

UNESP  UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”

CAMPUS DE GUARATINGUETÁ

CELSO DE SOUZA CATELANI

**GEOTECNOLOGIAS APLICADAS À ANÁLISE DO ASSOREAMENTO
DE RESERVATÓRIOS DE HIDRELÉTRICAS EM CENÁRIO DE
ESCASSEZ DE DADOS DE SÉRIES HISTÓRICAS**

**Guaratinguetá
2015**

CELSO DE SOUZA CATELANI

**GEOTECNOLOGIAS APLICADAS À ANÁLISE DO ASSOREAMENTO
DE RESERVATÓRIOS DE HIDRELÉTRICAS EM CENÁRIO DE
ESCASSEZ DE DADOS DE SÉRIES HISTÓRICAS**

Tese apresentada ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica na área de Energia.

Orientador: Prof. Dr. Sílvio Jorge Coelho Simões.
Co-orientadora: Prof^a Dr^a Isabel Cristina de Barros Trannin.

**Guaratinguetá
2015**

C358g Catelani, Celso de Souza
Geotecnologias aplicadas à análise do assoreamento de reservatórios de hidrelétricas em cenário de escassez de dados de séries históricas / Celso de Souza Catelani – Guaratinguetá, 2015
138 f : il.
Bibliografia: f. 129-138

Tese (doutorado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2015.
Orientador: Prof. Dr. Sílvio Jorge Coelho Simões
Coorientadora: Prof^a Dr^a Isabel Cristina de Barros Trannin

1. Solos - Erosão 2. Geotecnologia ambiental 3. Bacias sedimentares
4. Sedimentos (Geologia) I. Título


CDU 624.131.6(043)

CELSO DE SOUZA CATELANI

ESTA TESE FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
“DOUTOR EM CIÊNCIAS”

PROGRAMA: ENGENHARIA MECÂNICA
ÁREA: ENERGIA

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO


Prof. Dr. Edson Cocchieri Botelho
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. SILVIO JORGE COELHO SIMÕES
Orientador/UNESP


Prof. Dr. LUIZ FERNANDO COSTA NASCIMENTO
UNESP-FEG


Prof. Dr. MARCELO DOS SANTOS TARGA
UNITAU


Prof. Dr. PAULO AUGUSTO ROMERA E SILVA
DAEE/FCTH


Prof. Dr. SUELLYOSHINAGA PEREIRA
UNICAMP

Agosto de 2015

DADOS CURRICULARES
CELSO DE SOUZA CATELANI

NASCIMENTO	06.02.1970 – CAÇAPAVA/SP
FILIAÇÃO	Guilherme Catelani Apparecida de Souza Catelani
2001/2004	Curso de Graduação em Geografia (Bacharelado e Licenciatura), Universidade de Taubaté.
2005/2007	Curso de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, nível de Mestrado, Universidade de Taubaté.
2011/2015	Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, nível de Doutorado, faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista Julio de Mesquita Filho.

DEDICATÓRIA

*Dedico esta obra aos meus pais, a quem
tudo devo, por sua afetividade
incondicional e presente em todos os
momentos da minha vida, seja a que
distância for.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar a Deus pelo dom da vida, pela saúde e pela proteção nos caminhos em que me guia.

Aos meus pais Guilherme Catelani e Aparecida de Souza Catelani, por tudo na minha vida.

À minha amada esposa Adalgisa pela paciência, apoio, incentivo, confiança e companheirismo nas horas mais difíceis e nas privações, que foram muitas nesse período, por assimilar minha ausência e me acolher sempre com um sorriso, o seu sorriso único.

Ao pessoal de casa, minha sogra Dona Enedina, ao Meu Sogro Alberto Carlos (Seu Carlinho), minhas crianças, Amanda, Bruno, Débora e Matheus, amo vocês!!! A todos os meus sobrinhos.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Sílvio Jorge Coelho Simões, pela acolhida no programa de pós-graduação, pelo convívio acadêmico, pelas discussões e orientações técnicas, pela disponibilidade e paciência no decorrer desse período da minha vida, muito grato Professor!!!!

À minha co-orientadora Prof^a Dr^a Isabel Cristina de Barros Trannin por praticamente ter me adotado no decorrer da orientação, pelo convívio acadêmico, pelas inserções duras e firmes para me manter no foco o tempo todo, pelas discussões por vezes acaloradas, características únicas do seu jeito de orientar, muito grato Professora!!!!!!

Aos amigos diretamente envolvidos na pesquisa, David Drezza, Willian, Bruno e Alessandra.

Aos amigos incentivadores de sempre, Batatinha, Marcondes, Jorge, Roxane, Karina Mary, Eliana, Eduardo Montesi, Claudinei, Meu Cunhado Adalberto e a todos que de alguma forma incentivaram, acreditaram e contribuíram para a realização desse estudo.

Ao Maurinho, ao Sérgio e a um grande amigo, José Marcos Vieira, (*in memoriam*) o maior representante da frase “Só Alegria” que conheci em toda minha vida. Ao Gastão Villalba e ao Camarguinho.

Ao pessoal da secretaria do programa, especialmente à Cristina e a Renata pelo apoio de sempre nas muitas dúvidas durante esse período.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de doutorado.

EPIGRAFE

*"Há homens que lutam um dia e são bons.
Há outros que lutam um ano e são melhores.
Há os que lutam muitos anos e são muito bons.
Porém, há os que lutam toda a vida.
Esses são os imprescindíveis."*

Bertolt Brecht.

CATELANI, C. S. **Geotecnologias aplicadas à análise do assoreamento de reservatórios de hidrelétricas em cenário de escassez de dados de séries históricas**. 2015. 138 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2015.

RESUMO

Conhecer o potencial de produção de sedimentos é imprescindível na análise da viabilidade de implantação de uma Pequena Central Hidrelétrica (PCH), para que não haja comprometimento da longevidade e da eficiência do empreendimento. Esse estudo foi desenvolvido na bacia hidrográfica contribuinte da PCH Costa Rica (MS), de aproximadamente 1.200 km², que apresenta escassez de dados de séries históricas de dados hidrológicos e hidrossedimentológicos, o que consiste em desafio para a obtenção de resultados com grau de confiabilidade e passíveis de serem replicados. O objetivo desse estudo foi avaliar o potencial de perda de solo e produção de sedimentos por meio de modelagem utilizando o software Soil and Water Assessment Tool (SWAT) e geotecnologias de Sistemas de Informações Geográficas (SIG). Os resultados demonstraram uma elevada produção de sedimentos na bacia contribuinte da PCH Costa Rica, com valores totais que alcançaram 1.049.522 Mg ano⁻¹, o correspondente a 8,43 Mg ha⁻¹ano⁻¹ e equivalente a perda de uma camada contínua de solo de 0,0566 mm por ano. A modelagem pelo SWAT e o uso de geotecnologias foram eficientes na avaliação e quantificação do potencial de perdas de solo e de contribuição para o assoreamento de reservatórios de hidrelétricas, mesmo em cenário de escassez de dados de séries históricas. A utilização do SWAT para a modelagem da bacia apresentou nos valores dos dados simulados e observados uma correlação ou momento de Pearson forte e positiva (acima de 0,6) e moderada positiva (entre 0,3 e 0,6) para calibração e validação respectivamente, o que permite utilizar os dados quantitativos de sedimentos gerados na bacia e identificar quais sub-bacias apresentam maiores taxas de produção de sedimentos. A avaliação das mudanças no uso do solo entre os anos de 1984 e 2011 demonstrou que além da vulnerabilidade natural do meio físico, a remoção da vegetação de Cerrado para uso agropecuário, sem a adoção de práticas conservacionistas, intensificou os processos erosivos nas últimas décadas, comprometendo o desempenho da PCH Costa Rica na produção de energia.

Palavras-Chave: geotecnologia, modelagem, produção de sedimentos, SWAT.

CATELANI, C. S. Geotechnology applied to silting analysis of hydroelectric reservoirs in a scenario of limited time series data. 2015. 138 f. Thesis (Doctor in Mechanical Engineering) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2015.

ABSTRACT

Knowledge about potential sediment production is essential for the feasibility analysis to implement a Small Hydropower Plant (PCH, in Portuguese) for long term efficient operation. This study was developed in the PCH Costa Rica (MS) watershed, with approximately 1,200 km² that has limited historical series of hydrological and hydrosedimentological data what make reliable estimations and replication of results difficult. This study aimed to predict the potential soil loss and sediment yield using a model based on the software Soil and Water Assessment Tool (SWAT) and Geographic Information Systems (GIS) techniques. The results showed that the PCH Costa Rica watershed has a high potential to produce sediments, with total amount reaching 1,049,522 Mg year⁻¹, corresponding to 8.43 Mg ha⁻¹ yr⁻¹ and a continuous loss of soil layer of 0.0566 mm yr⁻¹. SWAT modeling and geo-technologies were efficient in the evaluation and quantification of potential soil loss and sediment production in this watershed, even in a scenario of limited data. Modeling watershed using SWAT resulted in strong positive range (above 0.6) of Pearson correlation between simulated and observed values and moderate positive values (0.3 to 0.6) for the calibration and validation, respectively. This allows quantitative estimations of sediments generated in the watershed and identification of sub-basins with higher rates of sediment production by modeling. The assessment of changes in land use between 1984 and 2011 showed that in addition to the natural vulnerability of physical environment, the conversion of Savannah vegetation to agricultural use, without conservation practices, increased the erosion rates in recent decades, compromising the performance of PCH Costa Rica for energy production.

Keywords: modeling, sediment, hydropower, watershed, SWAT

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Formação de depósitos de sedimentos nos reservatórios e seus principais problemas.....	36
Figura 2 - Diagrama de resultados da produção de sedimentos	41
Figura 3 - Localização da bacia contribuinte da PCH Costa Rica (MS), na região centro-oeste do Brasil	47
Figura 4 - Mapa geológico da região de Costa Rica (MS), em escala de 1:250.000	48
Figura 5 - Lineamentos, destacando os padrões de fraturamento regional, que controla a direção dos principais rios na região de Costa Rica (MS)	50
Figura 6 - Recorte do mapa de solos dos Estados do Mato Grosso do Sul e Goiás.....	51
Figura 7 - Mapa da rede de drenagem da bacia contribuinte da PCH Costa Rica, sobre o Modelo Digital de Elevação obtido a partir de imagem SRTM da região de Costa Rica (MS)	53
Figura 8 - Formulário on-line de requisição de dados climáticos do Global Weather Data for SWAT (CFSR).....	54
Figura 9 - Mapa com a distribuição espacial das estações de dados climáticos	54
Figura 10 - Distribuição das temperaturas máxima e mínima, no período de 1979 a 2014	55
Figura 11 - Distribuição da precipitação mensal, no período de 1979 a 2014.....	55
Figura 12 - Distribuição da incidência de radiação solar média mensal.....	56
Figura 13 - PCH Costa Rica, em funcionamento desde 1997, utilizando a água do rio Sucuriú próxima ao Salto Majestoso	57
Figura 14 - Draga instalada no canal de adução da PCH Costa Rica (MS)	58
Figura 15 - Sedimentos retirados do canal de adução da PCH Costa Rica.....	58
Figura 16 - Principal voçoroca localizada à montante do reservatório da PCH de Costa Rica.....	59
Figura 17 - Identificação de processo erosivo recente na voçoroca da bacia hidrográfica à montante da PCH Costa Rica.....	60
Figura 18 - Vista tomada a partir da borda da voçoroca existente à montante da PCH Costa Rica	62

Figura 19 - Equipamentos utilizados na realização do levantamento topográfico “a” GPS Geodésico PM 200 - ASHTECH e “b”, Estação Total Ruide RTS 862/R ...	63
Figura 20 - Diagrama esquemático do fluxo de modelagem das perdas de solo com o emprego do SWAT	64
Figura 21 - Mapa índice da articulação de folhas do projeto TOPODATA	68
Figura 22 - Imagem LandSat GeoCover em composição colorida R3G4B5 utilizada como parâmetro para a correção geométrica das cenas a serem classificadas quanto ao uso do solo, visualizada com MultiSpec©. No centro, pode ser observado o núcleo urbano do município de Costa Rica (MS)	69
Figura 23 - Canais 3, 4 e 5 da imagem do LandSat TM5 órbita/ponto 224-073 de 18/07/1984, correspondentes às faixas espectrais do Vermelho (RED, no visível, com o intervalo espectral 0,6 – 0,7 μm), Infra Vermelho Próximo (NIR 0,7-1,2 μm) e Infra Vermelho Médio (SWIR 1,55 – 1,75), respectivamente.....	70
Figura 24 - Canais 3, 4 e 5 da imagem do LandSat TM5 órbita/ponto 224-074 de 30/08/2011, correspondentes às faixas espectrais do Vermelho (RED, no visível, com o intervalo espectral 0,6 – 0,7 μm), Infra Vermelho Próximo (NIR 0,7-1,2 μm) e Infra Vermelho Médio (SWIR 1,55 – 1,75), respectivamente.....	70
Figura 25 - Visualização das imagens da região da bacia hidrográfica, agrupadas em composição colorida falsa cor 3R4G5B, na esquerda a imagem de 1984, à direita a imagem de 2011	71
Figura 26 - Captura de tela dos resultados estatísticos de exatidão do mapeamento, à esquerda os resultados sobre a imagem de 1984 e à direita os resultados sobre a imagem de 2011.....	72
Figura 27 - O MDE passa por uma varredura com uma máscara de 3X3 células do grid, e associa o menor valor da célula vizinha à respectiva direção, atribuindo em um novo arquivo a respectiva posição da célula de menor valor como indicativo de talvegue.....	76
Figura 28 - Códigos de cores indicativas para classificação e mapeamento da direção de fluxo das vertentes e rede de drenagem	77
Figura 29 - Tela de passos principais do MWSWAT. A seta em laranja indica a entrada de dados dos procedimentos mencionados até esse ponto	77
Figura 30 - Captura de tela da interface de entrada de processamento dos dados para a detecção automatizada da rede drenagem, bacias e sub-bacias hidrográficas no MWSWAT.....	78
Figura 31 - Captura de tela dos resultados de processamento dos dados para a detecção automatizada da rede drenagem no MWSWAT.....	78

Figura 32 - Captura de tela dos resultados de processamento dos dados para a detecção automatizada de bacias e sub-bacias no MWSWAT, foram identificadas ao final, 123 sub-bacias à montante da PCH Costa Rica	79
Figura 33 - Seleção de uma Unidade de Resposta Hidrológica (HRU) na tela. Nessa unidade é possível identificar que é parte correspondente a 22% da bacia n° 42, a vegetação é SAVA (Cerrado), tem declividade de 0 a 10%, dentre outros.....	80
Figura 34 - Recorte da síntese do relatório de HRUs para a bacia total	80
Figura 35 - Recorte de amostra da síntese do relatório de HRUs para uma sub-bacia (7)	81
Figura 36 - Interface de configuração final dos arquivos de entrada do modelo SWAT no MWSWAT 2012	81
Figura 37 - Vista da tela do sistema durante o processamento do modelo SWAT	82
Figura 38 - Captura de tela de calibração do modelo, na interface SWAT-CUP-SUFI2.....	82
Figura 39 - Localização dos pontos de coleta de dados hidrossedimentológicos na bacia.....	84
Figura 40 - Imagem Landsat TM5 com as áreas de solo exposto na bacia contribuinte da PCH Costa Rica (MS)	90
Figura 41 - Mapa do uso do solo da bacia hidrográfica, à montante da PCH Costa Rica (MS), obtida pela classificação de imagens do satélite da série LandSat TM5, com cenas tomadas em 04/09/1984.....	91
Figura 42 - Mapa do uso do solo da bacia hidrográfica, à montante da PCH Costa Rica (MS), obtida pela classificação de imagens do satélite da série LandSat TM5, com cenas tomadas em 30/08/2011	92
Figura 43 - Imagem do mapa de uso do solo em 1984, reclassificado com códigos de uso do solo, utilizados pelo SWAT	94
Figura 44 - Imagem do mapa de uso do solo em 2011, reclassificado com códigos de uso do solo, utilizados pelo SWAT	95
Figura 45 - Mapa pedológico da bacia contribuinte da PCH Costa Rica (MS)	96
Figura 46 - Delimitação das sub-bacias da área de estudo, em vermelho, e a rede de drenagem correspondente, em azul, com a respectiva numeração de identificação.....	99
Figura 47 - Amostra dos dados de vazões da estação de código 63001000, operada pela Agência Nacional de Águas (ANA), utilizados para calibração	99

Figura 48 - Captura de tela da calibração do modelo. A faixa em verde corresponde aos 95% de predição de incertezas (95PPU), para a variável vazão (Flow Out)	100
Figura 49 - Gráfico do coeficiente de determinação entre os dados observados e simulados pelo SWAT.....	101
Figura 50 - Dados de vazão observada e vazão simulada na fase de calibração.....	101
Figura 51 - Recorte do sumário estatístico da fase de calibração, com os valores de média e desvio padrão dos dados simulados e observados respectivamente	102
Figura 52 - Captura de tela da fase de validação do modelo. A faixa em verde corresponde aos 95% de predição de incertezas (95PPU), para a variável vazão (Flow Out)	102
Figura 53 - Gráfico do coeficiente de determinação entre os dados observados e simulados pelo SWAT.....	103
Figura 54 - Gráfico dos dados de vazão observada e vazão simulada pelo SWAT na fase de validação.....	103
Figura 55 - Recorte do sumário estatístico da fase de validação, com os valores de média e desvio padrão dos dados simulados pelo SWAT e observados, respectivamente	104
Figura 56 - Gráfico do período de 30 anos da variável vazão (Flow_Out), modelada pelo SWAT	104
Figura 57 - Mapa de distribuição da produção de sedimentos das sub-bacias ($Mg\ ha^{-1}\ mês^{-1}$), e de concentração de sólidos em suspensão nos cursos d'água que compõem a bacia contribuinte da PCH Costa Rica ($mg\ kg^{-1}$).....	105
Figura 58 - Recorte do mapa de geodiversidade do Estado do Mato Grosso do Sul (CPRM, 2009)	106
Figura 59 - Perfil do relevo extraído do MDE da bacia contribuinte da PCH Costa Rica (MS). Em detalhe, o degrau estrutural e a borda erosiva entre as unidades geomorfológicas de chapadas e platôs (no centro e à direita do perfil) e de planaltos com predomínio de espessos pacotes de arenito em deposição mista, à esquerda do degrau estrutural.....	107
Figura 60 - Distribuição dos pontos do levantamento topográfico sobre imagem de alta resolução espacial (Versão livre do Google Earth, 2014)	108
Figura 61 - Resultado do levantamento topográfico da voçoroca em visualização 3D do modelo numérico do terreno (MNT)	109

Figura 62 - Precipitações ocorridas em Costa Rica (MS), nos meses de março, no período de 1984 a 2006	110
Figura 63 - Precipitações ocorridas em Costa Rica (MS) nos meses de agosto, no período de 1984 a 2006	111
Figura 64 - Vazões obtidas nos pontos amostrados na estação chuvosa e seca dos anos de 2012 e 2013 na bacia do Alto Rio Sucuriú.....	113
Figura 65 - Descarga de sólidos totais amostrada na bacia hidrográfica contribuinte da PCH Costa Rica (MS).....	115
Figura 66 - Concentrações de sólidos em suspensão amostrados no período de chuva e seca nos anos de 2012 e 2013 na bacia contribuinte da PCH Costa Rica (MS), e os limites estabelecidos por Carvalho et al. (2000).....	117
Figura 67 - Fração orgânica dos sedimentos em suspensão, presente nos pontos amostrados na bacia hidrográfica contribuinte da PCH Costa Rica (MS)	122
Figura 68 - Descarga sólida total em Mg dia^{-1} na bacia contribuinte da PCH Costa Rica correspondente à estação seca.	123
Figura 69 - Descarga sólida total em Mg dia^{-1} na bacia contribuinte da PCH Costa Rica correspondente à estação chuvosa.....	124
Figura 70 - Recorte de Imagem orbital disponibilizada no GoogleEarth, de 2014, onde nota-se novamente a formação de um grande banco de sedimentos imediatamente à montante da planta geradora	126

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Potência instalada de geração de energia elétrica no Brasil (2014).....	23
Tabela 2 – Relação parcial de reservatórios brasileiros que apresentam problemas de assoreamento.....	34
Tabela 3 - Índice de variáveis geomorfométricas do projeto TOPODATA	67
Tabela 4 – Relação entre as classes de solos de ocorrência na área de estudo e as classes correspondentes no banco de dados de solos do SWAT.....	73
Tabela 5 – Parâmetros para formatação ASCII do arquivo de entrada de dados climáticos .WGN. No exemplo, além do cabeçalho, as variáveis são somente de temperatura, procedimento similar é feito para os dados de precipitação, radiação solar, umidade relativa e velocidade do vento	75
Tabela 6 - Número de pontos de medição em uma vertical de acordo com a profundidade do rio, recomendado para medições de vazão.....	85
Tabela 7 - Distância entre as verticais de acordo com a largura do rio, recomendado para medições de vazão	85
Tabela 8 - Volume de amostra necessário para a determinação da concentração de sedimentos em suspensão (World Meteorological Organization, 1981).....	87
Tabela 9 - Classes de uso do solo na bacia, à montante do reservatório da PCH Costa Rica, em 1984, expressos em km ² e porcentagem	92
Tabela 10 - Classes de uso do uso da bacia, à montante do reservatório da PCH Costa Rica, em 2011, expressos em km ² e porcentagem	93
Tabela 11 - Áreas em km ² das classes de uso do solo derivadas da tabulação cruzada do mapeamento na bacia, à montante da PCH de Costa Rica. As linhas apresentam os dados do mapeamento da imagem de 1984 e nas colunas estão os dados do mapeamento da imagem de 2011	93
Tabela 12 -. Resultados da reclassificação dos mapas de uso do solo, compatibilizado com o modelo SWAT, na bacia hidrográfica contribuinte da PCH Costa Rica (MS), entre os anos 1984 e 2011, expressos em km ² e porcentagem	95
Tabela 13 - Classes de solos de ocorrência na bacia contribuinte da PCH Costa Rica (MS), expressos em km ² e porcentagem	97
Tabela 14 - Classes de solos de ocorrência na contribuinte da PCH Costa Rica (MS), e características físicas utilizadas na modelagem com SWAT.....	97

Tabela 15 - Conjunto de dados de vazões médias mensais observadas na estação de código 63001000 operada pela ANA, utilizados para calibração e validação do modelo	100
Tabela 16 - Produção de sedimentos em toneladas por ano, modelada para um intervalo de 30 anos na bacia contribuinte da PCH Costa Rica (MS).....	107
Tabela 17 - Classificação da intensidade de precipitação (ASSIS, 1996)	111
Tabela 18 - Descarga líquida (vazão) obtida na estação chuvosa e na estação seca dos anos de 2012 e 2013, nos pontos de amostragem da bacia hidrográfica contribuinte da PCH Costa Rica (MS)	112
Tabela 19 - Descarga sólida total de sedimentos obtida na estação chuvosa e seca, nos pontos amostrados da bacia hidrográfica contribuinte da PCH Costa Rica (MS), nos anos de 2012 e 2013	114
Tabela 20 - Concentrações de sólidos em suspensão, obtidas na estação chuvosa e seca, nos pontos amostrados da bacia hidrográfica contribuinte da PCH Costa Rica (MS), nos anos de 2012 e 2013	116
Tabela 21 - Granulometria dos sedimentos em suspensão, obtida nos 16 pontos amostrais da bacia hidrográfica contribuinte da PCH Costa Rica (MS), na estação chuvosa em 2012	117
Tabela 22 - Granulometria dos sedimentos em suspensão, obtida nos 16 pontos amostrais da bacia hidrográfica contribuinte da PCH Costa Rica (MS), na estação chuvosa em 2013	118
Tabela 23 - Granulometria dos sedimentos em suspensão, obtida nos 16 pontos amostrais da bacia hidrográfica contribuinte da PCH Costa Rica (MS), na estação seca em 2012	118
Tabela 24 - Granulometria dos sedimentos em suspensão, obtida nos 16 pontos amostrais da bacia hidrográfica contribuinte da PCH Costa Rica (MS), na estação seca em 2013	118
Tabela 25 - Porcentagem da granulometria dos sedimentos de fundo, obtida nos 16 pontos amostrais da bacia hidrográfica contribuinte da PCH Costa Rica (MS), na estação chuvosa 2012	119
Tabela 26 - Porcentagem da granulometria dos sedimentos de fundo, obtida nos 16 pontos amostrais da bacia hidrográfica contribuinte da PCH Costa Rica (MS), na estação chuvosa 2013	120
Tabela 27 - Porcentagem da granulometria dos sedimentos de fundo, obtida nos 16 pontos amostrais da bacia hidrográfica contribuinte da PCH Costa Rica (MS), na estação seca 2012.....	120

Tabela 28 - Porcentagem da granulometria dos sedimentos de fundo, obtida nos 16 pontos amostrais da bacia hidrográfica contribuinte da PCH Costa Rica (MS), na estação seca 2013..... 121

Tabela 29 - Fração orgânica dos sedimentos em suspensão presente na bacia contribuinte da PCH Costa Rica (MS) nas estações chuvosa e seca dos anos de 2012 e 2013 121

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	19
2. OBJETIVOS	21
2.1. OBJETIVO GERAL	21
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	21
3. REVISÃO DE LITERATURA.....	22
3.1 BACIAS HIDROGRÁFICAS COM POTENCIAL HIDRELÉTRICO	22
4. MATERIAL E MÉTODOS	46
4.1. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	46
4.1.1 Geologia da área de estudo	47
4.1.2 Estruturas Geológicas	49
4.1.3 Pedologia, solos de ocorrência na área de estudo.	50
4.1.4 Hidrografia.....	52
4.1.5 Dados Climáticos	53
4.2 A PCH COSTA RICA	56
4.3 DADOS E SOFTWARES UTILIZADOS	61
4.4 METODOLOGIA APLICADA	62
4.4.1 Levantamento topográfico da voçoroca.....	62
4.4.2 Pré-processamento de dados de entrada para modelagem com SWAT	63
4.4.3 Obtenção do Modelo Digital de Elevação (MDE)	66
4.4.4 Mapeamento do uso e ocupação do solo	68
4.4.5 Detecção de mudança no uso do solo	69
4.4.6 Preparação dos dados pedológicos	73
4.4.7 Preparação prévia dos dados climáticos.....	73
4.5 IMPLEMENTAÇÃO DO MWSWAT	76
4.6 CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO	82
4.7 Levantamentos de campo (Coleta de dados hidrosedimentológicos).....	83
4.7.1 Determinação de descarga líquida (Vazão).....	84
4.7.2 Determinação da Concentração de Sedimentos em Suspensão	85
4.7.3 Medição de descarga de fundo.....	86
4.7.4 Análises laboratoriais	86
4.7.5 Determinação da Concentração de Sedimentos em Suspensão	87
4.7.6 Análise Granulométrica dos Sedimentos em Suspensão	88
4.7.7 Determinação da Fração Orgânica dos Sedimentos em Suspensão.....	88
4.7.8 Análise Granulométrica dos Sedimentos de Fundo.....	88

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	90
5.1. MAPEAMENTO DO USO DO SOLO	90
5.2. DADOS PEDOLÓGICOS DA BACIA DO ALTO SUCURIÚ	96
5.2. MODELAGEM DO COMPORTAMENTO AMBIENTAL DA BACIA.....	98
5.2.1. Modelagem hidrológica da bacia.....	98
5.2.3 Dimensões da voçoroca principal	108
5.3. DADOS HIDROSEDIMENTOLÓGICOS	109
5.3.1 Distribuição da pluviosidade média nos meses planejados para a coleta de dados	110
5.3.2 Resultados medidos da descarga líquida (Vazão).....	112
5.3.3 Descarga sólida total.....	113
5.3.4 Concentrações de sólidos em suspensão	115
5.3.5 Granulometria dos sólidos em suspensão do Alto Rio Sucuriú.....	117
5.3.5 Granulometria dos Sólidos de Fundo	119
5.3.6 Fração orgânica dos sedimentos em suspensão.....	121
6. CONCLUSÕES.....	127
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	129

1. INTRODUÇÃO

A matriz energética brasileira desenvolveu-se predominantemente com a utilização das vantagens naturais oferecidas pela extensa rede de drenagem. Essa rede de drenagem é composta por cursos d'água perenes, caudalosos e com declives formadores de corredeiras que resultam em grande potencial hidrelétrico. No entanto, as potenciais locações para grandes aproveitamentos hidrelétricos já se esgotaram, e a demanda crescente e contínua por segurança energética remete o país à utilização das locações restantes, ainda que de menor potencial, para suprir essa crescente demanda. Neste sentido, as pequenas centrais hidrelétricas (PCHs) ocupam um importante papel no atendimento a crescente demanda energética do país, e ainda contam com a disponibilidade de locações para novas plantas geradoras.

Para o atendimento das necessidades técnicas de planejamento, dimensionamento e análise da sustentabilidade e longevidade de empreendimentos dessa natureza, faz-se necessário a utilização da tecnologia de coleta e processamento de informações acerca dos meios físico, biótico, social e econômico, tanto da área de implantação da planta geradora de energia, quanto da regionalização das demandas e das condicionantes locais que se traduzirão nos índices de viabilidade do empreendimento.

A análise de empreendimentos já instalados, empregando o uso de geotecnologias para a apuração das causas de problemas detectados após alguns anos de operação (KUWAJIMA, 2012), bem como para a indicação de soluções preventivas, se traduzem numa necessidade imediata, dado o potencial de analisar desde a holística (Grandes bacias e suas interações) até a especificidade de uma bacia local, que venha a se constituir como empecilho ao potencial de geração e ou se tornar um núcleo de custos que possa afetar a receita ou até inviabilizar e comprometer seriamente a manutenção ou a longevidade do empreendimento (PIMAN et al., 2013), como é o caso do assoreamento dos reservatórios das hidrelétricas, desde pequenas centrais, até grandes empreendimentos hidrelétricos.

Esse tipo de análise, no entanto é fortemente dependente da disponibilidade de dados de séries históricas, e de parâmetros relacionados a Unidades de Resposta Hidrológica, HRU (ARNOLD et al., 2000), frequentemente restritos a estudos focados na América do Norte ou Europa, ou ainda em pequenas bacias instrumentalizadas para pesquisa, e não disponíveis para a realidade continental brasileira e demais países das zonas tropicais.

Nesse sentido, a aplicação de modelagem e geotecnologias para a avaliação e a quantificação do processo de assoreamento de reservatórios de hidrelétricas, em cenário de escassez de dados de séries históricas, pode se constituir numa importante ferramenta para o entendimento desse processo.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GERAL

O objetivo desse estudo foi aplicar uma metodologia para avaliar e quantificar por meio de modelagem e geotecnologias, o potencial de perdas de solo e, conseqüentemente, de assoreamento de reservatórios de hidrelétricas em cenários de escassez de dados de séries históricas.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar o levantamento do meio físico, utilizando imagens de satélite, modelo digital de elevação e mapas temáticos da bacia contribuinte da PCH Costa Rica, para avaliar as mudanças no uso do solo no período compreendido entre 1984 e 2011;
- Obter dados hidroclimatológicos e hidrossedimentológicos para a modelagem e a quantificação da carga de sedimentos totais relacionados à vazão na bacia contribuinte da PCH Costa Rica;
- Modelar o potencial de produção de sedimentos e sua contribuição no assoreamento do reservatório da PCH Costa Rica, empregando o software de modelagem Soil and Water Assessment Tool (SWAT).

3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1 BACIAS HIDROGRÁFICAS COM POTENCIAL HIDRELÉTRICO

A forma mais usual de caracterizar e definir uma bacia hidrográfica é considerando os divisores topográficos das vertentes, ou seja, como um conjunto de terras drenadas por um rio principal e seus afluentes (GUERRA, 1978) ou como uma área limitada por divisores de água, dentro da qual são drenados os recursos hídricos através de um curso de água, como um rio e seus afluentes (CHRISTOFOLETTI, 1980). A área física, assim delimitada, constitui-se em importante unidade de planejamento, sendo adotada por vários órgãos nacionais e internacionais, como unidade de gestão de recursos hídricos e de interações socioambientais e físico-bióticas, inclusive do setor energético, cuja abrangência, frequentemente, extrapola os limites dos divisores de água (ROSS, 2003).

Para efeitos legais, no Brasil, a Lei Federal 9.433, de 8 de janeiro de 1997, que instituiu a Política Nacional de Recursos Hídricos, adota a bacia hidrográfica como unidade de estudo da interação entre a rede de drenagem e as populações locais, o que envolve o uso desses recursos e os impactos das atividades humanas para os usos múltiplos atuais e futuros da água.

Os aproveitamentos hidrelétricos são, geralmente, norteados por uma análise posicional do recurso hídrico na bacia propriamente dita e da localização estratégica relacionada aos centros consumidores e à logística de transmissão. De acordo com os dados do Atlas de Energia do Brasil (ANEEL, 2008), com relação à locação de empreendimentos hidrelétricos, na pesquisa dos possíveis locais barráveis, devem ser observados com especial interesse todos os trechos com corredeiras e quedas d'água, além de todos os locais que apresentem estreitamentos acentuados do vale, e deverão receber igual atenção as limitações impostas pelas condicionantes físicas e restrições socioambientais. Em cada eixo de barragem deve-se determinar o maior nível de água que o reservatório pode atingir. Esses locais devem ser caracterizados em plantas e perfis dos rios, que servirão de base para a formulação das possíveis alternativas de divisão de queda. Os critérios a serem adotados em cada caso dependerão da avaliação técnica dos parâmetros topográficos, geológicos, geotécnicos, hidrológicos e socioambientais.

A energia hidrelétrica é gerada pelo aproveitamento do fluxo das águas em uma usina, na qual as obras civis que envolvem a construção, o desvio do rio e a formação do reservatório são tão ou mais importantes que os equipamentos instalados. Por isso, ao contrário do que ocorre com as usinas termelétricas, cujas instalações são mais simples, para a construção de uma hidrelétrica é imprescindível a contratação da chamada indústria da construção pesada.

A primeira hidrelétrica do mundo foi construída no final do século XIX, junto às quedas d'água das Cataratas do Niágara, quando o carvão era o principal combustível e as pesquisas sobre petróleo ainda eram incipientes. Até então, a energia hidráulica de modo geral tinha sido utilizada apenas para a produção de energia mecânica. Na mesma época, e ainda no reinado de D. Pedro II, o Brasil construiu a primeira hidrelétrica, no município de Diamantina, utilizando as águas do Ribeirão do Inferno, afluente do rio Jequitinhonha, com 0,5 MW de potência e uma linha de transmissão com dois quilômetros de comprimento.

Em pouco mais de 100 anos, a potência instalada das unidades de geração hidrelétrica aumentou significativamente chegando a 14 mil MW, como é o caso da binacional Itaipu, construída em parceria por Brasil e Paraguai e que atualmente é a maior hidrelétrica em operação do mundo.

Todavia, o princípio básico de funcionamento para produção e transmissão da energia se mantém inalterado, o que evoluiu foram as tecnologias que permitem a obtenção de maior eficiência e confiabilidade do sistema, que ainda permanece representando 85,5% da potência instalada no Brasil (Tabela 1).

Tabela 1 - Potência instalada de geração de energia elétrica no Brasil (2014)

Fontes	Capacidade instalada (MW)		
	2014	2013	2012
Hidráulica	37.757	36.280	35.668
Eólica	258	150	103
Solar	1	-	-
Nuclear	1.990	1.990	1.990
Térmica (óleo, carvão e gás natural)	3.803	4.567	4.567
Gás de processo e biomassa	347	-	-
Total	44.156	42.987	42.328

Fonte: Centrais Elétricas Brasileiras - ELETROBRAS. Sistema de informação do potencial hidrelétrico brasileiro - SIPOT. Rio de Janeiro, abril de 2015.

As principais variáveis utilizadas na classificação de uma usina hidrelétrica são: altura da queda d'água, vazão, capacidade ou potência instalada, tipo de turbina empregada,

localização, tipo de barragem e reservatório, sendo todas interdependentes. Assim, a altura da queda d'água e a vazão dependem do local de construção e são os elementos que determinarão qual será a capacidade instalada que, por sua vez, determina o tipo de turbina, barragem e reservatório.

