelo simplificado proposto por Haan *et al.* (1994). O método consiste em utilizar o conceito de razão de vertimento em um reservatório retangular equivalente.

De acordo com o modelo, a velocidade de sedimentação crítica (V_c) é definida como a velocidade mínima de deposição que vai permitir com que uma partícula alcance o fundo em

sua trajetória através do reservatório. Partículas com velocidade de sedimentação V_s maior do que a velocidade de sedimentação crítica serão depositadas e, conseqüentemente, ficarão retidas no reservatório. A velocidade de sedimentação crítica é dada pela razão entre a profundidade do reservatório e o fluxo através do tempo. Para um reservatório de forma retangular, a velocidade de sedimentação crítica pode ser calculada pela razão entre a vazão efluente e a área superficial do reservatório.

O método permite a estimativa da retenção e sedimentos desde que se conheça a granulometria do sedimento afluente ao reservatório e as vazões extravasadas pelo vertedouro da barragem. A granulometria do sedimento efluente liberado durante vertimentos também pode ser estimada pelo método. A Figura 14 abaixo mostra o esquema simplificado do modelo.

Figura 14 - Trajetórias de fluxo de sedimentos em um reservatório retangular idealizado de sedimentos (Haan *et al.*, 1994).



A retenção dos sedimentos no reservatório pode ser estimada com base na razão de vertimento, o qual leva em consideração a granulometria dos sedimentos que fluem para dentro do reservatório, tal como apresentado abaixo:

$$ER = (1 - X_c) + \int_0^{X_c} \frac{V_s}{V_c} dx \quad \text{Equação 48}$$

Integrando a equação 1 tem-se:

$$ER \cong (1 - X_c) + \sum_{i=1}^n \frac{V_{s,i}}{V_c} \Delta X_i \quad \text{Equação 49}$$

em que V_s é a velocidade de sedimentação da partícula de diâmetro d , V_c é a velocidade crítica de sedimentação, valor referência obtido à partir da velocidade do fluxo hídrico no reservatório; X_c é a fração de partículas com velocidade de sedimentação inferior a V_c ; n é o número de intervalos X usados para calcular o integral da equação anterior

Sendo assim, pelo modelo proposto acima, é possível ter uma estimativa, além da quantidade de sedimentos retida no reservatório, a granulometria efluente dos mesmos, tendo como parâmetros de entrada a granulometria do material afluente, a vazão e a CSS contida no material escoado afluente ao reservatório.

A velocidade de sedimentação de uma partícula de diâmetro d foi calculada pela Equação de Stokes:

$$v = \left((13,95 \times \frac{w}{d})^2 + 1,09 \times \Delta \times g \times d \right)^{0,5} - 13,95 \times \frac{w}{d} \quad \text{Equação 52}$$

Sendo:

v = velocidade de queda da partícula ($m.s^{-1}$);

w = viscosidade cinemática ($m^2.s^{-1}$);

d = diâmetro da partícula (m);

Δ = densidade do sedimento ($T.m^{-3}$);

g = aceleração da gravidade ($m.s^{-2}$).

Sendo a viscosidade cinemática calculada pela Equação:

$$w = (1,14 - 0,031 \times (T - 15) + 0,00068 \times (T - 15)^2) / 10^6 \quad \text{Equação 53}$$

Porém, essa pesquisa objetivou elaborar um método de estimativa da dinâmica de distribuição dos sedimentos não-uniformes depositados no interior do reservatório, estimativa que não é possível pelo modelo proposto por Haan *et al.* (1994), pois o mesmo faz o balanço de sedimentos apenas comparando o padrão granulométrico dos que entram e saem do reservatório.

A metodologia proposta nessa pesquisa teve de ser aplicada em duas condições distintas: para o reservatório cheio e ocorrência de vertimentos, ou em condições de volumes inferiores sem retirada de água do reservatório, uma vez que a grande maioria dos

reservatórios de pequeno e médio porte não dispõem de dispositivos de regularização de vazões.

Para condição de reservatório cheio, foi aplicado o modelo proposto por Fifield *et al.* (2011). Segundo o pesquisador, o movimento de deposição de partículas pode ser descrito por atributos físicos Newtonianos, relacionados à vetores velocidades e peso de partículas. Porém, tais atributos não são capazes de descrever como partículas sedimentam em meios fluidos com determinada velocidade longitudinal de fluxo. Usualmente, é aplicada a teoria de Stokes nesses casos. Ainda segundo o pesquisador, a teoria de como o sistema, reservatório, é capaz de reter as partículas ainda é complexa. Sendo assim, partindo dos pressupostos acima, desenvolveu um set de equações visando estimar o movimento do sedimento, de forma simplificada, ao longo do reservatório.

O método é aplicado de acordo com as seguintes condições:

- 1 – Existência de fluxo laminar através do reservatório;
- 2 – Velocidade constante de fluxo;
- 3 – Temperatura de água constante.

O método se baseia no pressuposto de que uma partícula de determinado diâmetro percorre uma certa distância longitudinal ao longo do reservatório. Essa distância é determinada pela Equação 54 abaixo:

$$L = [(L/W) \cdot SA_m]^{0,5} \quad \text{Equação 54}$$

Onde:

L/W : relação comprimento-largura do reservatório;

SA_m : área superficial de cada partícula (m^2);

L : distância mínima percorrida por uma partícula de diâmetro d dentro do reservatório (m).

Quando não houver condições de se determinar a relação L/W , Goldman e Jackson (1986) sugerem uma relação de 10:1. A área superficial mínima de partícula (SA_m) pode ser calculada de acordo com a Equação 55 abaixo:

$$SA_m = Q_{in} \div V_s \quad \text{Equação 55}$$

Sendo:

Q_{in} = Vazão afluyente ($m^3 \cdot s^{-1}$);

V_s = velocidade de queda de partícula de diâmetro d ($m \cdot s^{-1}$).

A velocidade de queda para cada partícula foi determinada pela Equação de Stokes. Porém, é compreensível que as partículas vão se sedimentar no fluido ao longo do percurso compreendido entre um valor mínimo adotado e o comprimento de deposição L calculado através da Equação 54. Sendo assim, foi preciso elaborar um método de estimativa de deposição de determinada massa de sedimento de diâmetro d ao longo de seu percurso L .

Os métodos empíricos mais utilizados, Cristofano (1953), Borle e Miller (1958), Borle (1970), Rooseboom e Mulke (1982), Rooseboom e Annandale (1983), e Annandale (1984, 1985, 1987, 1996), tem a ideia central de que a deposição de sedimentos no reservatório é proporcional a um fator referente ao mesmo, forma, profundidade ou volume. Michalec (2015) desenvolveu uma relação empírica, baseado nas observações feitas por Rahmanian e Banihashemi (2012), utilizando a profundidade e o volume como fatores principais e concluíram que a distribuição de sedimentos é altamente proporcional à profundidade, e consequentemente, volume de uma determinada lâmina de água no reservatório. Sendo assim, o padrão de sedimentos depositados pode ser estimado apenas se baseando no volume de água de cada seção do reservatório.

Partindo do pressuposto abordado acima, a massa de sedimentos depositada correspondente a uma partícula de diâmetro d é proporcional ao volume de cada seção. Para tal, o açude foi dividido em 10 seções, conforme Figura 15, cada qual com 1/10 do comprimento total do rio principal, sendo a seção 1 mais próxima à entrada e a seção 10 a mais próxima a barragem do açude. De acordo com os dados de levantamento batimétrico do açude, foi possível, através de software especializado, descobrir o volume máximo referente à cada seção.

Foi então determinado um Fator de Volume (FV) para cada seção, Tabela 4, estabelecido como sendo a razão entre o volume da seção e o volume total do açude.

Tabela 4 - Fator de volume (FV) para cada uma das seções no Açude Escola

Seção	Volume (m ³)	FV
1	0,023	0,00000042
2	68,182	0,00122938
3	534,987	0,00964629
4	1341,826	0,02419430
5	2550,808	0,04599331
6	5894,231	0,10627816
7	7846,369	0,14147692
8	7218,148	0,13014954
9	13301,075	0,23983005
10	15450,857	0,27859251

Após conhecido o comprimento máximo alcançado por cada classe de partícula, e de posse dos valores mínimo e máximo de comprimento de cada seção, estabeleceu-se em quais seções estaria sendo depositada determinada partícula de diâmetro d , admitindo-se que a quantidade depositada é proporcional ao volume da seção. Então, a quantidade de sedimentos de diâmetro d depositado numa seção S do reservatório pôde ser determinada de acordo com a Equação 56:

$$M_i = M_T \times \frac{f_i}{\sum f_i^n} \quad \text{Equação 56}$$

Sendo:

M_i : Massa de sedimentos depositada na seção i ;

M_T : Massa total de sedimentos de classe d que entra no reservatório;

f_i : fator correspondente a seção i .

Ou seja, as seções de maior volume tendem a receber as maiores quantidades de sedimento de determinada classe.

Quando o reservatório estiver totalmente cheio, o modelo proposto por Fifield *et al.* (2011) é aplicado. Porém, o mesmo não é permitido em situações em que o reservatório não estiver cheio, devido, principalmente, ao fato de a relação L/W ser variável. Para isso, verificou-se a necessidade de elaborar um método de estimativa da distribuição granulométrica dos sedimentos depositados ao longo da seção longitudinal tendo como base os preceitos informados por Fifield *et al.* (2011).

Primeiramente, através da relação Cota-Área-Volume do Açude Escola, numa análise de série histórica, foi possível estimar a área de espelho d'água em determinado período,

como também o volume e comprimento de água correspondente (Figura 15). De posse do valor de comprimento, foi possível saber quantas e quais seções continham o açude num determinado período da série.

Estabeleceu-se que seções secas não podiam receber nenhuma carga de sedimento. O comprimento seco, ou seja, a parte do açude sem água foi calculada como sendo a diferença entre o comprimento total do açude, conhecido através de ferramenta de geoprocessamento, e o comprimento máximo do espelho d'água, estimado pelo procedimento informado acima. Conhecendo-se quais seções estavam contidas no reservatório num determinado período, a Equação 55 foi aplicada, obedecendo-se a condição que as seções são proporcionais umas com as outras.

Figura 15 - Ilustrativo das seções em que foi dividido o reservatório.

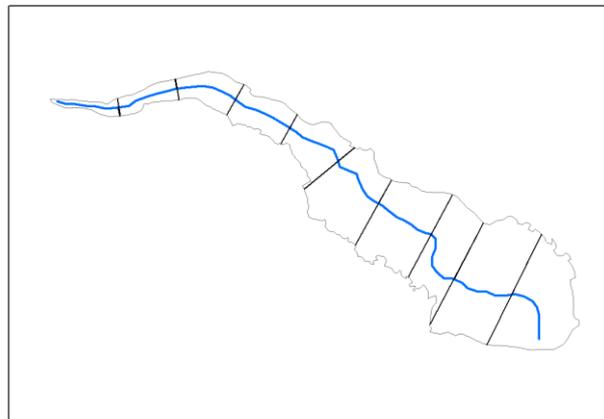
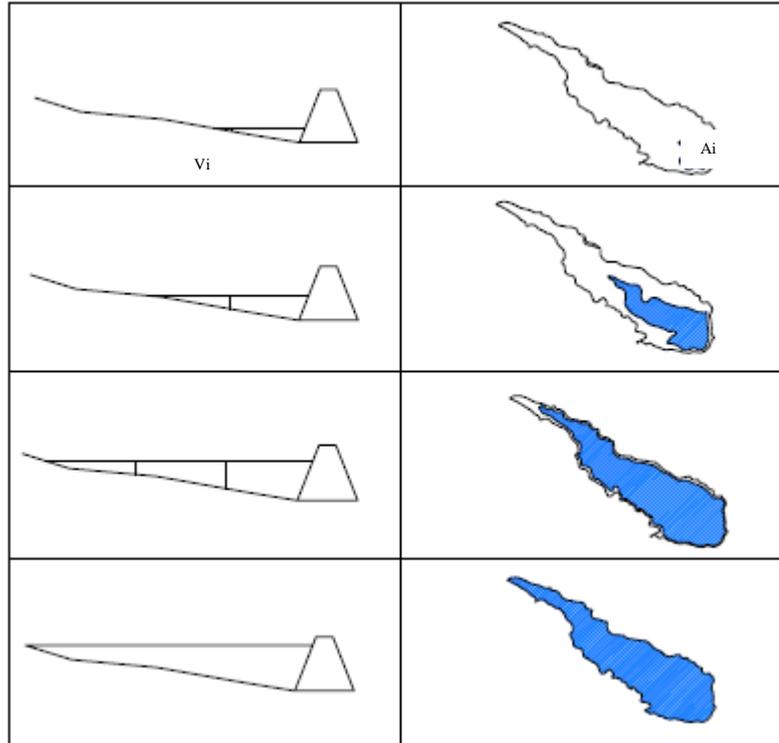


Figura 16 - Ilustrativo à respeito da variação de área, volume e comprimento de água no Açude Escola.



4.2.10 Análise estatística

Segundo Machado e Vettorazzi (2003) um importante critério estatístico para avaliar o ajuste de modelos é o coeficiente de Nash e Sutcliffe (NS), calculado por meio da equação 57:

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O - M)^2}{\sum_{i=1}^n (O - \bar{O})^2} \quad \text{Equação 57}$$

Onde:

O: valores observados;

M: valores modelados;

\bar{O} : Valores observados médios;

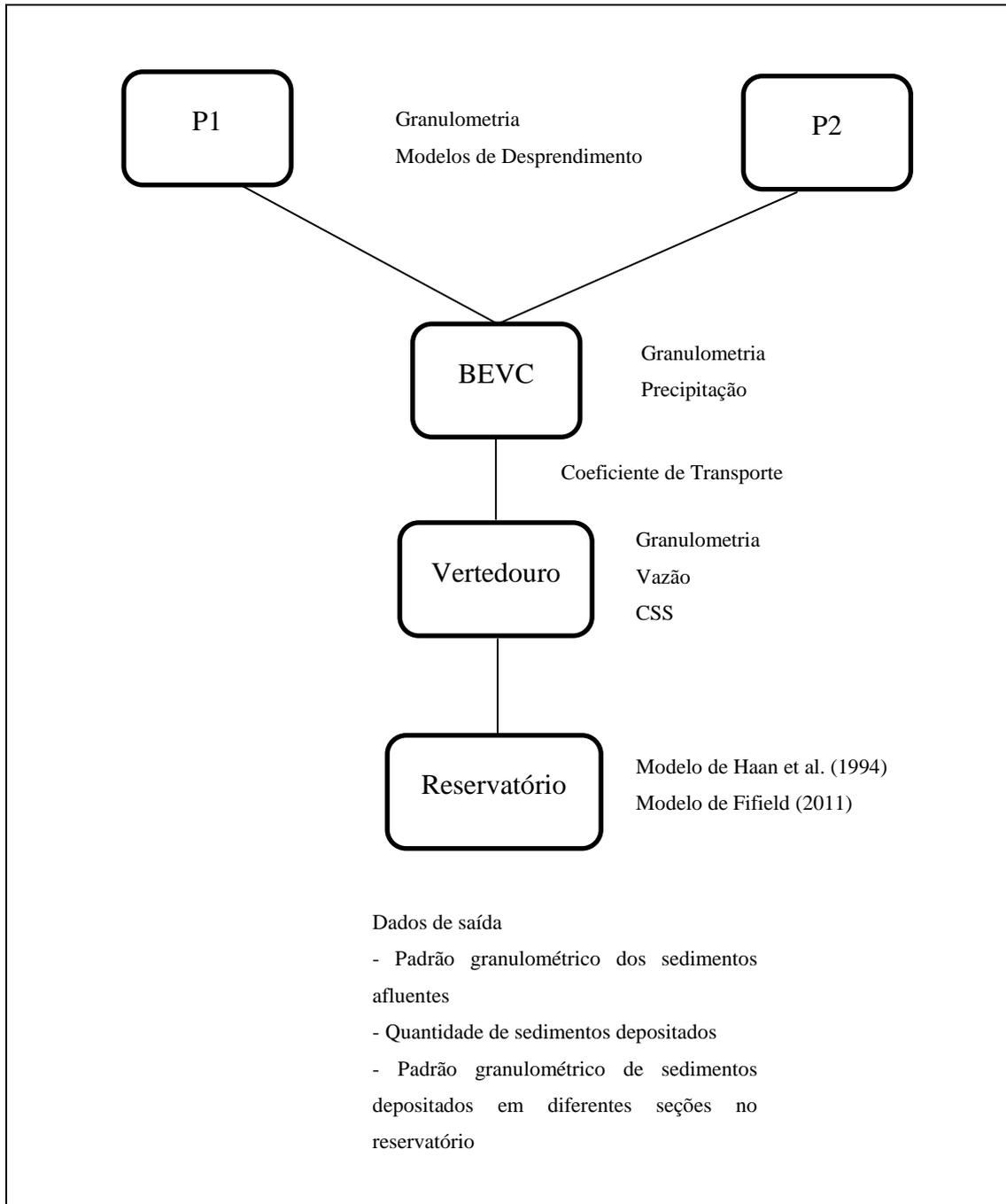
n: número de classes.

O coeficiente pode variar entre negativo infinito a 1, sendo que o valor 1 é o indicativo de perfeito ajuste (ASCE, 1993). Conforme Silva *et al.* (2008), se o valor de NS resultar em

maior que 0,75, o desempenho do modelo é considerado bom. Para valores de NS entre 0,36 e 0,75, o desempenho é considerado aceitável, enquanto valores de NS inferiores a 0,36 fazem com que o modelo seja julgado como inaceitável.

A Figura 17 abaixo mostra o fluxograma onde é possível se ter ideia de quais tipos de análise ou coletas foram feitas em determinados locais da BEVC.

Figura 17 - Fluxograma de locais e respectivas medições da BEVC.



CSS-concentração de sedimentos suspensos.

Tabela 5 - Descrição da instrumentação de monitoramento da BEVC

Tipo de dado	Local de instalação	Equipamento	Frequência	Tempo de observação	Fonte
Precipitação	MEVC	Pluviômetro Ville de Paris	Diária	Desde 2015	*
	BEVC	Pluviômetro Ville de Paris	Diária	Desde 2015	*
	Açude Escola	Pluviógrafo de báscula	5 min	A partir de 2016	*
	Bacia do Curú	Postos pluviométricos	Diária	Desde 1974	FUNCEME
Vazão	MEVC	Vertedouro misto	5 min	Desde 2015	*
	BEVC	Vertedouro triangular	5 min	Desde 2015	*
	Açude Escola	Vertedouro barragem	Evento	Sem registros	*
	Bacia do Curú	Postos fluviométricos	Diária	Desde 1966	ANA
Nível d'água	MEVC	Sensor HOBO + molinete	5 min	Desde 2015	*
	BEVC	Sensor HOBO + molinete	5 min	Desde 2015	*
	Açude Escola	Réguas linimétricas	Diária	Desde 2015	*
	Bacia do Curú	Réguas linimétricas	Diária	Desde 1968	COGERH
Concentração de sedimentos suspensos	MEVC	Amostrador DH-48	Evento	Desde 2015	*
	BEVC	Amostrador DH-48	Evento	Desde 2015	*
	Vertedouro Açude Escola	Turbidímetro	5 min	Sem registros	*
	Bacia do Curú	Amostrador DH-48	Evento	Desde 1968	*
Granulometria dos sedimentos suspensos	MEVC	Tube de remoção pela base	Evento	Desde 2015	*
	BEVC	Tube de remoção pela base	Evento	Desde 2015	*
	Vertedouro Açude Escola	Tube de remoção pela base	Evento	Sem registros	*
	Bacia do Curú	Tube de remoção pela base	Evento	Sem registros	*

a: Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME), Agência Nacional de Águas (ANA), Companhia de Gestão dos

Recursos Hídricos (COGERH); * : Dados serão obtidos durante a realização da projeto pelos pesquisadores envolvidos.

4.3 Resultados e Discussão

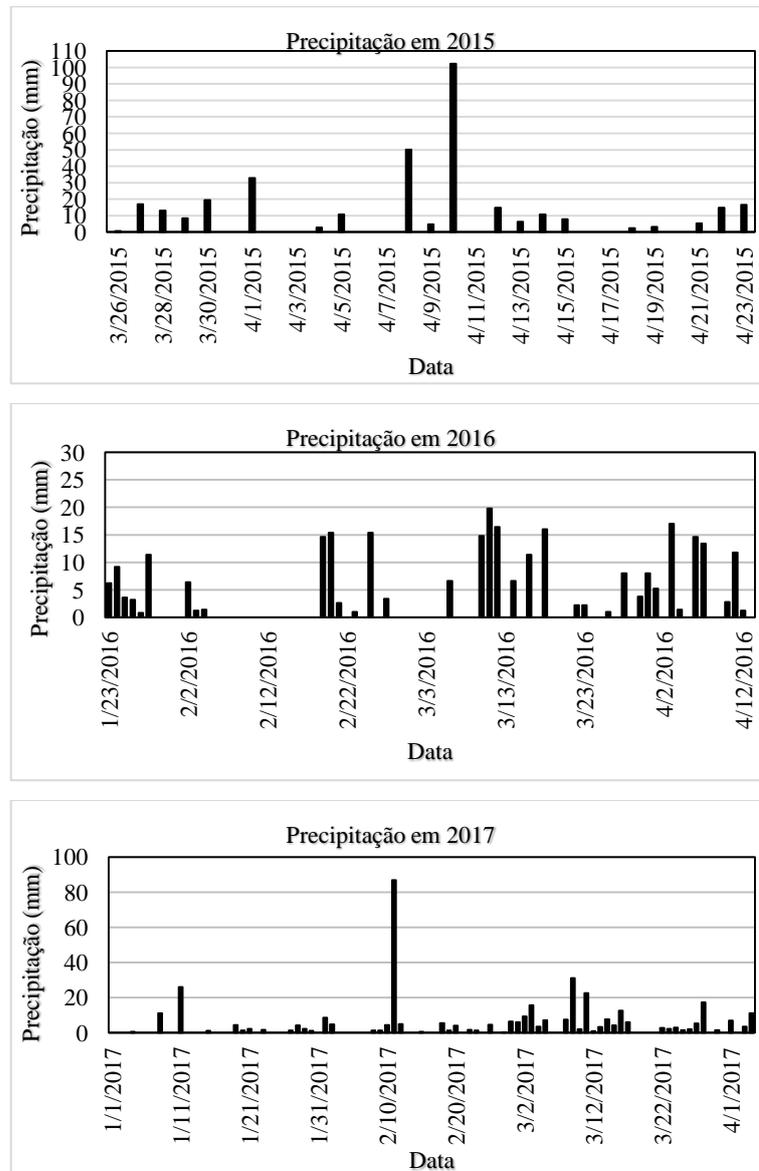
4.3.1 Síntese da precipitação e escoamento

Durante 3 anos de atividades de campo, no período de 2015 a 2017, a precipitação total foi de 329,70 mm, 462,20 mm e 572,3 para os anos de 2015, 2016 e 2017, respectivamente, com média de 454,73 mm, aproximadamente 43% abaixo da média histórica da região, 800 mm. Houve 125 eventos de precipitação, no qual 61 foram acima de 10 mm (48% do total precipitado no triênio), com máxima de 86,1 mm. Altura pluviométrica de 10 mm é um valor de referência sobre escoamento superficial em ambientes semiárido pelo fato de que dados de campo mostram que precipitações abaixo desse valor são altamente improváveis de gerar escoamento superficial.

Como pode ser visto na Figura 18, nos três anos de pesquisa, as chuvas se concentraram entre os meses de Janeiro e Junho. Tanto as baixas precipitações como o período de concentração das mesmas são típico do semiárido nordestino, com probabilidades maiores de geração de escoamento superficial nos meses de Março, Abril e Maio, devido aos maiores valores de precipitação e intensidade de chuvas.

Apesar da ocorrência de um número significativo de eventos chuvosos no período, apenas 15 eventos, 8 em 2015, 5 em 2016 e 2 em 2017, geraram escoamento superficial na BEVC, representando 12% do total precipitado. Contudo, apenas 4 eventos, no ano de 2015, geraram escoamentos que resultaram em aporte hídrico ao Açude Escola, os demais não tiveram volume suficiente para superar a cota mínima do vertedouro à montante do reservatório. Os coeficientes de escoamento variaram entre 0,2 e 4,8%. Segundo Medeiros e Araújo (2014), o escoamento superficial na Caatinga é intensamente concentrada em poucos eventos.

Figura 18 - Precipitações para os anos de 2015, 2016 e 2017.



Apenas no ano de 2016, com a instalação de um pluviógrafo de báscula, foi possível a verificação das intensidades das chuvas dos eventos registrados, conforme mostram a Tabela 6 e a Figura 19.

Figura 19 - Precipitações, e suas respectivas intensidades, ocorridas em 2016.

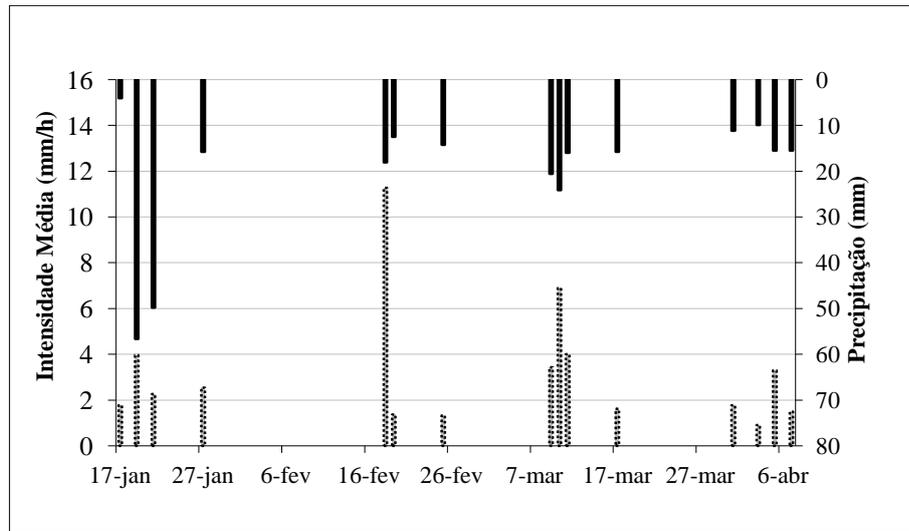


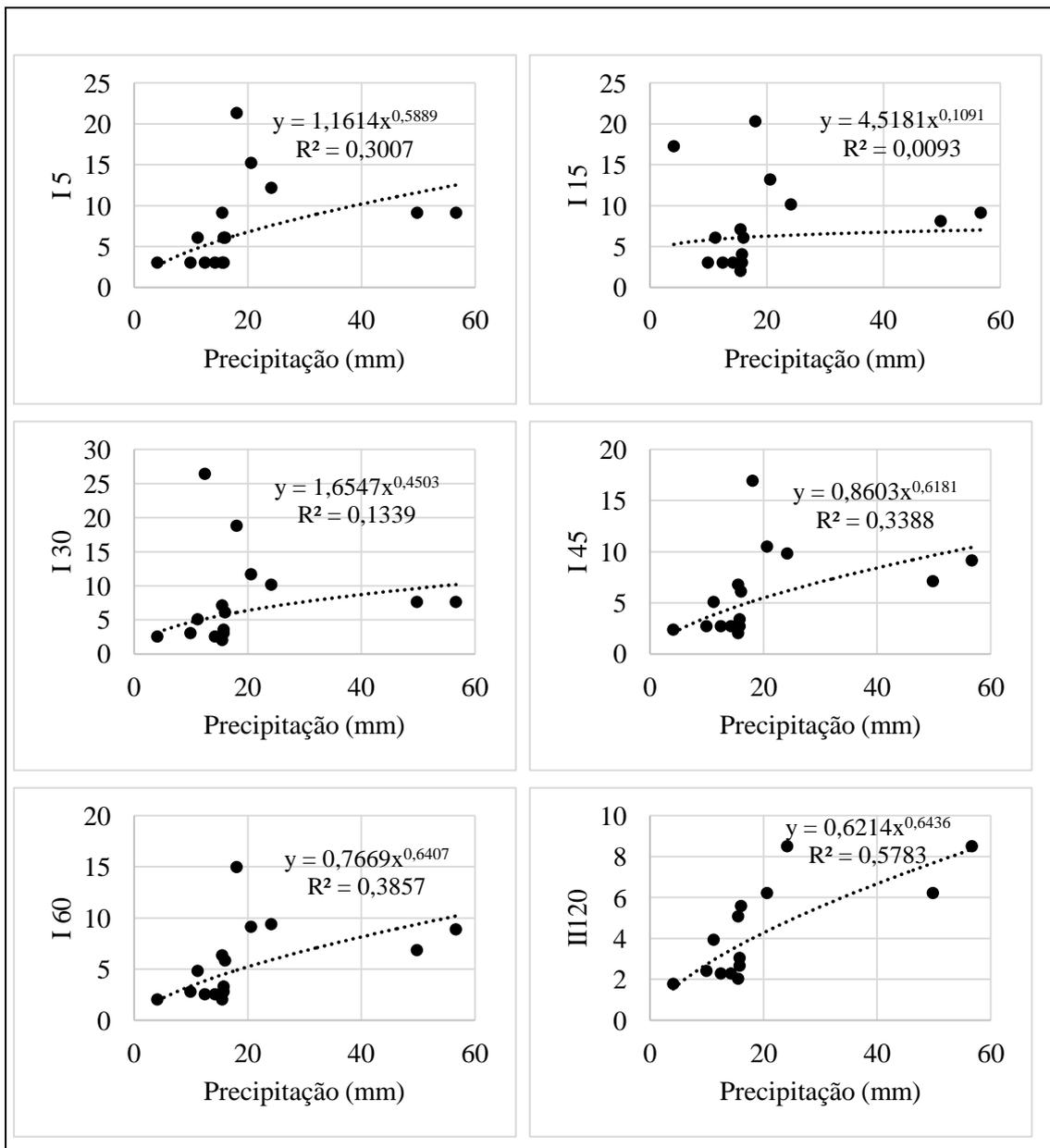
Tabela 6 - Intensidades das precipitações ocorridas em 2016.

Data	Duração (horas)	Precipitação (mm)	INTENSIDADE						
			I media	I5	I15	I30	I45	I60	I120
17/01/2016	2,30	4,06	1,77	3,05	17,27	2,54	2,37	2,03	1,78
19/01/2016	14,30	56,64	3,96	9,14	9,14	7,62	9,14	8,89	9
21/01/2016	22,00	49,78	2,26	9,14	8,13	7,62	7,11	6,86	6
27/01/2016	6,20	15,75	2,54	6,10	4,06	3,56	3,39	3,30	3
18/02/2016	1,60	18,03	11,27	21,34	20,32	18,80	16,93	14,99	
19/02/2016	9,10	12,45	1,37	3,05	3,05	26,42	2,71	2,54	2,29
25/02/2016	10,70	14,22	1,33	3,05	3,05	2,54	2,71	2,54	2,29
09/03/2016	6,00	20,57	3,43	15,24	13,21	11,68	10,50	9,14	6,22
10/03/2016	3,50	24,13	6,89	12,19	10,16	10,16	9,82	9,40	8,51
11/03/2016	4,00	16,00	4,00	6,10	6,10	6,10	6,10	5,84	5,59
17/03/2016	9,70	15,75	1,62	3,05	3,05	3,05	2,71	2,79	2,67
31/03/2016	6,30	11,18	1,77	6,10	6,10	5,08	5,08	4,83	3,94
03/04/2016	10,90	9,91	0,91	3,05	3,05	3,05	2,71	2,79	2,41
05/04/2016	4,70	15,49	3,30	9,14	7,11	7,11	6,77	6,35	5,08
07/04/2016	10,40	15,49	1,49	3,05	2,03	2,03	2,03	2,03	2,03

I5 = intensidade de 5 minutos, I15 = intensidade de 15 minutos, I30 = intensidade de 30 minutos, I45 = intensidade de 45 minutos, I60 = intensidade de 60 minutos, I120 = intensidade de 120 minutos.

Nenhuma correlação significativa foi observada entre precipitação e intensidade, como pode ser observado nos gráficos da Figura 20. Houve situações em que chuvas de alto valor pluviométrico tiveram baixas intensidades, como a ocorrida em 19/01/2016, 56,64 mm e 9,14 mm/h, de precipitação e intensidade para uma duração de 60 min, I60, respectivamente; como também situações de baixa pluviometria, 7,37 mm, e alto I60, 67 mm/h, em 16/01/2016

Figura 20 - Coeficientes de relação entre intensidades e precipitação.



Apesar do pouco número de eventos de precipitação, pôde-se observar que os eventos que produziram vazões afluentes ao açude estavam associados a chuvas superiores a 25 mm. Figueiredo *et al.* (2016) verificaram, em bacia experimental também do bioma Caatinga, que

10% do total precipitado num determinado período gerou escoamento superficial, 74% das chuvas geradoras de escoamento tinham precipitação acima de 10 mm, e que o coeficiente de escoamento médio da bacia em estudo foi de 0,44%. Araújo *et al.* (2006) avaliaram o coeficiente de escoamento em bacias de meso-escala no ambiente semiárido brasileiro e concluíram que o mesmo está na faixa entre 3 e 9%.

À título de informação, em 2015, os 4 eventos de escoamento mencionados acima foram responsáveis pelo aporte de 34.521 m³ ao açude Escola, o que corresponde a 66,8% da capacidade total do mesmo, que acumula 51 hm³. Um dos eventos, com precipitação superior a 80 mm, foi responsável por 90% do volume escoado no período, atestando que eventos de escoamento em ambiente semiárido pode, por vezes, serem concentrados em um pequeno número de eventos de precipitação.

4.3.2 Relação entre Vazão e Concentração de Sedimentos Suspensos (CSS)

As vazões afluentes ao Açude Escola, na seção onde está instalado um vertedouro triangular, resultantes de eventos chuvosos no ano de 2015, são apresentadas no Gráfico 1. Nos demais anos, 2016 e 2017, não foram registradas vazões significativas aportadas ao Açude Escola.

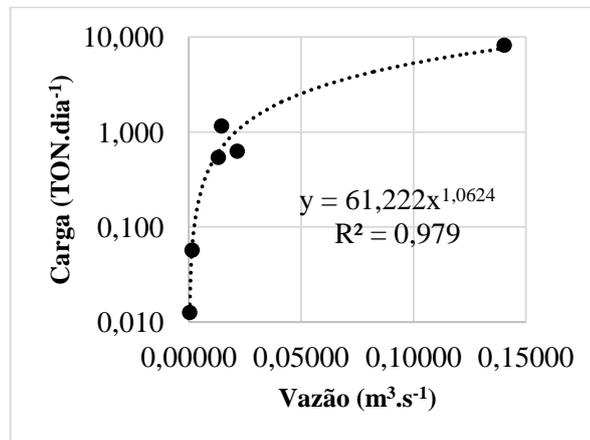
A Tabela 7 mostra uma síntese dos resultados de vazão e CSS dos eventos e amostras de escoamento afluentes ao açude. Os eventos ocorridos em 30/03, 04/04 e 08/04 provocaram picos de vazão de 94, 25 e 10 L.s⁻¹ para precipitações de 34,8, 27,5 e 28,5 mm, respectivamente. A maior precipitação ocorreu no dia 10/04, com total acumulado no dia de 80 mm, sendo responsável por promover um escoamento no vertedouro que ocasionou um pico de vazão de 8.050 L.s⁻¹, com uma média diária de 140,29 L.s⁻¹.

Tabela 7: Vazões e CSS de eventos de escoamentos afluentes ao açude.

Data	Vazão (m ³ .s ⁻¹)	CSS (mg.L ⁻¹)	Carga (ton.dia ⁻¹)
30/03/2015	0,00141	380,00	0,046
04/04/2015	0,00034	75,30	0,002
08/04/2015	0,01450	928,00	1,163
10/04/2015	0,14029	679,33	8,234
13/04/2015	0,01309	480,00	0,543
14/04/2015	0,02149	339,67	0,631

O Gráfico 1 abaixo mostra a Curva-Chave de sedimentos, que relaciona vazão e CSS, com os valores discriminados na Tabela acima.

Gráfico 1 - Curva-chave de sedimentos.



Carvalho *et al.* (2000a) destacam a dificuldade em se determinar a curva-chave de sedimentos, uma vez que a dispersão dos dados obtidos é grande. Para o mesmo valor de vazão líquida, a descarga sólida pode variar de 10 a 100 vezes. Gray e Simões (2008) ainda afirmam que a relação direta entre as descargas líquidas e sólidas em cursos d'água é raramente encontrada. A falta de sincronia entre os picos de vazões líquidas e concentração de sedimentos durante um evento de cheias é mais regra do que exceção. A alta correlação encontrada nessa pesquisa pode ser decorrente do pequeno número de amostras analisadas.

Andrade Neto *et al.* (2011), entretanto, relataram que a associação entre a vazão e a concentração de sedimento em suspensão, em pesquisa na Bacia Hidrográfica do rio Guaíba, Rio Grande do Sul, durante 4 anos, apresentou uma correlação significativa dos dados (95% de confiança). Isto leva a crer que o fator dominante na variação da concentração de sedimento suspenso foi a vazão. Rovira e Batalla (2006), explicam que o suprimento de sedimentos, a intensidade e distribuição espacial das chuvas, a quantidade e taxas de escoamento e as distâncias entre locais de enxurrada até os canais principais, também têm uma influência na concentração de sedimentos no fluxo do rio.

Outros fatores tais como características hidráulicas do canal, quantidade de sedimentos passíveis de erosão nas encostas e características fisiográficas da bacia tais como litologia, relevo, vegetação e topografia também podem influenciar na descarga de sedimentos. Luk *et al.* (1993) também destacam o tipo de material superficial e a umidade antecedente do solo.

Segundo Knighton (1998), é pouco provável que uma determinada vazão produza semelhantes descargas sólidas. Dessa forma, para uma mesma vazão pode-se obter diferentes valores de concentração de sedimento a depender do período e estação do ano. Tal situação provoca um comportamento conhecido como histerese, ou seja, para uma mesma vazão são obtidos diferentes valores de concentração de sedimento suspenso, mais precisamente, ao fenômeno de histerese significa um atraso na resposta sedimentológica em relação à resposta hidrológica do escoamento da bacia.

Essa relação é amplamente utilizada para a estimativa das concentrações de sedimentos ou descargas de sedimentos para períodos em que estão disponíveis dados de descarga líquida ou não estão disponíveis dados de sedimentos (COLBY, 1957 apud GRAY E SIMÕES, 2008). Porém, é importante frisar a dificuldade em se obter uma correlação significativa entre as descargas líquidas e sólidas em uma determinada bacia hidrográfica, visto que, para uma mesma vazão, pode-se ocorrer grandes variações nas concentrações de sólidos suspensos e tais variações também podem ocorrer no espaço temporal.

4.3.3 Geração de série sintética de vazões afluentes ao açude Escola

Para geração da série sintética de vazões afluentes ao açude Escola adotou-se o método do CN-SCS, com estimativa de valores de CN específicos para diferentes condições hidrológicas do solo. A condição 1 seria uma condição em que a precipitação acumulada durante os 5 dias anteriores à um determinado dia não ultrapassasse os 25,2 mm e a precipitação desse dia fosse menor do que 80 mm. A condição 2 seria uma condição em que a precipitação acumulada durante os 5 dias anteriores não ultrapassasse os 25,2 mm mas a precipitação fosse superior a 80 mm. A condição 3 seria uma condição em que o solo tivesse uma precipitação acumulada nos 5 dias anteriores entre 25,2 e 65,1 mm. E a condição 4 seria uma condição em que o solo tivesse uma precipitação acumulada nos 5 dias anteriores superior a 65,1 mm e precipitação acima de 80 mm. Todos os valores utilizados como referência, Tabela 8, foram considerados à partir da análise de dados pluviométricos e hidrológicos reais na BEVC.

Tabela 8 - Características de 6 eventos acontecidos em 2015.

Eventos	P (mm)	V (L)	Pe (mm)	C	S (mm)	CN	P.5 dias
30/03	34,8	121.400	0,12	0,3%	152,17	62,5	3,5
04/04	27,5	29.636	0,03	0,1%	127,69	66,5	8,2
07/04	28,5	25.396	0,03	0,1%	133,23	65,6	35,7
10/04	80,1	31.320.358	31,41	39,2%	71,84	78,0	65,3
13/04	7,7	271.994	0,27	3,5%	24,80	91,1	121,1
14/04	8,4	942.052	0,94	11,2%	18,57	93,2	102,4

P=precipitação, V=volume, Pe=precipitação escoada, C=coeficiente de escoamento, S=capacidade de armazenamento do solo, CN=Curva Number, P. 5 dias=precipitação acumulada em 5 dias anteriores.

Para cada evento de escoamento registrado, foi calculado seu respectivo valor de CN, como mostrado na Tabela 8 acima. Cada evento foi enquadrado numa das condições discriminadas anteriormente e calculado um CN médio para cada condição, discriminado na Tabela 9 abaixo.

