

UFPA

PPGEC

Universidade Federal do Pará



LILIANE DA CRUZ SAMPAIO

MODELO WEPP PARA ESTIMATIVA DA PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS EM UMA PEQUENA HIDROGRÁFICA DA AMAZÔNIA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Instituto de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

Dissertação orientada pelo Professor Claudio José Cavalcante
Blanco, Ph. D.

Belém – Pará – Brasil
2017

LILIANE DA CRUZ SAMPAIO

**MODELO WEPP PARA ESTIMATIVA DA PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS EM
UMA PEQUENA HIDROGRÁFICA DA AMAZÔNIA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós - Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Pará, para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Civil, na área de Concentração em Engenharia Hídrica, linha de Pesquisa em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental.

Orientador: Prof. Claudio José Cavalcante Blanco, Ph. D.

BELÉM

2017

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- S192m Sampaio, Liliane da Cruz
 Modelo WEPP para estimativa da produção de sedimentos em uma pequena Bacia Hidrográfica da
 Amazônia / Liliane da Cruz Sampaio. — 2017
 86 f. : il. color
- Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil (PPGEC), Instituto de
 Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, 2017.
 Orientação: Prof. Dr. Claudio Jose Cavalcante Blanco
1. Modelo WEPP. 2. Calibração. 3. Erosão do solo. 4. Produção de sedimento. I. Blanco, Claudio Jose
 Cavalcante, *orient.* II. Título
-

CDD 333.91

MODELO WEPP PARA ESTIMATIVA DA PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS EM UMA PEQUENA BACIA HIDROGRÁFICA DA AMAZÔNIA

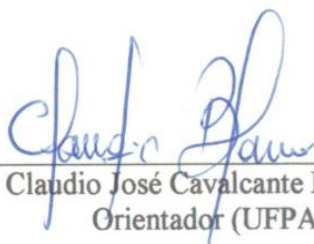
AUTORA:

LILIANE DA CRUZ SAMPAIO

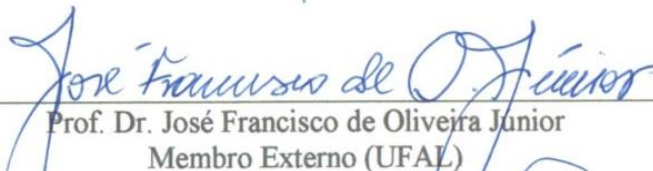
DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À BANCA EXAMINADORA APROVADA PELO COLEGIADO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL DO INSTITUTO DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ, COMO REQUISITO PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRA EM ENGENHARIA CIVIL NA ÁREA DE RECURSOS HÍDRICOS E SANEAMENTO AMBIENTAL.

APROVADO EM: 06 / 12 / 2017.

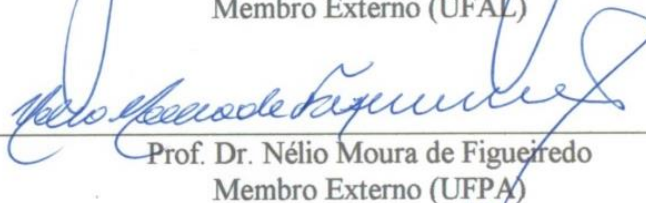
BANCA EXAMINADORA:



Prof. Claudio José Cavalcante Blanco, Ph.D.
Orientador (UFPA)



Prof. Dr. José Francisco de Oliveira Junior
Membro Externo (UFPA)



Prof. Dr. Nélio Moura de Figueiredo
Membro Externo (UFPA)



Prof. Dr. Lindemberg Lima Fernandes
Membro Interno (UFPA)

Visto:



Prof. Dr. Dênio Ramam Carvalho de Oliveira
Coordenador do PPGEC / ITEC / UFPA

RESUMO

Os processos erosivos produzem diversos prejuízos econômicos e ambientais. O desenvolvimento de modelos matemáticos tem possibilitado quantificar esses processos, permitindo estimar a magnitude do problema, visando minimizá-lo. Nesse sentido, este trabalho utiliza o modelo WEPP (Water Erosion Prediction Project) para simular a produção de sedimentos, em uma pequena bacia hidrográfica da Amazônia, bacia do igarapé da Prata, localizada no Município de Capitão Poço-PA. Os parâmetros principais calibrados do modelo WEPP foram: saturação inicial do solo (S_i), erosão pelo fluxo superficial (K_i), erosão pelo fluxo em canais ou em sulcos (K_r) e condutividade hidráulica saturada (K_e). Após a calibração, pôde-se verificar que a maior parte da produção de sedimento está nos planos próximos ao exutório da bacia. E como é de se esperar, essa produção é maior em áreas com predominância de agricultura e pecuária. Os resultados da estimativa de produção de sedimentos calculada pelo modelo foram comparados a dados observados do ano de 2012. O modelo apresentou um valor 131,99 t/km², valor próximo ao observado, que foi de 121,64 t/km². Esse resultado leva a conclusão de que os valores calculados pelo modelo estão coerentes com a realidade da produção de sedimentos da pequena bacia hidrográfica em questão.

Palavras-chave: Modelo WEPP, calibração, erosão do solo, produção de sedimento.

ABSTRACT

Erosive processes produce several economic and environmental damages. The development of mathematical models has made it possible to quantify these processes, allowing estimating the magnitude of the problem, in order to minimize it. In this sense, this work uses the WEPP (Water Erosion Prediction Project) model to simulate the sediment yield in an Amazon small catchment, Igarapé da Prata catchment, located in the Municipality of Capitão Poço-PA. The calibrated main parameters of the WEPP model were: initial soil saturation (S_i), erosion by runoff (K_i), erosion by channel or groove flow (K_r) and saturated hydraulic conductivity (K_e). After the calibration, it was verified that most of the sediment yield is in the plans. And as is to be expected, this production is higher in areas with predominance of agriculture and livestock. The results of the estimated sediment yield calculated by the model were compared to the observed data for the year 2012. The model presented a value of 131.99 t / km², close to the observed value, which was 121.64 t / km². This result leads to the conclusion that the values calculated by the model are consistent with the reality of the sediment yield of the small catchment in question.

Keywords: WEPP model, calibration, soil erosion, sediment yield.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – a) e b) desagregação das partículas de solo através do impacto das gotas de chuva; c) fases do processo erosivo.	21
Figura 2 – Erosão em sulcos e entressulcos	28
Figura 3 – Mapa de Localização da Área de Estudo.	30
Figura 4 - Mapa de caracterização do solo da bacia.....	31
Figura 5 - Mapa de cobertura vegetal e manejo do solo.....	32
Figura 6 – Mapa de declividade	33
Figura 7 – Esquema de predição de erosão pelo modelo WEPP.....	34
Figura 8 – Pluviograma para o ano de 2012 da estação pluviométrica instalada na bacia do Igarapé da Prata	40
Figura 9 – Média das velocidades de queda para diferentes tamanhos de partículas.....	48
Figura 10 – Valores do coeficiente de transporte (Kt) determinado para vários níveis de tensão de cisalhamento do solo (Finkner et al., 1989).....	49
Figura 11 – Representação computacional do gerador de dados climáticos CLINGEN.....	53
Figura 12 – Pluviômetro da estação pluviométrica do Igarapé da Prata	53
Figura 13 – Dados de entrada do modelo CLIGEN	54
Figura 14 – Componente do editor de solo do modelo.....	55
Figura 15 - Perfil representativo da vertente utilizada na simulação	56
Figura 16 – Representação do programa computacional para o componente de uso e manejo do solo do modelo WEPP.....	57
Figura 17 – Definição das sub- bacias.....	58
Figura 18 – Discretização da sub-bacia 1.....	58
Figura 19 – Discretização da sub-bacia 2.....	59
Figura 20 – Sensor de Turbidez para medida da quantidade de sedimentos.....	60
Figura 21 – Arquivo de eventos	60
Figura 22 – Editor de declividade do modelo.	61
Figura 23 – Representação computacional do componente do solo do modelo.....	62
Figura 24 - Distribuição espacial das variações do perfil do terreno para a desagregação de solo- sub-bacia 1.....	64
Figura 25 - Distribuição espacial das variações do perfil do terreno para a desagregação de solo - sub-bacia 2.....	67

Figura 26 - Potencial de produção de sedimentos calculada para as sub-bacias.....	71
Figura 27 – Modelo digital da produção de sedimentos da pequena bacia do igarapé da Prata.	72

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Modelos de perdas de solos.	25
Tabela 2 – Estimativa dos parâmetros classificada pela textura do solo do USDA.	37
Tabela 3 – Granulometria e textura do solo do Igarapé da Prata.	38
Tabela 4 – Classes de uso do solo	45
Tabela 5 – Distribuição do Tamanho dos Poros.....	51
Tabela 6 – Produção de sedimentos bruta (PSB) e específica (PSE) para cada plano.	71
Tabela 7 – Produção de sedimentos observada e estimada por Silva <i>et al.</i> (2015) e pelo modelo WEPP para o ano de 2012.	73
Tabela 8 - Produção de sedimentos estimados em várias regiões.	74

LISTA DE TABELAS EM APÊNDICES

Apêndice 1– Elementos da discretização da sub-bacia 1 com 16 elementos	84
Apêndice 2– Elementos da discretização da sub-bacia 2 com 18 elementos	84
Apêndice 3– Características dos planos da Sub – Bacia 1	85
Apêndice 4- Características dos planos da Sub –Bacia 2	85

LISTA DE TABELAS EM ANEXOS

Anexo A1– Parâmetros do arquivo de uso e manejo na base de dados internos disponíveis no modelo WEPP	86
--	----

LISTA DE SIGLAS

ANA	Agência Nacional de Águas
CPRM	Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
CLIGEN	Climate Generation
CREAMS	Chemicals, Runoff and Erosion from Agricultural Management Systems Model
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
KINEROS	Kinematic Runoff Erosion Model
MMA	Ministério do Meio Ambiente
MUSLE	Modified Universal Soil Loss Equation
RUSLE	Revised Universal Soil Loss Equation
SCS	Serviço de Conservação do Solo
SDR	Sediment delivery ratio
SIG	Sistema de Informação Geográfica
USDA	United States Department of Agriculture
USG	Unit Sediment Graph
USLE	Universal Soil Loss Equation
WEPP	Water Erosion Prediction Project
WESP	Watershed Erosion Simulation Program

LISTA DE SÍMBOLOS

C - Coeficiente de Chezy
 C_i - parâmetro que considera o efeito da cobertura vegetal na erosão dos canais
 D_i - Taxa de erosão de sedimentos nas áreas planas
 D_r - Taxa de liberação de sedimentos nos sulcos ou canais
 d - Diâmetro da partícula (m)
 F - Profundidade de infiltração acumulada
 f_c - Taxa de infiltração
 G - Carga de sedimentos
 g - Aceleração da gravidade (m/s^2)
 h - Volume de água armazenado por unidade de área
 i - Intensidade de precipitação
 I_p - Intensidade de precipitação
 K_e - Condutividade hidráulica efetiva saturada
 K_i - Erodibilidade do solo entressulco
 K_r - Erodibilidade do solo no sulco
 K_t - Coeficiente de transporte
 N_s - Potencial de capilaridade
 m - Expoente de profundidade de descarga
 n - Coeficiente de rugosidade de Manning
 η_e - Porosidade efetiva
 q - Descarga por unidade de largura
 t - Tempo
 t_p - Tempo de empoçamento
 T_c - Capacidade de transporte de sedimentos pelo escoamento
 R - Precipitação acumulada
 S_i - saturação inicial
 S - Densidade relativa
 V_f - Velocidade de queda da partícula
 V - Excesso de precipitação acumulada
 x - distância ao longo do sentido da declividade
 ϕ - Porosidade

τ - tensão cisalhante atuando nas partículas de solo em decorrência do escoamento
 τ_c - Tensão de cisalhamento necessária para a ocorrência da liberação de partículas
 ψ - Potencial capilar médio
 γ - Peso específica da água
 θ_i - conteúdo volumétrico inicial da água
 α - Coeficiente de profundidade de descarga
 β - Coeficiente de turbulência induzida pelo impacto das gotas da chuva (no modelo assume valor de 0,5)
 λ - Índice de distribuição dos tamanhos dos poros
 ν - Viscosidade cinemática (m^2/s)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1.	OBJETIVOS	18
1.1.1	<i>Geral.....</i>	18
1.1.2	<i>Específicos</i>	18
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	19
2.1	PROCESSOS EROSIVOS EM BACIAS HIDROGRÁFICAS	19
2.2	FORMAS DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS	22
2.3	PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS.....	23
2.4	MODELOS MATEMÁTICOS PARA A PREDIÇÃO DA EROSÃO HIDRICA....	24
2.4.1	<i>A USLE (Universal Soil Loss Equation)</i>	25
2.4.2	<i>A MUSLE (Modified Universal Soil Loss Equation).....</i>	25
2.4.3	<i>A RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation).....</i>	26
2.4.4	<i>O Modelo KINEROS2 (Kinematic Runoff Erosion Model)</i>	26
2.4.5	<i>O Modelo WESP (Watershed Erosion Simulation Program).....</i>	26
2.4.6	<i>O Modelo WEPP (Water Erosion Prediction Projec)</i>	27
2.5	ESTUDOS COM APLICAÇÃO DO MODELO WEPP	28
3	ÁREA DE ESTUDO	30
3.1	CLIMA.....	30
3.2	SOLO	31
3.3	COBERTURAS VEGETAIS	32
3.4	TOPOGRAFIA	33
4	METODOLOGIA	34
4.1	MODELO WEPP.....	34
4.2	APLICAÇÃO DO MODELO WEPP	36
4.2.1	<i>Modelo de infiltração.....</i>	36
4.2.2	<i>Escoamento nos planos</i>	40
4.2.3	<i>Componentes de erosão do solo</i>	42
4.3	PARAMETRIZAÇÕES DO MODELO	50
4.4	DADOS DE ENTRADA	52
4.4.1	<i>Parâmetros Climáticos do modelo</i>	52
4.4.2	<i>Componente de Solo</i>	54

4.4.3	<i>Parâmetros topográficos das vertentes</i>	55
4.4.4	<i>Parâmetros de uso e manejo do solo</i>	56
4.4.5	<i>Discretização da Pequena bacia</i>	57
4.5	COLETA DOS DADOS	59
4.6	CALIBRAÇÃO E SIMULAÇÃO DOS PARÂMETROS FÍSICOS DA BACIA	60
4.6.1	<i>Arquivos de chuva</i>	60
4.6.2	<i>Arquivo de morfologia da bacia</i>	61
4.6.3	<i>Arquivo de solo</i>	61
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	63
5.1	TESTES REALIZADOS COM OS PARÂMETROS FÍSICOS DO SOLO (K_i , K_r , τ_c e K_e)	63
5.2	ESTIMATIVA DA PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS	70
6	CONCLUSÃO	75
	REFERÊNCIAS	76
7	APÊNDICE	84
8	ANEXOS	86

1 INTRODUÇÃO

A utilização do solo para a Agricultura e o uso dos Recursos Hídricos para diversos fins, tem apresentado uma grande preocupação no que tange à quantificação no tempo e no espaço da produção, transporte e deposição de sedimentos em bacias hidrográficas. Nesse contexto, diversas técnicas de controle de erosão hídrica e pesquisas em ciências do solo têm sido desenvolvidas. Por exemplo, modelos hidrossedimentológica têm permitido prever perdas de solo por erosão. Tais modelos evoluíram de modelos empíricos, como o Universal Soil Loss Equation (USLE), para modelos de base física, como o Water Erosion Prediction Project (WEPP) (AMORIM, 2003). Estes modelos representam os processos de desagregação, transporte e deposição das partículas do solo.

Diversos estudos foram desenvolvidos com o intuito de conhecer e quantificar os sedimentos produzidos na pequena bacia hidrográfica do igarapé da Prata, localizada no município de Capitão Poço, estado do Pará, tais como:

Gomide *et al.* (2012) aplicaram o modelo Universal Soil Loss Equation (USLE) com o objetivo de avaliar a perda de solo na bacia hidrográfica do Igarapé da Prata. Santos *et al.* (2015) aplicaram a Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE), avaliando a sua aplicabilidade na região, através da construção de uma base de dados georeferenciada com adequações de dados para inserção em ambiente SIG, com objetivo de quantificar a erosão hídrica e analisar a perda de solo da bacia. Cariello *et al.* (2015) aplicaram e calibraram a equação universal de perda de solo modificada (MUSLE) para a bacia do igarapé da Prata. Os dados simulados foram comparados aos dados medidos e a versão calibrada obteve uma estimativa satisfatória. Silva *et al.* (2015) analisaram o potencial de produção de sedimentos, através dos modelos Langbein-Schumm (1958) e USLE (1965) comparando os dados simulados com os dados observados de sedimento da bacia, observando que o modelo Langbein-Schumm se sobre saiu em relação a USLE.

O modelo vem sendo aplicado em várias partes do mundo, por exemplo, Zhang *et al.*, (2014) avaliaram a taxa de perda de solo numa bacia da China, onde as concentrações de sedimentos medidos foram comparadas com os estimados. AMORE *et al.*, (2004) aplicaram os modelos USLE e WEPP numa bacia da Sicília - Itália, comparando os valores de sedimentos calculados com as medições de sedimentos depositados no reservatório, e para este caso, o modelo WEPP estimou melhor os volumes medidos do que a USLE. RACLOT E ALBERGEL, (2006) aplicaram o modelo na Tunísia, em uma área semiárida do

Mediterrâneo, comparando os resultados entre as previsões e as medições mostrando as diferenças significativas do processo relacionadas a efeitos sazonais, apontando um menor desempenho do modelo WEPP para as condições mediterrâneas.

Como até o presente momento, só foram aplicados modelos empíricos à pequena bacia hidrográfica do igarapé da Prata, o objetivo deste estudo é de avaliar a produção de sedimentos, utilizando o modelo físico WEPP (FLANAGAN e NEARING, 1995b) de predição de erosão.

1.1. OBJETIVOS

1.1.1 Geral

Aplicar o modelo Hidrossedimentológico WEPP (Water Erosion Prediction Project) na estimação da produção de sedimentos em uma pequena bacia Hidrográfica Amazônica, comparar os resultados aos dados experimentais.

1.1.2 Específicos

- Avaliar a aplicabilidade do modelo WEPP em função das variáveis necessárias;
- Calibrar o modelo WEPP para a bacia do igarapé da Prata;
- Quantificar a produção de sedimentos na bacia do Igarapé da Prata via modelo WEPP;

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 PROCESSOS EROSIVOS EM BACIAS HIDROGRÁFICAS

Das etapas que ocorrem no ciclo hidrológico, a fase terrestre engloba os processos erosivos que ocorrem em uma bacia hidrográfica. Pois, a mesma se comporta como uma área de captação natural da água que precipita, convergindo para um único ponto, o exutório. A bacia hidrográfica é utilizada como uma unidade geomorfológica fundamental, porque suas características governam todo o fluxo superficial da água. Assim, vem sendo considerada uma unidade territorial de ideal planejamento integrado para o manejo dos recursos naturais (CHRISTOFOLETTI, 1978; POLITANO, 1992; PISSARRA, 1998).

A precipitação que atinge a bacia hidrográfica é coletada e uma parte dessa água é conduzida para o rio através do escoamento superficial e do fluxo de água subterrânea. A velocidade com que a água alcança os rios é influenciada pelo uso e ocupação do solo e pelas características do solo. A litologia determina a textura do solo que, controla a capacidade de infiltrar e armazenar água. A morfologia da bacia é definida pela estrutura geológica e, com isso, controla os processos de erosão e lixiviação, além do potencial de produtividade da área (FROTTA, 2012).

As características do padrão de drenagem repercutem no comportamento hidrológico e litológico de cada unidade de solo. Em solos onde a infiltração é mais difícil, ocorre o escoamento superficial, sendo possível uma maior esculturação da rede hidrográfica, tendo como consequência uma densidade de drenagem maior (PISSARRA *et al.*, 2004). Demattê e Demétrio (1996a,b) analisaram as características da discriminação de unidades de solos e concluíram que ocorre uma estreita correlação entre a densidade de drenagem e determinados atributos morfológicos, químicos e mineralógicos, ligados à intensidade de intemperismo dos solos estudados.

Na bacia, o relevo se caracteriza pelos diferentes compartimentos da paisagem, onde ocorrem diversos processos superficiais e subsuperficiais, tais como o fluxo de materiais na superfície (erosão) e em profundidade (infiltração, lixiviação e translocação) (ABRAHÃO & MELLO, 1988). Entre os diversos tipos de erosão existentes, torna-se relevante entender o mecanismo relacionado à ação das águas pluviais sobre o solo – erosão hídrica – pois, os processos erosivos ocasionados pelas águas das chuvas têm abrangência em quase toda a superfície terrestre, em especial nas áreas com clima tropical, onde os totais pluviométricos são bem mais elevados do que em outras regiões do planeta (GUERRA, 2005).

Segundo Foster (1982), a erosão hídrica ocorre das seguintes formas: entressulcos ou laminar; ou em sulcos e voçorocas. A erosão entressulcos ou laminar ocorre pelo impacto das gotas de chuva, e é o fator responsável pela desagregação das partículas da massa do solo, podendo desagregar grandes quantidades de partículas decorrentes da energia cinética das gotas, que exercem forças de pressão e cisalhamento no ponto de impacto (CASSOL e LIMA, 2003). A erosão em sulcos é formada pela concentração do escoamento superficial nas depressões da superfície do terreno, evoluindo para a formação de canais ou ravinas, o que faz aumentar a degradação dos solos pela erosão hídrica (BEZERRA, 2010). Já no caso das voçorocas, trata-se de um canal resultante da erosão causada pelo fluxo intermitente da água durante um fluxo pesado de chuvas (ALBUQUERQUE, 2007). Essa classificação está relacionada ao crescimento progressivo da concentração do escoamento superficial no solo.

Segundo Guerra (1999), a erosão hídrica é descrita pelas seguintes etapas:

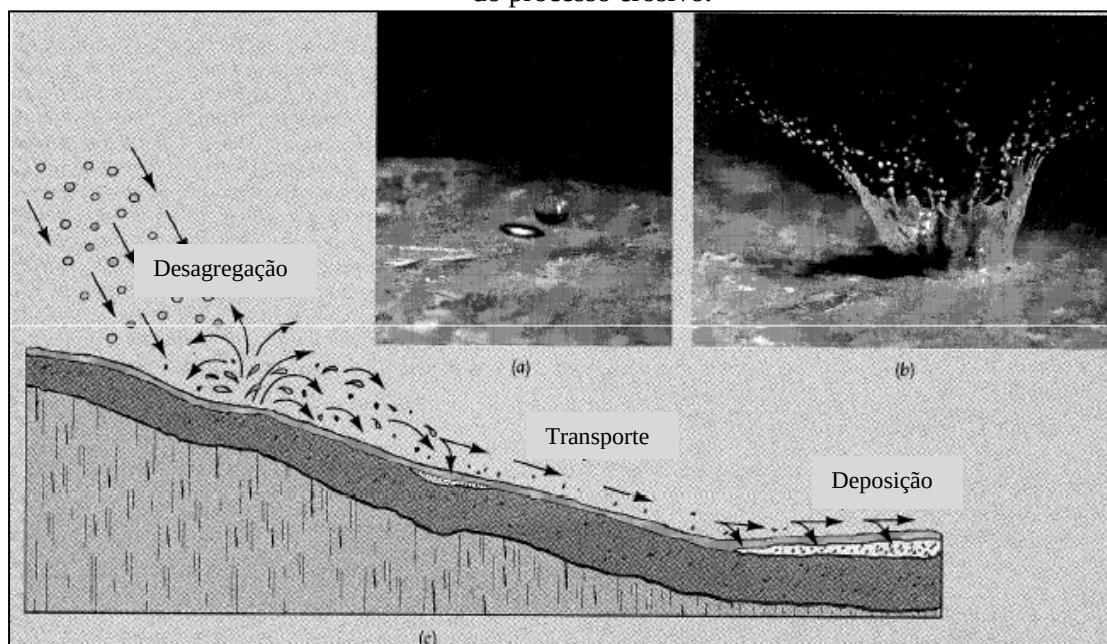
- **O splash (erosão pelo impacto das gotas de chuva):** é um estágio inicial do processo erosivo, onde as partículas que compõem o solo são preparadas para serem transportadas pelo escoamento superficial. O papel do *splash* tende a variar com a resistência do solo pelo impacto das gotas de água, e energia cinética das gotas de chuva.

- **Energia cinética da chuva:** determina a erosividade, que é a potencialidade da chuva em causar erosão; a energia cinética está ligada à intensidade da chuva, porque é a energia total das gotas existentes em um evento de precipitação, sendo uma função relacionada com a duração, massa, tamanho da gota e velocidade; contribuindo para a ruptura dos agregados.