Com o desenvolvimento do país, o consumo de energia tem aumentado, criando a necessidade de investimentos em produção energética. O Brasil é um país com grande potencial hidroelétrico, sendo um dos países mais ricos em recursos hídricos do mundo. Com o intuito de aumentar a oferta de energia, sem perder de vista a qualidade da produção, investimentos em geração de energia limpa têm sido realizados e pequenas centrais hidrelétricas têm sido implantadas em todas as regiões do país.

De acordo com a Resolução nº 394 de 04/12/1998 da Agência Nacional de Energia Elétrica-ANEEL, pequena central hidrelétrica (PCH) é toda usina hidrelétrica de pequeno porte, com capacidade instalada superior a 1 MW e inferior a 30 MW e cuja área do reservatório seja inferior a 3 km². Normalmente uma PCH opera a fio d'água, isto é, o reservatório não permite a regularização do fluxo d'água. Com isso, em ocasiões de estiagem a vazão disponível pode ser menor que a capacidade das turbinas, causando ociosidade.

Em outras situações, as vazões são maiores que a capacidade demandada pelas máquinas, permitindo a passagem da água pelo vertedouro. Por esse motivo, o custo da energia elétrica produzida pelas PCHs é maior que o de uma usina hidrelétrica de grande porte (UHE-Usina Hidrelétrica de Energia), onde o reservatório pode ser operado de forma a diminuir a ociosidade ou os desperdícios de água. Entretanto, as PCHs são instalações que resultam em menores impactos ambientais e se prestam à geração descentralizada. Este tipo de hidrelétrica é utilizada principalmente em rios de pequeno e médio porte, que possuam desníveis significativos durante seu percurso, gerando potência hidráulica suficiente para movimentar as turbinas. As resoluções elaboradas pela ANEEL permitem que a energia gerada nas PCHs entre no sistema de eletrificação, sem que o empreendedor pague as taxas pelo uso da rede de transmissão e distribuição. O benefício vale para quem entrou em operação até 2003. As PCHs são dispensadas ainda de remunerar Municípios e Estados pelo uso dos recursos hídricos.

Por outro lado, é preciso considerar que a construção de reservatórios para a geração de energia elétrica, altera o escoamento das águas e o fluxo de sedimentos, podendo causar impactos ambientais, econômicos e sociais.

De acordo com Carvalho et al. (2000), esses impactos devem ser analisados sistematicamente por meio de programas de monitoramento aplicados às bacias hidrográficas. Entre estes programas, destaca-se o monitoramento hidrossedimentológico, que pode gerar informações, que são imprescindíveis à adoção de medidas para o controle do assoreamento dos cursos d'água e dos reservatórios.

Os impactos do assoreamento nos reservatórios incluem a redução da capacidade de armazenamento, a abrasão dos canais de fuga e das pás das turbinas; a formação de bancos de areia, com interferência na navegação e, em alguns casos, a obstrução da tomada de água (MIRANDA, 2011).

Cabral et al. (2010) consideram que o assoreamento dos reservatórios é um dos principais problemas enfrentados pelas usinas hidrelétricas, devido à diminuição da vida útil do empreendimento e à necessidade de dragagens periódicas, normalmente, de alto custo.

3.2 Processos erosivos e assoreamento de reservatórios

O desmatamento é a primeira etapa da ocupação territorial e, como a vegetação atenua a ação das chuvas sobre o solo e sua erosão, sua remoção pode estimular o desenvolvimento de algum tipo de processo erosivo, que pode ser considerado como acelerado, quando é mais rápido que o processo natural de formação do solo, não permitindo assim, que este se regenere. A erosão pode causar a degradação do solo, pela perda do horizonte A, onde se localiza a maior parte dos nutrientes essenciais às plantas, a matéria orgânica e a melhor estrutura para o desenvolvimento das raízes (DAEE/IPT, 1989).

De acordo com Camargo et al. (2003) a cobertura do solo feita pelas copas das árvores, vegetação de sub-bosque, ou pela serrapilheira de uma floresta, “amortece” a energia contida nas gotas das águas de chuva, impedindo o contato direto entre a gota d'água e as partículas do solo, evitando o primeiro passo do processo erosivo, causado por embate ou salpicamento.

A presença de matéria orgânica no solo é de extrema importância para o controle da erosão. Em solos argilosos, a matéria orgânica modifica sua estrutura, o que melhora as condições de arejamento e de retenção de água, já em solos arenosos ocorre a agregação das partículas, que firma a estrutura e diminui o tamanho dos grãos, aumentando sua capacidade

de retenção de água. A matéria orgânica pode reter duas a três vezes o seu peso em água, aumentando a infiltração e diminuindo as perdas por erosão (BERTONI, 1990).

Os solos arenosos, sobretudo os finos, secos, ácidos, pouco coesivos, coluviais e porosos são os mais propícios à erosão, podendo ocorrer tanto em terrenos levemente ondulados, quanto em terrenos acidentados. Fatores como topografia, a forma e o comprimento da vertente, têm grande influência na velocidade de formação e desenvolvimento do processo erosivo, assim como o clima, principalmente o úmido, tropical quente e temperado (MAGALHÃES, 2001).

Dentre as várias formas de erosão, a que merece maior importância é a provocada pela ação da água das chuvas, que diminui a capacidade produtiva do solo e é responsável pela maior produção de sedimentos numa bacia (DILL, 2002). A erosão pluvial ou hídrica pode ser dividida em erosão laminar e erosão em canais, sendo a última dividida em erosão em sulcos, ravinas e voçorocas.

Segundo Magalhães (2001), a erosão laminar caracteriza-se pelo desgaste e arraste uniforme e suave em toda a extensão sujeita ao agente, sendo a matéria orgânica e as partículas de argila as primeiras porções do solo a se desprenderem. Embora seja difícil observar este tipo de erosão, ela pode ser constatada pelo decréscimo de produção das culturas, pela exposição de raízes ou mesmo de marcas no caule das plantas, onde o solo tenha sido arrastado.

Os sulcos são canais que possuem profundidade e largura inferiores a 50 cm, aparecendo após precipitações muito intensas e, em áreas de pastagem, geralmente, estão associados às trilhas de gado (EMBRAPA, 2003).

As ravinas são mais largas e mais profundas que os sulcos e, normalmente, são mais compridas que largas e com profundidades variáveis, geralmente, inferiores a dez metros. É também provocada pela ação erosiva da água de escoamento superficial concentrado e são comuns em áreas de pastagem e culturas que não promovem uma boa cobertura e não apresentam manejo adequado do solo (EMBRAPA, 2003).

As voçorocas são formadas pelo aprofundamento das ravinas e a interceptação do nível freático, que induz o surgimento de água. Portanto, no desenvolvimento da voçoroca, além da erosão causada pelo escoamento superficial, atuam outros processos, como o *piping*, que são conduzidos pelo lençol freático (EMBRAPA, 2003).

O atual crescimento das áreas de produção agrícola para atender à demanda também crescente por alimentos tem aumentado o risco de perda de biodiversidade e o desequilíbrio ambiental. Um dos impactos negativos da agricultura intensiva é a erosão dos solos, causada por eventuais práticas inadequadas de manejo do solo. Os cultivos anuais, que exigem preparo frequente e, normalmente, mecanizado do solo, aumentam os riscos de erosão. Por outro lado, os cultivos perenes como, por exemplo, a fruticultura e os reflorestamentos, que representam menor risco de ocorrência de processos erosivos, geram sombra e mantém equilibrada a estrutura do solo (ARAÚJO, 2010).

Segundo Almeida (2007) o intenso processo de mecanização agrícola faz com que a estrutura do solo seja modificada, reduz o volume de poros e, conseqüentemente, a sua capacidade de absorção. Quando a mecanização é realizada em solo muito úmido ocorre sua compactação, e quando o solo está muito seco pode ocorrer a formação de torrões ou sua pulverização em partículas muito finas.

A pecuária é outra atividade com grande influência sobre o processo erosivo e depende do manejo e das tecnologias aplicadas em cada sistema de exploração adotado. Na pecuária extensiva um dos impactos ambientais negativos mais expressivos da produção animal é a compactação do solo gerada pelo superpastoreio. O superpastoreio provoca, a partir do pisoteio excessivo, alterações significativas na estrutura da camada superficial do solo e na composição da presença das espécies vegetais, intensificando a compactação dos solos e a subtração da cobertura vegetal, favorecendo o processo erosivo. A intensidade deste impacto depende da espécie vegetal que cobre o solo, do porte e da carga animal, bem como da topografia e do tipo do solo da área (ARAÚJO, 2010).

O assoreamento pode dificultar o fornecimento de água, diminuir a vida útil de reservatórios de hidrelétricas e acarretar perda de patrimônio. Mahmood (1987), em um estudo para o Banco Mundial, demonstrou que a vida útil média dos reservatórios existentes em todos os países no mundo havia decrescido de 100 para 22 anos, sendo o custo em 1987 de 6 bilhões de dólares anuais para a remoção dos volumes assoreados. O mesmo autor demonstrou também que a perda média anual de volume dos reservatórios devido ao depósito de sedimentos era de 1% ao ano, sendo variável de um país para outro, bem como de uma região para outra.

De acordo com Vörösmarty et al. (1997), mais de 25% da descarga global de sedimentos suspensos é retida pelos reservatórios. Segundo Kuwajima (2011), este acúmulo

de sedimentos causou muitos danos desde o fim do século 20, destacando-se que nos EUA, reservatórios passaram por reformas ou mesmo precisaram ser desativados e demolidos, e que nos rios Eufrates (Iraque), Mekong (Tailândia), Syr Darya (Uzbequistão) a forte sedimentação provocou conflitos no uso da água reservada, entre países à jusante e à montante.

Os custos para a recuperação ou desativação das infra-estruturas existentes são altos e proibitivos a muitos países em desenvolvimento (WORLD WATER ASSESSMENT PROGRAMME, 2009). Por isso, a decisão sobre a recuperação ou a desativação de um empreendimento deve ser norteadas pelos custos, não sendo viável a manutenção quando os custos excederem os benefícios econômicos futuros (WORLD COMMISSION OF DAMS, 2000).

De acordo com EPE (2013), no caso de países que apresentam uma matriz energética predominantemente hidrelétrica como o Brasil, com grandes usinas e reservatórios, os estudos sedimentológicos e os levantamentos batimétricos se apresentam como importantes ferramentas para melhorar o planejamento e o gerenciamento dos recursos hídricos e energéticos. Este autor destaca que, atualmente, muitos reservatórios hidrelétricos operam com dados defasados devido, principalmente, ao contínuo processo de assoreamento dos reservatórios e, conseqüentemente, as políticas de gestão e operação destes reservatórios utilizam-se de dados inconsistentes. Coiado (2001) afirma que todo reservatório está sujeito ao processo de assoreamento, com o acúmulo de sedimentos carregados pelo curso d'água, no compartimento do volume útil do reservatório ou em cotas inferiores, o que pode reduzir seu volume morto e sua vida útil. A deposição de sedimentos no volume útil, pode alterar a vazão regularizada, a capacidade de geração de energia elétrica e o atendimento de outros usos consuntivos e não consuntivos da água.

Segundo Carvalho (2008), sedimento pode ser descrito como a partícula derivada de rochas ou de materiais biológicos que pode ser transportado por fluido (como a água e o vento) do seu ambiente de origem para os locais de deposição. Este autor, esclarece que a sedimentologia tem como base os processos hidroclimatológicos e quando restrita aos cursos d'água e lagos recebe o nome de hidrossedimentologia. Entre as diversas aplicações da sedimentologia, uma das mais difundidas é a avaliação do assoreamento e da vida útil de reservatórios de hidrelétricas. Os processos e estudos sedimentológicos são complexos e dependem de diversos fatores, e são de grande importância, principalmente, no caso de países com grande quantidade de recursos hídricos e com matriz energética predominantemente hidráulica, como é o caso do Brasil.

O termo sedimentação se refere aos processos de erosão, transporte e deposição de sedimentos, que causam o assoreamento. A erosão, que corresponde à separação e remoção de partículas de rochas e de solos, devido à ação de intempéries, como águas de chuva, ventos, entre outros, é o processo inicial da sedimentação e representa a origem dos problemas derivados do sedimento no meio ambiente (CARVALHO, 2008). Dessa forma, nos estudos sedimentológicos, o conhecimento das relações entre o uso e ocupação do solo e a erosão, são de grande importância, considerando que os sedimentos presentes nos cursos d'água e que causam assoreamento, são originados, principalmente, pelos processos erosivos da bacia hidrográfica, das margens e dos próprios leitos dos rios.

Os processos responsáveis pelo assoreamento são muito complexos, abrangendo principalmente erosão e movimentos de massa, transporte dos sedimentos nos cursos d'água e sua deposição na calha dos rios, lagos, reservatórios e estuários. De acordo com Carvalho (2008), todos esses processos que envolvem o sedimento são naturais, ocorrendo através do tempo geológico, existindo duas formas principais de erosão dos solos: a geológica e a acelerada. Esse autor explica que, a erosão gerada por processos geológicos e pedológicos ocorre normalmente, devido ao arranque das partículas de solo, formações superficiais e fragmentos de rocha e o seu transporte, ou deslocamento, sem intervenção humana. Por outro lado, a erosão acelerada pode ser causada por eventos extremos, como terremotos, erupções vulcânicas e tempestades ou, por ação antrópica, que pode ser altamente impactante devido ao aumento das populações e da ocupação territorial.

Essa erosão se manifesta diretamente pelas escavações, movimentos de terra na construção civil, agropecuária e em todas as intervenções antrópicas na superfície do solo. Paula (2010) destaca que as atividades antrópicas podem alterar a estabilidade da paisagem em diferentes escalas, mudando a vazão de cursos d'água ou ampliando a quantidade de sedimentos a serem transportados e, nestas condições, o processo de assoreamento pode ser consideravelmente acelerado.

De acordo com Barroso e Silva (1992), os processos erosivos também provocam outros problemas em cursos d'água e reservatórios, como: aumento dos custos de tratamento de água, desequilíbrio do balanço de oxigênio dissolvido na água, danos no crescimento e desenvolvimento de espécies aquáticas, diminuição da capacidade de armazenamento dos reservatórios e conseqüente redução do potencial de geração energia elétrica. O transporte de sedimentos depende de diversos fatores como a forma, o tamanho e o peso do sedimento e as

forças exercidas pela ação de escoamento. Além destes fatores, o tipo, a cobertura e o uso do solo; a topografia e a formação geológica do terreno, e a quantidade e intensidade das chuvas são outros fatores que influenciam no transporte dos sedimentos (CARVALHO, 2008). A quantidade de sedimentos transportada varia a cada curso d'água. Carvalho (2008) e Muller (1995) citam que os corpos hídricos têm a capacidade de transportar uma determinada quantidade máxima de sedimentos, que é conhecido como valor de saturação, e que depende de diversos fatores como: a vazão e a declividade do curso d'água; e o tipo, a granulometria e o peso específico do sedimento. Ainda segundo estes autores, quando o valor de saturação é maior que a quantidade de sedimento transportado (saturação), há formação de depósito nos corpos hídricos, canais, lagos, rios e reservatórios e quando este valor é menor (insaturação), há uma tendência a processos erosivos nas margens e leitos dos corpos hídricos.

Glymph (1973) afirma que todo corpo hídrico, normalmente, tende a apresentar um equilíbrio em relação ao transporte de sedimento. McCully (2001) cita que, apesar do desenvolvimento científico, ainda é difícil estimar com precisão a quantidade de sedimento que é transportada pelos rios. Ainda segundo o autor, a medição do material sólido que é carregada por um curso d'água é geralmente mais custosa e complexa do que a medida do volume líquido (vazão). Bhuyan et al. (2002) também ressaltam os problemas causados pelo transporte de sedimento, principalmente pelo fato da grande utilização, atualmente, de pesticidas e fertilizantes que podem ser absorvidos pelos solos e sedimentos e, através do seu transporte, causar poluição dos cursos d'água e aumento nos problemas de saúde humana e dos ecossistemas.

Do mesmo modo, Paiva et al. (1998) citam que o transporte de sedimentos, além de favorecer a poluição química e física, também causa aumento nos custos de tratamento de água para diversos usos e provoca danos para a vida aquática. No entanto, mesmo com todos os problemas apresentados anteriormente que envolvem questões econômicas, sociais e ambientais, poucas ações têm sido tomadas, por agentes públicos e privados, para evitar ou minimizar estes problemas, tanto sobre os aspectos da erosão quanto do transporte de sedimentos que, além dos fatos mencionados, resultam em um problema ainda mais complexo que é o assoreamento dos corpos hídricos.

A construção de um reservatório gera uma série de modificações físicas, ambientais e sociais nos locais em que são instalados. Bermann (2007) relata que um dos principais impactos sociais desencadeados pela instalação das usinas hidrelétricas e seus respectivos

reservatórios é o deslocamento compulsório da população que reside nas regiões onde serão construídos estes reservatórios. Segundo o autor, estima-se que a construção das usinas hidrelétricas até hoje no Brasil: resultaram em mais de 34.000 km² de terras inundadas para a formação dos reservatórios, e na expulsão – ou “deslocamento compulsório” – de cerca de 200 mil famílias, todas elas populações ribeirinhas diretamente atingidas”.

McCully (2001) também ressalta os problemas sociais e ambientais causados pela instalação dos reservatórios como grandes áreas inundadas e o deslocamento populacional. De acordo com o autor, pelo menos 400.000 km² foram inundados no mundo devido à construção de reservatórios. Quanto ao deslocamento populacional, o mesmo autor cita que é difícil quantificar corretamente o número de pessoas que foram deslocadas pela instalação dos reservatórios, pois raramente são coletados e produzidos dados confiáveis a respeito deste assunto. Para exemplificar a magnitude dos deslocamentos populacionais, McCully (2001) cita o caso da barragem de Três Gargantas, no Rio Yangtzé (China), que deve deslocar, até o final do projeto, cerca de 1.300.000 pessoas.

Além dos problemas citados anteriormente, a instalação dos reservatórios também provoca modificações no equilíbrio sedimentológico dos cursos d'água, pois propiciam uma significativa redução da velocidade do fluxo d'água que, por sua vez, ocasiona a deposição dos sedimentos transportados (GLYMPH, 1973; CARVALHO et al., 2000b). Desta forma, os reservatórios funcionam como grandes bacias de retenção de sedimentos, uma vez que proporcionam condições favoráveis para a deposição dos materiais transportados pelo curso d'água.

Como visto anteriormente, o assoreamento dos corpos hídricos e reservatórios é a última etapa do processo de sedimentação, que tem início com a produção dos sedimentos e seu conseqüente transporte, e é apontado por muitos autores, como um dos principais problemas originados pelos processos erosivos em uma bacia hidrográfica. O processo de deposição de sedimentos geralmente acontece em depressões naturais de terreno e ocorre quando a quantidade de sedimentos excede a capacidade de transporte. Infanti e Fornasari (1998) descrevem que o processo de assoreamento ocorre quando a força do agente transportador é superada pela força da gravidade do material transportado ou nos casos em que ocorre super-saturação no transporte dos sedimentos.

Outro fator importante que influencia na taxa de sedimentação é a região onde está localizado o reservatório. Segundo Goldsmith e Hildyard (1984), estas taxas são pequenas em

reservatórios localizados em zonas temperadas e muito elevadas em regiões de zonas tropicais. Segundo os autores, este fato deve-se, principalmente, às consequências do desmatamento e da quantidade de sedimentos produzidos e transportados nos solos tropicais. Um dos principais problemas causados pela deposição de sedimentos em reservatório é a redução do seu volume útil, fato este que prejudica o atendimento da demanda hídrica dos seus múltiplos usuários, como o abastecimento público e industrial, a irrigação, a geração de energia, entre outros.

Diversos estudos, nacionais e internacionais, apresentam os problemas decorrentes do assoreamento. Dentre estes estudos, cabe destacar Carvalho (2008; 2000), Muller (1995) e Environmental Protection Agency (1976), os quais citam que o assoreamento tem como principais consequências:

- Redução do volume de água armazenado no reservatório;
- Obstrução de canais de irrigação, navegação e trechos de cursos d'água;
- Afogamento de locais de desovas, alimentação e abrigo de peixes;
- Formação de bancos de areia dificultando e alterando rotas de navegação;
- Dificuldade ou impedimento da entrada de água em estruturas hidráulicas de sistemas de captação;
- Degradação da qualidade da água para consumo e conseqüente aumento dos custos de tratamento;
- Aumento da turbidez da água, que prejudica os aproveitamentos hídricos e reduz as atividades de fotossíntese;
- Alteração, destruição e degradação de ecossistemas aquáticos;

O assoreamento não apresenta problemas somente a montante da barragem, mas também a jusante, pois a água escoada tende a erodir as margens e os leitos do canal de escoamento, devido ao fato de possuir uma carga sólida geralmente menor do que o valor de saturação (CARVALHO, 2008). Este fato também é destacado por Coiado (2001) "A jusante da barragem, tem-se como consequência principal, o aumento da erosão devido ao desequilíbrio provocado pela retirada da carga natural de sedimentos do escoamento".

Paiva et al. (1998) ressaltam que além dos problemas citados anteriormente, o assoreamento também provoca aumento na frequência e intensidade das inundações nas áreas circunvizinhas aos reservatórios. A redução gradual na produção de energia é outro grave problema ocasionado pela deposição de sedimentos em reservatórios. Maia e Villela (2009) ressaltam que além da redução de receita com a produção energética, o assoreamento também pode ocasionar problemas de manobras de operação nas estruturas hidráulicas da usina e gastos em investimentos para dragagem de sedimentos nas proximidades da tomada d'água.

A Agência Nacional de Águas – ANA (ANA, 2009) também cita as influências do assoreamento sobre a questão energética destacando a redução gradual de geração de energia e as dificuldades de operação da tomada d'água, das válvulas de descarga e das comportas, entre outros. Segundo Almeida e Carvalho (1993), o Brasil apresenta diversos aproveitamentos hidrelétricos que tiveram sua capacidade de geração reduzida ou até mesmo a operação interrompida devido a problemas de assoreamento dos seus reservatórios (Tabela 2). Quando os sedimentos atingem a altura da tomada d'água da usina, eles passam a escoar junto com a água em grande quantidade, fato este que pode impedir completamente a operação da usina (CARVALHO e CATHARINO, 1993).

Pode-se verificar pela literatura que são vários os fatores locais que influenciam no processo de sedimentação, principalmente quanto à deposição e distribuição dos sedimentos nos reservatórios, como: clima, pluviometria, hidrologia, formação geológica, topografia, cobertura vegetal, tipo e uso do solo, composição química das águas e dos sedimentos, entre outros.

Segundo Brune e Allen (1941) e Glymph (1973), os principais fatores que influenciam na quantidade de sedimento que será depositado no reservatório são a quantidade de material em suspensão enviado para o reservatório aliada a capacidade de retenção do reservatório e o seu modo de operação.

Carvalho (2000) cita que os principais fatores que influenciam na formação dos depósitos de sedimentos são: a carga sólida afluyente, a eficiência de retenção do reservatório (que é a razão entre a quantidade de sedimento retido e a quantidade de sedimento total que entra no reservatório), a densidade e o volume dos sedimentos assoreados. Vanoni (1977) e Lane (1955) também acrescentam que a distribuição e a deposição de sedimentos em reservatórios dependem da geometria e do modo de operação do reservatório, da declividade de escoamento, das características e propriedades dos sedimentos e das águas, dentre outros.

Tabela 2 – Relação parcial de reservatórios brasileiros que apresentam problemas de assoreamento

Bacia do São Francisco			
Rio de Pedras	Velhas	CEMIG	UHE, 10 MW
Paraúna	Paraúna	CEMIG	UHE, 30 MW
Pandeiros	Pandeiros	CEMIG	UHE, 4,2 MW
Acabamundo	Acabamundo	DNOS	Controle de cheias
Arrudas	Arrudas	DNOS	Controle de cheias
Pampulha	Pampulha	SUDECAP	Controle de cheias
Bacias do Atlântico/Leste			
Funil	Contas	CHESF	UHE, 30 MW
Pedras	Contas	CHESF	UHE, 23 MW
Candengo	Una, BA	CVI	UHE, -
Peti	Santa Bárbara	CEMIG	UHE, 9,4 MW
Brecha	Piranga	ASCAN	UHE, 25 MW
Piracicaba	Piracicaba	B.-MINEIRA	UHE, -
Sá Carvalho	Piracicaba	ACESITA	UHE, 50 MW
Dona Rita	Tanque	-	UHE, 2,41 MW
Madeira Lavrada	Santo Antônio	CEMIG	Armazenamento
Guanhães	Guanhães	CEMIG	Armazenamento
Tronqueiras	Tronqueiras	-	UHE, 7,87 MW
Bretas	Suaçuí Pequeno	-	-
Sinceridade	Manhuaçu	CFLCL	UHE, 1,416 MW
Mascarenhas	Doce	ESCELSA	UHE, 120 MW
Areal	Areal	CERJ	UHE, -
Paraitinga	Paraitinga	CESP	UHE, 85 MW
Ituerê	Pombas	CFLCL	UHE, 4,0 MW
Funil	Paraíba do Sul	FURNAS	UHE, 216 MW
Jaguari	Jaguari	CESP	UHE, 27,6 MW
Una	Una, SP	PM Taubaté	Abastec. d'água
Bacia do Paraná			
Pirapora	Tietê	-	-
Caconde	Pardo	CESP	UHE, 80,4 MW
Euclides da Cunha	Pardo	CESP	UHE, 108,8 MW
Americana	Atibaia	CPFL	UHE, 34 MW
Jurumirim	Paranapanema	CESP	UHE, 22 MW
Piraju	Paranapanema	CPFL	UHE, 120 MW
Pres. Vargas	Tibaji	Klabin	UHE, 22,5 MW
Poxoréu	Poxoréu	CEMAT	UHE, -
São Gabriel	Coxim	ENERSUL	UHE, 7,5 MW
Rib. Das Pedras	Descoberto	CAESB	Abastec. d'água
São João	São João	ENERSUL	UHE. 3,2 MW
Bacia do Uruguai			
Caveiras	Caveiras	CELESC	UHE, 4,3 MW
Silveira	Santa Cruz	CELESC	UHE, -
Celso Ramos	Chapecozinho	CELESC	UHE, 5,76 MW
Furnas Segredo	Jaguari	CEEE	UHE, -
Bacias do Atlântico/Sudeste			
Santa Cruz	Tacanica	CCPRB	UHE, 1,4 MW
Pirai	Pirai	CELESC	UHE, 1,37 MW
Ernestina	Jacuí	CEEE	UHE, 1,0 MW
Passo Real	Jacuí	CEEE	UHE, 125 MW

Fonte: Carvalho (1994, 1998).

Asthana e Nigam (1980) também citam que diversos fatores interferem na distribuição e nos depósitos de sedimentos nos reservatórios. Segundo os autores, entre estes fatores

destacam: o modo de operação do reservatório, a quantidade, o tamanho e o tipo de sedimento transportado, o formato do reservatório, a vegetação e o deflúvio afluente e efluente ao reservatório.

Várias técnicas e métodos são encontrados na literatura para medição de assoreamento de reservatórios.

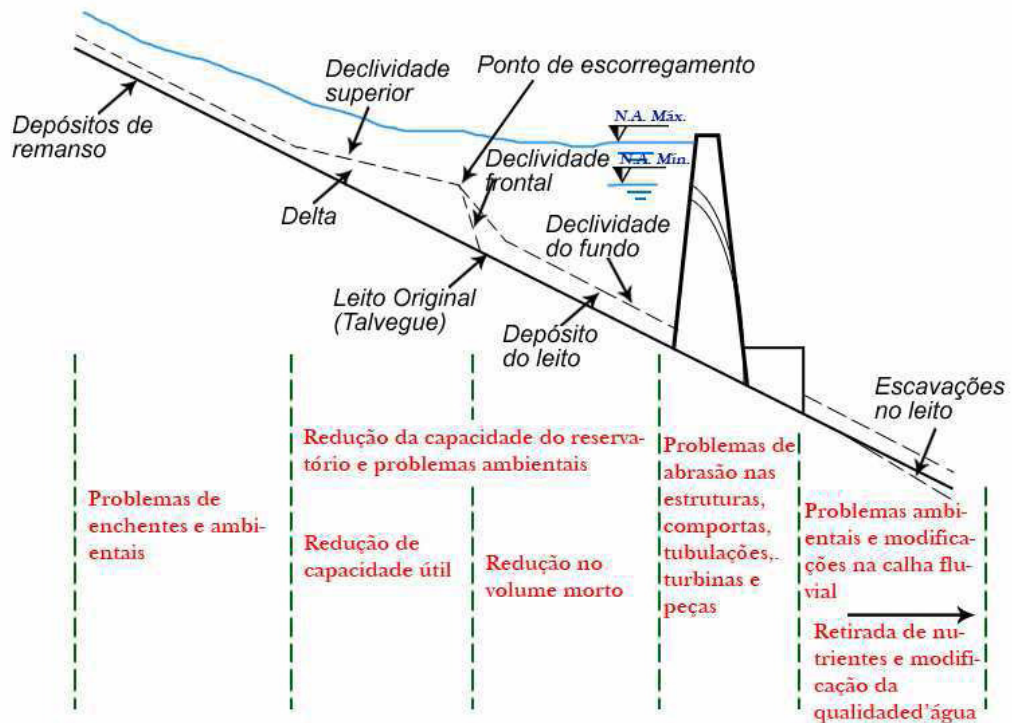
De acordo com Maia (2006), o método de incremento de área, foi a primeira metodologia estritamente matemática criada para o cálculo da redução de volume de reservatórios. Ainda segundo os autores, o método permitia realizar estimativas da altura dos sedimentos no reservatório em um período de tempo pré-determinado, sendo possível, desta forma, determinar uma nova curva cota/área/volume para avaliação da variação do volume do reservatório devido ao assoreamento.

Ainda segundo Maia (2006), o cálculo do volume de sedimentos em um reservatório consiste em três etapas que consistem em estimar o sedimento afluente ao reservatório, estimar o sedimento afluente que permaneceu no reservatório e converter o sedimento retido de unidade de peso para unidade de volume.

Da mesma forma, Coiado (2001) apresenta que para estimar o volume assoreado no reservatório são necessárias as seguintes informações: descarga sólida que adentra o reservatório, eficiência de retenção do reservatório, peso específico e distribuição dos sedimentos depositados.

A distribuição dos sedimentos em reservatório não é uniforme (MAHMOOD, 1987; CARVALHO et al., 2000) e pode dar origem, basicamente, a três tipos de depósitos: depósito de remanso (Backwater deposit), delta (delta) e depósito de fundo (Bottom-set deposit) (VANONI, 1977; CARVALHO, 2008). A Figura 1 apresenta a localização destes depósitos de sedimentos e os principais problemas ocasionados por eles.

Figura 1 - Formação de depósitos de sedimentos nos reservatórios e seus principais problemas



Fonte: Adaptado de Carvalho (2008).

Miranda (2011) relata que os efeitos dos sedimentos nos reservatórios são diversos, destacando-se: a redução da capacidade de armazenamento; abrasão dos canais de fuga e das pás das turbinas; formação de bancos de areia com interferência na navegação e, em alguns casos, obstrução da tomada de água. Segundo este autor, na análise do assoreamento em reservatórios pela ótica da geração de energia é possível verificar que, além da redução do faturamento da concessionária de energia devido à perda de volume útil do reservatório e redução na produção de energia, os sedimentos também podem acarretar em custos adicionais por conta de desgastes dos equipamentos eletromecânicos, além de investimentos em procedimentos para minimizar os problemas ocasionados pelo acúmulo de sedimentos. Miranda (2011) esclarece também que, apesar do conhecimento desses problemas, os estudos sedimentológicos (na maioria dos projetos e estudos realizados em reservatórios) não recebem a devida atenção e, quando realizados, muitas vezes, ocorrem de forma incompleta, sendo escassos na literatura técnica e acadêmica, estudos que avaliam as perdas energéticas por problemas ambientais, como o assoreamento, embora esta seja uma questão cada vez mais evidente.

Odriski (2002) quantificou as taxas de assoreamento da baía de Antonina (PR), comparando plantas batimétricas de 1901 com cartas náuticas de 1979, evidenciando a tendência de assoreamento para quase toda a região dessa baía. O volume de sedimento depositado entre 1901 e 1979, na área abrangida pelos levantamentos batimétricos, de cerca de 25 km², ficou em torno de 769.230 m³ ano⁻¹, ou 64.100 m³ mês⁻¹.

Campagnoli (2005) abordou os impactos econômicos e sociais da produção, transporte e deposição de sedimentos em reservatórios hidrelétricos e demonstrou que a hidrossedimentologia é a ferramenta de análise mais adequada para a caracterização, tanto quantitativa como qualitativa, dos processos da dinâmica sedimentar e de seus custos ambientais.

3.4 Geotecnologias aplicadas à modelagem de bacias hidrográficas

3.4.1 Softwares e projetos de modelagem de bacias hidrográficas

Entre os métodos geotecnológicos, a mais inovadora técnica de diagnóstico e predição de situações futuras é a modelagem envolvendo os meios físico, biótico e antrópico em bases de dados georreferenciados que podem ser implementadas por sistemas de modelagem dentre os quais destacam-se: Water Erosion Prediction Project - WEPP; Areal Non-point Source Watershed Environment Response Simulation - ANSWERS; Kentucky Erosion Model - KYERMO; European Soil Erosion Model - EUROSEM; Chemicals Runoff and Erosion from Agricultural Management Systems - CREAMS; Simulator for Water Resources in Rural Basins - SWRRB; e o Soil and Water Assessment Tool – SWAT, o mais experimentado modelo matemático distribuído da atualidade integrado a Sistemas de Informação Geográfica – SIG, razão pela qual foi selecionado para as análises da bacia à montante da PCH Costa Rica.

O software de modelagem Soil and Water Assessment Tool (SWAT) desenvolvido por Arnold et al. (1998) e atualizado por Arnold e Fohrer (2005), vem sendo empregado internacionalmente, como ferramenta eficaz para a avaliação de recursos hídricos e problemas de poluição difusa em várias escalas de abordagem e com diferentes condições ambientais em todo o globo. Nos Estados Unidos o SWAT é cada vez mais utilizado para apoiar as análises de Carga Diária Máxima Total (BORAH et al., 2006); na investigação da eficácia das práticas

de conservação no âmbito da iniciativa do USDA no Programa de Avaliação de Efeitos da Conservação (CEAP, 2007). Mausbach e Dedrick (2004) realizaram avaliações do uso do SWAT em grandes regiões, como a bacia do rio Mississippi superior, enquanto Arnold et al. (1999), Jha et al. (2006) e outros desenvolveram estudos em escala continental.

Aplicações similares do SWAT também foram realizadas na Europa e em outras regiões do globo, como demonstra a variedade de estudos apresentados em quatro conferências anteriores da Conferência Européia Internacional do SWAT que são relatados em uma edição especial da *Hydrological Processes* (TWRI, 2003), (EAWAG, 2005), e na quarta edição (UNESCO-IHE, 2007).

Os componentes do SWAT foram avaliados sendo, por vezes, comparados com outros modelos (Shepherd et al., 1999; Borah e Bera, 2003, 2004; Arnold e Föhrer, 2005). Uma avaliação de estudos que empregaram o SWAT, realizada por Gassman et al. (2007), destaca novas tendências de aplicação e fornece um histórico, que inclui o desenvolvimento de ferramentas de interface GIS e exemplos de modelos modificados do SWAT. Neste trabalho são apresentados os resultados das pesquisas e os métodos utilizados em cerca de 250 estudos; destacando as principais vantagens e limitações do software e as necessidades de pesquisas.

3.4.2 SWAT - histórico do desenvolvimento e panorama atual

O desenvolvimento do SWAT é uma continuação da experiência de modelagem do United States Department of Agriculture (USDA) e do Agricultural Research Service (ARS), que se estende por um período de aproximadamente 30 anos. A origem do SWAT pode ser atribuída a modelos desenvolvidos anteriormente pelo USDA-ARS, incluindo o modelo Chemicals, Runoff, and Erosion from Agricultural Management Systems (CREAMS) (Knisel, 1980), o modelo Groundwater Loading Effects on Agricultural Management Systems (GLEAMS) (Leonard et al., 1987), e o Environmental Impact Policy Climate (EIPC) model (Izaurrealde et al., 2006), que foi originalmente chamado de Erosion Productivity Impact Calculator (EPIC) (Williams, 1990).