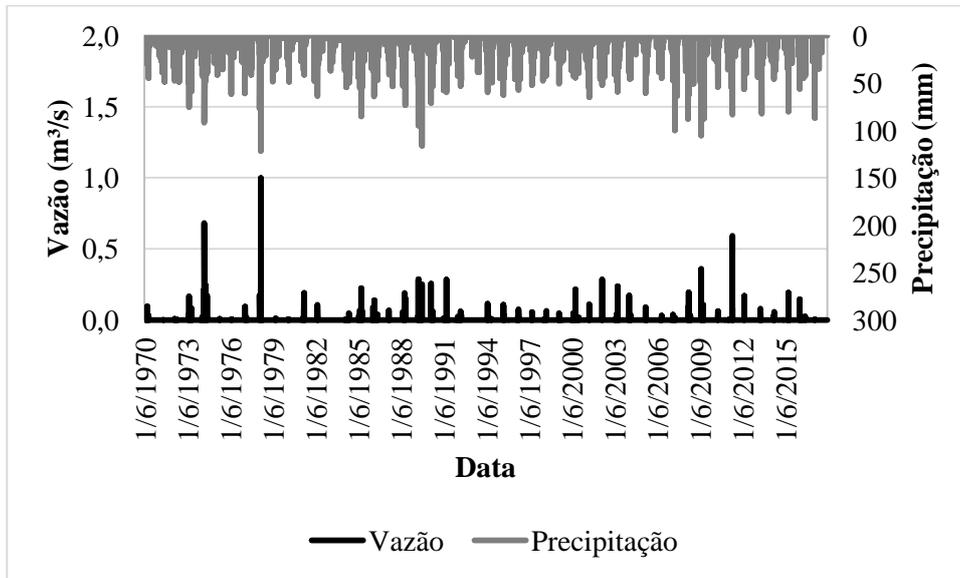
Tabela 9 - CN médio para cada condição escolhida.

Condição	CN
1	-
2	40,3
3	66,9
4	87,4

Os resultados do modelo hidrológico estão próximos aos valores encontrados por Araújo Neto *et al.* (2012), os quais encontraram valores de CN de 75,4 para ambientes de Caatinga nativa, 72,3 em Caatinga raleada e 88,5 em ambiente de pastagem. Figueiredo (2011) encontrou valor de CN de 78, também para vegetação Caatinga.

À partir dos valores estimados de CN, o modelo permitiu estimar as vazões ocorrentes para cada precipitação diária da série histórica. Os valores modelados de vazão são discriminados no Gráfico 2 abaixo.

Gráfico 2 - Precipitações e suas respectivas vazões, modeladas.



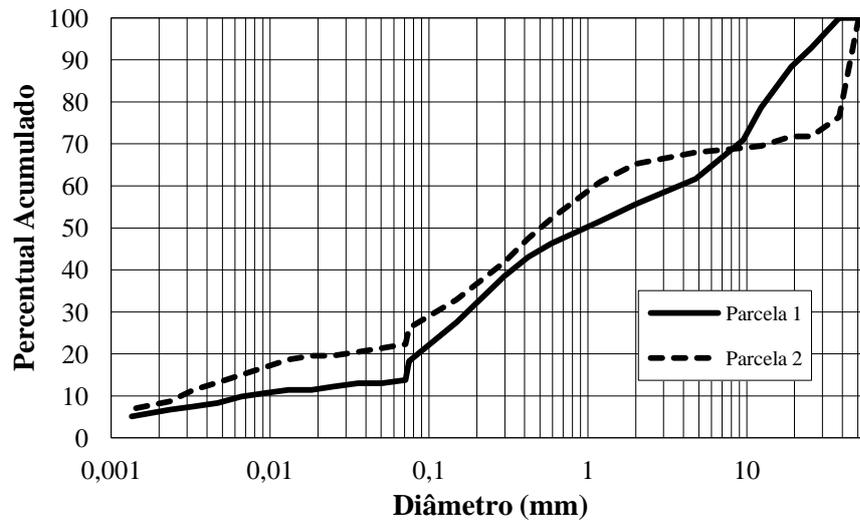
4.3.4 Análise granulométrica de sedimentos na BEVC

Caracterização granulométrica dos sedimentos erodidos sob diferentes tipos de coberturas vegetais

Como exposto na metodologia, duas Parcelas Wischmeyer foram instaladas em locais com características vegetacionais distintas de Caatinga, uma raleada (P1) e outra preservada (P2), com a finalidade de se observar se a cobertura vegetal poderia influenciar ou não no padrão granulométrico do sedimento desprendido e, conseqüentemente, erodido.

O Gráfico 3 abaixo mostra as curvas granulométricas do solo de ambas as parcelas. As curvas são bem parecidas, tanto P1 como P2 possuem uma textura arenosa, característica do solo da BEVC.

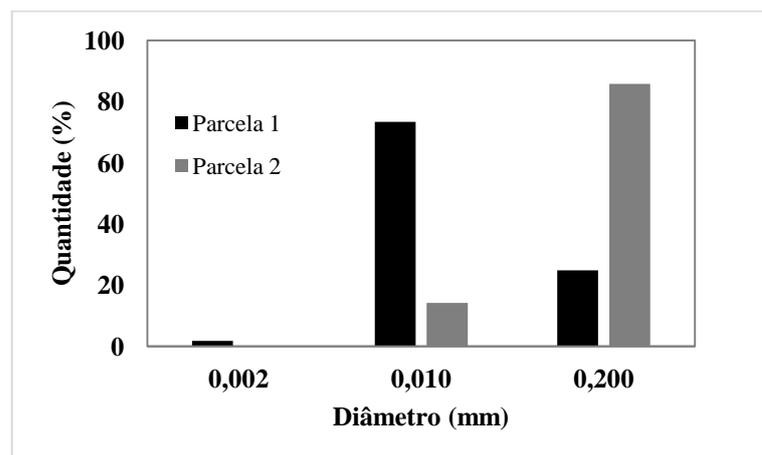
Gráfico 3 - Granulometria de solo das Parcelas Wischmeyer.



Parcela 1: caatinga raleada, Parcela 2: caatinga preservada

Analisando o Gráfico 4, percebe-se que a granulometria dos sedimentos escoados na P1, locada em ambiente de Caatinga raleada, comparada com a P2 locada em ambiente de Caatinga preservada teve característica mais fina, ou seja, maior predominância de argilas e siltes, principalmente quando se observa períodos próximos, P1 11/03/2016 e P2 10/03/2016.

Gráfico 4 - Padrão granulométrico dos sedimentos escoados nas Parcelas Wischmeyer.



A diferenciação no PSD (Padrão Granulométrico de Sedimentos Desprendidos) do solo em locais de diferentes coberturas vegetais é consequência da capacidade de interceptação da precipitação diferenciada para cada cobertura. A presença de vegetação amortece a energia de impacto da gota de chuva no contato com o solo, o que contribuirá para a redução da desagregação de partículas de sedimentos. Sendo assim, verificou-se uma

tendência que locais que contenham uma cobertura mais densa ou de maior porte entreguem um escoamento superficial de caráter granulométrico mais grosseiro.

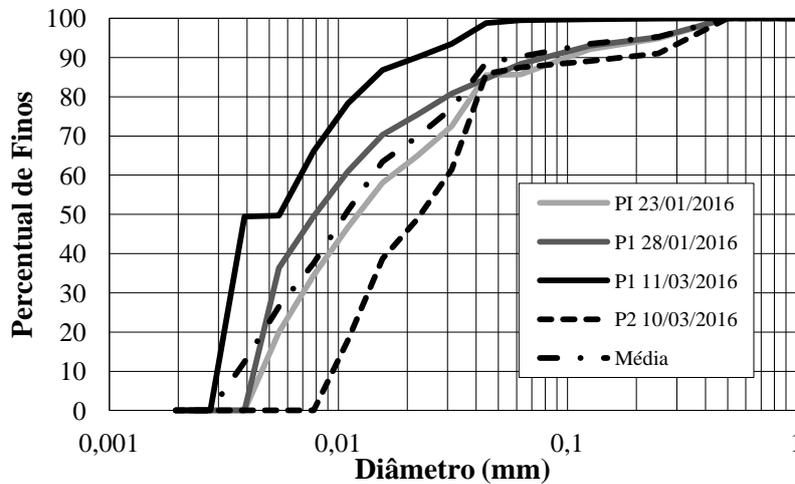
Pode-se verificar, na Tabela 10, abaixo os percentuais acumulados para cada classe granulométrica em diferentes períodos.

Tabela 10 - Padrão granulométrico dos sedimentos escoados nas parcelas em períodos distintos

Partícula (mm)	P1 23/01/2016	P1 28/01/2016	P1 11/03/2016	P2 10/03/2016	Média
< 0,002	0,4	1	1,8	0	0,7
0,002-0,01	45,7	60,1	73,2	14,3	49,2
0,01-0,2	53,9	38,9	25	85,7	50,1

O Gráfico 5 abaixo expõe as curvas granulométricas do escoamento das parcelas em determinados períodos.

Gráfico 5 - Curvas granulométricas do escoamento superficial das parcelas Wischmeyer em diferentes períodos.



Analisando os resultados granulométricos (Gráfico 5) para cada evento e parcela, verificou-se que há uma tendência de maior taxa de desagregação do componente do solo silte. Isso pode ser visto claramente na parcela P1 para o evento de 28/01/2016 e de 11/03/2016, as quais tiveram concentrações de silte no solo desprendido de 60,1% e 73,2%, respectivamente.

Segundo Megnounif *et al.* (2007) em regiões semiáridas, como no nordeste brasileiro, desprendimento de solo é particularmente consequência das altas precipitações num curto

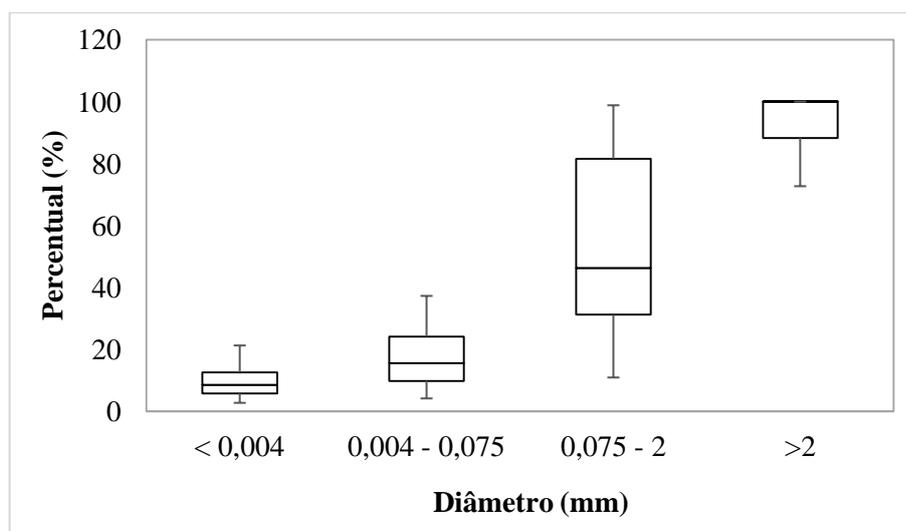
período de tempo e do solo exposto devido ao espaçamento da vegetação. O processo de seletividade de material desprendido de solo foi estudado também por Farmer (1973), Poesen e Savat (1981) e Issa *et al.* (2006), os quais demonstraram que há uma preferência dos materiais mais grosseiros do solo, devido à baixa coesão entre as partículas. Podwojewski *et al.* (2011) relataram diversas alterações na PSD em virtude de diferenciação na cobertura vegetal. Eles observaram que o aumento de cobertura vegetal potencializa a retenção de partículas mais finas do solo, pois esta atua como um filtro.

Matéria Orgânica e agregados também são fatores que dificultam essa desagregação e impedem que determinado componente do solo se desprenda da estrutura do mesmo e seja passível de erosão. A textura do solo pode afetar a estabilidade e a própria formação de agregados, e solos com maior teor de argila favorecem a agregação. Segundo Vezzani e Mielniczuk (2011), a maior presença de argila contribui para aumentar a aproximação das partículas do solo. De acordo com Santos *et al.* (2011), horizontes arenosos dificultam a proteção física da matéria orgânica, dificultando a formação de agregados (SILVA *et al.*, 2014).

A BEVC tem uma textura de solo de caráter arenoso, como mostrado no Gráfico 6, e, devido a isso, tem baixo índice de agregado. Em relação à matéria orgânica, Lourenço *et al.* (2017) analisaram as relações entre os teores de carbono orgânico no solo (COS) e os parâmetros umidade do solo e serapilheira em diferentes condições de Caatinga da BEVC durante quadra chuvosa. Os autores verificaram que o COS da bacia teve um valor médio de 2,24% e a umidade média foi de 6,61%.

Impacto da gota de chuva tem efeito maior no desprendimento de partículas do que o ocasionado pela tensão de cisalhamento do fluxo num solo pelo fato de que a energia inerente na gota de chuva, capaz de desagregar partículas, é maior do que a tensão de cisalhamento do fluxo superficial. Porém, esses valores se invertem durante o escoamento superficial, ou seja, o escoamento exerce mais influência no desprendimento do solo do que propriamente a gota da chuva (Warrington *et al.* 2009; Hudson, 1971; Young e Wiersma, 1973).

Gráfico 6 - Textura do solo da BEVC



Martinez-Mena *et al.* (1999), analisando a característica granulométrica do sedimento desprendido em ambiente semiárido sob chuva natural e dois tipos de cobertura vegetal, verificaram que a característica do sedimento em todos os eventos e condições de cobertura foi de caráter siltoso

Siltes são partículas facilmente transportáveis e dominam as concentrações no sedimento erodido; tem baixo poder de coesão entre partículas, o que deve beneficiar o seu desprendimento e transporte (Miller e Baharuddin, 1987; Rienzi *et al.* 2013; Wang *et al.* 2014; Nearing *et al.* 1991).

Segundo Gumiere *et al.* (2009), nas partículas mais grosseiras, o poder de desprendimento diminui com o aumento do tamanho da mesma, que está associado ao aumento da massa. Já para as menores partículas, o poder de desprendimento diminui com a diminuição do tamanho, o qual está associado ao aumento do poder de coesão entre elas (Farmer, 1973). Ou seja, solos com altos teores de argila e areia tem mais baixas taxas de erodibilidade quando comparados com solos com altos teores de silte.

Como mencionado anteriormente, o escoamento superficial também pode ser um fator erosivo devido à tensão de cisalhamento inerente ao mesmo. Sendo assim, locais com variadas taxas de escoamento, maior volume e velocidade de fluxo, tendem a ter padrões granulométricos de sedimentos também distintos. Afim de corroborar com os resultados acima mencionados e de se ter melhor clareza à respeito de como a cobertura pode influenciar nos totais de escoamento superficial e, conseqüentemente, o PSD, Gomes (2016) analisou o escoamento superficial da BEVC, verificando que a quantidade escoada em locais de caatinga

raleada chegam a ser 60% superior quando comparada à locais de caatinga preservada; no ano de 2016 as perdas de solo variaram da ordem de 0,0040 a 0,0070 ton.ha⁻¹ para parcela P1 e de 0,0004 a 0,0025 ton.ha⁻¹ para parcela P2. Ou seja, pelo fato da P1 ter uma quantidade de escoamento superior à P2, devido principalmente ao menor porte de cobertura vegetal, as tensões de cisalhamento erosivas na parcela P1 são maiores, capazes de desprender partículas mais finas do solo, mesmo estando ou não agregadas.

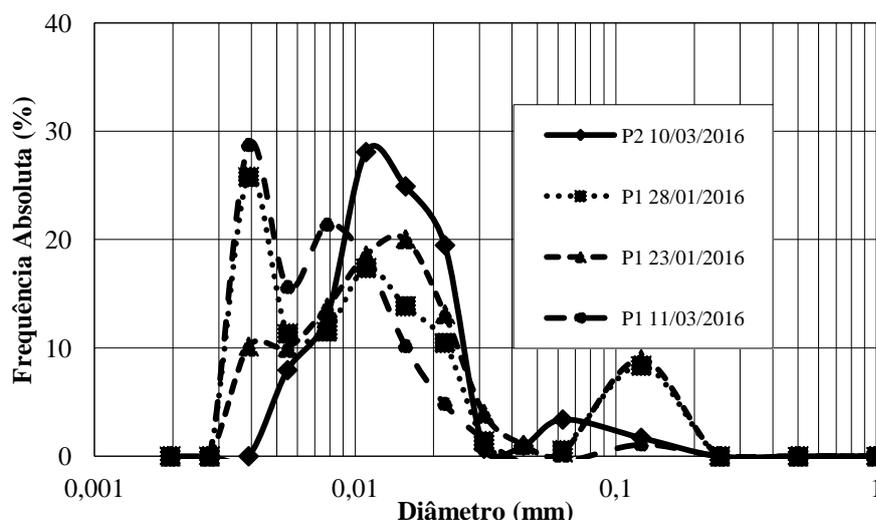
Albuquerque *et al.* (2005), em estudo semelhante realizado no semiárido paraibano, encontraram taxas médias de 0,10 ton.ha⁻¹ e de 0,41 ton.ha⁻¹ para caatinga nativa e caatinga nova (rebrotada), respectivamente. Lima *et al.* (2013), analisando as perdas de água e solo sob condições distintas de uso do solo no semiárido nordestino, verificaram que uma mudança na cobertura reduziu em 89% a perda de solo. Munoz-Robles *et al.* (2011) observaram controle de escoamento em áreas com maior cobertura herbácea no semiárido do sudeste da Austrália.

Caten *et al.* (2012) mostraram que um acréscimo de 16,2% na cobertura podem reduzir a erosão em até 44%. Este fato também foi evidenciado por Santos *et al.* (2011), identificando que quanto maior for a proteção ao solo por vegetação, menor serão as perdas de solo. Albuquerque *et al.* (2002), em estudos realizado em Sumé-PB, verificaram valores médios de escoamento de 2.250 Litros anuais em parcelas com cobertura de caatinga nativa preservada, e constataram que a mudança de uso aumentou em até 10 vezes esse valor.

Feitosa e Araújo (2016), avaliando a produção de água e sedimento em lotes de Caatinga raleada e preservada, verificaram maiores lâminas escoadas e quantidade de sedimentos na Caatinga raleada comparada com a preservada. Os pesquisadores evidenciaram a influência do raleamento sobre o comportamento hidrológico, fato também evidenciado por Bartley *et al.* (2006) e Rodrigues *et al.* (2013) que também investigaram a influência da cobertura vegetal sobre processos hidrológicos em microbacias.

O Gráfico 7 abaixo descreve as frequências absolutas dos sedimentos contidos no volume escoado nas parcelas, verificou-se, em todos, um comportamento bimodal. Foster *et al.* (1985) atentaram para tal acontecimento, afirmando que a distribuição granulométrica de sedimentos erodidos tendiam para um comportamento bimodal em muitos solos, com picos entre 0,02-0,06 mm e 0,2-1,0 mm. Fato que ocorreu também nos resultados encontrados por Hao *et al.* (2016), analisando a distribuição granulométrica de sedimentos erodidos em três distintos tipos de solo da China sob precipitação natural, os quais encontraram picos entre as classes 0,002-0,05 mm e 0,5-1,0 mm.

Gráfico 7 - Frequência absoluta das classes dos sedimentos erodidos.



É importante frisar que muitas pesquisas à respeito de PSD foram feitas em âmbito de laboratório com chuva simulada (Young, 1980; Alberts *et al.* 1983, Foster *et al.* 1985, Finkner *et al.* 1986; Meyer *et al.* 1992; Farenhorst e Bryan, 1995), como também algumas informações sobre caracterização granulométrica de sedimento erodido sob chuva natural tiveram suas amostras dispersadas para análise.

4.3.5 Variação temporal da granulometria

Walling e Webb (1982) alertaram que as concentrações de partículas podem variar entre eventos de escoamento em distintos períodos numa bacia. Períodos longos entre escoamentos podem ser tempo suficiente para que haja reestruturação do solo, principalmente se referindo aos sedimentos mais finos, argilas, aqueles mais passíveis de agregação. Se o período entre escoamentos não for muito extenso, a massa de sedimentos no fluxo anterior tende a ter menores concentrações de sedimentos quando comparado com o fluxo posterior, isso considerando que os fatores influenciadores continuem constantes.

Neste trabalho, pôde-se observar também uma notável diferença granulométrica numa mesma parcela, P1, em períodos distintos. Em 23/01/2016 e 28/01/2016, o padrão granulométrico do solo erodido nessa parcela apresentou uma tendência mais grosseira quando comparado com o padrão do solo erodido no evento do dia 11/03/2016, ou seja, a granulometria do sedimento no escoamento superficial tende a ficar com característica mais fina, maior presença de argilas, no decorrer dos eventos de escoamento na bacia. Os

resultados corroboram com os encontrados por Yuill e Nichols (2011), estudando o padrão granulométrico de transporte de sedimentos no semiárido do Arizona-EUA, os quais observaram uma tendência de aumento da concentração de sedimentos mais finos no decorrer da quadra chuvosa.

A provável explicação para tal acontecimento é que, no início da quadra chuvosa e primeiros escoamentos superficiais, há uma melhor estruturação do solo devido a baixa umidade do mesmo, consequência de meses de estiagem e nenhum escoamento superficial, aliado ao baixo teor de matéria orgânica e textura arenosa do solo, elementos que dificultam a retenção de água. Quanto mais estruturado o solo menor a possibilidade de erosão de partículas. As precipitações posteriores encontram um solo bem menos estruturado, passível de ser erodido.

Além do quesito estrutura do solo, os escoamentos também podem ter tido influência nessa variabilidade granulométrica, maiores escoamentos superficiais tem mais poder erosivo capaz de carrear ou desagregar partículas mais coesas no solo. Medeiros e Araújo (2013) afirmaram que escoamentos iniciais e lâminas baixas de escoamento (10 mm.ano^{-1} em média) têm limitada capacidade de transporte restringindo propagação dos sedimentos ao longo do sistema. Depois de sequências de chuvas ou durante eventos extremos, a alta capacidade de transporte é alcançada e o sedimento encontra condições adequadas para serem transportados.

Resultados contrários aos verificados nessa pesquisa foram encontrados por Alexandrov *et al.* (2003), os quais não apresentaram diferenças significativas entre o padrão granulométrico dos sedimentos desprendidos e os períodos de fluxo de escoamento. As contrariedades entre as pesquisas reforçam a ideia de que mais pesquisas devem ser feitas no que diz respeito a dinâmica de sedimentos em bacias.

Variações temporais na granulometria dos sedimentos suspensos foram também estudadas por Walling *et al.* (2000), também não encontraram diferenças estatísticas significantes, visto a variedade de descargas líquidas ocorrentes nas bacias. Segundo os autores, a composição granulométrica dos sedimentos suspensos é função da capacidade de transporte da bacia de contribuição ou fluxo hidráulico.

O padrão granulométrico de sedimentos também pode variar conforme as vazões recorrentes na bacia. Yuill e Nichols (2011) observaram um certo padrão quando compararam as concentrações de materiais finos e grosseiros com as vazões ocorrentes na bacia. Houve uma tendência de maiores concentrações de sedimentos finos antes da vazão de pico, porém não sendo verificada relação significativa entre a granulometria de sedimento e a descarga líquida. Em relação às frações mais grosseiras, houve uma forte tendência de suas

concentrações diminuam com o aumento da vazão. Os pesquisadores também afirmaram que a granulometria do sedimento erodido também pode interferir nos níveis de CSS (Concentração de Sedimentos Suspensos), devido ao fato de que classes granulométricas distintas possuem capacidades de transporte distintas. Segundo os pesquisadores, a CSS total do fluxo é mais relacionada com a concentração de materiais grosseiros. Porém, os resultados dessa pesquisa mostram que a CSS, assim como a vazão, não foi capaz de alterar significativamente a característica granulométrica do sedimento afluente ao reservatório.

Walling e Moorehead (1989) também notaram consideráveis variações na granulometria das partículas em suspensão em rios quando relacionou-as com as vazões dos mesmos. Houve casos em que as frações grosseiras aumentaram em quantidade quando houve aumento na vazão, casos onde não as frações mais grosseiras mais sim as mais finas sofreram aumento na sua quantidade quando houve aumento da vazão e casos onde as quantidades, tanto das frações mais finas quanto as frações mais grosseiras se mantiveram constantes, mesmo a vazão variando entre 10 e 160 m³.s⁻¹.

Essas movimentações de sedimentos pela bacia, fruto da erosão causada pela água, é a maior causa de degradação ambiental. Conhecer a variação espacial e temporal desses sedimentos é de suma importância em planos de manejo dos recursos hídricos e naturais. A precipitação influencia diretamente a variação temporal da erosão em curto intervalo de tempo (de horas a poucos anos), tem considerável efeito nos processos hidrológicos que influenciam na capacidade de transporte de partículas do solo (MEDEIROS e ARAÚJO, 2013). A região semiárida brasileira é caracterizada, segundo Torrico (1974), pela concentração de precipitações em curtos períodos com porções significativas de eventos de chuva ocorrendo em curtos intervalos. Tais afirmações levam a crer que, além do atributo solo como influenciador de variação de padrão granulométrico de sedimentos numa mesma área, as variantes nas precipitações podem ter influência significativa nesse quesito, visto seu poderio na capacidade de transportar partículas, como mencionado anteriormente.

Essa capacidade das chuvas em provocar erosão é denominada erosividade (EI₃₀ em Megajoules milímetro por hectare por hora). A fim de verificar se a precipitação foi um fator contribuinte para a variação granulométrica dos sedimentos escoados em diferentes períodos numa mesma área, o EI₃₀ foi calculado para cada uma das precipitações, através do método proposto por Wischmeier e Smith (1978) (Eq.57 e 58).

$$e = 0,119 + 0,0873 \cdot \log_{10} I$$

Equação 17

$$E = e \cdot P$$

Equação 18

Onde e é a energia cinética da chuva (megajoules por hectare por milímetro), I é a intensidade da chuva (milímetros por hora), E é a energia total do evento (megajoules por hectare), P é a lâmina precipitada do evento (milímetros).

O índice erosividade da chuva EI_{30} é o produto da energia cinética da chuva e a máxima intensidade em 30 minutos, durante o respectivo evento. Sendo assim, a Tabela 11 abaixo expõe os valores de EI_{30} para os eventos que tiveram amostragem de escoamentos na parcela P1 e que obtiveram curvas granulométrica distintas.

Tabela 11 - Precipitação do dia (P), I30 e erosividade da chuva (EI_{30}) para determinados eventos que tiveram amostragem de escoamento na parcela P1.

Dia	P (mm)	I30	EI30
23/01/2016	4,57	2,54	0,706
28/01/2016	15,75	3,56	2,631
11/03/2016	16,00	6,10	3,001

Pode-se verificar que o evento do dia 11/03/2016 teve um maior valor de EI_{30} e, analisando o PSD nesse período, o mesmo obteve uma característica mais fina, quando comparada com os eventos anteriores. Isso significa dizer que quão maior a erosividade da chuva maior seu poder de desprendimento e transporte de partículas pela bacia, levando a supor que as precipitações têm influência significativa no padrão granulométrico dos sedimentos erodidos numa bacia. Um fator limitante aqui é o pequeno número de dados amostrados, consequência de um período de estiagem que atinge o semiárido brasileiro; uma maior quantidade e dados possibilitaria uma visão mais clara à respeito da influência das precipitações na erosão.

Afim de corroborar com os resultados verificados nessa pesquisa como também esclarecer à respeito do poderio erosivo das chuvas, principalmente no nordeste brasileiro, Medeiros e Araújo (2013) avaliaram a variabilidade temporal das chuvas e seu efeito no processo de transporte de sedimentos em ambiente semiárido e concluíram que, nesse ambiente, eventos com alto poder erosivo ocorrem apesar dos baixos índices de precipitação; 10% dos eventos mais críticos são capazes de produzir entre 88 e 98% de todo o sedimento de um determinado período de estudo, segundo os pesquisadores.

4.3.6 Análise da aplicação de modelos de desprendimento de solo

Através dos modelos existentes na literatura e explicados na metodologia dessa pesquisa, foi possível elaborar uma estimativa da distribuição granulométrica dos sedimentos que se desprende do solo pela ação erosiva inerente tanto da gota de chuva quanto do escoamento superficial.

A análise da aplicação dos modelos propostos foi feita em 3 etapas:

- 1- Análise da aplicabilidade dos modelos com os dados texturais do solo da parcela P1;
- 2- Análise da aplicabilidade dos modelos com os dados texturais do solo da parcela P2;
- 3- Análise da aplicabilidade dos modelos com os dados texturais médios do solo matriz.

A justificativa para aplicação dos modelos em locais de características distintas é o fato de que tanto as parcelas quanto a bacia, tem aspectos texturais distintos. De acordo com Foster *et al.* (1981), a produção de sedimentos depende de fatores como topografia, solo, cobertura vegetal e características de chuva e escoamento, e ainda ressalta que o efeito desses fatores altera de estação para estação e evento pra evento. Assim sendo, entender o comportamento dos modelos em ambientes texturais de solo, coberturas vegetais e características de escoamento diferentes gera uma melhor clareza física do processo bem como abre um leque para posteriores discussões a respeito, por exemplo, da modelagem da dinâmica granulométrica de sedimentos em bacias de caráter degradada ou preservada.

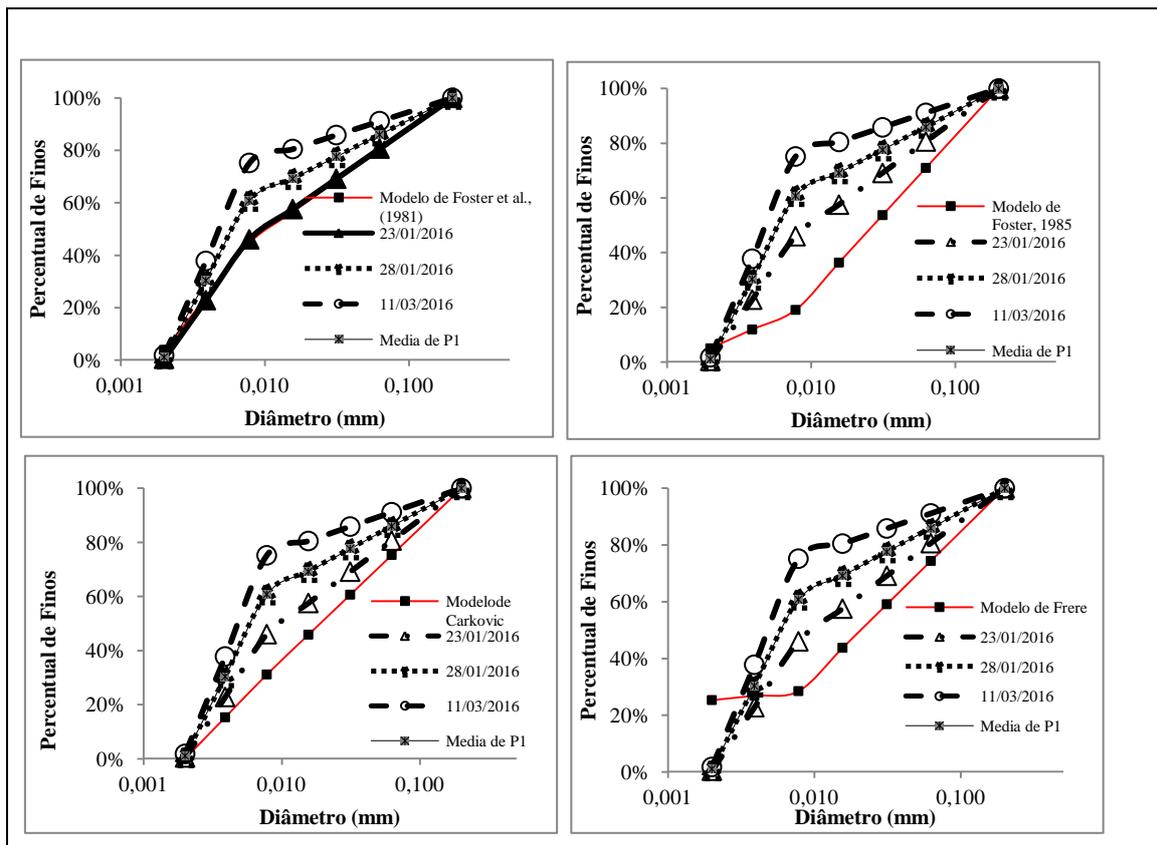
Parcela P1

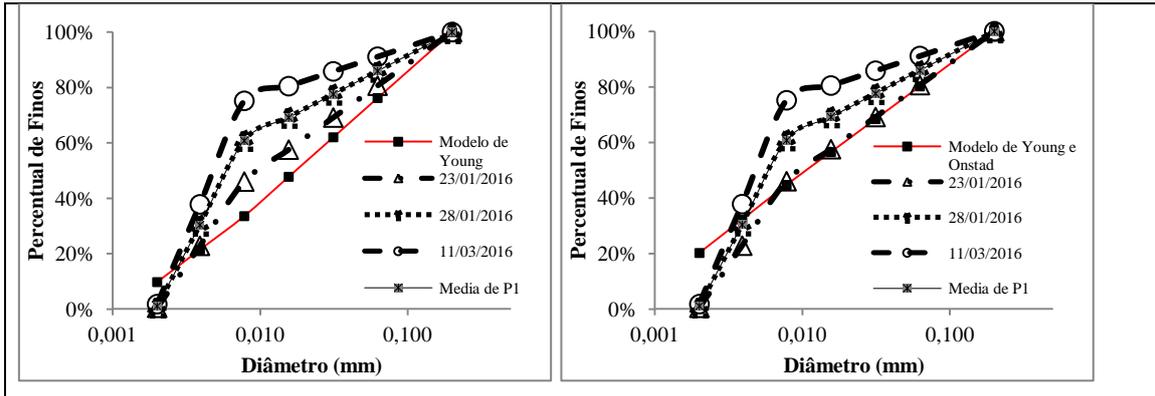
Para a referida parcela, a Figura 21 mostra os resultados dos modelos após aplicados. A análise mostrou que os modelos se mostraram discrepantes comparados uns com os outros, alguns previram com certa acurácia o Padrão de Sedimento Desprendido (PSD) nas amostras escoadas, como os modelos de Young (1980) e Young e Onstad (1971), com coeficiente de Nash e Sutcliffe (NS) de 0,76 e 0,87, respectivamente. Já o modelo proposto por Foster *et al.* (1985) obteve o menor valor de NS, 0,44. O modelo que previu com mais acurácia o PSD foi o modelo de Foster *et al.* (1981), com coeficiente de correlação de 0,92 e, conseqüentemente, menor RMSE, 0,09.

Na pesquisa desenvolvida por Carkovic *et al.* (2015), os resultados foram diferentes quando comparados ao modelo proposto por Foster *et al.* (1985). No âmbito dessa pesquisa, os resultados corroboraram com os encontrados pelos pesquisadores, atingindo coeficiente NS de 0,71.

De acordo com Young (1980), o desprendimento de partículas do solo dependem da textura, densidade e grau de agregação entre as partículas do solo. Foi destacado anteriormente que o sedimentos desprendidos tinham altas concentrações de silte. O autor destaca que solos com percentual de areia ou argila maiores que 50%, como no caso da BEVC, produzem sedimentos com altas concentrações de partículas de tamanho em torno de 50 μm , classe do silte. À título de informação, ainda segundo o autor, solos argilosos tendem a produzir, no escoamento, muito sedimento com tamanho maior do que 1.000 μm , isso devido ao alto poder de coesão entre as argilas, que faz com que o sedimento contido no escoamento esteja na forma de agregado. Já solos com teores de silte maiores que 33% tendem a produzir sedimentos com tamanho entre 20 e 35 μm .

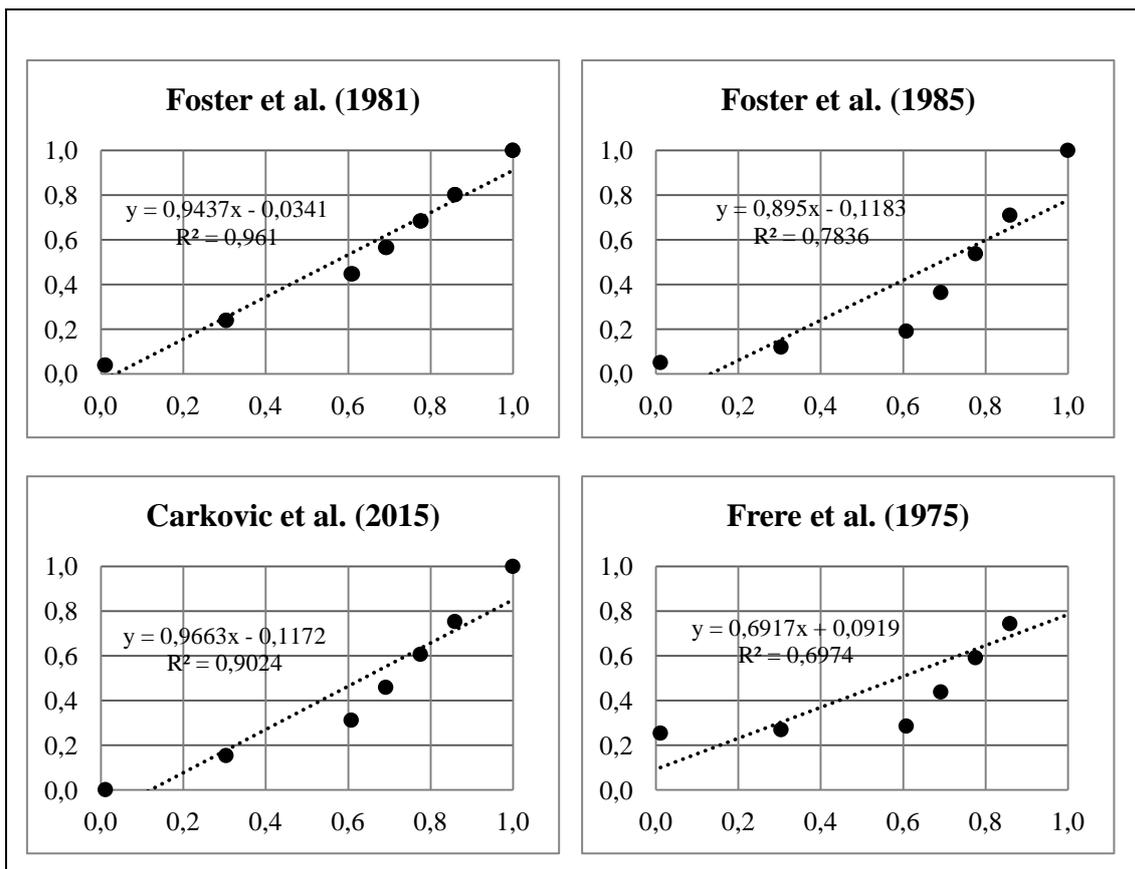
Figura 21 - Curvas granulométricas reais observadas dos sedimentos contidos nos escoamentos superficiais acontecidos na P1, curva granulométrica média da P1 e curvas obtidas através dos modelos propostos.

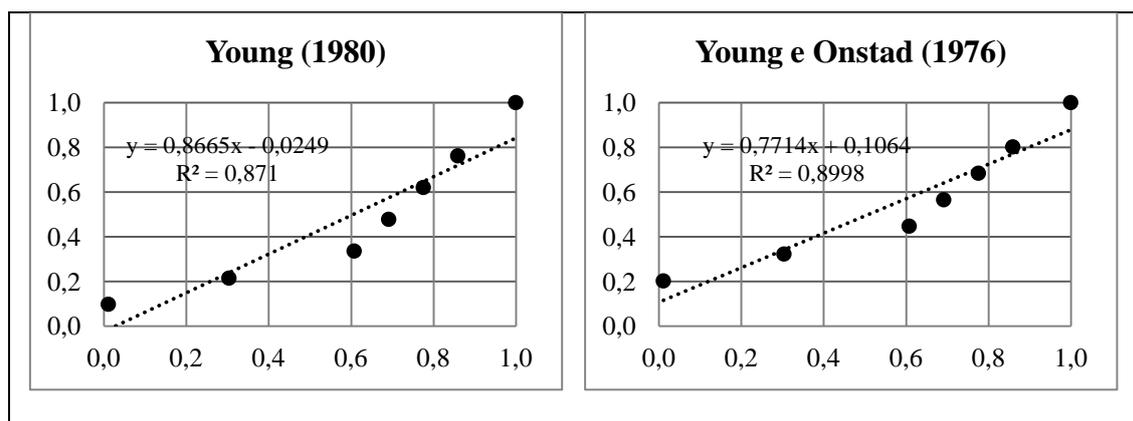




A Figura 22 abaixo mostra os coeficientes de determinação R^2 entre os valores modelados e observados.

Figura 22 - Coeficientes de correlação entre o modelado e o observado para os modelos avaliados.