- **Ruptura dos agregados:** é o teor de matéria orgânica, juntamente com outras propriedades dos solos que está diretamente ligada à ruptura dos agregados, textura, densidade aparente, porosidade, estrutura, características das encostas, cobertura vegetal. Essa ruptura pode ser considerada um dos primeiros fatores no processo de erosão dos solos, pois é a partir desse fator que outros processos desencadeiam-se, no sentido de desestabilizá-lo.

A desagregação do solo pode ser resultado tanto das gotas de chuva que golpeiam o solo como pela corrente de água que se forma na superfície, como mostra a Figura 1.

Figura 1 – a) e b) desagregação das partículas de solo através do impacto das gotas de chuva; c) fases do processo erosivo.



Fonte: Repositório digital da nptel.

A erosão hídrica é constituída por três fases: desagregação, transporte e a deposição das partículas.

- Degradação é o começo do processo erosivo que consiste no desprendimento das partículas pelo impacto das gotas de chuva e pelo escoamento superficial, essas, por sua vez, salpicam com as gotas de água e retornam a superfície levando à obstrução da porosidade da superfície e a redução da capacidade do meio de infiltrar a água (COGO & BERTOL, 1998).
- A segunda fase (transporte) do processo inicia-se quando a intensidade da chuva passa a ser maior que a taxa de infiltração pela transferência das partículas degradadas do seu local de origem para outro local (GONÇALVES, 2008).
- Por último, a deposição caracteriza-se pelo aumento da carga de sedimentos em relação à capacidade de transporte ou pela redução da velocidade de escoamento superficial devido à rugosidade da superfície do solo e pelo impacto das gotas de chuva (COGO E BERTOL, 1998; AGASSI, 1996).

Estas fases podem não ocorrer distintamente umas das outras, e sim concomitantemente, tornando o processo mais complexo (BRANCO, 1998). Das principais formas de erosão hídrica, têm-se destacado as seguintes: por embate ou por impacto das gotas de chuva, erosão laminar, erosão em sulcos e voçorocas, erosão em queda, erosão subterrânea e a erosão que ocorre ao longo do leito e das margens dos rios e canais (BRANCO, 1998).

Segundo Salomão (2005) e Peres (2003) a erosão hídrica ocorre, inicialmente, por dois eventos, um pelo impacto das gotas de chuva, sobre tudo em áreas desprovidas de cobertura vegetal e pelo escoamento superficial das águas que gera o transporte das partículas. As gotas de chuva ao caírem atingem certa velocidade com certa energia cinética. Esta energia é dissipada quando as gotas atingem a superfície do solo. Dependendo das condições da cobertura superficial (com ou sem vegetação), este impacto provocará ou não a desagregação das partículas. Essas poderão ser transportadas pelas gotas, sendo arremessadas após o impacto, a uma curta distância. Isto faz com que algumas vezes o fluxo possa transportar mais material do que a sua capacidade de transporte (Foster, 1982).

2.2 FORMAS DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS

O transporte do material desprendido ocorre pelo fluxo de massa, na forma de rolamento, deslizamento ou arraste da partícula, por suspensão ou por ambas as formas. Quando o efeito do impacto da gota da chuva ocorre sobre o solo essas partículas movem-se desagregadas a certas distâncias e em todas as direções (MUTCHLER E YOUNG, 1975). O transporte através da água pode acontecer de várias maneiras, dependendo do fluxo e das características das partículas. Partículas pesadas são transportadas por deslizamento, rolamento ou saltos. Partículas muito leves são transportadas em suspensão no interior do fluxo e constituem a carga de lavagem (PAIVA, 2008). Quando o aporte de sedimentos excede a capacidade de transporte, há a deposição deste material em locais relativamente mais baixos, que podendo ser depressões naturais do terreno ou reservatórios de água como rios, lagos, açudes ou represas, formando assim o processo erosivo (BRANCO, 1998).

Diversas formas são determinadas para o transporte de sedimento podendo ser definidas em três tipos conforme Carvalho (2008):

Carga Sólida de Arrasto – As partículas desprendidas rolam ou escorregam longitudinalmente no curso d'água. As partículas estão em contato com o leito praticamente o tempo todo.

Carga Sólida Saltante – São determinadas por partículas que saltam ao longo do curso d'água por efeito da correnteza ou devido ao impacto de outras partículas.

Carga Sólida em Suspensão – São partículas que são suportadas pelos componentes verticais de velocidades do fluxo turbulento, quando estão sendo transportadas pelos componentes horizontais dessas velocidades, são suficientemente pequenas para permanecerem em suspensão.

2.3 PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS

O processo de produção de sedimentos dentro do sistema de água doce é estudado por diversos ângulos, como nas margens dos cursos d'água (rios e correntezas) e também em lagos. A ação mecânica da água é responsável por separar as diversas granulometrias das partículas de sedimentos, gerando gradientes de tamanhos distintos e variando suas posições conforme a velocidade da água. Os mesmos são constituídos por três principais componentes: matéria orgânica em diversos estágios de decomposição; minerais particulados (carbonatos, argilas, silicatos não argilosos); e componentes inorgânicos de origem biogênica (WETZEL, 1993).

O processo erosivo que ocorre tanto em áreas com vegetação natural quanto em terras agrícolas, são um dos principais problemas ambientais da atualidade (TORRES, 2013). Esse processo é causado pelas chuvas intensas que ocorrem em toda superfície terrestre, principalmente quando as localidades possuem índices pluviométricos elevados. Alguns fatores de suma importância dizem respeito à necessidade de compreender o processo erosivo para evitar situações de calamidade (TORRES, 2013). A diferença na erodibilidade de solos distintos ocorre por causa das condições intrínsecas desses solos, dadas pelas características e propriedades físicas, químicas e mineralógicas. A erodibilidade expressa à suscetibilidade do solo ao processo erosivo, ou seja, devido às condições intrínsecas desses solos, dados pelas suas características físicas, químicas e mineralógicas (FOSTER, 1982).

O regime das águas e a produção de sedimentos são processos que ocorrem em função das ações combinadas das condições naturais e das atividades humanas. As características físicas (topografia, geologia, solo e clima) contribuem para uma erosão potencial, enquanto as interferências socioeconômicas são ocasionadas pelo uso e ocupação da terra (CUNHA, 2001).

O processo de erosão do solo e a quantificação das perdas de solo são de grande importância para o estudo e a compreensão dos fatores erosivos, como ponto de partida, esse processo serve para elaboração de medidas que visem à maximização do uso dos recursos hídricos disponíveis, sem os efeitos negativos decorrentes da produção, transporte e deposição de sedimentos (BRANCO, 1998). Dessa forma, a erosão do solo fornece os materiais que dão origem ao processo de assoreamento. A energia cinética que transporta o material erodido é reduzida e o mesmo é depositado, ocasionando o acúmulo permanente de sedimentos no leito dos cursos d'água (GUERRA, 1995).

O processo de deposição ocorre quando a força do escoamento reduz até a condição de não poder continuar a deslocar a partícula. O depósito dos sedimentos geralmente se dá em locais relativamente mais baixos, podendo ocorrer em depressões naturais do terreno ou mesmo em encostas de declividade mais suave (CARVALHO, 2008). A parcela de sedimento que é depositada nos declives, não alcançando o curso d'água, é representada através da taxa de transferência de sedimento (*sediment delivery ratio* – SDR). Este é um parâmetro adimensional que representa a relação entre a produção de sedimentos no exutório da bacia e a erosão bruta, que representa a soma de todo o sedimento desagregado por todas as formas de erosão que ocorrem dentro da bacia (WALLING, 1983). O valor percentual da taxa de entrega de sedimentos em bacias hidrográficas é influenciado por vários fatores geomorfológicos e ambientais, como dimensão da bacia, localização das fontes de sedimentos, relevo, hidrografia, vegetação e do uso e tipo de solo (WALLING, 1983). Em relação às dimensões da bacia, quanto maior, maiores as chances de ocorrer deposição de sedimentos no comprimento da vertente, diminuindo assim a eficiência da transferência de sedimentos, diminuindo, portando, os valores de SDR. Nesse caso o SDR funciona como um indicador, e quanto maior for o valor de SDR, menor será a eficiência na retenção de sedimentos na bacia (DIDONÉ, 2013).

2.4 MODELOS MATEMÁTICOS PARA A PREDIÇÃO DA EROSIÃO HIDRICA

Modelos matemáticos são aplicados em atividades humanas diversas, tais como: matemática, economia, engenharia, etc. Os problemas práticos utilizam-nos de forma a facilitar os trabalhos com problemas de modelagem. Eles são uma descrição simplificada do processo natural e humano com o objetivo de descrevê-lo. Os modelos hidrológicos têm sido desenvolvidos a partir da necessidade de se fazer previsões a fim de planejar e de entender o comportamento dos fenômenos hidrológicos que ocorrem em uma bacia hidrográfica, facilitando uma análise quantitativa e qualitativa dos processos do ciclo hidrológico, como: precipitação, evaporação, interceptação, infiltração, produção de sedimentos, escoamento superficial e subterrâneo (PAIVA, 2008). A descrição desenvolvida pelos modelos prevê a ocorrência e perdas de solo por erosão, dessa forma, eles vêm sendo desenvolvidos e aperfeiçoados (Tabela 1)

Tabela 1 – Modelos de perdas de solos.

Modelo	Autor	Base Conceitual
USLE (Universal Soil Loss Equation)	Wischmeier e Smith (1965)	Empírico
MUSLE (Modified Universal Soil Loss Equation)	Williams (1975)	Empírico
RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation)	Renard <i>et al.</i> (1991)	Empírico
KINEROS (Kinematic Runoff Erosion Model)	Woolhiser <i>et al</i> (1990)	Físico
WESP (Watershed Erosion Simulation Program)	Lopes (1987)	Físico
WEPP (Water Erosion Prediction Project)	Flanagan e Nearing (1995)	Físico

Fonte: Autoria própria.

2.4.1 A USLE (Universal Soil Loss Equation)

A Equação Universal de Perda de Solo (USLE) foi desenvolvida por Wischmeier e Smith (1965) e outros pesquisadores do departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA), do Serviço de Pesquisa Agrícola (ARS), do Serviço de Conservação do Solo (SCS) e da Universidade de Perdue (ELLIOT *et al.*, 1989). É um modelo de base empírica bastante utilizada, que permite estimar a perda média anual do solo com base em dados de precipitação, topografia do terreno, uso e manejo do solo e práticas conservacionistas (AMORIM, 2003).

2.4.2 A MUSLE (Modified Universal Soil Loss Equation)

Williams (1975) propôs a MUSLE com a substituição do fator de chuva da USLE por um fator de escoamento superficial, calculado para cada evento chuvoso individual. A concepção dessa troca aconteceu pelo autor acreditar que as características do escoamento melhoram a estimativa do aporte de sedimentos em uma bacia. Isso se explica, pois após o desgaste do solo, devido à chuva, é o escoamento superficial que comanda o carreamento dos sedimentos. O autor obteve o fator R através da calibração dos seus parâmetros com a carga de sólidos em suspensão observada em 778 eventos em 18 pequenas bacias dos Estados

Unidos. Dentre as variáveis testadas, o deflúvio total e a vazão de pico deram os melhores resultados.

2.4.3 A *RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation)*

A *RUSLE* é um modelo de base empírica que foi originado de uma revisão da *USLE* e de sua base de dados, estimando a perda de solo médio anual ocasionado pela precipitação e pelo escoamento. O modelo apresenta a mesma estrutura da equação da *USLE*, contendo vários conceitos baseados na descrição do processo físico incorporados à *RUSLE*, essa incorporação visa uma melhoria nas estimativas das perdas de solo (AMORIM, 2003). É um dos modelos mais utilizado e tem sido aplicado em áreas de diferentes tamanhos e condições ambientais. A utilização conjunta da *RUSLE* com um Sistema de Informações Geográfico permite discretizar, especialmente, os fatores que determinam a perda de solo, tornando o modelo mais atraente para análise de áreas de bacias hidrográficas.

2.4.4 O Modelo *KINEROS2 (Kinematic Runoff Erosion Model)*

O *KINEROS2* simula os processos de infiltração, geração e propagação do escoamento superficial, erosão por impacto da chuva e erosão pelo cisalhamento em pequenas bacias urbanas e rurais onde a bacia é representada por planos retangulares, canais e elementos de armazenamento. É um modelo que simula a vazão e a erosão durante um evento ou uma sequência de eventos de chuva em uma bacia (PAIVA, 2008). O modelo utiliza a equação da continuidade de sedimentos (BENNETT, 1974) e calcula o desprendimento das partículas pelo impacto das gotas de chuva através da equação de Meyer e Wischmeier (1969).

2.4.5 O Modelo *WESP (Watershed Erosion Simulation Program)*

O modelo *WESP* simula o escoamento e produção de sedimento, sendo desenvolvido para avaliar as variações da topografia, rugosidade da superfície, as propriedades do solo, geometria dos fluxos dos canais, e as condições de uso da terra em pequenas bacias hidrográficas (LOPES, 1987). A bacia é discretizada e representada por uma geometria de planos e canais, na qual os eventos de chuva são simulados. O modelo considera erosão por impacto das gotas de chuva e pelo fluxo superficial (SANTOS, 2008), considerando as perdas

de água por infiltração, as quais são dadas pela equação de Green e Ampt (1911) (CHU, 1978).

2.4.6 O Modelo WEPP (*Water Erosion Prediction Project*)

O modelo WEPP é baseado nos princípios físicos dos processos inerentes à erosão do solo (clima, desenvolvimento de plantas, deposição de resíduos, manejos, infiltração, balanço hídrico, escoamento superficial, perda de solo, deposição e taxa de transferência de sedimentos - *Sediment Delivery Ratio* – SDR). Esta última tem grande valor para o conhecimento da quantidade de sedimento realmente erodido, pois nem todo sedimento gerado na bacia é transportado para fora da mesma. O WEPP é um modelo que tem como finalidade simular eventos individuais ou vários eventos de forma contínua, capaz de estimar a erosão ou a deposição do solo numa bacia. O modelo considera os efeitos das mudanças do uso do solo, modelando a variabilidade espacial e temporal que influenciam nos processos hidrológicos e da erosão que ocorrem em uma encosta, onde as variáveis e parâmetros do modelo dependem do espaço e do tempo.

O modelo WEPP simula muitos dos processos físicos importantes da erosão do solo, os processos tendem a acontecer em sua ordem, onde o fim de um dará início ao outro, predizendo a perda do solo ou sua deposição (PAIVA, 2008). O WEPP considera o processo de erosão entressulcos e em sulcos (Figura 2) separadamente, utilizando, para cada dia, as características do solo, da cobertura vegetal e da umidade do solo. A quantificação ou a estimativa de produção de sedimento tem como base as condições do terreno quando ocorre uma chuva, dessa forma o modelo estima a desagregação, transporte e a deposição de partículas ao longo da encosta (LANE *et al.*, 1992).

Figura 2 – Erosão em sulcos e entressulcos

Fonte: Acton Wakefield Watersheders Alliance – AWWA, 2013.

2.5 ESTUDOS COM APLICAÇÃO DO MODELO WEPP

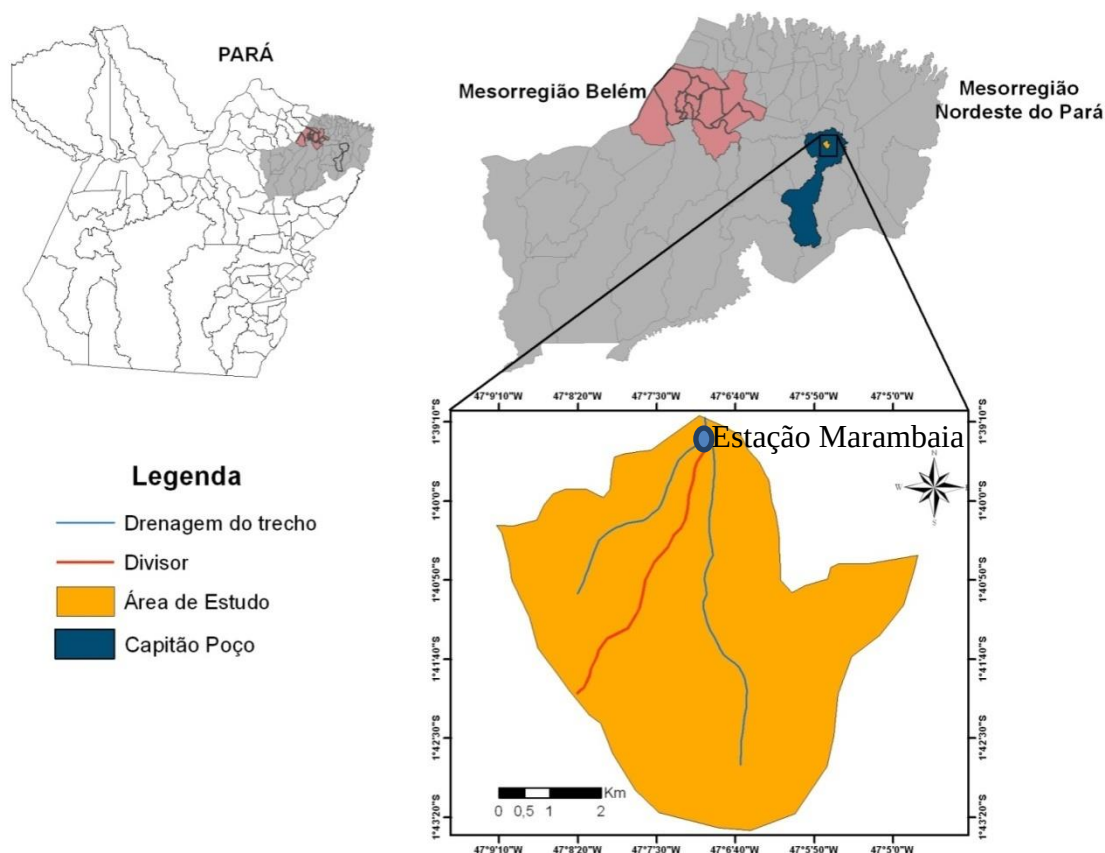
O modelo WEPP tem sido utilizado com sucesso em muitas regiões, tais como: Oliveira (2010) avaliou o desempenho de modelo em duas vertentes geomorfológicas distintas, localizadas na região da encosta basálticas do Estado do Rio Grande do Sul, os resultados mostraram que as diferenças entre os valores sedimentológicos simulados pelo modelo e os medidos foram satisfatórias. Singh *et al.* (2011) utilizaram o modelo WEPP, simulando o escoamento e a produção de sedimentos com alta pluviosidade para condições de forte inclinação no leste do Himalaia. O modelo foi usado para desenvolver medidas vegetativas (safra, nível de adubação, plantio direto) para melhorar a sustentabilidade da agricultura na bacia Umroi, representando as condições agroclimáticas típicas da região. Os resultados do estudo indicam que o modelo WEPP pode ser utilizado com sucesso para o desenvolvimento de práticas de gestão de conservação em alta pluviosidade e forte inclinação. Chandramohan *et al.* (2015) verificaram a aplicabilidade de três modelos de erosão do solo em pequenas bacias do rio Pamba de Kerala, Índia, usando dados de eventos de chuva-vazão e de sedimentos observados. Os modelos utilizados foram USG (Unit Sediment Graph), a MUSLE (Modified Universal Soil Loss Equation) e WEPP (Water Erosion Prediction Project), os resultados foram comparados com os valores de sedimentos observados, onde verificaram que o modelo USG teve uma melhor aplicabilidade para os dados climáticos e geográficos da região. Zhang *et al.*, (2009) aplicaram o modelo WEPP a uma pequena bacia hidrográfica em Black Hawk County, Iowa, USA simulando a produção de sedimento. Akbari

et al., (2015) utilizaram o modelo WEPP para simular a produção de sedimentos em uma pequena bacia hidrográfica iraniana. Sparovek *et al.*, (2000) simularam a produção de sedimentos em uma micro bacia hidrográfica no sudeste brasileiro pela comparação de três modelos ¹³⁷ Cs, WEPP e USLE.

3 ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo é a bacia hidrográfica do Igarapé da Prata, localizada no Município de Capitão Poço, na mesorregião nordeste do Estado do Pará. Ela está situada aproximadamente 160 km da capital Belém, delimitada a 9826000 N e 260000 E ao noroeste e 9810000 N e 272000 E ao sudeste. A bacia apresenta 82 km² de área de drenagem, tendo o seu exutório no Rio Guamá. A área estudada foi de 32,7 km² (Figura 3).

Figura 3 – Mapa de Localização da Área de Estudo.



Fonte: Silva (2015)

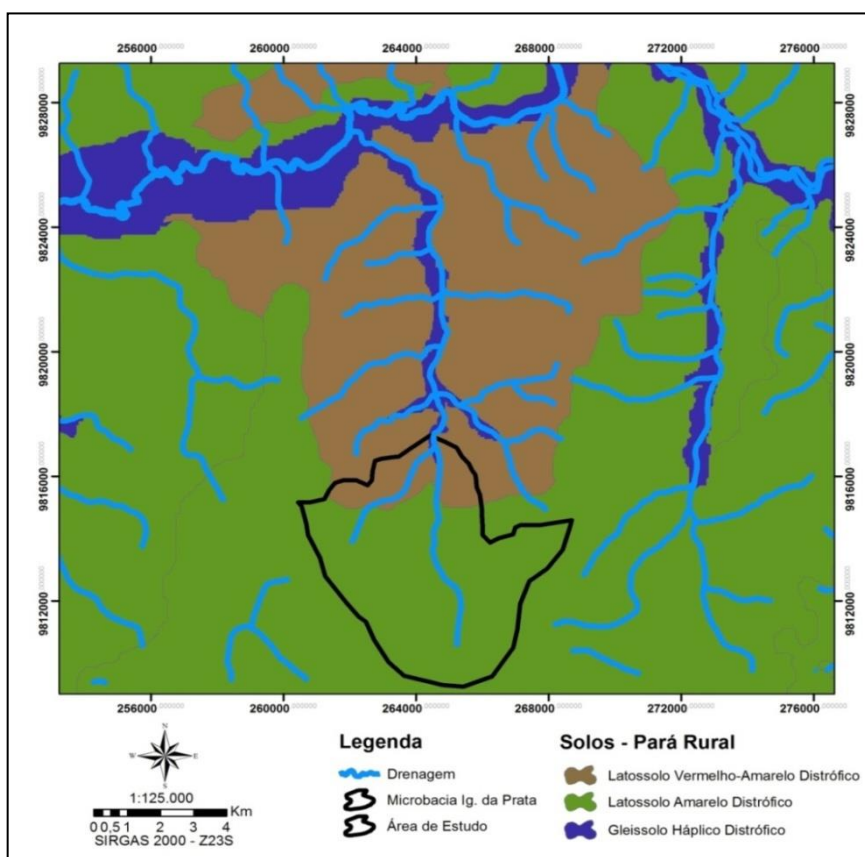
3.1 CLIMA

Segundo a classificação de Köpper a região de estudo possui característica climática quente e úmida, com um clima chuvoso. As temperaturas mínimas, médias e máximas situam-se na faixa de 21,4°C, 26,2°C e 32,7°C, respectivamente. A chuva anual de 2401 mm e a média da velocidade do vento é de 2 m/s. A umidade relativa do ar fica em torno de 85% (PACHECO E BASTOS, 2002).

3.2 SOLO

O tipo de solo, predominante, encontrado na região é o Latossolo Amarelo distrófico (Figura 4). Sendo um tipo de solo profundo, de coloração amarelada, com perfis muito homogêneos, tendo boa drenagem, de condições físicas de retenção de umidade e permeabilidade boa, que favorece a infiltração da água. Possuem baixa fertilidade natural em sua maioria, além de quimicamente pobres apresentam uma grande agregação entre as partículas, contribuindo para um aumento da resistência do solo contra o arraste. É um tipo de solo encontrado em especial nas planícies sedimentares da Amazônia brasileira.