O software SWAT é derivado do Simulator for Water Resources in Rural Basins (SWRRB) criado por Arnold e Williams (1987), que foi projetado para simular impactos do manejo do solo sobre a água e o carreamento de sedimentos para as bacias rurais não

monitoradas nos Estados Unidos. O desenvolvimento do SWRRB teve início na década de 1980 com a modificação do modelo hidrológico de precipitação diária do CREAMS. A melhoria mais significativa obtida nesse período foi a ampliação do cálculo do escoamento superficial e outros para até dez sub-bacias, o que antes era possível somente para bacias individualizadas. Outras melhorias incluíram os cálculos da taxa de pico do escoamento e de perdas de transmissão e a adição de vários novos componentes, como o fluxo de retorno da água subterrânea (Arnold e Allen, 1993), armazenamento em reservatório, o submodelo EPIC, de crescimento das culturas, um gerador de condições atmosféricas (.wgn), e rotinas de cálculo de transporte de sedimentos.

Outras modificações do SWRRB realizadas no final de 1980 incluíram a incorporação do componente de destino de pesticidas (GLEAMS); a incorporação da técnica do USDA-SCS, como opcional para estimar as vazões de pico, e as equações de produção de sedimentos, que até o momento são desenvolvidas. Estas modificações aumentaram a capacidade do modelo para trabalhar com uma ampla variedade de problemas relacionados à gestão de bacias hidrográficas e à qualidade da água.

Arnold et al. (1995) desenvolveu o modelo Routing Outputs to Outlet (ROTO) no início de 1990, com o objetivo de melhorar a avaliação do impacto hidrológico à jusante de reservas indígenas no Arizona e Novo México, que cobriam milhares de quilômetros quadrados, conforme solicitado pelo US Bureau of Indian Affairs. A análise foi realizada por meio da ligação da saída de cada conjunto de dez bacias, a partir de várias execuções do modelo SWRRB e, em seguida, a aplicação do modelo de routing flows por meio de canais e reservatórios com uso do modelo ROTO. Esta metodologia superou a limitação do SWRRB e permitiu que mais de dez sub-bacias fossem avaliadas.

No entanto, a entrada e saída de vários arquivos, resultaram em alto custo computacional. Para superar a complexidade desse arranjo, o SWRRB e ROTO foram incorporados em um único software, o SWAT, que manteve todas as características que fizeram do SWRRB um importante modelo de simulação, permitindo sua aplicação em áreas extensas. Desde que foi criado, no início de 1990, o SWAT foi submetido a um processo de avaliação e de expansão contínua das suas capacidades e aplicações.

Entre as principais melhorias das versões anteriores (SWAT 94.2, 96.2, 98.1, 99.2 e 2000), descritos por Arnold e Fohrer (2005) e Neitsch et al. (2005), destaca-se a incorporação

de rotinas de cálculo da onda cinética de cheias em canais, oriundas do modelo QUAL2E (BROWN e BARNWELL, 1987).

O SWAT é um software de modelagem aplicada em escala de bacia hidrográfica, contínuo no tempo, que opera em um passo de tempo diário, e que foi projetado para simular e prever o impacto da gestão de água, produção de sedimentos e pesticidas agrícolas em bacias hidrográficas não monitoradas.

O modelo é baseado em processos físicos, computacionalmente eficiente e capaz de simulação contínua durante longos períodos de tempo. Os principais dados de entrada que alimentam os componentes do modelo incluem séries históricas de dados climáticos como temperaturas máxima e mínima, precipitação, radiação solar, umidade relativa do ar e velocidade do vento, dados de propriedades e manejo do solo, dados que descrevem a topografia por meio de um modelo digital de elevação (DEM) e dados relativos ao uso e cobertura do solo.

No SWAT, uma bacia hidrográfica é dividida em várias sub-bacias, que são subdivididas em unidades de resposta hidrológica (HRUs), que consistem em unidades com características homogêneas de uso da terra, práticas conservacionistas e tipo de solo.

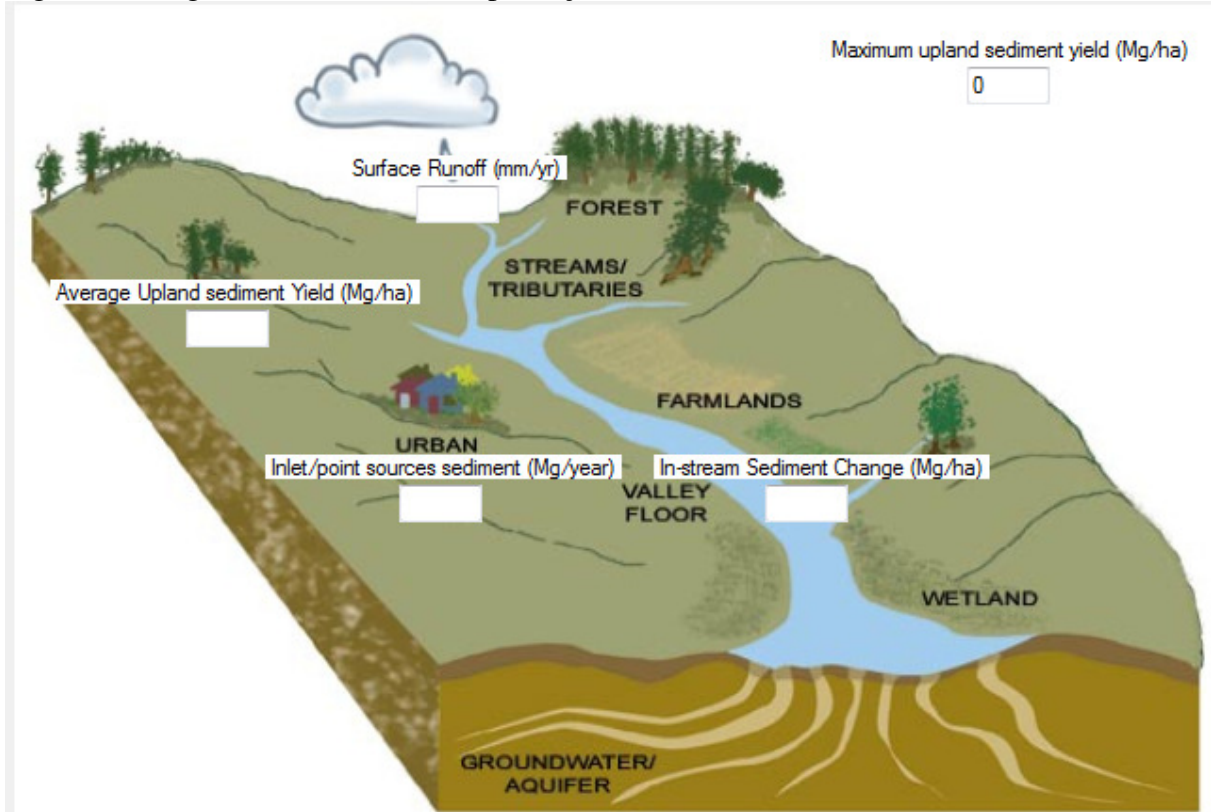
Dados climáticos e de balanço hídrico climatológico, utilizados no SWAT incluem os dados de precipitação diária, temperatura máxima e mínima, dados de radiação solar, umidade relativa e de velocidade do vento, que podem ser introduzidos a partir de registros medidos. Dados de umidade relativa do ar e velocidade do vento são necessários quando é utilizado o método de Penman-Monteith (Monteith, 1965) ou Priestly-Taylor (Priestly e Taylor, 1972) para os cálculos da evapotranspiração (ET). Dados de precipitação medidos em intervalos sub-diários são necessários se o método de infiltração de Green-Ampt (Green e Ampt, 1911) é selecionado.

A temperatura média do ar é utilizada para determinar se a precipitação deve ser simulada, como por exemplo, queda de neve. Os dados de entrada de temperaturas máximas e mínimas são utilizados no cálculo das temperaturas diárias do solo e da água. Os dados climáticos gerados pelo modelo são calculados a partir de tabelas, que apresentam 13 variáveis climáticas mensais, derivadas de longas séries de dados climatológicos.

O modelo tem por objetivo prever o efeito das ações de uso e manejo do solo sobre os recursos hídricos, produção de sedimentos (Figura 2), produção de nutrientes e pesticidas,

sendo aplicado em pequenas e grandes bacias. A modelagem pode ser efetuada em intervalos de tempo sub-diários, diários, mensais e anuais.

Figura 2 - Diagrama de resultados da produção de sedimentos



Fonte - Disponível no software de verificação SWAT Check (2014).

Para alcançar os objetivos propostos é preciso considerar as seguintes características do SWAT, descritas por Neitsch et al. (2002).

- **Com base em processos físicos:** ao invés de utilizar equações de regressão para descrever as relações entre as variáveis de entrada e saída, o modelo requer informações específicas sobre clima, propriedades dos solos, topografia, vegetação e práticas de manejo adotadas na bacia. Os processos físicos associados com a dinâmica da água e dos sedimentos, o crescimento da vegetação, o ciclo de nutrientes, entre outros, são modelados a partir da utilização dos dados de entrada.
- **Utiliza dados de entrada:** que, em muitos países, estão prontamente disponíveis em agências governamentais. No caso do Brasil, estes dados não são acessíveis

diretamente ao público e, muitas vezes, precisam ser preparados antes de sua incorporação aos modelos.

- **Computacionalmente eficiente:** o que significa que as simulações de grandes bacias ou a variedade de estratégias de manejo podem ser realizadas em curto espaço de tempo e com poucos recursos financeiros.
- **Possibilita estudos de impactos ambientais:** como o “timing”, ou seja, o período de tempo de duração do modelo permite séries de dados na escala de dezenas (ou centenas) de anos, permite a realização de estudos de impactos ambientais que são visíveis somente através de avaliação realizada em um longo período de tempo.

Como destacado por Gassman et al. (2007), o modelo SWAT vem sendo utilizado de forma corrente, obtendo grande desenvolvimento e evolução nos últimos anos. Isto contribuiu para estender o interesse pelo seu uso e muitas aplicações foram realizadas por agências governamentais, principalmente na Europa e nos Estados Unidos. Entre estas aplicações destacam-se as avaliações das mudanças climáticas e os efeitos do uso do solo sobre os recursos hídricos.

No Brasil, Machado (2002) aplicou o modelo para simular o escoamento e a produção de sedimentos em uma pequena bacia hidrográfica do Ribeirão dos Marins, afluente do rio Piracicaba, situado no estado de São Paulo. Baldissera (2005) aplicou o modelo para simular as vazões mensais na Bacia do Rio Cuiabá. Santos et al. (2010) avaliaram o impacto de diferentes cenários de usos do solo na vazão e na produção e transporte de sedimentos na bacia hidrográfica do Rio Apucarantina.

Algumas instituições públicas e privadas também fazem uso do modelo para prever problemas relacionados à erosão e assoreamento, principalmente empresas de geração de energia elétrica, conforme destacam Santos et al. (2005).

3.4.3 Estudos de produção e transporte de sedimentos utilizando o SWAT

Análises realizadas em oito estudos (ALMENDINGER et al., 2014; BEESON et al., 2014; BIEGER et al., 2014; BONUMÁ et al., 2014; LU et al., 2014; SANTHI et al., 2014; WHITE et al., 2014; ZABALETA et al., 2014), indicaram uma ampla gama de fatores que

impactaram no resultado da produção e transporte de sedimentos, incluindo a delimitação de bacias hidrográficas e resolução de dados de entrada, as variações de características da paisagem e métodos de transporte de sedimentos.

Os resultados de produção de sedimentos obtidos por Zabaleta et al. (2014), Allmendinger et al. (2014), e Beeson et al. (2014) apresentaram aderência nos dados de calibração mais bem-sucedidas, e os resultados de validação da produção de sedimentos, com NSE e valores R^2 alcançando 0,47-0,94 por dia e ou mensal. Bonumá et al. (2014), Bieger et al. (2014), e Lu et al. (2014), por outro lado, relataram resultados estatísticos mais frágeis, com os os valores especialmente do NSE, nos seus respectivos períodos de validação, que variaram entre -12,1 e 0,38.

No entanto, todos os três estudos apontaram problemas importantes relacionados com a disponibilidade de dados de séries de produção de sedimentos. Estes incluem a necessidade de conjuntos de dados mais abrangentes para realizar o teste de modelo em profundidade (BONUMÁ et al., 2014), a falta de confiabilidade dos dados (BIEGER et al., 2014), e a dificuldade na obtenção de alta precisão de simulação estatística devido à pequena magnitude de produção de sedimentos medidos (LU et al., 2014). A entrada de dados com problemas de precisão temporal e ou espacial dos dados de precipitação foram uma provável fonte de imprecisões nos resultados de produção de sedimentos para alguns estudos (BIEGER et al., 2014; LU et al., 2014; ZABALETA et al., 2014). Bieger et al. (2014) também observaram que a baixa resolução do Modelo Digital de Elevação (DEM), solo e dados de uso da terra utilizados, bem como problemas de transferência na Equação Universal de Perda de Solo Modificada (MUSLE) (WILLIAMS e BERNDT, 1977), pode ter introduzido outro erro em seus resultados de produção de sedimentos.

Em contraste, Zabaleta et al. (2014) demonstraram a necessidade de capturar combinações sensíveis de encostas extremas e uso do solo, ressaltando a importância dos regimes de delimitação de bacias hidrográficas detalhadas para algumas aplicações com SWAT. Beeson et al. (2014) avaliaram o impacto de valores de declividade calculados a partir DEMs com resoluções diferentes (90, 30, 10 e 3 m) na produção de sedimentos. A sua avaliação revela que um aumento de 2,5 vezes em declive ocorreu quando se utiliza uma alta resolução de 3m em vez de um DEM de baixa resolução de 90 m DEM, resultando num aumento de perda de sedimentos previsto de 130%. Os autores sugerem que os cuidados devem ser tomados ao usar DEM de alta resolução para parametrizar SWAT, porque isso

pode resultar em encostas significativamente mais elevadas, o que pode alterar consideravelmente a modelagem da produção de sedimentos.

Vários dos estudos (ALMENDINGER et al., 2014; BIEGER et al., 2014; BONUMÁ et al., 2014; LU et al., 2014) relatam valores da USLE práticas conservacionistas, fator (P) (WISCHMEIER e SMITH, 1978), definidos para 1 (um), quando não há práticas de conservação presentes no uso do solo de uma bacia hidrográfica, para simular de forma mais precisa a erosão do solo com a equação MUSLE no SWAT.

3.4.4 Detecção de mudanças no uso do solo

Vários métodos de detecção de mudanças no uso do solo já foram apresentados pela comunidade científica, dentre os quais os métodos de classificação, subtração de imagens, razão entre bandas e componentes principais são os mais utilizados (GRAÇA et al., 2005; SANTOS et al., 2001; ARAGÃO et al., 2001). No entanto, todos estes métodos se enquadram em duas formas principais de abordagem do problema, de pré-classificação ou de pós-classificação.

No Brasil, dentre os trabalhos de mapeamento do uso e cobertura do solo e detecção de mudanças, Borgonovi e Chiarini (1965) efetuaram, com base em fotografias aéreas de 1962, o levantamento das áreas cobertas com cerrado, cerradão e campo. O trabalho mostrou a seguinte situação: cerradão (724.900 ha), cerrado (2.668.000 ha) e campo (458.600 ha), representando 2,9%, 10,8% e 1,7%, respectivamente, da área do Estado de São Paulo. Borgonovi et al. (1967) efetuaram o levantamento por fotointerpretação da cobertura vegetal de floresta natural e reflorestamento do Estado de São Paulo, com base em levantamento aéreo efetuado em 1962. Neste trabalho, as diferentes categorias de vegetação (mata, capoeira, cerradão, cerrado, campo cerrado e campo) foram agrupadas como floresta natural, com uma área de 3.405.800 ha, que representava 13,7% da área total do Estado.

Dentro do programa "Zoneamento Econômico Florestal do Estado de São Paulo", Serra Filho et al. (1974), com base em levantamento aerofotográfico do Estado, efetuado no período de 1971 - 73, apresentaram um diagnóstico da cobertura vegetal natural, envolvendo diferentes tipo fitofisionômicos, com as seguintes áreas e percentuais referentes à área total do Estado de São Paulo: mata (2.069.920 ha, 8,33%); capoeira (1.241.090 ha, 77 4,99%);

cerradão (105.390 ha, 0,42%); cerrado (784.990 ha, 3,16%); campo cerrado (148.390 ha, 0,60%) e campo (43.870 ha, 0,18%).

Dentro dos procedimentos metodológicos dos trabalhos citados, os levantamentos resultantes foram obtidos a partir de grades de pontos, com fotointepretação de aerofotografias pancromáticas verticais. Kronka et al. (1993), publicaram o trabalho "Inventário Florestal do Estado de São Paulo", em que é quantificada a cobertura vegetal natural e o reflorestamento. Com imagens do satélite LANDSAT - 5 - TM, bandas 3, 4 e 5, as diferentes fitofisionomias fotointerpretadas foram transferidas para bases cartográficas 1:50.000, a partir das quais efetuou - se o mapeamento final e a quantificação, abrangendo todos os municípios do Estado de São Paulo. Em 1998, o Instituto Florestal publicou o trabalho "Áreas de Domínio do Cerrado no Estado de São Paulo" (KRONKA, 1998), resultante da análise digital de imagens orbitais do satélite LANDSAT - 5, período 1993 - 94. Neste trabalho as áreas remanescentes do cerrado são mapeadas.

4. MATERIAL E MÉTODOS

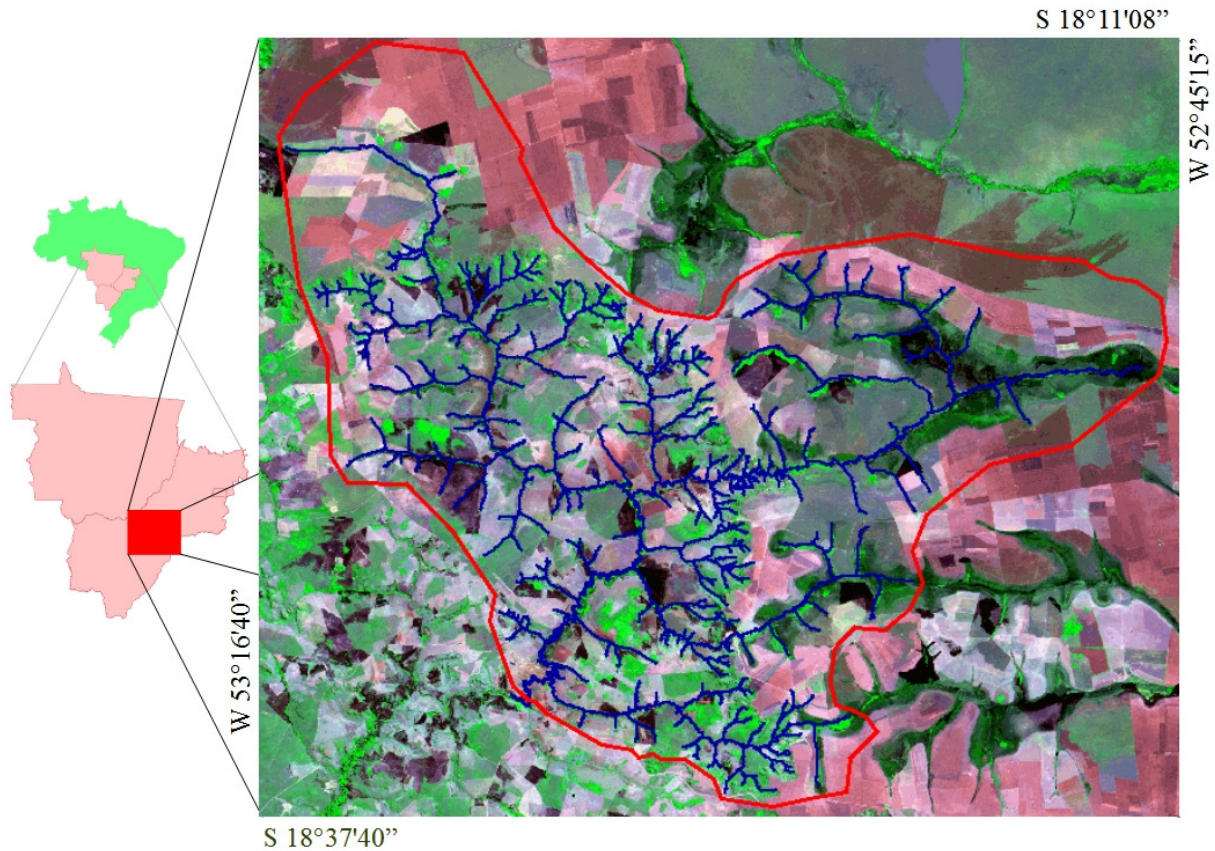
4.1. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo está localizada na região Nordeste do Estado do Mato Grosso do Sul, no município de Costa Rica, com latitude de 18°31'38" Sul e longitude 53°57'42" Oeste e a uma altitude de 641 metros, caracterizando-se por ser um dos municípios mais prósperos do Mato Grosso do Sul. Costa Rica faz divisa com os Estados de Goiás e Mato Grosso, distando 390 km da capital, Campo Grande. Sua população atual é de aproximadamente 19.175 habitantes (IBGE, 2014), sendo as atividades agropecuárias e turísticas as de maior relevância para o município, destacando-se entre as atividades agrícolas, a cultura do algodão. O potencial turístico também vem sendo explorado, principalmente por atividades envolvendo esportes de aventura. Neste aspecto, o parque municipal do Rio Sucuriú atrai turistas por suas tirolesas, rapel, piscinas, arvorismo, rafting, trilhas entre outras atividades de esporte e lazer.

O município de Costa Rica é divisor de águas entre as bacias dos rios Araguaia, Paraguai (Rios Taquari e Jaurú) e do Paraná (Rio Sucuriú, nascentes do Aporé e Corrente de Goiás).

A área de estudo utilizada para os levantamentos do meio físico e mapeamento do uso e ocupação do solo compreende parte da bacia do Alto Rio Sucuriú, no município de Costa Rica-MS, ao sul da tríplice divisa entre os Estados do Mato Grosso, Mato Grosso do Sul e Goiás, e ao sul do Parque Nacional das Emas, à montante do reservatório da PCH Costa Rica. Geograficamente essa bacia está inserida em um retângulo, limitado pelas coordenadas do canto inferior esquerdo com latitude S 18°37'40" e longitude W 53°16'40", e do canto superior direito com latitude S 18°11'08" e longitude W 52°45'15", conforme apresentado na Figura 3.

Figura 3 - Localização da bacia contribuinte da PCH Costa Rica (MS), na região centro-oeste do Brasil

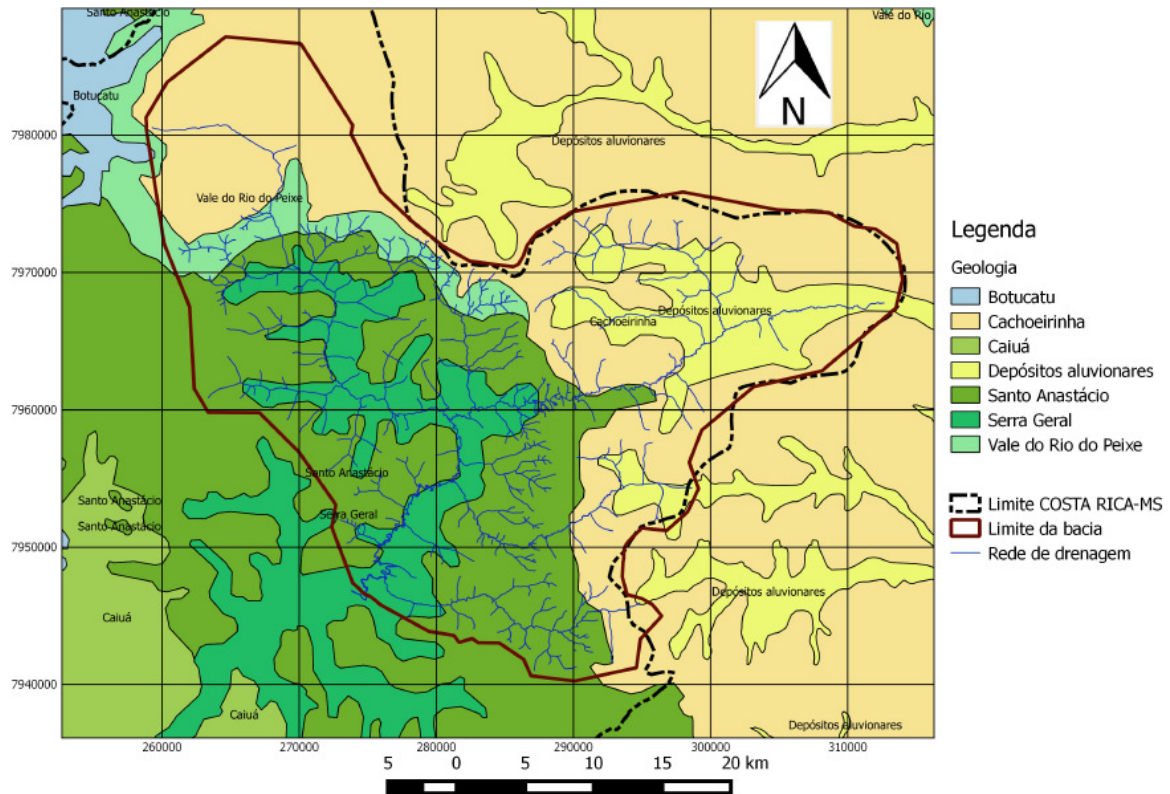


Fonte. Elaborado pelo autor a partir de dados do IBGE e imagens LandSat.

4.1.1 Geologia da área de estudo

De acordo com o mapa geológico apresentado na Figura 4, na região que compreende o município de Costa Rica são identificadas as seguintes unidades geológicas: Formação Botucatu e Formação Serra Geral do Grupo São Bento, Formação Santo Anastásio do Grupo Caiuá, Formação Cachoeirinha e Depósitos Aluvionares, sendo as principais, descritas brevemente a seguir.

Figura 4 - Mapa geológico da região de Costa Rica (MS), em escala de 1:250.000



Fonte. Modificado de Serviço Geológico do Brasil (CPRM).

O Grupo São Bento, na bacia do Paraná, é constituído pelas formações Botucatu, Serra Geral e Pirambóia, sendo as duas primeiras predominantes na Bacia do Alto Rio Sucuriú. A Formação Botucatu, no Mato Grosso do Sul, geralmente ocorre nas calhas dos principais sistemas de drenagem e ocupa uma faixa de direção quase Norte-Sul, na região central do Estado. Os principais litotipos dessa formação são arenitos finos a médios, avermelhados e friáveis de grãos arredondados e alta esfericidade. Segundo Scherer (1998), a ausência de depósitos interdunas e úmidos permite interpretar sua deposição como o de um sistema desértico.

A Formação Serra Geral é de origem vulcânica intercalada com rochas sedimentares. A rocha predominante é o basalto, com suas características típicas como cor preta, textura fina a afanítica e maciço. Os afloramentos ocorrem em forma de estrutura colunar e quando são alterados pelo processo de intemperismo apresentam estruturas do tipo esfoliação esferoidal, devido ao seu caráter isotrópico e maciço. De acordo com o CPRM (2006), existem evidências da ocorrência de cobre e ouro associada a estas rochas. Na região de Costa Rica essa formação ocorre associada à drenagem. Os derrames possuem composição variada, de

ácida a básica, com espessuras que chegam a alcançar mais de 1.500 m (IPT, 1981). Os derrames basálticos originam os solos ricos em óxidos de ferro e profundos, denominados Latossolos.

Grupo Bauru na bacia do Paraná, este grupo é constituído pelas formações Caiuá, Santo Anastácio Adamantina e Marília, predominando na bacia do Alto Sucuriú as formações Caiuá e Santo Anastácio. A Formação Caiuá ocupa uma grande área do Estado do Mato Grosso do Sul, aflorando principalmente em sua porção Centro-Sul. Na região de Costa Rica esta unidade está presente e é composta de arenitos arcóseos (fragmentos de feldspato em sua composição), de coloração vermelha, bimodais (muito finos ou grossos) e com esfericidade variável.

Os arenitos arroxeados, de granulação média a fina, podem apresentar minerais primários reliquiais como o quartzo e o feldspato (IPT, 1981), podendo ser encontrados arenitos porosos e facilmente desagregáveis (AMR-MS, 1990), que condicionam a formação de Neossolos Quartzarênicos. A Formação Santo Anastácio é constituída por um pacote de arenitos muito finos a médios, pouco argilosos e pobres em estruturas sedimentares. O ambiente de formação é o fluvial meandrante, sendo considerado por Suguio e Barcelos (1983), como resultado de deposição sob a influência de um clima quente e seco.

4.1.2 Estruturas Geológicas

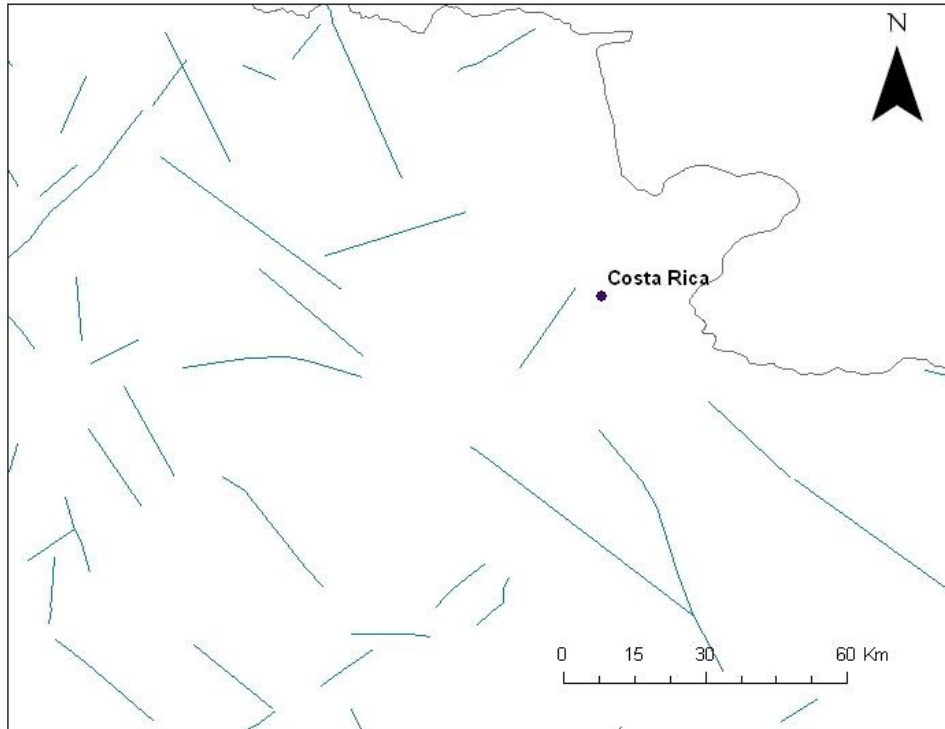
Além da identificação das unidades litológicas, outro aspecto importante é o papel das estruturas geológicas, particularmente, as fraturas e falhas genericamente designadas de “lineamentos”.

A região do município de Costa Rica apresenta duas unidades estruturais distintas, compatíveis com as unidades litológicas existentes. Neste contexto, ocorrem apenas estruturas rúpteis, que correspondem a fraturas associadas às rochas basálticas da formação Serra Geral e estruturas sedimentares típicas, associadas aos arenitos do Grupo Caiuá.

Portanto, os fraturamentos encontrados na área de estudo, são resultantes, principalmente, do resfriamento dos derrames basálticos, que perdem cerca de 10% do seu volume, produzindo rupturas e dando origem a juntas colunares. A Figura 5 ilustra as principais direções de lineamentos, destacando-se a direção NW-SW, que controla a direção

dos principais rios na região. Outras direções importantes são NE-SW e E-W. O fraturamento que ocorre nas unidades sedimentares pode ser considerado incipiente sendo mascarado pelo elevado processo de intemperismo que afetou estas rochas.

Figura 5 - Lineamentos, destacando os padrões de fraturamento regional, que controla a direção dos principais rios na região de Costa Rica (MS)



Fonte. Modificado de CPRM (2006).

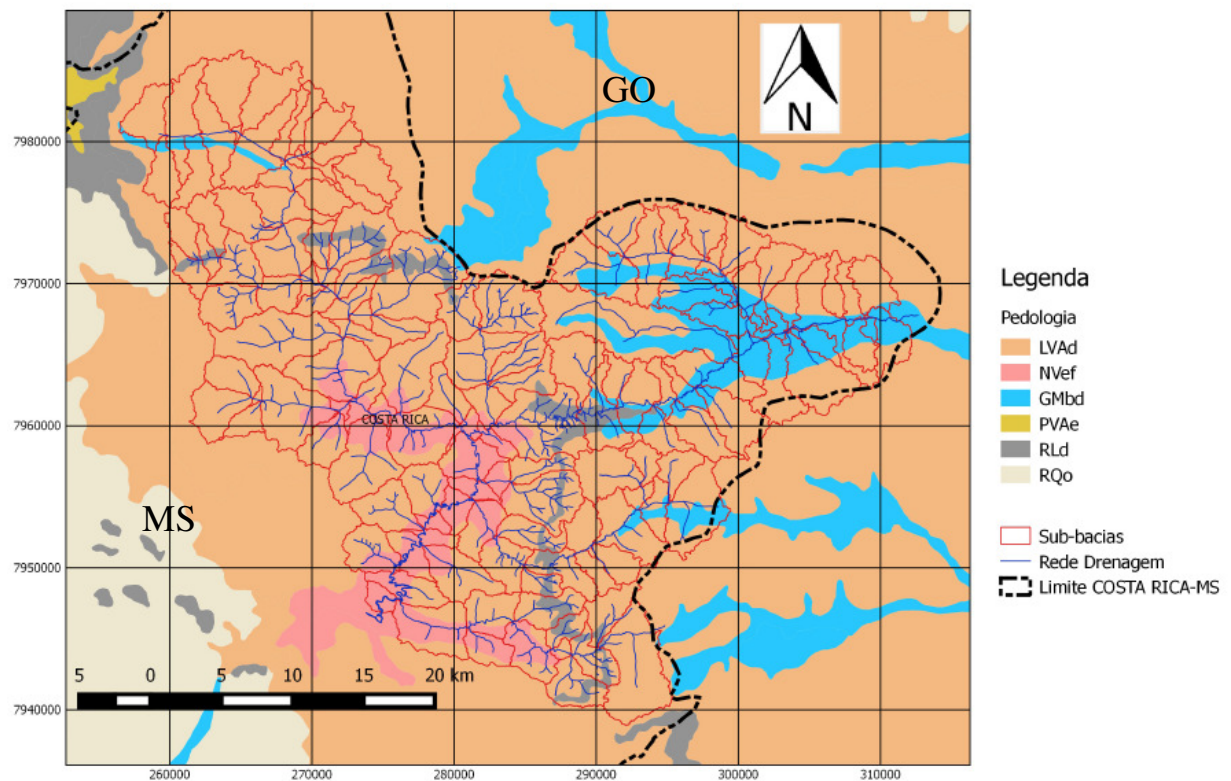
A presença de fraturamentos ou lineamentos, que recortam as rochas do grupo Caiuá (sedimentos/arenitos) e do Grupo Serra Geral (basalto/sedimentos), constituem zonas preferenciais de fratura, que podem controlar os sistemas de drenagem (cursos d'água) e potencializar o processo de formação e evolução das voçorocas.

4.1.3 Pedologia, solos de ocorrência na área de estudo.

Os dados pedológicos disponíveis para a área de estudo são os dados da Folha Pedologia SE-22, disponibilizada pelo IBGE, dos quais, tomando-se como base o mapeamento realizado pelo Projeto RADAMBRASIL, foi realizada a atualização destas informações de acordo com o Manual Técnico de Pedologia, publicado pelo IBGE (2007).

A primeira etapa desta atualização foi a pesquisa dos estudos/trabalhos mais recentes desenvolvidos na região, compatíveis com o nível de detalhamento do mapeamento (1:250.000), visando uma avaliação da incorporação destes trabalhos. A segunda etapa, através de imagens de satélites recentes foi realizada uma reinterpretação temática. Na terceira etapa, foi realizado o trabalho de campo visando solucionar dúvidas e coleta de material quando necessário. Na quarta etapa foi realizada a reinterpretação final, e na quinta etapa foi realizado o armazenamento das informações gráficas e alfanuméricas atualizadas no banco de dados, estruturado para a utilização destas informações em um ambiente de SIG. Constam deste banco informações sobre a classificação dos solos, segundo seus atributos e horizontes diagnósticos e suas características morfológicas, físicas e químicas. Contém, ainda, dados correspondentes às descrições, geral e morfológica, e os resultados de análises físicas e químicas de pontos de amostragem (Figura 6).