A Tabela 12 abaixo dispõe os valores observados e modelados, pelos diferentes modelos testados nessa pesquisa, assim como os valores de NS para tais.

Tabela 12 - Valores de Coeficiente de Eficiência (E), ou Coeficiente de Nash e Sutcliffe, e Raíz do Erro Quadrático Médio (RMSE) gerais dos modelos avaliados.

Classe mm	Observado	Foster <i>et al.</i> 1985	Carkovic <i>et al.</i> 2015	Frere <i>et al.</i> 1975	Young, 1980	Young e Onstad 1976	Foster <i>et al.</i> 1981
0,002	0,011	0,051	0,001	0,254	0,098	0,202	0,039
0,004	0,304	0,120	0,153	0,269	0,214	0,322	0,239
0,008	0,608	0,191	0,312	0,285	0,336	0,447	0,447
0,016	0,691	0,364	0,459	0,438	0,478	0,565	0,565
0,031	0,776	0,538	0,606	0,591	0,620	0,684	0,684
0,063	0,859	0,710	0,753	0,744	0,762	0,802	0,802
0,200	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
E	-	0,44	0,71	0,61	0,76	0,87	0,92
RMSE	-	0,24	0,17	0,20	0,16	0,11	0,09

Parcela P2

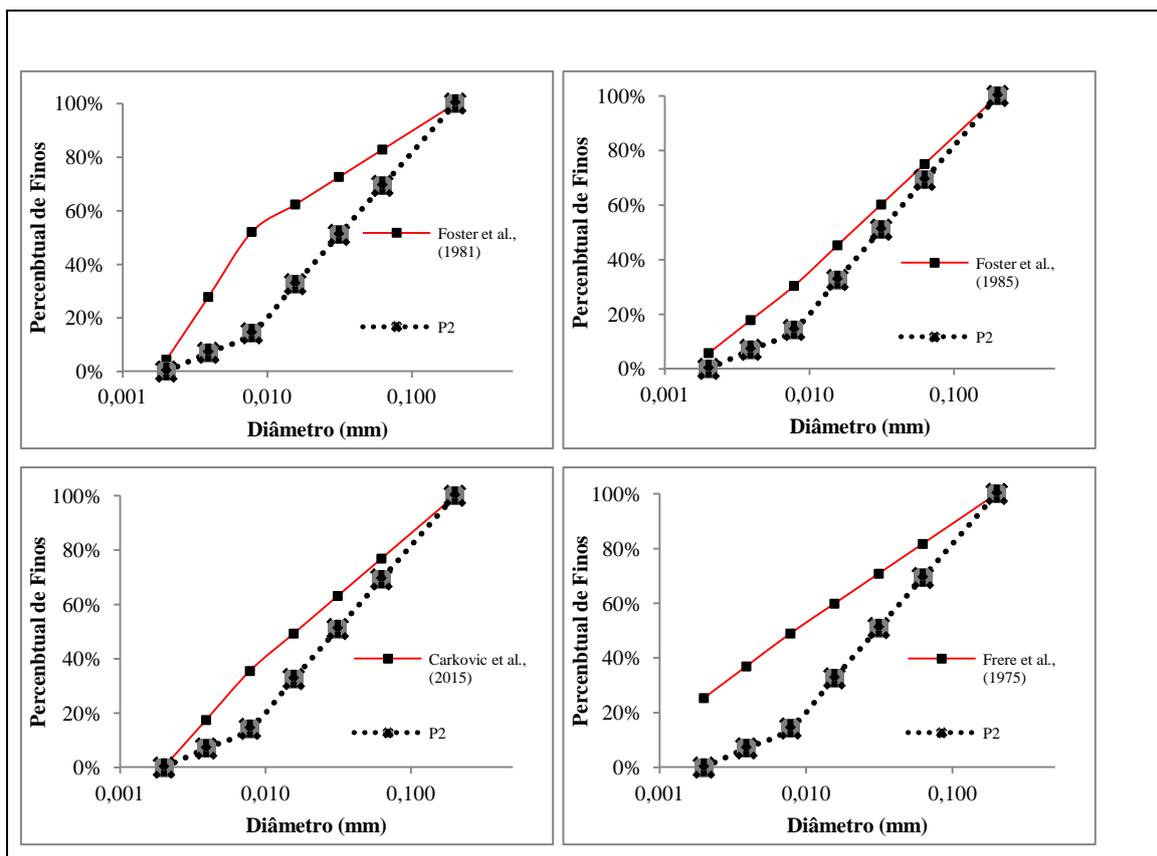
Para a referida parcela, a Figura 23 abaixo mostra os resultados dos modelos após aplicados. Como na parcela P1, alguns modelos previram com boa acurácia a PSD dos sedimentos contidos no escoamento superficial da parcela P2, com destaque para o modelo de Foster *et al.* (1985) e Carkovic *et al.*, (2015), que tiveram NS de 0,91 e 0,87, respectivamente. Ao contrário, o modelo de Young e Onstad (1971), com NS de 0,35.

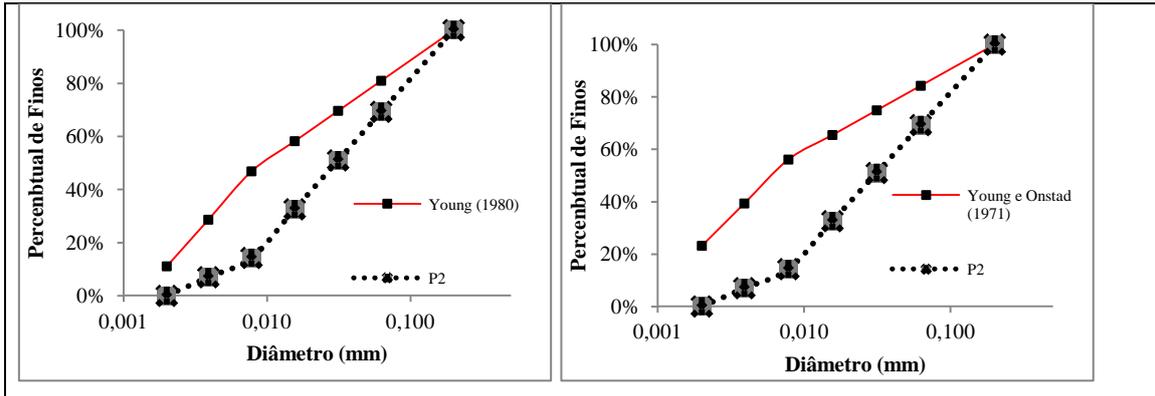
Nesse ponto, torna-se importante frisar as discrepâncias entre os modelos quando comparadas as parcela P1 e P2. O modelo de Foster *et al.* (1985) apresentou boa acurácia na

previsão do PSD da parcela P2 mas em relação a P1 seu comportamento se mostrou contrário com os menores valores de NS. Comportamento parecido com o modelo de Young e Onstad (1971), apresentando boa acurácia na PSD (Padrão granulométrico de sedimentos desprendidos) da parcela P1 mas comportamento contrário na PSD da parcela P2.

Visto que a parcela P2 tende a entregar, no fluxo de escoamento superficial, uma granulometria mais arenosa, como visto em tópico anterior, é provável que o modelo de Foster *et al.* (1985) tenha mais acurácia na PSD de fluxo de escoamento com característica mais grosseira; caso contrário do modelo de Young e Onstad, o qual seja provável ser mais acurado em prever PSD de fluxo escoado com característica mais fina.

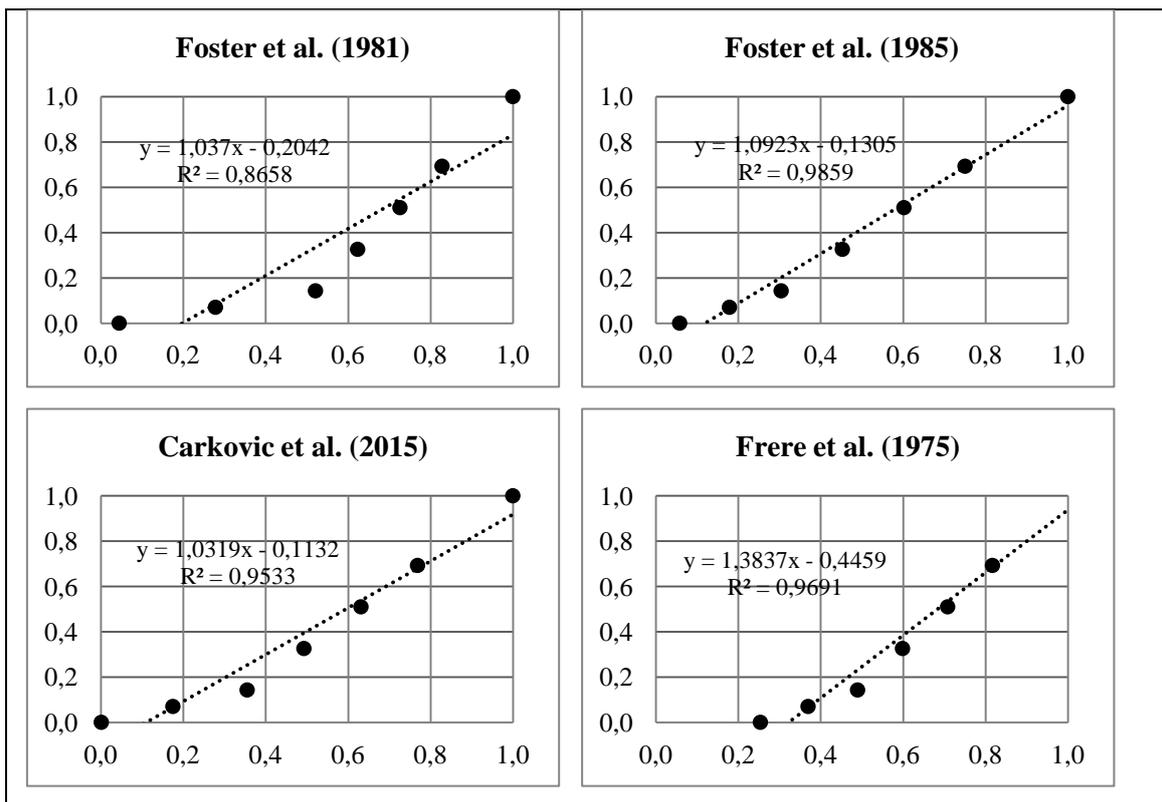
Figura 23 - Curvas granulométricas reais observadas dos sedimentos contidos nos escoamentos superficiais acontecidos na P2, curva granulométrica média da P2 e curvas obtidas através dos modelos propostos.

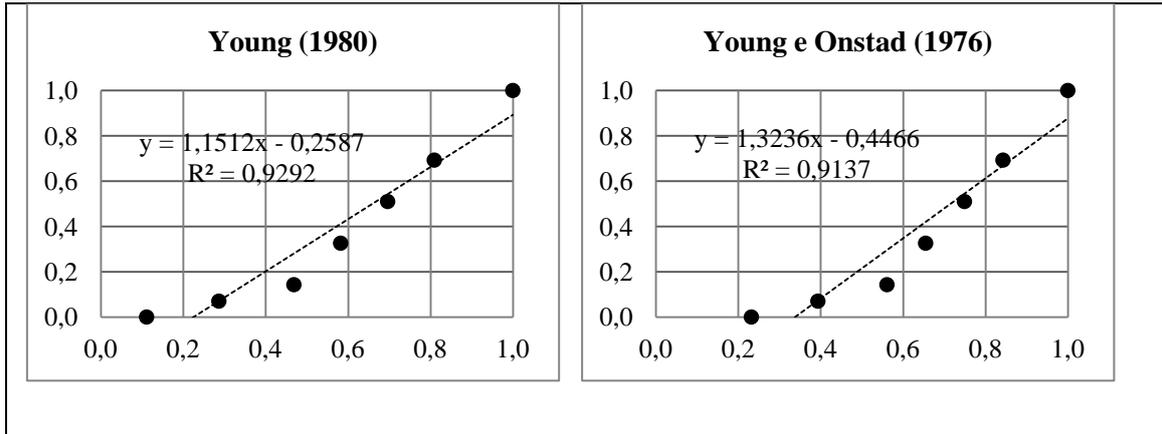




A Figura 24 abaixo mostra os coeficientes de determinação R^2 entre os valores modelados e observados.

Figura 24 - Coeficientes de correlação entre o modelado e o observado, na P2, para os modelos propostos.





A Tabela 13 abaixo dispõe os valores observados e modelados, pelos diferentes modelos testados nessa pesquisa, assim como os valores de NS para tais.

Tabela 13 - Valores de Coeficiente de Eficiência (E), ou Coeficiente de Nash e Sutcliffe, e Raíz do Erro Quadrático Médio (RMSE) gerais dos modelos avaliados na P2.

Classe mm	Observado	Foster <i>et al.</i> 1985	Carkovic <i>et al.</i> 2015	Frere <i>et al.</i> 1975	Young, 1980	Young e Onstad 1976	Foster <i>et al.</i> 1981
0,002	0,000	0,058	0,001	0,254	0,111	0,232	0,044
0,004	0,070	0,179	0,175	0,370	0,287	0,393	0,278
0,008	0,143	0,304	0,355	0,490	0,469	0,561	0,521
0,016	0,326	0,453	0,493	0,599	0,582	0,655	0,623
0,031	0,510	0,602	0,631	0,708	0,696	0,749	0,726
0,063	0,693	0,751	0,769	0,817	0,809	0,843	0,828
0,200	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
E	-	0,91	0,87	0,49	0,65	0,35	0,57
RMSE	-	0,10	0,12	0,24	0,20	0,27	0,22

Bacia

Nessa etapa, o desempenho dos modelos de desprendimento foi analisado à partir da textura média do solo da BEVC (Gráfico 9), que, como foi dito na metodologia, foi feita à partir da análise de 25 amostras coletadas na bacia, os resultados modelados foram comparados com os observados, obtidos à partir da média do PSD das amostras coletadas nas parcelas. O objetivo de se ter uma média granulométrica dos sedimentos escoados é que, em escala de bacia, sob condições fisiográficas diversas, principalmente no quesito cobertura vegetal, objeto de análise nesse ponto da tese, há uma homogeneização dos sedimentos no volume escoado. Os resultados podem ser observados na Figura 25.

Sob as condições dispostas acima, o modelo de Foster *et al.* (1981) apresentou os melhores resultados ao prever o PSD da BEVC como um todo, obtendo NS de 0,99. Os modelos se comportaram relativamente bem, Carkovic *et al.* (2015), Young (1980), Young e Onstad (1976) e Frere *et al.* (1975) obtiveram NS de 0,95, 0,90, 0,90 e 0,88, respectivamente. O modelo que previu com menos acurácia o PSD da bacia foi o de Foster *et al.* (1985), o qual obteve NS de 0,65.

Gráfico 8 - Curva granulométrica média do solo da BEVC.

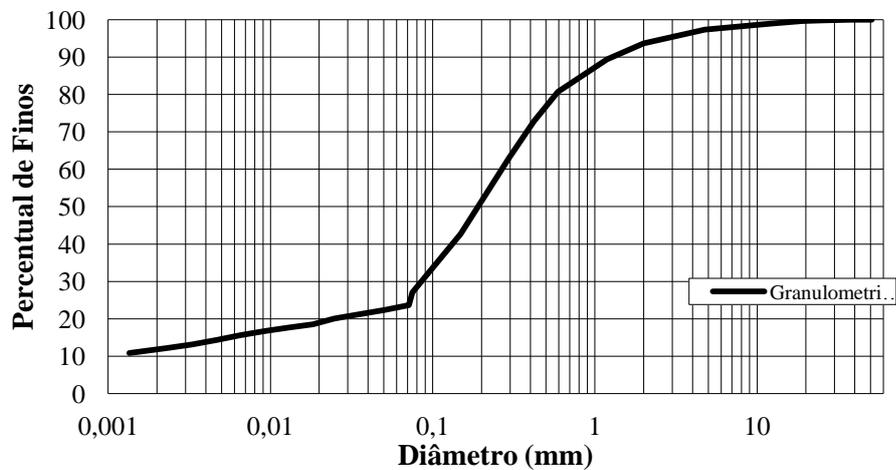
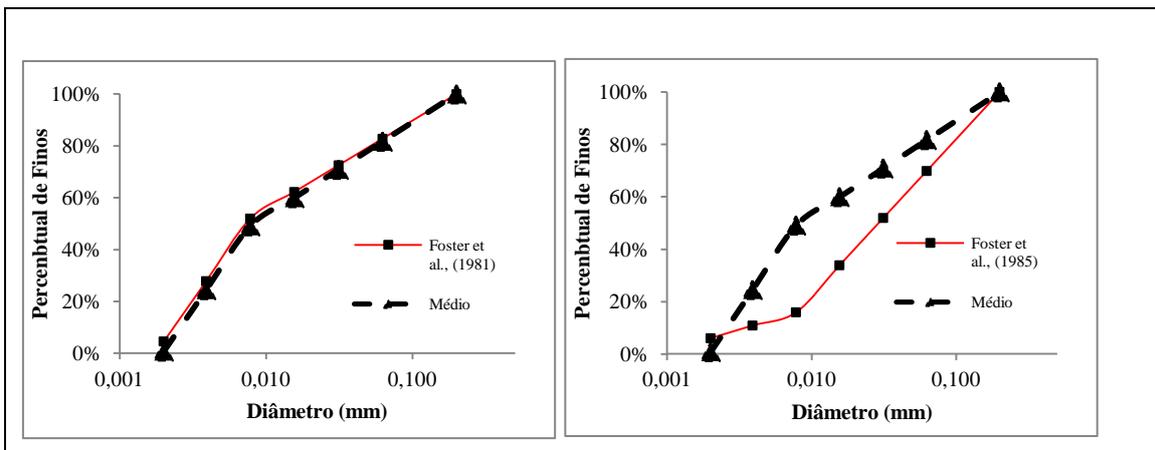
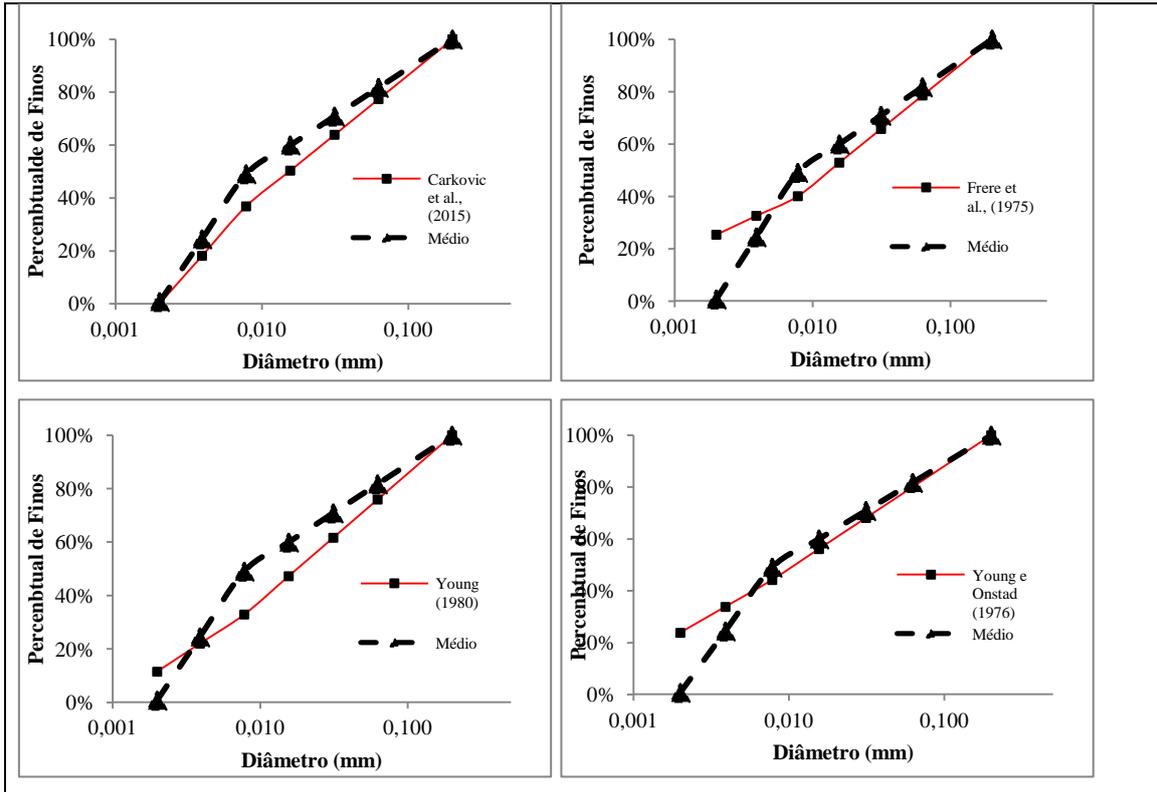


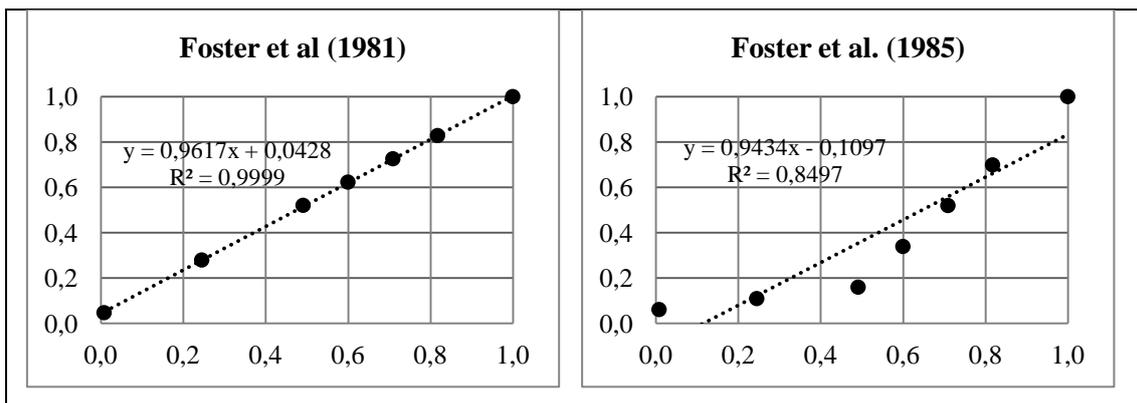
Figura 25 - Curva granulométrica média real observada nos sedimentos contidos nos escoamentos superficiais acontecidos na BEVC e curvas obtidas através dos modelos propostos.

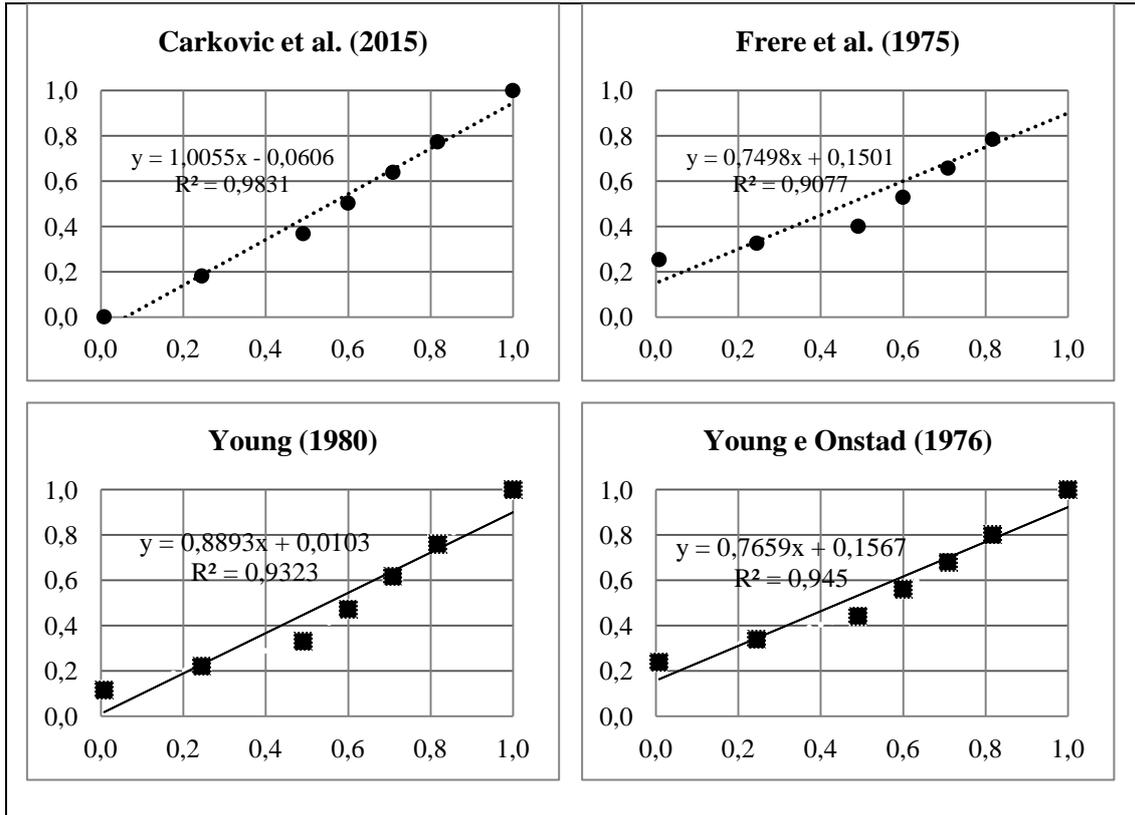




A Figura 26 abaixo mostra os coeficientes de determinação R^2 entre os valores modelados e observados.

Figura 26 - Coeficientes de correlação entre o observado e o modelado





A Tabela 14 abaixo dispõe os valores observados e modelados, pelos diferentes modelos testados nessa pesquisa, assim como os valores de NS para tais.

Tabela 14 - Valores de Coeficiente de Eficiência (E), ou Coeficiente de Nash e Sutcliffe, e Raíz do Erro Quadrático Médio (RMSE) gerais dos modelos avaliados.

Classe mm	Observado	Foster <i>et al.</i> 1985	Carkovic <i>et al.</i> 2015	Frere <i>et al.</i> 1975	Young, 1980	Young e Onstad 1976	Foster <i>et al.</i> 1981
0,002	0,008	0,060	0,001	0,254	0,115	0,238	0,046
0,004	0,245	0,108	0,181	0,326	0,220	0,338	0,279
0,008	0,491	0,159	0,368	0,401	0,329	0,442	0,520
0,016	0,600	0,338	0,503	0,529	0,473	0,561	0,623
0,031	0,709	0,519	0,639	0,657	0,617	0,681	0,726
0,063	0,817	0,698	0,774	0,785	0,760	0,800	0,828
0,200	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
E	-	0,64	0,95	0,88	0,90	0,90	0,99
RMSE	-	0,19	0,07	0,11	0,10	0,10	0,02

Verificou-se nos resultados que os modelos de Foster *et al.* (1981) e Foster *et al.* (1985) se comportaram de maneira distinta nas três situações estudadas, P1, P2 e Bacia. O primeiro foi construído para ser utilizado em diferentes situações, tendo como base os

preceitos da USLE (Equação Universal de Perda de Solo), sem calibração e coleta de dados para determinação de parâmetros e foi desenvolvido como proposta para ser componente do modelo CREAMS (USDA, 1980). Já o segundo, foi construído à partir de 28 dados reais de granulometria de solo desprendido em diferentes locais e ambientes dos EUA. Assim como os modelos propostos por Foster, os propostos por Young e Onstad (1976) também tiveram discrepâncias de resultados quando aplicados sob condições distintas de cobertura vegetal. Alguns atributos de solo podem explicar tais variabilidades entre eles, segundo os próprios pesquisadores, variações na área superficial específica devido aos vários tipos de argilas encontradas, susceptibilidade do solo à erosão e conteúdo de matéria orgânica. Notáveis variações nesses atributos podem ocasionar variações de resultados quando aplicado o modelo.

Observou-se que, apesar do pouco número de amostras de escoamento, o PSD tem característica mais fina, ou seja, maior predominância de siltes e argilas, do que o solo matriz, o que corrobora com os resultados encontrados por Martinez-Mena *et al.* (2002), em estudo realizado do semiárido do mediterrâneo, os quais analisaram as características granulométricas do sedimentos erodidos sob diferentes intensidades de chuva simulada em dois tipos de solo, constataram que o sedimento erodido tinha sempre característica mais fina que o solo matriz, independente da intensidade e do tipo de solo.

Também corrobora com os resultados encontrados por Deizman *et al.* (1987) que conduziu um experimento a fim de avaliar o PSD, usando chuva simulada de 50 mm.h^{-1} , em parcelas de declividade entre 8,5 e 9,7%. Os resultados mostraram que a quantidade de chuva, declividade, umidade do solo e textura não dispersada do solo matriz explicavam a variação no PSD. Gabriels e Moldenhauer (1978) conduziram uma série de experimentos em quatro tipos e solo usando chuva simulada de $63,5 \text{ mm.h}^{-1}$ durante 90 minutos para avaliar o efeito da textura e intensidade de chuva no PSD. Eles encontraram que o PSD teve altas porcentagens de partículas com diâmetro em torno de 0,05 mm em declividades menos pronunciadas.

Os resultados dessa pesquisa contrariam os encontrados por Meyer *et al.* (1980 e 1986) os quais observaram que a granulometria do solo desprendido foi similar à do solo matriz, porém com textura levemente mais grosseira do que o solo matriz, o PSD não apresentou diferenças significativas quando foi relacionada com a intensidade da chuva. A explicação para o fato, segundo os pesquisadores, foi a alta quantidade de agregados no solo erodido; o solo matriz tinha conteúdo de argila superior a 50%, fato que dificulta o desprendimento das partículas do solo e, conseqüentemente, sua mobilidade.

4.3.7 Análise da aplicação de modelo de transporte de sedimento desprendido até o exutório

Barfield *et al.* (1979) admitiram que os padrões granulométricos dos sedimentos desprendidos (PSD) e transportados (aqui denominados PSE, por fazer referência ao padrão granulométrico do sedimento que chega no exutório) da bacia dependiam, exclusivamente, das taxas de transporte de sedimentos para determinada localidade, ou seja, o SDR.

Nesta tese, aplicou-se a teoria proposta por Barfield para estimativa do PSE à partir do PSD médio observado nas amostras escoadas das parcelas. Admitiu-se um SDR de 7,3%, valor encontrado por Lira (2012), avaliando a produção e transporte de sedimentos na Bacia do Pentecoste. Os valores estão próximos aos encontrados por Gomes (2016) em pesquisa à respeito da produção e transporte de sedimentos na BEVC, o qual encontrou valor de SDR próximo a 6%.

Os resultados obtidos após a aplicação do modelo foram comparados com resultados medidos obtidos da análise granulométrica dos sedimentos (Tabela 15) contidos nos escoamentos à montante do açude no ano anterior, 2015, pelo fato de que em 2016 nenhum escoamento foi registrado no vertedouro de entrada do Açude Escola.

Tabela 15 - Padrão granulométrico de sedimentos contidos nas amostras escoadas à montante do açude no ano de 2015.

Dia	Amostra			Média
	30/03/2015	04/04/2015	09/04/2015	
Areia ($\theta > 65 \mu\text{m}$)	1,70%	3,30%	3,10%	2,70%
Silte grosso ($65 < \theta < 31 \mu\text{m}$)	5,40%	5,89%	2,39%	4,56%
Silte médio ($31 < \theta < 16 \mu\text{m}$)	11,21%	10,32%	9,74%	10,42%
Silte fino ($16 < \theta < 8 \mu\text{m}$)	16,82%	18,47%	17,89%	17,72%
Silte muito fino ($8 < \theta < 4 \mu\text{m}$)	15,82%	18,13%	17,91%	17,28%
Argila ($\theta < 4 \mu\text{m}$)	50,70%	47,20%	49,00%	48,96%

A Tabela 16 dispõe dos resultados obtidos após a aplicação do modelo de Barfield *et al.* (1979) e, à partir dela, verificou-se que o modelo proposto não apresentou bom desempenho em prever o PSE à partir do PSD verificados na bacia, com resultados muito discrepantes entre o modelado e o observado, aplicando um SDR de 7,3%.

Tabela 16 - Comparação entre o PSE modelado, pelo proposto por Barfield *et al.* (1979) e observado

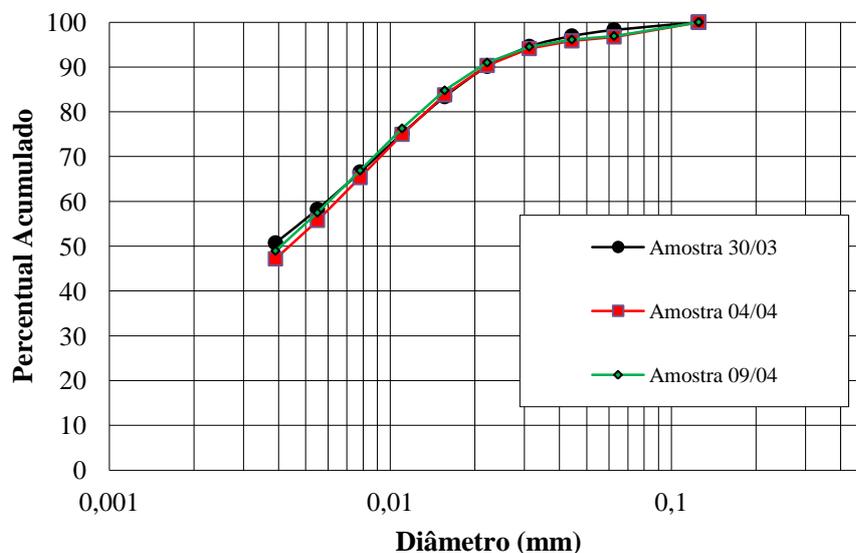
Diâmetro (mm)	PSD	PSE	
		Modelado (%)	Observado (%)
0,0020	0,78	11	35,3
0,0039	24,49	100	47,3
0,0078	49,09	100	62,4
0,0156	59,97	100	77,5
0,0313	70,89	100	92,7
0,063	81,74	100	97,3
0,200	99,98	100	100

PSD: Padrão Granulométrico dos Sedimentos Desprendidos

PSE: Padrão Granulométrico dos Sedimentos Transportados até o Exutório

O Gráfico 9 apresenta as curvas granulométricas dos sedimentos em suspensão nos escoamentos registrados no ano de 2015.

Gráfico 9 - Curvas granulométricas dos sedimentos contidos no escoamento à montante do açude.



O PSE (Padrão Granulométrico dos Sedimentos no Exutório) possuiu baixas porcentagens de areia, todas inferiores a 4%, e valores próximos de silte e argila; os maiores teores desse último, 50,7%, foram verificadas no 1º escoamento, o mesmo possuindo os menores teores de areia, 1,7%, em relação às demais amostras. O gráfico também mostra que cerca de 97% do sedimento transportado até o exutório tinha granulometria menor de que 63 µm, mostrando a tendência de transporte pela bacia das partículas mais finas.

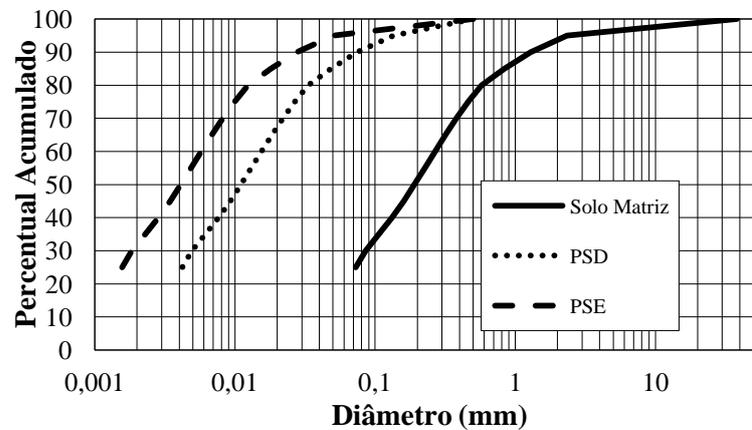
À partir da textura do solo matriz, PSD observado nas amostras de 2016 e PSE observado nas amostras de 2015, foi feito um padrão de redução da curva granulométrica dos sedimentos na bacia. Para isso, foi calculado um fator de redução. Para cada fração, em porcentagem, foi verificado qual o diâmetro equivalente na bacia, no desprendido e no exutório. Assim, o fator de redução entre a bacia e o padrão desprendido foi calculado como sendo a média dos fatores de cada classe, razão entre o diâmetro na bacia e o desprendido pra cada fração. O mesmo procedimento feito entre a bacia e o exutório. Os resultados podem ser verificados na Tabela 17 abaixo.

Tabela 17 - Fator de redução para cada classe de diâmetro entre a bacia e o padrão desprendido e transportado até o exutório.

Frações (%)	Origem	Desprendido		Exutório	
	D (mm)	D (mm)	Fator	D (mm)	Fator
95	2,3466	0,2408	9,75	0,0437	53,69
90	1,2851	0,0589	21,82	0,0261	49,33
85	0,8370	0,0474	17,66	0,0190	44,12
80	0,5734	0,0365	15,73	0,0146	39,24
75	0,4630	0,0283	16,35	0,0120	38,52
70	0,3808	0,0223	17,05	0,0099	38,52
65	0,3180	0,0163	19,54	0,0081	39,12
60	0,2674	0,0142	18,88	0,0067	40,18
55	0,2257	0,0122	18,48	0,0054	41,45
50	0,1906	0,0107	17,74	0,0045	42,76
45	0,1609	0,0099	16,29		
40	0,1322	0,0136	9,74		
35	0,1063	0,0049	21,85		
30	0,0854				
25	0,0727				
20	0,0244				
15	0,0056				
10	0,0010				
			Médio 16,9		Médio 42,4

Entre a bacia e o PSD foi verificado um fator médio de 16,9 e entre o PSE de 42,4. Aplicando-se esses valores médios à todas as classes granulométricas pré-determinadas, foi possível plotar as curvas padrão de granulometria do sedimento desprendido e no exutório, como mostrado no Gráfico 10 abaixo.

Gráfico 10 - Curvas granulométricas na bacia, no sedimento desprendido (PSD) e no exutório (PSE)



A fim de se obter um melhor entendimento à respeito da dinâmica granulométrica dos sedimentos verificado na BEVC durante o período de estudo, a Tabela 18 mostra os valores de D_{50} do solo matriz, PSD e PSE. Verificou-se que o D_{50} diminuiu gradativamente entre a bacia e o exutório, de 191 a 4 μm .

Tabela 18 - D_{50} do solo matriz, PSD e PSE.

Padrão	D_{50} (μm)
Matriz	191
PSD	11
PSE	4

Os resultados corroboram com os verificados por Shu *et al.* (2017), os quais estudaram a dinâmica granulométrica dos sedimentos mobilizados na China em situações reais de escoamento superficial e concluíram que o padrão granulométrico dos sedimentos mobilizados e exportados tem característica mais fina quando comparado com o solo *in situ* demonstram a preferência de transporte de finos. Em adição, a preferência de deposição das partículas mais grosseiras.

Corroboram também com os resultados encontrados por Walling *et al.* (2000), em pesquisa realizada nas bacias de Humber e Tweed, Ucrânia, os quais verificaram que mais de 90% do sedimento transportado tinha granulometria menor do que 63 μm (argilas e siltes) e quando tais sedimentos são erodidos da bacia e atingem o sistema de drenagem, tanto a concentração quanto a granulometria permaneciam uniformes ao longo da seção transversal e longitudinal. Owens e Walling (1999) também verificaram que cerca de 95% do sedimento escoado tinha granulometria menor que 62,5 μm .

Na pesquisa realizada por Shi *et al.* (2017), o padrão granulométrico do sedimento, tanto mobilizado, exportado ou depositado tinham características mais finas do que o solo matriz da bacia. Sedimentos finos são mais aptos a mobilização e transporte, caso contrário dos sedimentos mais grosseiros, aptos a deposição durante o curso, relacionado à velocidade de queda das partículas, segundo os pesquisadores.

Parsons *et al.* (1991), analisando as características granulométricas do sedimento escoado em bacia do ambiente semiárido do Arizona, também verificaram que o padrão granulométrico do sedimento escoado era mais fino do que o solo matriz e, segundo os pesquisadores, a seletividade do processo estava inteiramente relacionada com as características do fluxo superficial, o qual não é capaz de transportar materiais mais grosseiros devido a sua alta velocidade de queda em fluido. Alberts *et al.* (1980), entretanto, destacaram que toda a seletividade na dinâmica de sedimentos na bacia é devida à energia inerente ao impacto da chuva. De acordo com esses pesquisadores, partículas de 50 μm , por exemplo, quase que dobraram de concentração entre o solo matriz e o fluxo de escoamento.