Figura 4 - Mapa de caracterização do solo da bacia



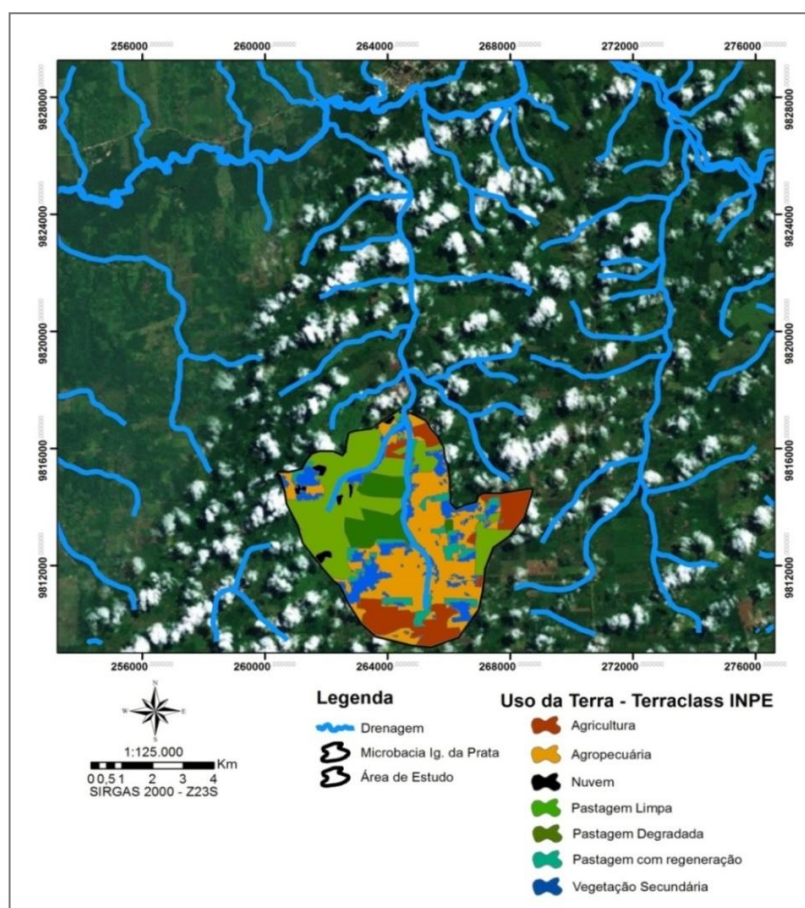
Fonte: Santos (2013)

A região apresenta um sistema tradicional de cultivo da terra. O trecho do estudo apresenta três tipos de solos: os Gleissolos que corresponde a 1% da área, o Latossolo Amarelo com 84% do total e 15% com o Latossolo Vermelho-Amarelo (SANTOS, 2013).

3.3 COBERTURAS VEGETAIS

A cobertura vegetal é formada por paisagem florística, associado a sistemas agrossilvopastoris com predominância de vegetação secundária, como capoeiras latifoliadas, com diferentes estádios de desenvolvimento e muitas vezes, utilizadas após um período de pousio no sistema tradicional de culturas anuais (Figura 5). Podendo, ainda, serem visualizadas no município remanescente de floresta explorada, resultantes alterações da floresta equatorial perenifólia (SILVA *et al.* 1999). Atualmente, existe uma grande área com o cultivo de citrus (laranja), com fins industriais.

Figura 5 - Mapa de cobertura vegetal e manejo do solo.



Fonte: Santos *et al.* (2013)

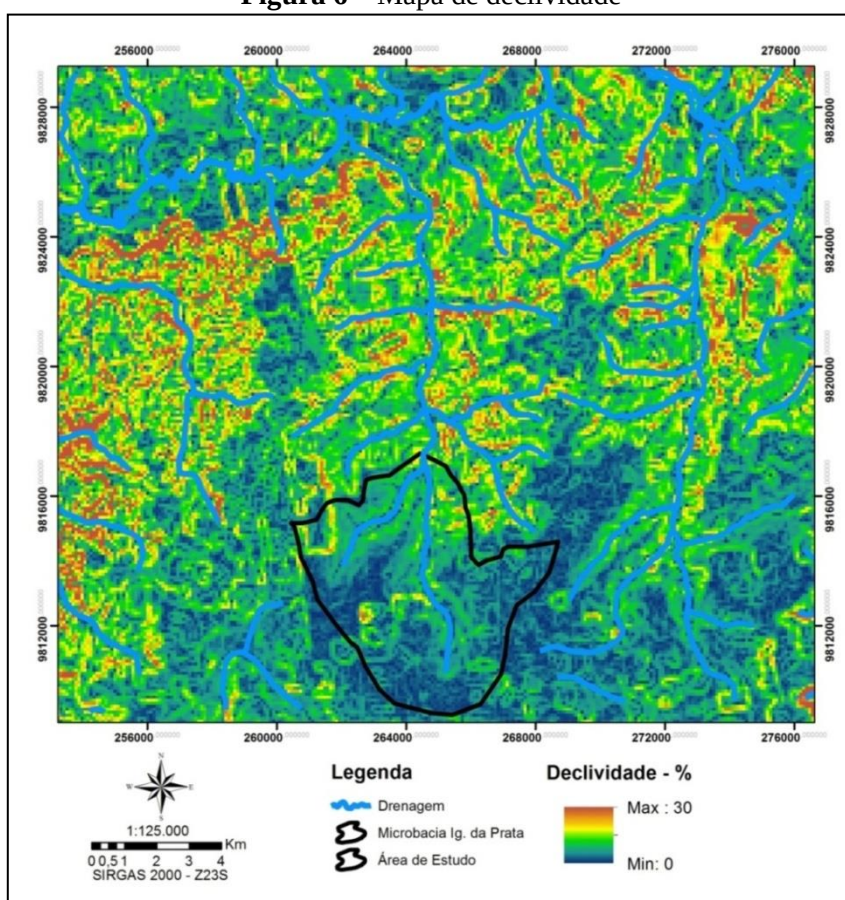
A bacia apresenta diversos usos da terra com predominância para as áreas de pastagem, concentradas na parte noroeste da área, podendo ser observadas três categorias de pastos que se estendem por aproximadamente 1.570 ha, com 43% da área total, sendo: Pastagem com regeneração (7%), Pastagem Degradada (9%), Pastagem Limpa (27%) tendo em destaques a Agropecuária com 1.070 ha (29%), assim, a Vegetação Secundária e

Agriculturas, ambas entorno de 475 ha (13%). A não mapeada representa o sombreamento provocado pela cobertura de nuvens no local, com um total de 2% (SANTOS *et al.*, 2013).

3.4 TOPOGRAFIA

A região apresenta um relevo bem diversificado (Figura 6), com grande dominância de plano e um suave ondulado e ondulado. O relevo apresenta mais dissecado e rebaixado quando fora dos domínios dos platôs que servem de divisores de águas do rio Irituia e Induiá que segue a direção do vale do rio principal-Guamá, que apresentam colinas e patamares mais suavizados (SILVA *et al.*, 1999).

Figura 6 – Mapa de declividade



Fonte: Santos (2013)

A área de estudo foi desenvolvida em uma região que apresenta um trecho superior ao da pequena bacia com cotas de 54 a 102m, e uma declividade inferior com valor médio de 1,7% não ultrapassando 8,5% nas áreas íngremes (SANTOS, 2013).

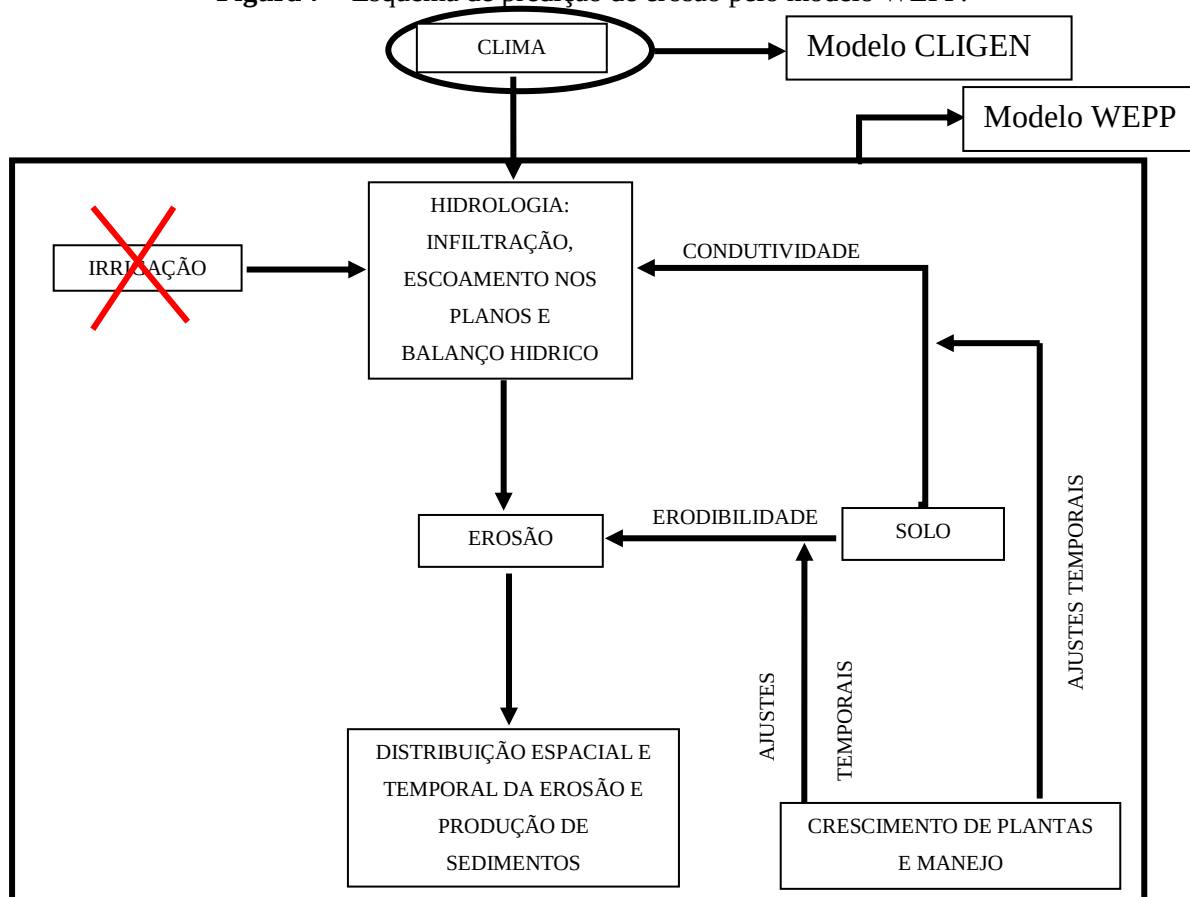
4 METODOLOGIA

O modelo WEPP baseia-se nos princípios físicos do processo erosivo, na simulação para diversas condições edafoclimáticas. Neste capítulo, o modelo será descrito em sua forma analítica, juntamente com as equações utilizada para os cálculos de infiltração da água e erosão do solo, com os dados necessários para as suas utilizações.

4.1 MODELO WEPP

Em 1985, diversas agências americanas, USDA – Natural Resources Conservation Service; Agricultural Research Service; USDA (United States Department of Agriculture) – Forest Service; USDI – Bureau of Land Management, desenvolveram o projeto WEPP (Water Erosion Prediction Project). O WEPP é um pacote de programas computacionais que possui um código fonte escrito em ANSI FORTRAN 77 para a eficiência e portabilidade, especialmente para computadores pessoais, que simula a erosão e a produção de sedimentos (MMA, 2007). Segundo Flanagan *et al.*(1995a) o modelo é dividido em seis componentes: Climático, Crescimento de plantas, solos, hidrológico (com base na equação de Green-Ampt modificado por Mein e Larson para o processo de infiltração com a utilização das equações de ondas cinemáticas), Erosão/deposição, e irrigação (Figura 7).

Figura 7 – Esquema de predição de erosão pelo modelo WEPP.



Na Figura 7 estão ilustradas as etapas importantes na versão atual do programa de computador. Essas etapas são descritas nos parágrafos que se sucedem.

A simulação em encosta é uma substituição direta da USLE, acrescentando a capacidade de estimar a deposição de sedimentos ao longo das encostas. A simulação em bacias hidrográficas possibilita estimar e quantificar a produção de sedimento, além de fornecer estimativas explícitas de quando e, onde está ocorrendo erosão, possibilitando, descrever o processo de erosão e deposição ao longo das encostas. Já a simulação em malha, é aplicável em áreas nas quais os limites não coincidem com os limites da bacia (FLANAGAN *et al.*, 1995a).

O módulo de simulação é utilizado em bacia hidrográfica (***Watershed Version***), para a determinação da quantidade de sedimento que chega ao exutório.

O modelo possui um componente climático, que utiliza um gerador de informações diárias. Tais informações podem ser feita estocasticamente por um submodelo paralelo (CLIGEN) Climate Generation, que foi desenvolvido por NICKS *et al.* (1995). CLIGEN usa estatísticas de dados climáticos históricos observados em estações com o objetivo de gerar uma série temporal de dados. O CLIGEN é um dos mais recentes e evoluídos geradores de clima, foi desenvolvido e testado para grandes regiões dos Estados Unidos, produzindo dados climáticos que podem ser usados em diferentes modelos hidrossedimentológicos como no EPIC (Erosion Productivity Impact Calculator), modelo hidrossedimentológico desenvolvido pelo USDA e CREAMS.

O Balanço Hídrico determina a estimativa da infiltração, do escoamento superficial e da tensão cisalhante do escoamento superficial. Este componente utiliza informações dos componentes de clima, de crescimento de plantas e de infiltrações para estimativa da evapotranspiração potencial e da evaporação da água do solo (SAVABI E WILLIAMS, 1995). A Irrigação é uma operação de gestão opcional, que determina a quantidade mínima de água que será aplicada se um evento de irrigação, sendo simulado. Essa irrigação será desconsiderada por haver ausência de irrigação na região de estudo (Figura 7).

O componente de crescimento de plantas tem como objetivo simular mudanças temporais nas variáveis de plantas que influenciam nos processos de escoamento superficial e erosão, sendo aplicado às condições de terras agrícolas e de pastagens. Será montado um arquivo com base em condições locais e no banco de dados do WEPP, de maneira a representar as práticas de cultivos e de manejos adotadas na bacia de estudo.

Os ajustes temporais são feitos com base nas características da bacia, referentes ao teor de umidade do solo em que a condutividade hidráulica, mostra que a água se movimenta no solo, controla a previsão de infiltração e do escoamento, importante para os usos agrícolas, e, conseqüentemente para a produção das culturas, preservação do solo e do ambiente.

4.2 APLICAÇÃO DO MODELO WEPP

4.2.1 *Modelo de infiltração*

As caracterizações sobre as variáveis que influenciam na infiltração torna-se um processo difícil. Nesse sentido, várias equações foram propostas para estimar a infiltração no solo dentre elas a Green-Ampt (1911), que é uma equação bastante utilizada pela sua simplicidade e por estar fundamentada no processo físico da infiltração (RODRIGUES E PRUSKI, 1997).

O método de Green-Ampt (1911), foi derivado da equação de Darcy, considerando simplificações no processo de propagação da frente de umedecimento no interior do solo. Mein e Larson (1973) modificaram a equação de Green Ampt (1911) e obtiveram um novo modelo com o qual se calcula a lâmina infiltrada antes e depois do empoçamento. O processo de empoçamento dá-se com a formação de uma lâmina d'água (acúmulo de água) sobre a superfície do solo, após a saturação do solo e o escoamento superficial.

A equação de Green-Ampt (1911) utiliza soluções de ondas cinemáticas, que modelam a infiltração para uma chuva intermitente. A Eq. (1) mostra a equação de Green-Ampt.

$$f = K_e \left(1 + \frac{N_s}{F} \right) \quad (1)$$

Em que:

f = é a taxa de infiltração (m/s);

K_e = é a condutividade hidráulica efetiva saturada (m/s);

N_s = é o potencial de capilaridade eficaz (m), e

F = é a profundidade de infiltração acumulada (m).

A condutividade hidráulica efetiva saturada é um parâmetro que é calibrado pela análise de sensibilidade. No estudo, esse processo será realizado via limite de dois valores, um pela Tabela 2 proposto por Rawls *et al.* (1982) e o segundo pela Eq. (2), utilizando o valor

que melhor se ajusta para a saída do modelo, existindo casos onde estes limites foram ultrapassados.

Tabela 2 – Estimativa dos parâmetros classificada pela textura do solo do USDA.

Textura Classe	Condutividade hidráulica saturada Ks (mm/h)	Porosidade e Efetiva / Saturação η_e (cm³/cm³)	Capilaridade e media do solo Ψ(cm)	Conteúdo volumétrico inicial da água θ_i (cm¹/cm¹)	Porosidade Total ϕ (cm³/cm³)
Areia franca	61,1	0,401	6,13	0,105	0,437
Franco Arenoso	25,0	0,412	1,01	0,190	0,437
Franco	13,2	0,434	8,89	0,232	0,453
Franco Siltoso	6,8	0,486	16,68	0,284	0,463
Franco Argiloso	4,3	0,33	21,85	0,224	0,501
Arenoso	2,3	0,39	20,88	0,310	0,398
Franco Argiloso	1,5	0,432	27,3	0,342	0,464
Siltoso	1,2	0,321	23,9	0,321	0,471
Argiloso Arenoso	0,9	0,423	29,22	0,371	0,43
Argiloso Siltoso	0,9	0,385	31,63	0,378	0,479

Fonte: Adaptado Rawls *et al.* (1982).

Segundo Flanagan & Nearing (1995b), a Eq. (2) é utilizada internamente pelo modelo WEPP para solos com menos de 40% de conteúdo de argila. A Eq. (1) da condutividade hidráulica efetiva Green-Ampt representa a metade do valor da condutividade hidráulica saturada, e é usada para estimar a condutividade hidráulica com base na quantidade de chuva, cobertura de superfície e escoamento.

$$K_b = -0,265 + 0,0086 (\% \text{ Areia})^{1,8} + 11,46CEC^{(-0,75)} \quad (2)$$

A Equação 2 é empregada na simulação do modelo caso o usuário do programa não conheça o valor da condutividade hidráulica efetiva da área de estudo, com base nas porcentagens de areia e CEC - Capacidade de troca de cátions. A CEC trata da quantidade de cátions retida nas partículas do solo por unidade de massa de solo sob condições quimicamente neutras, sendo usada nas equações de estimação de parâmetros de

condutividade hidráulica (Tabela 3). Esse dado pode ser obtido a partir de estudos realizados por Martins (1987).

Tabela 3 – Granulometria e textura do solo do Igarapé da Prata.

TEXTURA	FRANCO ARENOSO
Permeabilidade	Moderada e rápida
% Areia grossa	46
% Areia fina	29
% Silte	14
% Argila	11
% Matéria Orgânica	2,18
% CEC	2,10

Fonte: Martins (1987)

Rawls *et al.* (1982) determinaram que a condutividade hidráulica saturada correspondesse à capacidade mínima de infiltração após o prolongado umedecimento.

O potencial de capilaridade eficaz é determinado pela Eq. (3):

$$N_s = (\eta_e - \theta_i)\Psi \quad (3)$$

Em que:

η_e = é a porosidade efetiva (m m^{-1}),

θ_i = é conteúdo volumétrico inicial da água ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$),

Ψ = é o potencial capilar médio (m).

Para a área de estudo, buscou-se valores disponíveis na literatura, que pudessem informar a porosidade efetiva (η_e), conteúdo volumétrico inicial da água (θ_i) e potencial capilar médio (Ψ) para a textura de solo presente no Igarapé da Prata (Tabela 2).

A profundidade de infiltração acumulada (F) é calculada pela Eq. (4), que representa a existência do excesso de água na superfície do solo (condição de empoçamento), tendo os incrementos sucessivos do tempo usando uma interação de Newton-Rapson, estimando a raiz da função.

$$K_e * t = F - N_s \left(1 + \frac{F}{N_s} \right) \quad t > t_p \quad (4)$$

Em que t é o tempo (s) após o início do processo de infiltração e t_p é o tempo para o início do empoçamento da superfície do solo (s).

A infiltração acumulada é calculada pelo modelo de Green Ampt Mein e Larson (GAML), tal como apresentada por Chu (1978) para formação de alagamento, obtendo uma boa relação entre o escoamento calculado e o escoamento observado. O tempo de empoçamento é calculado pela Eq. (5) e é baseado em eventos de precipitação ocorridos na bacia durante o tempo de 30 min (Tabela 4).

$$t_p = t_{n-1} + \frac{\frac{K_e N_s}{1 - K_e} - R(t_{n-1}) + V(t_{n-1})}{i} \quad (5)$$

Em que:

t_p = é o tempo de empoçamento (s),

i = é a intensidade de precipitação (mm/h),

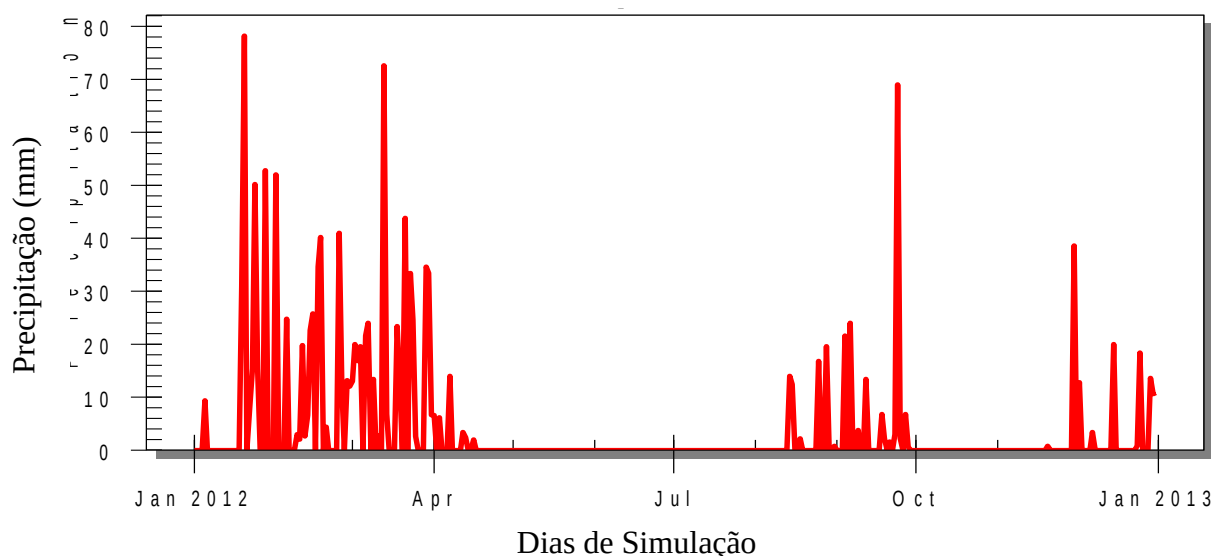
R = é a precipitação acumulada (mm),

V = é o excesso de precipitação acumulado (mm); e

t_{n-1} = é o tempo no início do intervalo considerado (h).

A intensidade de precipitação (i) é determinada pela divisão da lâmina precipitada pelo respectivo tempo de duração da chuva. Os eventos geram uma precipitação acumulada (R) que ocorre pela saturação do terreno, levando ao acúmulo de água na superfície. O excesso de precipitação acumulada (V) ocorre durante o período em que a taxa de precipitação excede a capacidade de infiltração, gerando o escoamento superficial, durante esse processo parte da precipitação é mantida em armazenamento causado pela micro variação topográfica. Para se calcular a lâmina formada pelo acúmulo de água na superfície, faz-se necessário que seja obtida a precipitação que gerou escoamento, tendo-se um banco de dados formado por eventos de chuva da bacia do igarapé da Prata (Figura 8).

Figura 8 – Pluviograma para o ano de 2012 da estação pluviométrica instalada na bacia do igarapé da Prata



4.2.2 Escoamento nos planos

O processo de escoamento superficial consiste em uma função de infiltração que possui uma sequência de cálculos como: infiltração, excesso de chuva, acúmulo de água em depressões e a vazão de pico. O escoamento superficial é determinado pela diferença da taxa de infiltração, a intensidade de precipitação e o volume armazenado. Dessa forma, o modelo utiliza o conceito da onda cinemática em que a equação da quantidade de movimento determina a taxa de pico do escoamento superficial (Eq. 6) (STONE *et al.*, 1995).

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = v \quad (6)$$

Em que:

q = é a descarga por unidade de largura (m^2/s);

h = é o volume de água armazenado por unidade da área (m);

t = é o tempo (s),

x = é a distância ao longo do sentido da declividade (m), e

v = é o excesso de precipitação (m/s).

O fluxo nos planos pode ser representado como um processo unidirecional em direção à calha do rio, e a descarga por unidade de largura pode ser relacionada ao volume armazenado por unidade de área através de coeficientes que estão relacionados à declividade, rugosidade e ao regime de fluxo, conforme a Eq. (7). A distância ao longo do sentido da

declividade (x) é determinado pelo comprimento do plano, a partir da parte superior do plano que a profundidade ocorre. O excesso de precipitação não permite a infiltração após chuva cessada.

$$q = \alpha h^m \quad (7)$$

Os coeficientes α e m são dados por: $\alpha = CS_o^{0.5}$.