Figura 6 - Recorte do mapa de solos dos Estados do Mato Grosso do Sul e Goiás



Fonte. Adaptado do mapa pedológico do IBGE 1:250.000, Folha SE-22.

Levantamentos de solos realizados por Galdino et al. (2003) para a bacia do Taquari, contígua à bacia do Alto Rio Sucuriú, indicaram a presença de diferentes classes de solo para o município de Costa Rica.

Entre estas classes de solos, os Neossolos Quartzarênicos e os Neossolos Litólicos são, por natureza, os mais vulneráveis à erosão laminar. No entanto, os Latossolos, embora sejam solos que, por definição, são mais profundos e melhor estruturados, são os mais indicados às atividades agrícolas e ocupam extensas áreas da bacia do Alto Sucuriú, sendo por isso, os mais mecanizados e os mais compactados pelo pisoteio pecuário. Os municípios de Costa Rica, Alto Araguaia e Rio Verde apresentaram maiores perdas de solo por erosão laminar entre os doze municípios analisados na bacia do rio Taquari por Galdino et al. (2003).

4.1.4 Hidrografia

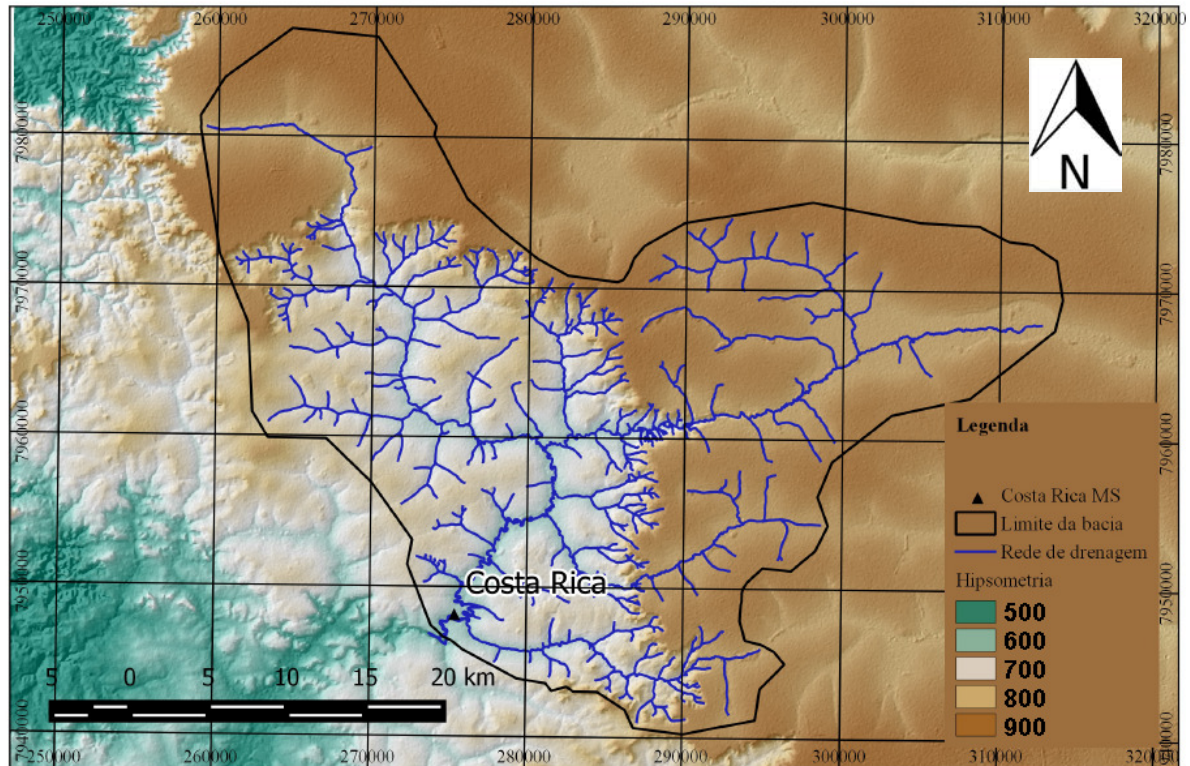
A Figura 7 apresenta a rede de drenagem da bacia do Alto Sucuriú, que pode ser classificada como dendrítica, por se desenvolver, predominantemente, sobre estruturas sedimentares horizontais, conforme classificação de Christofolletti (1980).

Na região de Costa Rica destacam-se como principais cursos d'água, o rio Sucuriú e o ribeirão Baús. A orientação geral dos cursos d'água segue, em linhas gerais, a direção NW-SE. Um aspecto interessante em relação à drenagem é a sua baixa densidade relativa.

Isto pode ser devido a dois fatores: aos relevos suaves, com declividades médias inferiores a 5% e as condições elevadas de infiltração dos sedimentos arenosos.

Assim, os padrões de drenagem obtidos em pequenas escalas (mapas inferiores a escala 1:100.000), correspondem a situação real da drenagem, podendo ser observada sem a necessidade de mapas topográficos de maior detalhe.

Figura 7 - Mapa da rede de drenagem da bacia contribuinte da PCH Costa Rica, sobre o Modelo Digital de Elevação obtido a partir de imagem SRTM da região de Costa Rica (MS)



Fonte. Elaborado pelo autor a partir de dados da malha hidrográfica editada sobre imagem e MDE do TOPODATA.

4.1.5 Dados Climáticos

Para a análise da precipitação na bacia hidrográfica do Alto Sucuriú e inserção de dados climáticos no SWAT foram utilizados dados de distribuição da precipitação mensal, nos períodos de 1984 a 2006, gerada dos dados obtidos da Estação do município de Costa Rica, MS (Código 1853004), e de 1979 a 2014 do National Center for Environmental Prediction (NCEP), Climate Forecast System Reanalysis (CFSR), Dile e Srinivasan (2014), (Figuras 8 a 12).

Figura 8 - Formulário on-line de requisição de dados climáticos do Global Weather Data for SWAT (CFSR)

Request Status

✔ Download your request data [\[?\]](#)
 This data will be available online until 7/18/2014


Request Information

Date Requested	6/18/2014 6:30 AM
Generate SWAT Files	Yes
Generate CSV File	Yes

Data Collected

Temperature	Yes
Precipitation	Yes
Wind	Yes
Relative Humidity	Yes
Solar	Yes

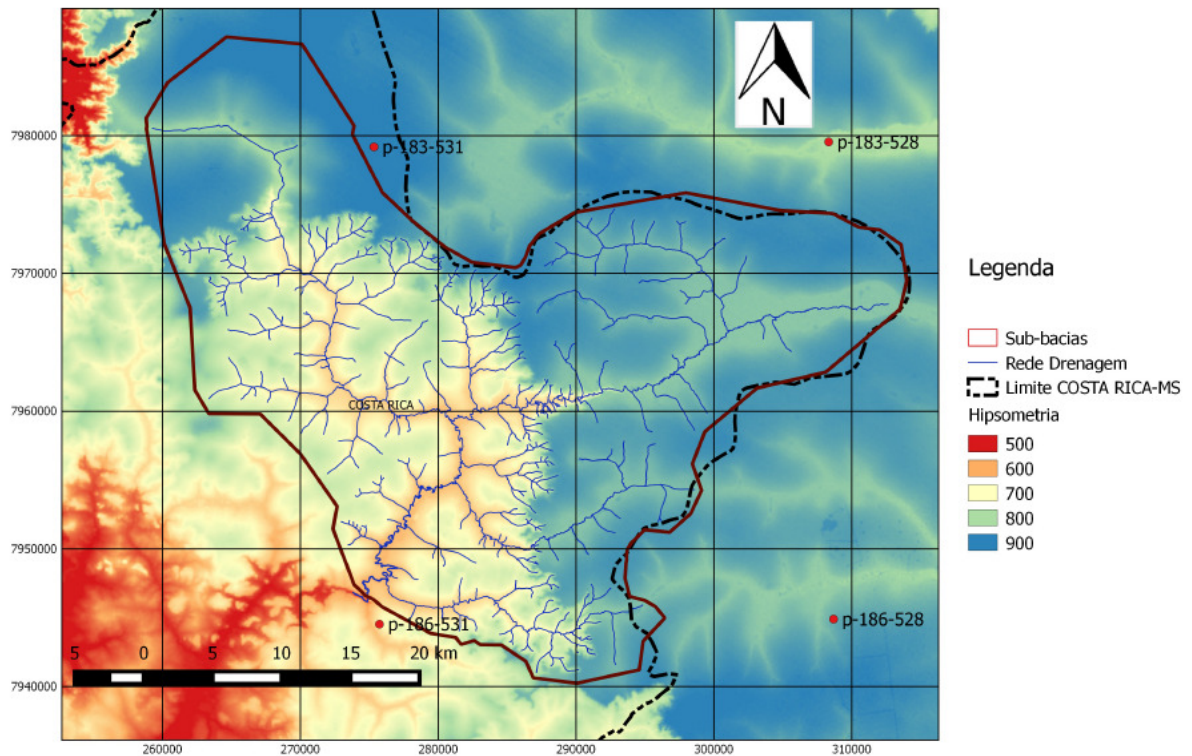
Location and Dates



South Latitude	-19.1296	North Latitude	-17.9631
West Longitude	-53.7231	East Longitude	-52.5311
Number of Stations	9		
Start Date	12/1/2000		
End Date	12/31/2010		
Starting Hour of Day	12:00 AM		

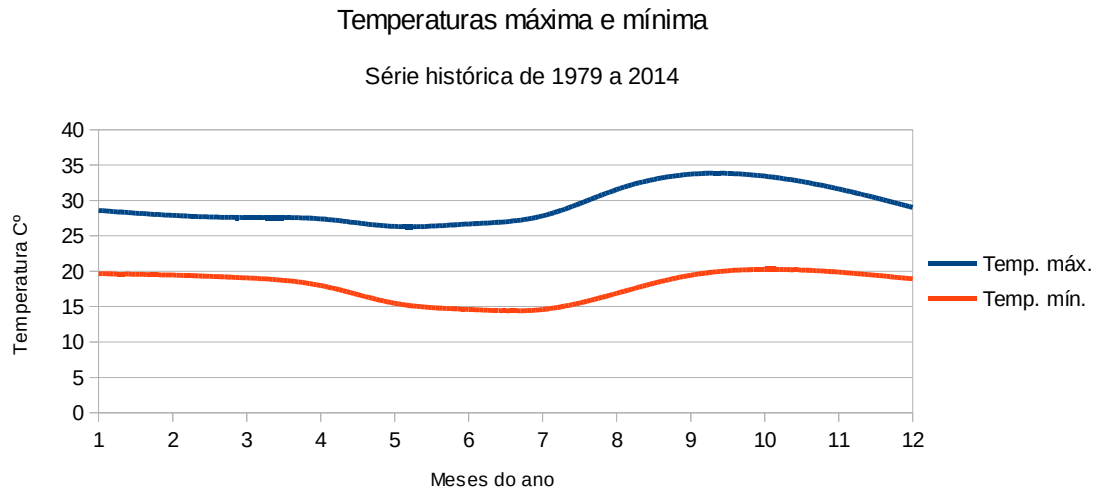
Fonte. Disponível em <http://globalweather.tamu.edu/> acesso em 18/06/2014.

Figura 9 - Mapa com a distribuição espacial das estações de dados climáticos



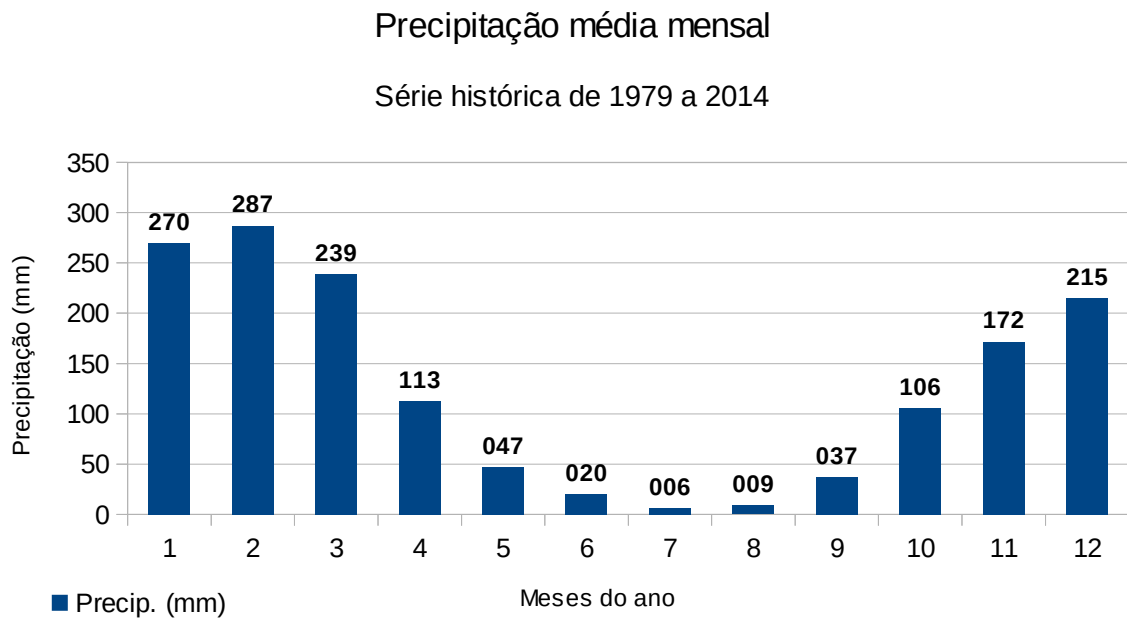
Fonte. Elaborado pelo autor a partir de dados do CFSR e TOPODATA.

Figura 10 - Distribuição das temperaturas máxima e mínima, no período de 1979 a 2014



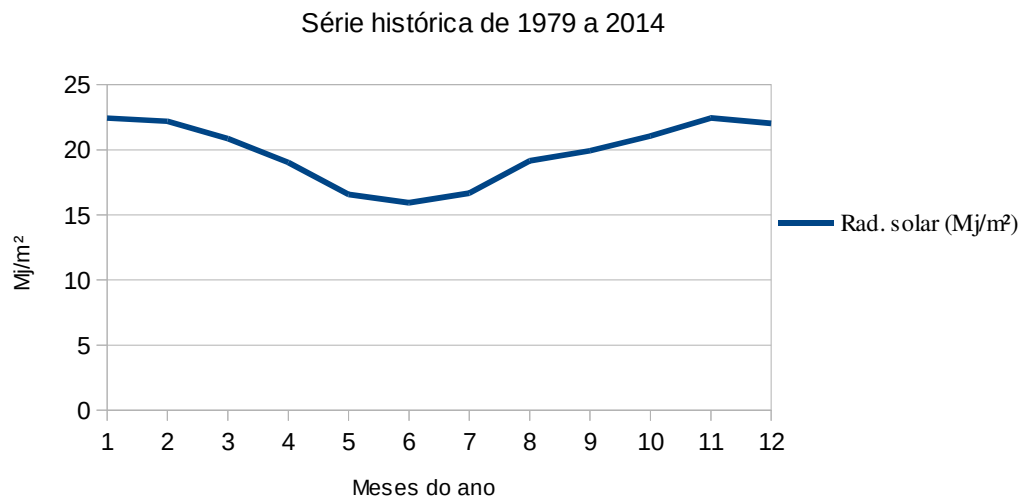
Fonte. Elaborado pelo autor com dados obtidos da série histórica do CFSR, estação 183-528.

Figura 11 - Distribuição da precipitação mensal, no período de 1979 a 2014



Fonte. Elaborado pelo autor com dados obtidos da série histórica do CFSR, estação 183-528.

Figura 12 - Distribuição da incidência de radiação solar média mensal
Radiação solar média mensal



Fonte. Elaborado pelo autor com dados obtidos da série histórica do CFSR, estação 183-528.

4.2 A PCH COSTA RICA

A PCH Costa Rica está em funcionamento desde 1997, foi instalada à jusante do núcleo urbano do município de Costa Rica (MS), próximo ao principal ponto turístico da região, o salto Majestoso, com uma queda d'água de aproximadamente 40 metros na vertical.

O conjunto gerador utiliza a água do rio Sucuriú, que após passar pelo canal de adução e pelos geradores da PCH volta a fazer parte deste rio (Figura 13).

Figura 13 - PCH Costa Rica, em funcionamento desde 1997, utilizando a água do rio Sucuriú próxima ao Salto Majestoso



Fonte. Trannin (2013).

A produção média de energia é de 16,5 MW, no entanto, devido ao intenso processo de assoreamento do rio Sucuriú, há quatro anos seu funcionamento vem sendo mantido por dragagem, por meio da qual são retirados os sedimentos do leito do reservatório, constituídos principalmente de areia, depositada em área da própria PCH Costa Rica, tendo a previsão de ser aproveitada por areiros da região e construtores (Figuras 14 e 15).

Como forma de preservar as APPs - áreas de preservação permanente foram mantidos 30 m de vegetação em cada margem do rio Sucuriú na área de influência da PCH Costa Rica.

Figura 14 - Draga instalada no canal de adução da PCH Costa Rica (MS)



Fonte. Trannin (2013).

Figura 15 - Sedimentos retirados do canal de adução da PCH Costa Rica



Fonte. Trannin (2013).

Até o ano de 2011 não existia acompanhamento da quantidade e das principais fontes geradoras do grande volume de sedimentos que assoreavam o rio Sucuriú e que, ao atingirem

o canal de adução, comprometiam a vida útil do reservatório e afetam o bom desempenho da geração de energia desta PCH.

No entanto, a identificação de uma voçoroca localizada próximo ao Córrego São Luiz, com altitude de 789m e coordenadas UTM E=290955 e N=7946607 (WGS-84 Fuso 22 S), foi apontada como uma das principais fontes geradoras de sedimentos, que causavam o assoreamento do reservatório da PCH Costa Rica. Na Figura 16, pode ser observada essa erosão, situada a cerca de 20 km da cidade de Costa Rica e 16 km à montante do reservatório.

Figura 16 - Principal voçoroca localizada à montante do reservatório da PCH de Costa Rica



Fonte. Elaborado pelo autor a partir de imagem do Google Earth de 2004.

De acordo com informações fornecidas pela Secretaria de Turismo e Meio Ambiente de Costa Rica, no ano de 2011, e de moradores antigos da região de entorno, essa voçoroca vem se desenvolvendo a aproximadamente 50 anos. Em levantamentos de campo, foi evidenciado que o processo erosivo continua ativo, havendo vários pontos de recentes movimentos de massa (Figura 17).

A influência direta desta voçoroca atinge três propriedades rurais, e além desta voçoroca principal, verificou-se que várias outras voçorocas estão se formando na bacia, inclusive uma localizada imediatamente à montante do núcleo urbano do município.

Figura 17 - Identificação de processo erosivo recente na voçoroca da bacia hidrográfica à montante da PCH Costa Rica



Fonte. Trannin (2013).

Em uma primeira análise verificou-se a importância de avaliar minuciosamente a fenomenologia ou as causas da origem dessa voçoroca, considerando que está localizada na borda de um chapadão e não parece ter sido causada por pisoteio de gado ou processo de mecanização agrícola intenso. Além disso, encontra-se em área de Latossolos (solos ricos em óxidos de ferro), profundos e, nesse caso, coberto por vegetação arbórea de cerrado bem desenvolvida, não sendo identificada, de imediato, a principal causa para que o processo erosivo tenha sido desencadeado, sendo necessária para isso, a utilização do mapa geológico e de uma série histórica de imagens da região.

4.3 DADOS E SOFTWARES UTILIZADOS

No presente trabalho foram utilizados dados pré-existentes (imagens e mapas), dados de levantamentos (campanhas de levantamento de dados hidrossedimentológicos), dados de séries históricas de estações climatológicas, equipamentos de topografia (Estação total marca RUIDE modelo 852R3, dotada com capacidade de leitura sem prisma até 350m), georreferenciamento (GPS geodésico ASHTECH Promark 200), equipamentos de informática e softwares específicos.

Foram utilizados dados orbitais do satélite LandSat TM5 para o mapeamento e análise das mudanças de uso da terra, mapa digital de uso da terra do WaterBase/UNU (2012), mapa de solos da EMBRAPA, mapa de solos do Digital Soil Map of the World –DSMW (FAO/UNESCO, 1995), e os dados do Modelo Digital de Elevação (MDE) da bacia hidrográfica, obtidos do projeto TOPODATA (VALERIANO et al., 2009), que gerou uma base de cobertura nacional com o processamento de dados do Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), criando uma coleção com 16 variáveis de derivadas geomorfométricas.

Foram utilizados os softwares de sensoriamento remoto Sistema de Processamento de Informações Georreferenciadas – SPRING (CÂMARA et al., 1996) na versão 5.2, Multispec[©] na versão 3.3 (BIEHL e LANDGREBE, 1996), e de geoprocessamento, QGIS[©] -Quantum GIS, 2004 - 2014 QGIS Development Team, MapWindow[©] na versão 4.8.8, de modelagem SWAT2012 com MWSWAT2012 (GEORGE, 2012) e QSWAT (GEORGE, 2015), e de Calibração/Validação do Modelo SWAT-CUP na versão 5.1.6 (ABBASPOUR, 2013), o desenvolvimento se deu no sistema operacional Windows7[©], foram utilizados na produção do texto e planilhas os pacotes Microsoft Office 2007 e LibreOffice 4.2.2, além do editor de texto Notepad++ (The Notepad++ team, 2014).

4.4 METODOLOGIA APLICADA

4.4.1 Levantamento topográfico da voçoroca

A voçoroca localizada a cerca de 21 km da cidade de Costa Rica e à montante do reservatório (16 km), foi apontada por técnicos da PCH Costa Rica como uma das principais fontes geradoras de sedimentos que causam o assoreamento do rio e provocam problemas à operação da usina, (Figura 18).

Figura 18 - Vista tomada a partir da borda da voçoroca existente à montante da PCH Costa Rica

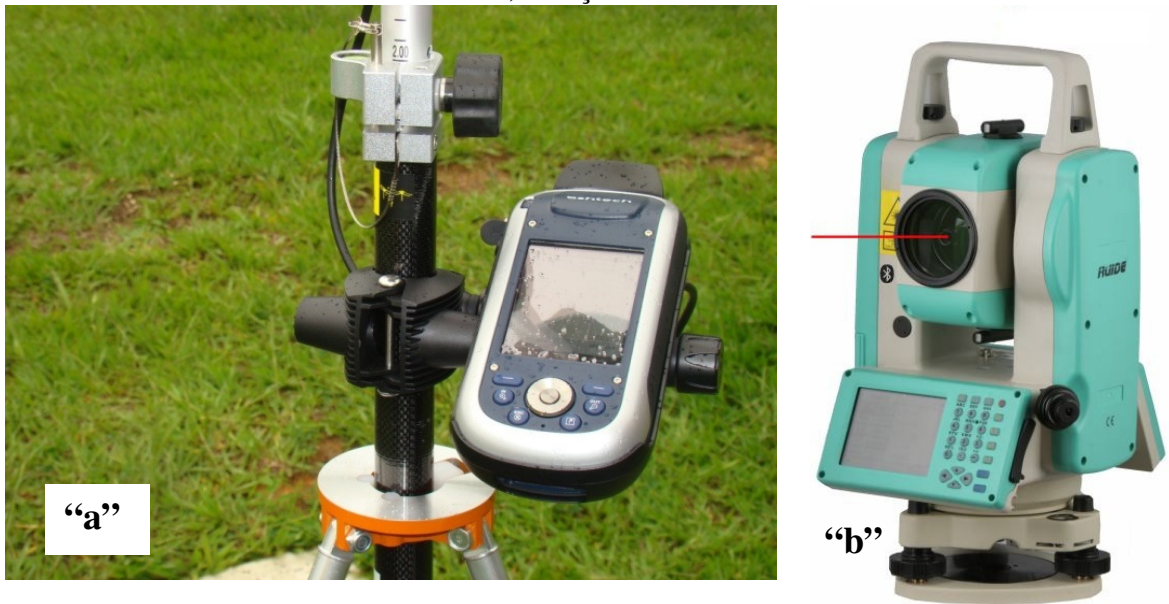


Fonte. Trannin, (2013).

Para a quantificação do volume de material produzido pela voçoroca foi realizado um levantamento topográfico georreferenciado com poligonal aberta apoiada em dois pontos tomados com GPS Geodésico, para a realização desse trabalho foi utilizado uma estação total

com capacidade de leitura sem prisma com alcance de trezentos metros (Modelo RUIDE RTS 862/R), e um GPS Geodésico L1-L2 (Modelo ASHTECH PM 200), como pode ser observado na Figura 19.

Figura 19 - Equipamentos utilizados na realização do levantamento topográfico “a” GPS Geodésico PM 200 - ASHTECH e “b”, Estação Total Ruide RTS 862/R

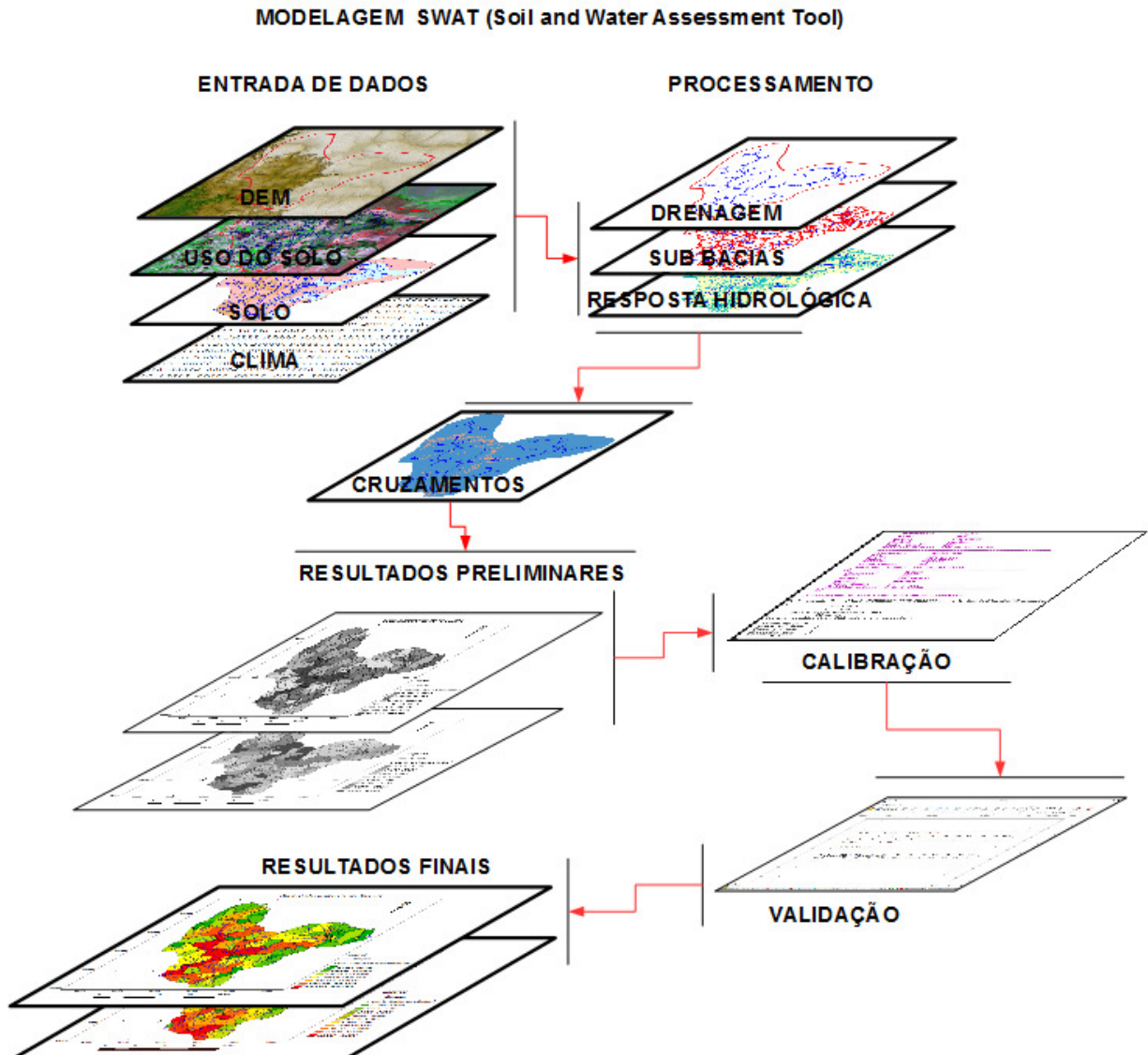


Fonte. Trannin (2013).

4.4.2 Pré-processamento de dados de entrada para modelagem com SWAT

A utilização do SWAT para a realização da modelagem de perda de solo e da produção de sedimentos nos canais de drenagem da bacia do alto Sucuriú depende de uma série de etapas de pré processamento de dados que são utilizados como entrada no sistema, a sequência de preparação/entrada/processamento e resultados no SWAT é realizada, conforme o diagrama apresentado na Figura 20.

Figura 20 - Diagrama esquemático do fluxo de modelagem das perdas de solo com o emprego do SWAT



Fonte. Elaborado pelo autor com base em dados, processamentos e resultados obtidos no processo de modelagem com emprego do SWAT.

A modelagem de produção de sedimentos realizada pelo modelo SWAT se divide em duas fases, a da modelagem do escoamento na bacia, e em seguida a modelagem da produção e do transporte do sedimento nos canais.

O escoamento superficial ocorre sempre que a taxa de aplicação de água na superfície do solo excede a taxa de infiltração. Quando a água é inicialmente aplicada a um solo seco, a taxa de infiltração é geralmente muito alta, e diminui proporcionalmente à curva de saturação de umidade no solo.

Quando a taxa de aplicação é mais elevada do que a taxa de infiltração, as depressões superficiais começam a encher. Se a taxa de aplicação continua a ser maior que a taxa

infiltração uma vez que todas as depressões superficiais encheram, tem início o escoamento superficial.

O modelo SWAT fornece dois métodos para estimar o escoamento superficial, o procedimento da Curva Número (CN) do SCS (SCS, 1972) e o método de infiltração (GREEN e AMPT, 1911), para o qual são necessários dados de precipitação sub-diários, não disponíveis para este estudo.

A equação de escoamento do SCS é um modelo empírico que começou a ser usado com frequência na década de 1950. Foi o resultado de mais de 20 anos de estudos envolvendo relações entre precipitações e escoamento de pequenas bacias hidrográficas rurais em todos os EUA. O modelo foi desenvolvido para fornecer uma base consistente para estimar as quantidades de escoamento em diferentes usos da terra e tipos de solo (RALLISON e MILLER, 1981).

A equação de escoamento pelo número da curva (CN) do SCS é dada por:

$$Q_{surfD} = \frac{(R_{day} - I_a)^2}{(R_{day} - I_a + S)} \quad (1)$$

Em que:

Q_{surfD} = escoamento superficial direto diário (mm);

R_{day} = precipitação diária (mm);

I_a = abstração inicial, que inclui o armazenamento superficial, interceptação e a infiltração antes do escoamento, (mm);

S = parâmetro de retenção (mm).

A abstração inicial (I_a) é comumente aproximada a $0,2S$ que substituindo na equação 2 tem-se:

$$Q_{surfD} = \frac{(R_{day} - 0,2S)^2}{(R_{day} + 0,8S)} \quad (2)$$

O parâmetro de retenção (S) varia espacialmente devido as classes de solo, cobertura, manejo, declividade e temporalmente devido as mudanças no conteúdo de água no solo (NEITSCH et al., 2005). O parâmetro de retenção é descrito por:

$$S = 25,4 \left(\frac{1000}{CN} - 10 \right) \quad (3)$$

A escala de CN do SCS não é linear e varia de 1 a 100, sendo os valores extremos correspondentes respectivamente a uma cobertura permeável até uma cobertura impermeável, na modelagem do escoamento superficial o SWAT utiliza valores de CN entre 35 a 98, sendo utilizada a condição de CN2, situação em que o teor de umidade dos solos encontram-se próximos à capacidade de campo.

Para a estimativa de produção de sedimentos, no modelo SWAT a erosão causada pela chuva é estimada através da Equação Universal de Perda de Solos Modificada (Modified Universal Soil Loss Equation – MUSLE) desenvolvida por Williams (1975). A MUSLE é a versão modificada da USLE desenvolvida por Wischmeier e Smith (1965). Enquanto a USLE prediz a erosão média em função da energia da chuva, a MUSLE utiliza a quantidade de escoamento para simular a erosão e a produção de sedimentos, representando a energia usada no destacamento e transporte de sedimentos. Segundo Neitsch et al. (2005) essa substituição resulta em um número de benefícios para o modelo SWAT, com aumento da precisão aumenta, e aplicação para eventos de chuvas individuais, utilizando o passo diário de simulação, adotado na modelagem com o SWAT.

A Equação Universal de Perda de Solos Modificada (MUSLE) proposta por Williams (1975,1995) é dada por:

$$sed = 11,8 * (Q_{surf} * q_{peak} * area_{hru})^{0,56} * K_{USLE} * C_{USLE} * P_{USLE} * LS_{USLE} \quad (4)$$

Em que:

sed = produção de sedimentos em um dado dia (Mg);

Q_{surf} = volume de escoamento superficial (mm);

q_{peak} = vazão de pico ($m^3.s^{-1}$);

$area_{hru}$ = área em hectares da HRU (Unidade de Resposta Hidrológica);

K_{USLE} = fator de erodibilidade do solo;

C_{USLE} = fator de cobertura e manejo do solo;

P_{USLE} = fator de práticas conservacionistas;

LS_{USLE} = fator topográfico.

4.4.3 Obtenção do Modelo Digital de Elevação (MDE)

O Modelo Digital de Elevação (MDE) da bacia hidrográfica foi obtido do projeto TOPODATA (VALERIANO et al., 2009), que gerou uma base de dados de cobertura nacional com o processamento de dados do Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), criando uma coleção com 16 variáveis de derivadas geomorfométricas (Tabela 3).

Tabela 3 - Índice de variáveis geomorfométricas do projeto TOPODATA

Variável	Arquivos (.zip):
Altitude - numérica	___ZN
Declividade - numérica	___SN
Orientação - numérica	___ON
Curv. Vertical - numérica	___VN
Curv. Horizontal - numérica	___HN
Declividade - classes	___SA
Declividade - classes	___SB
Declividade - classes	___SC
Orientação - octantes	___OC
Curv. Vertical - 3 classes	___V3
Curv. Vertical - 5 classes	___V5
Curv. Horizontal - 3 classes	___H3
Curv. Horizontal - 5 classes	___H5
Forma de terreno - classes	___FT
Relevo sombreado - numérico	___RS
ADD - divisores e talvegues	___DD

Fonte – Projeto TOPODATA - <http://www.dsr.inpe.br/topodata/acesso.php>: acesso em 24/11/2012.

Os dados do TOPODATA são disponibilizados em quadrículas compatíveis com a articulação 1:250.000, portanto, em folhas de 1° de latitude por 1,5° de longitude. Na versão atual, os arquivos estão nomeados, seguindo-se uma única notação para cada conjunto de uma mesma folha. As folhas estão identificadas seguindo o prefixo de 6 letras LAHLON, em que LA é a latitude do canto superior esquerdo da quadrícula, H refere-se ao hemisfério desta posição (S, Sul, ou N, Norte) e LON sua longitude, na seguinte notação: nn5 quando a longitude for nn graus e 30' e nn_ quando a coordenada for nn graus inteiros (Figura 21).

Figura 21 - Mapa índice da articulação de folhas do projeto TOPODATA



Fonte – Projeto TOPODATA - <http://www.dsr.inpe.br/topodata/acesso.php>: acesso em 24/11/2012.

Os arquivos do MDE utilizados são os que contêm a altitude numérica, com a extensão __ZN, correspondentes a área de estudo de Costa Rica, e são respectivamente 18S54_ZN e 18S525_ZN, ambos disponibilizados no sistema de coordenadas geográficas, as quais precisam ser reprojatadas para o sistema de coordenadas UTM, datum WGS-84 zona 22S, como pré requisito para alimentar o sistema para a modelagem com o SWAT.