Os sedimentos em suspensão compreendem, em geral, as partículas de tamanho reduzido (silte e argila), as quais, por serem pequenas, se conservam em suspensão pelo fluxo. A carga em suspensão pode representar mais de 90% do material total transportado. As partículas de tamanho maior, como as areias e os cascalhos, tendem a se depositar, porém podem ser roladas ou deslizadas (VESTENA *et al.*, 2007), o que poderia provocar o seu deslocamento junto com o fluxo. De acordo com Rodrigues (2011), isso decorre do fato que o transporte das partículas depende não só da velocidade do escoamento, mas também da granulometria do material, da declividade do leito, da força de atrito entre as partículas e da profundidade do curso de água. Além disso, segundo Carvalho (2008), em períodos chuvosos, as forças que atuam sobre as partículas de granulometria maior proporcionam transporte das mesmas.

4.3.8 Taxa de enriquecimento (TE)

A taxa de enriquecimento, relação entre a textura da bacia, ou solo matriz, e a textura das amostras de escoamento superficial afluentes ao exutório, pode ser visualizado na Tabela 19. A mesma expõe os dados referentes à textura dos solo matriz, a textura das amostras de escoamento superficial e a textura média das amostras de escoamento superficial. A textura do solo da bacia possui uma grande proporção de areia ($\theta > 62,5 \mu\text{m}$), superior a 60%. Porém, a análise granulométrica nas 3 amostras nos três eventos registrados em 2015 (30/mar, 04/abr,

09/abr,) de escoamento superficial revela que a proporção de tal material é um pouco superior a 3%, com média de 2,7%. Já as frações silte e argila também apresentaram grandes diferenças quando comparado o aspecto textural do solo matriz da bacia com as amostras de escoamento, com destaque para as frações silte fino ($8 < \theta < 16 \mu\text{m}$) e muito fino ($4 < \theta < 8 \mu\text{m}$), os quais apresentaram textura de 1,81 e 1,28% no solo matriz e 17,67 e 17,27%, em média, nas amostras de sedimento no escoamento superficial, respectivamente.

As frações silte e argila apresentaram enriquecimento, valores superiores a 1 e a fração areia apresentou diminuição. Os maiores valores de TE foram registrados para as frações silte fino e muito fino, 9,74 e 13,54, respectivamente. Porém a fração areia apresentou menor valor de TE, 0,04. Os resultados confirmam a tese de que materiais de granulometria mais fina tendem a ser mais transportáveis enquanto que materiais mais grosseiros tendem a ser depositados durante o fluxo de escoamento através da bacia até o exutório.

Tabela 19 - Textura e taxa de enriquecimento para diferentes classes granulométricas

Classe (μm)	Textura (%)					TE
	Matriz	30/mar	04/abr	10/abr	Média	
$\theta > 62,5$	62,08	1,70	3,10	3,30	2,70	0,04
$31 < \theta < 62,5$	1,07	5,40	2,40	5,90	4,57	4,28
$16 < \theta < 31$	1,21	11,20	9,70	10,30	10,40	8,59
$8 < \theta < 16$	1,81	16,80	17,70	18,50	17,67	9,74
$4 < \theta < 8$	1,28	15,80	17,90	18,10	17,27	13,54
$\theta < 4$	13,44	50,70	49,00	47,20	48,97	3,64

Observou-se que o componente do solo que apresentou maior taxa de enriquecimento foi o silte. O silte tem maior poder de mobilidade pelo fato de que não é uma partícula tão grande como a areia nem sofre agregação ou coesão como as argilas.

Slattery e Burt (1997) verificaram enriquecimento da areia na ordem 0,4 e de siltes e argilas da ordem de 2, Walling (1983) e Walling e Moorehead (1989) também encontraram resultados semelhantes de TE quando compararam características granulométricas do solo matriz da bacia com amostras de escoamento superficial.

De acordo com Di Stefano e Ferro (2002), que a distribuição granulométrica do sedimento erodido é comparado com a do solo matriz, ou material original, o enriquecimento das frações finas é geralmente notado, e isso traz o seguinte questionamento: tal

enriquecimento é função do processo de seletividade, desprendimento, durante a erosão ou está mais atribuído ao processo de transporte?

Em escala de parcela, Walling e Moorehead (1989), afirmaram que os mecanismos de seletividade durante a erosão são relativamente menos importantes para explicar esse enriquecimento ou diminuição de classes de partículas entre as encostas e o exutório da bacia. Foster *et al.* (1985) sugeriram que essa variação está provavelmente mais relacionado com os processos de transporte e deposição do que com o processo de desestruturação do solo durante a erosão.

Já em escala de bacia, segundo Young (1980), a perda ou diminuição das frações mais grosseiras no sedimento escoado estão relacionadas à seletividade durante a desestruturação do solo ocasionada pela erosão hídrica, devido a agregação dos sedimentos (LU *et al.*, 1988) e devido a capacidade de transporte entre as encostas e rede de drenagem da bacia e o exutório.

Nessa pesquisa, foi abordado, anteriormente, que as variadas precipitações, tanto quantitativamente quanto espacialmente, podem influenciar diretamente a qualidade dos sedimentos entregues por um mesmo local da bacia, como também pela bacia em geral; que também podem variar o regime de vazões recorrentes numa determinada área. Há a possibilidade de tais variações no volume escoado também variar a característica granulométrica dos sedimentos contidos.

Walling e Moorhead (1989), analisando dados granulométricos de sedimentos e vazões em rios, atentaram para a variedade de situações quando as características granulométricas do sedimento foram relacionadas às descargas líquidas ocorridas num determinado local da bacia num determinado tempo. Houve situações em que as frações mais grosseiras aumentaram, em concentração, com o aumento da vazão, situações em que em vez das frações grosseiras aumentarem em quantidade as mais frações finas aumentaram e casos em que não houve mudança significativa na concentração granulométrica do sedimento suspenso quando comparada com as vazões.

Colby e Hembree (1955) verificaram uma tendência entre o transporte de sedimentos de granulometria mais grosseira com períodos de baixa descarga e sedimentos de granulometria mais fina com períodos de alta descarga. Os autores atribuíram esta tendência a grande importância dos sedimentos transportados de fontes durante períodos de alta descarga. Outros estudos descrevem situações onde o padrão granulométrico dos sedimentos transportado é dominado mais pela sazonalidade, tempo, do que pela relação com a magnitude do fluxo.

Há estudos onde foi observado que o clima promoveu diferença na granulometria das partículas em suspensão. Ongley *et al.* (1981) observaram que os sedimentos transportados durante a primavera eram mais grosseiros do que os transportados no verão. Padrão da rede de drenagem e variações nas descargas líquidas da bacia são as explicações mais plausíveis para esse contraste no padrão granulométrico dos grãos.

No que tange o transporte de nutrientes pela bacia aliado ao transporte de partículas, também há estudos envolvendo a relação entre as partículas de solo e a mobilização de metais pesados. Lai *et al.* (2013) analisaram o transporte de metais pesados pela bacia e verificaram relação significativa entre estes e a fração silte do sedimento, sugerindo que a distribuição granulométrica deve contribuir para o aumento da concentração de metais.

As partículas grosseiras resistem ao desprendimento e, principalmente, transporte pela bacia devido a sua massa física, levando ao enriquecimento das partículas mais finas (Poesen e Savat, 1980, 1981). Pesquisadores sugerem que o grau de enriquecimento de sedimentos depende da coesão, taxa de infiltração e eluviação das partículas (Farmer, 1973; Young e Onstad, 1978; Issa, 2006)

O solo erodido é composto de partículas primárias e agregados. Tanto o tamanho dessas partículas como também o grau de agregação são fatores que influenciam tanto no desprendimento quanto no transporte de sedimentos, devido a diferença de tamanho da partícula e, conseqüentemente, a influência dessa característica na velocidade de queda da partícula. Agregados são compostos, além de partículas primárias (areia, silte e argila), de outros componentes, principalmente matéria orgânica. Num modelo ou método de estimativa da granulometria do sedimento mobilizado numa bacia é importante considerar que uma significativa quantidade desses sedimentos está sendo transportada na forma de agregados, às vezes mais do que partículas primárias.

A textura do solo matriz, entretanto, influencia nesse grau de agregação. Solos arenosos tendem a ter baixo grau de agregação, o contrário acontecendo com solos argilosos. Assim sendo, solos com altos teores de silte e areia, pelo fato de terem baixo poder de agregação, são desprendidos e transportados como partículas primárias.

Segundo Walling e Kane (1984), agregados podem ter um aumento em sua velocidade de queda da ordem de 2, o que teria implicações severas no aspecto deposicional ou de transporte dessa partícula.

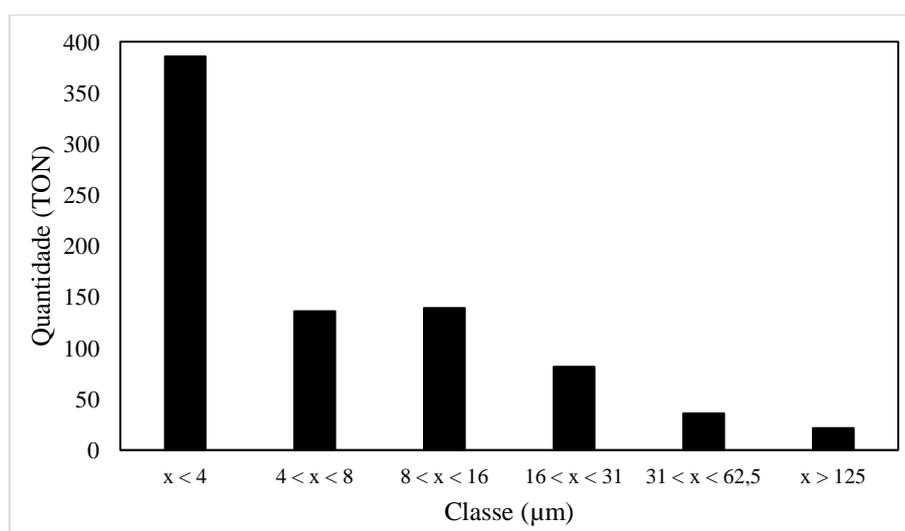
A discussão acima sobre agregação de partículas de sedimento foi pelo fato de essa característica ser considerada em estudos e pesquisas onde o solo matriz da bacia tenha características de agregados, principalmente se esse solo tenha uma textura de caráter

argiloso, solo com alta probabilidade de se conter agregados. Solos com altos teores de areia, como é o caso da BEVC, tem altas taxas de enriquecimento, devido a ser pobre em agregados, com suas partículas sendo transportadas na forma primária. Textura do solo matriz, topografia da bacia e características da rede de drenagem, de acordo com os pesquisadores, são os fatores que mais influenciam nas diferenças relacionadas à dinâmica de sedimentos em bacias distintas. Os autores também destacam que, áreas com características geomorfológicas similares tem padrão granulométrico de sedimentos suspensos transportados em fluxo também similares.

4.3.9 Modelagem da dinâmica de sedimento em reservatório

De posse dos dados de vazão afluente ao açude, estimadas pelo modelo *CN-SCS*, curva-chave de sedimentos e admitindo constantes ao longo do tempo os percentuais granulométricos dos sedimentos contidos nos escoamentos, e aplicando a linguagem de programação FORTRAN, foi possível estimar a quantidade de sedimentos que alcançou o reservatório, em toneladas, para cada classe granulométrica (Gráfico 11), para a série histórica 1970-2017.

Gráfico 11 - Quantidade total de sedimentos, em Toneladas, que entraram no açude durante a série histórica 1970-2017, de acordo com o modelo.

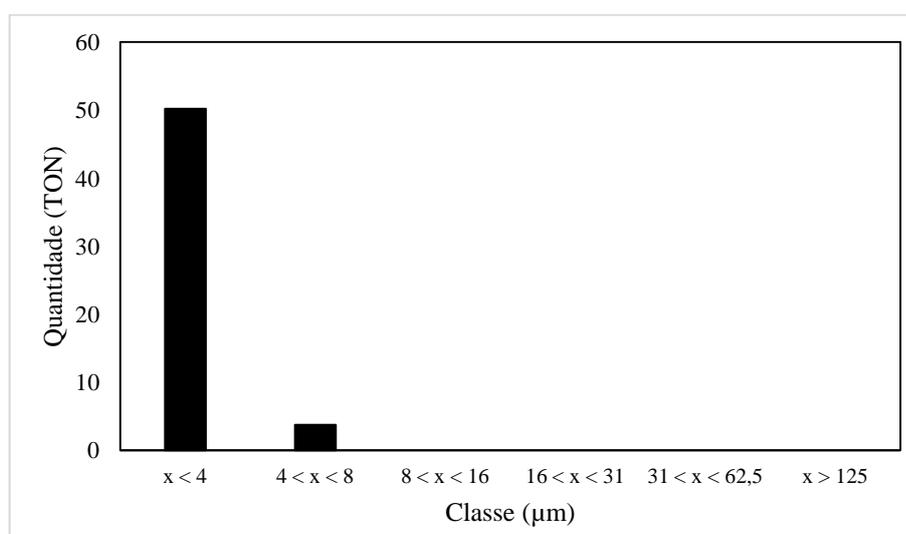


De acordo com as porcentagens verificadas nas amostras escoadas até o açude informadas no tópico anterior, cerca de 49% dos sedimentos contidos no escoamento superficial era composto de argila fina ($d < 4 \mu\text{m}$). De um total de 800 toneladas de sedimento

que entraram no açude, estimados pelo modelo, cerca de 385 toneladas foram argila fina; enquanto que os menores valores foram percebidos para a classe areia ($D > 125 \mu\text{m}$), com cerca de 21 toneladas que entraram no açude durante a série histórica.

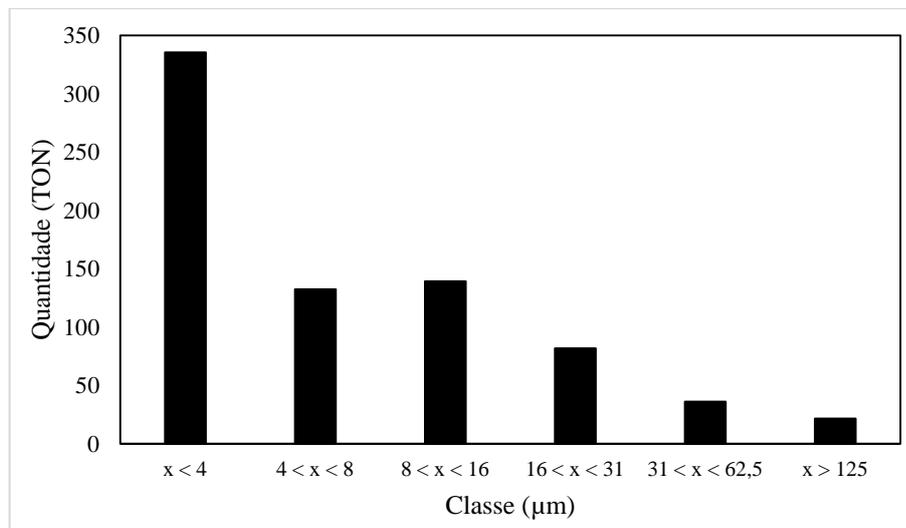
Pelo modelo proposto por Haan *et al.* (1994), chamado de *Overflow Rate*, o qual leva em consideração a velocidade do fluxo hidráulico dentro do reservatório e as velocidades de queda das partículas, foi possível estimar a carga de sedimento efluente. De posse das quantidades que entram e saem, por simples diferença entre os valores, foi possível estimar a quantidade retida no reservatório (Gráfico 12) durante a série histórica. O modelo de cálculo simplificado foi proposto também por Heinemann (1981) e, segundo o pesquisador, a eficiência de retenção de sedimentos é o mais importante informativo acerca do reservatório, como sendo a relação entre a quantidade retida e a quantidade afluenta, expressa em valor de porcentagem.

Gráfico 12 - Quantidade total de sedimentos, em toneladas, efluentes ao açude durante a série histórica 1970-2017, de acordo com o modelo.



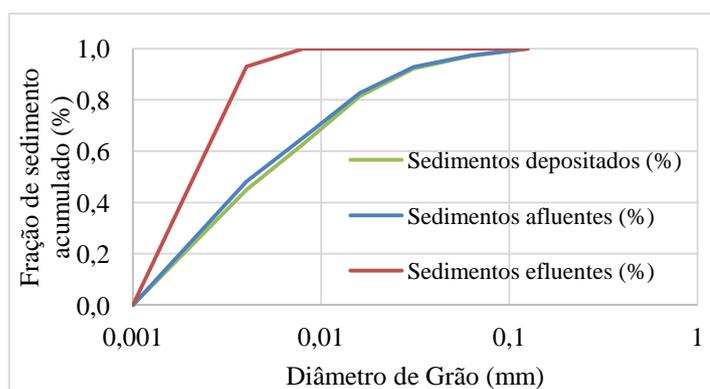
À partir da análise do gráfico acima, pôde-se constatar que as únicas partículas que foram capazes de deixar o reservatório, por vertimento, foram as de diâmetro menor que $8 \mu\text{m}$, muito provavelmente devido a sua baixa velocidade de sedimentação, em torno de $4 \times 10^{-5} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, num total de 53 toneladas. Portanto, o reservatório foi capaz de reter boa parte dos sedimentos afluentes, como pode ser visto no Gráfico 13.

Gráfico 13 - Quantidade total de sedimentos, em partículas denominadas primárias, depositados no açude durante a série histórica 1970-2017, de acordo com o modelo.



A análise do gráfico acima permitiu concluir que o reservatório foi capaz de reter até 100% das partículas compreendidas entre 8 e 125 µm, cujas velocidades de queda de partícula variaram de 4×10^{-5} à $2,45 \times 10^{-3} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, num total de 746 toneladas de sedimento retidos. Pelo modelo simplificado de Haan *et al.* (1994), a eficiência de retenção do reservatório de estudo foi de cerca de 93%. O Gráfico 14 mostra as curvas granulométricas dos sedimentos afluentes, depositados e efluentes no Açude Escola após aplicado o modelo proposto por Haan *et al.* (1994). Verificou-se que as curvas dos sedimentos depositados e afluentes são muito próximas e parecidas, isso se deve ao fato de que muito dos sedimentos que entram no reservatório são retidos pelo mesmo, visto sua alta taxa de retenção anteriormente estimada.

Gráfico 14 - Distribuição granulométrica dos sedimentos afluentes, depositados e efluentes no Açude Escola, pelo modelo proposto por Haan *et al.*, (1994).



Molisani *et al.* (2013) avaliaram a retenção de sólidos e nutrientes no reservatório Castanhão, locado na Bacia do Jaguaribe, Ceará, e verificaram que esse grande reservatório é capaz de reter até 97% de material sólido.

Os resultados corroboram com os encontrados por Lewis *et al.* (2013), estudando a eficiência de retenção em um grande reservatório na Austrália, verificaram que cerca de 95% das partículas com diâmetro maior que 30 μm eram retidas; das partículas com diâmetro entre 5 e 30 μm , 75% eram retidas, e com diâmetro entre 0,5 a 5 μm , 50% eram retidas. Ainda segundo os pesquisadores, a acurácia na determinação da retenção de sedimentos em reservatórios é importante na estimativa da quantidade de sedimentos à jusante do reservatório, na estimativa da vida útil dos mesmos, como também possibilita um entendimento acerca da dinâmica desses sedimentos na bacia hidrográfica. De acordo com Lima Neto *et al.* (2011), o conhecimento dos processos relacionados ao assoreamento auxiliará na estimativa do tempo de vida do reservatório como também na avaliação de propostas de mecanismos de prevenção do assoreamento e escassez hídrica.

Dendy (1974) avaliou a retenção em 17 pequenos reservatórios nos EUA e verificou que a retenção nos mesmos variou entre 81 e 98% para um período entre 4 e 16 anos. O pesquisador verificou ainda que entre 96 e 100% das partículas de tamanho maiores que 62 μm eram retidas.

Garg e Jothiprakash (2008) avaliaram a eficiência de retenção de um grande reservatório da Índia e concluíram que a textura do solo depositado no reservatório estudado tinha característica grosseira e a eficiência de retenção média encontrada, para uma série histórica de 40 anos, foi de 99,36%.

Sultana e Naik (2015) compararam os valores de retenção calculados pelos métodos empíricos de Brown e Gill e Brune com os resultados reais de um reservatório na Índia e observaram um valor médio de retenção de 86%, para uma série histórica de 25 anos.

Espinosa-Villegas e Schnoor (2009) verificaram eficiência de retenção média de 74,7% do reservatório Coralville, em Iowa, EUA, numa série histórica de 30 anos. Ainda segundo os pesquisadores, houve um indício de tal retenção ter diminuído ao longo do tempo, provavelmente pela perda de volume do reservatório como também pelo notável aumento na quantidade de finos presente no escoamento superficial resultante da adesão de práticas conservacionistas de solo na bacia em estudo.

Segundo Yoon (1992) e Yang (2003), a perda anual de capacidade de reservatórios devido ao assoreamento ao redor do mundo é estimada em 1 a 2% do total. Araújo (2003) avaliou a perda de volume resultante do assoreamento em reservatório do Estado do Ceará,

Brasil, e concluiu que a taxa média (ponderada) de assoreamento nos reservatórios do semiárido estudados é de 1,85% a cada década, ou seja, perda de cerca de 22 hm³ de capacidade de reserva a cada ano.

Araújo *et al.* (2006), analisaram o efeito do assoreamento na disponibilidade de água na região semiárida nordestina brasileira, verificaram que a capacidade de armazenamento dos reservatórios diminuiu numa taxa de 0,18% ao ano para reservatórios localizados em bacias rurais e 0,56% em reservatórios localizados em bacias urbanas. Essa discrepância nos valores, segundo os pesquisadores, é devido ao rápido e não regularizado processo de urbanização, que causa, em bacias urbanas, uma taxa de escoamento de cerca de 410 mm.ano⁻¹ e em bacia rurais 90 mm.ano⁻¹, em média.

Os diferentes valores de taxa de assoreamento em reservatórios de distintos ambientes, principalmente quando se compara as taxas da Europa com as do semiárido brasileiro, provoca uma reflexão do porquê dessa variabilidade. Mesmo em reservatórios localizados num mesmo ecossistema, como observado na pesquisa de Araújo *et al.* (2006), as taxas são também discrepantes. Algumas razões foram dadas pelos pesquisadores citados anteriormente que podem ser aplicadas em qualquer contexto: (a) variações nas declividades das encostas; (b) baixa conservação ambiental da bacia; e (c) alto tempo de permanência do fluxo no reservatório, o que aumenta a eficiência de retenção de sedimentos.

De acordo com Arora e Goel (1994), os fatores que mais influenciam na retenção de sedimentos em reservatórios são a relação Capacidade-Vazão afluente, granulometria e concentração dos sedimentos contidos no escoamento afluente e forma de operação do reservatório.

Pinheiro *et al.* (2015) propuseram avaliar a relação entre a retenção de sedimentos em reservatórios do semiárido brasileiro com o volume inicial de armazenamento, área drenada e tempo de operação do reservatório, utilizando uma equação empírica com poucos parâmetros para auxiliar tal estimativa em regiões com escassez de dados. Os autores concluíram que, entre a retenção e o volume inicial de armazenamento, houve uma correlação positiva para os volumes inferiores a 10 hm³. Correlação positiva entre a retenção e a área drenada e correlação fortemente negativa entre a retenção e o tempo de operação do reservatório.

De acordo com Mamede *et al.* (2012), pequenos reservatórios tendem a receber água por escoamento superficial com mais frequência quando comparados com grandes reservatórios, conseqüentemente, há uma maior descarga de água e sedimentos à montante.

Segundo Verstraten e Poesen (2000), a eficiência de retenção de reservatórios depende de alguns parâmetros. Levando-se em consideração que tal eficiência está relacionada com a

quantidade de sedimentos depositada, os parâmetros que controlam os processos de sedimentação devem ser considerados, ou seja, o padrão granulométrico dos sedimentos que chegam ao reservatório estão inteiramente ligados a retenção desses sedimentos pelo mesmo. O padrão depende da textura do solo da bacia e de como esses sedimentos são erodidos e transportados pela mesma. O tempo de retenção de um reservatório está relacionado com as características da vazão afluente e as características físicas do mesmo tais como capacidade, forma e tipo de vertimento.

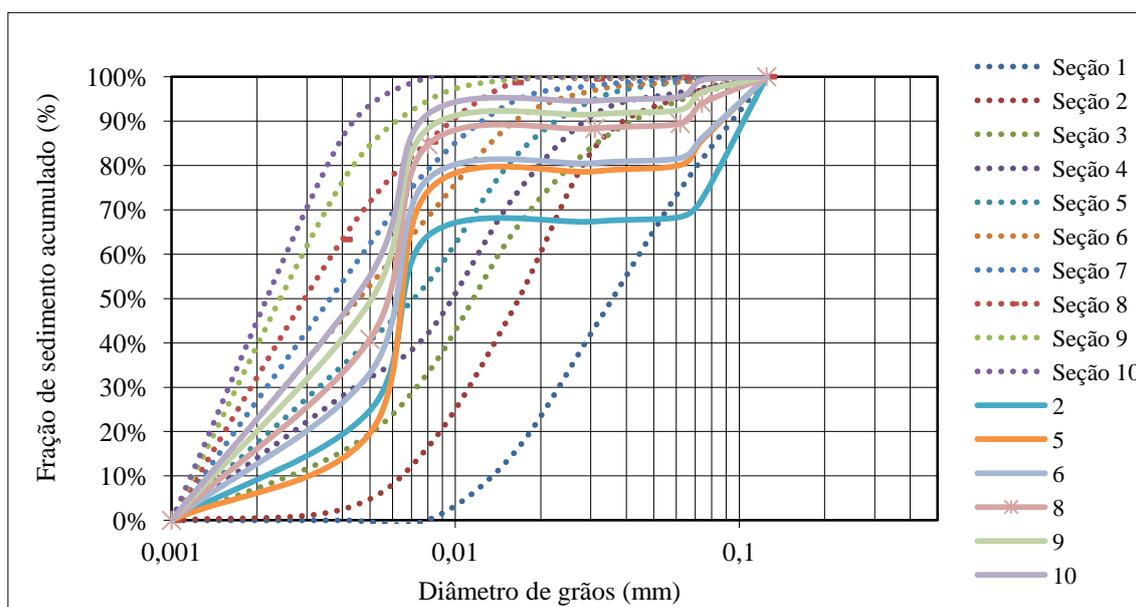
Ghomeshi (1995) concluiu que os fatores que afetam a deposição de sedimentos em reservatórios são:

- a) Quantidade de sedimentos carregados, o qual depende, principalmente, da quantidade de escoamento superficial, cobertura vegetal, geometria e pedologia da bacia de contribuição;
- b) Eficiência de retenção, o qual depende da capacidade, geometria, forma e tipo de operação do reservatório, quantidade e características granulométricas dos sedimentos afluentes;
- c) Densidade do sedimento depositado: necessário para se estimar o volume ocupado por determinada classe no reservatório;
- d) Correntes de turbidez.

Como dito anteriormente, foi objetivo dessa pesquisa propor um modelo, simplificado, e baseado nas considerações sobre movimentação de sedimentos feitas por Haan *et al.* (1994) e Fifield *et al.* (2011), para estimativa da dinâmica de sedimentos no interior de reservatórios. Os resultados podem ser observados no Gráfico 16.

De acordo com o modelo, pôde ser observado que há uma tendência de maiores concentrações de finos nas porções mais próximas à barragem, devido principalmente ao fato de essas partículas terem baixas velocidades de sedimentação que auxilia no processo de transporte dessas partículas ao longo do reservatório. O Gráfico 15 também apresenta as curvas 2, 5, 6, 8, 9 e 10. São curvas granulométricas de solos retirados do açude, em diferentes pontos da seção longitudinal, sendo o 2 próximo à montante e 10 próximo à jusante. Observando as curvas modeladas e observadas, é possível comparar as mesmas e definir que o modelo apresentou que as seções mais próximas à barragem tendem a ter uma maior proporção de finos.

Gráfico 15 - Curvas granulométricas modeladas por seções, de 1 a 10, e observadas no açude.



O processo de deposição ocorre assim que o fluxo carregado com sedimentos entram no reservatório. Cargas de fundo ou arraste e partículas maiores tendem a se depositar primeiramente, formando os chamados deltas, enquanto as partículas menores, por terem baixa velocidade de queda, tendem a serem transportadas.

Esse padrão de aumento da concentração de finos em locais mais próximos à barragem, como proposto pelo modelo, foi verificado por Bak e Dabkowski (2013), estudando o padrão deposicional de sedimentos, com valores de D_{50} de cerca e 0,45 mm no solo próximo à entrada do reservatório e de 0,05 mm próximos à barragem.

Dendy (1982) analisou a eficiência de retenção e o padrão deposicional de sedimentos em 12 pequenos reservatórios dos EUA e verificou retenções altas, entre 80 e 95%. Quanto ao padrão deposicional, sedimentos grosseiros são frequentemente depositados próximo à montante e sedimentos mais finos são mais distribuídos verticalmente e horizontalmente. O pesquisador ainda afirma que a granulometria dos sedimentos tem influência predominante na locação dos sedimentos depositados. Outros fatores estão envolvidos, entretanto, o tempo de permanência do fluxo é também importante.

Annandale (1984) foi um dos pioneiros a propor um método para estimativa de deposição de sedimentos, o qual tinha característica semi-empírico que poderia ser utilizado para uma gama de reservatórios de diferentes tamanhos e geometrias que estimava o volume de sedimento em determinada seção baseado no comprimento do açude e o perímetro molhado, porém não considerava a granulometria do sedimento.

Michalec (2014) analisando a aplicação do método de Annandale mencionado acima, verificou que a aplicação de tal é possível apenas em casos de pequenos reservatórios, no qual a carga de sedimentos é depositada próxima à barragem.

Rahmanian e Banihashemi (2012), observando o assoreamento em grandes reservatórios iranianos, propuseram um método, à partir do proposto por Annandale, inserindo a grandeza raio hidráulico da seção transversal, verificando uma considerável melhora nos resultados obtidos. Os autores também destacaram que, baseado em suas investigações, a deposição de sedimentos entre seções no reservatórios são consideravelmente afetados pelo volume de água dessas seções

Hosseinjanzadeh *et al.* (2015) propuseram um novo método, mais simplificado, para estimar o padrão de distribuição de sedimentos em reservatório, à partir de dados de 16 reservatórios dos EUA, e concluíram que a distribuição está relacionada ao volume de sedimentos e características originais do reservatório, afirmando que o novo método proposto é mais eficiente e mais simples de ser aplicado quando comparado aos métodos de redução de área e incremento de área.

Alguns aspectos devem ser considerados: as características de vazão de entrada, pois é ela que influenciará diretamente nas características do fluxo hidráulico no interior do reservatório; as características do próprio fluxo hidráulico no reservatório, junto com o diâmetro é um fator determinante na sedimentação ou transporte longitudinal das partículas; fatores relacionados ao reservatório como comprimento e largura, atributos utilizados no modelo utilizado por Fifield *et al.* (2011).

Quanto aos reservatórios, padrões de deposição podem variar, como discutido anteriormente, devido às diferentes condições hidráulicas, características dos sedimentos oriundos da bacia de contribuição e geometria do mesmo. Chaudhuri (2017), analisando o aspecto deposicional e sedimentos em 57 reservatórios dos EUA, concluíram que a topografia, geometria, geologia do reservatório e características granulométricas do sedimento são os principais fatores que governam a deposição e distribuição de sedimentos em reservatórios, devido a variabilidade de tais atributos, pode-se esperar também grande variabilidade deposicional de sedimentos entre reservatórios.

Wohl e Cenderelli (2000), avaliando a dinâmica de sedimentos em um grande reservatório do Colorado, EUA, concluíram que a magnitude das vazões afluentes determinam o volume e a distribuição granulométrica dos sedimentos de fundo. O regime de sequência dessas vazões afluentes determina locais temporariamente armazenadores de um

volume de sedimento, os deltas, que podem ser deslocados a depender dos fluxos posteriores. Partículas mais finas são removidas primeiramente, segundo os pesquisadores.

Em relação ao semiárido brasileiro, segundo Barbosa *et al.* (2012), esses ecossistemas englobam lagos rasos naturais, reservatórios artificiais e rios e riachos intermitentes. Estes sistemas são particularidades na paisagem do semiárido e compreendem uma grande variedade de sistemas associados, funcionando como um mosaico em constante mudança entre épocas de seca e chuva.

Então, pelas características do semiárido e, conseqüentemente, dos reservatórios inseridos nesse ecossistema, o padrão granulométrico dos sedimentos depositados é distinto quando comparado a reservatórios que recebem aporte hídrico durante todo o ano. Apenas à título de exemplificação, um reservatório que esteja seco ao receber os primeiros volumes de água oriundos de escoamento superficial, as partículas grosseiras presentes nesse escoamento tenderão a ser carreadas e se depositar próximas à parede da barragem, contrário do que acontece num reservatório que tenha as mesmas características hidráulicas mas que tenha, nesse mesmo tempo, um volume hídrico bem superior, as partículas grosseiras tenderão a se depositarem mais próximas do ponto de maior cota hídrica, mais próximo do ponto à montante.

Sendo assim, reservatórios do semiárido devem ser objeto de mais estudos no que diz respeito ao padrão deposicional de sedimentos em seus reservatórios, pois existem características particulares desse tipo de ecossistema: variação temporal e espacial de precipitações e, conseqüentemente, vazões afluentes aos açudes, variabilidade sazonal de cota hídrica dos açudes. O primeiro pode acarretar variações na carga de sedimento suspenso e granulometria, acarretando padrões deposicionais distintos. O segundo pode fazer com que o fluxo hidráulico transporte sedimentos até próximo à barragem, em casos de fluxos que encontrem os reservatório com pouco volume de água, ou em locais mais próximos à montante, casos em que o mesmo tenha considerável volume de água, principalmente no que se refere à sedimentos grosseiros.

5. ANÁLISE DA EFICIÊNCIA DE APLICAÇÃO DA MODELAGEM DE DINÂMICA DE SEDIMENTOS EM DENSE REDE DE RESERVATÓRIOS NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO

5.1 Introdução

Erosão hídrica é uma das maiores causadoras de degradação do solo. As consequências incluem perda de solo, diminuição dos níveis de matéria orgânica e nutrientes do solo e transporte de contaminantes e pesticidas. A capacidade e transporte do sedimento depende de sua área superficial específica, que por sua vez depende da granulometria do sedimento (LAGOS-AVID e BONILLA, 2017).

Áreas áridas são mais sensíveis aos processos erosivos devido à escassez de cobertura vegetal, curto porém intensos eventos de precipitação em virtude de longos períodos sem chuva, topografia ligeiramente íngreme conectada a um sistema de canais combinado como solos erodíveis. Assim sendo, dinâmica de sedimentos induzida pelo escoamento superficial, transporte pelos canais de drenagem e deposição em reservatórios constituem importantes problemas a serem considerados no manejo de áreas de tal ambiente (BRONSTERT *et al.*, 2014).

Em reservatórios, muitas variáveis influenciam na deposição de sedimentos no interior do mesmo, incluindo fluxo hídrico, profundidade, concentração de sedimentos no fluxo e tamanho e distribuição das partículas, os quais variam regionalmente com a geologia, processos de transporte geomorfológicos, uso da terra e clima. Considerando que haja uma semelhança de processos em regiões de geomorfologia similares e que esses processos são constantes através do tempo, os modelos se tornam ferramentas utilizáveis em detectar tendências regionais de dinâmica de sedimentos, destacando reservatórios com potenciais riscos de assoreamento.

Considerando o potencial impacto das mudanças climáticas ou das condições fisiográficas numa determinada área na disponibilidade de água e assoreamento de reservatórios, modelos numéricos tem sido elaborados para auxiliar a explicar e prever possíveis mudanças na dinâmica de água e sedimento em bacias. Modelos de erosão e transporte tem sido desenvolvidos em micro e macro escala nas últimas décadas, sua complexidade varia com o detalhamento da representação dos processos espaciais e

temporais, variando desde modelos que representam processos em encostas para eventos individuais até temporadas completas (MUELLER *et al.*, 2010).

Walling e Moorehead (1989) sugeriram que o conhecimento dos fatores que contribuem para a variação espacial e temporal da composição granulométrica do sedimento é de importância vital para melhorar o entendimento das interações água e sedimento.

A necessidade em entender a dinâmica de sedimentos numa bacia é devido ao fato de que tal processo é relevante ao estudo dos recursos hídricos e manejo de bacias, visto que o sedimento é um transportador de poluentes e sua quantidade determina a performance e vida útil de reservatórios, canais de drenagem e etc. Além disso, uma análise acurada sob a dinâmica e produção de sedimentos podem refletir as características da bacia, sua história, desenvolvimento, uso e manejo.

O objetivo desse capítulo foi estimar o padrão granulométrico do sedimento desde a origem até sua deposição na densa rede de reservatórios superficiais da bacia hidrográfica do Pentecoste.

5.2 Material e Métodos

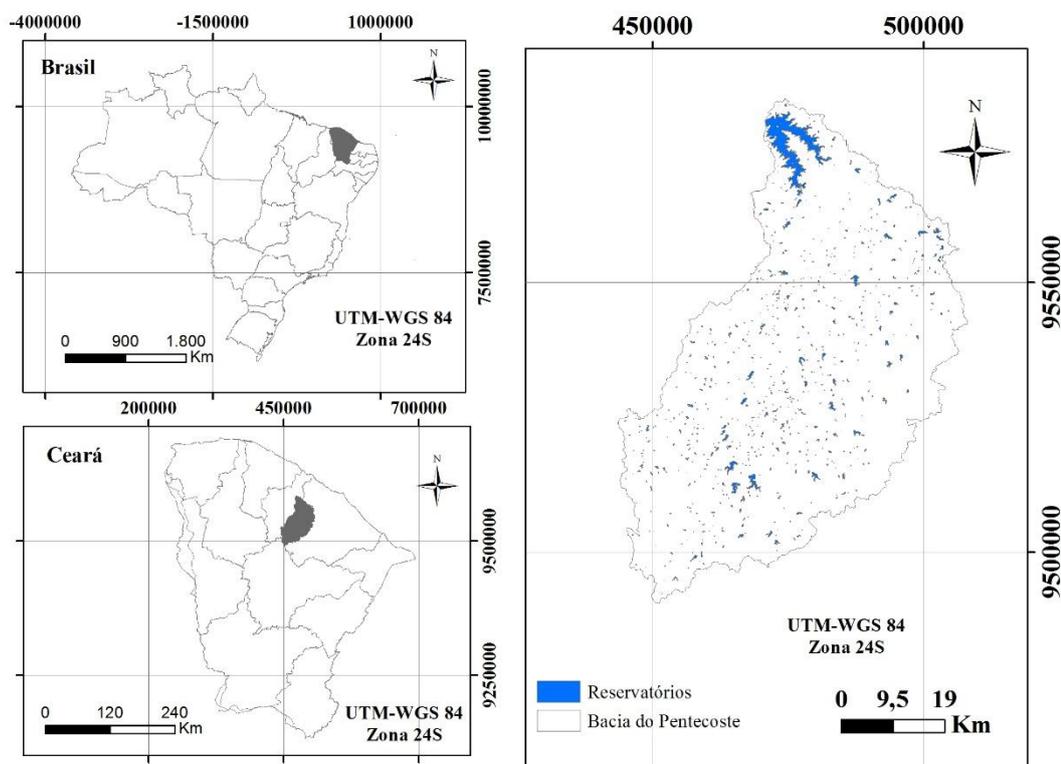
5.2.1 Caracterização da bacia hidrográfica do Pentecoste

O estudo foi realizado na Bacia Hidrográfica do Açude Pereira de Miranda – Pentecoste (Figura 27), sendo uma sub-bacia do rio Canindé, localizado na região centro norte do estado do Ceará, pertencente à bacia do rio Curú.

Dos 15 municípios que compõem a bacia do Curú, 12 fazem parte da bacia do Pentecoste, são eles: Apuiarés (28,3%), Aratuba (14,71%), Canindé (41,61%), Caridade (100%), Guaramiranga (16,9%), Itaitira (1,31%), Maranguape (5,95%), Mulungu (34,17%), Pacoti (5,33%), Palmácia (5,16%), Paramoti (41,48%), e Pentecoste (40%). Considerando o Sistema de coordenadas UTM (24 S, WGS 84 *datum*), a bacia do Pentecoste localiza-se entre as coordenadas 9480000 - 9590000 N e 440000 - 510000 E, com uma área de 3.230 km² aproximadamente.

O açude Pentecoste tem como finalidades: o controle das cheias do rio Canindé; a regularização de vazões do rio Curú; a irrigação das terras de jusante, coadjuvada pelas águas armazenadas na Barragem General Sampaio; a geração de energia elétrica; a piscicultura e o aproveitamento para culturas nas áreas de montante (CEARÁ, 2009).

Figura 27 - Localização da bacia hidrográfica do Pentecoste.