α – coeficiente de profundidade de descarga;

m – expoente de profundidade de descarga;

C – Coeficiente de Chezy ($m^{0.5}.s^{-1}$).

Para a determinação do coeficiente de Chezy foi utilizada a Eq. (8), que relaciona a equação de Darcy-Weisbach e a equação de Manning (PRITCHARD, 2011):

$$C = \left[\frac{8g}{f} \right]^{0.5} \approx \frac{1}{n} R h^{2/3} \quad (8)$$

Em que:

n = parâmetro de rugosidade de Manning;

R = raio hidráulico, m.

O coeficiente de Chezy (C) foi calculado com dados de acordo com as características geométricas da bacia, apresentando um coeficiente de $2,72 \text{ m}^{0.5}.s^{-1}$, sendo S_o a declividade, determinada para cada trecho da bacia com a diferença de cotas dividida pelo seu comprimento, e m no modelo é igual a 1,5 (STONE et al., 1995).

O raio hidráulico da seção do escoamento foi determinado pela Eq. (9):

$$V_m = \frac{1}{n} R h^{2/3} I^{1/2} \quad (9)$$

Em que:

V_m = velocidade média, m/s;

R_h = raio hidráulico, m;

n = coeficiente de rugosidade de Manning

I = declividade, m/m.

O raio hidráulico (R_h) foi encontrado pela Eq. (9) com o valor de 0,29, para o coeficiente de rugosidade de manning (n), foi considerado segundo as características morfológicas da bacia, com o valor de n para o canal igual a 0,3 (TUCCI, 2012). Para representar a velocidade em uma seção é considerada a velocidade média de 0,192 m/s, observando que a distribuição da velocidade não é uniforme. Segundo Santos (2013) a declividade média (I) da bacia é de 1,17%.

Substituindo a Eq. (7) em (6), tem-se a Eq. (10), que descreve o escoamento superficial no modelo:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \alpha m h^{m-1} \frac{\partial h}{\partial x} = v \quad (10)$$

Com as seguintes condições iniciais e de fronteira (Eq. 11).

$$h(x, 0) = h(0, t) = 0 \quad (11)$$

O escoamento superficial nos planos é descrito pelas equações de Saint-venant simplificadas através das equações de ondas cinemáticas, que não preservam todas as suas propriedades, como as utilizadas em modelos difusos, considerando os efeitos de jusante sobre o escoamento proveniente a montante, como nos modelos hidrodinâmicos, onde se consideram as equações de saint-venant em sua forma geral, que inclui os termos que representam a gravidade, o atrito, a pressão e a inércia do fluxo (Woolhiser et al., 1990). As equações de onda cinemática são resolvidas no modelo usando um esquema implícito de diferenças finitas definidas em quatro pontos, em relação ao tempo e espaço.

4.2.3 Componentes de erosão do solo

Para o processo erosivo são consideradas mudanças temporais que ocorrem nas propriedades do solo (rugosidade, densidade do solo, condutividade hidráulica, tensão crítica de cisalhamento e fatores de erodibilidade do solo entressulcos e em sulcos) ocasionadas pelas praticas de manejo do solo, consolidação e precipitação (LAFLEN *et al.*, 1991).

No componente de erosão do solo do modelo WEPP, ocorre à quantificação dos processos de desprendimento, transporte e deposição de partículas. Essa quantificação é determinada pela utilização da equação da continuidade (Eq. 12), com o objetivo de descrever

o movimento das partículas em uma vertente, de modo a considerar o regime permanente (FLANAGAN *et al.*, 1995a).

$$\frac{dG}{dx} = D_i + D_r \quad (12)$$

Em que:

G = carga de sedimentos, $\text{kg m}^{-1}\text{s}^{-1}$;

x = distância percorrida pelo escoamento superficial, m;

D_i = taxa de erosão de sedimentos nas áreas planas (entre sulcos), $\text{kg m}^{-2}\text{s}^{-1}$; e

D_r = taxa de liberação de sedimentos nos sulcos ou canais, $\text{kg m}^{-2}\text{s}^{-1}$.

O sedimento advindo da erosão entressulco (áreas planas) (D_i) é considerado independente de x e é sempre positivo. No sedimento advindo da erosão em sulcos (D_r), pode ser positivo se houver desprendimento e negativa se houver deposição.

A taxa de liberação de sedimentos entressulcos (D_i) é calculada pela Eq. (13) proposta por Flanagan e Nearing (1995b).

$$D_i = C_i K_i S_f I_p^2 G_e \quad (13)$$

Em que:

C_i = O efeito da cobertura vegetal na erosão dos canais, adimensional;

K_i = Erodibilidade do solo nos planos, kg s m^{-4} ;

S_f = fator de ajuste relativo à declividade, adimensional;

I_p = intensidade de precipitação, m s^{-1} ;

G_e = O efeito da cobertura do solo para erosão.

Os efeitos da cobertura são atribuídos de acordo com as classes representativas do uso e cobertura do solo, as quais influenciarão na erosão. Para a área de estudo, essas informações são encontradas na Figura 5, sendo representadas pela combinação de subfatores (Eq. 14) (MARTINS FILHO *et al.*, 2009).

$$C_i = C_{II} + C_{III} + C_{III} \quad (14)$$

Em que:

C_{iI} = subfator relativo à cobertura vegetal oferecida pelo dossel ou copa da planta;

C_{iII} = subfator relativo à cobertura por resíduos vegetais em contato direto com a superfície do solo e

C_{iIII} = subfator que expressa o efeito da incorporação de resíduos vegetais ao solo em função do seu uso e manejo.

O subfator C_{iI} decorre da interceptação das gotas da água da chuva propiciada pelo dossel ou parte aérea das culturas. Para isso, C_{iI} é estimado segundo o ambiente de estudo, onde é determinado pela Vegetação secundária. Para o subfator C_{iIII} é estimado pelos resíduos produzidos pela seguinte cultura: Agricultura anual. As demais classes são desconsideradas por não produzirem resíduos vegetais que possa reduzir o processo erosivo entressulcos.

Segundo Foster (1982) é possível estimar o subfator relativo à cobertura por resíduos vegetais em contato direto com a superfície do solo (C_{iII}), para esse subfator Laflen *et al.* (1985) propôs a Eq. (15).

$$C_{iII} = e^{-2,5 CS/100} \quad (15)$$

Em que:

e = Base do logaritmo natural, e

CS = é a porcentagem da superfície entressulcos coberta por resíduos.

A erosão entressulcos ocorre nas áreas localizadas entre os pequenos canais, conhecidos como sulcos, e podem ser entendidos como a remoção de uma camada fina pelo impacto das gotas de chuva, sendo o fator responsável pela desagregação das partículas da massa de solo, desprendendo grandes quantidades decorrentes da energia cinética das gotas e são transportadas por um fluxo laminar raso, ocorrendo nas áreas entre os pequenos canais (CASSOL E LIMA, 2003).

Para a avaliação da cobertura vegetal, sobre as perdas por erosão, foram utilizadas as seguintes culturas: agricultura anual, três categorias de pastos e a vegetação secundária (Tabela 4).

Tabela 4 – Classes de uso do solo

Classe de uso	Fator de cobertura vegetal e do solo (%)	Autor
Agricultura anual	13	Santos <i>et al.</i> , 2013.
Agropecuária	29	
Nuvem	2	
Pasto limpo	27	
Pasto degradado	9	
Pasto com regeneração	7	
Vegetação secundária	13	

Fonte: Adaptado de Santos *et al.*, 2015.

O parâmetro K_i pode ser determinado pela Eq. (16), que faz parte da rotina interna utilizado no modelo WEPP, considerando a superfície do solo cultivada contendo 30% de areia ou mais (Flanagan & Nearing, 1995b), fazendo-se necessário a obtenção de dados de granulometria (Tabela 3).

$$K_i = 2728000 + 192100x\text{Areia Fina} \quad (16)$$

Este parâmetro tem uma grande influência sobre a erodibilidade, sendo realizada a calibração, ajustando o seu valor até que a produção de sedimentos simulada seja igual ou próxima ao valor observado.

O fator que considera o efeito de cobertura do solo (G_e) é um fator de resíduos vegetais ou outros materiais nele aplicados, atuando como barreira física na superfície, reduzindo o impacto das gotas de chuvas, e é determinado segundo o ambiente da área de estudo (Figura 4). O fator do efeito da cobertura do solo para a área de estudo, por apresentar um ambiente misto, será considerado a cobertura vegetal de Agricultura anual, pastos e vegetação secundária, que apresenta um fator G_e de 0,69, desconsiderando os demais fatores por não reproduzir resíduos vegetais.

A taxa de liberação de sedimentos nos sulcos ou canais (D_r) é calculada nos casos onde a tensão de cisalhamento do escoamento que excede a tensão cisalhante crítica do solo e

quando a carga de sedimento for menor que a capacidade de transporte de escoamento. O valor de D_r é obtido utilizando a Eq. (17) apresentada por FLANAGAN *et al.* (1995a):

$$D_r = K_r(\tau - \tau_c) \left[1 - \frac{G}{T_c} \right] \quad (17)$$

Em que:

K_r = Erodibilidade do solo nos canais ($s \, m^{-1}$);

τ = Tensão de cisalhamento do escoamento superficial atuando sobre as partículas do solo (Pa);

τ_c = Tensão de cisalhamento necessária para a ocorrência da liberação de partículas (Pa);

G = carga de sedimento no escoamento ($kg \, m^{-1} \, s^{-1}$);

T_c = capacidade de transporte de sedimento pelo escoamento ($kg \, m^{-1} \, s^{-1}$).

Para a estimativa do parâmetro K_r e τ_c , foram utilizadas as Eqs. (18 e 19). Segundo Flanagan & Nearing, (1995b) essas equações são determinadas para uma seção do solo que contenha 30% de areia ou mais, sendo equações de rotina interna do modelo (Tabela 3).

$$K_r = 0,00197 + 0,00030 \, Vfs + 0,03863 \, e^{-1,84 \, Mat.Org.} \quad (18)$$

$$\tau_c = 2,67 + 0,065xArgila - 0,058xVfs \quad (19)$$

A tensão de cisalhamento do escoamento superficial atuando sobre as partículas do solo é expressa pela Eq. (20).

$$\tau = \gamma R_h S \quad (20)$$

Em que:

γ = é o peso específico da água (Nm^{-3});

R_h = raio hidráulico do escoamento em sulco (m);

S = declividade do sulco (mm^{-1}).

A tensão de cisalhamento necessária para a ocorrência da liberação de partículas é um parâmetro que é determinado pelo processo de calibração.

O termo $1-G/T_c$, da Eq. (17), representa um balanço da desagregação, deposição no decorrer de um evento, o qual demonstra que a taxa de erosão em sulcos é uma função da carga de sedimento em relação à capacidade de transporte do fluxo. Portanto, conforme a Eq. (17), a desagregação em sulcos ocorre apenas quando $\tau > \tau_c$ e se $G < T_c$, pois, nesse caso, D_r

é positivo ($G/T_c < 1$). Já a deposição de sedimentos ocorre quando $G > T_c$. Desse modo, D_r é negativo ($G/T_c > 1$), o qual é quantificado utilizando a Eq. (21) (FOSTER *et al.*, 1995).

$$D_r = \frac{\beta V_f}{q} (T_c - G) \quad (21)$$

Em que:

D_r = taxa de liberação de sedimentos nos sulcos ou canais, $\text{kg m}^{-2}\text{s}^{-1}$;

β = é um coeficiente de turbulência induzida por gotas de chuvas;

V_f = é a velocidade eficaz para a queda do sedimento (ms^{-1});

q = é o fluxo de descarga por unidade de largura ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$).

Para situações de gotas de chuva que afetam os fluxos de sulcos, β recebe o valor de 0,5 no modelo WEPP, enquanto que para outros casos, como a neve derretida ou irrigação do sulco, β vale 1,0 (FOSTER *et al.*, 1995).

Segundo Sadat-Helbar *et al.*, (2009) a velocidade de queda da partícula depende da densidade e viscosidade do fluido; da densidade, tamanho, forma e textura da partícula. A velocidade de queda da partícula é baseada em resultados desenvolvidos por Stokes (1851), que pesquisou o coeficiente de arraste causado pelo fluxo do fluido sobre uma partícula. A velocidade de queda de partículas pode ser calculada utilizando a Eq. (22).

$$V_f = \frac{1}{18} \frac{g(s-1)d^2}{\nu} \quad (22)$$

Em que:

V_f = Velocidade de queda do sedimento (ms^{-1});

g = Aceleração da gravidade (m/s^2);

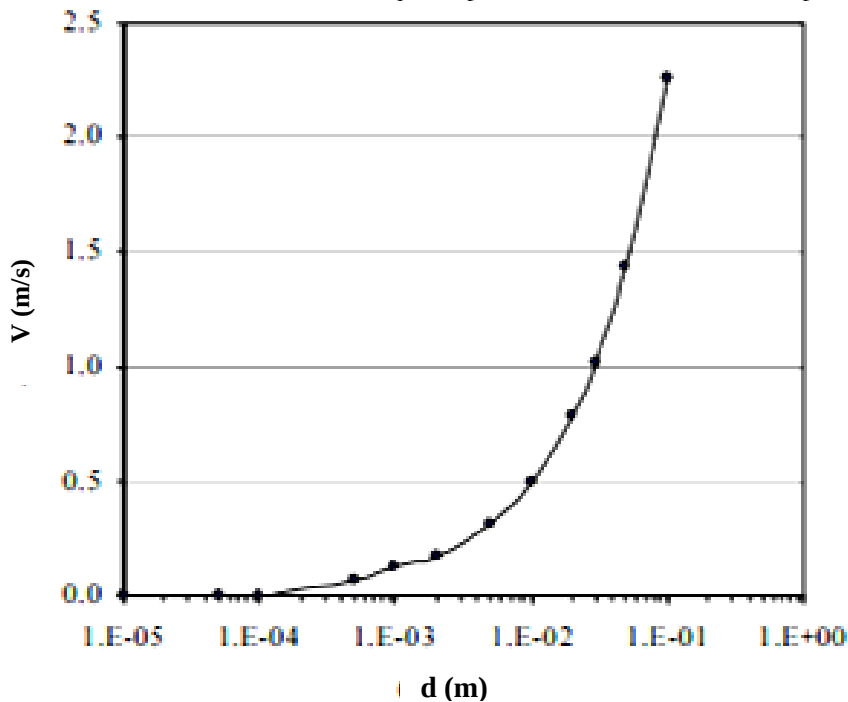
d = Diâmetro da partícula (m);

ν = Viscosidade cinemática (m^2/s);

S = Densidade relativa (-).

Para este processo, a Figura 9 pode, também, ser utilizada para fornecer uma estimativa final de velocidade de queda para cada tamanho de partícula.

Figura 9 – Média das velocidades de queda para diferentes tamanhos de partículas



Fonte : Adaptado de Sadat-Helbar *et al.*, 2009

A capacidade de transporte de sedimentos (T_c), bem como a carga de sedimentos (G), é calculada em uma unidade de largura de base do plano. A carga de sedimento é convertida para uma base de largura do campo, quando os cálculos estão concluídos. A capacidade de transporte é uma função da tensão de cisalhamento de fluxo é calculada utilizando a Eq. (23) de transporte simplificado (FOSTER *et al.*, 1995).

$$T_c = K_t \tau^{3/2} \quad (23)$$

Em que:

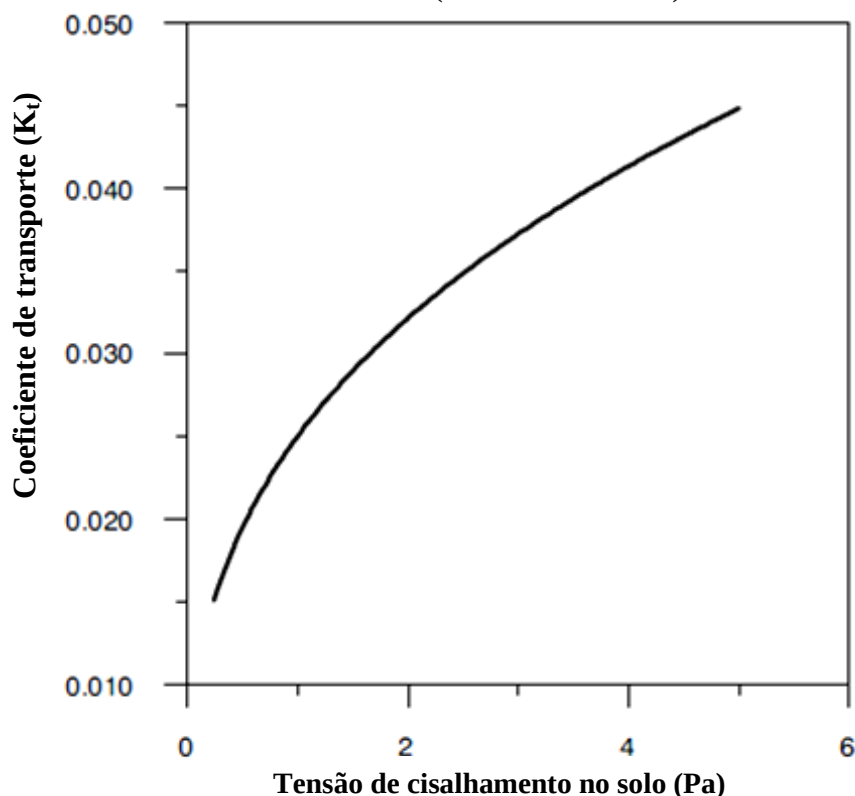
T_c = é a capacidade de transporte;

K_t = é um coeficiente de transporte ($m^{0.5}.s^2.kg^{-0.5}$);

τ = é a tensão de cisalhamento do solo (Pa).

Para determinar o coeficiente de transporte (K_t) Zhang *et. al.*, (2008) tomaram como base estudos realizados por Finkner *et. al.*, (1989), em que K_t foi determinado graficamente a partir da Figura 10. Nessa figura é mostrada a relação entre K_t e a tensão de cisalhamento utilizado na equação da capacidade de transporte do modelo WEPP para o processo de calibração.

Figura 10 – Valores do coeficiente de transporte (K_t) determinado para vários níveis de tensão de cisalhamento do solo (Finkner et al., 1989).



Fonte: Adaptado de Zhang *et al.*, 2008

A equação de Yalin para sedimentos de granulometria não uniforme foi descrita por Foster (1982). Essas equações foram modificadas em dois meios, com o objetivo de melhorar a representação entre as diferenças na capacidade de transporte com as características do tamanho da partícula do solo. Estas modificações são baseadas em testes extensivos do modelo WEPP para um alcance grande de tipos diferentes de solo e dados medidos de erosão de campo.

Pela aplicação da equação de Yalin como descrito por Foster (1982), a capacidade de transporte de sedimento para cada uma das classes de tamanho de partícula do solo é somada para obter a capacidade total de transporte de sedimento. Usando este método existe apenas diferença pequena nas características calculadas de sedimento, que foram limitadas na densidade e para diâmetro dos agregados. Em outras palavras, dois solos com distribuições de tamanho de sedimento muito diferentes, mas com, essencialmente, o mesmo tamanho e densidade de agregados, teria pouca diferença na capacidade total de transporte de sedimentos. A modificação incluída no WEPP utiliza uma média ponderada da capacidade de transporte de sedimentos para cada classe de tamanho de partícula, onde a função de

ponderação é a fração de massa de sedimentos dentro de cada classe, referente a isso os parâmetros de erodibilidade entressulcos (K_i) e a erodibilidade do solo nos sulcos (K_r) serão ajustados para que a sua variação quantifique a produção de sedimentos na saída do modelo.

4.3 PARAMETRIZAÇÕES DO MODELO

A parametrização do modelo está baseada na hidrologia e na erosão. As determinações dos parâmetros serão baseadas de acordo com as características da bacia, textura do solo (Latossolo Amarelo) e cobertura vegetal.

A fim de avaliar a capacidade preditiva do WEPP, a seguir serão apresentados os parâmetros utilizados para modelar o escoamento superficial e erosão do solo utilizada na bacia do Igarapé da Prata.

- a) **Comprimento (Length)** – É dado pelo comprimento do plano (metros ou pés);
- b) **Largura (Width)** – É definida pela largura do plano (metros ou pés);
- c) **Declividade (Slope)** – Define a declividade do plano;
- d) **Cobertura Vegetal (Canopy Cover)** – É definido pela fração da superfície ocupada por cobertura vegetal, utilizada no cálculo da interceptação;
- e) **Interceptação** – É a retenção de água acima da superfície pela vegetação ou outro tipo de obstáculo. Esse processo dependente das características das precipitações, das condições climáticas, da densidade da vegetação, da estrutura e arquitetura do dossel e do comportamento fisiológico das plantas durante o ano (TUCCI, 2012).
- f) **Saturação Inicial (S_i)** – Indica o teor de água contida no solo, definida como a razão entre sua umidade inicial (θ_v) e sua porosidade (ϕ), sendo determinada na medida em que for simulado para cada vertente (Tabela 2).
- g) **Condutividade Hidráulica Saturada Efetiva (K_e)** – É o parâmetro chave para a determinação da taxa de infiltração do modelo wepp, sendo utilizado na determinação da equação de Green-Ampt (K_e).
- h) **Distribuição (λ)** - É o índice de distribuição do tamanho dos poros para determinar a redistribuição da água no solo durante estiagens. Estes parâmetros variam de acordo com o tipo de solo, e foram determinados a partir dos estudos de Rawls *et al.* (1982) (Tabela 5).

Tabela 5 – Distribuição do Tamanho dos Poros

Textura Classe	Distribuição do Tamanho dos poros λ (cm/cm)
Arenoso	0,694
Areia franca	0,553
Franco Arenoso	0,378
Franco	0,252
Franco Siltoso	0,234
Franco Argiloso Arenoso	0,319
Franco Argiloso	0,242
Franco Argiloso Siltoso	0,177
Argiloso Arenoso	0,223
Argiloso Siltoso	0,150
Argila	0,165

Fonte: Adaptado de Rawls, *et al.* (1982)

- i) **Porosidade (η_e) e Capilaridade do Solo (Ψ)** – Rawls *et al.* (1982) propuseram valores para a determinação da porosidade e capilaridade baseados nas variações de acordo com o tipo de solo, sendo determinado a partir da Tabela 2, conforme a textura do solo da bacia de estudo.
- j) **Erodibilidade Entressulcos (K_i)** – É um parâmetro que determina a erodibilidade por impacto das gotas de chuva.
- k) **Erodibilidade do solo nos sulcos (K_r)** – É um parâmetro que reflete a suscetibilidade do solo ao cisalhamento pelo fluxo de água em sulcos.
- l) **Manning**: coeficiente de rugosidade de Manning de 0,30 (TUCCI, 2012).
- m) **Chezy**: coeficiente de Chezy
- n) **Densidade relativa dos sedimentos** – Representa a massa por unidade de volume de solo e é um parâmetro que corresponde à densidade relativa do grão de quartzo, e comumente representada nos solos por 2,65 g/cm³ (MARTINS, 1987). É um Parâmetro de entrada do programa para determinação da capacidade de transporte de sedimento.
- o) **Radiação Solar** – É toda radiação eletromagnética que incide na terra proveniente do sol, sendo determinado através dos dados disponíveis no Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), esse parâmetro é utilizado como dado de entrada no programa CLIGEN.
- p) **Albedo** – É a capacidade que cada superfície possui de refletir radiação solar, cujos valores variam com as características de cada superfície. Como a área de estudo apresenta um ambiente misto foi utilizado uma média do albedo da floresta e de pastagem da região

amazônica, onde a média anual da região de floresta é igual a 13%; e da região de pastagem é de 18% com média de 15,5% (QUERINO, 2006).

4.4 DADOS DE ENTRADA

Para a realização da simulação, o modelo necessita dos seguintes dados:

- Parâmetros climáticos e de composição do solo, os quais, no presente estudo, foram considerados característicos de toda a bacia; e
- Parâmetros morfológicos da bacia e físicos do solo: topografia, vegetação, uso e ocupação do solo, saturação inicial, erodibilidade, tensão crítica de cisalhamento e condutividade hidráulica, os quais foram considerados para cada plano, resultante da discretização da bacia.

4.4.1 *Parâmetros Climáticos do modelo*

Para a simulação da infiltração foi necessário à montagem do arquivo climático de entrada, esse arquivo é gerado com a execução do programa CLIGEN, que gera os dados climáticos no formato aceito pelo modelo WEPP. Nesse caso, foi usada uma série de chuvas que ocorreram em 2012, as quais estão apresentas no gráfico da Figura 8.