4.4.4 Mapeamento do uso e ocupação do solo

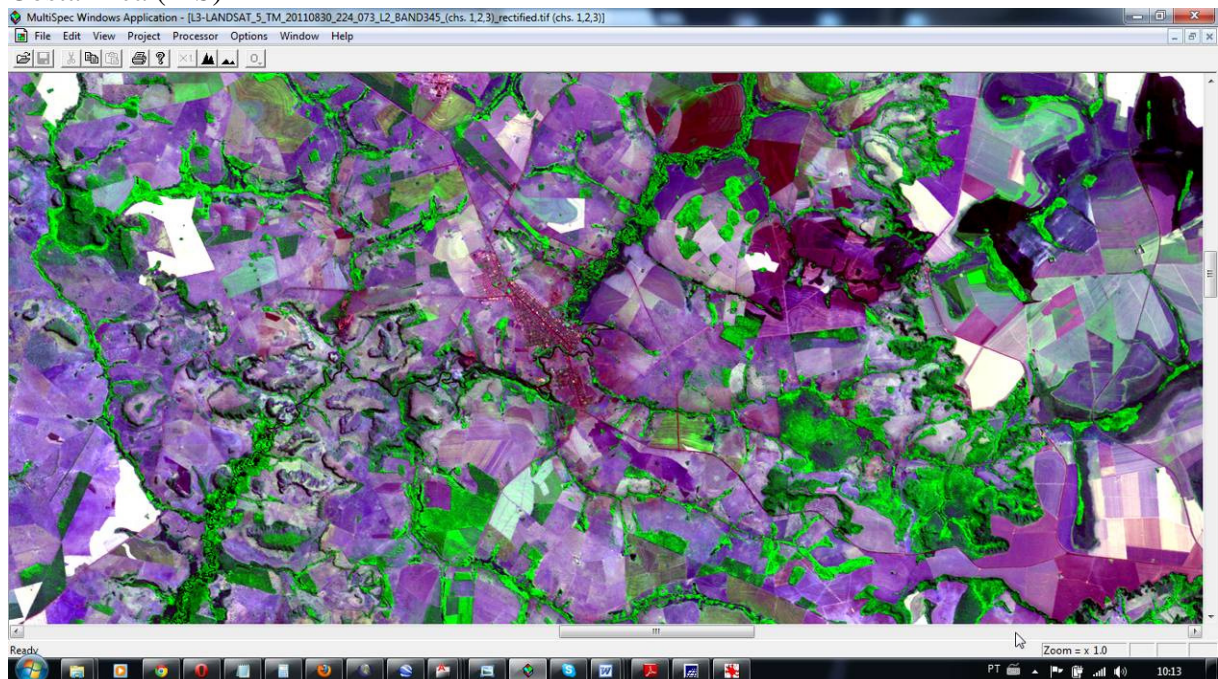
Para a elaboração do mapeamento do uso do solo e detecção de mudanças entre os anos de 1984 e 2011 (27 anos), foram utilizados o software Multispec[©] (BIEHL e LANDGREBE, 1996), e o SIG completo SPRING – Sistema de Processamento de Informações Georreferenciadas (CÂMARA et al. 1996), na versão 5.2, com o qual foi criado um banco de dados georreferenciado e um projeto correspondente ao tamanho da área geográfica que contém a área de estudo, e ao qual foram inseridas as cenas de satélite descritas, utilizando-se

a projeção UTM referenciada ao Datum WGS84, Fuso 22 e Meridiano Central de 51° W de Greenwich.

As cenas ou imagens do satélite LandSat TM5 foram recebidas em formato GEOTIFF, e precisaram ser registradas/georreferenciadas para correção geométrica e compatibilização com o Datum do banco de dados georreferenciado.

Para a realização do registro da imagem utilizou-se uma cena georreferenciada LandSat GeoCover (Figura 22), disponível a partir de <http://glcf.umiacs.umd.edu/>, utilizada como parâmetro para a obtenção de pontos de controle utilizados no georreferenciamento das cenas a serem classificadas.

Figura 22 - Imagem LandSat GeoCover em composição colorida R3G4B5 utilizada como parâmetro para a correção geométrica das cenas a serem classificadas quanto ao uso do solo, visualizada com MultiSpec©. No centro, pode ser observado o núcleo urbano do município de Costa Rica (MS)



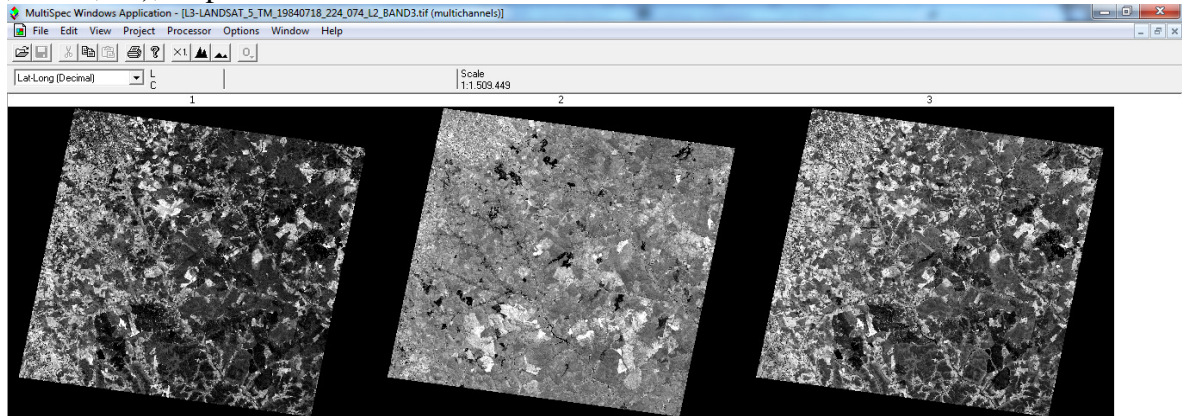
Fonte. USGS LandSat GeoCover, disponível em <http://glcf.umiacs.umd.edu/> acesso em 23/08/2014.

4.4.5 Detecção de mudança no uso do solo

Entre os métodos de detecção de mudanças no uso do solo, foi utilizado neste trabalho o método de análise pós-classificada. As imagens recebidas do INPE em formato GEOTIFF foram disponibilizadas, separadas por faixas radiométricas distintas (Figuras 23 e 24), e para proceder a correção geométrica em relação ao georreferenciamento das cenas de duas datas

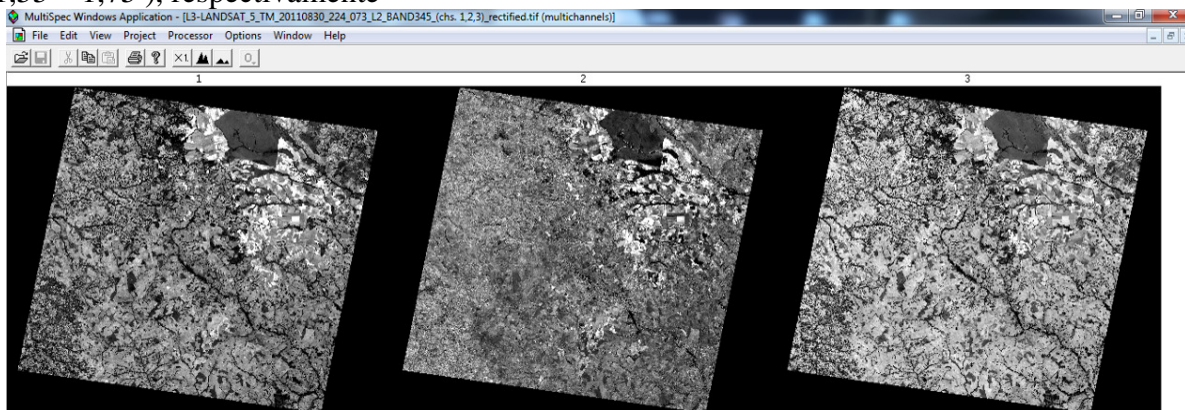
distintas, estas foram agrupadas em imagens com três bandas espectrais, procedimento realizado com o uso do software MultiSpec[®].

Figura 23 - Canais 3, 4 e 5 da imagem do LandSat TM5 órbita/ponto 224-073 de 18/07/1984, correspondentes às faixas espectrais do Vermelho (RED, no visível, com o intervalo espectral 0,6 – 0,7 μm), Infra Vermelho Próximo (NIR 0,7-1,2 μm) e Infra Vermelho Médio (SWIR 1,55 – 1,75 μm), respectivamente



Fonte. Elaborado pelo autor com uso do software Multispec e imagens do satélite LandSat TM5 órbita/ponto 224-073 de 18/07/1984.

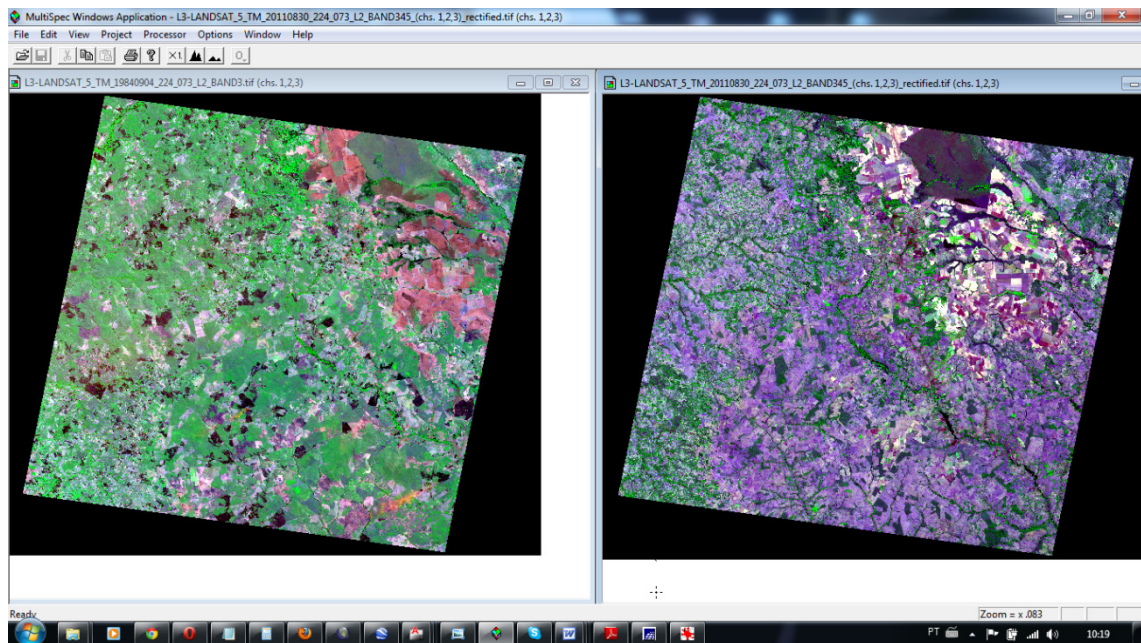
Figura 24 - Canais 3, 4 e 5 da imagem do LandSat TM5 órbita/ponto 224-074 de 30/08/2011, correspondentes às faixas espectrais do Vermelho (RED, no visível, com o intervalo espectral 0,6 – 0,7 μm), Infra Vermelho Próximo (NIR 0,7-1,2 μm) e Infra Vermelho Médio (SWIR 1,55 – 1,75 μm), respectivamente



Fonte. Elaborado pelo autor com uso do software Multispec e imagens do satélite LandSat TM5 órbita/ponto 224-073 de 30/08/2011.

O agrupamento dos canais separados em uma única imagem com três bandas espectrais otimiza o procedimento de correção geométrica e garante o exato posicionamento em relação aos canais, o que dificilmente se consegue quando os canais são registrados um a um. O resultado do agrupamento dos canais para as duas datas estudadas, considerando o uso do solo da bacia do Alto Rio Sucuriú, pode ser observado na Figura 25.

Figura 25 - Visualização das imagens da região da bacia hidrográfica, agrupadas em composição colorida falsa cor 3R4G5B, na esquerda a imagem de 1984, à direita a imagem de 2011



Fonte. Elaborado pelo autor com uso do software Multispec e imagens do satélite LandSat TM5 órbita/ponto 224-073 de 18/07/1984 e 30/08/2011.

A classificação das imagens para a obtenção do mapa de uso do solo foi conduzida para verificar as mudanças nos padrões de uso e suas relações com os processos erosivos da bacia do Alto Rio Sucuriú. Para isso, foi considerado o período mais seco dos anos de 1984 e 2011, quando as formações perenes ficam evidenciadas na paisagem, ressaltando a porção de solo exposto aos processos de intemperismo, sendo possível a identificação das grandes classes de uso do solo, descritas a seguir.

Solo exposto – solo desprovido de cobertura vegetal ou com resposta espectral, cuja presença de solo é superior as demais identidades dos alvos, como áreas urbanizadas ou presença incipiente de vegetação;

Floresta – fisionomias florestais perenes com dossel em grau de cobertura com folhas verdes em fechamento, cuja resposta espectral produzida por processos fotossintéticos supera as demais identidades dos alvos;

Água/queimadas – corpos d'água e áreas de queimadas produzem respostas espectrais semelhantes no conjunto dos três canais a serem classificados, todavia de pequena participação em área quadrática;

Campo/vegetação rasteira – feições cuja resposta espectral corresponde à mistura com presença de culturas e cobertura vegetal com resposta de solo.

Após a definição destas classes de uso do solo e com as imagens já inseridas e georreferenciadas no banco de dados, foi então realizado o mapeamento. O algoritmo classificador do uso do solo selecionado para este mapeamento foi o MAXVER, derivado do método estatístico de Máxima Verossimilhança, que é o método de classificação "pixel a pixel" mais comum. O MAXVER considera a ponderação das distâncias entre as médias dos níveis digitais das classes, utilizando parâmetros estatísticos.

Os conjuntos de amostras de treinamento selecionadas na imagem, segundo as classes de uso do solo preestabelecidas, definem o diagrama de dispersão das classes e suas distribuições de probabilidade, considerando a distribuição de probabilidade normal para cada classe do treinamento. Os índices de exatidão obtidos para cada uma das classes situaram-se, predominantemente, acima de 90% para esta bacia hidrográfica (Figura 26).

Figura 26 - Captura de tela dos resultados estatísticos de exatidão do mapeamento, à esquerda os resultados sobre a imagem de 1984 e à direita os resultados sobre a imagem de 2011

	Exatidão do produtor	Exatidão do usuário
solo_exp1	86.35%	58.77%
solo_exp2	58.99%	85.04%
solo_exp3	92.70%	91.46%
solo_exp4	63.91%	87.27%
cerrado	98.28%	93.09%
mata_capoe	72.01%	79.57%
agua_queim	93.33%	95.61%
campo_veg_	58.62%	83.86%

	Exatidão do produtor	Exatidão do usuário
solo_exp1	82.26%	97.81%
solo_exp2	92.69%	86.48%
solo_exp3	68.16%	97.49%
solo_exp4	94.53%	94.89%
agua_queim	97.38%	95.14%
cerrado	99.76%	95.74%
mata_capoe	78.82%	98.15%
campo_veg_	90.81%	91.10%

Fonte. Elaborado pelo autor com o recorte dos resultados das matrizes de confusão do conjunto de amostras colhidas nas imagens para os anos de 1984 e 2011.

Após a verificação dos índices de exatidão procedeu-se à classificação das imagens dos anos de 1984 e 2011, obtendo-se então, os mapas de uso do solo da bacia do Alto Rio Sucuriú, à montante da PCH Costa Rica.

Os mapas de uso do solo obtidos da classificação das imagens Landsat TM5 foram reclassificados na forma de imagem numérica, sendo cada classe compatibilizada para as classes de uso do solo presentes no banco de dados de cobertura do solo do SWAT, com seus respectivos parâmetros.

4.4.6 Preparação dos dados pedológicos

Os dados relativos ao mapa de solos do IBGE precisaram ser compatibilizados com as classes correspondentes no SWAT, com seus respectivos atributos físicos inseridos na tabela USERSOIL do banco de dados de solos do SWAT (Tabela 4).

Tabela 4 – Relação entre as classes de solos de ocorrência na área de estudo e as classes correspondentes no banco de dados de solos do SWAT

Classes de solo	Cód. FAO	SNAM
GMbd	5483	Gd1-3a-5483
Rld	5645	Qf7-1a-5645
LVd	5417	Fa2-2a-5417
LVe	5468	Fr1-3a-5468

Fonte. Elaborado pelo autor.

4.4.7 Preparação prévia dos dados climáticos

Com relação a entrada de dados climáticos, a modelagem de fenômenos atuantes em bacias hidrográficas realizadas pelo SWAT não possui, por padrão, um conjunto de dados globais embarcado, existe por padrão um conjunto de dados climáticos para o tratamento e modelagem regionalizado na América do Norte.

Nas demais regiões do globo são necessários o tratamento de dados brutos de estações meteorológicas regionais/locais, tais como: precipitação diária máxima, temperaturas máxima e mínima do ar, radiação solar, velocidade do vento e umidade relativa do ar dentre outras, ou a utilização dos dados do “Global Weather Data for SWAT”.

O arquivo de entrada para o módulo de modelagem de condições climáticas necessita dos dados estatísticos provenientes de observação nas estações meteorológicas da região em estudo para gerar dados climáticos diários representativos para as sub-bacias, empregando o máximo de anos de registros disponíveis para calcular os parâmetros no arquivo de entrada de dados no formato específico do sistema (*.WGN). Os dados climáticos são gerados em dois casos: quando o usuário especifica que os dados climáticos para a modelagem serão simulados, ou, quando dados medidos estão ausentes. Uma breve descrição de algumas das

variáveis do arquivo de entrada para o módulo de simulação climática do SWAT é apresentada a seguir (Quadro 1).

Quadro 1 - Amostra descritiva de algumas das variáveis do arquivo de modelagem climática .WGN

Variable name	Definition
TITLE	A primeira linha do arquivo. WGN é reservado para usuário e comentários. Os comentários podem conter até 80 caracteres. A linha do título não é processada pelo modelo e pode ser deixada em branco. Opcional.
WLATITUDE	Latitude da estação meteorológica utilizada para criar parâmetros estatísticos (graus). A latitude é expressa como um número real com minuto e segundo convertidos em frações de graus. Obrigatório.
WLONGITUDE	Longitude da estação meteorológica (graus). Esta variável não é utilizado pelo modelo e pode ser deixada em branco. Opcional.
WELEV	Elevação da estação meteorológica (m). Necessário se bacias hidrográficas são modeladas em grid de elevação.
RAIN_YRS	O número de anos com máximos mensais de 0,5 h chuvas ou superior, dados utilizados para definir os valores para RAIN_HHMX (1) - RAIN_HHMX (12). Se nenhum valor é informado para RAIN_YRS, SWAT irá definir RAIN_YRS = 10. Obrigatório.
TMPMX(mon)	Temperatura do ar diária média das máximas ou média mensal (° C). Este valor é calculado pela soma da temperatura máxima do ar para cada dia do mês para todos os anos de registro e dividindo pelo número de dias somados: $\mu mx_{mon} = \frac{\sum_{d=1}^N T_{mx,mon}}{N}$ Onde: mx_{mon} é a temperatura média diária máxima para o mês (°C), $T_{mx,mon}$ é o máximo diário de temperatura no registro d no mês mon (°C), e N é o número total de registros de temperatura máxima diária para mon mês. Obrigatório.
TMPMN(mon)	Temperatura do ar diária média das mínimas ou média mensal (° C). Este valor é calculado pela soma da temperatura mínima do ar para cada dia do mês para todos os anos de registro e dividindo pelo número de dias somados: $\mu mn_{mon} = \frac{\sum_{d=1}^N T_{mn,mon}}{N}$ Onde: mn_{mon} é a temperatura média diária mínima para o mês (°C), $T_{mn,mon}$ é o mínimo diário de temperatura no registro d no mês mon (°C), e N é o número total de registros de temperatura mínima diária para mon mês. Obrigatório.

Fonte. Manual do SWAT 2005.

A disposição exata de cada variável no arquivo de alimentação de dados climáticos para modelagem no SWAT deve obedecer aos critérios indicados na Tabela 5.

Tabela 5 – Parâmetros para formatação ASCII do arquivo de entrada de dados climáticos .WGN. No exemplo, além do cabeçalho, as variáveis são somente de temperatura, procedimento similar é feito para os dados de precipitação, radiação solar, umidade relativa e velocidade do vento

Variable name	Line#	Position	Format	F90 Format
TITLE	1	space 1-80	character	a80
WLATITUDE	2	space 13-19	decimal(xxxx.xx)	f7.2
WLONGITUDE	2	space 32-38	decimal(xxxx.xx)	f7.2
WELEV	3	space 13-19	decimal(xxxx.xx)	f7.2
RAIN_YRS	4	space 13-19	decimal(xxxx.xx)	f7.2
TMPMX(1)	5	space 1-6	decimal(xxx.xx)	f6.2
TMPMX(2)	5	space 7-12	decimal(xxx.xx)	f6.2
TMPMX(3)	5	space 13-18	decimal(xxx.xx)	f6.2
TMPMX(4)	5	space 19-24	decimal(xxx.xx)	f6.2
TMPMX(5)	5	space 25-30	decimal(xxx.xx)	f6.2
TMPMX(6)	5	space 31-36	decimal(xxx.xx)	f6.2
TMPMX(7)	5	space 37-42	decimal(xxx.xx)	f6.2
TMPMX(8)	5	space 43-48	decimal(xxx.xx)	f6.2
TMPMX(9)	5	space 49-54	decimal(xxx.xx)	f6.2
TMPMX(10)	5	space 55-60	decimal(xxx.xx)	f6.2
TMPMX(11)	5	space 61-66	decimal(xxx.xx)	f6.2
TMPMX(12)	5	space 67-72	decimal(xxx.xx)	f6.2
TMPMN(1)	6	space 1-6	decimal(xxx.xx)	f6.2
TMPMN(2)	6	space 7-12	decimal(xxx.xx)	f6.2
TMPMN(3)	6	space 13-18	decimal(xxx.xx)	f6.2
TMPMN(4)	6	space 19-24	decimal(xxx.xx)	f6.2
TMPMN(5)	6	space 25-30	decimal(xxx.xx)	f6.2
TMPMN(6)	6	space 31-36	decimal(xxx.xx)	f6.2
TMPMN(7)	6	space 37-42	decimal(xxx.xx)	f6.2
TMPMN(8)	6	space 43-48	decimal(xxx.xx)	f6.2
TMPMN(9)	6	space 49-54	decimal(xxx.xx)	f6.2
TMPMN(10)	6	space 55-60	decimal(xxx.xx)	f6.2
TMPMN(11)	6	space 61-66	decimal(xxx.xx)	f6.2
TMPMN(12)	6	space 67-72	decimal(xxx.xx)	f6.2
TMPSTDMX(1)	7	space 1-6	decimal(xxx.xx)	f6.2
TMPSTDMX(2)	7	space 7-12	decimal(xxx.xx)	f6.2
TMPSTDMX(3)	7	space 13-18	decimal(xxx.xx)	f6.2
TMPSTDMX(4)	7	space 19-24	decimal(xxx.xx)	f6.2
TMPSTDMX(5)	7	space 25-30	decimal(xxx.xx)	f6.2
TMPSTDMX(6)	7	space 31-36	decimal(xxx.xx)	f6.2
TMPSTDMX(7)	7	space 37-42	decimal(xxx.xx)	f6.2
TMPSTDMX(8)	7	space 43-48	decimal(xxx.xx)	f6.2
TMPSTDMX(9)	7	space 49-54	decimal(xxx.xx)	f6.2
TMPSTDMX(10)	7	space 55-60	decimal(xxx.xx)	f6.2
TMPSTDMX(11)	7	space 61-66	decimal(xxx.xx)	f6.2
TMPSTDMX(12)	7	space 67-72	decimal(xxx.xx)	f6.2
TMPSTDMN(1)	8	space 1-6	decimal(xxx.xx)	f6.2
TMPSTDMN(2)	8	space 7-12	decimal(xxx.xx)	f6.2
TMPSTDMN(3)	8	space 13-18	decimal(xxx.xx)	f6.2
TMPSTDMN(4)	8	space 19-24	decimal(xxx.xx)	f6.2
TMPSTDMN(5)	8	space 25-30	decimal(xxx.xx)	f6.2
TMPSTDMN(6)	8	space 31-36	decimal(xxx.xx)	f6.2
TMPSTDMN(7)	8	space 37-42	decimal(xxx.xx)	f6.2
TMPSTDMN(8)	8	space 43-48	decimal(xxx.xx)	f6.2
TMPSTDMN(9)	8	space 49-54	decimal(xxx.xx)	f6.2


Fonte. Manual do SWAT 2005.

Para o preenchimento dos dados climáticos, os dados regionais, com cobertura da área de estudo foram processados para a montagem dos arquivos de geração de dados simulados do modelo em extensão “.wgn”. Parte desses dados foram processados com a utilização do software pcpSTAT (LIERSCH, 2003), e parte foi processada com o uso de editores de texto e planilhas eletrônicas de modo a gerar as variáveis descritas no capítulo 12 do manual de referência do SWAT.

4.5 Implementação do MWSWAT

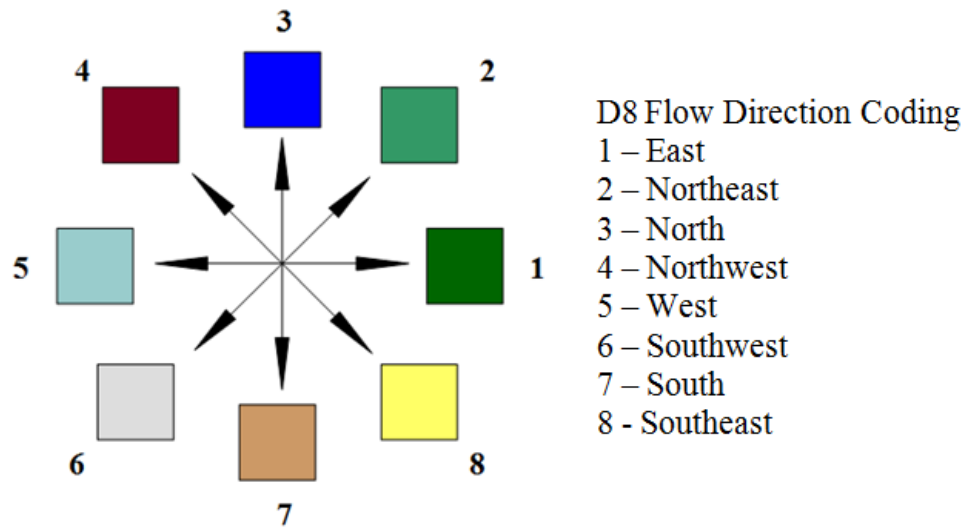
Após a preparação do Geodatabase com os dados de relevo (MDE), Solos e Uso da Terra, foi possível iniciar a aplicação da modelagem SWAT no MapWindow, por meio da extensão MWSWAT. O primeiro passo foi a criação de um novo projeto do MapWindow, que criou uma nova estrutura de pastas e arquivos para o armazenamento de dados derivados e dos resultados da modelagem. Na sequência, iniciou-se a extensão MWSWAT e foram seguidos os passos de processamento com o módulo TauDEM Tools v 5.1.2 (TARBOTON et al., 2010) para o delineamento de bacias e sub-bacias hidrográficas, a determinação do exutório principal da bacia, a ser considerado pelo sistema, e o processamento de dados derivados do MDE (D8Flow, Declividade, Comprimento de Rampa e outros). As Figuras 27 e 28 exemplificam os mecanismos de classificação da direção de fluxo.

Figura 27 - O MDE passa por uma varredura com uma máscara de 3X3 células do grid, e associa o menor valor da célula vizinha à respectiva direção, atribuindo em um novo arquivo a respectiva posição da célula de menor valor como indicativo de talvegue

32	64	128	Value	Direction of flow from centre
			1	East
			2	South East
			4	South
16	1		8	South West
			16	West
			32	North West
			64	North
8	4	2	128	North East
			0	Indicates a sink

Fonte. Adaptado de Garbrecht; Martz (1997)

Figura 28 - Códigos de cores indicativas para classificação e mapeamento da direção de fluxo das vertentes e rede de drenagem



Fonte. Adaptado de Garbrecht; Martz (1997).

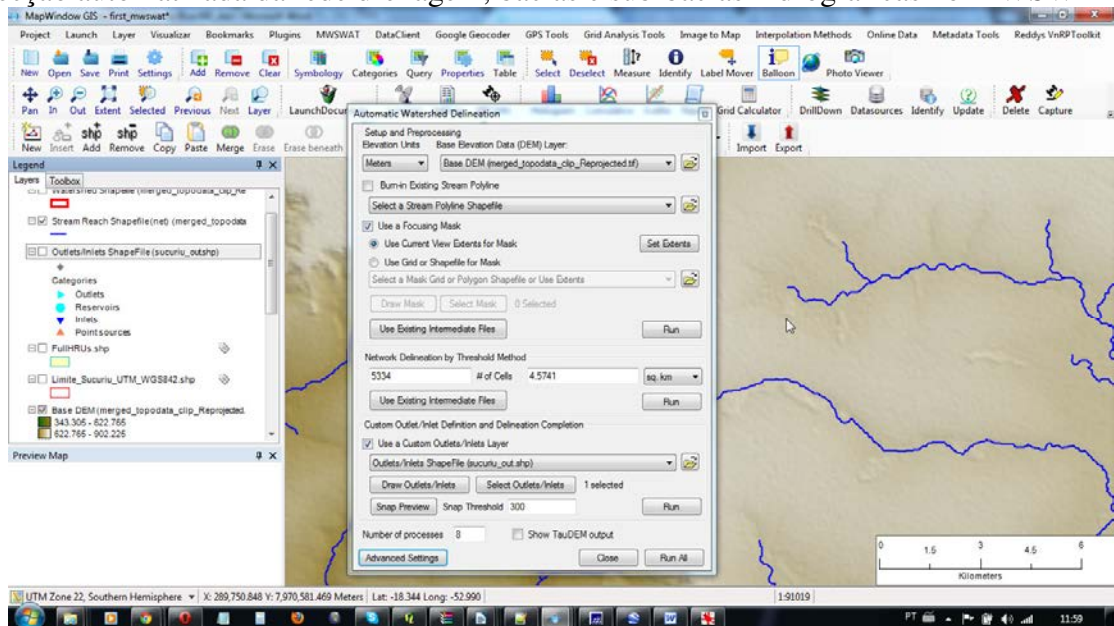
Todos esses procedimentos ocorrem no primeiro passo do módulo MWSWAT (Figuras 29 e 30).

Figura 29 - Tela de passos principais do MWSWAT. A seta em laranja indica a entrada de dados dos procedimentos mencionados até esse ponto



Fonte. Elaborado pelo autor com captura de tela do MWSWAT durante o processamento dos dados.

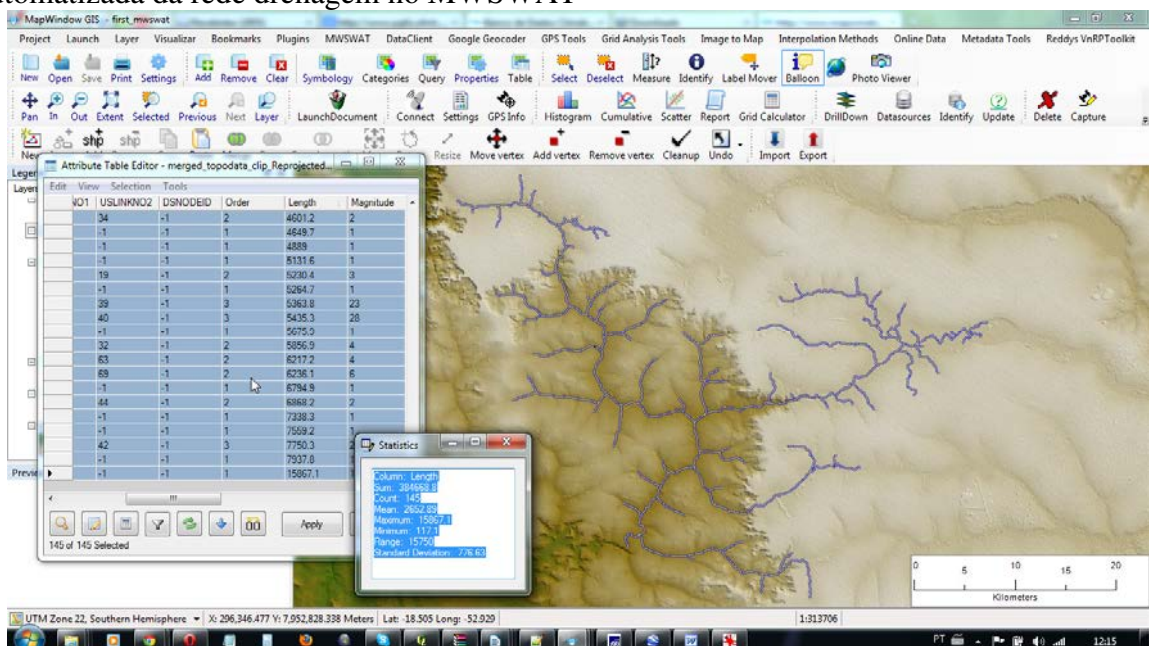
Figura 30 - Captura de tela da interface de entrada de processamento dos dados para a detecção automatizada da rede drenagem, bacias e sub-bacias hidrográficas no MWSWAT



Fonte. Elaborado pelo autor com captura de tela do MWSWAT durante o processamento dos dados.

Como resultado do processamento de dados do MDE, o sistema realiza uma varredura na grade de elevação do terreno e delimita a rede de drenagem e os divisores de bacias. Nesse projeto o sistema identificou 384,6km de rede de drenagem nas classes de 1ª a 4ª ordem na classificação de Straller (Figura 31).

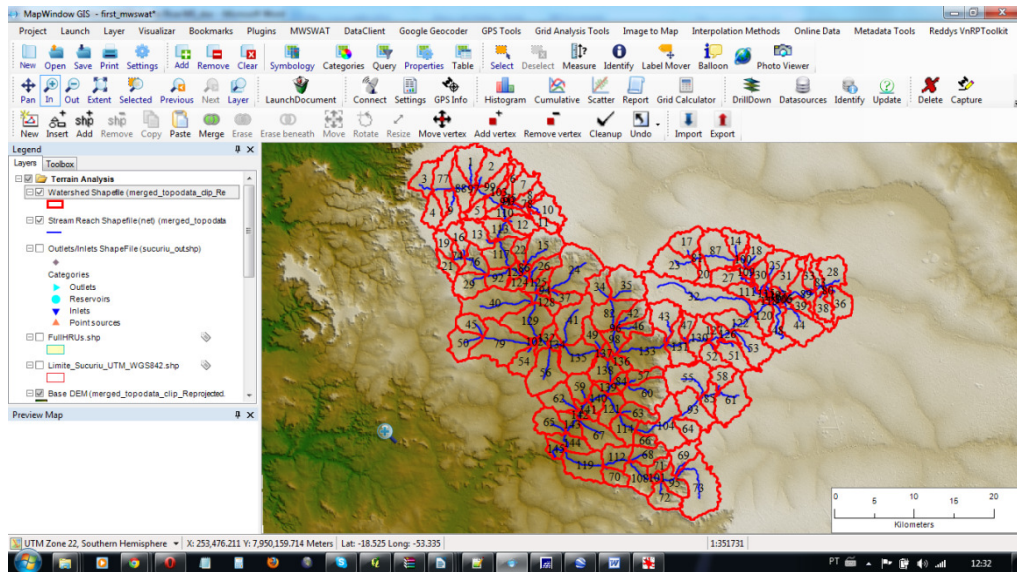
Figura 31 - Captura de tela dos resultados de processamento dos dados para a detecção automatizada da rede drenagem no MWSWAT



Fonte. Elaborado pelo autor com captura de tela do MWSWAT durante o processamento dos dados.

Em continuidade ao processamento dos dados do MDE, foi realizada a detecção de bacias e sub-bacias, cujo barramento da PCH Costa Rica foi informado como ponto exutório (Outlet) para efeito de cálculo somente à montante deste, onde foram identificadas na modelagem final 123 sub-bacias (Figura 32).