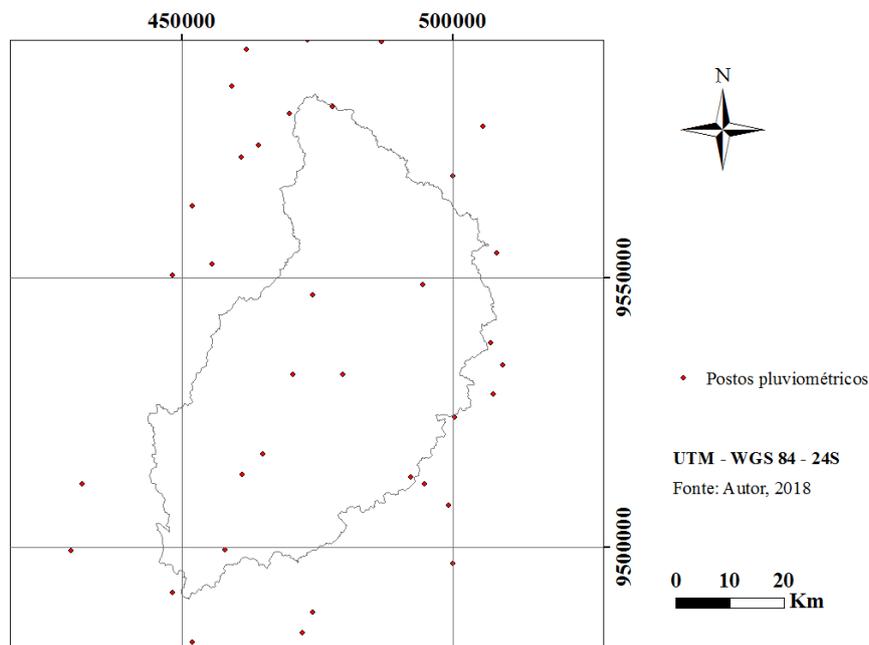


A barragem do açude Pentecoste foi projetada e construída pelo Departamento Nacional de Obras Contra as Secas - DNOCS, entre os anos de 1950 e 1957. A barragem está inserida na bacia do Curú, que é caracterizada pelo alto nível de açudagem (CEARÁ, 2009).

A barragem Pentecoste detém cerca de 37% da água acumulada na bacia do Curú, possuindo seu uso predominante para irrigação (83%), indústria (7%) e o consumo humano (10%) (PLANERH, 2005). De acordo com Ceará (2009), na bacia há problemas decorrentes das plantações irregulares, uso de agrotóxicos, desmatamento e poluição nas margens dos rios (lavagem de carros, motos e animais), o que vêm causando assoreamento no rio e perda da qualidade de sua água (LIRA, 2012).

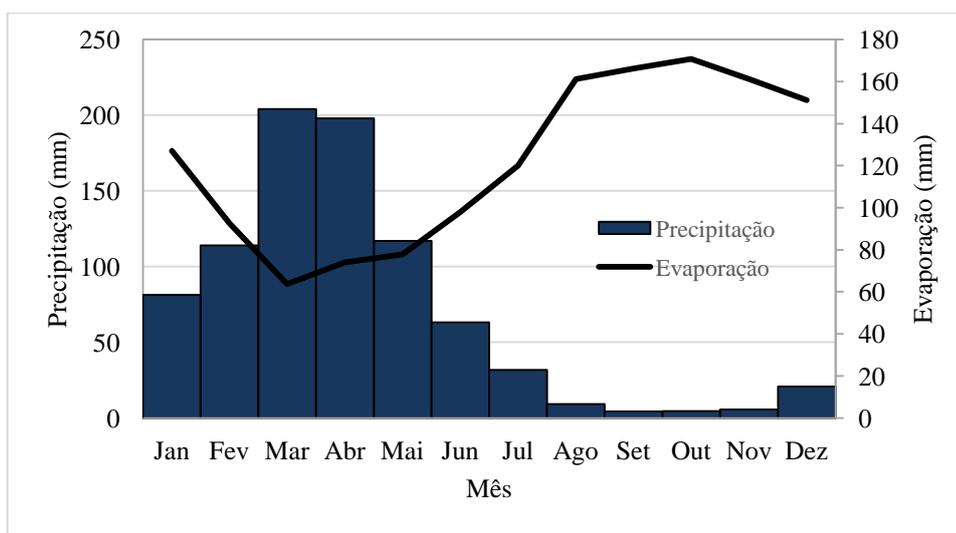
A bacia hidrográfica do açude Pentecoste apresenta uma precipitação média anual de 853,55 mm, estimada a partir de 33 postos pluviométricos, monitorados pela FUNCEME (Fundação Cearense de Meteorologia), com dados significativos, ou seja, com registro de dados a partir de dez anos. A localização dos postos pode ser visualizada na Figura 28 (LIRA, 2012)

Figura 28 - Postos pluviométricos.



A Figura 29 ilustra a precipitação e a evaporação na bacia hidrográfica do açude Pentecoste, onde é possível observar que nos meses de junho a janeiro a evaporação excede o valor precipitado na bacia.

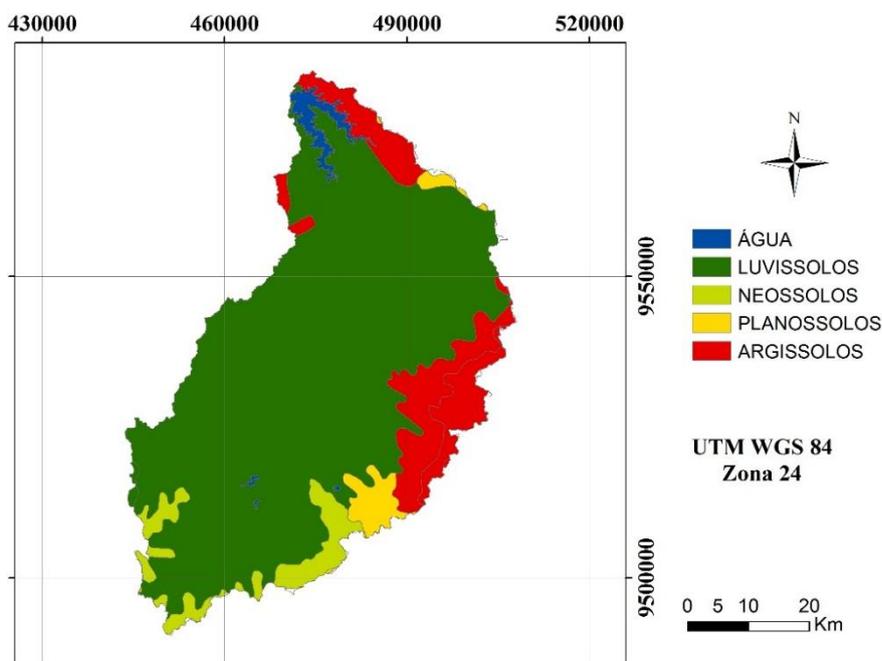
Figura 29 - Precipitação média e evaporação da bacia do Pentecoste.



De acordo com o mapa base de Reconhecimento dos Solos do Ceará na escala de 1:600.000, que contém as classes de solo para todo o Estado, identificaram-se nove diferentes tipos de solo dentro da bacia (Figura 30). Desses, a bacia apresenta um percentual de área de 82% do solo bruno não cálcico (LUVISSOLOS), 11% de podzólico vermelho amarelo

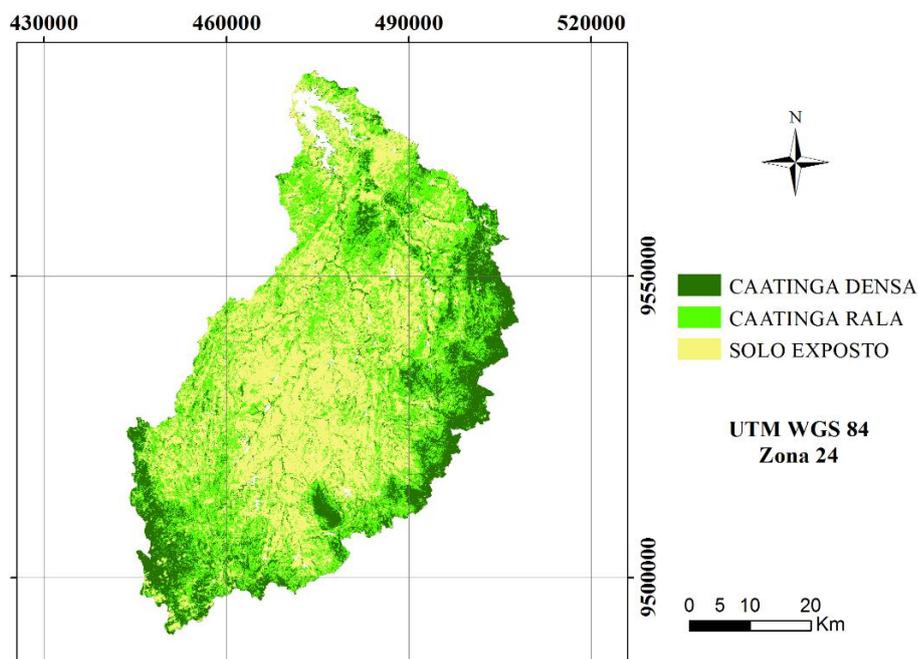
equivalente eutrófico (ARGISSOLOS), 5% de solo litólico (NEOSSOLOS), 2% de planossolo solódico (LIRA, 2012)

Figura 30 - Mapa de solos da bacia do Pentecoste.



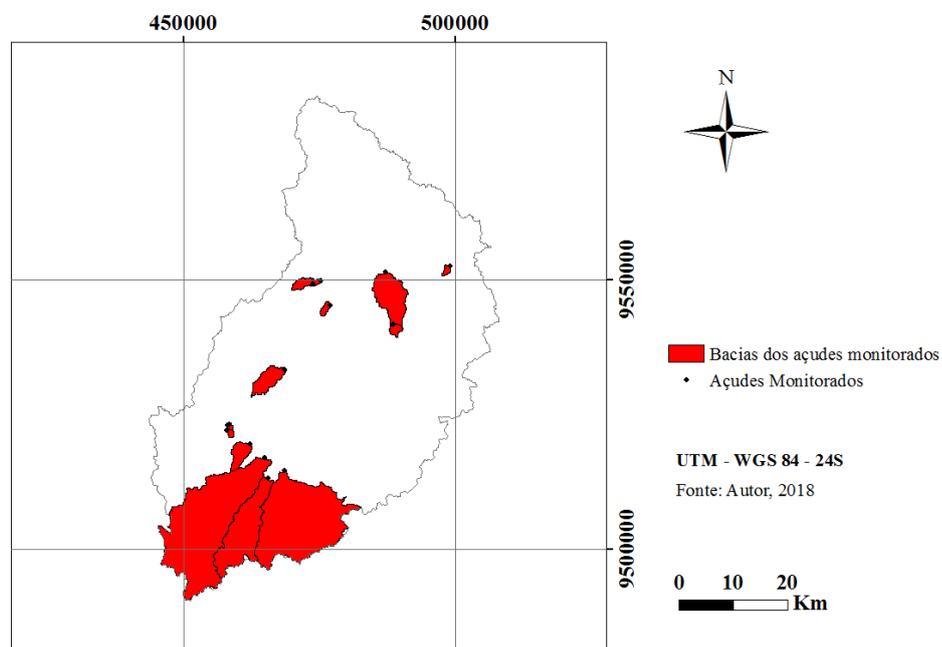
De acordo com o mapa das unidades fitoecológicas da FUNCEME, a bacia hidrográfica do Pentecoste possui quatro diferentes tipos de vegetação, entre eles caatinga arbustiva aberta, caatinga arbustiva densa, caatinga arbórea e mata seca. Destas, 74% são cobertas por caatinga arbustiva densa, aproximadamente 17% da área coberta por caatinga arbustiva aberta, 6% de mata seca e 2% de caatinga arbórea, como mostra abaixo a Figura 31 (LIRA, 2012)

Figura 31 - Mapa de vegetação da bacia do Pentecoste.



Para a aplicação do modelo foram selecionadas 14 bacias, todas inseridas na Bacia do Pentecoste (Figura 32). A escolha das bacias se deu pela facilidade de acesso a estas estruturas hidráulicas localizadas nas proximidades das estradas e por caracterizar bem a heterogeneidade dos reservatórios da rede. Como pode ser visto na Tabela 19, as áreas das bacias monitoradas variam desde 12,8 ha até 23.294 ha. Os traçados das bacias foram feitos com auxílio de ferramentas de geoprocessamento através de software especializado. A escolha por tais bacias e, conseqüentemente, reservatórios, se deu pelo fato de os mesmos já terem sido monitorados por equipes de pesquisa.

Figura 32 - Sub-bacias monitoradas.



Os reservatórios monitorados e suas respectivas coordenadas de localização podem ser verificadas na Tabela 20 abaixo.

Tabela 20 - Coordenadas geográficas dos açudes monitorados

Açude	Coordenada X	Coordenada Y
Açude 1	458102	9522074
Açude 2	458228	9523037
Açude 3	458476	9523382
Açude 4	461619	9519485
Açude 5	475496	9544535
Açude 7	474930	9550028
Açude 8	473665	9549234
Açude 9	488930	9541919
Açude 10	498900	9552335
Desterro	487344	9551307
São Domingos	468581	9533428
Salão	465485	9512852
Souza	468588	9514295
São Mateus	465217	9516736

5.2.2 Caracterização granulométrica dos sedimentos na bacia hidrográfica do açude Pentecoste

A caracterização do solo matriz, ou de origem, de cada bacia foi feita por ferramenta de interpolação. Primeiramente, foram coletadas 37 amostras de solo indeformadas com auxílio de amostrador Urland em pontos estratégicos da Bacia do Pentecoste e encaminhadas à laboratório para análise granulométrica. Os teores de areia grossa, média, fina, silte e argila, como também a caracterização textural do solo coletado podem ser verificados na Tabela 21.

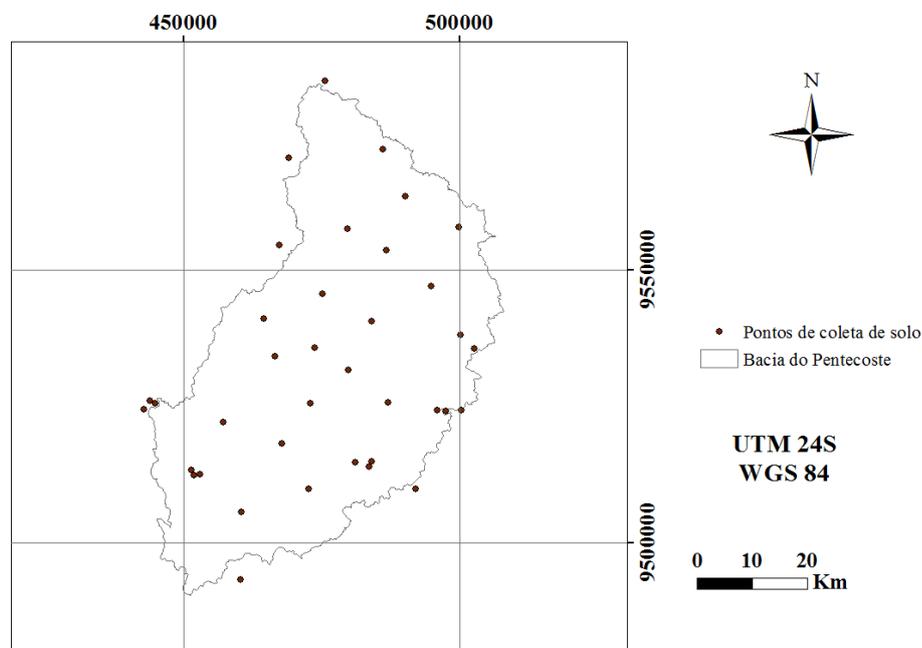
Tabela 21 - Característica textural do solo nos pontos coletados da bacia do Pentecoste.

Ponto	Longitude	Latitude	Areia grossa (%)	Areia média (%)	Areia fina (%)	Silte (%)	Argila (%)	Classificação SBCS
1	494919	9547067	5	23	35,53	18,20	0,72	Areia franca
2	500312	9538054	3	16	55,26	19,39	0,88	Areia franca
3	502677	9535541	3	15	18,43	42,48	21,30	Franco-siltoso
4	497510	9524133	9	22	29,99	24,28	3,40	Franco-arenoso
5	495972	9524382	9	32	37,55	14,33	0,80	Areia franca
6	500419	9524257	6	27	28,12	32,99	2,30	Franco-arenoso
7	492120	9509891	6	16	12,89	12,79	0,41	Areia franca
8	484157	9514929	10	29	33,02	15,49	0,75	Areia franca
9	481146	9514831	4	42	31,44	21,18	0,91	Areia franca
10	483732	9513945	5	23	38,25	25,00	7,19	Franco-arenoso
11	460564	9505658	6	30	37,74	20,76	0,86	Areia franca
12	460380	9493361	7	25	27,99	27,12	3,62	Franco arenoso
13	443889	9526015	10	20	18,73	16,04	2,35	Areia franca
14	442767	9524426	6	27	31,00	29,00	2,28	Franco arenoso
15	444793	9525548	9	33	26,53	20,68	0,76	Areia franca
16	451863	9512352	2	25	40,36	27,83	0,88	Areia franca
17	451489	9513287	3	36	45,03	15,07	0,91	Areia franca
18	452922	9512507	6	24	30,40	22,98	2,07	Areia franca
19	472978	9525630	5	27	40,83	25,94	0,89	Areia franca
20	475244	9545551	3	23	40,48	26,12	2,36	Franco-arenoso
21	467363	9554483	5	27	34,31	27,63	2,35	Franco-arenoso
22	469170	9570437	5	18	25,18	40,32	6,78	Franca
23	499944	9557735	3	45	34,76	15,05	0,90	Areia franca
24	490224	9563514	4	38	32,32	25,00	0,90	Areia franca
25	484182	9540528	12	15	27,19	9,23	0,48	Arenosa
26	479979	9531728	2	24	40,45	29,44	0,89	Franco-arenoso

27	487072	9525686	6	27	31,50	25,57	3,70	Franco-arenoso
28	467895	9518199	8	20	26,58	27,75	4,54	Franco-arenoso
29	472640	9509875	3	21	43,72	27,33	0,88	Areia franca
30	457273	9522189	5	18	32,71	31,85	5,06	Franco-arenoso
31	473822	9535784	5	30	34,39	25,89	0,86	Areia franca
32	466631	9534109	1	29	42,63	23,86	2,55	Areia franca
33	464562	9541005	3	28	32,07	35,45	0,91	Franco-arenoso
34	479766	9557489	1	5	35,82	47,78	10,88	Franco-siltoso
35	486859	9553548	4	28	39,74	24,19	2,42	Areia franca
36	486227	9572062	1	11	58,84	27,38	2,56	Franco-arenoso
37	475734	9584486	4	36	40,18	17,89	0,89	Areia franca

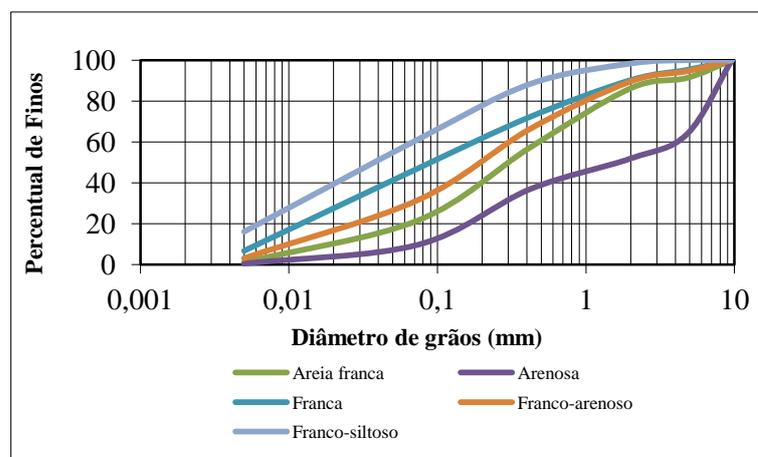
A localização dos pontos de coleta de solo na Bacia do Pentecoste pode ser visualizada na Figura 33 abaixo.

Figura 33 - Pontos de coleta de solo na bacia do Pentecoste.



Cinco classes texturais foram verificadas nesse levantamento: areia, areia-franca, franca-arenosa, franca e franca-siltosa. As curvas granulométricas de cada classe textural podem ser verificadas no Gráfico 16.

Gráfico 16 - Curvas granulométricas dos tipos de solo encontrados na bacia do Pentecoste.

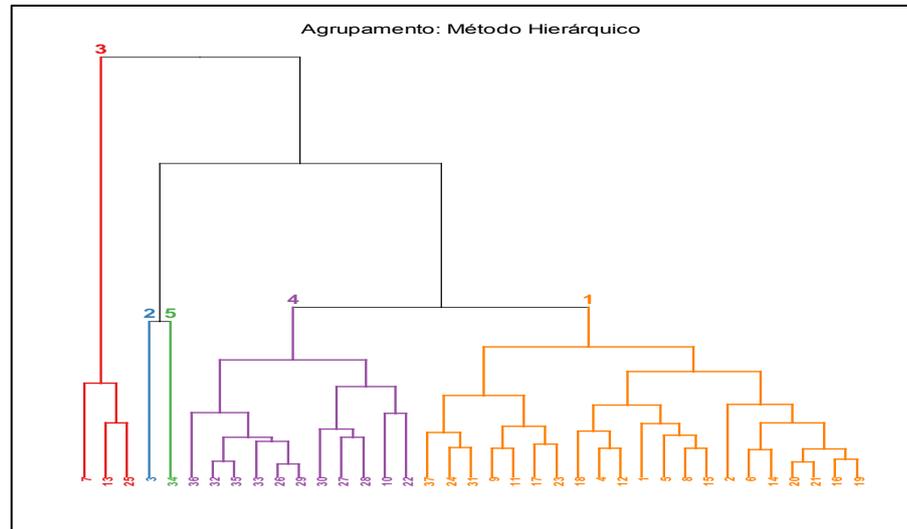


Um dendograma, Figura 34, foi feito com o objetivo de se conhecer as frequências absolutas de cada classe textural encontrada. Como pode ser visto, duas classes texturais são

responsáveis por quase que totalidade da amostragem, areia-franca e franca-arenosa.

Assim, decidiu-se converter as demais classes para uma das duas mencionadas anteriormente.

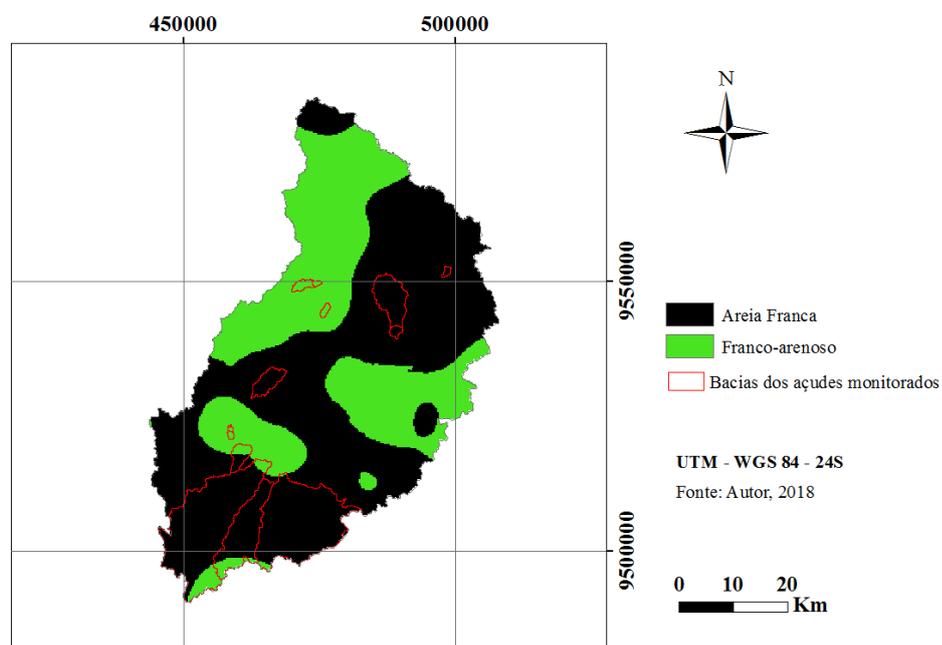
Figura 34 - Dendograma com os grupos pertencentes a cada tipo de solo.



1: areia-franca; 2: franco; 3: franco-siltoso; 4: franco-arenoso; 5: areia.

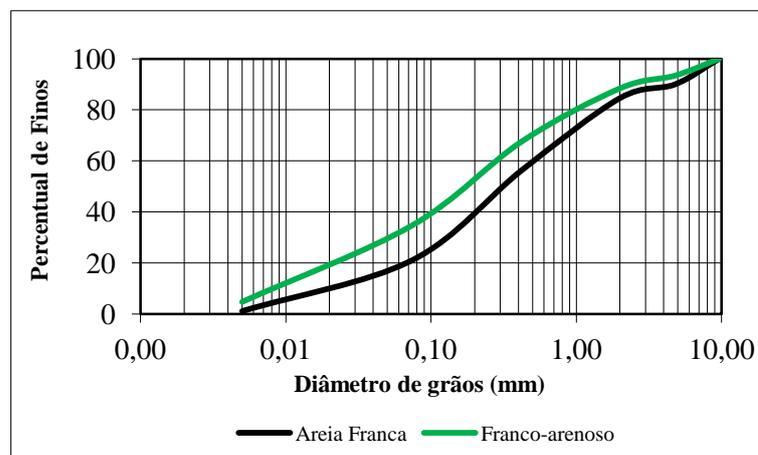
Após a definição da caracterização textural da bacia, foi realizada a interpolação dos dados, com auxílio de ferramenta de geoprocessamento. A disponibilização de solo na Bacia do Pentecoste após a interpolação pode ser verificada na Figura 35.

Figura 35 - Disponibilização dos solos na bacia do Pentecoste e sub-bacias monitoradas.



E suas curvas granulométricas podem ser verificadas no Gráfico 17 abaixo.

Gráfico 17 - Curvas granulométricas dos solos predominantes na bacia do Pentecoste



Para se determinar o padrão granulométrico do solo matriz de cada sub-bacia, foi necessário, primeiramente, determinar em qual(is) manchas de solo a mesma estava inserida. Caso uma bacia estivesse inserida em 2 tipos de mancha de solo, o procedimento utilizado para se obter o padrão granulométrico médio do solo dessa bacia foi utilizando o Fator Área e o Fator Erosão. O Fator Área foi calculado como sendo o percentual de cada tipo, dos 2 solos predominantes, na sub-bacia. Se, na sub-bacia, houvesse a predominância total de apenas 1 tipo de solo, o Fator de Área desse solo seria 1 e o outro, conseqüentemente, seria 0. Caso a sub-bacia contivesse ambos os solos o Fator de Área de cada solo seria a relação entre a área do mesmo e a área total. Os resultados à respeito do padrão granulométrico do solo de cada bacia podem ser verificados na Tabela 23.

Tabela 22 - Característica granulométrica do solo das 14 sub-bacias após a aplicação do fator de Área.

Açude	Área (m ²)	Área (m ²)		Fator de Área		Curva granulométrica					
		Solo 1	Solo 2	Solo 1	Solo 2	0,005	0,074	0,42	2	4,8	9,6
1	1460040,121		1460040,121	0	1	4,7	34,7	67,6	88,5	93,5	100,0
2	828208,9206		828208,9206	0	1	4,7	34,7	67,6	88,5	93,5	100,0
3	128073,404		128073,404	0	1	4,7	34,7	67,6	88,5	93,5	100,0
4	12687808,99	6365881,137	6321927,853	0,501732	0,498268	3,0	28,1	62,1	86,6	91,8	100,0
5	2894446,172		2894446,172	0	1	4,7	34,7	67,6	88,5	93,5	100,0
7	1477111,021		1477111,021	0	1	4,7	34,7	67,6	88,5	93,5	100,0
8	6010881,034		6010881,034	0	1	4,7	34,7	67,6	88,5	93,5	100,0
9	3927589,053	3927589,053		1	0	1,1	21,1	56,3	84,6	90,1	100,0
10	2066253,421	2066253,421		1	0	1,1	21,1	56,3	84,6	90,1	100,0
Des	26144104,16	26144104,16		1	0	1,1	21,1	56,3	84,6	90,1	100,0
SD	18024176,95	18024176,95		1	0	1,1	21,1	56,3	84,6	90,1	100,0
SM	232940035,2	208998011,6	23129308,91	0,897218	0,099293	1,5	22,5	57,5	85,0	90,4	100,0
Salão	83290409,96	70927179,41	11968169,47	0,851565	0,143692	1,7	23,1	58,0	85,2	90,6	100,0
Souza	200340984,8	196293928,5	3146575,758	0,979799	0,015706	1,2	21,3	56,5	84,7	90,1	100,0

Para cálculo do Fator Erosão foi estabelecido valores de erosão para cada tipo de solo de acordo com a pesquisa realizada por Lira (2012), a qual verificou que o solo tipo 1, areia-franca, tinha uma erosão em torno de $159,9 \text{ ton.ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$ e o solo tipo 2, franca-arenosa, tinha uma erosão em torno de $171,39 \text{ ton.ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$.

5.2.3 Granulometria do sedimento desprendido

De posse dos dados granulométricos do solo matriz, foi possível aplicar um modelo de desprendimento, como realizado no Capítulo anterior, que obteve o melhor resultado quando aplicado ao solo matriz da BEVC, sendo escolhido o modelo de Foster *et al.* (1981).

Sob as condições de uma bacia variada em relação à cobertura vegetal, o modelo de Foster *et al.* (1981) apresentou os melhores resultados ao prever o PSD da BEVC como um todo, obtendo um coeficiente de Nash e Sutcliffe NS de 0,99, justificando sua aplicabilidade na rede de reservatórios.

Após o desprendimento do solo de origem, os sedimentos são transportados pelas encostas e rede de drenagem, sendo depositados durante o percurso ou atingindo o exutório. Como realizado no Capítulo I, um fator de transporte foi inserido para se obter uma curva granulométrica modelada dos sedimentos imediatamente afluentes aos açudes de cada bacia.

Assim, o Fator de Transporte é um fator médio calculado pela relação entre o diâmetro de sedimento no solo desprendido para uma determinada fração percentual e o diâmetro do sedimento no material afluente ao exutório, para a mesma fração percentual, observado na BEVC. Admitiu-se, para todas as sub-bacias, um valor constante de 2,9, com base nos resultados encontrados na BEVC.

5.2.4 Granulometria do sedimento depositado nos reservatórios

Na estimativa da granulometria do sedimento depositado no interior dos reservatórios foi admitido que a granulometria do sedimento afluente aos mesmos, resultado do material desprendido e transportado pela bacia de contribuição, é similar ao padrão granulométrico do sedimento depositado, evidenciado na BEVC, com base nas elevadas taxas de retenção, comuns nos reservatórios desta região, superiores a 90% na maioria dos casos conforme Almeida (2001), Lima Neto *et al.* (2011), Bronstert *et al.* (2014), Dendy (1974), Jothiprakash e Garg (2008), Sultana e Naik (2015)

Afim de se verificar a veracidade do afirmado no parágrafo anterior, foram retiradas amostras de solo do interior de todos os reservatórios estudados com o objetivo de se comparar os resultados granulométricos modelados com os reais amostrados. Para tanto, nos reservatórios correspondentes de cada sub-bacia, foram retiradas 3 amostras (Figura 36) de solo, indeformadas, distanciadas cerca de 100 m uma da outra, sendo a amostra 3 locada próxima a entrada do açude e a amostra 1 locada à margem da barragem. A retirada foi feita com auxílio de amostrador Urland na profundidade de 0 – 10 cm, entre os dias 24 e 26 de novembro de 2016. As amostras foram encaminhadas ao Laboratório de Mecânica e Pavimentação e feitas análises granulométricas com e sem dispersante.

Figura 36 - Padrão de coleta de solo no interior dos reservatórios.



O objetivo da amostragem de sedimento nos interiores dos reservatórios foi para comparar o padrão granulométrico real com o padrão granulométrico modelado. A justificativa pelo também não uso do dispersante na análise foi para a verificação do aspecto granulométrico do solo *in natura*, já que se tem ideia de que partículas podem sofrer agregação durante sua estadia ou transporte através da bacia, o que pode provocar alterações em seus aspectos físicos e, conseqüentemente, em sua mobilidade.

Figura 37 - Amostra indeformada de sedimento.



5.2.5 Análise estatística

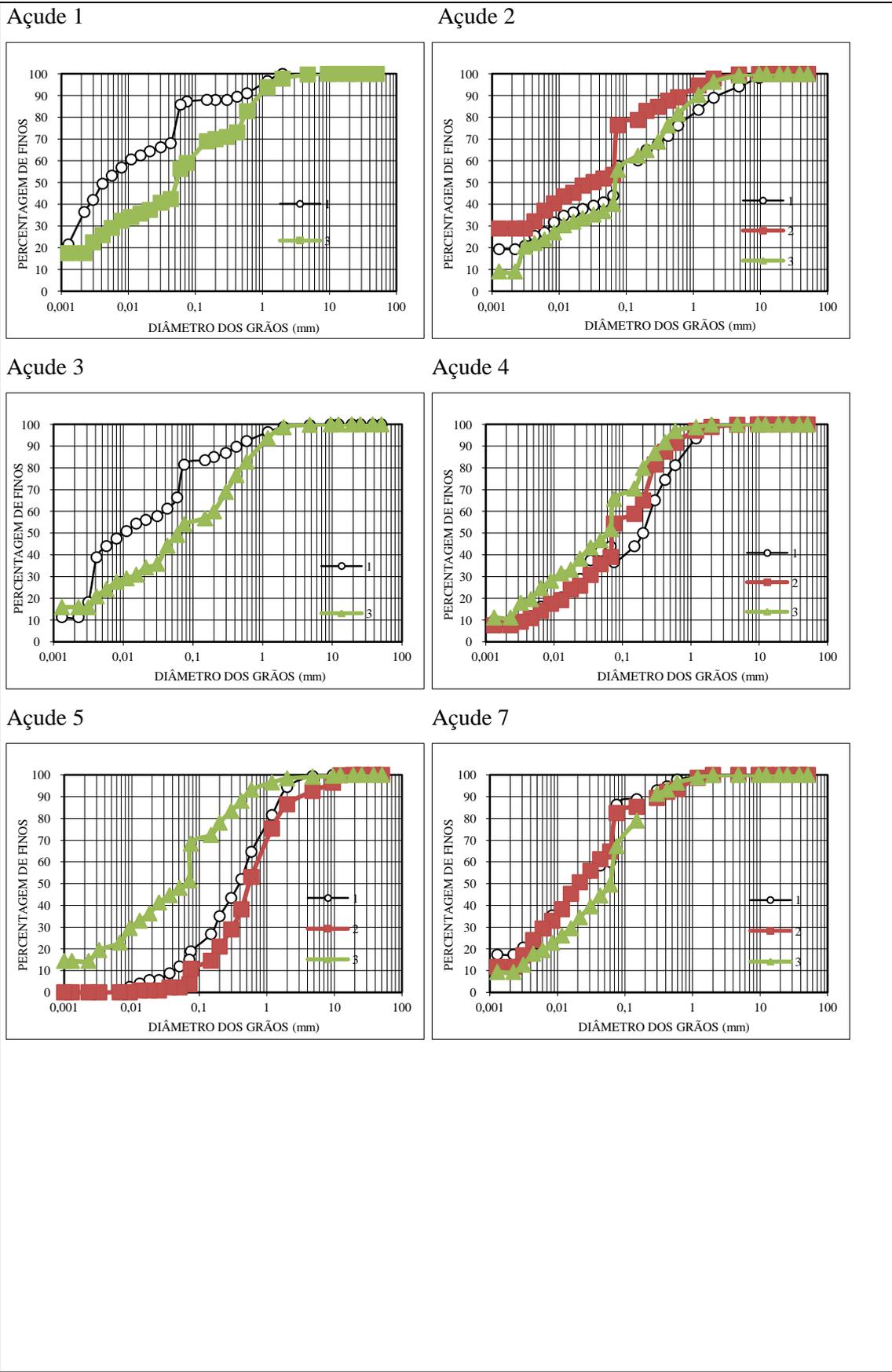
Na avaliação estatística de desempenho do modelo, os dados granulométricos modelados foram comparados aos dados granulométricos reais no interior dos açudes, obtido através da média granulométrica dos 3 pontos amostrados em cada açude. Para tal, o coeficiente de Nash e Sutcliffe (NS) foi utilizado.

5.3 Resultados e Discussão

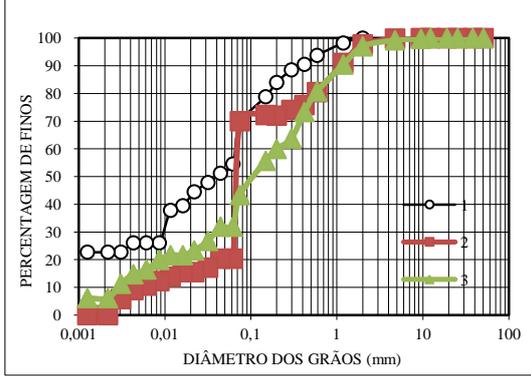
5.3.1 Comportamento granulométrico dos sedimentos nos interiores dos reservatórios

A Figura 38 abaixo dispõe os gráficos onde estão contidas as curvas granulométricas provenientes das coletas de sedimento, *in natura*, nos interiores dos açudes. Observa-se um comportamento análogo ao verificado no capítulo anterior, quando foi analisado a dinâmica de sedimentos no interior do Açude Escola. A granulometria do sedimento afluyente ao reservatório apresentou uma tendência mais fina à medida que se aproxima da barragem.

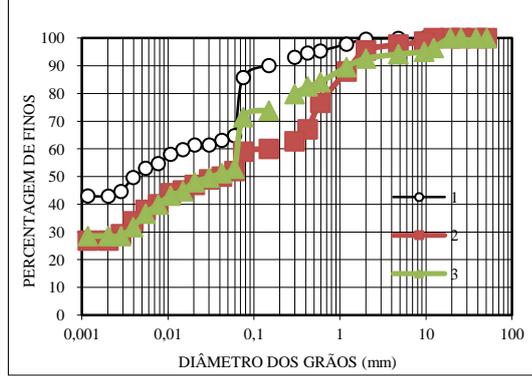
Figura 38 - Curvas granulométricas do solo, *in natura*, no interior dos reservatórios monitorados na Bacia do Pentecoste.