Os dados, necessários para a entrada no gerador climático, são obtidos com base nas observações da localização da estação como a latitude, longitude, elevação, média da radiação solar, média das temperaturas máxima e mínima mensal, média mensal da intensidade de precipitação máxima em 30 minutos, média mensal do ponto de orvalho, probabilidade de ocorrências de dia com chuva, seguido de dia com chuva e de dia com chuva, seguido de dia sem chuva. Partes desses dados podem ser obtidas em literatura ou em bancos de dados de Instituições de Ensino ou Pesquisa, como por exemplo, a intensidade de precipitação, os valores diários de temperatura mínima e máxima do ar, a radiação solar, temperatura do ponto de orvalho, velocidade e direção do vento que se encontram disponíveis no INMET (Instituto Nacional de Meteorologia) e outras podem ser obtidos em levantamento de campo, como dados da declividade e do solo.

Figura 11 – Representação computacional do gerador de dados climáticos CLIGEN.

View/Edit a CLIGEN Parameter File

Verify Parameter File

Name: Data File:

Latitude: Longitude: Elevation(m): Max 30 minute rate(mm): Max 6 hour rate(mm):

	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
Average Monthly Precip(mm)	17.00	22.01	48.63	79.83	105.81	122.62	113.97	98.19	85.27	57.32	44.99	29.60
Number of Wet Days	3.52	3.33	5.47	7.86	9.69	8.62	8.16	7.29	7.14	5.79	5.06	4.48
Average Monthly Max Temp(C)	26.69	26.13	31.60	32.20	32.50	32.40	32.30	32.80	33.30	33.90	34.10	33.70
Average Monthly Min Temp(C)	25.37	25.00	22.40	22.50	22.10	21.40	20.70	20.70	20.60	20.50	20.90	21.40
Average Precip on Wet Days(mm)	4.83	6.60	8.89	10.16	10.92	14.22	13.97	13.46	11.94	9.91	8.89	6.60
Probability of wet day following wet day	0.22	0.26	0.30	0.38	0.45	0.38	0.30	0.35	0.36	0.39	0.31	0.29
Probability of wet day following dry day	0.10	0.10	0.15	0.22	0.25	0.25	0.25	0.20	0.20	0.14	0.14	0.12
Solar Radiation (Langley/Day)*	0.80	0.70	0.80	1.50	1.40	1.40	1.40	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50
Maximum 30 minute Rainfall (mm)*	3.05	5.33	8.38	24.13	29.46	39.37	34.04	42.67	17.53	11.94	8.89	5.33

Monthly Averages PAR File

☐ English Units Refresh Predicted Values Undo All Changes Predicted Yearly Precip(mm)

Change values to match local conditions. Time to Peak Intensity values represent a cumulative distribution of Tp values based on 15 minute rainfall data. See cligen parameter documentation for more information.

The average monthly precipitation and number of wet days are calculated from the probabilities for a wet day following a wet day and for a wet day following a dry day. To adjust approximate average monthly precipitation change the probabilities fields and click the Refresh button.

OK Cancel Aplicar Ajuda

As informações obtidas foram introduzidas na tela de simulação do submodelo CLIGEN (Figura 11) e gravadas em um arquivo de clima. Posteriormente, foram utilizadas no modelo WEPP. Os dados referentes à Estação pluviométrica do Igarapé da Prata (Figura 12) foram inseridos dentro de uma estação já existente no modelo, esse procedimento faz-se necessário por não haver a estação climatológica da região em estudo.

Figura 12 – Pluviômetro da estação pluviométrica do Igarapé da Prata



Fonte: Gomide (2012)

A precipitação da estação foi registrada em um pluviômetro do tipo SL 2000-P da Solar instrumentação instalado na área. Este aparelho possui um sensor de precipitação que possibilita determinar o intervalo de medição, possuindo uma resolução de 0,2 mm e intensidade máxima de 3 mm/min. Para a determinação de medidas de precipitação de 30 minutos, tem-se acoplado ao pluviômetro um data logger, que tem por objetivo executar a aquisição de dados de precipitação e da concentração de sedimentos.

As informações iniciais de entrada do programa CLIGEN são referentes a dados diários de precipitação total, temperaturas máxima e mínima (Figura 13), longitude, latitude e elevação. Esses dados são a fonte para a elaboração do arquivo de extensão **(.par)** de entrada do programa. Na elaboração desse arquivo, foram seguidas as recomendações de Flanagan e Nearing (1995b). O arquivo gerado pelo programa CLIGEN, de extensão **(.cli)**, é o arquivo de entrada para o modelo WEPP.

Figura 13– Dados de entrada do modelo CLIGEN



IGARAPÉ DA PRATA - Bloco de notas

Arquivo	Editar	Formatar	Exibir	Ajuda	
MONTH	DAY	YEAR	PRCP	TMAX	TMIN
1	1	2012	0.00	26.90	25.64
1	2	2012	0.00	27.35	25.97
1	3	2012	0.00	25.61	24.15
1	4	2012	0.00	25.78	24.48
1	5	2012	9.40	24.80	23.89
1	6	2012	0.00	26.25	24.78
1	7	2012	0.00	26.25	24.65
1	8	2012	0.00	27.20	25.95
1	9	2012	0.00	26.89	25.25
1	10	2012	0.00	26.99	25.51
1	11	2012	0.00	26.93	25.39
1	12	2012	0.00	27.38	26.25
1	13	2012	0.00	27.26	25.80
1	14	2012	0.00	27.18	25.93
1	15	2012	0.00	27.73	26.48
1	16	2012	0.00	26.96	25.64
1	17	2012	0.00	27.84	26.61
1	18	2012	0.00	27.19	25.83
1	19	2012	30.82	26.82	25.24
1	20	2012	78.24	26.23	24.73
1	21	2012	0.00	26.93	25.51
1	22	2012	8.00	27.23	25.83
1	23	2012	17.81	26.01	25.03

Fonte: Autora, 2017

4.4.2 Componente de Solo

Os parâmetros físicos e químicos do solo foram determinados pelas Equações 2, 16 e 18 sugeridas no resumo do manual do usuário do modelo. Esses parâmetros foram definidos para uma camada bem distribuída da bacia, sendo os seguintes: Albedo, condutividade

hidráulica efetiva, erodibilidade nos planos, erodibilidade nos canais e tensão crítica de cisalhamento. Todos os parâmetros calculados foram calibrados antes da simulação do modelo para quantificar a produção de sedimento, conforme a característica do solo, declividade, uso e ocupação do solo.

Os dados obtidos da Tabela 3 são utilizados no arquivo de solo do modelo, o qual possui um editor de solo (Figura 14), no qual, inicialmente, são introduzidos todos os parâmetros relativos ao solo do projeto a ser executado, e como tais informações são organizadas no arquivo para que se realize a calibração no modelo WEPP, tais como: a saturação inicial S_i (%), os parâmetros de erodibilidade do solo nos planos K_i ($\text{kg}\cdot\text{s}/\text{m}^4$), erodibilidade do solo nos canais K_r (s/m), tensão crítica de cisalhamento do solo τ_c (Pa) e condutividade hidráulica efetiva K_s (mm/h), albedo. Além desses dados, é necessário definir a textura do solo. Martins (1987) determinou a granulométrica do latossolo amarelo da bacia, para um solo tipo franco arenoso (Tabela 3).

Figura 14 – Componente do editor de solo do modelo.

Soil Database Editor: Igarapé da Prata.sol

Soil File Name: Igarapé da Prata Soil Texture: Franco Arenoso Albedo: 0.15 Initial Sat. Level: (%) 70

Interrill Erodibility: 6.04794e+006 ($\text{Kg}\cdot\text{s}/\text{m}^4$) ☐ Have Model Calculate

Rill Erodibility: 0.019 (s/m) ☐ Have Model Calculate

Critical Shear: 3.5 (Pa) ☐ Have Model Calculate

Eff. Hydr. Conductivity: 6.3 (mm/h) ☐ Have Model Calculate

Layer	Depth(mm)	Sand(%)	Clay(%)	Organic(%)	CEC(meq/10)	Rock(%)
1	17	20.0	11.0	2.180	2.1	0.0
2						
3						
4						
5						
6						
7						
8						
9						

☐ Use Restricting Layer User Defined

Anisotropy Ratio 25 Ksat (mm/h) 0

☐ English Units

Print Save As Save Cancel Help

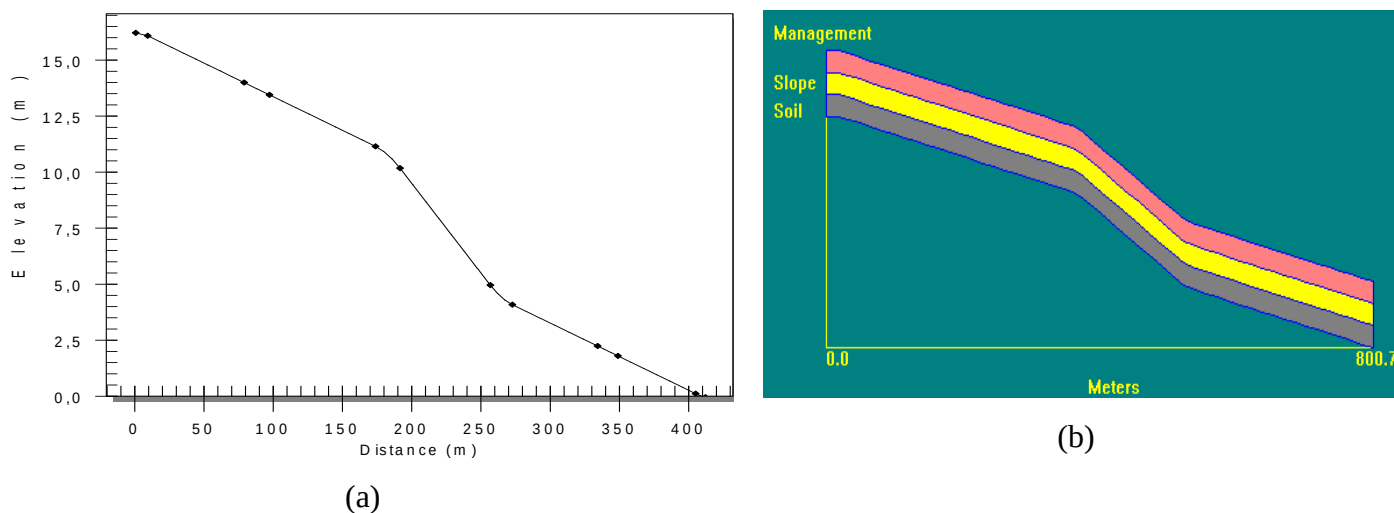
4.4.3 Parâmetros topográficos das vertentes

Para a criação dos perfis representativos para cada vertente, foi necessário obter em diversos pontos, o comprimento e as altitudes ao longo de cada vertente. Na Figura 15b é

apresentado o perfil da vertente utilizada na simulação, sendo a primeira camada, a cobertura vegetal; a segunda camada, a declividade do solo; e a terceira camada, o tipo de solo. Os pontos utilizados na Figura 15a foram criados com base no MDE juntamente com ARCMAP, identificando a orientação e direção da encosta, com isso obteve-se o perfil representativo da vertente para a simulação (Figura 15b).

Os dados topográficos necessários para a representação das vertentes foram utilizados como base na geração do mapa de declividade do terreno, reclassificado em seis intervalos distintos sugeridos pela Embrapa (1979) que são relevo plano (0 a 3%), relevo suavemente ondulado (3 a 8%), relevo ondulado (8 a 20%), relevo fortemente ondulado (20 a 45%), relevo montanhoso (45 a 75%) e relevo fortemente montanhoso (acima de 75%). Seguindo o procedimento apresentado, obteve-se para a área de estudo um relevo compreendido entre 3% e 8%, ou seja, um relevo suavemente ondulado.

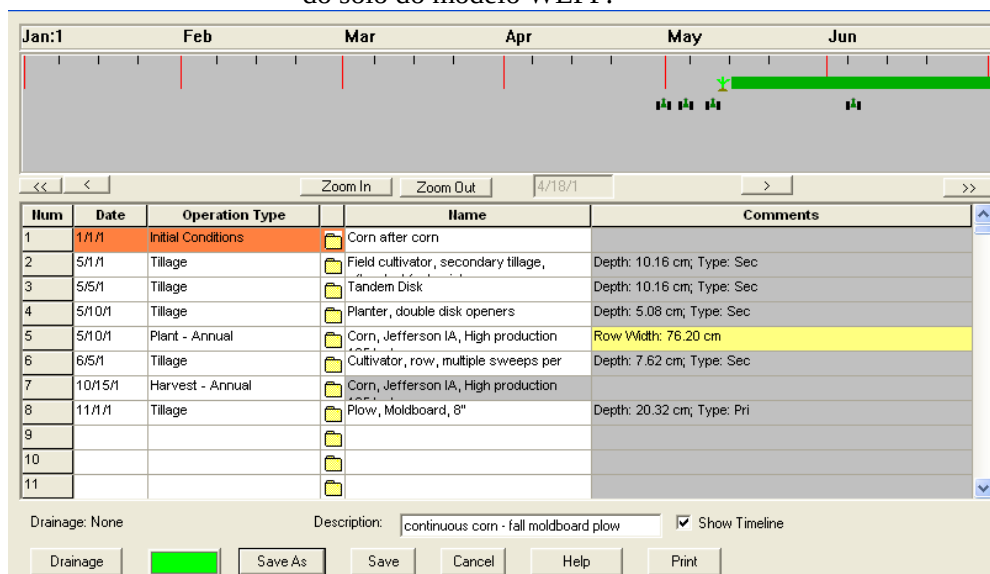
Figura 15 - Perfil representativo da vertente utilizada na simulação



4.4.4 Parâmetros de uso e manejo do solo

A aplicação do WEPP é gerada pela elaboração dos arquivos de manejo e uso do solo, os quais são baseados em registros de dados locais. Este arquivo simula mudanças temporais nas variáveis das plantas que podem influenciar os processos erosivos. Os arquivos de uso e manejo do solo (crescimento de plantas – plantas anuais ou perenes, condições iniciais, decomposição de resíduos e práticas de manejo do solo) são gerados com base em dados locais e em dados disponíveis no WEPP. A Figura 16 representa o tipo de arquivo requerido pelo modelo.

Figura 16 – Representação do programa computacional para o componente de uso e manejo do solo do modelo WEPP.



A base de dados de cultivo e de manejo do solo foi selecionada de maneira a melhor representar as práticas adotadas na bacia, esses dados são inseridos com base em informações locais disponíveis. Para os arquivos de planta/gestões (Anexo 1), foram utilizadas alguns arquivos existentes (para floresta, pastagem, agricultura e agropecuária). Para as áreas florestais, o arquivo de entrada foi construído com base em dados do banco de dados original para a execução do WEPP em condições florestais (Elliot e Hall, 1997).

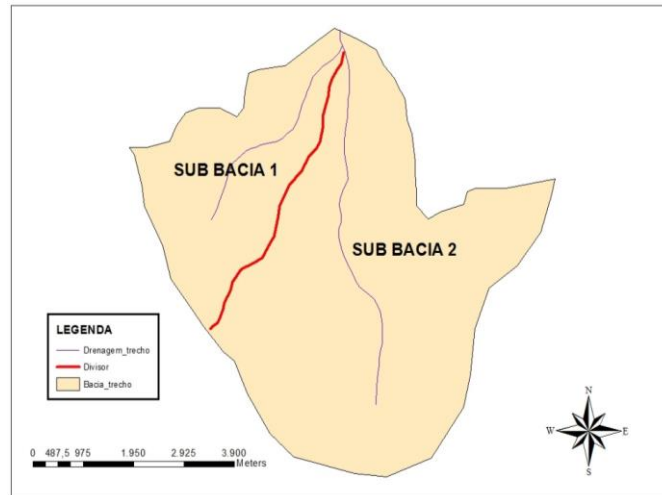
4.4.5 Discretização da Pequena bacia

A fim de avaliar a capacidade do WEPP, fez-se necessária a representação da bacia em forma de planos e canais, procurando representar da melhor forma possível a distribuição dos mesmos. Assim, a bacia do Igarapé da Prata foi dividida em duas sub-bacias, sendo sub-bacia 1 e sub- bacia 2 (Figura 17).

Para a bacia de estudo, foram traçados sistemas de planos e canais, sendo determinada a área do plano que irá contribuir para cada canal, cruzando as curvas de níveis perpendiculares levando em consideração à declividade e toda rede de drenagem. A declividade das encostas (slope) foi determinada pela diferença de cotas dividida pelo seu comprimento, já o comprimento do canal é o mesmo medido no mapa. A largura do canal foi determinada pela medição em campo, através de uma fita métrica esticada de uma margem a outra do rio, sendo mantida acima do nível d'água. Os pontos de início e finalização para medição são os pontos onde a vegetação e inclinações das margens sugerem que o rio atinja a

sua capacidade máxima, a partir do qual ocorra variação do volume pela ocorrência de eventos de chuva.

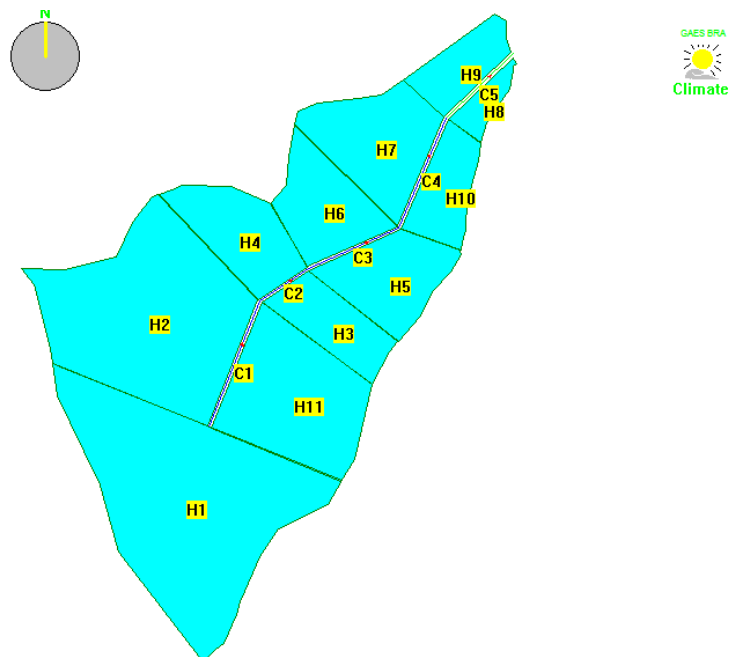
Figura 17 – Definição das sub-bacias.



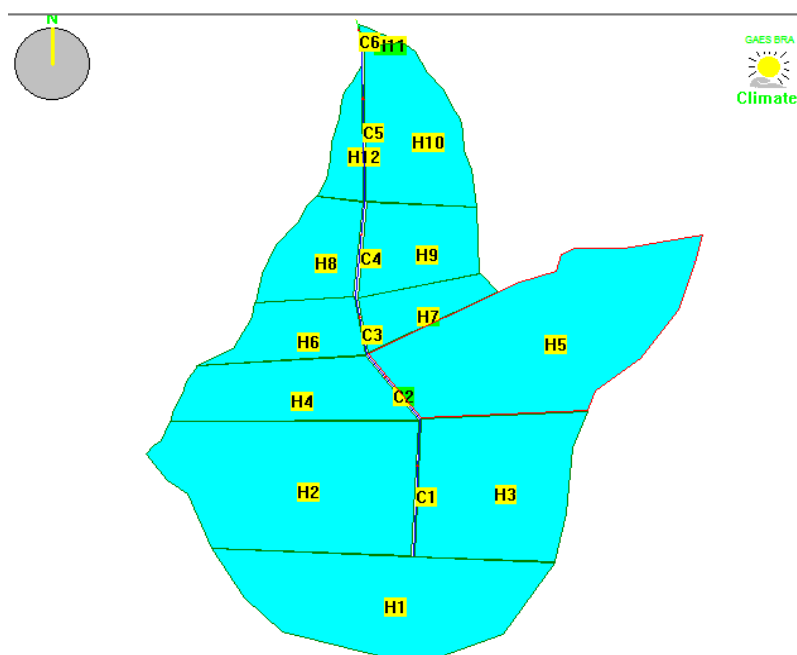
Fonte: Autora

A Figura 18 representa a discretização da sub-bacia 1, que foi discretizada em (16) elementos, sendo 5 canais e 11 planos.

Figura 18 – Discretização da sub-bacia 1.



A Figura 19 representa a discretização da sub-bacia 2, que foi discretizada em 18 elementos, sendo 6 canais e 12 planos.

Figura 19 – Discretização da sub-bacia 2.

Após a discretização, foram obtidas as tabelas (Apêndice 1 e 2), que apresentam os elementos dos planos e canais, contendo as características morfológicas: como área, largura, comprimento e declividade para cada plano discretizado, já que os dados de clima e solo são válidos para toda a bacia.

4.5 COLETA DOS DADOS

Os dados de precipitação e a produção de sedimentos foram sendo coletados desde o início da implantação da Estação hidrossedimentológica e pluviométrica instalada no exutório da bacia do igarapé da Prata e também em trabalhos realizados na bacia, sendo esses dados observados em campo. Os dados de sedimentos em suspensão são obtidos através do equipamento SL2000-TS, também da Solar Instrumentação, que possui um sensor de turbidez (Figura 20), que quantifica as partículas em suspensão por meio dos princípios de transmitância e refletância, determinando a quantidade de luz que atravessa o volume de água tendo partículas em suspensão e a refletância, que indica a quantidade de luz refletida pelos sólidos em suspensão.

Figura 20 – Sensor de Turbidez para medida da quantidade de sedimentos.



Fonte: Gomide (2012)

4.6 CALIBRAÇÃO E SIMULAÇÃO DOS PARÂMETROS FÍSICOS DA BACIA

4.6.1 Arquivos de chuva

A calibração do modelo é executada após ser gerado o arquivo de chuvas (Figura 21). Esse arquivo é formado com base nos dados de precipitação (Figura 8), após a criação de todos os arquivos dos eventos da região e os dados climatológicos médios, os valores serviram como base para que as equações estatísticas do modelo forneçam bons resultados. Ao término dessa etapa, todos os arquivos serão salvos para serem utilizados, posteriormente, no componente da bacia hidrográfica do modelo, visando à calibração do mesmo. A Figura 21 representa um exemplo de saída do arquivo de parâmetros do modelo CLIGEN.