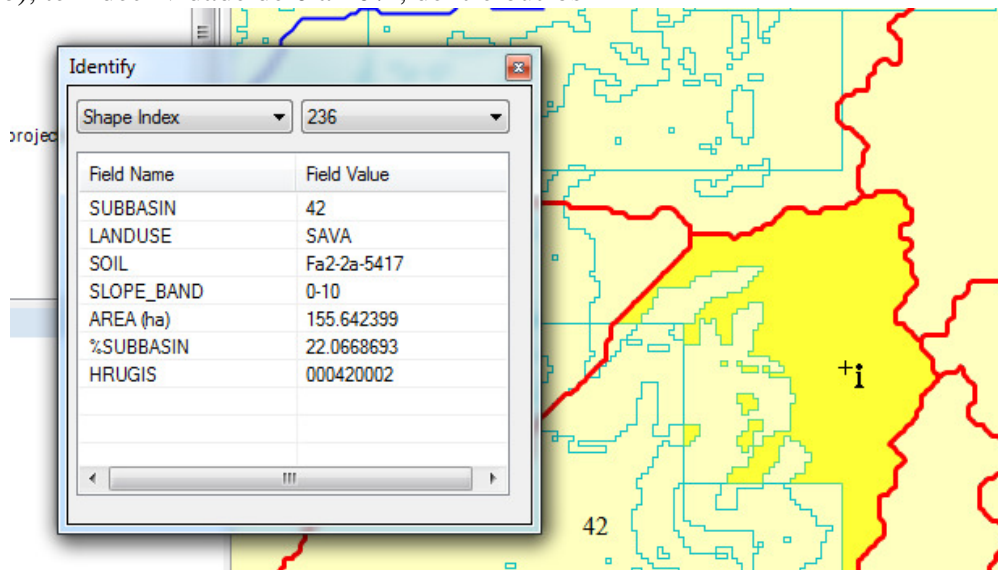
Figura 32 - Captura de tela dos resultados de processamento dos dados para a detecção automatizada de bacias e sub-bacias no MWSWAT, foram identificadas ao final, 123 sub-bacias à montante da PCH Costa Rica



Fonte. Elaborado pelo autor com captura de tela do MWSWAT durante o processamento dos dados.

Para representar a heterogeneidade de uma bacia hidrográfica, o SWAT divide a mesma em subunidades denominadas Hydrologic Response Units (HRUs), que representam uma combinação única de tipo de solo, uso e ocupação do solo e declividade (Figura 33), representando uma pequena região homogênea, da qual serão calculados os elementos do modelo tais como sedimentos e vazões (BOURAOUI et al., 2005).

Figura 33 - Seleção de uma Unidade de Resposta Hidrológica (HRU) na tela. Nessa unidade é possível identificar que é parte correspondente a 22% da bacia n° 42, a vegetação é SAVA (Cerrado), tem declividade de 0 a 10%, dentre outros



Fonte. Elaborado pelo autor com captura de tela do MWSWAT durante o processamento dos dados.

O sistema permite a emissão de relatórios dos dados processados em HRUs (Figuras 34 e 35).

Figura 34 - Recorte da síntese do relatório de HRUs para a bacia total

Detailed Landuse/Soil/Slope Distribution Saturday, 24 November 2012
14:53:31
Number of subbasins: 145

<u>Watershed</u>		<u>Area [ha]</u>	
		124842.87	

<u>Landuse</u>		<u>Area [ha]</u>	<u>%Watershed</u>
	WEWO	24.61	0.02
	FOEB	151.78	0.12
	SAVA	46417.54	37.18
	GRAS	1063.77	0.85
	CRWO	39422.55	31.58
	CRGR	2631.94	2.11
	CRDY	35130.68	28.14

<u>Soil</u>		<u>Area [ha]</u>	<u>%Watershed</u>
	Fa2-3a-5419	22934.49	18.37
	Fa2-2a-5417	75753.86	60.68
	Qf7-1a-5645	579.69	0.46
	Fr1-3a-5468	25574.83	20.49

<u>Slope</u>		<u>Area [ha]</u>	<u>%Watershed</u>
	0-10	115763.99	92.73
	10-170	9078.88	7.27

Fonte. Elaborado pelo autor com captura de tela do MWSWAT durante o processamento dos dados.

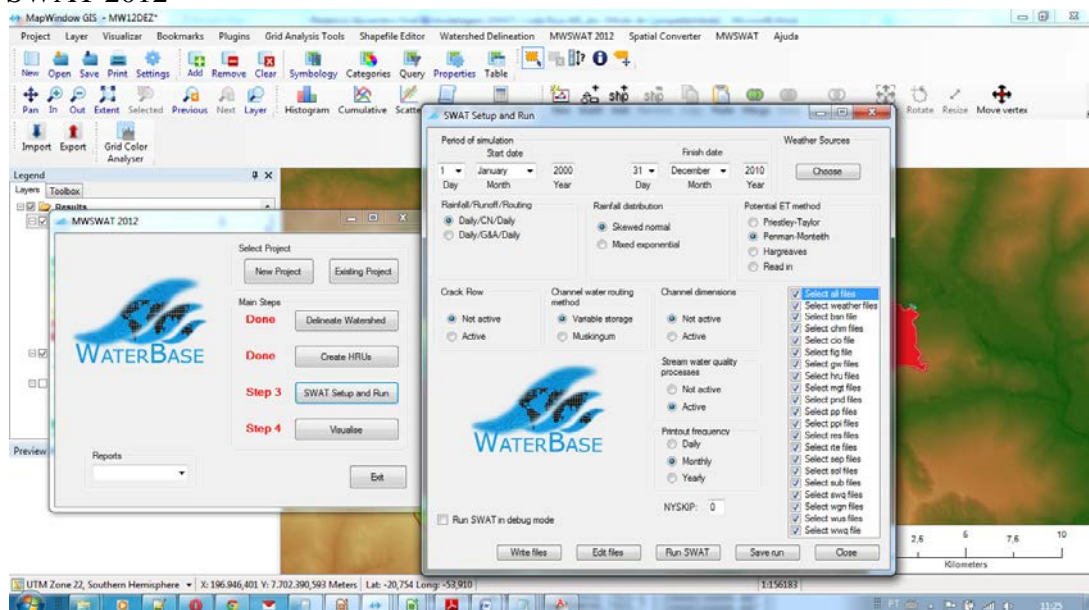
Figura 35 - Recorte de amostra da síntese do relatório de HRUs para uma sub-bacia (7)

		Area [ha]	%Watershed	%Subbasin
Subbasin 7		1383.55	1.18	
Landuse				
	SAVA	392.60	0.33	28.38
	CRWO	990.95	0.84	71.62
Soil				
	Fa2-3a-5419	922.77	0.78	66.70
	Fa2-2a-5417	460.78	0.39	33.30
Slope				
	0-10	1383.55	1.18	100.00
HRUs:				
15	SAVA/Fa2-3a-5419/0-10	190.61	0.16	13.78
16	SAVA/Fa2-2a-5417/0-10	201.99	0.17	14.60
17	CRWO/Fa2-3a-5419/0-10	732.16	0.62	52.92
18	CRWO/Fa2-2a-5417/0-10	258.80	0.22	18.71

Fonte. Elaborado pelo autor com captura de tela do MWSWAT durante o processamento dos dados.

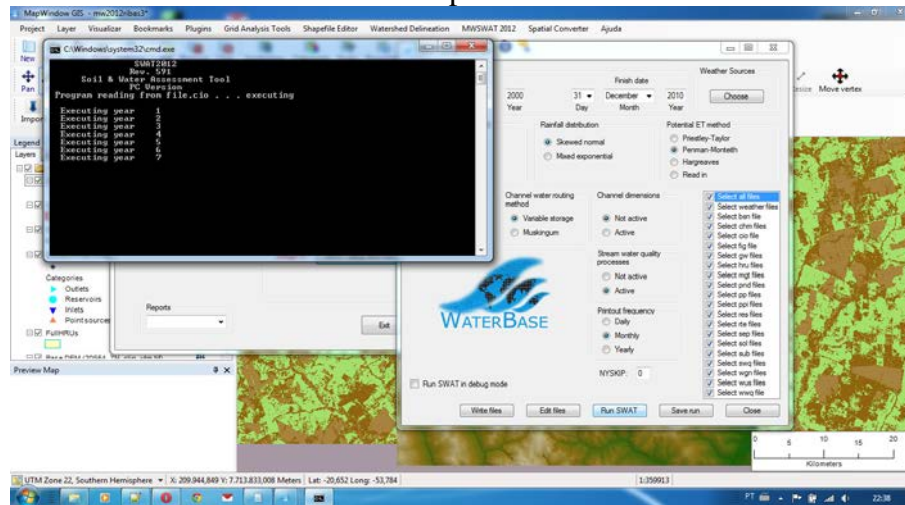
Com a inserção dos arquivos de dados de uma série contínua de 34 (trinta e quatro) anos de dados climáticos, foi então possível realizar a configuração final do modelo para então rodar a modelagem SWAT com a interface gráfica provida pelo conjunto MapWindow/MWSWAT (Figuras 36 e 37).

Figura 36 - Interface de configuração final dos arquivos de entrada do modelo SWAT no MWSWAT 2012



Fonte. Elaborado pelo autor com captura de tela do MWSWAT durante o processamento dos dados.

Figura 37 - Vista da tela do sistema durante o processamento do modelo SWAT

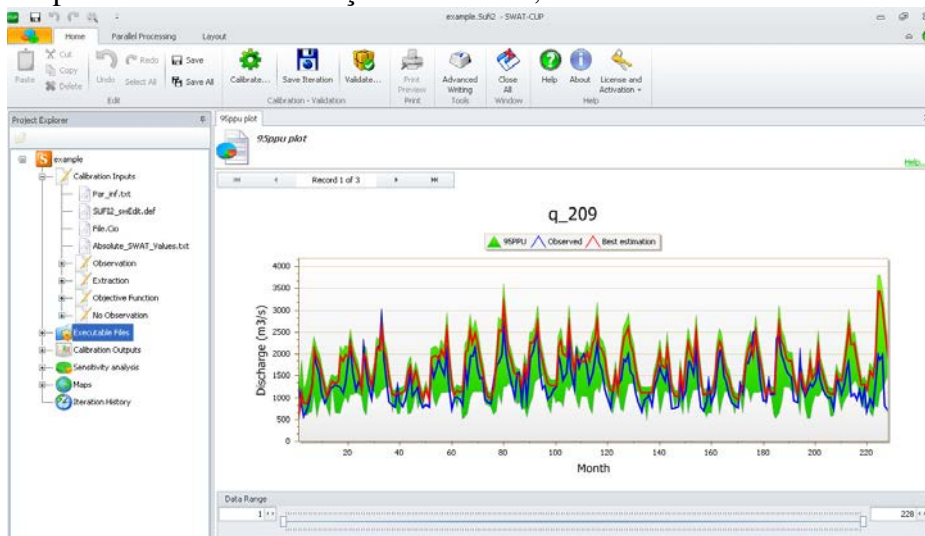


Fonte. Elaborado pelo autor com captura de tela do MWSWAT durante o processamento dos dados.

4.6 Calibração e validação do modelo

A modelagem realizada com a utilização do SWAT requer uma fase de calibração e validação do modelo, realizada com apoio num conjunto de algoritmos específicos que analisam a aderência entre dados medidos e dados simulados para a verificação da calibração e validação do modelo, este procedimento é realizado nesse estudo utilizando o software SWAT-CUP4 – Calibration and Uncertainty Programs versão 4 (ABBASPOUR, 2013), conforme Figura 38.

Figura 38 - Captura de tela de calibração do modelo, na interface SWAT-CUP-SUFI2



Fonte. SWAT-CUP 2012- SWAT Calibration and Uncertainty Programs - A User Manual (ABBASPOUR, 2014).

No processo de calibração do modelo é definida a função objetiva para a comparação da aderência entre os dados observados no campo (Dados de vazão da estação fluviométrica ANA cód. 63001000) e os dados simulados na modelagem (Vazão simulada), de forma análoga se procede com a validação do modelo, comparando a aderência dos dados medidos e simulados, porém com o intervalo de dados posterior aos dados do período utilizado na calibração, e com os mesmos parâmetros utilizados na fase de calibração.

Dentre as opções de função objetiva para verificar a consistência do modelo, foram utilizados o coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe e o R^2 .

O coeficiente de eficiência do modelo de Nash-Sutcliffe (1970) é calculado por:

$$NS = 1 - \frac{\sum_i (Q_m - Q_s)_i^2}{\sum_i (Q_{m,i} - \bar{Q}_m)^2} \quad (5)$$

Em que: Q_m corresponde ao evento medido ou observado, e Q_s corresponde ao evento simulado.

O coeficiente de regressão linear R^2 é calculado por:

$$R^2 = \frac{\left[\sum_i (Q_{m,i} - \bar{Q}_m)(Q_{s,i} - \bar{Q}_s) \right]^2}{\sum_i (Q_{m,i} - \bar{Q}_m)^2 \sum_i (Q_{s,i} - \bar{Q}_s)^2} \quad (6)$$

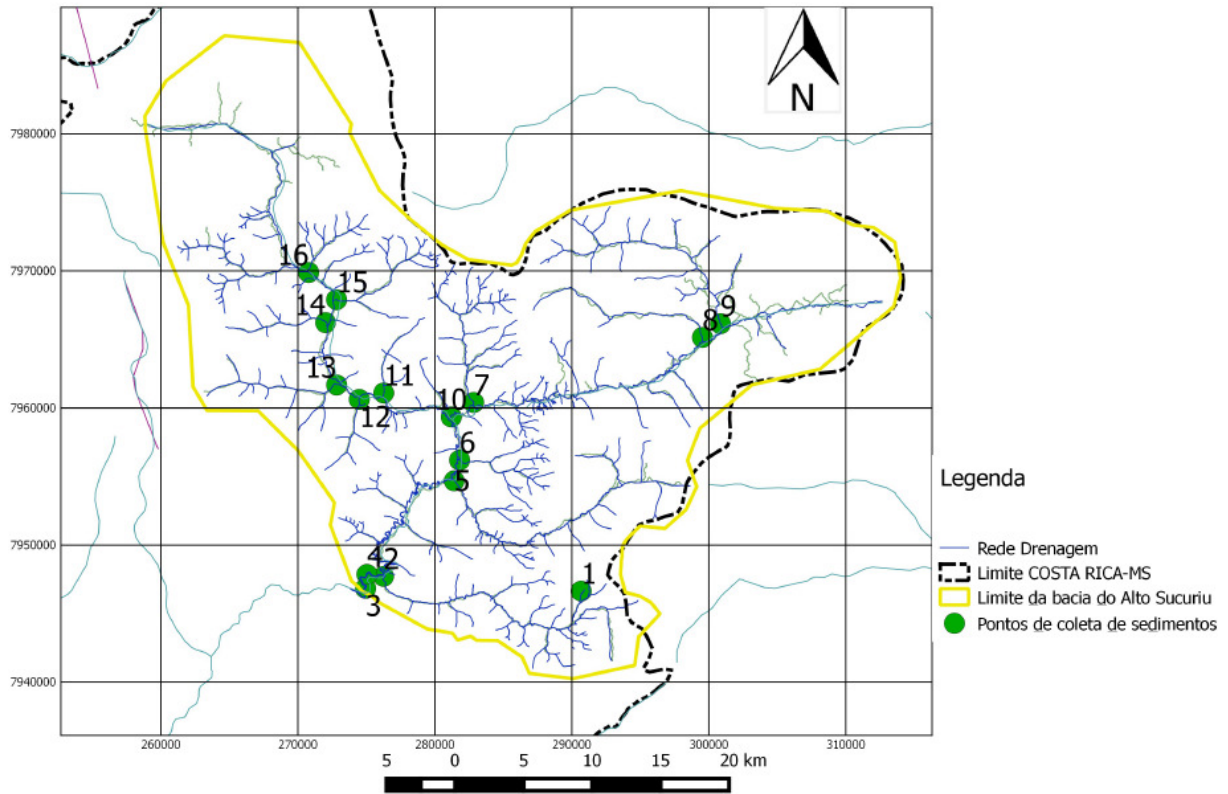
Em que: Q_m corresponde ao evento medido ou observado, e Q_s corresponde ao evento simulado.

4.7 Levantamentos de campo (Coleta de dados hidrosedimentológicos)

O trabalho de campo para levantamento de dados hidrosedimentológicos foi realizado no âmbito do projeto de Pesquisa e Desenvolvimento denominado “Reabilitação de voçorocas para a contenção do assoreamento e melhoria do desempenho de reservatórios na produção de energia elétrica” (TRANNIN, 2013). A amostragem de sedimentos foi efetuada com o objetivo de obter amostras representativas da seção transversal dos cursos d’água,

empregando para isso, amostradores padronizados e aplicando técnicas apropriadas, em dezesseis pontos na bacia, Figura 39.

Figura 39 - Localização dos pontos de coleta de dados hidrossedimentológicos na bacia



Fonte. Elaborado pelo autor.

Devido à diferença entre as características de transportes de sedimentos em suspensão e de fundo, foram necessárias medições independentes, sendo utilizados equipamentos específicos para os levantamentos de sedimentos em suspensão e de fundo. Neste estudo hidrossedimentológico foram executadas medições indiretas de descarga sólida em suspensão, em amostras contendo a mistura água-sedimento em diversas posições no canal, procurando levar em conta a distribuição do sedimento na seção transversal a fim de apresentar o valor médio da concentração e da granulometria.

4.7.1 Determinação de descarga líquida (Vazão)

Nas medições de descarga líquida (vazão), em cursos d'água com até 6 metros de largura, as verticais foram espaçadas de 0,5 em 0,5 metros. Em cursos d'água com larguras

maiores que 6 metros o espaçamento entre as verticais foi de 1 metro. Em cursos d'água com largura acima de 30 metros, o espaçamento foi de 2 metros. O número de pontos tomados verticalmente (profundidades) foi de um ponto para profundidades menores que 0,6 metro; de 3 pontos para profundidades entre 0,6 m e 2 m e de pelo menos 5 pontos para profundidades acima de 2 metros, conforme apresentado nas Tabelas 6 e 7.

Na medição da descarga líquida foi empregado o molinete hidrométrico MLN-7, utilizado com guincho para maiores profundidades ou com haste para medições a vau, nas quais, foi utilizado um cabo de aço graduado ou uma trena esticada de margem a margem para demarcar a seção de medidas. O pulso gerado pelo molinete foi computado no contador CPD-10 através de um cabo padrão. No método do molinete um pequeno rotor é mergulhado no fluxo e a velocidade média do fluido é determinada neste ponto, contando o número de voltas em um período de tempo. Devido à versatilidade e precisão, o método do molinete é um dos mais utilizados para a medição da descarga líquida (BARBEDO, 2003).

Tabela 6 - Número de pontos de medição em uma vertical de acordo com a profundidade do rio, recomendado para medições de vazão

Profundidade (m)	Número de Pontos
0,15 a 0,60	1
0,60 a 1,20	2
1,20 a 2,00	3
2,00 a 4,00	4
> 4,00	6

Fonte. Trannin (2013).

Tabela 7 - Distância entre as verticais de acordo com a largura do rio, recomendado para medições de vazão

Largura do rio (m)	Distância entre as verticais (m)
<3	0,30
3 – 6	0,50
6 – 15	1,00
15 – 30	2,00
30 – 50	3,00
50 – 80	4,00
80 – 150	6,00
150 – 250	8,00
≥250	12,00

Fonte. Trannin (2013).

4.7.2 Determinação da Concentração de Sedimentos em Suspensão

A determinação da concentração de sedimentos em suspensão acompanhou os levantamentos fluviométricos, uma vez que a descarga sólida é função da descarga líquida,

não havendo relevância em medir o primeiro parâmetro isoladamente. Para esta medição, foram utilizados amostradores pontuais de sedimentos (DH-48 para trechos de coleta à vau e os medidores USP-46 e USP-61 com profundidade de amostragem capaz de atingir dezenas de metros), nos mesmos pontos tomados verticalmente para a determinação da descarga líquida (vazão). Esta amostragem foi realizada tanto para a determinação da concentração de sedimentos em suspensão, quanto para a obtenção da distribuição granulométrica. No processo de amostragem evitou-se o impacto do amostrador no leito para não levantar sedimentos, coletando assim partículas que não se encontravam em suspensão.

4.7.3 Medição de descarga de fundo

As amostragens dos sedimentos do leito foram realizadas nas mesmas verticais (pontos) de amostragem dos sedimentos em suspensão. As amostras foram acondicionadas em embalagens plásticas para não ocorrer perda dos finos por escoamento de água. Para a coleta de material fino (argila a areia) foram utilizados amostradores de penetração vertical e para coleta de sedimentos coesivos e não-coesivos foram empregados amostradores de penetração horizontal.

Na coleta dos sedimentos grosseiros, como seixos rolados e pedregulhos (> 8 mm) a penetração do amostrador é dificultada, tornando complicada a obtenção de uma quantidade significativa de material. Para este caso, de uma maneira geral, não existem métodos práticos para determinar a granulometria, mas uma forma utilizada para calcular é a “contagem de seixos” em 100 a 200 pontos amostrais, conforme descrito por Carvalho (2008).

Neste trabalho as amostragens de sedimentos foram realizadas com a draga de Petersen, que é um amostrador do tipo caçamba de raspagem, de penetração vertical, que consiste em duas caçambas que se fecham juntas ao tocar o leito, devido a um dispositivo de barra ou de mola, para coletar uma camada superior do material e também com USBM – 60, que é um amostrador de escavação de penetração vertical, que consiste em uma caçamba que fica presa dentro do corpo do amostrador (ANAMBI, 2012).

4.7.4 Análises laboratoriais

As amostras coletadas para a obtenção do valor da descarga sólida foram enviadas ao laboratório para análise dos sedimentos em suspensão e de fundo. As amostras destinadas a determinação de sedimentos em suspensão, contendo água, sedimentos e sais solúveis, foram acondicionadas em garrafas e as amostras destinadas à determinação do material do leito, contendo sedimentos de fundo, foram acondicionadas em sacos plásticos.

As análises laboratoriais incluíram a determinação da concentração, da granulometria, do teor de matéria orgânica e análises mineralógicas dos sedimentos contidos nas amostras de material em suspensão e do leito.

Sendo a confiabilidade na precisão da análise laboratorial diretamente relacionada aos cálculos de descargas sólidas, as amostras coletadas foram enviadas ao laboratório em volumes suficientes para permitir a análise adequada dos sedimentos em suspensão e de fundo. Na Tabela 8 são apresentados os volumes de amostras necessários para a determinação da concentração de sedimentos em suspensão.

Tabela 8 - Volume de amostra necessário para a determinação da concentração de sedimentos em suspensão (World Meteorological Organization, 1981)

Concentração de sedimentos em suspensão (g cm^{-3} , mg L^{-1} , ppm)	Volume de amostra (L)
> 100	1
50 a 100	2
20 a 30	5
< 20	10

Fonte: Trannin (2013).

Desta forma, os volumes de amostra de material de leito enviados para análise granulométrica por peneiramento foram da ordem de 2 kg de sedimento molhado. Volumes superiores a este não foram enviados, para não gerar problemas de transporte e de laboratório, como no processo de secagem e no quarteamento, entre outros.

4.7.5 Determinação da Concentração de Sedimentos em Suspensão

Na determinação da Concentração de Sedimentos em Suspensão foi utilizado o método de integração vertical, utilizando o método de Igual Incremento de Largura (IIL). A determinação da concentração de sedimentos em suspensão baseia-se na razão entre o peso do material sólido (contido na amostra seca) e o volume da mistura água/sedimento, sendo

expresso em mg L^{-1} . Nesta análise foram determinados também a concentração de sedimentos (mg L^{-1}), sólidos dissolvidos (mg L^{-1}), granulometria (%) e temperatura ($^{\circ}\text{C}$).

Os métodos para a análise de sedimentos em suspensão variam em função dos parâmetros a serem avaliados. Para analisar a granulometria dos sedimentos, o método empregado foi o do tubo de retirada de fundo. A determinação do volume de sedimentos ou sedimentometria foi realizada de acordo com o Guia de Práticas Hidrossedimentológicas da ANEEL, escrito por Carvalho et al. (2000), que apresenta as descrições dos diversos métodos de análise de maneira clara e adequada.

4.7.6 Análise Granulométrica dos Sedimentos em Suspensão

As análises foram realizadas principalmente por peneiramento, conforme metodologia proposta pela NBR NM 248 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 2003), sendo que o sedimento passante pela peneira mais fina, de malha 0,0625 mm foi analisado por outros métodos como o densímetro, a pipetagem ou o tubo de retirada de fundo, dependendo da quantidade de sedimentos.

4.7.7 Determinação da Fração Orgânica dos Sedimentos em Suspensão

A determinação do conteúdo de matéria orgânica nos sedimentos necessitou com que as amostras, inicialmente, fossem secas em estufa, a aproximadamente 60°C , e maceradas. A seguir, os cadinhos utilizados na pesagem dos sedimentos foram colocados em mufla, a aproximadamente, 300°C para retirar a umidade, pesados e suas respectivas massas anotadas.

Aproximadamente 0,3 g de sedimento foram levados à mufla para queima a uma temperatura de aproximadamente 550°C por 3 horas e, posteriormente, as amostras foram novamente pesadas para a determinação da quantidade de massa queimada, correspondente à matéria orgânica presente nas amostras.

4.7.8 Análise Granulométrica dos Sedimentos de Fundo

Os métodos para medição de descarga sólida por arraste de fundo encontram-se em desenvolvimento. Estudos mostram que o transporte de fundo corresponde a cerca de 5% do transporte total, podendo ser superior em rios de planalto, onde a quantidade de sedimentos transportados por arraste é maior.

As amostras de material de fundo foram analisadas com o objetivo de obter suas características granulométricas, portanto, foram utilizados métodos específicos para a areia como o método do peneiramento e do tubo de acumulação visual. A quantidade de amostra de material de leito numa medição para análise granulométrica por peneiramento deve ser da ordem de 2 kg de sedimento molhado.

Esse método utiliza uma série de peneiras-padrão agitadas mecanicamente e por tempo determinado em aparelhos denominados “RO-TAP”. Na execução da análise granulométrica, tomam-se, aproximadamente, 100g de material seco, ou conforme o tamanho da peneira, adicionam-se 5cm³ de agente defloculante, levando-se essa mistura diversas vezes ao misturador mecânico. Lava-se o material na peneira n.º 230 (0,065mm), coloca-se outra quantidade de agente defloculante e repete-se a operação até que o material fique visivelmente limpo.

Em seguida, coloca-se esse material num prato de evaporação, levando-o à estufa para secagem à temperatura de 105 °C. Após a secagem, procede-se ao peneiramento mecânico do “RO-TAP” durante 15 minutos, numa série de peneiras de números 5, 10, 18, 35, 60, 80, 120, 230, correspondendo às aberturas de malhas, em milímetros, de 4,0, 2,0, 1,0, 0,5, 0,25, 0,177, 0,125 e 0,062.

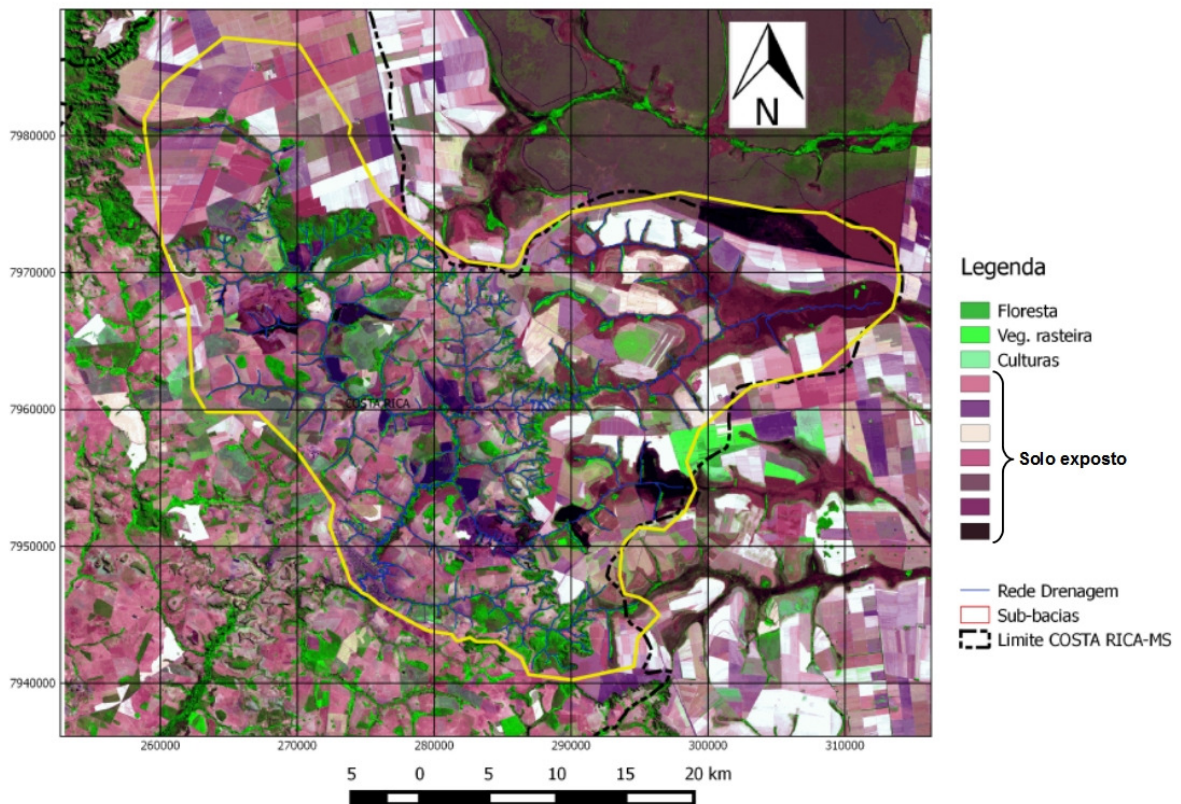
O peso do material retido na peneira de número 230 é subtraído dos 100g iniciais de material seco, a fim de se obter o peso da amostra seca que passa nesta peneira. Faz-se, em seguida, a curva granulométrica, tendo como ordenadas as porcentagens de sedimentos mais finos que passam, e como abscissas, os diâmetros das peneiras padronizadas (BARBEDO, 2003).

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. MAPEAMENTO DO USO DO SOLO

Com base em imagens de satélite da série Landsat TM5 de 2011 foi possível estimar que, numa área de 1.282,57 km² da bacia do Alto Sucuriú, 32,18% são ocupados por solos expostos (Figura 40). Nesta figura observou-se a ocorrência de solos expostos em toda a área avaliada, com efeitos diretos sobre o assoreamento do sistema de drenagem superficial. Considerando que as condições do meio físico, principalmente, as características geológicas e pedológicas, são favoráveis aos processos erosivos na região de Costa Rica, a ocorrência de 32,18% de solo exposto evidencia a contribuição da erosão laminar ao processo de assoreamento dos cursos d'água.

Figura 40 - Imagem Landsat TM5 com as áreas de solo exposto na bacia contribuinte da PCH Costa Rica (MS)

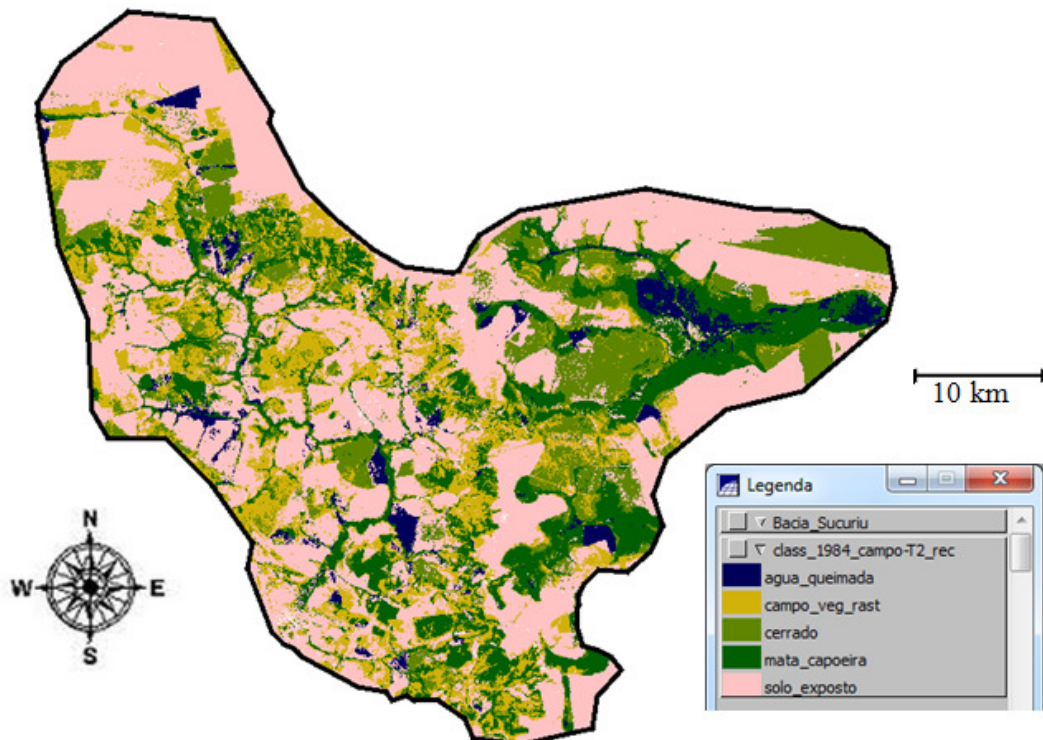


Fonte. Elaborado pelo autor com base em imagens do satélite da série LandSat TM5.

Esta situação diagnosticada na área estudada pode ser considerada representativa de extensas regiões situadas no Centro-Oeste brasileiro, onde a vulnerabilidade natural do meio físico aos desastres naturais é alta e vem sendo agravada pelo uso intensivo do solo, ultrapassando, em algumas regiões, a condição de resiliência da paisagem. Nesta condição, os processos de erosão linear, que atingem o estágio de voçorocas, podem representar um sério problema ambiental, pela degradação física do solo e por sua contribuição aos processos de assoreamento de corpos d'água, quando comparada aos processos de erosão laminar.

Os mapas de uso do solo de parte da bacia hidrográfica do Alto Rio Sucuriú, à montante da PCH Costa Rica, gerados para os anos de 1984 e 2011, são apresentados nas Figuras 39 e 40, respectivamente. Na Figura 41 é possível observar que, já em 1984 havia forte presença de solo exposto na bacia.

Figura 41 - Mapa do uso do solo da bacia hidrográfica, à montante da PCH Costa Rica (MS), obtida pela classificação de imagens do satélite da série LandSat TM5, com cenas tomadas em 04/09/1984



Fonte. Elaborado pelo autor com base em imagens do satélite da série LandSat TM5.

Os resultados dos percentuais de áreas de cada classe de uso do solo da bacia estão apresentados na Tabela 9.

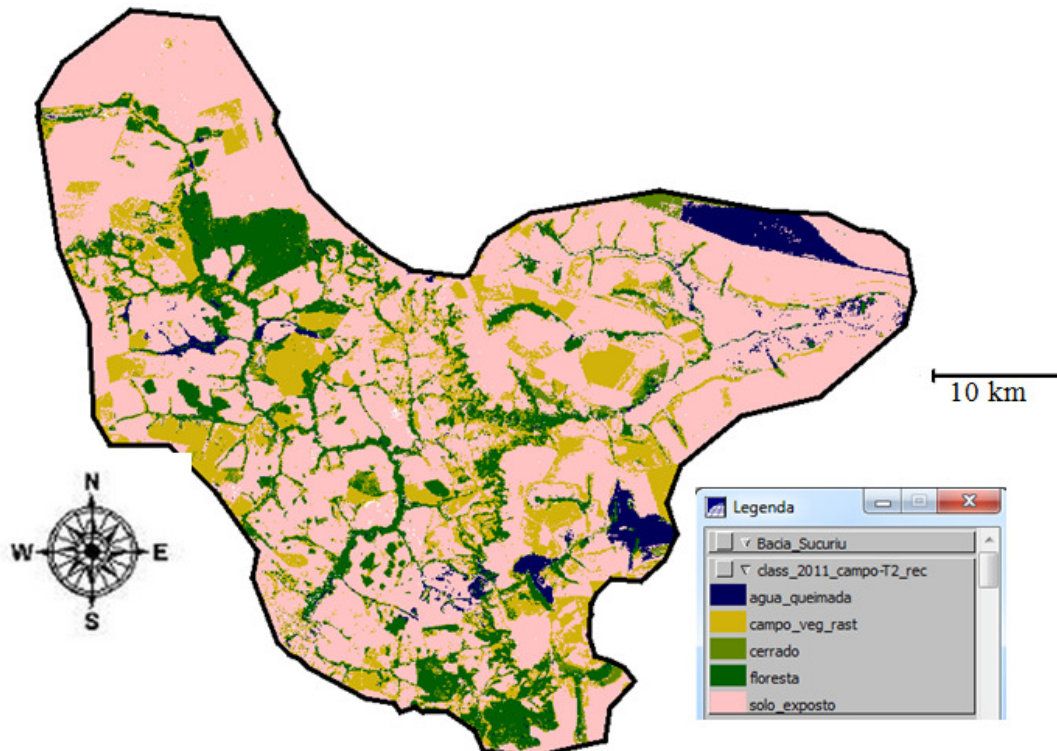
Tabela 9 - Classes de uso do solo na bacia, à montante do reservatório da PCH Costa Rica, em 1984, expressos em km² e porcentagem

Classes de uso do solo (1984)	Área km ²	%
Solo exposto	588,31	45,86
Água/queimada	46,43	3,62
Cerrado	198,93	15,51
Floresta	219,40	17,10
Campo/vegetação rasteira	229,75	17,91
Área total das classes	1282,82	100,00

Fonte. Elaborado pelo autor com base nos resultados do mapeamento de uso do solo.