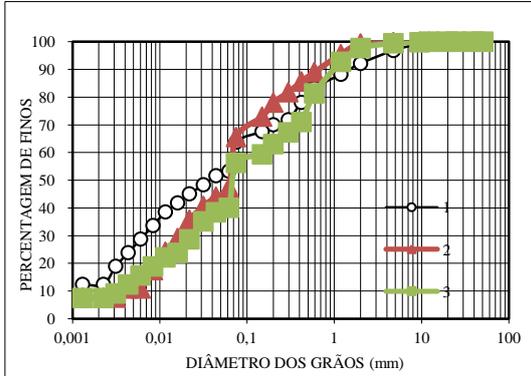
Açude 8



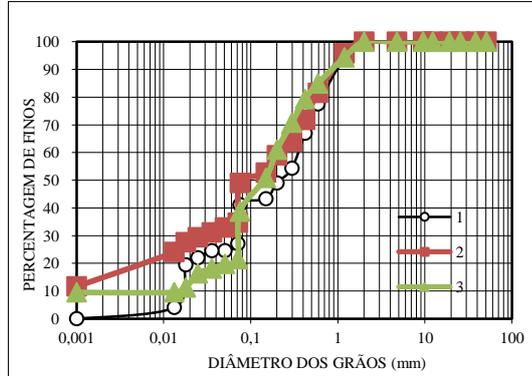
Açude 9



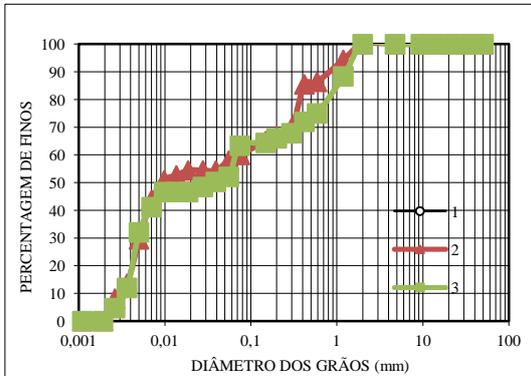
Açude 10



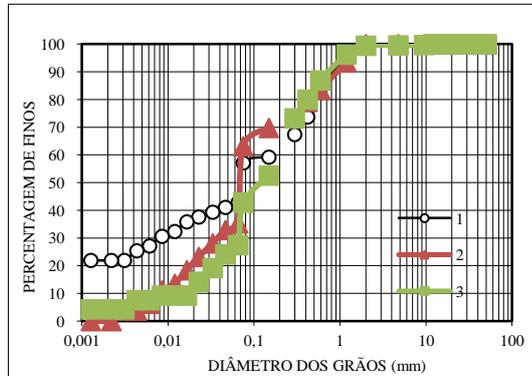
Desterro



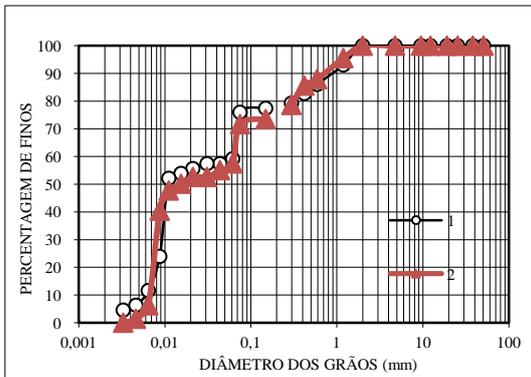
Salão



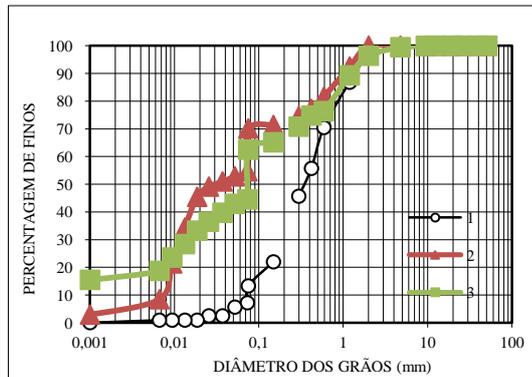
São Domingos



São Mateus



Souza

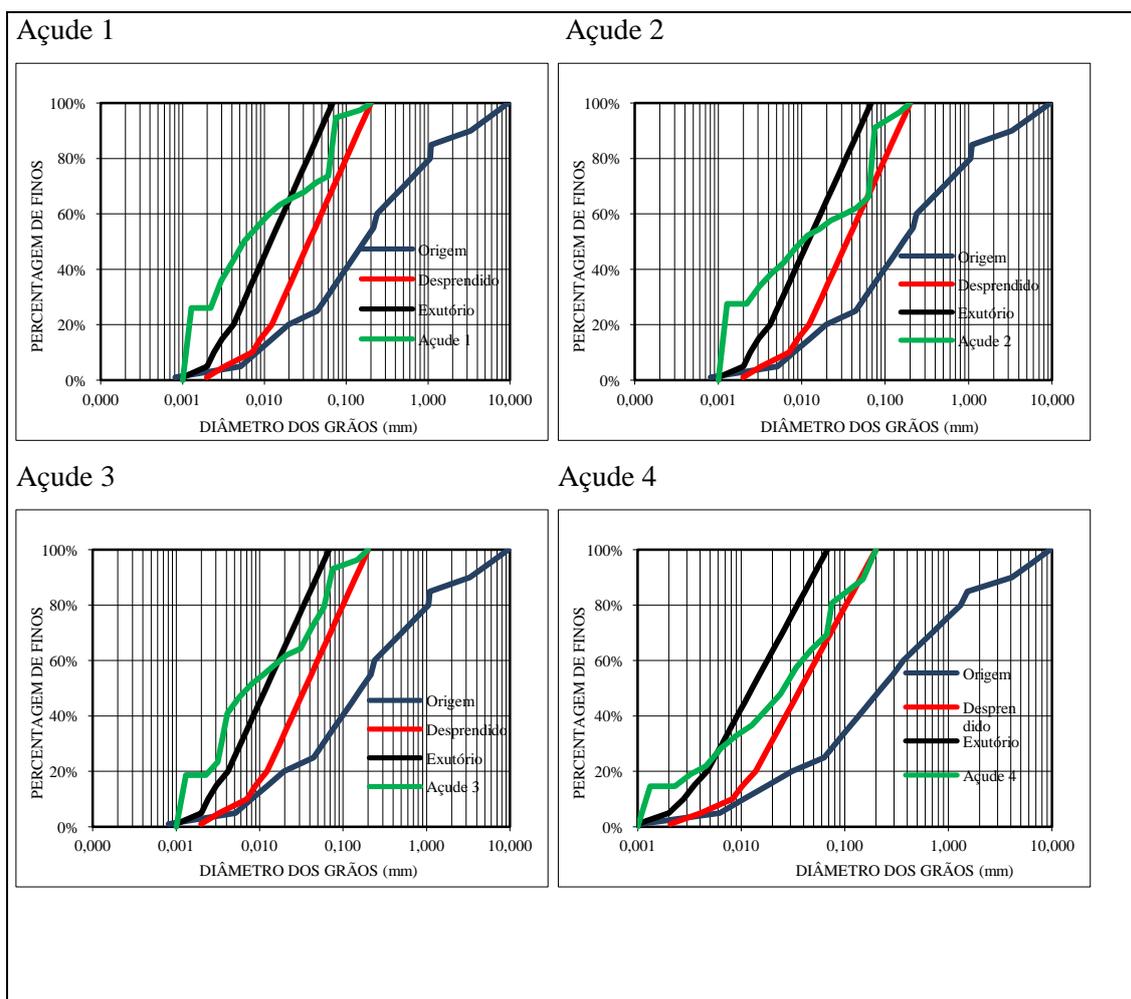


5.3.2 Aplicação do modelo de dinâmica granulométrica de sedimento

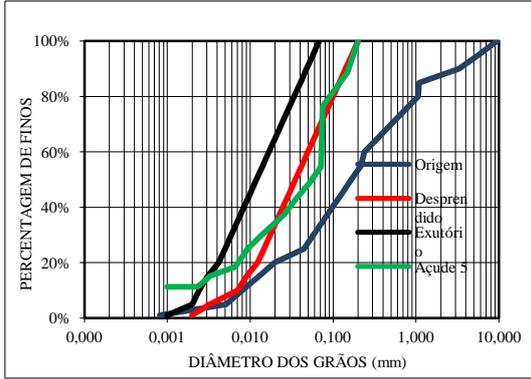
Na Figura 39 abaixo, estão dispostos os gráficos referentes às curvas granulométricas, desde a origem, entendendo origem como o solo da sub-bacia a qual pertence determinado açude, passando pelo desprendido e exutório, ambos modelados, até o solo no interior do açude, tido como a média textural de 3 pontos coletados, como apresentado na metodologia.

Pode ser observado através dos gráficos que as curvas granulométricas dos solos contidos no interior dos açudes estão próximas às curvas modeladas no exutório. Visualmente, há curvas próximas tanto em pequenos açudes, caso do açude 3, como nos grandes, caso do São Mateus e Salão, por exemplo. Cabe um destaque aos Açudes 5 e Desterro, ambos tiveram suas curvas granulométricas de interior do açude semelhantes à curva do solo desprendido.

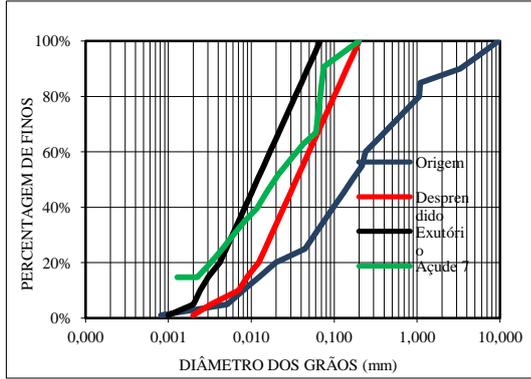
Figura 39: Curvas granulométricas dos sedimentos desde a origem até o exutório, modelado, e padrão granulométrico real dos sedimentos no interior dos reservatórios.



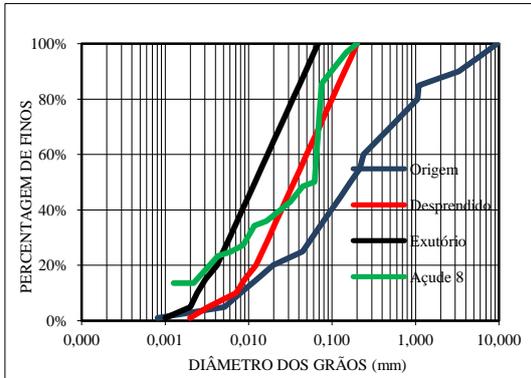
Açude 5



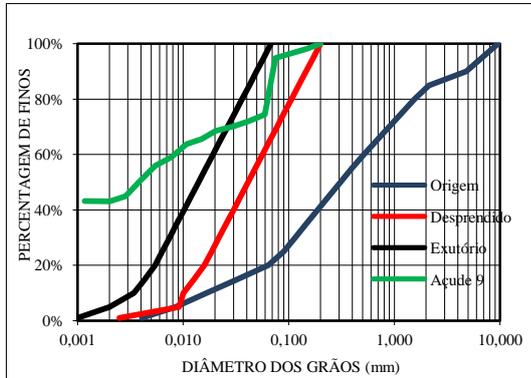
Açude 7



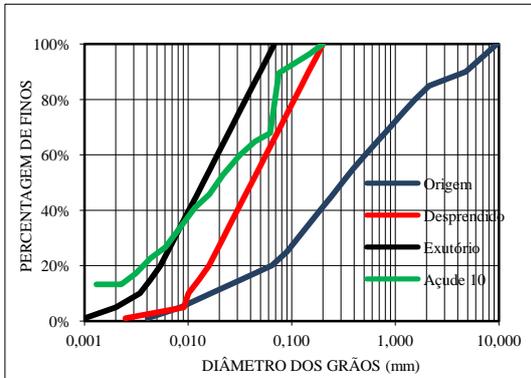
Açude 8



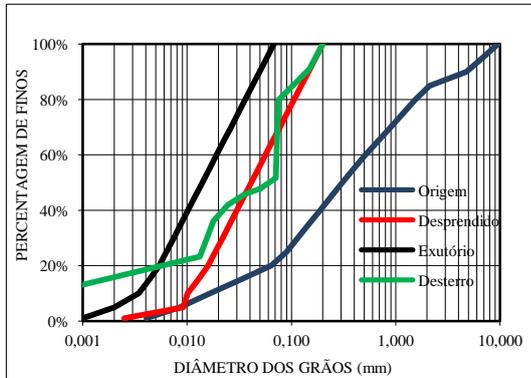
Açude 9



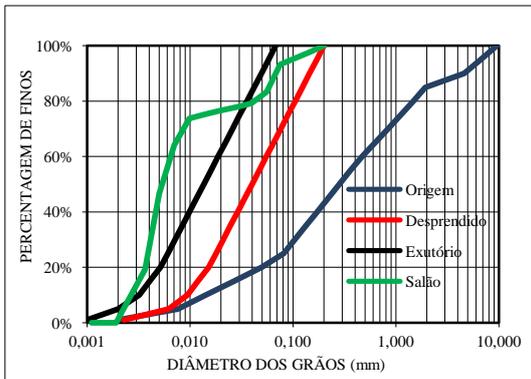
Açude 10



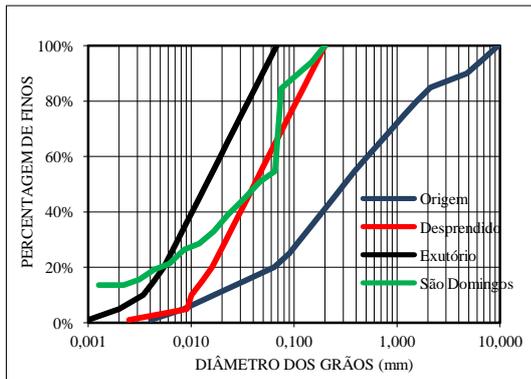
Desterro

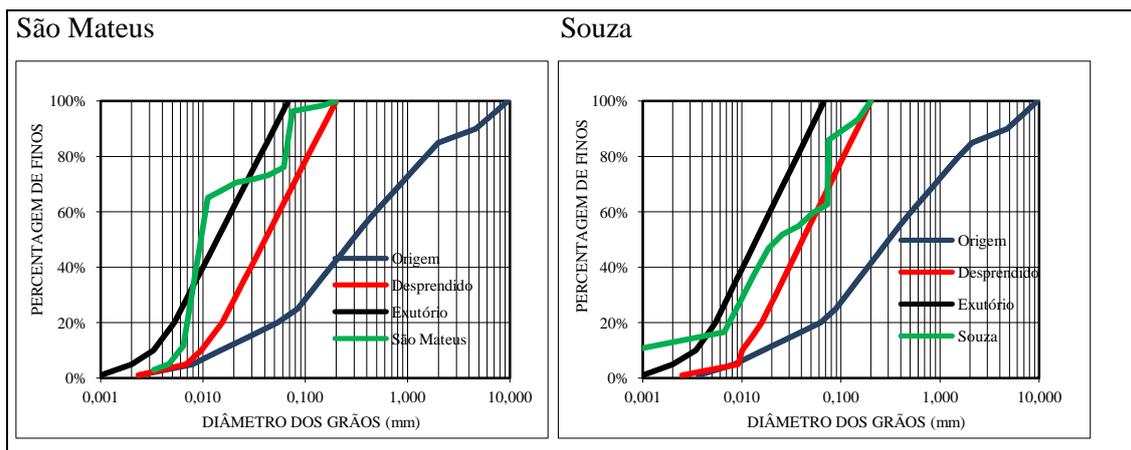


Salão



São Domingos





A análise da Figura 38 revela um determinado padrão na dinâmica dos sedimentos no interior de reservatórios, independentemente do tamanho do mesmo, padrão discutido por Haan *et al.* (1994), o qual concluiu que sedimentos mais finos tendem a percorrer maiores distâncias em fluxo devido ao seu pequeno diâmetro, baixa massa e, conseqüentemente, menor velocidade de queda. Foi observado que em alguns reservatórios as curvas se invertem, pontos mais próximos à barragem obtiveram granulometrias mais grosseiras. Quanto a isso, um explicação provável é a possibilidade de ter tido um acúmulo de sedimentos mais grosseiro nesse local. Os reservatórios do semiárido tem característica intermitente, ou seja, que acumulam água proveniente de escoamento superficial apenas durante a quadra chuvosa. Por essa razão, os primeiros escoamentos superficiais afluentes ao reservatório encontram um volume hídrico baixo, o que possibilita que as classes de sedimentos, não importante os diâmetros, trafeguem até próximo à barragem. À medida que o volume hídrico no interior do reservatório vai aumentando, os sedimentos carreados pelas vazões afluentes vão sendo depositados obedecendo ao exposto por Haan *et al.*, (1994), sedimentos grosseiros sendo depositados primeiramente. Sendo assim, dentro de uma mesma quadra chuvosa, os sedimentos mais grosseiros tanto podem ser depositados próximo à barragem quanto próximo do ponto à montante, dependendo do volume hídrico presente no reservatório num determinado momento.

Com relação ao modelo de dinâmica granulométrica de sedimentos, verificados na Figura 39, os resultados mostraram uma proximidade entre as curvas granulométricas reais do solo no interior dos reservatórios (tonalidades verdes) e as curvas granulométricas, não dispersadas, estimadas no interior dos mesmos através do modelo (tonalidades pretas). É importante ressaltar que o modelo utilizou poucos dados de entrada, textura do solo de origem e fator de redução, calculado à partir de dados granulométricos de sedimentos escoados na BEVC, como dito no Capítulo 1 dessa tese, e que, como tão poucos dados de entrada e

entendendo a complexidade dos fatores que contribuem para o transporte de sedimentos em bacias hidrográficas, o modelo apresentou bom comportamento.

A Tabela 23 abaixo dispõe do RMSE e coeficiente NS entre os valores reais médios de granulometria de solo no interior do reservatório e os valores dessa mesma granulometria após a aplicação do modelo para todas as sub-bacias estudadas. Verificando os valores expostos na Tabela, pode-se ver que os coeficientes NS variaram de -1,23 à 0,52, sendo os menores valores observados no açude Desterro e os maiores no açude Salão.

Os diâmetros variam em várias ordens de grandeza, o que torna difícil a comparação entre dados observados e modelados e limita a precisão do coeficiente NS. Sendo assim, optou-se por uma alternativa considerar os diâmetros em escala logarítmica, uma vez que as curvas granulométricas apresentam tal escala no eixo das abcissas. Considerando o ajuste mencionado acima, como também verificando os resultados apresentados na Tabela 24, os valores de coeficiente NS tiveram valores negativos para o açude 5 e Desterro e os demais com valores aceitáveis, chegando a 0,82.

Tabela 23 - Granulometria real e modelada do solo no interior do reservatório, coeficiente RMSE e Nash e Sutcliffe (NS) para todos os reservatórios das sub-bacias estudadas.

	Açude 1		Açude 2		Açude 3		Açude 4		Açude 5		Açude 7		Açude 8	
	Real	Modelado												
	0,200	0,068	0,200	0,068	0,200	0,068	0,200	0,068	0,200	0,068	0,200	0,068	0,200	0,068
	0,081	0,057	0,126	0,057	0,118	0,057	0,176	0,058	0,177	0,057	0,123	0,057	0,136	0,057
	0,072	0,048	0,074	0,048	0,071	0,048	0,152	0,049	0,155	0,048	0,075	0,048	0,104	0,048
	0,068	0,040	0,072	0,040	0,066	0,040	0,112	0,041	0,127	0,040	0,071	0,040	0,075	0,040
	0,065	0,034	0,070	0,034	0,060	0,034	0,074	0,035	0,096	0,034	0,068	0,034	0,073	0,034
	0,059	0,028	0,060	0,028	0,037	0,028	0,063	0,029	0,068	0,028	0,055	0,028	0,053	0,028
	0,033	0,024	0,065	0,024	0,039	0,024	0,067	0,025	0,074	0,024	0,062	0,024	0,069	0,024
	0,020	0,020	0,059	0,020	0,032	0,020	0,051	0,021	0,073	0,020	0,052	0,020	0,067	0,020
	0,012	0,017	0,033	0,017	0,018	0,017	0,039	0,018	0,072	0,017	0,036	0,017	0,066	0,017
	0,008	0,014	0,017	0,014	0,011	0,014	0,031	0,015	0,072	0,014	0,026	0,014	0,064	0,014
	0,006	0,012	0,010	0,012	0,007	0,012	0,026	0,013	0,056	0,012	0,020	0,012	0,061	0,012
	0,005	0,010	0,007	0,010	0,005	0,010	0,021	0,011	0,041	0,010	0,015	0,010	0,036	0,010
	0,004	0,008	0,005	0,008	0,004	0,008	0,016	0,009	0,030	0,008	0,012	0,008	0,024	0,008
	0,003	0,007	0,003	0,007	0,004	0,007	0,011	0,008	0,021	0,007	0,008	0,007	0,015	0,007
	0,003	0,006	0,003	0,006	0,004	0,006	0,007	0,007	0,014	0,006	0,006	0,006	0,010	0,006
							0,005	0,006	0,009	0,005	0,004	0,005	0,006	0,005
									0,007	0,004	0,003	0,004	0,003	0,004
									0,003	0,003	0,002	0,003	0,002	0,003
RMSE	0,038		0,045		0,040		0,058		0,063		0,040		0,049	
NS	0,45		0,28		0,42		0,08		-0,20		0,36		0,02	

Cont.:

	Açude 9		Açude 10		Desterro		SD		SM		Salão		Souza	
	Real	Modelado	Real	Modelado	Real	Modelado	Real	Modelado	Real	Modelado	Real	Modelado	Real	Modelado
	0,200	0,068	0,200	0,068	0,200	0,068	0,200	0,068	0,200	0,068	0,200	0,068	0,200	0,068
	0,075	0,058	0,133	0,058	0,172	0,058	0,156	0,058	0,074	0,058	0,102	0,058	0,161	0,058
	0,071	0,050	0,075	0,050	0,142	0,050	0,117	0,050	0,071	0,049	0,069	0,049	0,115	0,050
	0,067	0,042	0,069	0,042	0,109	0,042	0,075	0,042	0,067	0,042	0,059	0,042	0,075	0,042
	0,064	0,036	0,069	0,036	0,075	0,036	0,074	0,036	0,064	0,036	0,042	0,036	0,075	0,036
	0,059	0,031	0,058	0,031	0,074	0,031	0,059	0,031	0,033	0,031	0,028	0,030	0,072	0,031
	0,029	0,026	0,063	0,026	0,074	0,026	0,070	0,026	0,020	0,026	0,009	0,026	0,074	0,026
	0,014	0,022	0,045	0,022	0,073	0,022	0,069	0,022	0,011	0,022	0,007	0,022	0,073	0,022
	0,008	0,019	0,032	0,019	0,072	0,019	0,067	0,019	0,011	0,019	0,007	0,019	0,054	0,019
	0,005	0,016	0,025	0,016	0,071	0,016	0,066	0,016	0,010	0,016	0,006	0,016	0,038	0,016
	0,004	0,014	0,020	0,014	0,062	0,014	0,044	0,014	0,010	0,014	0,005	0,014	0,023	0,014
	0,003	0,012	0,015	0,012	0,034	0,012	0,033	0,012	0,009	0,012	0,005	0,012	0,018	0,012
			0,011	0,010			0,025	0,010	0,009	0,010	0,005	0,010	0,015	0,010
			0,009	0,009			0,019	0,009	0,008	0,008	0,004	0,008	0,012	0,009
			0,007	0,007			0,013	0,007	0,008	0,007	0,004	0,007	0,010	0,007
			0,005	0,006			0,008	0,006	0,007	0,006	0,004	0,006	0,009	0,006
			0,004	0,005			0,005	0,005	0,007	0,005	0,004	0,005	0,008	0,005
			0,003	0,004			0,003	0,004	0,007	0,004	0,003	0,004		
RMSE	0,042		0,040		0,071		0,050		0,033		0,034		0,050	
NS	0,39		0,37		-1,23		0,05		0,50		0,52		0,13	

Tabela 24 - Valores reais e modelados para cada açude e respectivos valores de RMSE e NS após aplicado o \log_{10} nos diâmetros.

Percentual de Finos	A1		A2		A3		A4		A5		A7	
	Real	Modelado										
100	-0,699	-1,168	-0,699	-1,168	-0,699	-1,168	-0,699	-1,168	-0,699	-1,168	-0,699	-1,168
95	-1,092	-1,243	-0,898	-1,243	-0,926	-1,243	-0,754	-1,240	-0,751	-1,243	-0,909	-1,243
90	-1,145	-1,319	-1,128	-1,319	-1,146	-1,319	-0,817	-1,313	-0,810	-1,319	-1,127	-1,319
85	-1,166	-1,395	-1,141	-1,395	-1,182	-1,395	-0,952	-1,385	-0,897	-1,395	-1,146	-1,395
80	-1,189	-1,470	-1,155	-1,470	-1,221	-1,470	-1,128	-1,458	-1,016	-1,470	-1,165	-1,470
75	-1,227	-1,546	-1,224	-1,546	-1,436	-1,546	-1,200	-1,531	-1,168	-1,546	-1,258	-1,546
70	-1,479	-1,622	-1,184	-1,622	-1,405	-1,622	-1,171	-1,603	-1,131	-1,622	-1,207	-1,622
65	-1,706	-1,697	-1,233	-1,697	-1,497	-1,697	-1,290	-1,676	-1,136	-1,697	-1,288	-1,697
60	-1,938	-1,773	-1,485	-1,773	-1,749	-1,773	-1,405	-1,748	-1,141	-1,773	-1,445	-1,773
55	-2,097	-1,849	-1,766	-1,849	-1,953	-1,849	-1,502	-1,821	-1,140	-1,849	-1,580	-1,849
50	-2,248	-1,925	-1,996	-1,925	-2,139	-1,925	-1,582	-1,893	-1,252	-1,925	-1,709	-1,925
45	-2,341	-2,000	-2,140	-2,000	-2,282	-2,000	-1,686	-1,966	-1,388	-2,000	-1,821	-2,000
40	-2,439	-2,076	-2,298	-2,076	-2,390	-2,076	-1,808	-2,039	-1,519	-2,076	-1,923	-2,076
35	-2,537	-2,152	-2,467	-2,152	-2,421	-2,152	-1,957	-2,111	-1,672	-2,152	-2,079	-2,152
30	-2,599	-2,227	-2,593	-2,227	-2,454	-2,227	-2,135	-2,184	-1,859	-2,227	-2,215	-2,227
25							-2,263	-2,256	-2,029	-2,303	-2,350	-2,303
20									-2,139	-2,379	-2,485	-2,379
15									-2,488	-2,516	-2,643	-2,516
RMSE	0,289		0,311		0,247		0,346		0,495		0,265	
NS	0,771		0,715		0,807		0,454		-0,005		0,771	

Cont.:

A8		A9		A10		Desterro		SD		SM		Salão		Souza	
Real	Modelado	Real	Modelado	Real	Modelado	Real	Modelado	Real	Modelado	Real	Modelado	Real	Modelado	Real	Modelado
-0,699	-1,168	-0,699	-1,168	-0,699	-1,168	-0,699	-1,168	-0,699	-1,168	-0,699	-1,168	-0,699	-1,168	-0,699	-1,168
-0,865	-1,243	-1,124	-1,236	-0,876	-1,236	-0,765	-1,236	-0,807	-1,236	-1,130	-1,237	-0,990	-1,238	-0,792	-1,236
-0,984	-1,319	-1,147	-1,305	-1,124	-1,305	-0,847	-1,305	-0,934	-1,305	-1,150	-1,307	-1,164	-1,307	-0,939	-1,305
-1,126	-1,395	-1,171	-1,374	-1,159	-1,374	-0,961	-1,374	-1,124	-1,374	-1,171	-1,376	-1,230	-1,377	-1,125	-1,374
-1,137	-1,470	-1,197	-1,442	-1,160	-1,442	-1,125	-1,442	-1,134	-1,442	-1,193	-1,446	-1,372	-1,447	-1,128	-1,442
-1,277	-1,546	-1,230	-1,511	-1,238	-1,511	-1,129	-1,511	-1,230	-1,511	-1,479	-1,515	-1,549	-1,517	-1,141	-1,511
-1,159	-1,622	-1,542	-1,580	-1,199	-1,580	-1,133	-1,580	-1,153	-1,580	-1,700	-1,585	-2,059	-1,587	-1,132	-1,580
-1,171	-1,697	-1,867	-1,648	-1,348	-1,648	-1,137	-1,648	-1,163	-1,648	-1,954	-1,654	-2,140	-1,657	-1,134	-1,648
-1,183	-1,773	-2,080	-1,717	-1,499	-1,717	-1,142	-1,717	-1,173	-1,717	-1,974	-1,724	-2,184	-1,727	-1,267	-1,717
-1,195	-1,849	-2,284	-1,786	-1,605	-1,786	-1,146	-1,786	-1,178	-1,786	-1,996	-1,793	-2,224	-1,797	-1,426	-1,786
-1,215	-1,925	-2,417	-1,854	-1,709	-1,854	-1,207	-1,854	-1,352	-1,854	-2,019	-1,863	-2,267	-1,867	-1,640	-1,854
-1,439	-2,000	-2,540	-1,923	-1,814	-1,923	-1,474	-1,923	-1,478	-1,923	-2,043	-1,933	-2,307	-1,937	-1,757	-1,923
-1,614	-2,076			-1,952	-1,992			-1,608	-1,992	-2,066	-2,002	-2,329	-2,007	-1,833	-1,992
-1,837	-2,152			-2,050	-2,060			-1,728	-2,060	-2,086	-2,072	-2,353	-2,076	-1,908	-2,060
-2,009	-2,227			-2,147	-2,129			-1,871	-2,129	-2,106	-2,141	-2,379	-2,146	-1,979	-2,129
-2,210	-2,303			-2,274	-2,198			-2,105	-2,198	-2,128	-2,211	-2,406	-2,216	-2,053	-2,198
-2,464	-2,379			-2,427	-2,267			-2,294	-2,267	-2,151	-2,280	-2,435	-2,286	-2,122	-2,267
-2,612	-2,516			-2,577	-2,364			-2,546	-2,364	-2,175	-2,384	-2,518	-2,393		
0,421		0,361		0,236		0,490		0,385		0,194		0,314		0,328	
0,379		0,613		0,801		-4,779		0,396		0,816		0,690		0,454	

Os sedimentos que alcançam o reservatório são consequência da capacidade de erosão do solo nas encostas e do transporte de sedimentos pela bacia. Algumas considerações podem ser feitas após análise dos resultados da aplicação do modelo proposto. Primeiramente, o mesmo utiliza poucas variáveis: textura do solo matriz da bacia e fator de transporte da mesma. Em relação à textura do solo, é possível, visto que solo é um fator altamente dinâmico principalmente em escala de bacia hidrográfica, que a textura matriz de determinada bacia seja distinta do resultado obtido do modelo, lembrando que o modelo utilizou o processo de interpolação para gerar o mapa de solo para cada sub-bacia.

Ainda em relação ao solo, porém do interior do reservatório, a textura foi resultado da média granulométrica de 3 pontos coletados. Devido à dinâmica ocorrente no processo de transporte de sedimentos em reservatórios, já mencionado aqui nessa pesquisa, é provável que um maior número de amostras seja necessário para poder caracterizar a textura granulométrica.

Nos reservatórios onde o modelo não obteve resultado aceitável, as curvas granulométricas reais se aproximam das curvas do material desprendido, modelado pelo método de Foster *et al.* (1981). Sendo assim, é possível que algumas características geomorfológicas da bacia afetem a capacidade de transporte de sedimentos pela mesma.

Em relação ao transporte de sedimentos por uma bacia de captação, Li *et al.* (2015) atentou para o fato de cada uma ter uma capacidade de retenção de sedimento, o qual afeta diretamente a quantidade de partículas que alcançam o reservatório.

Boix-Fayos *et al.* (2006) atenta para o fato de que o transporte de sedimento em uma bacia é afetada pela sua escala de tamanho. Medeiros *et al.* (2014) informam que é necessário o conhecimento das condições de transporte de sedimento através e entre os diferentes locais da bacia, e que o potencial de movimento das partículas no sistema é um importante fator para entender e estimar o fluxo de sedimentos. Zhang *et al.* (2009) analisa que a capacidade de transporte de sedimentos, que é a carga máxima de equilíbrio de sedimentos que um fluxo pode transportar, é um conceito chave para o desenvolvimento de modelos de erosão e que desempenha um papel fundamental na determinação da taxa de desprendimento e transporte de sedimentos.

Bracken e Kirkby (2009), avaliando os fatores que mais afetam a capacidade de transporte de sedimentos em bacias em ambiente semiárido, concluíram que tal capacidade, como também o escoamento superficial, são altamente afetados pela litologia. Os pesquisadores ainda afirmam que variações na declividade e características de precipitação,

principalmente em relação as suas intensidades, podem causar significativas alterações na capacidade de transporte de sedimentos em bacias do ambiente semiárido.

Sendo assim, fatores como capacidade de retenção de sedimentos, tamanho, condições de transporte, litologia da bacia podem ser inseridos em modelos de dinâmica de sedimento devido a possibilidade de os mesmos interferirem diretamente na mobilidade de sedimentos.

Com relação a modelos de dinâmica de sedimentos, Lazzari *et al.* (2014), avaliando a aplicabilidade de 3 modelos na estimativa da produção de sedimento em reservatório, concluiu que o método TU INDEX foi o que melhor previu o aporte de sedimentos no reservatório estudado. Algumas informações sobre os resultados da aplicação do método merecem destaque: os valores sugerem uma alta influência na produção de sedimentos fatores como textura do solo, cobertura vegetal e topografia, a boa previsão do método se deve também ao fato do mesmo assumir altas taxas de transporte de sedimento (SDR) na bacia, áreas com maiores teores de argila, como também as menores sub-bacias, apresentaram maiores valores de produção de sedimento.

Gao *et al.* (2013), analisando as variações temporais e espaciais do transporte de sedimentos suspensos em Walnut Gulch, sudeste do Arizona, usando dados de 16 bacias de tamanhos variados, identificaram 5 padrões de transporte e concluíram que o transporte de sedimentos em bacias do ambiente semiárido é altamente variável. Os autores ainda afirmam que os padrões tem capacidade limitada ao caracterizar o processo de transporte de sedimentos pelo fato de que mesmo dentro de um mesmo padrão, o processo de transporte pode sofrer diferenciação.

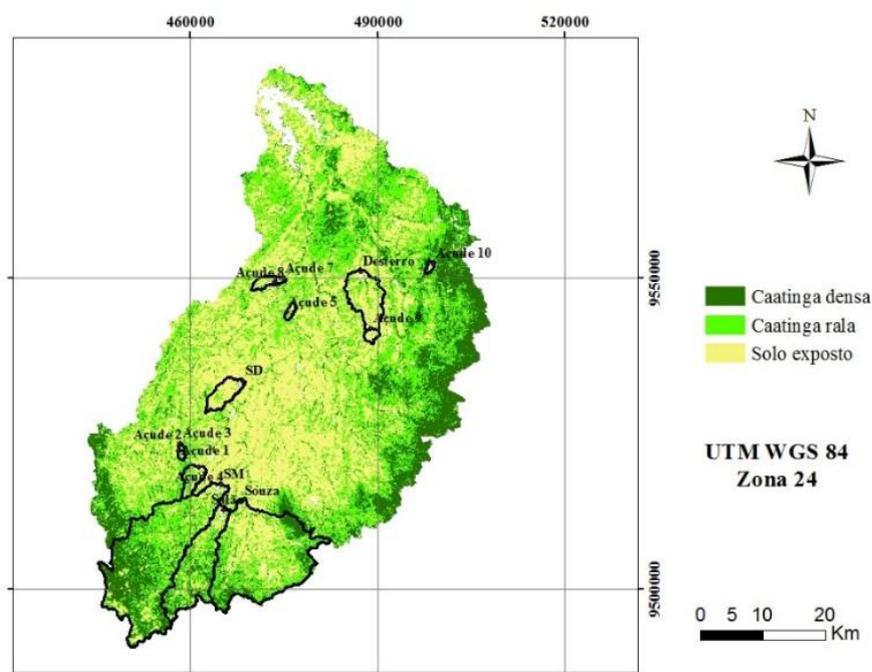
Achite e Quillon (2007) alertaram que essa alta variabilidade na capacidade de transporte em bacias no semiárido é devido às altas variabilidades de precipitação e escoamento superficial. Os pesquisadores enfatizam que há um pequeno número de pesquisas publicadas à respeito do sistema de transporte de sedimentos em zonas semiáridas e a necessidade de construir e analisar uma série longa de dados.

Como essa variabilidade da precipitação afeta a capacidade de transporte de sedimentos numa bacia foi estudada por Medeiros e Araújo (2014), avaliando o processo na Bacia Experimental de Aiuaba, nordeste do Brasil, os quais afirmaram que essa variabilidade tem considerável efeito no comportamento hidrológico com forte influência na capacidade de transporte de partículas de solo e produção de sedimento.

A cobertura vegetal também pode ser um atributo que possa causar variações consideráveis na característica granulométrica do sedimento no interior do reservatório pelo fato de a mesma influenciar nas características das partículas que são desprendidas nas

encostas, como visto no capítulo 1 dessa tese, adicionando a isso o fato de a característica granulométrica do sedimento desprendido ser um fator dos que mais afetam na caracterização do sedimento no reservatório. Foi constatado, pela análise de curvas granulométricas, que o fator de redução entre o solo matriz e o solo desprendido foi da ordem de 17 e o fator entre o solo desprendido e o que alcança o exutório, transportado pela bacia, foi da ordem de 2,94. Então, qualquer atributo que cause variação no padrão granulométrico do sedimento desprendido pode afetar abruptamente o padrão dos sedimentos no interior do reservatório. A análise da Figura 40 abaixo possibilita verificar, para cada sub-bacia estudada, o aspecto da vegetação.

Figura 40 - Aspecto vegetacional da bacia do Pentecoste e sub-bacias estudadas.



SM: São Mateus; SD: São Domingos.

Visualizando a Figura 40, é possível notar o aspecto vegetacional das bacias de contribuição dos grandes reservatórios: Desterro, São Domingos, São Mateus, Salão e Souza. A Tabela 25 mostra o percentual de área verde (AV) calculado para cada uma das bacias de contribuição dos reservatórios listados anteriormente, à partir do cálculo de NDVI para a bacia do Pentecoste, à partir de imagens do satélite Landsat 5. Um fato merece destaque. O modelo foi considerado aceitável para dois deles: São Mateus e Salão. As bacias de tais reservatórios obtiveram maior valor de AV, 79,85% e 72,59%, respectivamente, entre caatinga rala e densa.

Os valores menos aceitáveis do modelo foram para os reservatórios Desterro e São Domingos, ambos obtiveram os menores valores de AV, 26,20% e 13,84%, respectivamente. Os fatos mencionados acima sugerem que o aspecto vegetacional pode ser um fator preponderante na caracterização granulométrica dos sedimentos contidos no interior de reservatórios, corroborando com o que foi explanado no capítulo I dessa tese, o qual foi verificado uma diferenciação notável no padrão granulométrico dos sedimentos desprendidos em locais com caracterização vegetacional distintas, caatinga raleada e preservada.

Tabela 25 - Percentual de área verde das bacias de contribuição dos maiores açudes entre os analisados na pesquisa.

Açude	Total (ha)	Caatinga Rala (ha)	Caatinga Densa (ha)	AV (%)
Desterro	4023,25	938,50	115,51	26,20
SD	1802,42	226,68	22,86	13,84
Souza	20034,09	7861,22	3939,83	58,90
Salão	8329,04	3937,59	2108,60	72,59
SM	23294	9197,33	9401,82	79,85

AV: Área Verde

Outro fator que merece investigação é a densidade de drenagem a qual é definida como sendo a razão entre o comprimento total de cursos de água de uma bacia hidrográfica e sua área. Inicialmente este índice foi proposto por Horton (1945) e posteriormente Christofolletti (1980). Densidade de drenagem elevada significa uma bacia hidrográfica com elevada quantidade de cursos de água, córregos e rios. Isto significa uma resposta rápida entre os níveis de precipitação e vazão (CHRISTOFOLETTI, 1981), Castro e Carvalho (2009) afirmam que quanto maior a densidade de drenagem na bacia maior a capacidade de erosão fluvial, ou seja, bacias bem drenadas, com densidade de drenagem superior a $3,5 \text{ Km.Km}^{-2}$, apresentam maior eficiência em transportar sedimentos e maiores vazões em seu curso principal.

Analisando os resultados da Tabela 26 abaixo, a qual mostra os valores de densidade de drenagem das bacias de contribuição dos maiores açudes analisados nessa pesquisa, vê-se que todos possuem densidade de drenagem com valores próximos, variando de 2,16 à 2,37 Km.Km^{-2} , o que leva a supor que tal atributo, densidade de drenagem, não foi suficientemente relevante em interferir no padrão granulométrico dos sedimentos no interior dos reservatórios.

Tabela 26 - Densidade de drenagem das bacias de contribuição dos maiores açudes analisados na pesquisa.

Açude	Drenagem (Km)	Área da bacia (Km²)	Densidade de drenagem (Km/Km²)
Desterro	95,34	40,23	2,37
SD	41,63	18,02	2,31
Souza	473,85	200,34	2,37
Salão	192,06	83,29	2,31
SM	503,30	232,94	2,16

Relacionada com a quantidade de canais existente em uma bacia está a densidade de rios, estabelecido pela relação entre o número total de canais ou rios e a área da bacia hidrográfica em que se inserem. Com o resultado deste índice é possível inferir se as bacias apresentam solos pouco permeáveis e/ou maior propensão a escoamento superficial, uma vez que solos que apresentam maior tendência ao escoamento, ou seja, menor predisposição à infiltração. Desta forma, bacias que apresentam elevados valores de densidade de rios são bacias que apresentam solos com maior capacidade de escoamento superficial, conseqüentemente, transporte de partículas.

Considerando que a hidrografia para cada sub-bacia foi processada com auxílio de software especializado em geoprocessamento e que rio foi considerado qualquer corpo hídrico com comprimento superior a 10 metros, a Tabela 28 abaixo expõe os valores de densidade de rio para cada bacia de contribuição dos maiores reservatórios analisados nessa pesquisa.

Os valores de densidade de rios de cada bacia de contribuição não mostrou grandes diferenças, variando entre 4,6 à 5,77 Rios.Km⁻², o que leva também a supor que tal atributo não é relevante em interferir no padrão granulométrico dos sedimentos no interior dos reservatórios.

Como dito anteriormente, as curvas granulométricas de todos os solos foi feita com e sem o uso do dispersante, o uso de tal elemento químico é padrão em tal análise física, porém, viu-se a necessidade de se obter um resultado físico dos solos em seu estado natural, *in natura*, pelo fato de que, como foi discutido no capítulo anterior, um dos processos que ocorrem durante o percurso do sedimento desde a bacia até o exutório é a agregação, a qual deve ser levado em consideração, de acordo com o objetivo da pesquisa. Sedimentos sofrem agregação o que acarreta em alteração em seu diâmetro, massa e velocidade de queda da partícula, fator considerado chave na dinâmica do sedimento (WU *et al.*, 2000; LEWIS *et al.*, 2013; VERSTRATEN e POESEN, 2000). No Interior do reservatório, onde a relação entre a velocidade de fluxo hidráulico e a velocidade de queda da partícula é o que determina a

retenção ou não dos sedimentos no reservatório, é de vital importância conhecer o grau de agregação dessas partículas.