Figura 21 – Arquivo de eventos

```

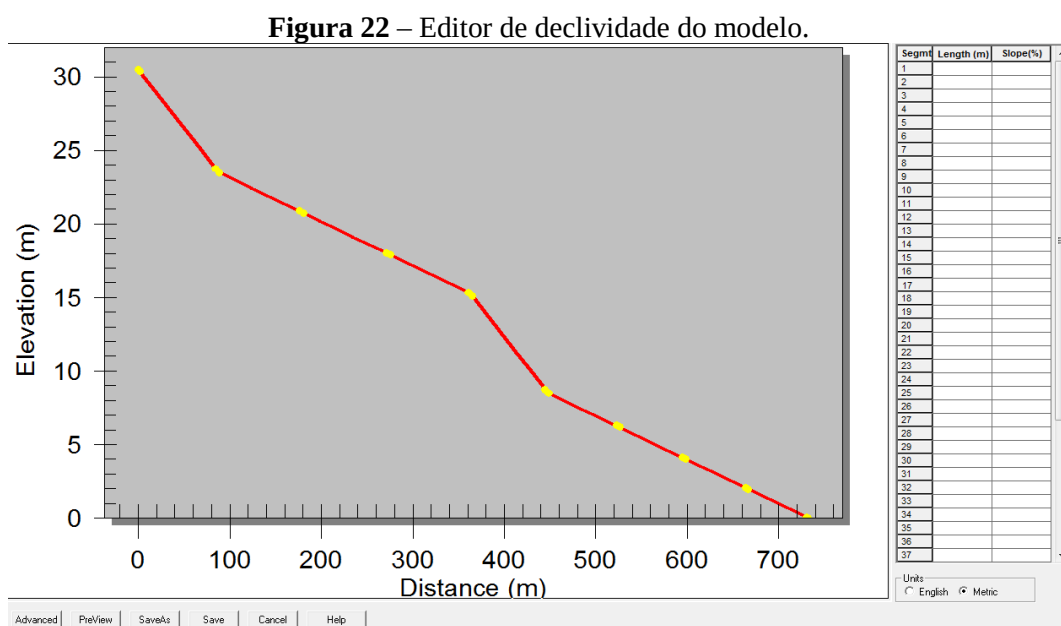
4.30
1 0 0
Station: BRAZIL IGARAPÉ DA PRATA BRA CLIGEN VERSION 4.3
Latitude Longitude Elevation (m) Obs. Years Beginning year Years simulated
1.73 -47.05 78 2 1 3
observed monthly ave max temperature (C)
31.1 30.0 29.4 30.0 29.8 30.2 30.1 30.4 31.4 32.0 32.0 32.0
observed monthly ave min temperature (C)
24.5 23.6 23.2 23.1 23.0 22.6 22.2 22.4 22.2 22.3 22.5 23.0
observed monthly ave solar radiation (Langleys/day)
588.0 626.0 634.0 604.0 561.0 549.0 550.0 597.0 640.0 651.0 600.0 572.0
observed monthly ave precipitation (mm)
162.2 213.9 305.0 241.6 151.7 62.5 52.3 64.7 71.0 0.1 17.5 43.9
da mo year prcp dur tp ip tmax tmin rad w-vl w-dir tdew
(mm) (h) (C) (C) (l/d) (m/s) (Deg) (C)
1 1 1 38.7 2.70 0.02 6.03 30.5 24.2 255. 7.0 102. 17.4

```

Fonte: Autora, 2017

4.6.2 Arquivo de morfologia da bacia

Na calibração do modelo WEPP são utilizados todos os dados das parcelas de erosão da bacia (Figuras 18 e 19). É possível modificar as informações sobre o plano do solo e a distribuição da declividade do mesmo. A calibração dos planos é realizada nas parcelas de erosão, quando transformados em planos e canais a partir da discretização da bacia de estudo, essa por sua vez, deverá ser editada conforme as características da região a ser realizado, como: declividade, cobertura do solo e tipo de solo. As declividades são geradas com base em dados de descrição topográfica dos planos, o que gera a representação da elevação digital da área. Tal representação é utilizada para a locação das vertentes principais para análise pelo WEPP da declividade e curvaturas do relevo. O modelo requer informações sobre a geometria da paisagem, que é inserida por meio do arquivo de inclinação (Figura 22). As informações necessárias incluem a orientação da inclinação, o comprimento da inclinação e são inseridos pela inclinação de pontos, identificando o comprimento e as altitudes, os pontos são usados para gerar uma curva de inclinação.



4.6.3 Arquivo de solo

O arquivo de solo escolhido para o processo de calibração foi de uma camada de solo, onde o modelo utiliza as porcentagens de areia, argila e rocha para a utilização dos parâmetros no processo de cálculo. Para os parâmetros físicos do solo, a Figura 23 representa todas as

características e os parâmetros a serem inseridos e como tais informações são organizadas no arquivo para que se realize a calibração no modelo WEPP, dentre eles a saturação inicial (S_i), que será calibrada para cada vertente pelo método de tentativa e erro, sendo realizada para as duas sub-bacias. O parâmetro K_i é o parâmetro que caracteriza a erodibilidade do solo nos planos, esse por sua vez tem influência sobre a erosão que acontece entre o início do evento de precipitação e o tempo de empoçamento. O parâmetro K_r que representa a erodibilidade do solo nos canais, que tem uma variação nas vertentes, uma vez que a tensão de cisalhamento nos canais vai depender da condição do fluxo.

Figura 23 – Representação computacional do componente do solo do modelo.

Soil Database Editor: Igarapé da Prata.sol

Soil File Name: Igarapé da Prata Soil Texture: Franco Arenoso Albedo: 0.15 Initial Sat. Level: (%) 70

Interrill Erodibility: 6.04794e+006 (Kg*s/m**4) ☐ Have Model Calculate

Rill Erodibility: 0.019 (s/m) ☐ Have Model Calculate

Critical Shear: 3.5 (Pa) ☐ Have Model Calculate

Eff. Hydr. Conductivity: 6.3 (mm/h) ☐ Have Model Calculate

Layer	Depth(mm)	Sand(%)	Clay(%)	Organic(%)	CEC(meq/10)	Rock(%)
1	17	20.0	11.0	2.180	2.1	0.0
2						
3						
4						
5						
6						
7						
8						
9						

☐ Use Restricting Layer User Defined

Anisotropy Ratio 25 Ksat (mm/h) 0

☐ English Units

Print Save As Save Cancel Help

A fim de calibrar o modelo, as análises de sensibilidade serão realizadas, em alguns parâmetros, pelo método da tentativa e erro, através da alteração do valor de um parâmetro de entrada, para um determinado intervalo aceitável observando a saída de taxa de sedimento, e identificando o parâmetro que afeta essa taxa. A saída do modelo é afetada pela variação nos valores dos parâmetros, essa variação ocorre, primeiramente, pelo ajuste do parâmetro mais sensível seguido por outros parâmetros para que a produção de sedimento simulada seja igual ou próxima ao valor observado, no período de 2012, através dos arquivos de saída do modelo. Uma vez encontrados estes valores nas parcelas, eles foram mantidos fixos em todas as outras vertentes, utilizados neste estudo.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 TESTES REALIZADOS COM OS PARÂMETROS FÍSICOS DO SOLO (K_i , K_r , τ_c e K_e)

A erodibilidade entressulco (K_i) foi igual a $8,2989 \text{ kg s m}^{-4}$. Ela foi utilizada como base inicial para a calibração para ambas as sub-bacias. Já aos valores obtidos pela simulação, apresentam uma de variação entre 10^6 kg s m^{-4} (sub-bacia 1) e 10^5 kg s m^{-4} (sub-bacia 2). Verifica-se que o valor estimado por meio da equação de rotina interna do modelo WEPP apresentou um valor superior comparado às condições de simulação.

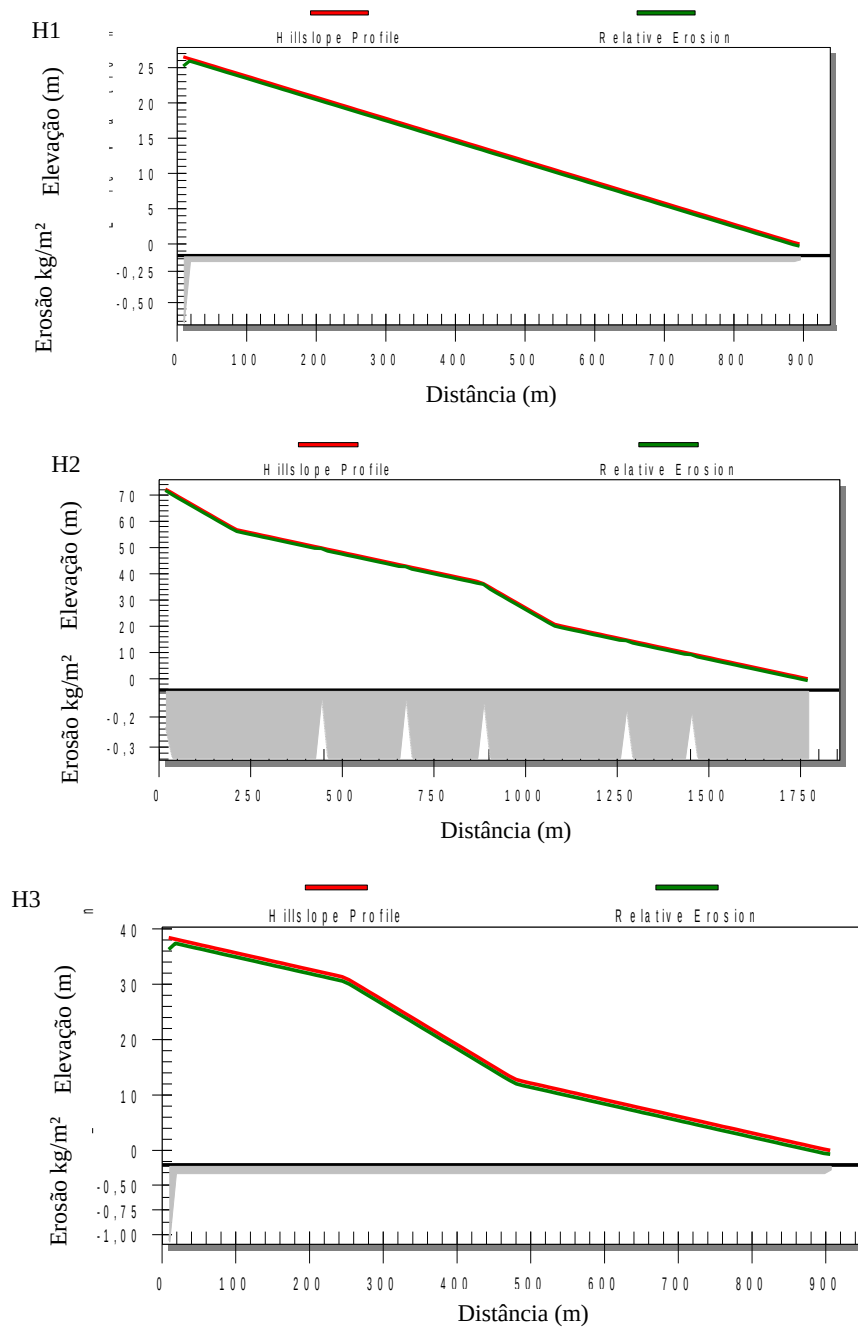
Para o fator de erodibilidade do solo em sulco (K_r) e tensão crítica (τ_c), em ambas sub-bacias, os valores obtidos pelas equações foram de $0,0114 \text{ s/m}$ e $1,703 \text{ Pa}$. No processo de calibração, o valor para o parâmetro K_r , obtido pela simulação, foi $0,0001 \text{ s/m}$ para ambas as sub-bacias, enquanto que (τ_c) foi de 22 Pa (sub-bacia 1) e 20 Pa (sub-bacia 2). Os valores obtidos pelas equações de rotina interna do modelo em comparação com os valores calibrados pelo modelo foram superiores para o parâmetro K_r . Já no processo de calibração o parâmetro τ_c foram superiores em comparação a equação de rotina interna do modelo. Tais informações são utilizadas para o cálculo da condutividade hidráulica efetiva K_e que afeta o valor da saturação do solo.

O fator (K_e) pela equação de rotina interna do modelo foi de $26,70 \text{ mm/h}$ para ambas as sub-bacias. Com o processo de calibração do modelo o valor encontrado nos planos foram de $7,5 \text{ mm/h}$ (sub-bacia 1) e $12,5 \text{ mm/h}$ (sub-bacia 2). Após fixar, o valor de K_e nas sub-bacias, e por meio do arquivo de solo fixado, foi possível calibrar o parâmetro de saturação inicial (S_i) para o escoamento superficial. Assim, foram realizadas calibrações desse parâmetro para cada plano, cujo intervalo de variação foram $65,95\%$ a 97% para a sub-bacia 1 e 68% a 82% para a sub-bacia 2.

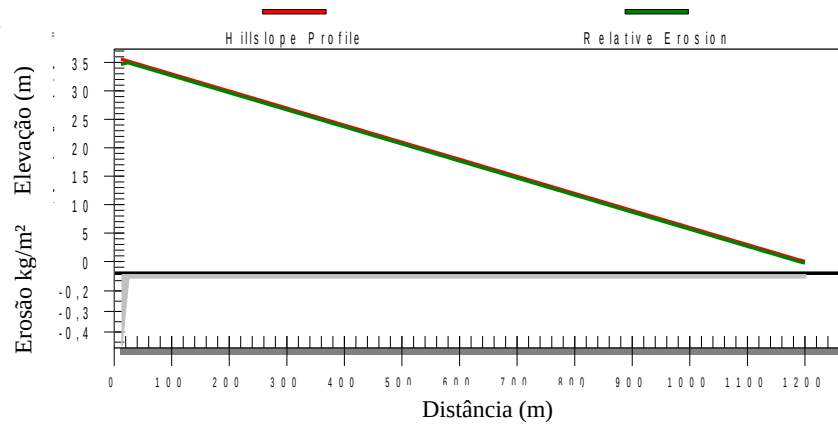
Com os parâmetros encontrados nas calibrações (Apêndice 3 e 4) foram realizadas simulações para todos os planos por um período de 1 ano em ambas as sub-bacias. A distribuição espacial do processo erosivo ao longo das vertentes das duas sub-bacias foi realizada com os dados do componente do solo do modelo WEPP. Os resultados das simulações podem ser observados nas Figuras 24 e 25. As figuras foram geradas pelo modelo WEPP, sendo representado pela distribuição do perfil da topografia para cada plano estudado das sub-bacias. A linha vermelha representa o perfil de encosta. A linha verde perto do perfil de inclinação é uma representação da perda de solo ou de deposição para os pontos correspondentes no perfil. Quando as duas linhas juntam-se pouca erosão ocorre, e quando as

linhas estão mais afastadas mais erosão ocorre. O gráfico da área sombreada informa a taxa de erosão em cada plano.

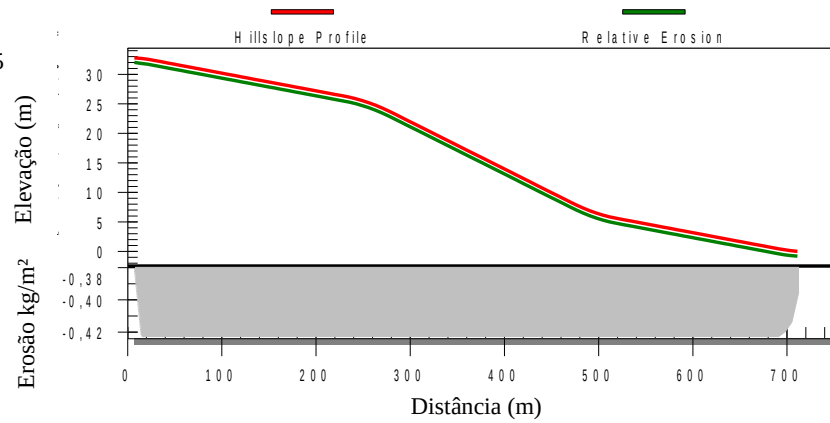
Figura 24 - Distribuição espacial das variações do perfil do terreno para a desagregação de solo- sub-bacia 1.



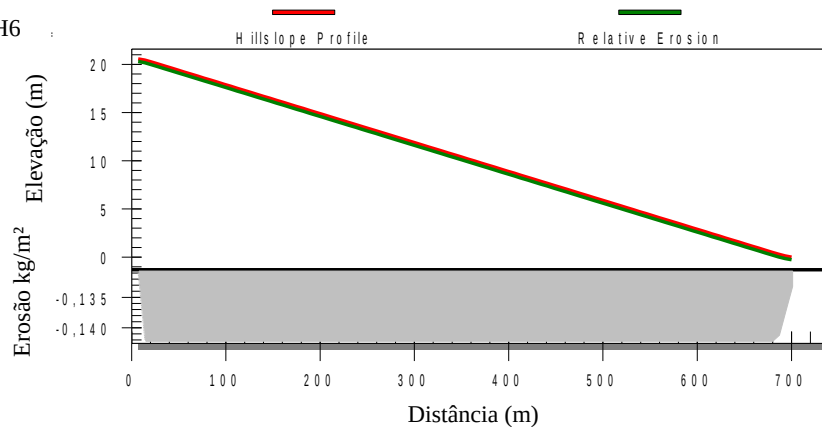
H4



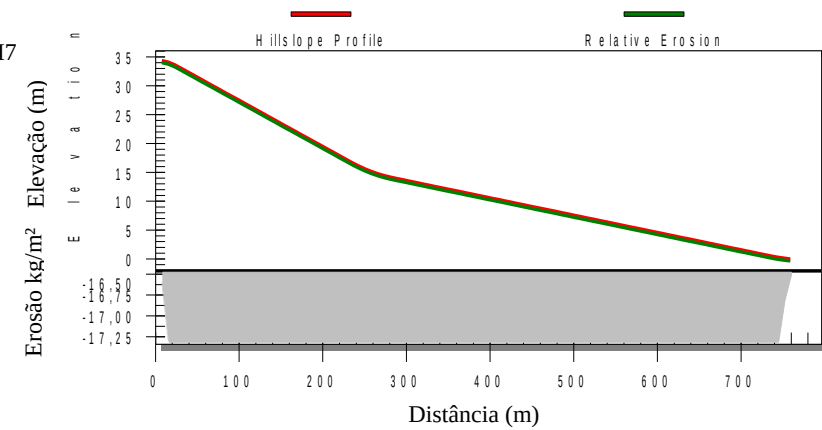
H5

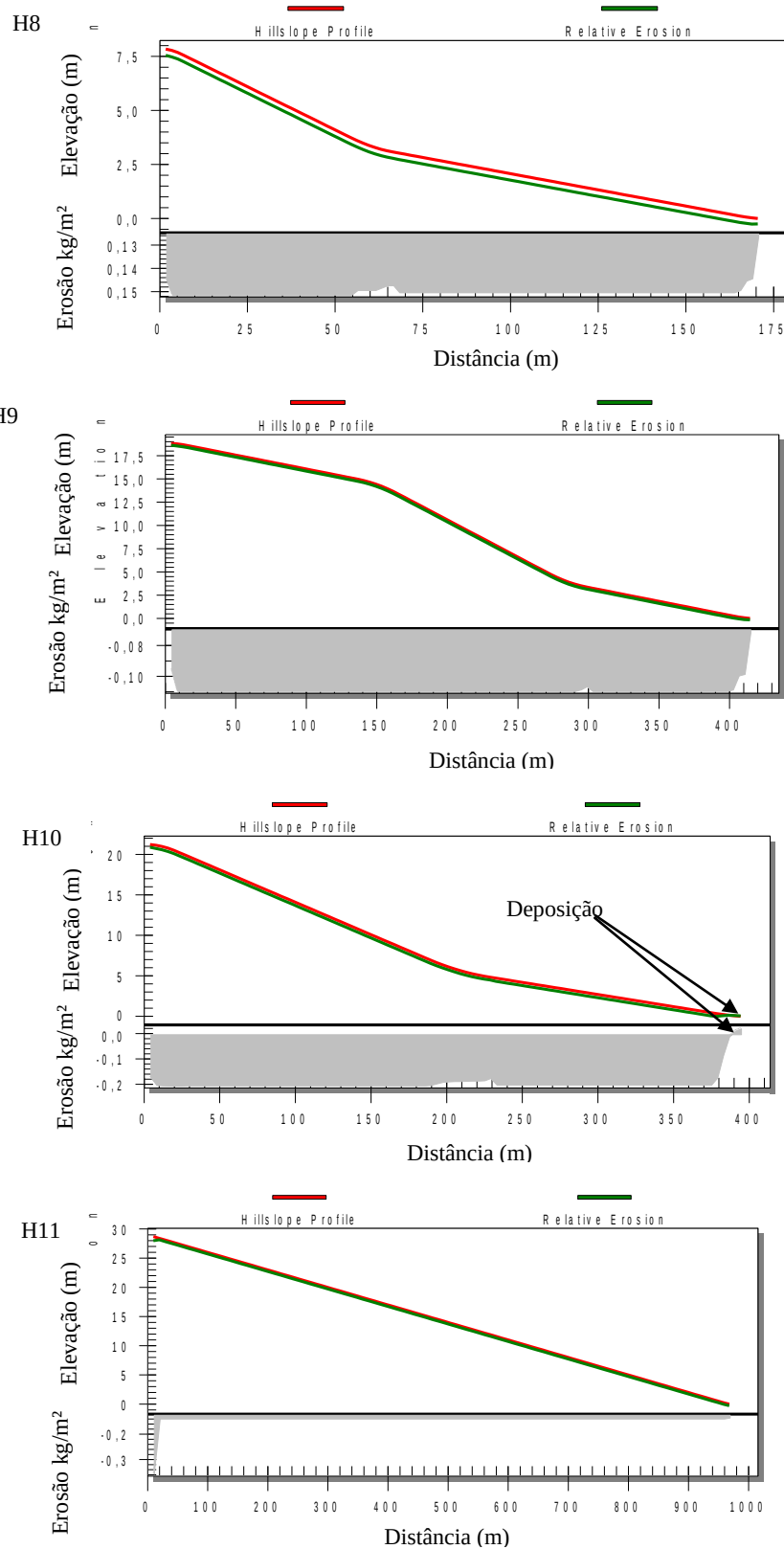


H6



H7

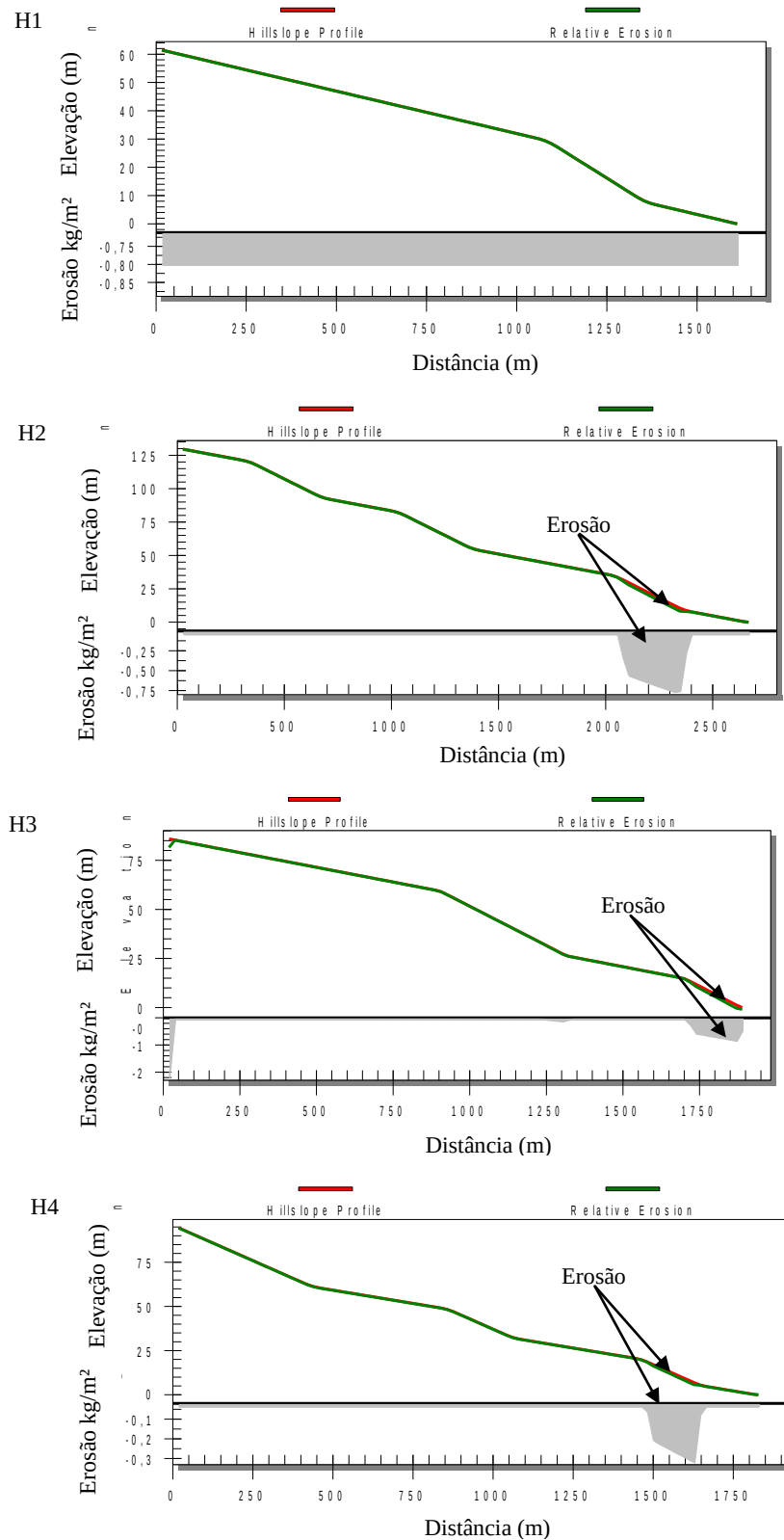


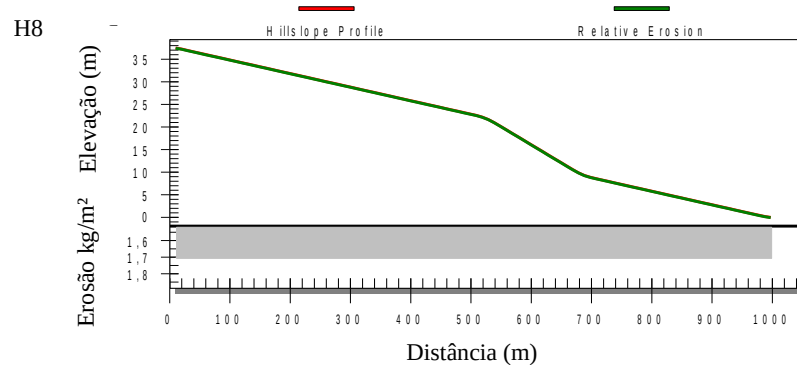
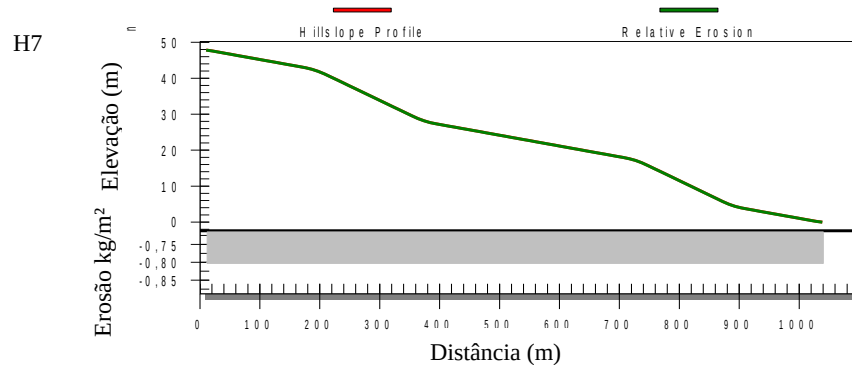
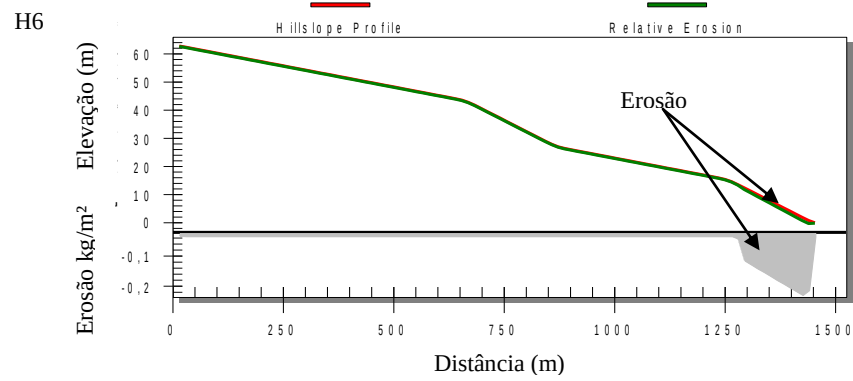
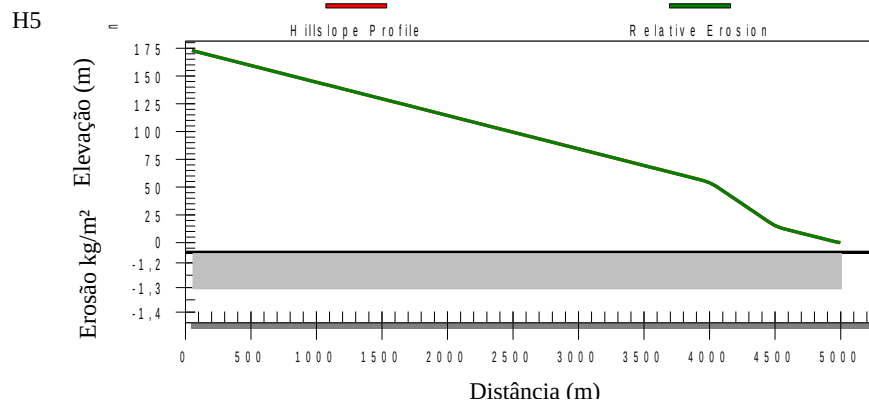