Os percentuais de áreas de cada classe de uso do solo, mapeados com dados orbitais de 2011, da bacia hidrográfica à montante da PCH Costa Rica (MS), estão apresentados na Figura 42.

Figura 42 - Mapa do uso do solo da bacia hidrográfica, à montante da PCH Costa Rica (MS), obtida pela classificação de imagens do satélite da série LandSat TM5, com cenas tomadas em 30/08/2011



Fonte. Elaborado pelo autor com base em imagens do satélite da série LandSat TM5.

Os percentuais de áreas de cada classe de uso do solo, mapeados com dados orbitais de 2011, da bacia hidrográfica do Alto Rio Sucuriú, estão apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 - Classes de uso do uso da bacia, à montante do reservatório da PCH Costa Rica, em 2011, expressos em km² e porcentagem

Classes de uso do solo (2011)	Área km ²	% de área da bacia
Solo exposto	803,61	62,64
Água/queimada	48,28	3,76
Cerrado	44,45	3,47
Floresta	168,37	13,12
Campo/vegetação rasteira	218,11	17,00
Área total das classes	1282,82	100,00

Fonte. Elaborado pelo autor com base nos resultados do mapeamento de uso do solo.

Para uma melhor compreensão do significado das mudanças nos padrões de uso do solo, foi realizado o procedimento de tabulação cruzada. A operação de tabulação cruzada permite calcular a área das intersecções entre as classes de dois planos de informações (PIs) temáticos, sendo a operação realizada entre os respectivos PIs de uso do solo, processados no formato matricial. Os resultados são apresentados em tabelas de duas dimensões. A Tabela 11 apresenta os resultados da tabulação cruzada dos mapeamentos de uso do solo realizados para as duas datas avaliadas.

Tabela 11 - Áreas em km² das classes de uso do solo derivadas da tabulação cruzada do mapeamento na bacia, à montante da PCH de Costa Rica. As linhas apresentam os dados do mapeamento da imagem de 1984 e nas colunas estão os dados do mapeamento da imagem de 2011

Classe de uso	Solo exposto	Água/queimada	Cerrado	Floresta	Campo/vegetação rasteira
Solo exposto	451,08	15,44	12,46	12,87	94,66
Água/queimada	31,78	1,9	2,46	5,11	5,99
Cerrado	122,95	9,43	9,46	24,7	35,79
Floresta	79,82	19,34	11,62	84,74	25,97
Campo/vegetação rasteira	117,52	1,91	8,29	36,83	60,7

*Os dados em vermelho representam a redução da cobertura florestal, os dados em verde representam o incremento da classe Floresta, os dados em azul, na diagonal, representam as áreas que permaneceram nas mesmas classes de uso do solo em que se encontravam em 1984, os dados em marrom representam a redução do cerrado, que em 2011 teve o solo ocupado por outras classes de uso e, os demais dados relacionam-se com as respectivas classes nas intersecções de linhas e colunas.

Fonte. Elaborado pelo autor com base no cruzamento dos resultados do mapeamento de uso do solo, por meio do módulo de tabulação cruzada do software SPRING v.4.3.3.

Na Tabela 11 pode ser observado que dos 219,49km² da área de cobertura de floresta no ano de 1984, 79,82km² (36,3%) foram convertidos para a classe de solo exposto; 25,97km² (11,72%) foram convertidos para a classe campo/vegetação rasteira e 19,34km² (8,81%) foram convertidos para a classe água/queimadas.

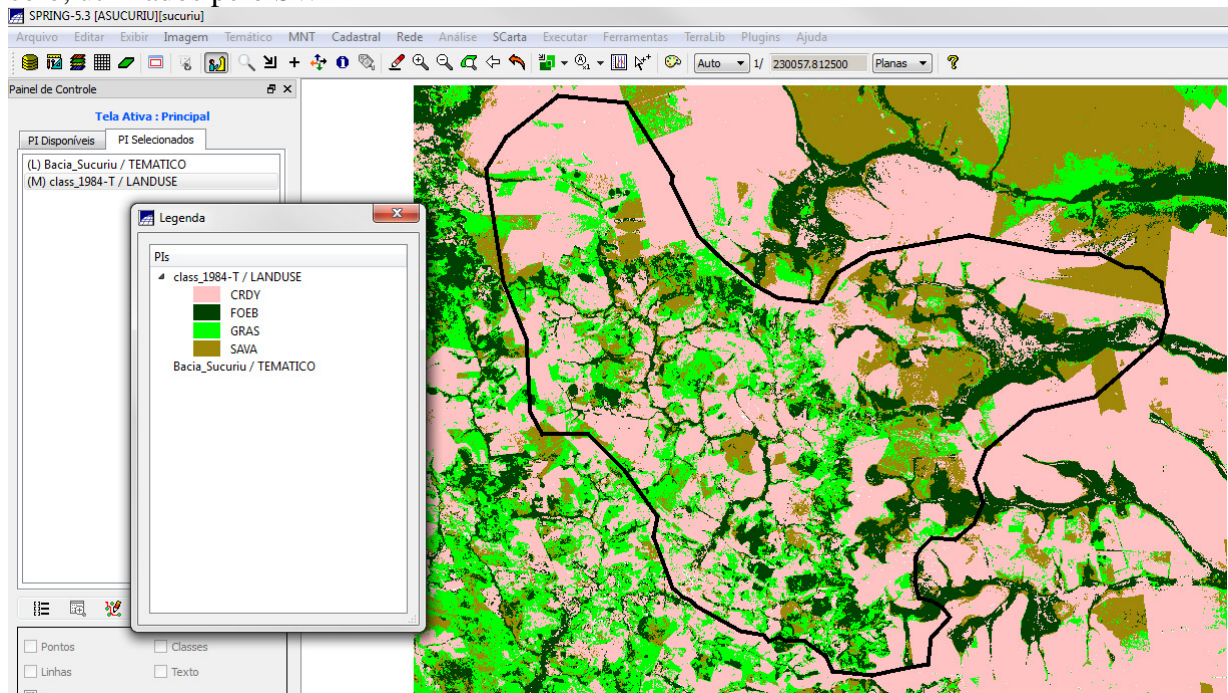
Em contrapartida, a classe ocupada por solo exposto aumentou nestes 27 anos, de 588,31km² para 803,61km², o que representou um incremento de 26,79%. Os dados analisados demonstraram que as alterações nos padrões de uso do solo na área estudada contribuíram para a formação de processos erosivos, pois um dos principais elementos causadores da erosão é o solo desprovido de cobertura vegetal, preferencialmente, nativa.

É preciso destacar que o incremento da classe de solo exposto no intervalo de 27 anos (26,79%) corresponde a, aproximadamente, 1% ao ano.

Esse resultado evidencia uma aceleração considerável da exposição do solo na bacia, e nos leva a questionar sobre o posicionamento das políticas de incentivos à preservação ambiental e de recursos hídricos desta região.

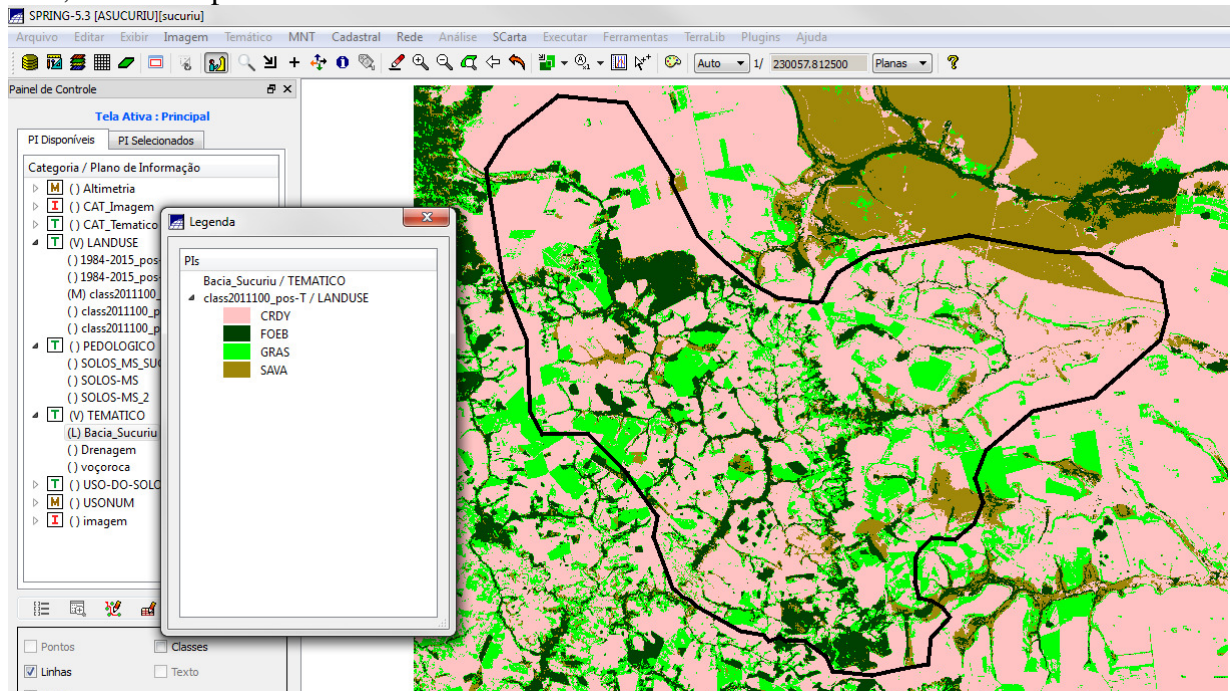
Os dados dos mapeamentos do uso do solo foram reclassificados para as classes correspondentes utilizadas pelo SWAT na identificação dos parâmetros físicos relativos a cobertura do solo (Figuras 43 e 44).

Figura 43 - Imagem do mapa de uso do solo em 1984, reclassificado com códigos de uso do solo, utilizados pelo SWAT



Fonte. Elaborado pelo autor com base nos resultados do mapeamento de uso do solo e mapeamento de classes para imagem temática.

Figura 44 - Imagem do mapa de uso do solo em 2011, reclassificado com códigos de uso do solo, utilizados pelo SWAT



Fonte. Elaborado pelo autor com base nos resultados do mapeamento de uso do solo e mapeamento de classes para imagem temática.

Os números relativos às classes compatibilizadas com o modelo SWAT revelam outra situação de desconformidade com o código florestal vigente à época, entre o período analisado de 1984 a 2011 (Lei Federal 4771/1965) no que se refere à preservação das áreas de Reserva Legal, uma vez que a soma das classes correspondentes a floresta e cerrado, passando de 32,61% em 1984, para 16,18% em 2011, o que é inferior ao percentual de Reserva Legal obrigatória (20%), não levando em consideração as APPs, ou seja o déficit de cobertura florestal e de cerrado já se faz presente (Tabela 12).

Tabela 12 -. Resultados da reclassificação dos mapas de uso do solo, compatibilizado com o modelo SWAT, na bacia hidrográfica contribuinte da PCH Costa Rica (MS), entre os anos 1984 e 2011, expressos em km² e porcentagem

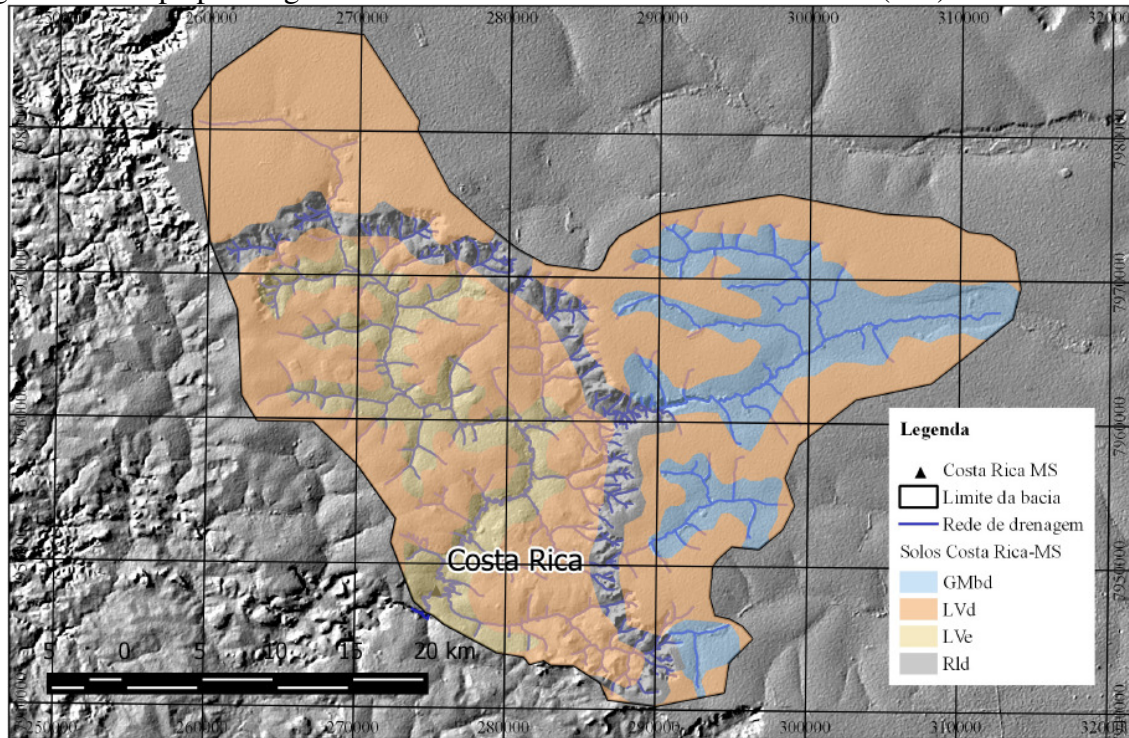
Classes temáticas	1984 (km ²)	%	2011 (km ²)	%	Diferença %
CRDY	633.92	49.43	807.51	62.96	13.53
SAVA	198.91	15.51	90.57	7.06	-8.45
FOEB	219.40	17.11	167.41	13.05	-4.05
GRAS	225.81	17.61	217.10	16.93	-0.68
Total	1282.59	100.00	1282.59	100.00	-

Fonte. Elaborado pelo autor com base nos resultados da reclassificação do mapa de uso do solo.

5.2. DADOS PEDOLÓGICOS DA BACIA DO ALTO SUCURIÚ

Os dados de solos contidos no mapa de solos do Estado do Mato do Sul (Figura 45) apresentam somente a descrição das grandes classes, não incluindo as características físicas dos solos, necessárias para a realização de modelagem no SWAT. Nessa figura, é possível verificar com relação à textura do relevo que as áreas mais suavizadas representam os chapadões, as áreas mais rugosas o relevo dissecado e frentes erosivas, a condição intermediária representa planaltos dissecados com relevo suave ondulado.

Figura 45 - Mapa pedológico da bacia contribuinte da PCH Costa Rica (MS)



Fonte. Elaborado pelo autor com base no Mapa de Solos do Estado do Mato Grosso do Sul (IBGE), e relevo SRTM/TOPODATA (Valeriano, 2005).

Os dados relativos às classes de solos de ocorrência na bacia do Alto Sucuriú, à montante da PCH Costa Rica estão apresentados na Tabela 13, em km² e porcentagem. As características físicas dos solos, utilizadas na modelagem estão apresentadas na Tabela 14.

Tabela 13 - Classes de solos de ocorrência na bacia contribuinte da PCH Costa Rica (MS), expressos em km² e porcentagem

Classes de solo	Área, km ²	Área, %
Gleissolo Melânico Distrófico (GMbd)	216,21	16,86
Neossolo Litólico (Rld)	118,34	9,23
Latossolo Vermelho Distrófico (LVd)	777,63	60,63
Latossolo Vermelho Eutrófico (LVe)	170,39	13,29
Total das classes	1282,57	100,00

Fonte. Elaborado pelo autor com base nos resultados da vetorização do mapa de solos.

Tabela 14 - Classes de solos de ocorrência na contribuinte da PCH Costa Rica (MS), e características físicas utilizadas na modelagem com SWAT

Classes de solo	GMbd	Rld	LVd	LVe
Atributos				
Cód. FAO	5483	5645	5417	5468
SNAM	Gd1-3a-5483	Qf7-1a-5645	Fa2-2a-5417	Fr1-3a-5468
NLAYERS	2	2	2	2
HYDGRP	C	C	C	C
SOL_ZMX	1000	1000	1000	1000
ANION_EXCL	0.5	0.5	0.5	0.5
SOL_CRK	0.5	0.5	0.5	0.5
TEXTURE	CLAY_LOAM	SANDY_CLAY_LOAM	SANDY_CLAY_LOAM	CLAY
SOL_Z1	300	300	300	300
SOL_BD1	1.2	1.3	1.4	1.1
SOL_AWC1	0.158	0.147	0.16	0.175
SOL_K1	12.19	28.89	17.54	19.3
SOL_CBN1	1.7	1.5	1.5	1.8
CLAY1	32	21	27	55
SILT1	36	11	7	20
SAND1	32	68	66	25
ROCK1	0	0	0	0
SOL_ALB1	0.0184	0.0271	0.0271	0.0152
USLE_K1	0.2608	0.2329	0.2019	0.2011
SOL_EC1	0	0.2	0	0
SOL_Z2	1000	1000	1000	1000
SOL_BD2	1.3	1.4	1.3	1
SOL_AWC2	0.158	0.147	0.16	0.175
SOL_K2	7.38	17.53	21.64	25.43
SOL_CBN2	0.7	0.5	0.6	0.8
CLAY2	37	25	31	61
SILT2	33	9	8	20
SAND2	30	66	62	18
ROCK2	0	0.2	0	0
SOL_ALB2	0.1269	0.1867	0.154	0.1047
USLE_K2	0.2608	0.2329	0.2019	0.2011

Fonte. Banco de dados do Global Soils of the World (FAO, 2005).

A distribuição espacial das classes de solo, geomorfologia e suscetibilidade aos riscos geológicos e aos processos erosivos, e respectivas classes geotécnicas estão apresentados no Quadro 2.

Quadro 2 - Distribuição espacial das classes de solo, geomorfologia e suscetibilidade aos riscos geológicos e aos processos erosivos (classes geotécnicas)

Classes de solo	Classe geomorfológica	Classe geotécnica	Área, km ²	Área, %
Gleissolos (GMbd)	Formações flúvio-lacustres recentes	Baixo potencial erosivo	216,21	16,86
Neossolo Litólico (Rld)	Degraus estruturais e bordas erosivas	Frentes erosivas de alto potencial de movimentos naturais de massa e portadoras de escarpas sujeitas a desprendimento de blocos	118,34	9,23
Latossolo Vermelho distrófico (LVd)	Planaltos com predomínio de espessos pacotes de arenito em deposição mista, Chapadas e Platôs	Predomínio de solos arenosos finos ou areno-silto-argilosos de alto potencial erosivo se submetidos à concentração das águas das chuvas e com relevo favorável ao processo de arenização pela ação das águas pluviais e pelo vento.	777,63	60,63
Latossolo Vermelho Eutrófico (LVe)	Planaltos com predomínio de Basalto	Baixo potencial erosivo	170,39	13,29
Total das classes	-	-	1282,57	100,00

Fonte. Elaborado pelo autor com base nos dados do mapa de solos e do Atlas Multirreferencial do Estado do Mato Grosso do Sul.

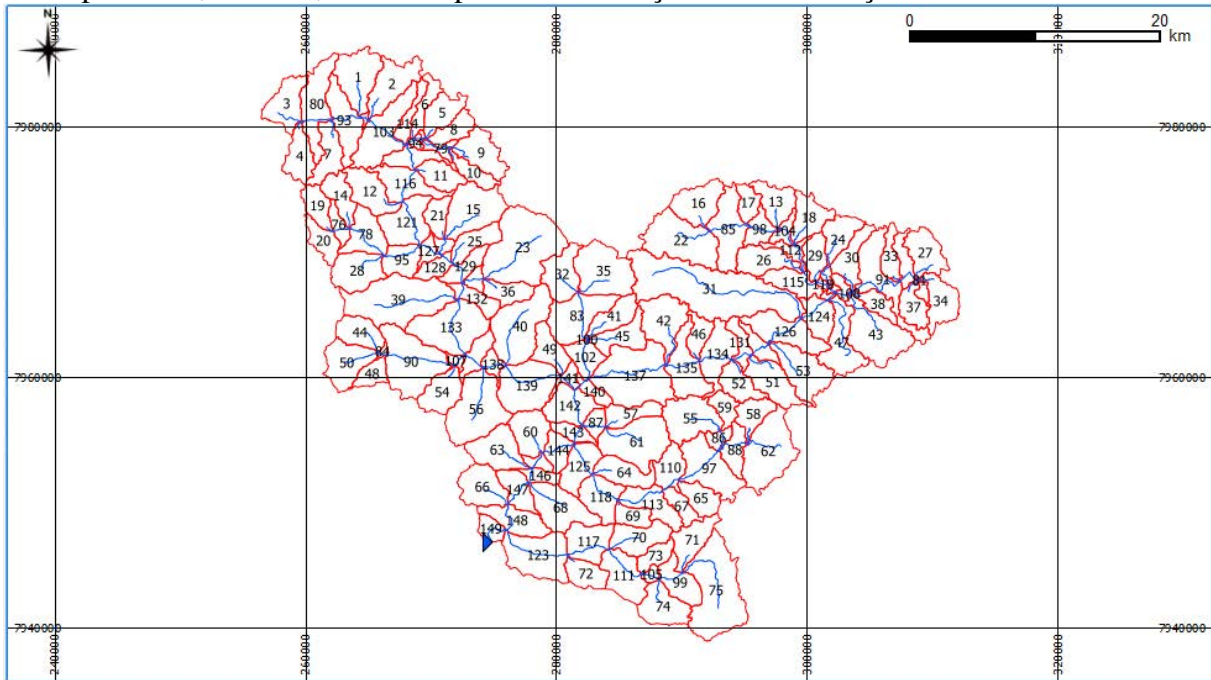
5.2. MODELAGEM DO COMPORTAMENTO AMBIENTAL DA BACIA

5.2.1. Modelagem hidrológica da bacia

Os dados resultantes da modelagem hidrológica da bacia obtidos com uso do SWAT , utilizando os dados do uso da terra, mapeados com imagens de 2011 são apresentados com valores espacialmente distribuídos em 149 sub-bacias delimitadas pelo sistema (Figura 46).

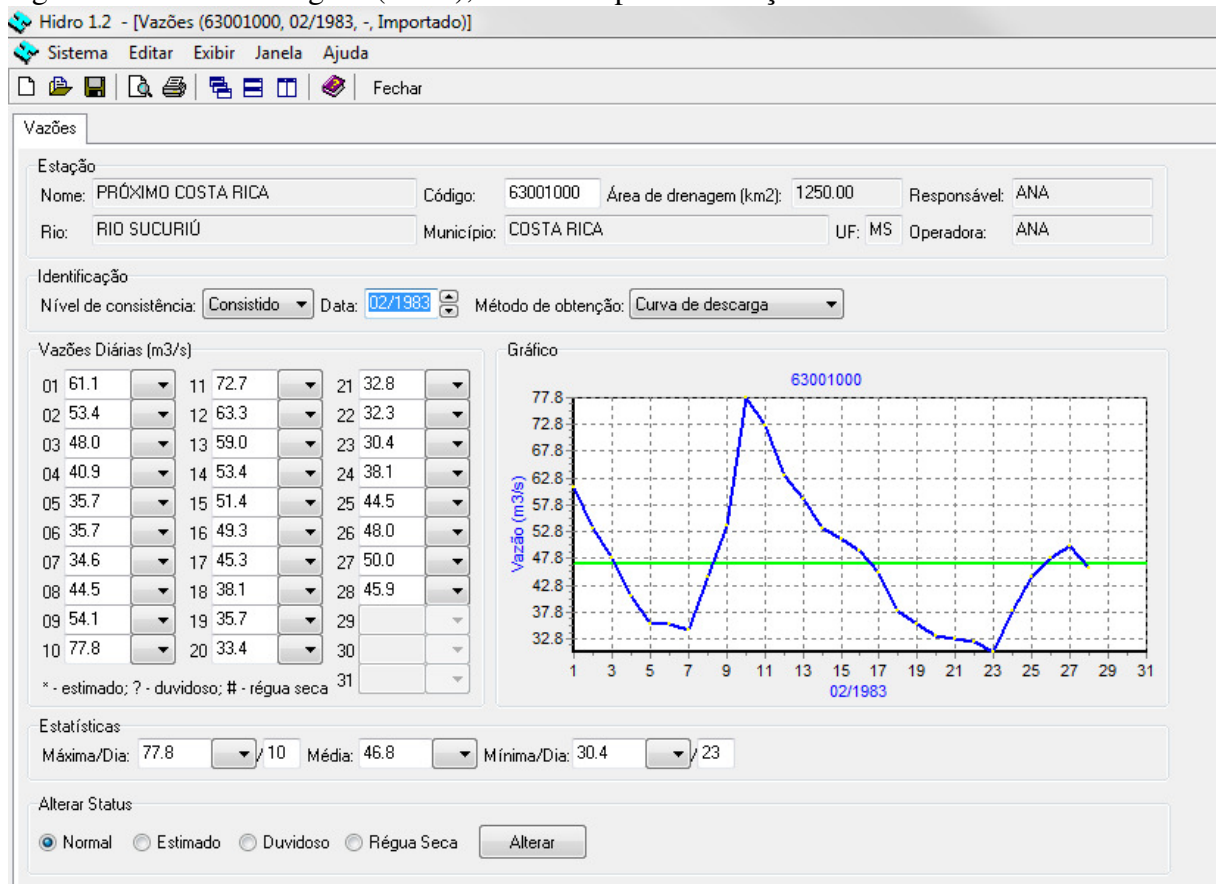
Os dados brutos resultantes do modelo SWAT não devem ser considerados como resultado final, sendo obrigatória a implementação das fases de calibração e validação do modelo (ABBASPOUR, 2005). O conjunto de dados para a calibração e validação do modelo quanto à vazão foram obtidos da série histórica da estação fluviométrica 63001000 da ANA, extraídos com uso do aplicativo Sistema de Informação Hidrológica – HIDRO, conforme Figura 47 e Tabela 15.

Figura 46 - Delimitação das sub-bacias da área de estudo, em vermelho, e a rede de drenagem correspondente, em azul, com a respectiva numeração de identificação



Fonte. Elaborado pelo autor.

Figura 47 - Amostra dos dados de vazões da estação de código 63001000, operada pela Agência Nacional de Águas (ANA), utilizados para calibração



Fonte. Elaborado pelo autor com dados da série histórica da estação fluviométrica 63001000 da ANA.

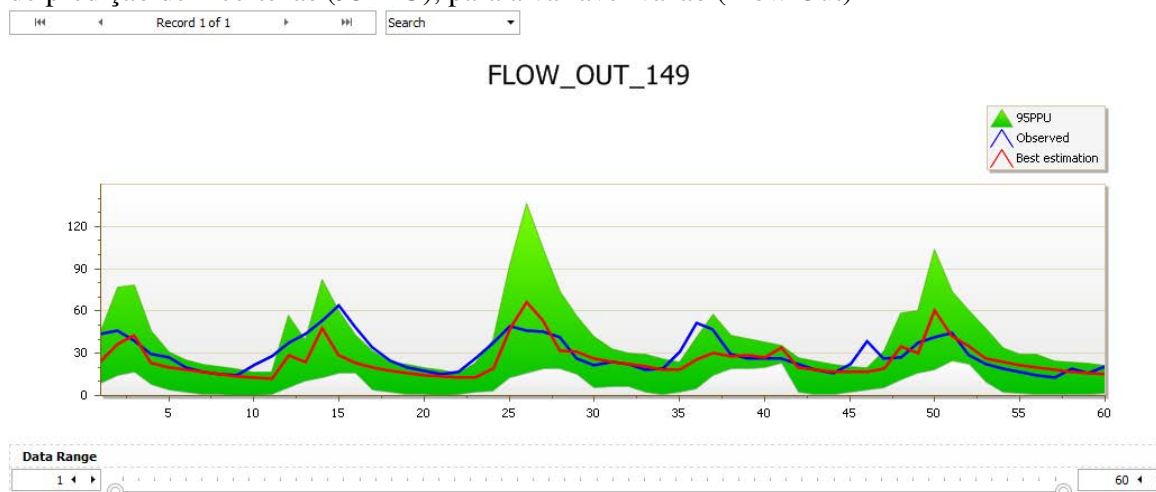
Tabela 15 - Conjunto de dados de vazões médias mensais observadas na estação de código 63001000 operada pela ANA, utilizados para calibração e validação do modelo

Meses	Anos												
	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997
Jan	46.50	25.60	44.40	44.30	50.00	48.00	38.30	32.40	32.00	47.90	28.10	31.20	52.80
Fev	41.70	30.60	46.90	53.90	47.00	30.40	41.80	32.20	47.70	45.00	35.00	39.00	38.80
Mar	43.90	43.00	40.00	65.00	45.70	26.80	45.40	36.50	37.70	36.00	31.40	47.10	25.10
Abr	32.20	26.30	30.00	48.90	42.30	27.30	29.50	28.40	40.80	34.70	30.30	29.90	27.80
Mai	22.80	23.60	27.60	34.60	26.70	26.80	23.20	28.40	21.90	27.20	25.70	21.40	23.60
Jun	19.20	17.90	21.00	25.10	22.50	22.70	19.80	19.10	24.80	24.40	22.60	17.40	35.30
Jul	17.80	14.40	17.80	20.90	24.20	18.70	17.30	15.70	16.90	22.70	16.20	14.90	19.90
Ago	14.70	18.30	16.10	18.00	23.30	16.50	14.70	15.70	15.60	14.80	13.50	12.70	16.60
Set	13.70	16.00	14.90	16.00	19.30	22.70	13.30	24.90	18.40	12.70	13.30	19.00	16.40
Out	14.50	16.90	22.60	17.30	19.60	39.60	19.60	29.50	21.20	15.70	15.50	16.80	19.20
Nov	16.60	19.90	28.70	27.00	32.10	27.00	16.90	31.20	16.80	20.00	17.90	24.20	30.10
Dez	17.30	32.60	38.00	38.30	52.50	28.00	21.30	31.40	28.60	26.60	26.00	32.80	46.10

Fonte. Elaborado pelo autor com dados da série histórica da estação fluviométrica 63001000 da ANA.

Na fase de calibração do modelo, com utilização do módulo SUFI2 do SWAT-CUP (ABBASPOUR, 2005), foram utilizados os dados de vazão observada no período de 1987 a 1991, desconsiderando então os três anos iniciais da modelagem, correspondentes à fase de Number of the Years to Skip - NYSKIP do modelo, que corresponde ao período de aquecimento da modelagem, o qual deve ser descartado para evitar a formação errônea de valores extremos. A calibração do modelo foi realizada com 200 simulações, 13 parâmetros, 149 bacias, com 60 meses, de 01/1987 a 12/1991, para a bacia 149, onde se localiza a estação fluviométrica o resultado gráfico da fase de calibração está apresentado na Figura 48.

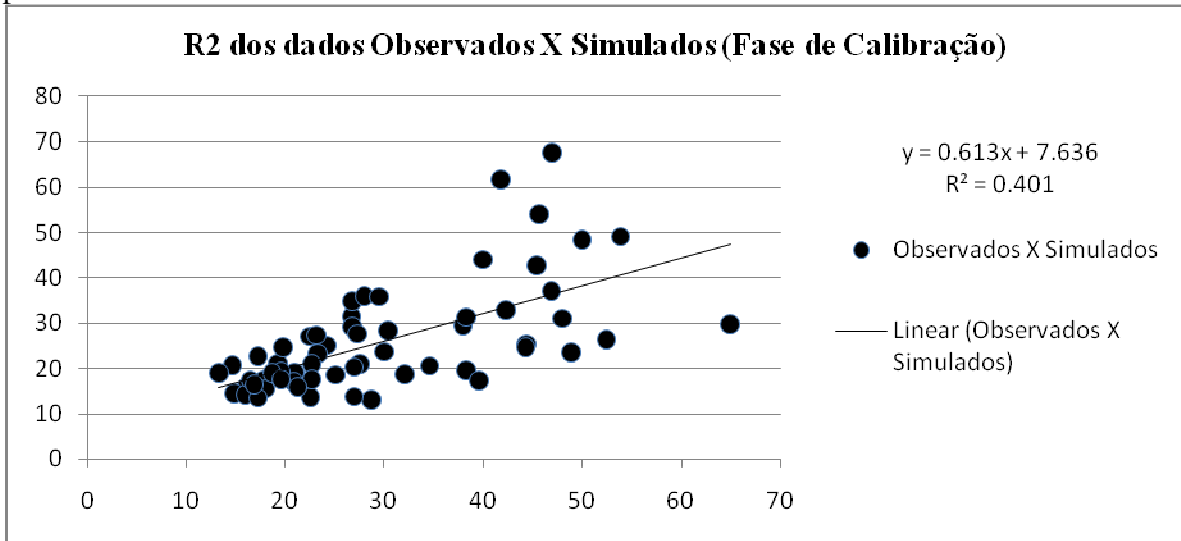
Figura 48 - Captura de tela da calibração do modelo. A faixa em verde corresponde aos 95% de predição de incertezas (95PPU), para a variável vazão (Flow Out)



Fonte. Resultado da calibração com os dados da bacia em estudo.

O comportamento do modelo na fase de calibração apresentou um baixo coeficiente de determinação (R^2), que varia entre 0 e 1, indicando, em porcentagem, o quanto o modelo consegue explicar os valores observados. Quanto maior o R^2 , mais explicativo é o modelo e melhor ele se ajusta à amostra, na fase de calibração o R^2 do modelo foi de 0,401, conforme se verifica na Figura 49.

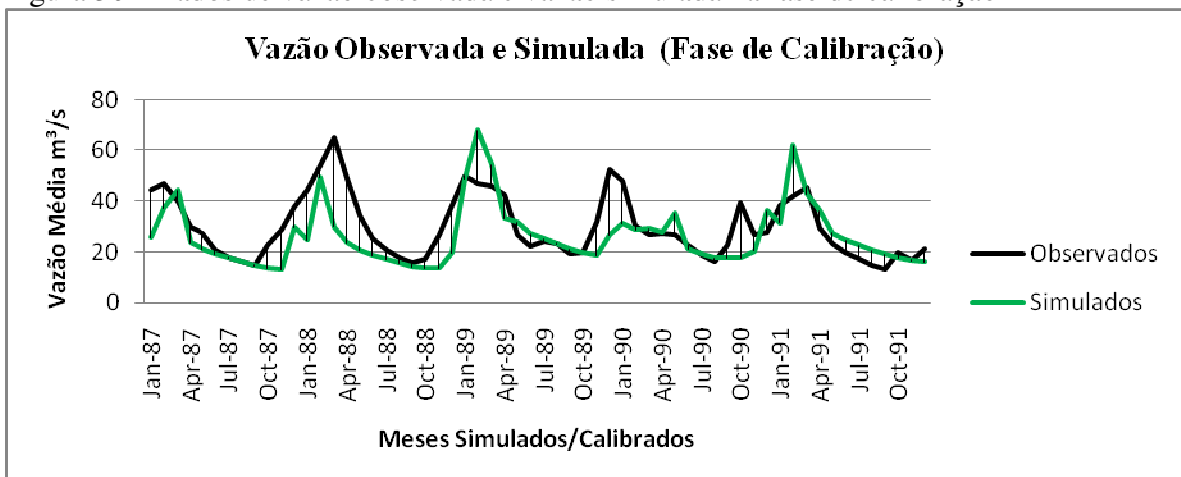
Figura 49 - Gráfico do coeficiente de determinação entre os dados observados e simulados pelo SWAT



Fonte. Resultado da calibração com os dados da bacia em estudo.