Tabela 27 - Densidade de rios das bacias de contribuição dos maiores açudes analisados na pesquisa.

Açude	Rios	Área da bacia (Km²)	Densidade de rios (Rios/Km²)
Desterro	232	40,23	5,77
SD	83	18,02	4,60
Souza	1.116	200,34	5,57
Salão	427	83,29	5,13
SM	1.256	232,94	5,39

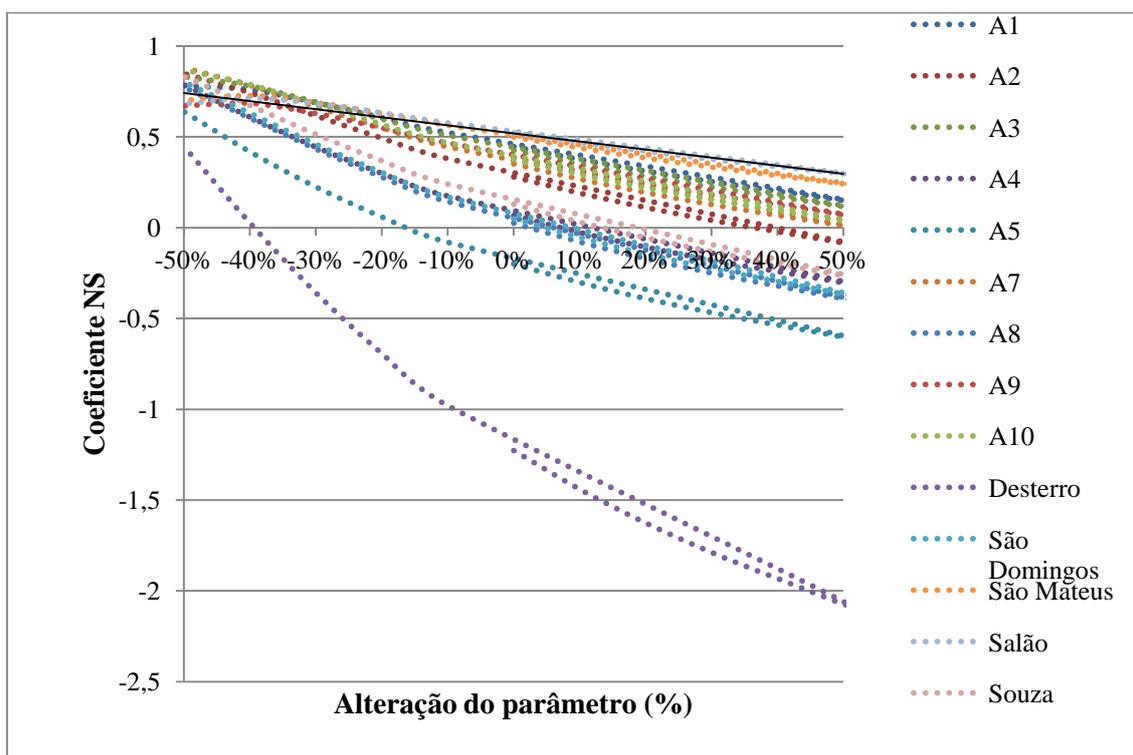
5.3.4 Análise de Sensibilidade

De acordo com Thompson e Sykes, 1990, a sensibilidade de um parâmetro de entrada em um modelo indica sua influência nos resultados de saída. Grandes alterações nos resultados indicam que o parâmetro tem um alto coeficiente de sensibilidade. Isso oferecerá controle da percepção do comportamento do modelo no qual deverá ser dada mais atenção

Procedeu-se a análise de sensibilidade do modelo variando-se o parâmetro coeficiente de transporte de -50% a +50%, sendo possível concluir que o modelo é bastante sensível ao parâmetro.

Verificou-se que os coeficientes NS das sub-bacias obtiveram consideráveis melhoras à medida que o coeficiente de transporte, inicialmente no valor de 2,94, foi diminuído, como mostrado na Figura 39. Destaque para as sub-bacias dos Açudes 4, 8, São Domingos e Souza, que ao diminuírem o valor do coeficiente de transporte para 1,47 obtiveram melhorias de 91%, 96%, 93% e 84%, chegando a coeficientes NS de 0,78, 0,77, 0,80 e 0,83, respectivamente. Com esse valor de coeficiente de transporte, 1,47, os valores de coeficiente NS das sub-bacias estudadas variaram entre 0,44 e 0,87, para as sub-bacias dos açudes Desterro e 7, respectivamente. Vale destacar que os valores ótimos para todas as sub-bacias estão entre 1,17 e 1,47 de coeficiente de transporte.

Figura 41 - Análise de sensibilidade do modelo.



Diversas características da bacia, tais como geologia, litologia, topografia, drenagem, clima e ações antrópicas podem afetar a dinâmica de sedimentos, transporte dos mesmos. Mesmo pertencentes a um mesmo bioma, o transporte de sedimentos é dependente de muitos parâmetros, que por vezes é característico de determinada área, o que pode ocasionar discrepâncias nos resultados de coeficiente de transporte. Mesmo assim, foi verificado, através da análise, que os coeficientes de transporte das sub-bacias estudadas, em diversas localidades e diferentes tamanhos, obtiveram valores próximos para valores ótimos de coeficiente NS.

Vente *et al.* (2011), avaliando quais variáveis ambientais estão mais relacionados à produção de sedimentos, verificaram alta correlação entre os gradientes de declividade e relevo com a taxa de sedimentos produzidos. Singh *et al.* (2011), estudando produção de sedimentos com o modelo WEPP verificaram que o modelo, e, conseqüentemente, sedimentos produzidos e transportados, tem alta sensibilidade à erodibilidade e parâmetros do solo. Alahiane *et al.* (2016), avaliando os fatores impactantes no transporte de sedimentos na região semiárida do Marrocos, verificaram, através do coeficiente de Pearson, que os fatores área e forma da bacia, densidade de drenagem, declividade, fator de erodibilidade e sinuosidade obtiveram relação significativa. Porém, os fatores, cobertura vegetal e índice de erodibilidade não demonstraram correlação significativa. Com os fatores que apresentaram relação

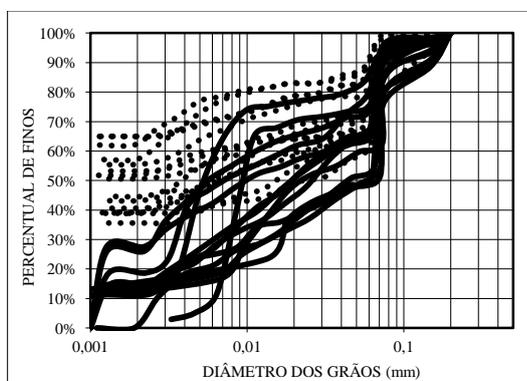
significativa, foi realizada uma análise de regressão, ao nível de confiança de 95%. A equação que apresentou melhor coeficiente de determinação foi a composta pela densidade de drenagem, fator de erodibilidade e declividade.

Segundo Grausso *et al.* (2007) fatores como declividade, impacto de ações humanas, influência de deslizamentos de terra ou erosões concentradas devem ser levados em consideração pois afetam muito os processos de transporte e erosão, os autores ainda destacam que são fatores difíceis de analisar.

Verstraten *et al.* (2003) sugerem que a susceptibilidade à erosão numa bacia seja função de cinco fatores: cobertura vegetal, litologia, topografia e forma da bacia. Araújo (2007) analisando a produção de sedimentos em encostas em sete bacias, duas na Suíça e 5 no Brasil, e a sensibilidade com respeito ao fator K, erodibilidade do solo, verificou que as bacias tiveram sensibilidades distintas ao fator, sendo as bacias localizadas na Suíça altamente sensíveis e as localizadas na Paraíba, baixas. Ainda, segundo o pesquisador, outras características da bacia, tais como climática, geológica e morfológica, devem também ter importante influência na erodibilidade, não apenas a cobertura vegetal e uso da terra. Há diferenças no transporte de sedimentos quando comparado bacias de clima tropical e temperado que devem estar relacionadas com as diferentes condições de geração de escoamento e erosividade

O Gráfico 18 abaixo dispõe as curvas granulométricas dos solos contidos no interior dos reservatórios monitorados, com e sem o uso do dispersante. Observa-se uma notável diferença nas curvas nas classes argila e silte, até o diâmetro de 0,01 mm, atestando o fato de que tais classes granulométricas tendem a ter um alto grau de agregação.

Gráfico 18: Granulometrias médias dos solos no interior dos reservatórios, com e sem dispersante.



———— Sem dispersante Com dispersante

Verificou-se que o sedimento no fundo do reservatório apresentou tamanho à partir de 0,001, ou seja, na forma de argila primária, porém em quantidades inferiores quando comparada a mesma classe mas na forma dispersada. Os resultados corroboram com os encontrados por Slattery e Burt (1995) e Martinez-Mena *et al.* (1999).

A análise do gráfico permite afirmar que cerca de 50% da classe argila 0,001 mm alcança o reservatório na forma agregada. Tal percentual tende a diminuir à medida que as classes aumentam em diâmetro. Tal processo é esperado quando se trata de argilas pois essas partículas possuem alto grau de adsorção. Isso tem importante implicação no comportamento do sedimento suspenso transportado como também pode afetar a retenção dos mesmos pelo reservatório, visto que argilas transportadas na forma discreta tem deposição limitada devido as suas baixas velocidades de queda, porém, quando tais argilas se agregam, sua deposição passa a ser considerada.

Walling (1999) observou contrastes entre a granulometria dos sedimentos transportados quando variou o uso de dispersante nas amostras. O pesquisador verificou, através da distinção entre as curvas, que muito do sedimento transportado era na forma de partículas compostas ou agregados, as quais são maiores do que as partículas minerais discretas.

A Tabela 28 abaixo mostra um comparativo entre o D_{50} das curvas granulométricas das amostras não dispersadas e dispersadas. Verificou-se uma tendência de serem mais finas as amostras com dispersante (CD) em todos os reservatórios monitorados.

Ressalta-se aqui, mais uma vez, que a decisão de se utilizar resultados granulométricos dispersados ou não foi em virtude da finalidade da pesquisa, tal consideração também deve ser feita em todas as pesquisas do âmbito de dinâmica dos sedimentos em fluxos hídricos.

Walling e Moorehead (1989) avaliaram os fatores que controlam as diferenças entre as curvas, sugerindo que tanto a composição textural do solo original como também o conteúdo de matéria orgânica exercem significativo efeito. Walling e Woodward (2000) sugeriram que a distribuição granulométrica do sedimento transportado é influenciado pela litologia da bacia, tipo de solo, dinâmica no transporte desses sedimentos.

Ding (2017) atentou para o fato de que poucas pesquisas tem sido feitas à respeito de como essa relação entre as curvas granulométricas que consideram ou não os agregados podem agir como indicador de como diferentes classes são erodidas e transportadas pelo fluxo (MARTINEZ-MENA *et al.*, 1999, 2002; SHI *et al.*, 2012a). Martinez-Mena *et al.* (2002) afirmaram que a relação entre os dois padrões granulométricos é provavelmente o melhor indicador de como o solo é desprendido e transportado pelo escoamento superficial, podendo

ser indicador também da interferência do escoamento superficial e precipitação nesse processo, já que, segundo Shi *et al.*, (2015), esses são os principais fatores que interferem na agregação dos sedimentos escoados.

Tabela 28 - D_{50} do solo dispersado e não dispersado.

Reservatório	D_{50} (mm)	
	SD	CD
1	0,006	0,001
2	0,010	0,001
3	0,007	0,001
4	0,026	0,006
5	0,056	0,015
7	0,020	0,006
8	0,061	0,022
9	0,004	0,001
10	0,020	0,005
Desterro	0,062	0,001
São Domingos	0,044	0,005
Salão	0,050	0,001
Souza	0,023	0,006
São Mateus	0,010	0,001

Wang e Shi (2015) afirmaram que quando a razão entre os sedimentos não dispersados e os dispersados, para um determinado diâmetro, for próximo a 1, isso indica que as partículas são dispersadas e/ou desprendidas pelo impacto da gota de chuva e/ou escoamento superficial e então transportadas como partículas primárias, indicando também baixo grau de agregação do solo. Já uma relação menor do que 1 indica que estas partículas frequentemente formam agregados que são transportadas como partículas maiores que as originais. Uma relação maior que 1 indica que essas partículas são formadas de outras partículas mais finas e são transportadas como agregados

Ainda segundo Martínez-Mena (2002) o padrão granulométrico dos sedimentos escoados considerando os agregados podem variar com o tempo devido às diferentes intensidades de precipitações. Se tal fator é um dos responsáveis pela quebra ou não dos agregados do solo, como dito no parágrafo anterior, espera-se que haja essa variação no padrão dos sedimentos escoados. Para eventos de alta intensidade, o diâmetro médio da curva diminuiu no tempo, aumentou o percentual de sedimentos finos, argilas e siltes, e diminuiu o percentual de sedimentos grosseiros. Porém, para eventos de intensidade média não houve diferença significativa no padrão granulométrico dos sedimentos escoados. Os pesquisadores

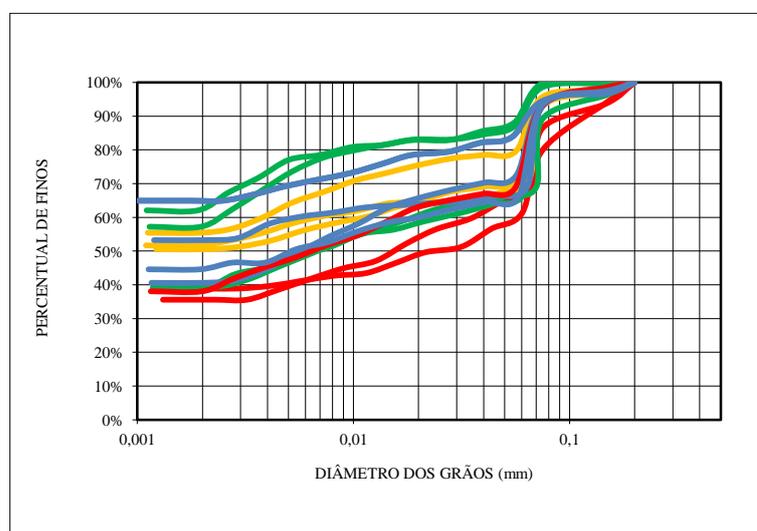
ainda atestaram que essa mudança na distribuição granulométrica pode explicar em parte os processos envolvidos no transporte de sedimentos pela bacia e sugerem que tal atributo seja incluído em modelos de erosão de solo.

A análise dos sedimentos contidos no fundo dos reservatórios também permite uma discussão à respeito de sua relação com o material de origem. O Gráfico 20 abaixo mostra o padrão granulométrico dos sedimentos contidos nos reservatórios. As cores distinguem reservatórios com o mesmo padrão textural de solo na sua sub-bacia.

Lane (1997) estabeleceu uma relação entre o transporte de sedimentos e a área drenada em uma bacia e concluiu que em locais onde a taxa de desprendimento do solo excede a taxa de deposição, o SDR é diretamente proporcional à área drenada. Caso as duas taxas sejam aproximadas, espera-se que o SDR não dependa da área drenada. Porém, se a taxa de deposição excede a taxa de desprendimento, espera-se uma diminuição do SDR. O pesquisador ainda afirma que o conceito de SDR é melhor aplicado em bacia com áreas variando de 1 à 10^4 Km².

Glowski e Kasperek (2017) afirmaram que a intensidade da deposição de sedimentos em um reservatório depende da intensidade e quantidade de sedimento transportado no escoamento superficial através da bacia e que para assegurar o funcionamento adequado do reservatório e o cumprimento de certas tarefas de gerenciamento de água é necessário observar mudanças em seu volume e distribuição espacial das várias frações de sedimentos. Conhecer a respeito da distribuição granulométrica do sedimento no interior do reservatório é importante quando se deseja estimar o padrão erosivo da bacia, como também no gerenciamento e manejo, no que diz respeito, por exemplo, à quantidade de sedimento que poderia ser removido para restaurar a capacidade do reservatório.

Gráfico 19: Granulometria de fundo dos reservatórios.



Ressalta-se também a falta de pesquisas semelhantes à proposta desse Capítulo, de avaliar a dinâmica granulométrica dos sedimentos desde a bacia até o reservatório, utilizando para isso modelos de desprendimento de partículas nas encostas e de transporte de sedimentos pela bacia. Por isso, a citação de pesquisas a seguir objetivarão num melhor esclarecimento dos processos que regem o transporte de sedimentos em bacias e os fatores que o afetam, como também a produção de sedimentos no reservatório.

Vente *et al.* (2011) avaliaram quais variáveis ambientais, características morfológicas da bacia, topografia, rede de drenagem, litologia, textura e tipo de solo, clima e uso da terra, estavam mais relacionados à produção de sedimentos em 61 reservatórios localizados na Espanha. No que diz respeito a correlação entre as propriedades da área e a produção de sedimentos, os valores mais altos foram relacionados às variáveis área e perímetro da bacia de contribuição, comprimento do rio principal, relevo, erodibilidade e cobertura vegetal. Solos com textura argilosa também apresentaram significativa correlação com a produção de sedimento. Uma alternativa, proposta pelos pesquisadores, para melhoria da acurácia do modelo seria a inserção de fatores acerca de atividades humanas potencialmente impactadoras, atividades de controle erosivo e vazão do rio.

Para Geeraert *et al.* (2015), para se elevar a acurácia de um modelo de previsão de assoreamento, propuseram também a inserção de fatores relacionados às atividades humanas e mudanças climáticas.

Alahiane *et al.* (2016) analisaram, pelo método de Pearson, quais fatores contribuíam mais significativamente para a deposição de sedimentos contidos no reservatório, verificando relação positiva para os fatores área e forma da bacia, densidade de drenagem, declividade, fator de erodibilidade e sinuosidade. Porém, os fatores, cobertura vegetal e índice de erodibilidade não demonstraram correlação significativa com quantidade de sedimentos afluentes ao reservatório.

Wohl e Cenderelli (2000) concluíram que a granulometria de fundo num reservatório é altamente influenciado pela magnitude do fluxo no interior do reservatório controla, além do volume.

Xu (2007) analisou a variação granulométrica dos sedimentos suspensos no Rio Yangtze, China, e verificou que, em 40 anos, a granulometria apresentou uma tendência de diminuição, ou seja, aumento da quantidade de materiais finos, o pesquisador atribuiu tal variação à construção de reservatório, à montante, e a implementação de medidas de conservação do solo. Reservatórios construídos à montante são capazes de reter uma grande quantidade de partículas mais grosseiras. Variações no padrão granulométrico do canal

principal de uma bacia, resultado de alterações físicas na mesma, conseqüentemente trará alterações no padrão granulométrico e dinâmica dos sedimentos que alcançam o reservatório.

Shi *et al.* (2012) avaliaram a variação na distribuição granulométrica dos sedimentos e concluiu que o mecanismo de suspensão/saltação, que afetam com mais afinco as partículas mais finas, é o principal mecanismo erosivo nas encostas. Entretanto, em canais, tal mecanismo é menos dominante, sendo substituído pelo transporte de arraste, que afetam partículas de caráter mais grosseiro, mas esse arraste de partículas de fundo só é considerável em eventos de grande fluxo hidráulico.

Figueiredo (2002) avaliou o efeito da área da bacia de contribuição e o uso da terra na produção de sedimentos e concluiu que tal produção é afetada por ambos os fatores, verificando uma diminuição da produção de sedimentos em áreas maiores porém com melhores práticas de conservação de solo.

Bronstert *et al.* (2014), avaliando os fatores ambientais que mais afetam a retenção de sedimentos em reservatórios do semiárido brasileiro, verificaram que os atributos topográficos são os principais processos de retenção de sedimentos em todas as escalas de bacia. Os pesquisadores também concluíram que a retenção de sedimentos é inteiramente relacionada à escala, aumentando com o tamanho da área da bacia de contribuição; em pequenas escalas, a quantidade de sedimentos retidos nos reservatórios é relativamente baixa devido à pequena área de captação e ocasionais vertimentos; com o aumento da área de captação, aumenta a possibilidade de deposição nos reservatórios associados.

Ao criar modelos de assoreamento em reservatórios, Minear (2009) propôs incorporar a retenção em reservatórios à montante e variáveis de eficiência de retenção em áreas onde haja muitas barragens numa mesma bacia. O pesquisador verificou que 2 modelos que não consideravam a retenção à montante superestimavam o assoreamento em mais de 161%. De acordo com Mamede (2012), não apenas as propriedades de cada reservatório são importantes, mas também a maneira como são conectados.

Reservatórios à montante podem reter uma parte significativa da água coletada, o que permite uma distribuição espacial eficiente, garantindo uma conexão contínua com outros reservatórios, mesmo durante as estações secas, quando não há fluxo hídrico pela rede de drenagem. Reservatórios à montante também servem como um retentor de sedimentos, retraindo uma considerável quantidade de sedimento gerado na bacia e aumentando a vida útil dos grandes reservatórios localizados à jusante, afetando a capacidade de armazenamento e, conseqüentemente, toda a dinâmica.

De acordo com Trimble (1999), nos reservatórios, modelos de assoreamento existentes não são capazes de gerar um padrão de assoreamento em grandes escalas, temporal e espacial, devido, principalmente, ao grande número de atributos necessários dos modelos. Os modelos são baseados em processos que operam em pequenas escalas temporais e espaciais e requerem dados como registros hidrológicos anuais ou diários, batimetria detalhada do reservatório e distribuições de tamanho de grão de sedimentos. O pesquisador adverte que aplicar esses processos sem uma devida calibração pode dar divergência nos resultados modelados quando comparados com os reais.

6 RECOMENDAÇÕES

Recomenda-se que, em âmbito de bacia experimental

- Sejam coletadas um maior número de amostras de escoamento, tanto em locais próximos às encostas, quanto à montante do reservatório-exutório. Por motivos de escassez de chuvas, conseqüentemente poucos eventos de escoamento, poucas amostras foram coletadas;
- Que sejam feitas avaliações de alterações temporais, em escala anual, nos padrões granulométricos dos sedimentos escoados até o exutório; uma das particularidades do método proposto nessa tese foi que o padrão fosse considerado constante ao longo do tempo, algo que pode variar à medida que material sólido é lixiviado da bacia;
- Uma análise mais apurada das relações entre vazões e CSS;
- No reservatório-exutório da bacia, um maior número possível de amostras de solo sejam coletadas a fim de se obter uma melhor caracterização textural do solo contido no interior do mesmo;

Recomenda-se que, em âmbito de rede de reservatórios:

- Analisar um método que obtenha um melhor resultado acerca de caracterizar texturalmente o solo das bacias pertencentes à uma rede;
- Verificar se alguns dos modelos de desprendimento propostos obtêm melhor resultado em estimar o padrão granulométrico dos sedimentos desprendidos numa bacia que tenha características mistas em relação à cobertura vegetal;

- Verificar a possível inserção de fatores relacionados à cobertura vegetal, bem como atividade antrópica, no modelo de dinâmica de sedimentos em bacias proposto, já que foi notado possível influência de tal fator, cobertura vegetal.

7 CONCLUSÕES

Em ambiente de Caatinga raleada, o modelo de desprendimento proposto por Foster *et al.* (1981) apresentou melhores resultados em prever o PSD, com coeficiente NS de 0,92. Em ambiente de Caatinga preservada, o modelo proposto por Foster *et al.* (1985) apresentou os melhores resultados em prever o PSD, com coeficiente NS de 0,91. Em ambiente misto, raleada e preservada, o modelo proposto por Foster *et al.* (1981) apresentou os melhores resultados, com coeficiente NS de 0,99;

Com relação ao potencial de enriquecimento de finos, houve um enriquecimento dos componentes argila e silte e diminuição do componente areia, quando comparado o padrão granulométrico da bacia de contribuição e o padrão granulométrico dos sedimentos que atingem o exutório da bacia, imediatamente à montante do reservatório. O componente silte apresentou um maior potencial de erosividade;

O modelo simplificado de dinâmica de sedimentos em reservatório apresentou razoável eficácia ao prever a granulometria dos sedimentos contidos no fundo de um pequeno reservatório;

A análise granulométrica de solo contido no fundo de 14 reservatórios de tamanhos variados permitiu concluir que partículas mais grosseiras tendem a serem depositadas mais próximo da entrada dos reservatórios, e partículas mais finas tendem a serem transportadas pelo mesmo, sendo depositadas mais próximo à barragem ou saindo por vertimento;

Quando o modelo de dinâmica de sedimentos proposto em pequena bacia experimental foi aplicado numa densa rede de reservatórios, apresentou resultado aceitável para parte das bacias analisadas e, para outra parte, o resultado foi inaceitável. Após um ajuste, aplicado o Log_{10} aos diâmetros observados e modelados, os resultados apresentaram considerável melhora.

O presente trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

REFERÊNCIAS

- ACHITE, M.; QUILLON, S. Suspended sediment transport in a semiarid watershed, Wadi Abd, Algeria (1973–1995). **Journal of Hydrology**, v.343, p.187-202, 2007.
- AGUIAR, M. J. N. et al. **Dados Climatológicos: Estação de Pentecoste, 2000**. Fortaleza: **Embrapa** Agroindústria Tropical, 14 p. (Boletim Agrometeorológico, n. 26), 2001.
- ALAHIANE, N. et al. Small dam reservoir siltation in the Atlas Mountains of Central Morocco: analysis of factors impacting sediment yield. **Environmental Earth Sciences**, v.75, n.12, p.1-11, 2016.
- ALBERTS, E. E.; MOLDENHAUER, W. C.; FOSTER, G. R. Soil aggregates and primary particles transported in rill and interrill erosion. **Soil Science Society of America Journal**, v.44, n.3, p.590-595, 1980.
- ALBERTS, E. E.; WENDT, R. C.; PIEST, R. F. Physical e chemical properties of eroded soil aggregates. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, v.26, p.465-471, 1983.
- ALBERTS, E. E., MOLDENHAUER, W. C., FOSTER, G. R. Soil Aggregates and Primary Particles Transported in Rill and Interrill Flow 1. **Soil Science Society of America Journal**, v.44, n.3, p.590-595, 1980.
- ALBUQUERQUE, J. A.; CASSOL, E. A.; REINERT, D. J. Relação entre a erodibilidade em entressulcos e a estabilidade dos agregados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.24, p.141-151, 2000.
- ALBUQUERQUE, A. W. et al. Manejo da cobertura do solo e de práticas conservacionistas nas perdas de solo e água em Sumé, PB. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.6, n.1, p.136-141, 2002.
- ALBUQUERQUE, A. W. et al. Determinação de fatores da equação universal de perda de solo em Sumé, PB. **Rev. bras. eng. agríc. ambient.**, v.9, n.2, 2005.
- ALEXANDROV, Y., LARONNE, J. B., REID, I. Suspended sediment concentration and its variation with water discharge in a dryland ephemeral channel, northern Negev, Israel. **Journal of arid environments**, v.53, n.1, p.73-84, 2003.
- ALVIM, A. M.; RIGHETTO, A. M. Simulação do transporte de sedimentos no reservatório de Pirapora. IN: **X Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos/I Simpósio Hídricos do Cone Sul. Gramado-RS**, 5, p.184–192, 1993.
- ANDRADE NETO, J. S. D. **Descarga sólida em suspensão do sistema Guaíba, RS, e sua variabilidade temporal, 2011**.
- ANNANDALE, G.W. **Sediment distribution in reservoirs**. In: Proc. National Hydrological Symposium (Pretoria, South Africa), 1983.

ANNANDALE, G.W.; ROOSEBOOM, A. **Reservoir sedimentation and stream power**. In: D.B.Simons Symposium on Erosion and Sedimentation (Colorado State University, Fort Collins, Colorado), 1983.

ANNANDALE, G. W. Predicting the distribution of deposited sediment in southern African reservoirs. In: **Proceedings of the symposium challenges in African hydrology and water resources**, v.44, p.549-558, 1984.

ARAÚJO NETO, J. R. et al. Otimização do número de curva (CN-SCS) para diferentes manejos na região semiárida, Ceará, Brasil. **Irriga, Botucatu, Edição Especial**, p.264-279, 2012.

ARAÚJO, J. C. et al. Water scarcity under scenarios for global climate change e regional development in semiarid Northeastern Brazil. **Water International**, v.29, n.2, p.209-220, 2004.

ARAÚJO, J. C.; KNIGHT, D. W. Assessment of sediment yield of watersheds by reservoir survey and simulation modelling in Brazilian semiarid environment. In: **Geomorphological Processes and Human Impacts in River Basins** (R. J. Batalla & C. Garcia, eds), 124–130. Wallingford: IAHS Press, IAHS Publ. 299. Abstracts available at: <http://www.iahs.info/redbooks/299.htm>, 2005.

ARAÚJO, J. C. DE.; PIEDRA, J. I. G.; COSTA, A. C. Densidade de medições pluviométricas e planejamento de recursos hídricos: o caso da bacia experimental de Aiuaba. **IX Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste**, ABRH, Salvador, BA, 2008.

Araújo, J. C. Entropy-based equation to assess hillslope sediment production. **Earth Surface Processes e Leforms**, v.32, n.13, p.2005-2018, 2007.

ARAÚJO, J. C. DE.; GÜNTNER, A.; BRONSTERT, A. Loss of reservoir volume by sediment deposition e its impact on water availability in semiarid Brazil. **Hydrological Sciences. Journal**, v.51, n.1, p.157-170, 2006.

ARAÚJO, J. C. DE.; BRONSTERT, A.; GÜNTNER, A. Influence of reservoir sedimentation on water yield in the semiarid region of Brazil. In: **VIIth IAHS Scientific Assembly, 2005**, Foz do Iguaçu. Sediment Budgets, IAHS Publication 292. Wallingford, 2, 301-307p.

ARAÚJO, J. C. DE, KNIGHT, D. W. A review of measurement of sediment yield in different scales. Rem: **Revista Escola de Minas**, Ouro Preto, v.58, n.2, p.257-266, 2005.

ARAÚJO, J. C. et al. Sedimentation of reservoirs in semiarid Brazil. In: **Global change e regional impacts: Water availability e vulnerability of ecosystems e society in the semi-arid Northeast of Brazil** (ed. T. Gaiser, M.S. Krol, H. Frischkorn e J.C. de Araújo), 205-216. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2003.

ARAÚJO, J. C. Assoreamento em reservatórios do semiárido: modelagem e validação. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.8, n.2, p.39-56, 2003.

ARAÚJO NETO, J. R. et al. Otimização do número de curva (CN-SCS) para diferentes manejos na região semiárida, Ceará, Brasil. **Revista Irriga**, edição especial, 264-279, 2012.

- ARORA, P. K.; GOEL, M. P. Estimating Life of a Reservoir. **Proceedings of Workshop on Reservoir Sedimentation held in Mysore**, Karnataka, on May 17- May 19, p.4-11, India, 1994
- ASCE. Task Committee on Definition of Criteria for Evaluation of Watershed Models of the Watershed management. Committee Irrigation e Drainage Division Criteria for evaluation of watershed models, **J. Irrig. Grainage Eng.**, v.119, p.429-442, 1993
- BARBOSA, J. E. L. et al. Aquatic systems in semi-arid Brazil: limnology e management. **Acta Limnologica Brasiliensia**, v.24, n.1, p.103-118, 2012.
- BEASLEY, R. P. Erosion e sediment pollution control. The Iowa State University Press. 1st edition, 1972.
- BARTLEY, R. et al. Runoff e erosion from Australian's tropical semi-arid rangeles: Influence of ground cover for differing space e time scale. **Hydrological Processes**, v.20, p.3317-33, 2006.
- BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do solo**. São Paulo - SP, Ícone, 355, 1999.
- BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do solo**. 7^a ed. São Paulo. Editora Ícone. 355p., 2010.
- BERTOL, I. et al. Nutrient e organic carbono losses, enrichment rate e cost of water erosion. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.41, p.1-15, 2017.
- BOIX-FAYOS, C. et al. Measuring soil erosion by field plots: understeing the sources of variation. **Earth Sci Rev**, v.78, p.267-285, 2006.
- BORJI, T. T. **Sedimentation and sustainability of hydropower reservoirs: cases of Grand Ethiopian Renaissance Dam on the Blue Nile River in Ethiopia** (Master's thesis, Institutt for vann-og miljøteknikk), 2013.
- BORLAND, W. M.; MILLER, C. R. Distribution of sediment in large reservoirs. **J. Hydraul. Div. ASCE HY2**, 1958.
- BORLAND, W. M. Reservoir sedimentation. In: River Mechanics (ed. by H.Shen). **Water Resources Publications**, Fort Collins, Colorado, 1970.
- BORLE, W. M.; MILLER, C. R. Distribution of Sediment in Large Reservoirs, **Journal of the Hydrological Division**, ASCE, v.84, 1958.
- BORLE, W. M. **Reservoir sedimentation**, in River Mechanics, Vol. II, edited by H.W. Shen, pp. 29.1-29.38, Colo. State Univ., Fort Collins, Colo, 1971.
- BORDAS, M. P.; SEMMELMANN, F. R. Elementos de engenharia de sedimentos. In: Tucci, C. E. M. **Hidrologia: Ciência e Aplicação**. 2. ed. Porto Alegre: ABRH, p.915- 943, 2001.

BRACKEN, L. J.; KIRKBY, M. J. Differences in hillslopes runoff e sediment transport rates within two semi-arid catchments in southeast Spain. **Geomorphology**, v.68, p.183-200, 2005.

BRASIL Ministério da Agricultura. **Levantamento Exploratório – Reconhecimento de Solos do Estado do Ceará**. Rio de Janeiro: MAPA/SUDENE, 1, 301p, 1973.(Boletim Técnico, 28).

BRITO, R. N. R. et al. Características sedimentares fluviais associadas ao grau de preservação da mata ciliar - rio Urumajó, nordeste paraense. **Revista Acta Amazônica**, v.39, n.1, p.173-180, 2009.

BRONSTERT, A. et al. Process-based modelling of erosion, sediment transport e reservoir siltation in mesoscale semi-arid catchments. **Journal of Soils e Sediments**, v.14, n.12, p.2001-2018, 2014.

BROWN, P. P.; LAWLER, D. F. Sphere drag e settling velocity revisited. **Journal of Environmental Engineering**, v.129, n.3, p.222-231, 2003.

BROWN, C. B. Discussion of “Sedimentation in reservoirs” by B. J. Witzig, proc., **Amer. Soc. Civ. Eng.**, v.69, n.6, p.793-815, 1493-1499, 1943.

BRUNE, G. M. (1953) Trap Efficiency of Reservoirs, **Trans. Am. Geophysical Union**, v.34, n.3, p.407-418, 1953.

BRUNE, G. M.; ALLEN, R. E. A consideration of factors influencing reservoir sedimentation em the Ohio Valley Region, **Trans. Amer. Geophys. Union**, v.22, p.649-655, 1941.

CABRAL, J. B. P. **Análise da sedimentação e aplicação de métodos de previsão para tomada de medidas mitigadoras quanto ao processo de assoreamento no reservatório de Cachoeira Dourada – GO/MG**. Tese. Universidade Federal do Paraná, 211p. 2006.

CAMPOS, R. **Three-dimensional reservoir sedimentation model**. PhD thesis, University of Newcastle, Newcastle, 2001.

CARKOVIC, A. B.; PASTÉN, P. A.; BONILLA, C. A. Sediment composition for the assessment of water erosion e nonpoint source pollution in natural e fire-affected landscapes. **Sci. Total Environ.** p.512–513, p.26–35, 2015.

CARVALHO, N. O. **Hidrossedimentologia Prática. CPRM e ELETROBRÁS**. Rio de Janeiro, RJ. 384p., 1994.

CARVALHO, N. O.; CATHARINO, M. G. Avaliação do assoreamento de reservatório da UHE Itaipu. In: **X Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos/ I Simpósio de Recursos Hídricos do Cone Sul**, v.5, p.174-183, 1993.

CARVALHO, N. O. et al. **Guia de Avaliação de Assoreamento de Reservatórios da Agência Nacional de Energia Elétrica-ANEEL**, Brasília, 132p. 2000. Disponível em: http://www.aneel.gov.br/biblioteca/downloads/livros/Guia_ava_port.pdf. Acesso em: 10.03.15.

- CARVALHO, N. O. **Hidrossedimentologia Prática**. 2ª ed, Interciência. Rio de Janeiro, RJ. 599p., 2008.
- CARVALHO, N. O. et al. **Guia de práticas sedimentométricas**. Brasília: ANEEL. 154p., 2000a.
- CASTRO, S. B.; CARVALHO, T. M. Análise Morfométrica e Geomorfologia da Bacia Hidrográfica do rio Turvo - GO, Através de técnicas de sensoriamento remoto e geoprocessamento. **Revista Scientia Plena**, v.5, 2009.
- CATEN, A. T. et al. Desintensificação do uso da terra e sua relação com erosão do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.16, p.1006-1014, 2012.
- CATEN, A. T. et al. Desintensificação do uso da terra e sua relação com a erosão do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental-Agriambi**, v.16, n.9, 2012.
- CBDB – Comitê Brasileiro de Barragens **Main Brazilian Dams III: Design, Construction e Performance**. ICOLD Publications, Brasil. 437p. 2009.
- CHEN, C. N. **Design of Sediment Retention Basins**. Proc., National Symposium on Urban Hydrology e Sediment Control, University of Kentucky, Lexington, Kentucky, 5868p. 1975.
- CHEN, E.; MACKAY, D. S. Effects of distribution-based parameter aggregation on a spatially distributed nonpoint source pollution model. **J. Hydrol.** v.295, p.211–224, 2004.
- CHENG, N. S. Simplified settling velocity formula for sediment particle. **Journal of Hydraulic Engineering**, ASCE, v.123, n.8, p.149–152, 1997.
- CHOW, V. T. **Applied hydrology**. McGraw-Hill International Editions, Singapura. 1988. ISBN 0-07-010810-2.
- CHURCH, M.; SLAYMAKER, O. Desequilíbrio de Holoceno sediment yield in glaciated. **British Columbia, Nature**, v.337, p.452-454, 1989.
- CHURCHILL, M. A. **Discussion of "Analysis e Use of Reservoir Sedimentation Data,"** by L. C. Gottschalk, 139-140p, 1948. Proc. Federal Inter-Agency Sedimentation Conf., Denver.
- COLBY, B. R.; HEMBREE, C. H. **Computations of total sediment discharge**, Niobrara River near Cody, Nebraska, 1955.
- CORTEZ, J. R. **Desempenho de modelos numéricos em estudos de assoreamento de reservatórios–Caso UHE Aimorés**. Tese de Doutorado. 2013.
- Cotton, J. A. et al. The effects of seasonal changes to the in-stream vegetation cover on patterns of flow e accumulation of sediment. **Geomorphology**, v.77, p.320–334, 2006.
- CPRM – COMPANHIA DE PRODUÇÃO DE RECURSOS MINERAIS. **Atlas de Geologia e Recursos Minerais do Ceará: Sistema de Informações Geográficas SIG e mapa na escala 1:500.000**. 2003. In: Cavalcante, J. C.; Vasconcelos, A. M.; Gomes F. E. M. Serviço Geológico do Brasil/ Secretária dos Recursos Hídricos do Ceará. Fortaleza: CPRM Serviço Geológico do Brasil, 1 CD ROM.
- CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia**. São Paulo: Edgard Blucher. 1981.

CRISTOFANO, E. A. Area Increment Method for Distributing Sediment in a Reservoir. **US Bureau of Reclamation**, Albuquerque, New Mexico. 1953.

CURTIS, D. C.; MCCUEN, R. H. Design Efficiency of Stormwater Detention Basins. Proc., ASCE, **Jour. of Water Res. Manning e Management Division** 103(WR1), p.125-140, 1977.

DENDY, F. E. Sediment Trap Efficiency of Small Reservoirs. **Trans., ASAE**, v.17, n.5, 1974.

DIAS, J. A. **Evolução do conceito de Sedimento Relíquia**. 2004.

DIETRICH, W. E. Settling velocity of natural particles. **Water Resource. Research**. v.18, n.6, p.1615–1626, 1982.

Di STEFANO, C.; FERRO, V. SW—Soil and water: linking clay enrichment and sediment delivery processes. **Biosystems Engineering**, v.81, n.4, p.465-479, 2002.

Di STEFANO, C. et al. Testing the grain-size distribution determined by Laser diffractometry for Sicilian soils. **Journal of Agricultural Engineering**, v.42, n.3, p.39-36, 2011.

Diezman, M. M. et al. Size distribution of eroded sediment from two tillage systems. **Transations of the ASAE**, v.30, n.6, p.1642-1647, 1987.

ESPINOSA-VILLEGAS, C. O.; SCHNOOR, J. L. Comparison of long-term observed sediment trap efficiency with empirical equations for Coralville Reservoir, Iowa. **Journal of Environmental Engineering**, v.135, n.7, 518-525, 2009.