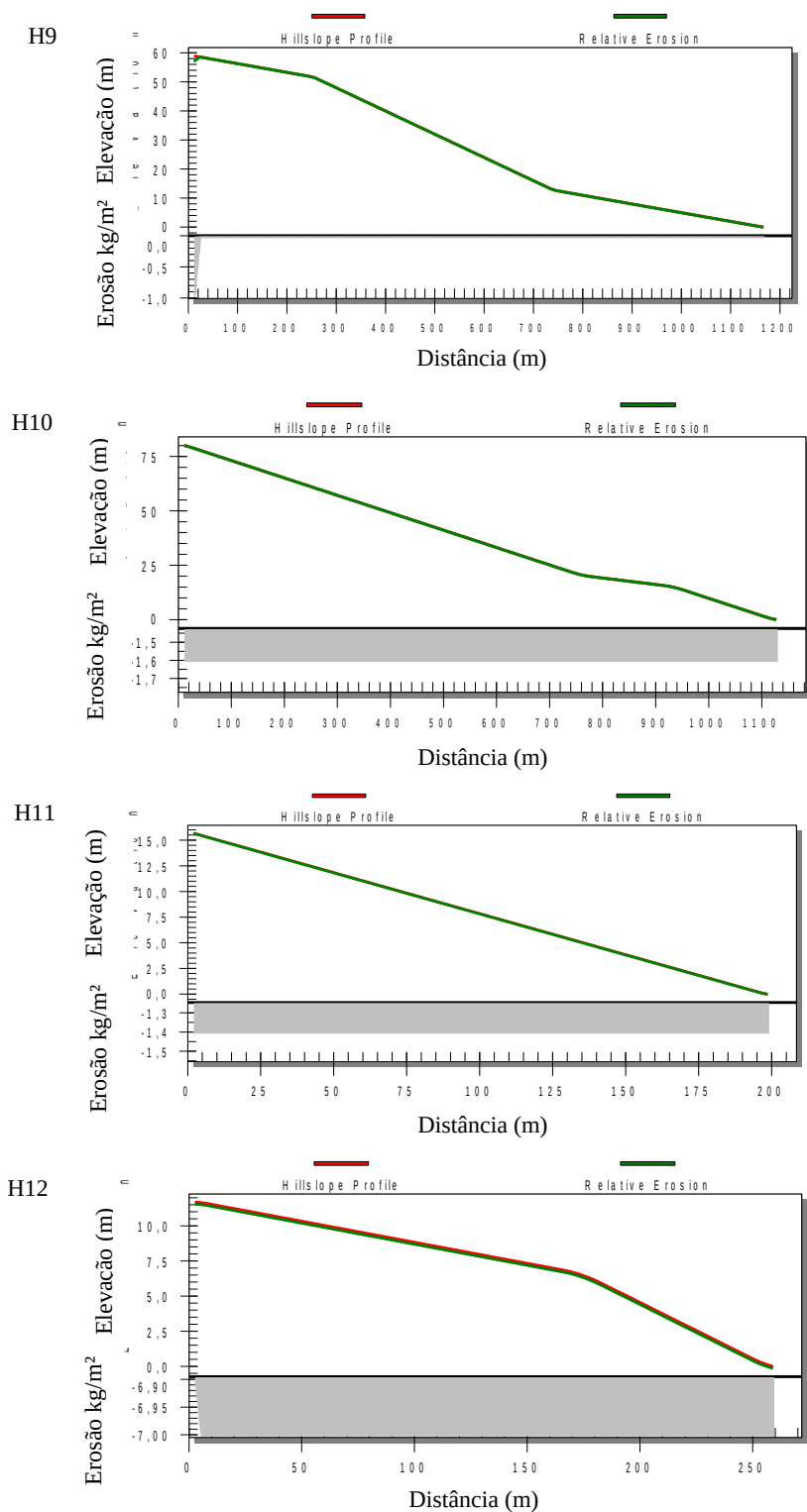
Na Figura 24, observa-se que os processos erosivos foram moderadamente acentuados nas condições estudadas. As alterações nas condições de superfície do solo e áreas de desagregação e deposição ao longo da encosta foram moderadas. Nesse caso, verificou-se que

aporte de sedimento e as perdas de solo foram iguais em grande parte dos planos, havendo deposição de sedimentos em apenas um plano.

Figura 25 - Distribuição espacial das variações do perfil do terreno para a desagregação de solo - sub-bacia 2.







Na Figura 25 verifica-se a ocorrência de processos erosivos, porém moderadamente acentuados, não constatando alterações nas condições da superfície do solo. Neste período, verificou-se que em algumas parcelas das sub-bacia (H2, H3, H4 e H6) a erosão do solo é

concentrado na parte inferior da encosta, com isso o aporte de sedimento foi igual às perdas de solo, não havendo deposição de sedimentos.

Observações realizadas por alguns autores demonstram que o escoamento superficial, transporte de sedimento e deposição de sedimento sofre influencia do formato das vertentes. (GUERRA, 2003). Isso ocorre pelo fato das vertentes apresentarem diferentes curvaturas, que podem condicionar diferentes processos numa mesma declividade e comprimento de rampa. Também se deve considerar a cobertura do solo, que reduz a capacidade de transporte e deposição de sedimento, impedindo a perda de solo pelo impacto direto das gotas de chuvas sobre a superfície diminuindo a desagregação e a produção de sedimento (OLIVEIRA, 2010).

5.2 ESTIMATIVA DA PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS

Para a estimativa da produção de sedimento, foram realizadas simulações referentes ao ano de 2012 para todos os planos da bacia. Os dados observados foram os mesmo utilizados por Silva *et al.* (2015). Os resultados obtidos para a produção de sedimento para cada plano são apresentados na Tabela 6. Assim, com os dados do componente do solo coletados na bacia, o WEPP simulou a produção de sedimentos. No caso da área da sub-bacia 1, a produção de sedimentos variou entre 159,75 t/km² e 415,49 t/km². Para a área da sub-bacia 2, os valores variaram entre 8,33 t/km² e 208,84 t/km².

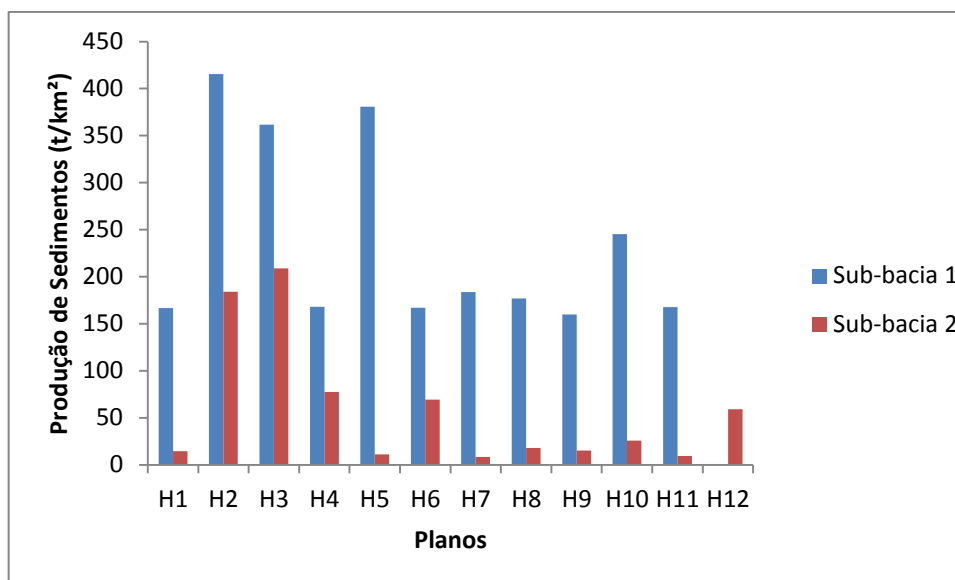
Tabela 6 – Produção de sedimentos bruta (PSB) e específica (PSE) para cada plano.

Planos	Sub 1			Sub 2		
	Área (km ²)	PSB (t)	PSE (t/km ²)	Área (km ²)	PSB (t)	PSE (t/km ²)
H1	2,51	418,79	166,68	3,78	55,03	14,56
H2	1,98	824,54	415,49	4,68	861,62	184,11
H3	0,43	154,06	361,82	3,30	689,20	208,84
H4	0,57	95,26	167,86	1,89	146,03	77,34
H5	0,59	222,83	380,72	5,21	57,10	10,96
H6	0,57	95,09	167,12	1,07	74,44	69,43
H7	0,74	135,60	183,64	0,77	6,40	8,33
H8	0,13	22,75	176,87	1,19	21,23	17,79
H9	0,32	51,52	159,75	1,42	21,64	15,26
H10	0,39	94,97	245,21	2,11	54,68	25,85
H11	1,09	182,49	167,70	0,06	0,57	9,44
H12	--	--	--	0,51	30,27	59,19

Fonte: Autora, 2017.

A área de maior produção de sedimento (Plano H2 – sub-bacia 1) ocorre onde se apresenta uma maior declividade (Figura 6). Nesse caso, podem-se observar alguns fragmentos de vegetação nativa (Figura 5), protegendo as encostas. Entretanto, maior parte do plano é ocupada por pastagens, agricultura e pecuária. A área que apresentou menor produção de sedimento (Plano H7 – sub-bacia 2). Verifica-se que é uma área com baixa declividade (Figura 6) e com alta predominância de agricultura e agropecuária (Figura 5). A Figura 26 mostra a produção calculada de sedimentos para a bacia numa escala anual, na qual se observa que na sub- bacia 1 ocorre a maior produção de sedimento com um valor superior a 400 t ha⁻¹, isso pode ser justificado por ser uma área com predominância de pastos.

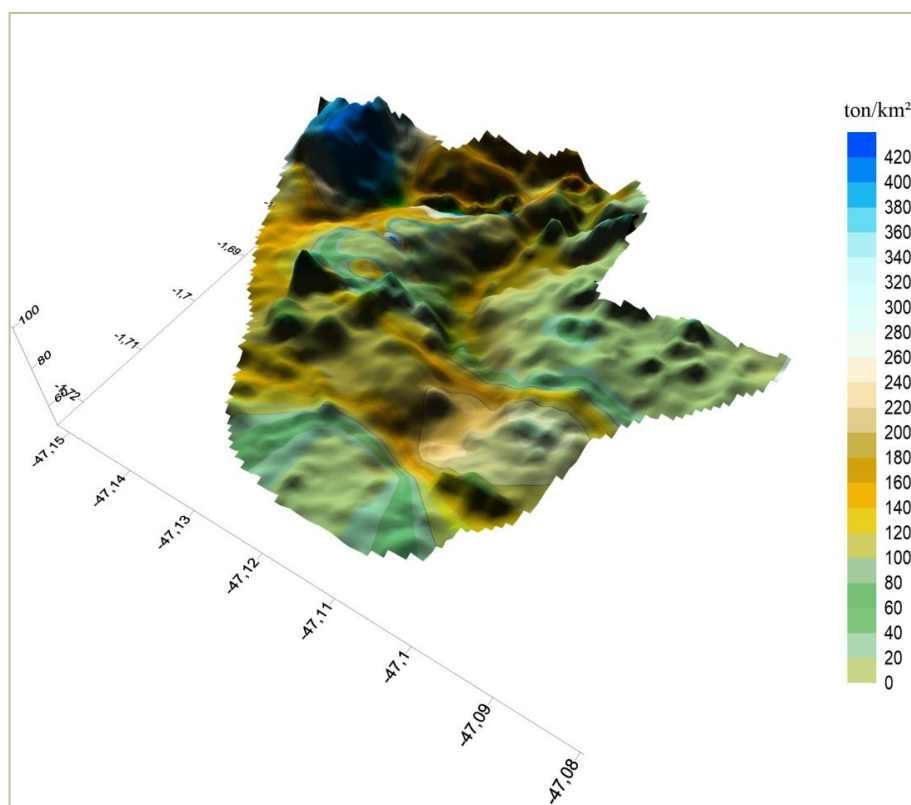
Figura 26 - Potencial de produção de sedimentos calculada para as sub-bacias.



Fonte: Autora, 2017

A Figura 27, elaborada a partir da Tabela 6, apresenta o modelo digital da produção de sedimentos da pequena bacia do igarapé da Prata, permitindo uma melhor avaliação da distribuição espacial da produção de sedimentos. Desta forma, verificou-se que a produção de sedimentos na bacia apresentou valores próximos a zero e em algumas áreas valores próximos a 420 t/km². A distribuição espacial da produção de sedimento mostrou-se bastante variável, observando-se que poucas áreas são responsáveis por valores elevados de sedimentos que chegam ao curso d'água.

Figura 27 – Modelo digital da produção de sedimentos da pequena bacia do igarapé da Prata.



Fonte: Autora, 2017

Em relação aos resultados apresentados na Tabela 6 e Figura 26, Kamath *et al.*, 2012, também encontraram alta variabilidade em seus 23 planos de simulação de produção de sedimentos, entre 48,73 e 25.500,2 t/km². Esses resultados são referentes às bacias hidrográficas dos rios Baindur Hole e Yedamavina Hole em Udupi distrito do estado de Karnataka, Índia, que possui uma área de 194,44 km² e também possui usos agrícolas e agropecuários. Para as simulações da produção de sedimentos, os autores utilizaram a MUSLE associada a um SIG. O resultado da estimativa média da produção de sedimentos, no exutório da bacia do Igarapé da Prata via modelo WEPP, conforme a Tabela 7. O valor de 131,99 t/km² foi determinado ao se dividir a PSB total da sub-bacia1 mais a PSB total da sub-bacia2 pela área da bacia, que é igual a 32,7 km².

Tabela 7 – Produção de sedimentos observada e estimada por Silva *et al.* (2015) e pelo modelo WEPP para o ano de 2012.

	Observada	Silva <i>et al.</i> 2015	Estimada (WEPP)	Área
ANO	t/km ²	t/km ²	t/km ²	(km ²)
2012	121,64	142,47	131,99	32,7

Fonte: Autora, 2017

Pode-se observar que a produção de sedimentos estimada pelo modelo WEPP foi maior que a produção de sedimentos observada. Entretanto, os resultados do modelo WEPP aproximaram-se mais que o resultado de Silva *et al.*, (2015), que estimou a produção de sedimentos via modelo de Langbein-Schumm (Langbein & Schumm, 1958). Essa comparação revelou que o modelo apresentou um bom desempenho para a região. Esse bom desempenho é devido, pela adequação do banco de dados utilizado neste estudo, já que os componentes climáticos e solo foram estabelecidos com dados específicos da área estudada.

O valor estimado pelo modelo WEPP para a bacia do igarapé da Prata é comparável a alguns autores que estimaram a produção de sedimento pelo modelo, e obtiveram valores elevados em relação às áreas de estudo (Tabela 8), como: Zhang *et al.*, (2009), que simularam um valor de 137,79 t/km² para uma pequena bacia hidrográfica em Black Hawk County, Iowa, USA. Essa bacia apresenta, principalmente, uso agrícola. Nesse caso, os autores também utilizaram a MUSLE integrada a um SIG. Akbari *et al.*, (2015), simularam a produção de sedimentos, onde a produção anual média de sedimentos é igual a 42,79 t/km² para uma pequena bacia hidrográfica iraniana de relevo montanhoso e clima árido. Uma explicação plausível para a maior produção de sedimentos da primeira pode ser devido ao clima quente e úmido da Amazônia. Uma aplicação em território brasileiro do modelo WEPP é encontrada no trabalho de Sparovek *et al.*, (2000), que simularam a produção de sedimentos em uma micro bacia hidrográfica com cultura de cana de açúcar no sudeste brasileiro, cujo o valor foi igual a 1300 t/km². Essa importante produção de sedimentos é devida ao plantio intensivo de cana de açúcar e à declividade medida do terreno, que é igual 16%, bem mais acidentado que a planície amazônica.

Tabela 8 - Produção de sedimentos estimados em várias regiões.

Autor	Sedimento Estimado (t/km ²)	Área (km ²)	Local
Zhang <i>et al.</i> , 2009	137,79	24,2	Iowa, USA
Akbari <i>et al.</i> , 2015	42,79	37,2	Irã
Sparovek <i>et al.</i> , 2000	1300	0,06	Sudeste brasileiro

Fonte: Autora, 2017

6 CONCLUSÃO

A média da produção de sedimento observada teve um valor de 121,64 t/km² e de sedimento calculada foi de 131,99 t/km², um valor próximo do observado, de maneira a concluir que os valores estimados pelo modelo são coerentes. O modelo tende a superestimar a produção de sedimento, uma das razões para superestimação de sedimentos é a alta sensibilidade do modelo para as declividades dos canais, que precisam ser levantadas no campo cuidadosamente.

Os parâmetros principais do modelo são influenciados pela escala da bacia, ainda precisa ser mais bem definida para a região. A grande vantagem potencial do modelo WEPP é o maior acervo de banco de dados interno, seguido da possibilidade de parametrizar o modelo para bacias sem dados hidrossedimentológicos para estimativas preliminares do escoamento e erosão em eventos isolados ou sequenciados. O modelo WEPP é eficiente na estimativa dos valores de erosão líquida (produção de sedimentos) para bacias hidrográficas em que há efetiva deposição de sedimentos.

Os resultados obtidos mostram a necessidade de aprofundamento nas técnicas de monitoramento modelagem de parâmetros e as variáveis associadas à estimativa da erosão e da produção de sedimentos. Ampliar os dados, conforme a necessidade do modelo. A construção dos arquivos de entrada de dados no modelo via sistematização dos dados e informações são fundamentais, de forma a facilitar o processo de modelagem.

REFERÊNCIAS

- ABRAHÃO, W.A.P. & MELLO, J.W.V. **Fundamentos de pedologia e geologia de interesse no processo de recuperação de uma área degradada.** In: DIAS, L.E. & MELLO, J.W.V. Recuperação de áreas degradadas. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, SBRAD, 1988. 251p.
- AGASSI, M. (Ed.). Soil erosion, conservation, and rehabilitation. New York: Marcel Dekker, 1996, 402 p.
- Akbari, A.; Sedaei, L.; Naderi, M.; Samah, A. A.; Sedaei, N. **The application of the Water Erosion Prediction Project (WEPP) model for the estimation of runoff and sediment on a monthly time resolution.** Environmental Earth Sciences, v. 74, 5827 – 5837, 2015.
- ALBUQUERQUE, F. N. B. de. Agentes, processos e feições erosivas em voçoroca conectada à rede de drenagem do rio Coreaú, em Coreaú, Ceará. **Revista da Casa da Geografia de Sobral.** v. 8/9, n. 1, p. 11-20, 2006/2007.
- AMORE, C.; MODICA, M.A.; NEARING, V. Santoro – Scale Effect in USLE and WEPP application for soil erosion computation from three Sicilian basins. Journal of Hydrology, 293 (2004), pp.100-114.
- AMORIM, R.S.S. Avaliação dos modelos de predição da erosão hídrica USLE, RUSLE e WEPP para condições edafoclimáticas brasileiras. 2003. 123 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa - MG, 2003.
- ARNOLD, J. G.; SRINIVASAN, R.; MUTTIAH, R.S.; WILLIAMS, J.R. **Large area hydrologic modelling and assessment: Part I. Model development.** Journal of the American Water Resources Association, Herndon, v. 34, n. 1, p. 73– 89, 1998.
- <http://awwatersheds.org/rill/>; Acesso em Junho de 2017.
- BATCHELOR, P. **Model as metaphors: The role of modeling in pollution prevention.** Waste Management, Padova, v. 14, n.3, p. 243-251, 1994.
- BENNETT, J. P. **Concepts of mathematical modeling of sediment yield.** Water Resources Research, 10(3): 485-492, 1974.
- BEZERRA, S.A.; CANTALICE, J.R.B.; CUNHA FILHO, M.; SOUZA, W.L.S. **Características Hidráulicas da Erosão em Sulcos em um Cambissolo do Semiárido do Brasil.** R. Bras. Ci. Solo, v.34, 2010, p.1325-1332.
- BRAKENSIEK, D. L.; RAWLS, W. J. **“Green-Ampt Infiltration Model Parameters for Hydrologic Classification of Soils”.** In: Specialty Conference on Advances in Irrigation and Drainage: Surviving external pressures, July, 20-22, 1983, Jackson, Wyoming, USA. Proceedings. ASCE/ASAE, p. 226-233, 1983.