EZUGWU, C. N. Sediment Deposition in Nigeria Reservoirs: Impacts e Control Measures. **Innovative Systems Design e Engineering**, v.4, n.15, p.54-62, 2013.

FARMER, E. E. Relative detachability of soil particles by simulated rainfall. **Soil Sci. Soc. Am. J.** v.37, p.629–633, 1973.

FARENHORST, A.; BRYAN, R. B. Particle size distribution of sediment transported by shallow flow. **Catena**, v.25, p.1–4, 1995.

FEITOSA, L. S.; ARAÚJO, J. C. Avaliação da produção de água e sedimento na Caatinga degradada. **REDE-Revista Eletrônica do PRODEMA**, v.10, n.1, p.85-95, 2016.

FIFIELD, J. S. **Field manual on sediment and erosion control: Best Management Practices for contractors and inspectors**. Forester Press. 2002.

FIFIELD, J. S. **Designing and Reviewing Effective Sediment and Erosion Control Plans**. Third Edition. Forester Media, Santa Barbara, CA. 2011.

FIFIELD, J. S. **Designing and Effective Sediment and Erosion Control on Constrution Sites**. First Edition. Forester Media, Santa Barbara, CA. 2001.

- FIGUEIREDO, J. V. **Início da geração do escoamento superficial em uma bacia semiárida em Caatinga preservada.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) Universidade Federal do Ceara, Fortaleza, CE, Brasil. 2011.
- FIGUEIREDO, J. V. et al. Runoff initiation in a preserved semiarid Caatinga watershed, Northeastern Brazil. **Hydrological Processes**, 30, 2390-2400p. 2016.
- FINKNER, S. C.; GILLEY, J. E.; VARVEL, G. E. Size distribution of the sediment as affected by sorghum e soybean residue. **ASAE Paper No. 86-2536**, ASAE, St. Joseph, MI 49085. 1986.
- FOSTER, G. R. et al. Estimating erosion e sediment yield on field sized areas. **Transactions of the Asae**, v.24, n.5, p.1253-1262, 1981.
- FOSTER, G. R.; YOUNG, R. A.; NEIBLING, W. H. Sediment composition for nonpoint source pollution analyses. **Trans. ASAE**, v.28, p.133-139,146, 1985.
- FRERE, M. H.; ONSTAD, C. A.; HOLTAN, H. N. ACTMO, an agricultural chemical transport model. **U.S. Agricultural Research Service. ARS-H-3**, pp. 1-11. 1975.
- FLANAGAN, D. C. et al. Overview of the WEPP erosion prediction model. In: **Water Erosion Prediction Project Hillslope Profile and Watershed Model Documentation**, 1995. (D. C. Flanagan & M. A. Nearing, eds), 1.1-1.12. West Lafayette, IA: US Dept Agriculture.
- GABRIELS, D.; MOLDENHAUER, W. C. Size distribution of eroded material from simulated rainfall: Effect over a range of texture. **Soil Science Society of America Journal**, 42, 954-958p. 1978.
- GHOMESHI, M. **Reservoir sedimentation modelling.** University Wollongong, Thesis Collections, 1995.
- GLOWSKI, R.; KASPEREK, R. The grain size distribution of sttled sediment within storage reservoir Otmuchów. **Annals of Warsaw University of Life Sciences**, v.49, n.1, p.3-14, 2017
- GLYMPH, L. M. Sedimentation of Reservoirs. IN; **ACKERMANN. W. C et al.**, ed. Man made lakes: their problems e enviromental. Washington DC. American Geophysical Union, p.342-348, 1973
- GLYMPH, L. M. Summary: sedimentation of reservoirs. Washington DC American **Geophysical Union Geophysical Monograph Series**, v.17, p.342-348, 1973.
- GLYMPH, L. M. Relation of sedimentation to accelerated erosion in the Missouri River basin, SCS-TP-102, **U. S. Soil Conservation Service**, Lincoln, Nebraska. 1951
- GOLDMAN, S. J.; JACKSON, K. E. **Erosion and sediment control handbook.** 1996.
- GOMES, F. E. F. **Processos hidrossedimentológicos em uma bacia experimental do semiárido brasileiro.** Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Ceará. 68p. 2016.

GRAY, J. R.; SIMÕES, F. J. M. Estimating sediment discharge, *in* Garcia, M., ed., *Sedimentation Engineering, Processes, Measurements, Modeling, e Practice: ASCE Manuals e Reports on Engineering Practice*, v.110, p.1067-1088, 2008.

GRAUSO, S. et al. Relations between climatic–geomorphological parameters and sediment yield in a mediterranean semi-arid area (Sicily, southern Italy). **Environmental geology**, v.54, n.2, p.219-234, 2008.

GUMIERE, S. J.; LE BISSONNAIS, Y.; RACLOT, D. Soil resistance to interrill erosion: Model parameterization e sensitivity. **Catena**, v.77, p.274–284. doi:10.1016/j.catena.2009.02.007, 2009.

GUNTNER, A. et al. Simple water balance modelling of surface reservoir systems in a large data-scarce semiarid region. **Hydrological Sciences Journal**, v.49, n.5, p.901-918, 2004.

GUNTNER, A.; BRONSTERT, A. Representation of landscape variability e lateral redistribution processes for large-scale hydrological modeling in semi-arid areas. **Journal of Hydrology**, v.297, p.136-161, 2004.

GUNTNER, A. Large-scale hydrological modelling in the semi-arid North-East of Brazil. **Tese de doutorado**, Instituto de Geocologia, Universidade de Potsdam, Alemanha. 2002.

HAAN, C. T.; BARFIELD, B. J.; HAYES, J. C. **Design hydrology e sedimentology for small catchments**. Academic Press, ISBN 0-12-312340-2. 1994.

HALLERMEIER, R. J. Terminal settling velocity of commonly occurring se grains. **Sedimentology**, v.28, n.6, p.859–865, 1981.

HAO, Y. et al. Size characteristics of sediment eroded from three soils in China under natural rainfall. **Journal of Soils e Sediments**, v.16, p.2153-2165, 2016.

HAYES, J. C., B. J. BARFIELD.; R. I. BARNHISEL. Performance of grass filters under laboratory and field conditions. **Trans. ASAE**, v.27, n.5, p.1321-1331, 1994.

HEINEMANN, H. G. A new sediment trap efficiency curve for small reservoirs, **Water Resour. Bull**, v.17, p.825–830, 1981.

HORTON, R. E. Erosional development of streams e their drainage basins: a hydrophysical approach to quantitative morphology. **Geol Soe. Am. Bull.**, v.56, n.3, p.275-370, 1945

HOSSEINJANZADEH, H. et al. New proposed method for prediction of reservoir sedimentation distribution. **International Journal of Sediment Research**, v.30, p.235–240, 2015.

HUDSON, N. **Soil Conservation**. Cornell University Press, Ithaca, New York. 1971.

ICOLD, **International Commission on Large Dams**. Sedimentation control of reservoirs. Guidelines. Bulletin 67. Paris. 1989.

INTERAGENCY COMMITTEE. **Some fundamentals of particle size analysis: A study of methods used in measurement e analysis of sediment loads in streams.** Rep. No. 12, Subcommittee on Sedimentation, Interagency Committee on Water Resources, St. Anthony Falls Hydraulic Laboratory, Minneapolis. 1957.

ISSA, O. M. et al. **Soil detachment e transport on field e laboratory-scale interrill areas: erosion processes e the size selevity of eroded sediment**, v.31, n.8, p.929-939, 2006.

JIMENEZ, J. A.; MADSEN, O. S. A simple formula to estimate settling velocity of natural sediments. **Journal of Water. Port, Coastal, Ocean Engineering**, ASCE, v.129, n2, p.70-78, 2003.

JULIEN, Y. P. **Erosion e sedimentation**, Cambridge University Press, Cambridge, U.K. 1995.

KINNELL, P. I. A. The influence of raindrop induced saltation on particle size distributions in sediment discharged by rain-impacted flow on planar surfaces. **Catena**, v.78, p.2-11, 2009.

KOCHEM, M. L. **Características granulométricas, carbono, nitrogênio e frações de fósforo em sedimentos durante eventos chuva-vazão em bacias hidrográficas no Rio Grande do Sul, Brasil.** 2014.

KNIGHTON, D. **Fluvial forms & processes. A new perspective.** London: Arnold.1998.

KNISEL, W.G. (Editor), **CREAMS: A field scale model for chemicals, runoff, and erosion from agricultural management systems.** USDA, Conservation Res. Rep., 26, 643p. 1980.

KUWAJIMA, T. et al. Necdin interacts with the Msx2 homeodomains protein via MAGE-D1 to promote myogenic differentiation of C2C12 cells. **J. Biol. Chem.**, v.279, p.40484-40493, 2004.

LAGOS-AVID, M. P.; BONILLA, C. A. Predicting the particle size distribution of eroded sediment using artificial neural networks. **Science of the Total Environment**, 1:581-582, p.833-839, 2017.

LAI, T. M. et al. Influence of sediment grain size e le use on the distribution of heavy metals in sediments of the Han River Basin in Korea e the assessment of Anthropogenic Pollution, **Water Air Soil Pollut**, 224:1609, p.1-12, 2013. DOI 10.1007/s11270-013-1609-y

LANE, L. J.; SHIRLEY, E. D.; SINGH, V. P. **'Modelling erosion on hillslopes'**, in Eerson, M. G. (Ed.), **Modelling geomorphological systems**, John Wiley e Sons, Chichester, p.287-308, 1988.

LANE, L. J. Distributed model for small semi-arid watersheds. **J. Hydraul. Div.**, ASCE, 108(HYi0):114-1131. 1982.

LAQUINI, J. P. et al. Modelo quase-tridimensional para a simulação do assoreamento em reservatórios de água. In: **Anais do XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, Campo Grande. 2009.

- LAZZARI, M. et al. Sediment yield e erosion rate estimation in the mountain catchments of the Camastra artificial reservoir (Southern Italy): A comparison between different empirical methods. **Catena**, v.127, n.17, p.323-339, 2015.
- LECCE, S. A. et al. Seasonal controls on sediment delivery in a small coastal plain watershed, North Carolina, USA. **Geomorphology**, v.73, n.(3-4), p.246-260, 2006.
- LELI, I. T.; STEVAUX, J. C.; NÓBREGA, M. T. Produção e transporte de carga suspensa fluvial: teoria e método para rios de médio porte. **Bol. geogr.**, Maringá, v.28, n.1, 43 – 58p., 2010.
- LEMOS, J. R **Florística, estrutura e mapeamento da vegetação de caatinga da estação ecológica de Aiuaba, Ceará**. Tese de doutorado. Universidade de São Paulo, 139p. 2006.
- LEWIS, S. E. et al. Calculating sediment trapping efficiencies for reservoirs in tropical setting: A case study from the Burdekin Falls Dam, NE Australia. **Water Resources Research**, v.49, p.1017-102, 2013.
- LI, X. et al. Soil Erosion e Sediment-Yield Prediction at Basin Scale in Upstream Watershed of Miyun Reservoir. **Journal of hydrologic engineering**, v.20, n.6, 2014.
- LIMA, H. M. et al. Comportamento hidrologico de bacias hidrograficas: integracao de metodos e aplicação a um estudo de caso. **REM: R. Esc. Minas**, Ouro Preto, v. 60, n. 3, p. 525-536, 2007.
- LIMA, C. A. Characteristics of rainfall e erosion under natural conditions of le use in semiarid regions. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.17, n.11, p.1222-1229, 2013.
- LIMA NETO, I. E.; WIEGAND, M. C.; DE ARAÚJO, J. C. Sediment redistribution due to a dense reservoir network in a large semi-arid Brazilian basin. **Hydrological Sciences Journal des Sciences Hydrologiques**, v.56, n.2, p.319-333, 2011.
- LIRA, D.; TOLEDO, C.; MAMEDE, G. Silting in the dense reservoir network of the Pereira de Miranda catchment. **Engenharia Agrícola**, v.34, n.4, p.671-682, 2014.
- LIRA, D. L. C. **Assoreamento em densas redes de reservatórios: o caso da bacia hidrográfica da barragem pereira de miranda, CE**. 2012. 86 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola), Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2012.
- LOPES, J. W. B. et al. Análise de confiabilidade do modelo SCS-CN em diferentes escalas espaciais no semiárido. In: **Workshop Internacional de Inovações Tecnológicas na Irrigação** (Vol. 15). 2012.
- LOURENÇO, V. R. et al. Influência relativa dos parâmetros umidade e serapilheira no teor de carbono em diferentes manejos da Caatinga. **III Simpósio Brasileiro de Recursos Naturais do Semiárido – SBRNS**, Fortaleza-Ceará, Brasil. 2017.
- LU, J. Y. et al. Selective transport and deposition of sediment particles in shallow flow. **Transactions of the ASAE**, v.31, n.4, p.1141-1147, 1988.

- LUK, S. H.; ABRAHAMAS, A. D.; PARSONS, A. J. Sediment sources and sediment transport by rill flow and interrill flow on a semi-arid piedmont slope, southern Arizona. **Catena**, v.20, n.(1-2), p.93-111, 1993.
- MACHADO, R. E.; VETTORAZZI, C. A. Simulação da produção de sedimentos para a microbacia hidrográficoado Ribeirão dos Marins, **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.27, p.735-741, 2003.
- MAHMOOD, K. **Reservoir sedimentation – impact, extent e mitigation**. World Bank Tech. Paper No. 71. Washington, DC. 1987.
- MAMEDE, G. L. et al. Modelo hidrossedimentológico WASA-SED: aplicação para o semiárido brasileiro. **VIII Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos**, Campo Grande, MS. 2008.
- MAMEDE, G. L. Reservoir sedimentation in dryle catchments: modelling e management. **Tese de doutorado**, Instituto de Geocologia, Universidade de Potsdam, Alemanha. 2008.
- MAMEDE, G. L. et al. Overspill avalanching in a dense reservoir network. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v.109, n.19, p.7191-7195, 2012.
- MALVEIRA, V. T. C.; ARAÚJO, J. C.; GÜNTNER, A. Hydrological impact of a high-density reservoir network in the semiarid north-eastern Brazil. **Journal of Hydrologic Engineering**, Reston, v.17, p.109-117, 2012.
- Martin, J. P. (1941) The organic matter in Collington sey loam e in the eroded material. **Soil Sci.** v.52, p.435-443.
- MARTINS, S. G. et al. Perdas de solo e água por erosão hídrica em sistemas florestais na região de Aracruz (ES). **Revista brasileira de ciência do solo**, v.27, n.3, 2003.
- MARTINEZ-MENA, M. et al. Influence of vegetal cover on sediment particle size distribution in natural rainfall conditions in a semiarid environment. **Catena**. v.38, p.175-190, 1999.
- MARTINEZ-MENA, M. et al. Realtions between interrill erosion processes e sediment particle size distribution in a semiarid Mediterranean area of SE of Spain. **Geomorphology**. v.45, p.261-275, 2002.
- MASSEY, H. F.; JACKSON, M. L. Satellite Imagery Selective erosion of soil fertility constituents. **Soil Sci. Soc. Am. Proc.** v.16, p.353-357, 1952.
- MASSEY, H. F., JACKSON, M. L.; HAYS, O. E. Fertility erosion on two Wisconsin soils. **Agron. Jour.**, v.45, p.543-547, 1953.
- MATI, B. M., MORGAN, R. P. C.; QUINTON, J. N. Soil erosion modelling with EUROSEM at Embori and Mukogodo catchments, Kenya. **Earth Surf. Processes Landf.**, v.31, p.579–588, 2006.

MEDEIROS, P. H. A.; VIEIRA, V. P. P. B. Importância da abordagem dos processos hidrosedimentológicos na gestão dos recursos hídricos no semiárido Brasileiro. **VIII Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste**, ABRH, Gravatá, PE. 2006.

MEDEIROS, P. H. A.; ARAÚJO, J. C.; BRONSTERT, A. Interception measurements e assessment of Gash model performance for a tropical semi-arid region. **Revista Ciência Agronômica**, v.40, p.165–174. 2009. DOI:10.1590/S0100-69162014000200004.

MEDEIROS, P. H. A. et al. Modelling spatio-temporal patterns of sediment yield e connectivity in a semi-arid catchment with the WASA-SED model. **Hydrological Sciences Journal**, v.55, n.4, p.635-648, 2010.

MEDEIROS P. H. A, DE ARAÚJO J. C. Temporal variability of rainfall in a semiarid environment in Brazil e its effect on sediment transport processes. **Journal of Soils e Sediments**, v.14, p.1216–1223. 2014. DOI:10.1007/s11368-013-0809-9.

MEDEIROS, P. H. A. et al. Connectivity of sediment transport in a semiarid environment: a synthesis for the Upper Jaguaribe Basin, Brazil. **Journal of Soils e Sediments**, v.14, n.12, p.1905–1908. 2014. DOI:10.1007/s11368-014-0988-z.

MELBOUNCY, N. H.; BOUHADEF, M. Numerical model to predict distribution e evolution of suspended sediment transport in a dam reservoir. **International Journal of Engineering Science e Technology**, v.4, n.7, p.3184-3193, 2012.

MEYER, L. D.; LINE, D. E.; HARMON, W. C. Size characteristics of sediment from agricultural soils. **Journal of Soil e Water Conservation**, v.47, p.107–111, 1992.

MEYER, L. D. How rain intensity affects interrill erosion. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, v.23, p.1472–1475, 1981.

MEYER, L. D.; HARMON, W. C. Susceptibility of agricultural soils to interrill erosion. **Soil Science Society of America Journal**, v.48, p.1152–1157, 1984.

MEYER, L. D.; HARMON, W. C.; MCDOWELL, L. L. Sediment sizes eroded from crop row sideslope. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, v.23, p.891–898, 1980.

MICHALEC, B. The use of modified Annandale's Method in the estimation of the sediment distribution in small reservoirs – A case study. **Journal Water**, v.6, p.2993-3011, 2014.

MILLER, W. P., E M. K. BAHARUDDIN. Particle size of interrill-eroded sediments from highly weathered soils. **Soil Sci. Soc. Am. J.** v.51, p.1610–1615, 1987. doi:10.2136/sssaj1987.03615995005100060037x

MINEAR, J. T.; KONDOLF, G. M. Estimating reservoir sedimentation rates at large spatial e temporal scales: A case study of California, **Water Resour. Res.**, v.45, W12502, 2009. doi:10.1029/2007WR006703.

MILLER, W. P.; M. K. BAHARUDDIN. Particle size of inter-rill-eroded sediments from highly weathered soils, **Soil Sci. Soc. Am. J.**, v.51, p.1610–1615, 1987.

MIRANDA, E. E.; GOMES, E. G.; GUIMARÃES, M. Mapeamento e estimativa da área urbanizada do Brasil com base em imagens orbitais e modelos estatísticos. In Embrapa Monitoramento por Satélite-Artigo em anais de congresso (ALICE). In: **SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO**, 12., 2005, Goiânia. Anais eletrônicos... São José dos Campos: INPE, 2005.

MOLISANI, M. M. et al. The influence of castanhão reservoir on nutrient e suspended matter transport during rainy season in the ephemeral Jaguaribe river (CE, Brazil). **Brazilian Journal of Biology**, v.73, n.1, p.115-123, 2013.

MORGAN, R. P. C. et al. The European Soil Erosion Model (EUROSEM): a dynamic approach for predicting sediment transport from fields and small catchments. **Earth Surf. Processes Landf.**, v.23, p.527–544, 1998.

MORRIS, G. L.; FAN, J. **Reservoir sedimentation handbook: Design e management of dams, reservoirs e watersheds for sustainable use**. McGraw-Hill Educ., New York, 1997.

MORRIS, G. L.; ANNANDALE, G.; HOTCHKISS, R. **Reservoir Sedimentation**. In Sedimentation Engineering. Processes, Measurements, Modeling, e Practice – ASCE, American Society of Civil Engineers. Virginia. 2008.

MUELLER, E. N. et al. Modelling sediment export, retention an reservoir sedimentation in drylles with WASA-SED model. **Geoscientific Model Development**, v.3, p.275-291, 2010.

MUNOZ-ROBLES, C. et al. Soil hydrological e erosional responses in patches e inter-patches in vegetation states in semiarid Australia. **Geoderma**, v.160, p.524–534, 2011.

NEARING, M. et al. A process-based soil erosion model for USDA-Water Erosion Prediction Project technology. **Trans. ASAE**, v.32, p.1587–1593. 1989. doi:10.13031/2013.31195

NEARING, M. A.; BRADFORD, J. M.; PARKER. E. S. C. Soil detachment by shallow flow at low slopes. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, v.55, n.2, p.339–344, 1991.

NUNES, M. C. M.; CASSOL, E. A. Estimativa da erodibilidade em entressulcos de Latossolos do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, p.2839-2845, 2008.

ONGLEY, E. D. et al. Is water a relevant sampling medium for toxic chemicals? An alternative environmental sensing strategy. **Journal of Environmental Quality**, v.17, n.3, p.391-401, 1988.

OSEEN, C. **Hydrodynamik**, Akademische Verlagsgesellschaft, Leipzig, Germany. 1927.

OWENS, P. N.; WALLING, D. E.; LEEKS, G. J. Deposition and storage of fine-grained sediment within the main channel system of the River Tweed, Scotland. **Earth Surface Processes And Landforms: The Journal Of The British Geomorphological Research Group**, v.24, n.12, p.1061-1076, 1999.

PAIVA, F. M. L. **Estudo comparativo entre três modelos de base física na modelagem hidrossedimentológica em microbacias na região semi-árida paraibana**. Dissertação

(Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, 175p. 2008.

PALMIERI, A. et al. **Reservoir Conservation** volume 1: The RESCON approach. Economic e Engineering Evaluation of alternative strategies for managing sedimentation in storage reservoirs. The World Bank, 1818 H Street N. W., Washington, D. C. 20433. 2003.

PALMIERI, A.; SHAH, F.; DINAR, A. Economics of reservoir sedimentation e sustain- able management of dams. **Journal of Environ- mental Management**, v.61, p.148-163, 2001.

PAK, J. **Assessment of reservoir trap efficiency methods using the hydrologic modeling system (hec-hms) for the upper north bosque river watershed in central Texas**, 2nd Joint Federal Interagency Conference, Las Vegas, NV, June 27 - July 1. 2010.

PARSONS, A. J.; ABRAHMS, A. D.; LUK, S. Size characteristics of sediment in interrill overle flow on a semiarid hillslope, Southern Arizona. **Earth Surface Processes e Leforms**, v.16, p.143-152, 1991.

PEMBERTON, E. L. **Reservoir sedimentation**. Paper presented at the United States-Japan Binational Seminar on Sedimentation and Erosion, Honolulu, Hawaii. 1978.

PODWOJEWSKI, P. et al. Influence of grass soil cover on water runoff e detachment under rainfall simulation in a sub-humid South African degraded rangele. **Earth Surface Processes e Leforms**. v.36, p.911-922, 2011

POESEN, J.; SAVAT, J. **Particle-size separation during erosion by splash e runoff**, in de Boodt, M. e Gabriels, D. (Eds), 1980.

POESEN, J.; SAVAT, J. ‘Detachment e transportation of loose sediment by raindrop splash’, **Catena**, v.8, 1981.

PENNELL, A. B.; LARSON, C. L. **Effects of Design Factors Sedimentation Basin Performance**. Paper 76-2020 presented at the ASAE. 1976

PISCOYA, R. C. C. C. et al. Avaliação do impacto dos reservatórios em cascata sobre o fluxo de sedimentos no rio Paranapanema. In: **XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto – SBSR**, Foz do Iguaçu-PR. 2013.

PONCE, V. M. Management of droughts e floods in the semiarid Brazilian northeast. The case for conservation. **Journal of Soil e Water Conservation**, v.50, n.5, p.422-431, 1995.

PORTO, R. M. **Hidráulica básica**. 4 ed. São Carlos-SP. Editora Rima. 2006.

PROSSER, I. P. et al. Large-scale patterns of erosion and sediment transport in river networks, with examples from Australia. **Marine Freshwater Res.**, v.52, p.81–99, 2001.

PRUSKI, F. F. **Conservação do solo e da água: práticas mecânicas para o controle de erosão hídrica**. 2. ed. Viçosa: UFV, 279p. 2010.

RAHMANIAN, M. R.; BANIHASHEMI, M. A. Introduction of a new empirical reservoir shape function to define sediment distribution pattern in dam reservoirs. **Transactions of civil engineering**, v.36, n.1, p.79-92, 2012.

RAMSANKARAM, R., KOTHYARI, U. C.; RAWAT, J. S. Simulation of surface runoff and sediment yield using the water erosion prediction project (WEPP) model: a study in Kaneli watershed, Himalaya, India. **Hydrol. Sci. J.**, v.54, n.3, p.513–525, 2009.

RAUSCH, D. L.; HEINEMANN, H. G. Controlling Reservoir Trap Efficiency. **Transactions of ASAE**, v.18, n.6, 1105-1113, 1975.

RENNÓ, C. D.; SOARES, V. J. **Modelos Hidrológicos para Gestão Ambiental. Relatório Técnico Parcial "Métodos, modelos e geoinformação para a gestão ambiental"**.

[Brasília]: Ministério da Ciência e Tecnologia, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. 2000.

RIENZI, E. A. Interrill erosion in soils with different le uses: The kinetic energy wetting effect on temporal particle size distribution. **Catena**, v.107, p.130–138, 2013.
doi:10.1016/j.catena.2013.02.007

RODRIGUES, M. F. **Monitoramento e modelagem dos processos hidrossedimentológicos em bacias hidrográficas florestais no sul do Brasil**. 2011. 202f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal/Silvicultura) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS.

RODRIGUES, J. O. et al. Respostas hidrológicas em pequenas bacias na região semiárida em função do uso do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.17, n.3. 2013.

ROSTAMIAN, R. et al. Application of a SWAT model for estimating runoff and sediment in two mountainous basins in central Iran. **Hydrol. Sci. J.**, v.53, n.5, p.977–988, 2008.

ROOSEBOOM, A.; MILKE, F. J. **Erosion initiation**. In: Recent Developments in the Explanation and Prediction of Erosion and Sediment Yield (Proc. Exeter Symp., July 1982), 59-66. IAHS Publ. no. 137. 1982.

ROUSE, H. **Fluid mechanics for hydraulic engineers**, Dover, New York. 1938.

ROVIRA, A.; BATALLA, R. J. Temporal distribution of suspended sediment transport in a Mediterranean basin The Lower Tordera. **Geomorphology**, v.79, p.58–71, 2006.

RUBEY, W. Settling velocities of gravel, se e silt particles. **Am. J. Sci.**, v.225, p.325–338, 1933.

SALAS, J. D.; SHIN, H. S. Uncertainty analysis of reservoir sedimentation. **Journal of Hydraulic Engineering**, v.125, n.4, p.330-50, 1999.

SANTOS, D. C. et al. Agregação e frações físicas da matéria orgânica de um Argissolo Vermelho sob sistemas de uso no bioma Pampa. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v.35, p.1735-1744, 2011.

SANTOS, J. C. N. et al. Runoff, soil loss e soil nutrientes in semiarid áreas of uncultivated. **Revista Ciência Agronômica**, v.42, p.813-820, 2011.

- SEEGER, M. et al. Catchment soil moisture e rainfall characteristics as determinant factors for discharge/suspended sediment hysteretic loops in a small headwater catchment in the Spanish pyrenees. **Journal of Hydrology**, v.288, p.299-311, 2004.
- SHARMA, S.; KAVVAS, L. Modeling noncohesive suspended sediment transport in stream channels using ensemble-averaged conservation equation. **Journal of Hydraulic Engineering**, v.131, n.5, p.380-389, 2005.
- SHE, K.; TRIM, L.; POPE, D. Fall velocities of natural sediment particles: a simple mathematical presentation of the fall velocity law. **Journal of hydraulic research**, v.43, n.2, p.189-195, 2005.
- SHEN, H. W.; JULIEN, P. Y. **Erosion e sediment transport**. In: Maidment, R.D., Hebook of Hydrology, McGraw Hill, New York, pp.12.1-12.61, 1992.
- SHI, Z. et al. Exploring particle size selectivity effects during erosion of purple soils in Chongqing municipality, China. **Journal of Soils e Sediments**, v.17, p.1191-1196, 2017.
- SCHIEBE, F. R.; DENDY, F. E. Control of Water Residence Time in Small Reservoirs. **Trans., ASAE**, v.11, n.3, Annual Meeting, Lincoln, Nebraska. 1978.
- SILVA, A. S. et al. Argila e matéria orgânica e seus efeitos na agregação em diferentes usos do solo. **Ciência Rural**, v.44, n.10, p.1783-1789p., 2014.
- SILVA, A. M.; SCHULZ, H. E.; CAMARGO, P. B. **Erosão e Hidrossedimentologia em Bacias Hidrográficas**. Ed. RIMA, 138p, 2004.
- SILVA, A. M.; SCHULZ, H. E.; CAMARGO, P. B. **Erosão e hidrossedimentologia em bacias hidrográfica**. 2. ed. São Carlos: Editora Rima, 158p. 2007.
- SILVA, P. M. O. et al. Modelagem da hidrografia de cheia em uma bacia hidrográfica da região Alto Rio Grande. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.12, p.258-265, 2008.
- SINGH, R. K. et al. Simulation of runoff and sediment yield from a hilly watershed in the eastern Himalaya, India using the WEPP model. **Journal of Hydrology**, v.405, n.3, p.261-276., 2011.
- SHU, Y. et al. Tracing subducted sediment inputs to the Ryukyu arc-Okinawa trough system: Evidence from thallium isotopes. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, v.217, p.462-491, 2017.
- SLATER, C. S.; CARLETON, E. A. The effect of erosion on losses of soil organic matter. **Soil Sci. Soc. Am. Proc.**, v.3, p.123-128, 1938.
- SLATER, C. S.; CARLETON, E. A. Variability of eroded material. **Jour. Agric. Res.**, v.65, n.4, p.209-219., 1942.

SLATTERY, M. C.; BURT, T. P. Particle size characteristics of suspended sediment in hillslope runoff and stream flow. **Earth Surface Processes and Landforms: The Journal of the British Geomorphological Group**, v.22, n.8, p.705-719, 1997.

SLOFF, C. J. **Reservoir Sedimentation: A literature Survey. Committee on hydrology e geotechnical engineering**. Report No 91-2, Delft University of Technology, The Netherlands, 126 pp. 1991.

STEFANO, C.; FERRO, V. Linking clay enrichment e sediment delivery processes. **Biosystems Engineering**, v.81, n.4, p.465-479, 2002.

STONE, P. M., WALLING, D. E Particle size selectivity considerations in suspended sediment budget investigations. **Water Air Soil Pollut**, v.99, p.63 - 70, 1997.

STOKES, G. G. On the effect of the internal friction on the motion of pendulums, Cambridge **Philos. Trans.**, Part 2, v.2, p.8–106, 1851

STRE, R. I., PEMBERTON, E. I. **Reservoir sedimentation**. In: U.S.w. resources (Editor), Design of small dams. United states department of the interior, bureau of reclamation, p.529-564. 1987.

SUGUIO, K. **Introdução a Sedimentologia**. Editora da Universidade de São Paulo. São Paulo – SP. 317p, 1973.

SUGUIO, K. **Formação Bauru, calcários e sedimentos detriticos associados**, Tese, Universidade de São Paulo. 1973.

SULTANA, Q.; NAIK, M. Estimation of trap efficiency of Sriramsagar reservoir. **International Journal of Research in Engineering and Technology**, v.4, n.11, p.116-122, 2015.

SUTHERLAND, W. J. **From individual behaviour to population ecology** (Vol. 11). Oxford University Press on Demand.

TORRICO, J. J. T. **Práticas Hidrológicas**. Rio de Janeiro: Transcon, 1974. 119p.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: Ciência e Aplicação**, 2ª edição, Editora da universidade (UFRGS)/ Edusp/ABRH, Porto Alegre, RS. 2000.

TYAGI, J. V. et al. CN-SCS based time-distributed sediment yield model. **Journal of Hydrology**, v.352, p.388–403, 2008.

U.S. Department of Agriculture (USDA). **CREAMS - A Field Scale Model for Chemicals, Runoff, e Erosion from Agricultural Management Systems**. Conservation Research Report No. 26. USDA, Sci. e Educ. Admin. 643 pp, 1980.

USDA-SCS. 1974. Soil Survey of Polk County, Nebraska. Washington D.C.: U.S. Government Printing Office.

VANONI, V. A. Sedimentation Engineering. ASCE, **American Society of Civil Engineers**. New York. 1975.

VANONI, V. A. "Predicting Sediment Discharge in Alluvial Channels," **Water Supply e Managemnt**, Pergamon Press, Oxford, pp.399-417, 1977.

VAN RIJN, L. C. **Hebook: Sediment transport by currents e waves**. Rep. No. H 461, Delft Hydraulics, Delft, The Netherlands. 1989.

VENÂNCIO, S. S. **Simulação numérica aplicada ao assoreamento do Reservatório Represa Velha**. Tese de doutorado. Escola de engenharia de São Carlos, USP, 2009, 197p.

VENTE, J.; POESEN, J. Predicting soil erosion e sediment yield at the basin scale: Scale issues e semi-quantitative models, **Earth-Science Reviews**, v.71, p.95-125., 2005.

VENTE, J. et al. Factors controlling sediment yield at the catchment scale in NW Mediterranean geoeosystems, **Journal of Soils and Sediments**, v.11, n.4, p.690-707., 2011.

VENTE, J. et al. Spatially distributed modelling of soil erosion and sediment yield at regional scales in Spain. **Global Planet. Change** 60, p.393–415, 2008.

VERSTRAETEN, G. et al. Sediment yield variability in Spain: a quantitative e semiquantitative analysis using reservoir sedimentation rates. **Geomorphology**, v.50, n.4, p.327-348, 2003.

VERSTRAETEN, G., LANG, A., HOUBEN, P. Human impact on sediment dynamics — quantification e timing. **Catena**, v.7, p.77-80., 2009.

VERSTRAETEN, G., POESEN, J. Estimating trap efficiency of small reservoirs e ponds: methods e implications for the assessment of sediment yield. Progress in **Physical Geography**, v.24, p.219–251, 2000.

VERSTRAETEN, G.; POESEN, J. Factors controlling sediment yield from small intensively cultivated catchments in a temperate humid climate. **Geomorphology**, v.40, p.123-144, 2001.
VERSTRAETEN, G.; POESEN, J. Using sediment deposits in small ponds to quantify sediment yield from small catchments: possibilities & limitations. **Earth Surface Processes e Landforms**, v.27, p.1425-1439, 2002.

VERSTRAETEN, G. et al. **Reservoir e Pond Sedimentation in Europe In: Boardman, J., Poesen, J. (Editors), Soil Erosion in Europe**, John Wiley & Sons Ltd., Chichester, United Kingdom, pp.759-774. 2006.

VERSTRAETEN, G.; PROSSER, I. P.; FOGARTY, P. Predicting the spatial patterns of hillslope sediment delivery to river channels in the Murrumbidgee catchment, Australia. **J. Hydrol.**, v.334, p.440–454, 2007.

VESTENA, L. R.; KOBAYAMA, M. Water Balance in Karst: case study of the Ribeirão da Onça Catchment in Colombo City, Paraná State - Brazil, **Brazilian Archives of Biology e Technology an International Journal**, Curitiba, v.50, n.5, p.905-912, 2007.

VEZZANI, F. M.; MIELNICZUK, J. Agregação e estoque de carbono em Argissolo submetido a diferentes práticas de manejo agrícola. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.35, p.213-223, 2011.

YOUNG, R. A. The role of rainfall impact e surface flow in soil detachment e transport. Unpublished **Ph.D. Thesis**, South Dakota State Univ. 1972.

YOUNG, R. A.; WIERSMA, J. L. Role of rainfall impact in soil detachment e transport. **Water Resources Research**, v.9, p.1629-1636, 1973

YOUNG, R. A.; ONSTAD, C. A. Characterization of rill e interrill eroded soil. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, v.21, p.1126–1130, 1978.

YUILL, B. T.; NICHOLS, M. H. Patterns of grain-size dependent sediment transport in low-ordered, ephemeral channels. *Earth Surface Processes and Landforms*, v.36, n.3, p.334-346, 2011.

WALLING, D. E. The sediment delivery problem. **Journal of Hydrology**. v.65, p.209-237, 1983.

WALLING, D. E. The sediment yields of African rivers. In: **Challenges in African Hydrology** (ed. by D. E. Walling, S. S. D. Foster & P. Wurzel) (Proc. Harare Symp., July 1984), 265-283. IAHS Publ. no. 144, 1984.

WALLING, D. E. Rainfall, runoff e erosion of the le: a global view. In: **Energetics of Physical Environment** (ed. by K. J. Gregory), 89-117. Wiley, Chichester, UK. 1987.

WALLING, D. E. Suspended sediment yields in changing environment. In: **Changing River Channels** (ed. by A. M. Gurnell & G. Petts), 149-176. Wiley, Chichester, UK. 1995.

WALLING, D. E.; WEBB, B. W. Sediment availability e the prediction of storm-period sediment yields. In **Recent Developments in the Explanation e Prediction of Erosion e Sediment Yield**. IAHS Publication no. 137. IAHS: Wallingford. 1982.

WALLING, D. E.; WEBB, B. W. Patterns of sediment yield. In: **Background to Palaeohydrology** (ed. by K. J. Gregory), 69-100. Wiley, Chichester, UK. 1983.

WALLING, D. E.; WEBB, B. W. Estimating the discharge of contaminants to coastal waters by rivers: some cautionary comments. **Marine Pollution Bull.** 16, 488-492., 1985.

WALLING, D. E.; WEBB, B. W. Material transport by the world's rivers: evolving perspectives. In: **Water for the Future: Hydrology in Perspective** (ed by J. C. Rodda & N. C. Matalas) (Proc. Rome Symp., April 1987), 313-329. IAHS Publ. no. 164. 1987.

WALLING, D. E.; WEBB, B. W. The reliability of rating curve estimates of suspended sediment yield: some further comments. In: **Sediment Budgets** (ed. by M. P. Bordas & D. E. Walling) (Proc. Porto Alegre Symp., December 1988), p.337-350. IAHS Publ. no. 174, 1988.

Walling, D. E.; Kane, P. Suspended sediment properties and their geomorphological significance. In **Catchment Experiments in Fluvial Geomorphology**, Burt TP, Walling DE (eds). Geobooks: Norwich; p.311–344, 1984.

WANG, L. et al. Rainfall kinetic energy controlling erosion processes e sediment sorting on steep hillslopes: A case study of clay loam soil from the Loess Plateau, China. **J. Hydrol.** 512:168–176., 2014. doi:10.1016/j.jhydrol.2014.02.066

WANG, Y. P. et al. Sediment resuspension, flocculation, and settling in a macrotidal estuary. **Journal of Geophysical Research: Oceans**, v.118, n.10, p.5591-5608, 2013.

WARD, A. D.; HAAN, C. T.; BARFIELD, B. J. **Simulation of the Sedimentology of Sediment Detention Basins**. University of Kentucky Water Resources Institute Technical Report 1203, Lexington, Kentucky, 133 p, 1977a.

WARD, A. D.; HAAN, C. T.; BARFIELD, B. J. The Performance of Sediment Detention Structures. Roc., **Internatl. Symposium on Urban Hydrology, Hydraulics e Sediment Control**, Kentucky, p.58-68, 1977b.

WARD, A. D.; HAAN, C. T.; BARFIELD, B. J. **Prediction of Sediment Basin Performance**. Paper No. 77-2528 at the 1977 Winter Meeting of ASAE, 1977c, 35p.

WARRINGTON, D. N. et al. Primary particle size distribution of eroded material affected by degrande of aggregate slaking e seal development. **European Journal of Soil Science**, v.60, p.84-93, 2009.

WILCOCK, P. R.; SOUTHARD, J. B. Experimental study of incipient motion in mixed-size sediment. **Water Resources Research**, v.24, n.7, p.1137-1151, 1988.

WILKINSON, S. N. et al. Modelling and testing spatially distributed sediment budgets to relate erosion processes to sediment yields. **Environ. Model. Software**, v.24, p.489-501, 2009.

WISCHMEIER, W. H.; SMITH, D. D. **Predicting rainfall erosion losses-a guide to conservation planning. Predicting rainfall erosion losses-a guide to conservation planning**. 1978.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. **Manual on sediment management e measurement**. Geneva-Switzerle, WMO-No.948. 2003.

XU, J. Trends in suspended sediment grain size in the upper Yangtze River e its tributaries, as influenced by human activities. **Hydrological Sciences Journal**, v.52, n.4, p.777-792, 2007.

ZACHAR, D. **Soil Erosion. Developments in Soil Science**, v.10. Elsevier Scientific Publishing Company, Brastislava, Czechoslovakia. 1982.

ZHANG, G. et al. Sediment Transport e Soil Detachment on Steep Slopes: I. Transport Capacity Estimation. **Soil Science Society of America Journal**, v.73, n.4, p.1291-1297, 2009.