- BRANCO, N. **Avaliação da produção de sedimentos de eventos chuvosos em uma pequena bacia hidrográfica rural de encosta**. Dissertação de Mestrado. Santa Maria - RS 1998.
- BRUNNER, A.C.; PARK, S.J.; RUECKER, G.R.; DIKAU, R.; Vlek, P.L.G. **Catenary soil development influencing erosion susceptibility along a hillslope in Uganda**. Catena 58, 1–22, 2004.
- CARIELLO, B. L.; BLANCO, C. J. C.; GOMIDE, I. S.; BARBOSA, A. J. S.; SANTOS, D. B. O. **Analysis of the Modified Universal Soil Loss Equation to estimate the sediment yield in a small Amazon catchment**. SYLWAN, v. 158, p. 347-359, 2014.
- CARVALHO, N. O. **Hidrossedimentologia prática**. 2ª edição; revisada; atual e ampliada, Rio de Janeiro – RJ: Interciência, 2008, 599 p.
- CASSOL, E. A.; LIMA, V. S. **Erosão em entressulcos sob diferentes tipos de prepare e manejo do solo**. Pesq. agropec. bras. v. 38, n. 1, p. 117-124, Brasília jan. 2003.
- CHANDRAMOHAN, T.; VENKATESH, B; BALCHAND, A. N. **Evaluation of Three Soil Erosion Models for Small Watersheds**, INTERNATIONAL CONFERENCE ON WATER RESOURCES, COASTAL AND OCEAN ENGINEERING (ICWRCOE 2015). p. 1227–1234.
- CHRISTOFOLETTI, A. **Morfologia de bacias de drenagem**. Not. Geomorfol., 18:130-132, 1978.
- CHU, S. T. **Infiltration during an unsteady rain**. Water Resources Research, 14 (3): 461 – 466, 1978.
- COGO, N. P.; BERTOL, I. **O papel das praticas mecânicas e não-mecânicas no controle da erosão hídrica do solo: conceitos e princípios**. In: NUERNBERG, N.J. Conceitos e fundamentos do sistema plantio direto. Lages: Sociedade Brasileira de Ciências do Solo. p. 53-75, 1998.
- DEMATTE, J.A.M. & DEMÉTRIO, V.A. **Fotointerpretação de padrões de drenagem em amostras circulares na caracterização de solos basálticos do estado do Paraná**. Revista Brasileira de Ciências do Solo, v.20: 109-115, 1996a.
- DEMATTE, J.A.M., DEMÉTRIO, V. A. **Padrões de drenagem em áreas de solos desenvolvidos de rochas vulcânicas ácidas na região de Guarapuava (PR)**. Revista Brasileira de Ciências do Solo, v. 20: 305-311, 1996b.
- DIDONÉ, E. J. **Erosão bruta e produção de sedimentos em bacia hidrográfica sob plantio direto do planalto do Rio Grande do Sul**, Dissertação (Mestrado) Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Rurais, Santa Maria, 2013.
- ELLIOT, W.J.; LIEBENOW, A. M.; LAFLEN, J. M. KOHL, K. D. **A compendium of soil erodibility data from WEPP cropland soil field erodibility experiments 1987 and 1988**. NSERL Report N° 3. Ohio State University and USDA Agricultural Research Service. Available from USDA- ARS, National Soil Erosion Research Laboratory, West Lafayette, In., 316p, 1989.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos (Rio de Janeiro, RJ). In: REUNIÃO TÉCNICA DE LEVANTAMENTO DE SOLOS, 10., 1979, Rio de Janeiro. Súmula... Rio de Janeiro, 1979. 83 p.(EMBRAPA-SNLCS. Micelânea, 1).

FAO. **La erosión del suelo por el agua: algunas medidas para combatirla en las tierras de cultivo.** Roma, 1967. 207 p. (Cuadernos de Fomento Agropecuario, n. 81).

FERNANDES, E. N. **Sistema inteligente de apoio ao processo de avaliação de impactos ambientais de atividades agropecuárias.** Tese de Doutorado. Universidade Federal de Viçosa. Viçosa - MG, 1997.

FINKNER, S. C., M. A. NEARING, G. R. FOSTER, AND J. E. GILLEY. 1989. **A simplified equation for modeling sediment transport capacity.** Trans. ASAE 32(5): 1545-1550.

FLANAGAN, D.C.; ASCOUGH, J.C.; NICKS, A.D.; NEARING, M.A.; LAFFLEN, J.M. **Overview of the WEPP Erosion Prediction Model.** IN: USDA. water erosion prediction project - **WEPP**. West Lafayette: USDA-ARS-MWA-SWCS, 1995a). cap.1. p. 1.1-1.12. (Technical documentation. NSERL, Report, 10).

FLANAGAN, D.C.; NEARING, M.A. United States Department of Agriculture–USDA: **Water erosion prediction project.** West Lafayette: National Soil Erosion Research Laboratory– NSERL, 1995b). (Technical Documentation, 10).

FLANAGAN, D. C.; GILLEY, J. E.; FRANTI, T. G. **Water erosion prediction project (WEPP): development history, model capabilities, and future enhancements.** American Society of Agricultural and Biological Engineers, v. 50(5): 1603-1612, 2007.

FOSTER, G.R.; FLANAGAN, D.C.; NEARING, M.A.; LANE, L.J.; RISSE, L.M.; FINKNER, S.C. Hillslope erosion component. IN: USDA. **Water erosion prediction Project – WEPP.** West Lafayette: USDA-ARS-MWA-SWCS, cap.11,p.11.1-11.12 (Technical documentation. NSERL, Report,10), 1995.

FOSTER, G.R. and LANE, L.J. (compilers). **User requirements: USDA-Water Erosion Prediction Project (WEPP).** NSERL Report N. 1, USDA-ARS National Soil Erosion Research Laboratory, West Lafayette, IN, 43 pp, 1987.

FOSTER, G.R.; MEYER, L.D. Mathematical simulation of upland erosion by fundamental erosion mechanics. In: USDA-ARS (Ed.) **Present and prospective technology for predicting sediment yields and sources.** Washington, p. 190-207 (ARS-S, 40), 1972.

FOSTER, G. R. Modeling the erosion process. In: HAAN, C. T. (Ed.). **Hydrologic modeling of small watersheds.** St. Joseph: American Society of Agricultural Engineers, p. 297-380. (ASAE Monograph, 5), 1982.

FROTA, P. V., NAPPO, M. E. **Processo erosivo e a retirada da vegetação na bacia hidrográfica do açude Orós – CE.** Revista Geonorte, Edição Especial, v.4, n.4, p.1472 – 1481, 2012.

GARCIA, A. R. – **Uso do Modelo WEPP (Water Erosion Prediction Project) Modificado para estimar taxas de erosão em estradas florestais.** Tese de Doutorado. Universidade Federal de Viçosa. Viçosa – MG, 2001

GOMIDE, I. S.; BLANCO, C. J. C; MATOS, T. R. **Estudo da variabilidade dos fatores integrantes do modelo Usle para aplicação na bacia do igarapé da prata, capitão poço/Pa.** X Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos, 2012.

GONÇALVES, F.A. **Validação do modelo WEPP na predição de erosão hídrica para condição edafoclimática da região de viçosa.** Tese de Doutorado. Viçosa – MG, 2008.

GREEN, W. H. & AMPT, G. A. (1911). Studies on Soil Physics I: The flow of air and water through soil. J. Agric. Sci., Vol. 4, No. 1, PP. 1-24.

GUERRA, A. J. T. **Processo Erosivo nas Encostas.** In: GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B.(org.). Geomorfologia: uma utilização de bases e conceitos. 2ª ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1995. 472 p.

GUERRA, A. J. T. **Erosão e conservação dos solos conceitos, temas e aplicações.** Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1999, p.339.

GUERRA, A.J.T. O início do processo erosivo. In: GUERRA, A.J.T.; SILVA, A.S. DA; BOTELHO, R.G.M. (Orgs.). **Erosão e Conservação dos Solos. Conceitos, temas e aplicações.** Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2ª. ed., p. 17-56, 2005.

HIDROWEB. Disponível em: www.hidroweb.ana.gov.br/ Acesso em 14 de fevereiro de 2015.

ARUN M. KAMATH, A. M.; VARUN, V. M.; DWARAKISH, G. S.; KAVYASHREE, B; SHWETHA, H. R. **Soil loss estimation through MUSLE using Kirpich and Williams times of concentration using RS and GIS techniques: a case study.** ISH Journal of Hydraulic Engineering, v. 18, n.1, p. 1-10, 2012.

LANE, L.J.; FOSTER, G.R.; NICKS, A.D. **Use of fundamental erosion mechanics in erosion prediction.** St. Joseph, ASAE, 1987.

LAFLÉN, J.M.; LANE, L.J.; FOSTER, G.R. **The water erosion prediction Project – a new generation of erosion prediction technology.** Journal of soil and water conservation, Ankeny, v. 46, p. 34-38, 1991.

LANE, L.J.; RENARD, K.G.; FOSTER G.R.; LAFLÉN, J.M. **Development and application of modern soil erosion prediction technology.** Australian Journal of Soil Research, Melbourne, V.30, p. 893-912, 1992.

LANGBEIN, W. B.; SCHUMM, S. A. **Yield of Sediment in Relation to Mean Annual Precipitation.** Trans. Am. Geophys. Union, v. 39, n. 6, p. 1076-1084, 1958.

LOPES, V. L. - **A numerical model of watershed erosion and sediment yield.** Tese de Doutorado. THE UNIVERSITY OF ARIZONA – USA, 104 p. 1997.

MACHADO, C. C.; GARCIA, A. R.; SILVA, E. & FONTES, A. M. **Comparação de taxas de erosão em estradas florestais estimadas pelo modelo wepp (water erosion prediction project) modificado em relação a medições experimentais.** Revista Árvore, vol. 27, n. 3, pp. 295-300, Universidade Federal de Viçosa, Brasil, 2003.

MARTINS, P.F.S. **Propriedades de solos sob floresta natural e sua alteração em consequência do desmatamento e cultivo, na Amazônia Oriental.** Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. Piracicaba - SP. 233p, 1987.

MEIN, R. G. e LARSON, C. L. (1973). *Modeling Infiltration During a Steady Rain.* Water Resources Research. 9(2): 384-394.

MEYER, L. D.; FOSTER, G. R.; ROMKENS, M.J.M. Source of soil eroded by water from upland slopes. In: USDA-ARS(Ed.) **Present and prospective technology for predicting sediment yields and source.** Washington: USDA-Agricultural Research, 1975.

MEYER, L.D.; WISCHMEIER, W. H. **Mathematical simulation of the process of soil erosion by water.** Transaction American Society Agricultural Engineering, St. Joseph,v.12, p.754-758, 1969.

MUTCHLER, C. K. & YOUNG, R. A. Soil detachment by raindrops. In: Sediment-yield workshop. Oxford, MIss.1972. **Present and prospective technology for predicting sediment yields and sources.** S.I., Agricultural Research Service. p.113-7, 1975.

<http://www.nptel.ac.in/courses/104103020/module7/lec3/2.html>, acesso em 26/05/2015.

OLIVEIRA, F.P. **Modelagem do Escoamento Superficial e da Erosão Hidrica em Bacia Rural em Arvorezinha, RS, Utilizando o WEPP.** Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre (RS), 2010.

PAIVA, F. M. de L. **Estudo comparativo entre três modelos de base física na modelagem hidrossedimentológica em microbacias na região semi-árida Paraibana.** Dissertação de Mestrado. Universidade de Campina Grande. Campina Grande, 2008.

PANDEY, A.; CHOWDARY, V.M.; MAL, B.C.; BILLIB, M. **Runoff and sediment yield modelling from a small agricultural watershed in India using the WEPP model.** Journal of Hydrology 348, 305–319, 2008.

POLITANO, W. **Estudo da adequabilidade do emprego de bacias hidrográficas de 3ª, 2ª, 1ª ordem de magnitude na análise morfométrica aplicada a solos.** Tese de Doutorado. Universidade Estadual Paulista. Jaboticabal. 331p, 1992.

PIERI, L.; BITTELLI, M.; WU, J.Q.; DUN, S.; FLANAGAN, D.C.; PISA, P.R.; VENTURA, F.; SALVATORELLI, F.- Using the water erosion prediction project (WEPP) model to simulate field-observed runoff and erosion in the Apennines mountain range, Italy. J. Hydrol., 336 (2007), pp. 84–97.

PIRES, F.R. **Práticas Mecânicas de Conservação do Solo e da Água.** Viçosa, 2003.

PISSARRA, T.C.T. **Avaliação quantitativa das características geomorfológicas de microbacias hidrográficas 1ª ordem de magnitude em quatro posições do sistema**

natural de drenagem. Tese de Mestrado. Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal. 124p, 1998.

PISSARRA, T. C. T.; POLITANO, W.; FERRAUDO, A. S.. **Avaliação de características morfométricas na relação solo-superfície da Bacia Hidrográfica do Córrego Rico,** Jaboticabal (SP). Revista Brasileira de Ciência do Solo. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v. 28, n. 2, p. 297-305, 2004. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/11449/1437>>.

PRITCHARD P. J.(2011) Fox and McDonald's Introduction to Fluid Mechanics; with special contributions from John C. Leylegian [electronic resource] - 8th ed. Hoboken, NJ John Wiley & Sons xviii, 875 p.

QUERINO, C. A. S.; MOURA, M. A. L.; LYRA, R. F. DA F. E MARIANO, G. L. **Avaliação e comparação de radiação solar global e albedo com ângulo zênital na região amazônica.** Revista Brasileira de Meteorologia, v.21, n.3a, 42-49, 2006.

RACLOT, D.; ALBERGEL, J. (2006)- Runoff and water erosion modelling using WEPP on a Mediterranean cultivated catchment. Physics and chemistry of the Earth. B. Hydrology, Oceans and Atmosphere 31: 1038-347

RAWLS, W. J.; BRAKENSIEK, D. L.; SAXTON, K. E. **Estimation of Soil Water Properties.** Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, v.25, n.5, p. 1316-1320, 1982.

RENARD, K. G.; FOSTER, G. R.; WEESIES, G. A.; PORTER, J. P. RUSLE - Revised universal soil loss equation. Jornal of Soil and Water Coservation, v. 46, n. 1, p. 30-33, 1991.

RODRIGUES, L.N.; PRUSKI, F.F. **Otimização do desempenho de sistemas de irrigação do tipo pivô-central com o uso da equação de Green-Ampt.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA. Vol. 26. 1997.

SALOMÃO, F. X. De T. **Controle e prevenção dos processos erosivos.** In: GUERRA, A.J.T.; SILVA, A.S. DA; BOTELHO, R.G.M. (Orgs.), Erosão e Conservação dos Solos. Conceitos, Temas e Aplicações. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2a. ed., p. 229-268, 2005.

SADAT-HELBAR, S.M., AMIRI-TOKALDANY, E., DARBY, S. and SHAFIAIE, A. (2009). Fall Velocity of Sediment Particles. Proceeding of the 4th IASME/WSEASInt. Conference on water resources, Hydraulics and Hydrology (WHH'09).

SANTOS, D. B. O.; BLANCO, C. J. C.; PESSOA, F. C. L. **RUSLE para Determinação da Tolerância de Perda de Solo.** *Biota Amazônia (Biote Amazonie, Biota Amazonia, Amazonian Biota)* 5.4 (2015): 78-83.

SANTOS, L. L. **Modelagem hidrossedimentológica e avaliação comparativa de três modelos em pequenas sub-bacias na região semi-árida Paraibana.** Dissertação de Mestrado. Universidade de Campina Grande. Campina Grande, 2008.

SANTOS, R. F. (org.) **Vulnerabilidade Ambiental: Desastres naturais ou fenômenos induzidos?** Brasília: MMA, 192 p, 2007.

SAVABI, M.R.; WILLIAMS, J.R. Water balance and percolation. In: USDA. **Water erosion prediction project – WEPP**. West Laffayette: USDA-ARS-MWA-SWCS, 1995. Cap. 5, p. 5.1-5.14. (Technical documentation. NSERL. Report, 10).

SILVA, B. N. R. DA; SILVA, L.G.T.; ROCHA, A. M. A.; SAMPAIO, S. M. N. **Interação biofísica e do uso da terra na dinâmica da paisagem do município de Capitão Poço - PA, em sistema de informação geográfica**. Belém: Embrapa Amazônia Oriental, 1999. 42p. (Embrapa Amazônia Oriental. Documentos, 10).

SILVA, D. S. S; BLANCO, C. J. C.; SANTOS, K. N. S DOS; PESSOA, C. L. – **Modelo de langbein-schumm e estimativa de produção de sedimentos de bacias com áreas preservadas**. Revista de Engenharia e Tecnologia. v. 7, No. 4, 2015.

SINGH, R. K., PANDA, R. K., SATAPATHY, K. K., NGACHAN, S. V. **Simulation of runoff and sediment yield from a hilly watershed in the eastern Himalaya, India using the WEPP model**. Journal of Hydrology, v. 405, 261–276, 2011.

SPAROVEK, G., BACCHI, O.O.S., SCHUNUG, E., RANIERI, S.B.L., MARIA, I.C. **Comparison of three water erosion prediction methods (137Cs, WEPP, ELSE) in south-east brasilian sugarcane production**. *Der Tropenlandwirt -Beiträge zur tropischen Landwirtschaft und Veterinärmedizin*, v. 101, p. 107 – 118, 2000.

STONE, J.L.; LANE, L.J.; SHIRLEY, E. D.; HERNANDEZ, M. **Hillslope surface hydrology**. In: USDA. **Water erosion prediction project – WEPP**. West Laffayette: USDA-ARS-MWA-SWCS, 1995. Cap.4, p.41 – 4.20. (Technical documentation, NSERL, Report n.10).

TORRES, E. C. **Processos erosivos no norte do Paraná: o caso de micro-bacias do município de Londrina-Paraná Brasil**. Encontro de Geógrafos da America latina - Perú 2013.

TUCCI, C. E. M. **Modelos Hidrológicos**. Porto Alegre: Editora da UFRGS e ABRH, 2012.

WALLING, D.E. The sediment delivery problem. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v.65, p. 209-237, 1983.

WETZEL, R. G.; BOAVIDA, M. J. **Limnologia**. Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa.1993.

WILLIAMS, J. R. Sediment routing for agricultural watersheds. *Water Resources Bulletin*, v. 11, n.5, p. 965-974, 1975

WISCHMEIER, W.H.; SMITH, D.D. **Predicting Rainfall Erosion Losses: a Guide to Conservation Planning**. Washington: USDA, 1978. 58p. (Agricultural Handbook, 537).

WOOLHISER, D. A., SMITH, R. E. & GOODRICH, D.C. **KINEROS, a kinematic runoff and erosion model: documentation and user manual**. U.S. Department of Agriculture, Agricultural Research Service, ARS-77, 1990.

ZHAN, Y.; J. DEGROOTE, WOLTER, C; SUGUMARAN, R. **Integration of modified universal soil loss equation (MUSLE) into a GIS framework to assess soil erosion risk.** Land Degradation & Development, v. 20, p. 84-91, 2009.

ZHANG, Q.; DONG Y.; LI F.; ZHANG A.; LEI, T. **Quantifying detachment rate of eroding rill or ephemeral gully for WEPP with flume experiments.** Journal of Hydrology 519, 2012–2019, 2014.

ZHANG, G. H.; LIU, B. Y.; ZHANG, X. C. **Applicability of WEPP sediment transport equation to steep slopes.** Trans. ASABE 51(5): 1675-1681, 2008.

7 APÊNDICE

Apêndice 1– Elementos da discretização da sub-bacia 1 com 16 elementos

ELEMENTO	ÁREA	C (m)	L (m)	S %
H1	251,25	894,24	2809,60	1,1
H2	199,3	1769,88	1126,07	1,1
H3	42,58	906,01	469,98	1,1
H4	57,21	1199,99	476,77	0,8
H5	58,53	710,69	823,63	1,4
H6	57,31	700,01	818,64	1,4
H7	74,59	758,8	983,01	1,3
H8	13,13	170,48	770,30	5,9
H9	32,25	414,48	778,08	2,3
H10	38,73	393,52	984,08	2,5
H11	108,82	967,8	1124,43	0,9
C1	-	1126,07	9,90	6,2
C2	-	477,71	9,90	14,6
C3	-	819,85	9,90	7,3
C4	-	983,01	9,90	6,1
C5	-	771,19	9,90	7,8

Apêndice 2– Elementos da discretização da sub-bacia 2 com 18 elementos

ELEMENTO	ÁREA	C (m)	L (m)	S %
H1	377,84	1603,06	2357,00	0,6
H2	468,00	2689,11	1740,36	0,7
H3	330,02	1900,80	1736,23	0,9
H4	188,83	1834,80	1029,16	1,6
H5	521,16	5046,49	1032,72	0,4
H6	107,22	1441,13	743,97	0,7
H7	76,81	1038,84	739,41	0,9
H8	119,36	989,66	1206,06	0,9
H9	141,80	1173,14	1208,71	1,7
H10	211,48	1122,58	1883,91	1,7
H11	6,01	198,66	302,39	29,1
H12	51,15	258,92	1975,33	3,7
C1	-	1734,77	9,90	4,0
C2	-	1029,33	9,90	6,8
C3	-	741,69	9,90	9,43
C4	-	1202,42	9,90	5,8
C5	-	1978,55	9,90	0,5

C6	-	303,01	9,90	19,8
-----------	---	--------	------	------

Apêndice 3– Características dos planos da Sub – Bacia 1

PLANOS	ke	si	Tau	Kr	ki
H1	7,5	79,95	22	0,0001	1,00E+06
H2	7,5	65,95	22	0,0001	1,00E+06
H3	7,5	84,35	22	0,0001	1,00E+06
H4	7,5	72	22	0,0001	1,00E+06
H5	7,5	89	22	0,0001	1,00E+06
H6	7,5	67	22	0,0001	1,00E+06
H7	7,5	86	22	0,0001	1,00E+06
H8	7,5	90	22	0,0001	1,00E+06
H9	7,5	70	22	0,0001	1,00E+06
H10	7,5	87,15	22	0,0001	1,00E+06
H11	7,5	97	22	0,0001	1,00E+06

Apêndice 4- Características dos planos da Sub –Bacia 2

PLANOS	ke	si	Tau	Kr	ki
H1	12,5	79,45	20	0,0001	1,00E+05
H2	12,5	77,28	20	0,0001	1,00E+05
H3	12,5	76	20	0,0001	1,00E+05
H4	12,5	80,95	20	0,0001	1,00E+05
H5	12,5	82	20	0,0001	1,00E+05
H6	12,5	78	20	0,0001	1,00E+05
H7	12,5	68	20	0,0001	1,00E+05
H8	12,5	91	20	0,0001	1,00E+05
H9	12,5	82	20	0,0001	1,00E+05
H10	12,5	79	20	0,0001	1,00E+05
H11	12,5	81	20	0,0001	1,00E+05
H12	12,5	82	20	0,0001	1,00E+05

8 ANEXOS

Anexo A1– Parâmetros do arquivo de uso e manejo na base de dados internos disponíveis no modelo WEPP

Start Grazing Schedule - Cows					
Begin Date	End Date	Number of Animals	Field Size (m ²)	Body Weight (Kg)	Digestibility
4/10	4/25	16	10000	500	0.5
5/10	6/20	50	10000	200	0.7
7/1	7/29	30	10000	200	0.6
8/2	9/1	60	10000	120	0.55

Plant – Annual – Forest Perennial		
Parameter	Value	Units
Plant Growth and Harvest Parameters		
Biomass energy ratio	15	kg/MJ
Growing degree days to emergence	5	Degrees C.days
Growing degree days for growing season	0	Degrees C.days
In-row plant spacing	200	cm
Plant stem diameter at maturity	25	cm
Height of post-harvest standing residue; cutting height	2000	cm
Harvest index (dry crop yield/total above ground dry biomass)	42	%
Temperature and Radiation Parameters		
Base daily air temperature	2	Degrees C
Optimal temperature for plant growth	20	Degrees C
Maximum temperature that stops the growth of a perennial crop	40	Degrees C
Critical freezing temperature for a perennial crop	-40	Degrees C
Radiation extinction coefficient	0.9	
Canopy, LAI and Root Parameters		

Canopy cover coefficient	14	
Parameter value for canopy height equation	3	
Maximum canopy height	600	cm
Maximum leaf area index	6	
Maximum root depth	200	cm
Root to shoot ratio (% root growth/% above ground growth)	33	%
Maximum root mass for a perennial crop	0.5	kg/sq.m
Senescence Parameters		
Percent of growing season when leaf area index starts to decline (0-100%)	50	%
Period over which senescence occurs	90	days
Percent canopy remaining after senescence (0-100%)	50	%
Percent of biomass remaining after senescence (0-100%)	80	%
Residue Parameters		
Parameter for flat residue cover equation	5	sq.m/kg
Standing to flat residue adjustment factor (wind, snow, etc.)	99	%
Decomposition constant to calculate mass change of above-ground biomass	0.006	
Decomposition constant to calculate mass change of root-biomass	0.006	
Use fragile or non-fragile mfo values	Non-Fragile	
Other Parameters		
Plant specific drought tolerance (% of soil porosity)	10	%
Critical live biomass value below which grazing is not allowed	0	kg/sq.m
Maximum Darcy Weisbach friction factor for living plant	17	
Harvest Units	WeppWillSet	
Optimum yield under no stress conditions	0	kg/sq.m