Mesmo com baixo coeficiente de determinação, observa-se uma similaridade no comportamento médio das curvas dos dados observados e simulados, com apresentação da média e do desvio padrão muito próximos entre si, o que se observou no sumário estatístico produzido pelo software de calibração (SWAT-CUP), conforme se verifica nas Figuras 50 e 51.

Figura 50 - Dados de vazão observada e vazão simulada na fase de calibração



Fonte. Resultado da calibração com os dados da bacia em estudo.

Figura 51 - Recorte do sumário estatístico da fase de calibração, com os valores de média e desvio padrão dos dados simulados e observados respectivamente

```

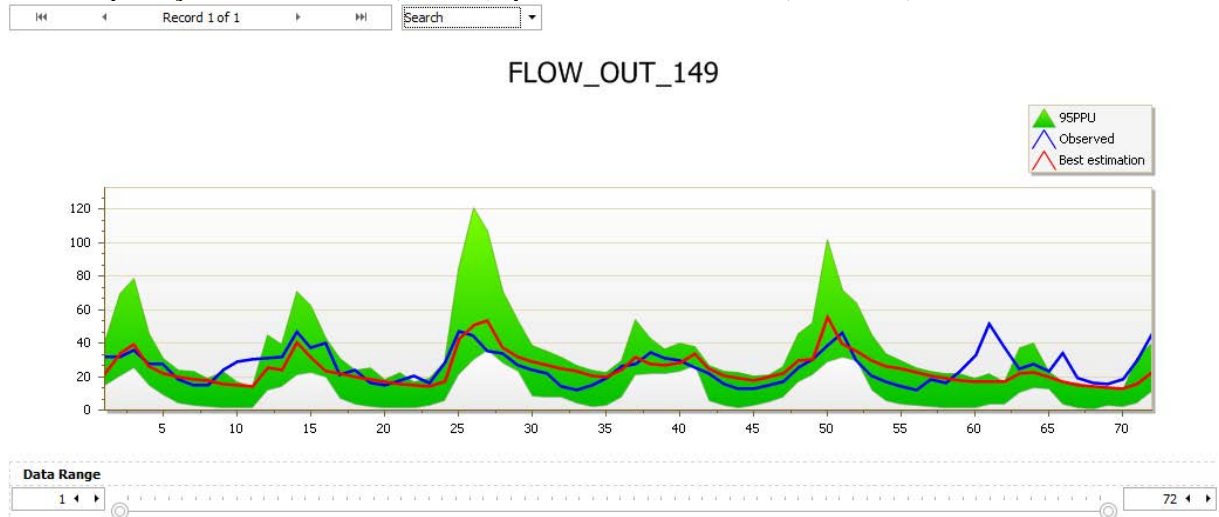
Mean_sim(Mean_obs) StdDev_sim(StdDev_obs)
26.01 (29.97) 11.78 (12.18)
    
```

Fonte. Resultado da calibração com os dados da bacia em estudo.

O índice de correlação de Pearson para o conjunto dos dados observados e simulados na fase de calibração é de 0,633 o que situa o conjunto de dados no limite superior da correlação positiva moderada, ou no limite inferior da forte correlação positiva, ou seja houve uma modelagem da bacia, ainda que distante da condição ideal.

Na fase de validação do modelo foram utilizados os dados de vazão observada no período de 1991 a 1997, e foi realizada com 200 simulações, 13 parâmetros, 149 bacias, com 72 meses, de 01/1992 a 12/1997, para a bacia 149, onde se localiza a estação fluviométrica, o resultado gráfico da fase de validação está apresentado na Figura 52.

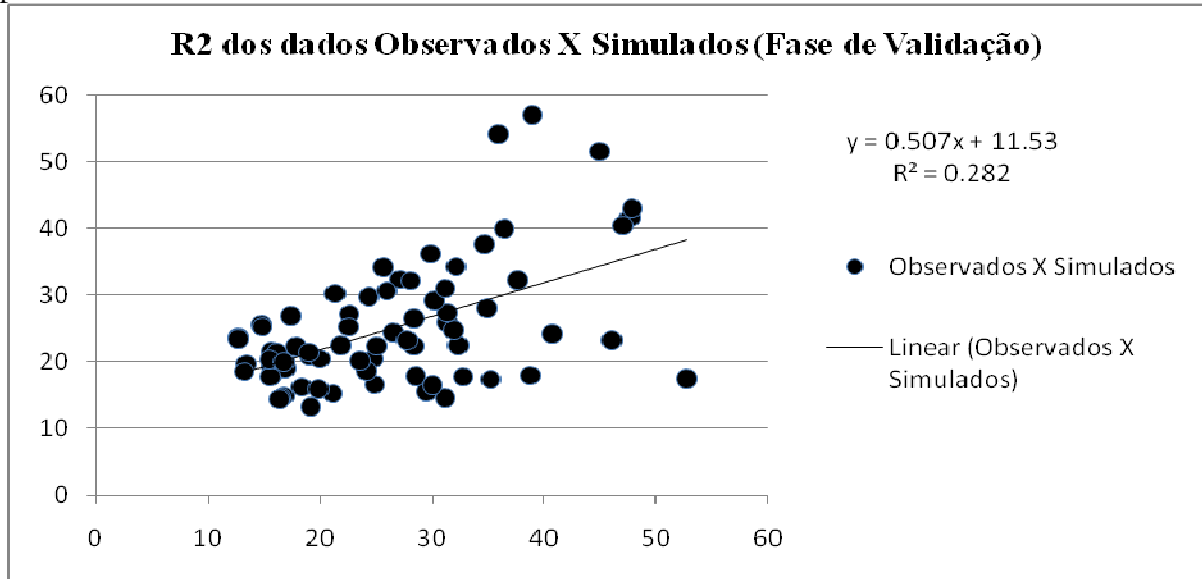
Figura 52 - Captura de tela da fase de validação do modelo. A faixa em verde corresponde aos 95% de predição de incertezas (95PPU), para a variável vazão (Flow Out)



Fonte. Resultado da validação com os dados da bacia em estudo.

O comportamento do modelo na fase de validação, tal como na fase de calibração apresentou um baixo coeficiente de determinação, o R^2 do modelo foi de 0,282, conforme se verifica na Figura 53.

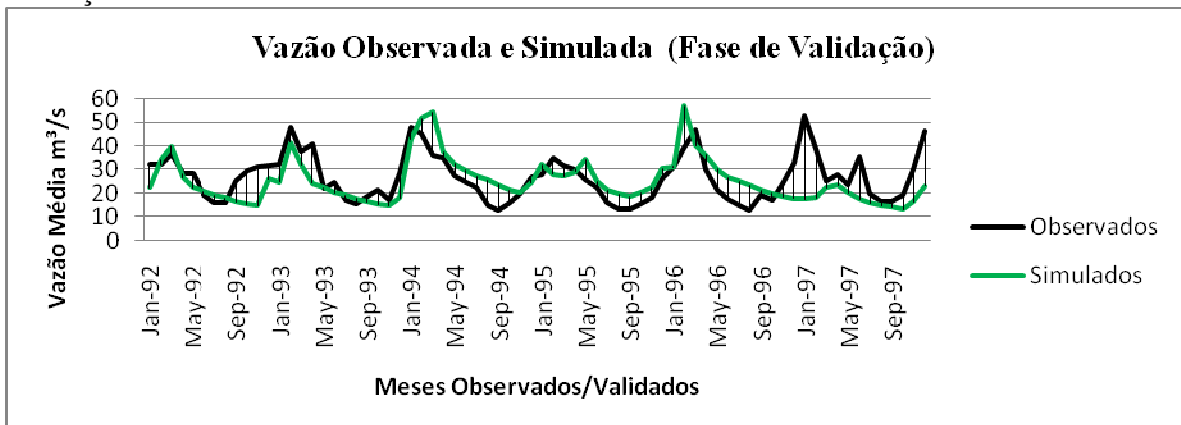
Figura 53 - Gráfico do coeficiente de determinação entre os dados observados e simulados pelo SWAT



Fonte. Resultado da validação com os dados da bacia em estudo.

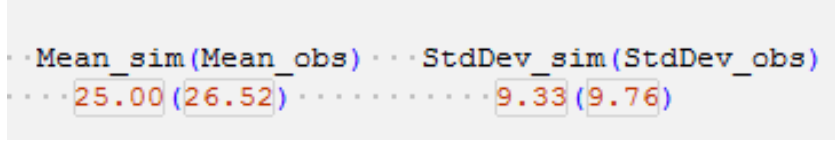
Assim como se verificou na fase de calibração, mesmo com baixo coeficiente de determinação, observa-se uma similaridade no comportamento médio das curvas dos dados observados e simulados, novamente com apresentação da média e do desvio padrão muito próximos entre si, o que se observou no sumário estatístico produzido pelo software de calibração (SWAT-CUP), conforme se verifica nas Figuras 54 e 55.

Figura 54 - Gráfico dos dados de vazão observada e vazão simulada pelo SWAT na fase de validação



Fonte. Resultado da validação com os dados da bacia em estudo.

Figura 55 - Recorte do sumário estatístico da fase de validação, com os valores de média e desvio padrão dos dados simulados pelo SWAT e observados, respectivamente

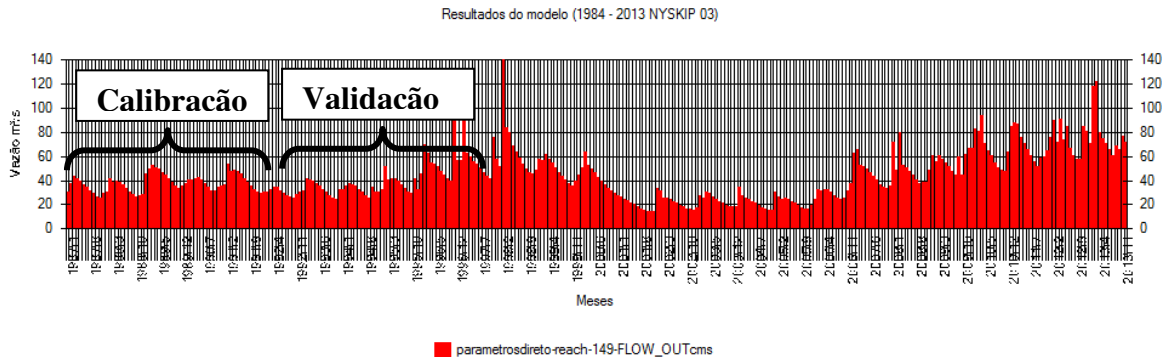


Fonte. Resultado da validação com os dados da bacia em estudo.

O índice de correlação de Pearson para o conjunto dos dados observados e simulados na fase de validação é de 0,531 o que situa o conjunto de dados na faixa da correlação positiva moderada. Todavia, o Coeficiente de Eficiência do modelo de Nash Sutcliff apontou valores muito baixos, de 0,19 e 0,08 para as fases de calibração e validação, respectivamente.

A visualização dos dados no período completo da modelagem, de 1984 a 2013, no entanto revelou que mesmo após as fases de calibração e validação do modelo, houve uma sensível desestabilização na predição dos dados de vazão, conforme se observou por meio do módulo de visualização SWATPLOT na Figura 56.

Figura 56 - Gráfico do período de 30 anos da variável vazão (Flow_Out), modelada pelo SWAT



Fonte. Resultados da modelagem, visualizados com auxílio do software SwatPlot (GEORGE et al., 2012).

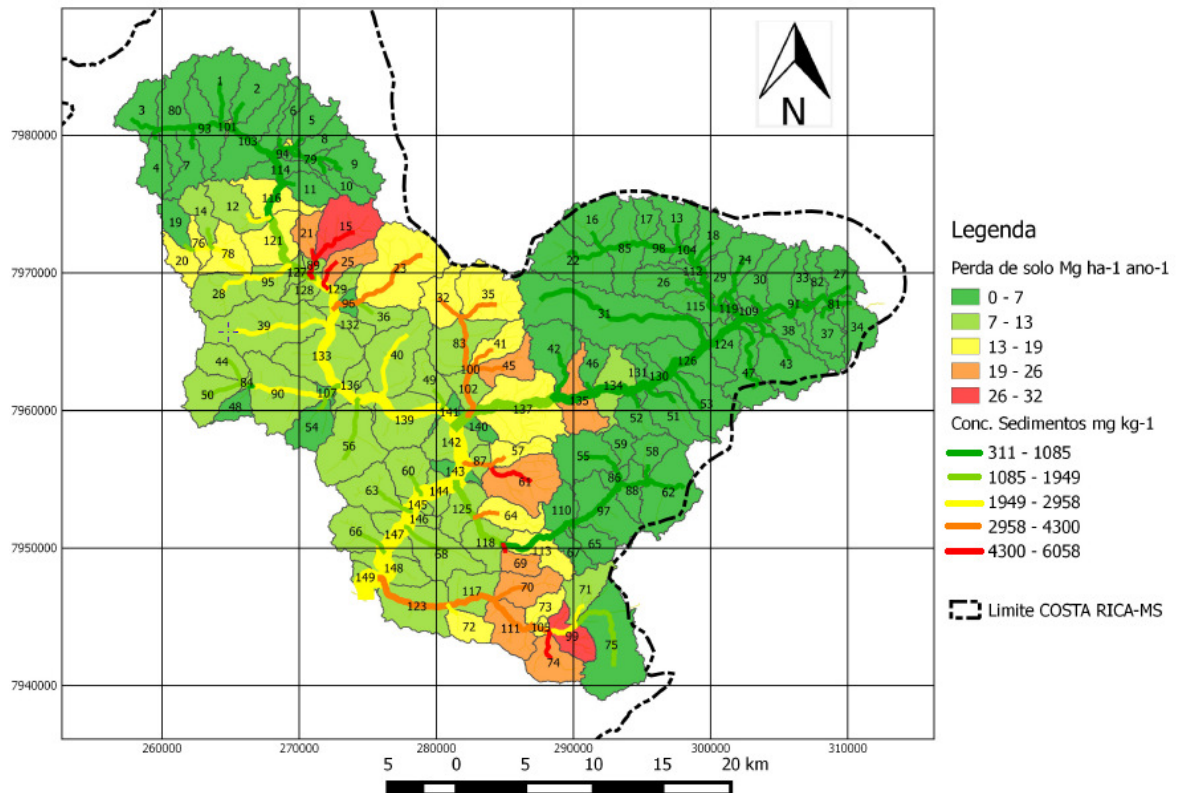
Dentre as possíveis causas das anomalias na curva do modelo pode-se associar o fato da assimetria e tamanho da bacia, com apenas um ponto de controle, e principalmente o tamanho da série histórica dos dados de vazão utilizados nas fases de calibração e validação do modelo, com a fase de calibração correspondendo a apenas um sexto do período modelado.

Situação semelhante foi descrita por Kuwajima (2012), que no entanto, considerou aceitável, com resultados de R² 0,29 e Nash Sutcliff -2,17, ou seja valores ainda inferiores aos encontrados para a bacia contribuinte da PCH Costa Rica.

Essa situação de escassez de dados de séries históricas consiste no maior desafio à quaisquer iniciativas de modelagem ambiental, uma vez que, sem um volume considerável de dados como parâmetros comparativos, não há como estabelecer um grau de confiança aos modelos. No Brasil, apesar do grande esforço de técnicos de algumas instituições para manter em funcionamento postos de monitoramento, não há uma tradição consistente na coleta de dados de monitoramento de bacias hidrográficas, com muitas estações desativadas ou com séries incompletas de dados, e isso em relação aos dados de hidrologia das bacias, quando se observa a questão da produção de sedimentos, percebe-se que séries históricas de dados sedimentológicos praticamente não existem, e desse modo não há como realizar calibração ou validação de modelos de produção de sedimentos em bacias hidrográficas de grande porte.

Os resultados referentes aos dados de produção de sedimentos na bacia do Alto Sucuriú, à montante da PCH Costa Rica estão apresentados com a visualização espacializada da variável SED_OUT_TON, que representa a quantidade de material transportado para fora da bacia hidrográfica, cumulativamente de montante para jusante, conforme se observa na Figura 57.

Figura 57 - Mapa de distribuição da produção de sedimentos das sub-bacias ($\text{Mg ha}^{-1}\text{mês}^{-1}$), e de concentração de sólidos em suspensão nos cursos d'água que compõem a bacia contribuinte da PCH Costa Rica (mg kg^{-1})



Fonte. Elaborado pelo autor.

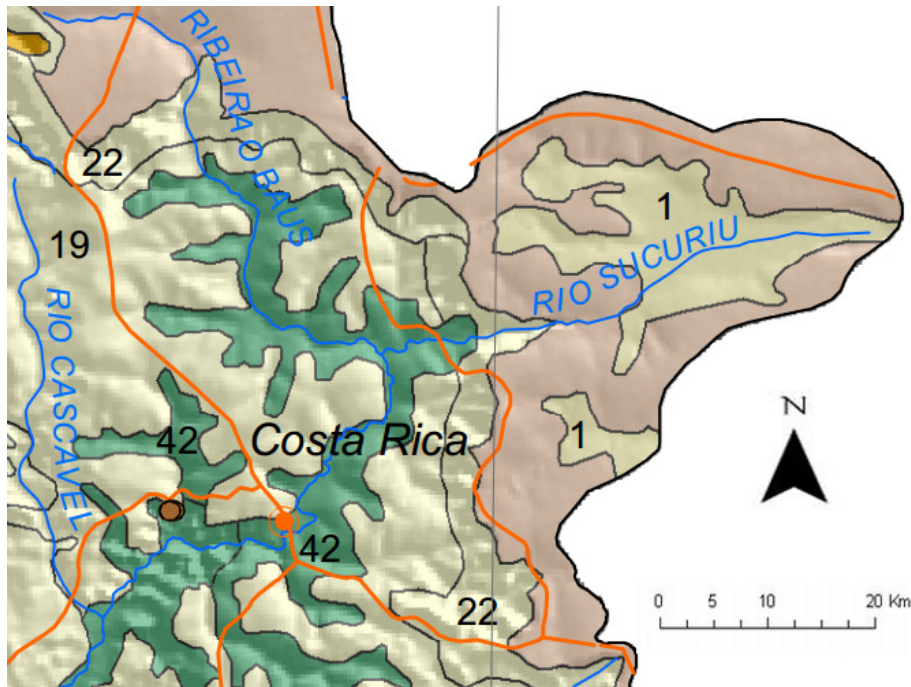
Esses dados correspondem ao total de sedimento escoado pela rede de drenagem ao longo do ano, modelados pelo sistema SWAT.

Outro dado diretamente conectado aos problemas observados no reservatório da PCH Costa Rica é a produção de sedimentos por perda direta de solo por hectare por ano ($\text{Mg ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$) em cada sub-bacia, o que não é uniforme, conforme se observa ainda na Figura 57.

O resultado demonstrou uma maior incidência de perda de solo na zona de encosta, onde ocorre o contato das unidades geomorfológicas da Unidade 22 – Degraus estruturais e rebordos erosivos, com a Unidade 42 – Planaltos com predomínio de Basalto (Figura 58).

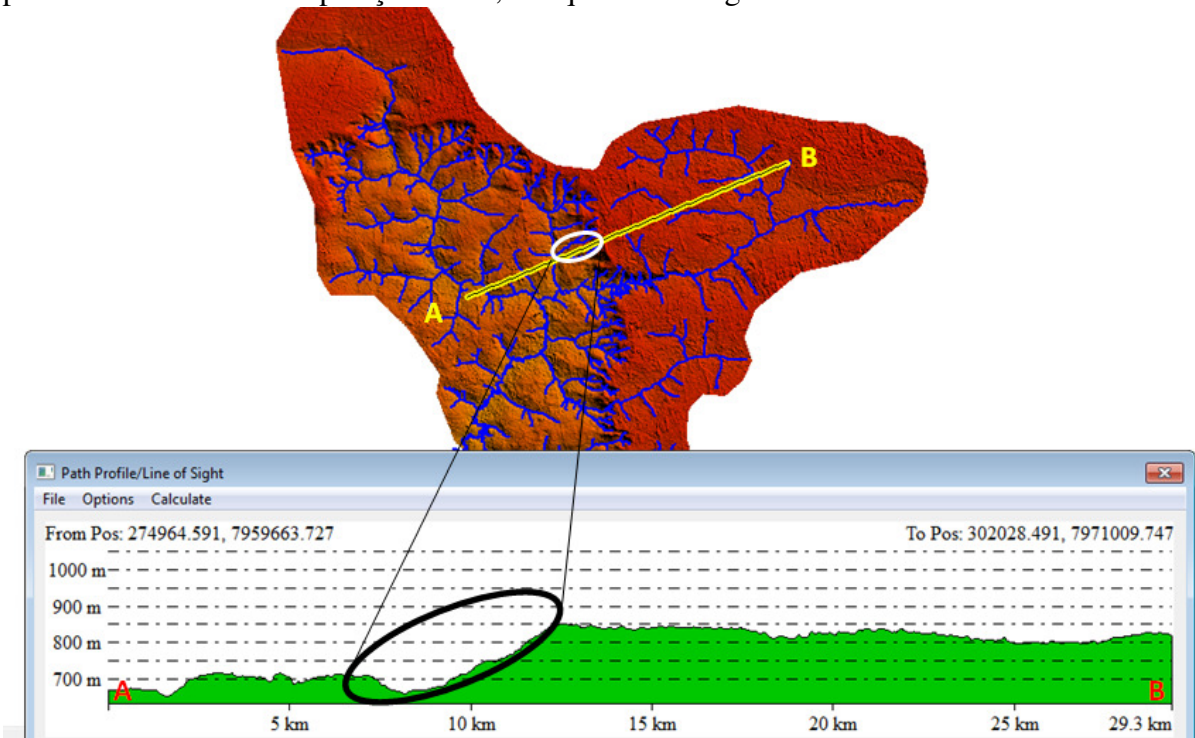
É preciso considerar também, que as condicionantes geomorfológicas, visíveis sobre o modelo digital de elevação MDE (Figura 59), estão diretamente conectadas aos aspectos relacionados à formação pedológica, cuja associação de ambas mais a geologia, resultam nas condicionantes geotécnicas, que no caso em questão, apontam em conjunto para um grande potencial de produção de sedimentos (Tabela 16), conforme ficou demonstrado na modelagem e evidenciado na Figura 57.

Figura 58 - Recorte do mapa de geodiversidade do Estado do Mato Grosso do Sul (CPRM, 2009)



Fonte. Geodiversidades do Brasil (CPRM, 2009).

Figura 59 - Perfil do relevo extraído do MDE da bacia contribuinte da PCH Costa Rica (MS). Em detalhe, o degrau estrutural e a borda erosiva entre as unidades geomorfológicas de chapadas e platôs (no centro e à direita do perfil) e de planaltos com predomínio de espessos pacotes de arenito em deposição mista, à esquerda do degrau estrutural



Fonte. Elaborado pelo autor com base em dados SRTM/TOPODATA.

A produção de sedimentos em toneladas por ano, modelada para a bacia do Alto Sucuriú, pode ser observada na Tabela 16.

Tabela 16 - Produção de sedimentos em toneladas por ano, modelada para um intervalo de 30 anos na bacia contribuinte da PCH Costa Rica (MS)

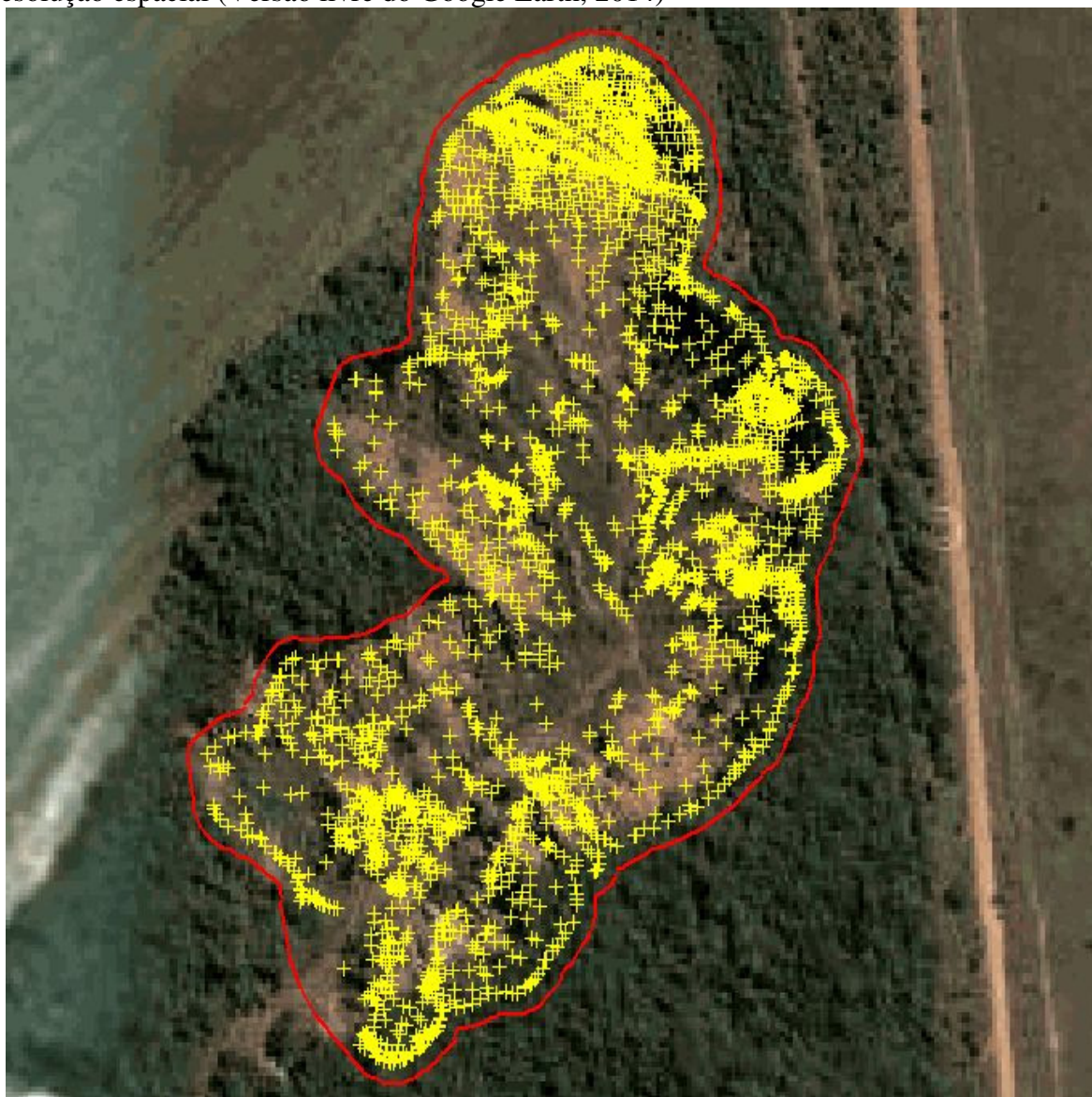
Produção de sedimentos em Mg ha⁻¹ ano⁻¹	Volume (m³) ano⁻¹	Área km²	
Na Bacia	1049521,72	702434,38	1244,00
Por km ²	843,67	691,53	1,00
Por ha	8,43	6,91	0,01

Fonte. Elaborado pelo autor.

5.2.3 Dimensões da voçoroca principal

Os dados obtidos do levantamento topográfico da voçoroca, apontada como principal causadora do assoreamento do rio Sucuriú no trecho à montante da PCH Costa Rica (Figura 60), após processados demonstraram que de fato um grande volume de material saiu dessa voçoroca nos últimos 40 a 50 anos.

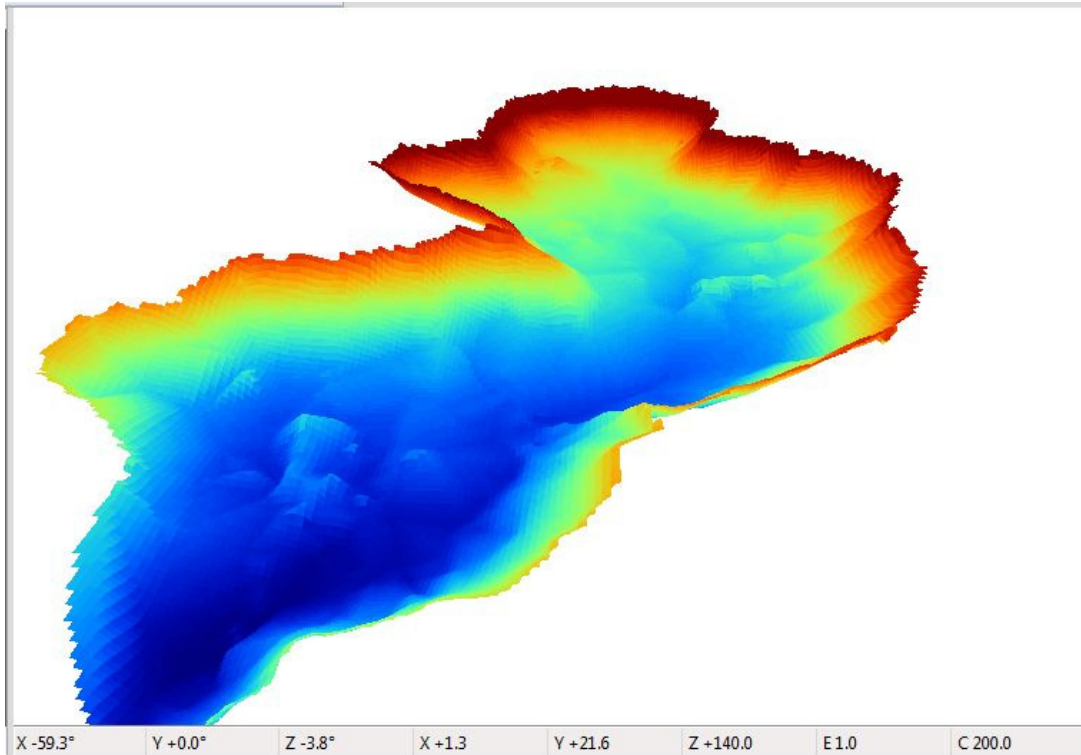
Figura 60 - Distribuição dos pontos do levantamento topográfico sobre imagem de alta resolução espacial (Versão livre do Google Earth, 2014)



Fonte. Elaborado pelo autor com dados do levantamento topográfico.

O resultado do levantamento incorporado a um sistema de informações geográficas (SIG), gerou um Modelo Numérico do Terreno (MNT) georreferenciado, e permitiu a quantificação estimada do volume de material produzido pela voçoroca (Figura 61).

Figura 61 - Resultado do levantamento topográfico da voçoroca em visualização 3D do modelo numérico do terreno (MNT)



Fonte. Elaborado pelo autor com dados do levantamento topográfico.

O levantamento topográfico da voçoroca resultou num volume de 2.271.682,51 m³ de material transportado ao longo de aproximadamente 40 a 50 anos do período de formação dessa voçoroca, conforme apurado por meio de investigações de campo e imagens da região.

5.3. DADOS HIDROSEDIMENTOLÓGICOS

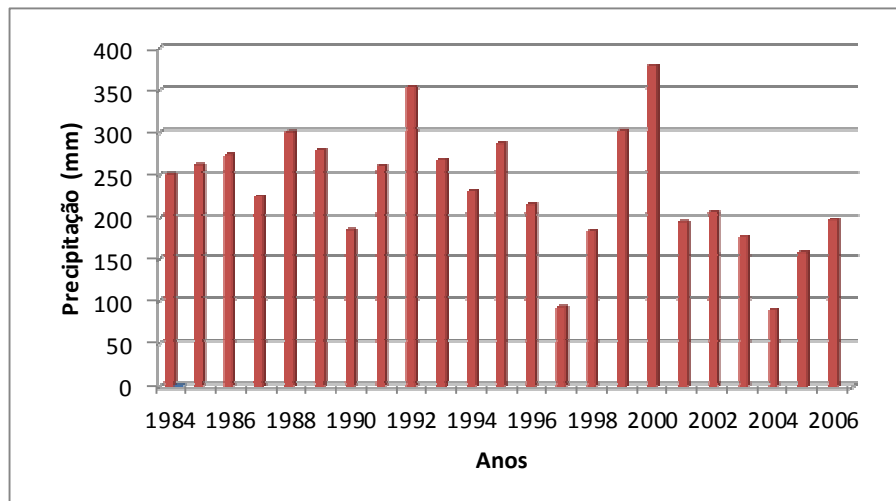
Os dados dos levantamentos hidrossedimentológicos obtidos para a bacia hidrográfica contribuinte da PCH Costa Rica foram levantados no âmbito do projeto de P&D ANNEL/EDP-ENERPEIXE, pela empresa Anambi- Análises Ambientais Ltda., nas estações

chuvosas e de estiagem dos anos de 2012 e 2013, cujos resultados foram avaliados com relação ao potencial de produção de sedimentos na bacia.

5.3.1 Distribuição da pluviosidade média nos meses planejados para a coleta de dados

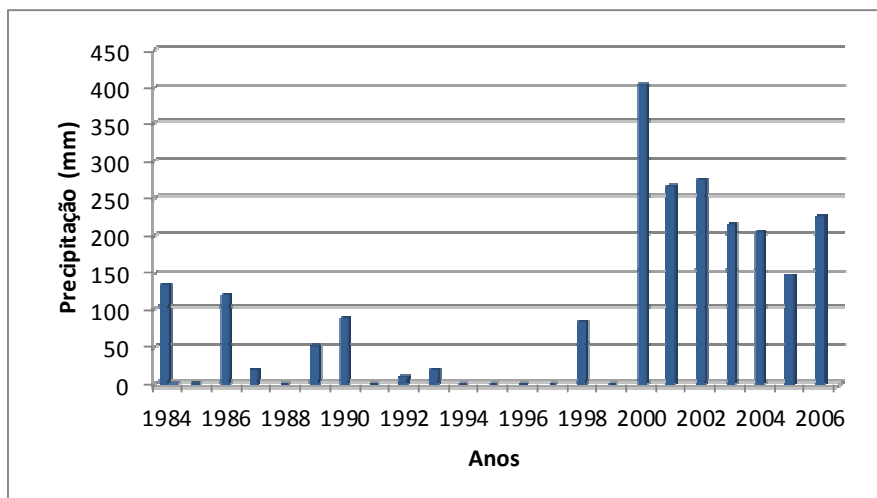
Nas Figuras 62 e 63 são apresentadas as variações das precipitações obtidas para o município de Costa Rica (MS) nos meses de março e agosto (meses em que foram realizadas as campanhas dos estudos hidrossedimentológicos nos anos de 2012 e 2013) no período de 1984 a 2006. Pode-se observar que o comportamento das precipitações na estação chuvosa foi constante, sendo que a média deste período foi da faixa de 234 mm. Entretanto, conforme observado na Figura 63, nos anos anteriores a 2000, as precipitações na estação seca foram muito baixas, sendo praticamente nulas nos anos de 1994 a 1997. Portanto, para uma melhor comparação entre a estação chuvosa e seca, foram analisados os dados referentes aos anos de 2000 a 2006, obtendo-se a precipitação média de 200 mm para o mês de março e de 249 mm para o mês de agosto, sendo verificada variação 49 mm entre as estações.

Figura 62 - Precipitações ocorridas em Costa Rica (MS), nos meses de março, no período de 1984 a 2006



Fonte. Trannin (2013).

Figura 63 - Precipitações ocorridas em Costa Rica (MS) nos meses de agosto, no período de 1984 a 2006



Fonte. Trannin (2013).

Na tabela 17 são apresentadas as classes de precipitação estabelecidas por Assis et al. (1996). De acordo com esta classificação, a intensidade da precipitação que ocorre na bacia hidrográfica do Alto Rio Sucuriú, no período chuvoso e de estiagem, se enquadra na classe “muito forte” o que, provavelmente, tem influência sobre as vazões dos cursos d’água desta bacia e sobre a ocorrência dos processos erosivos, que aumentam a quantidade de sedimentos transportados para os leitos de rios e reservatórios presentes nesta bacia.

Tabela 17 - Classificação da intensidade de precipitação (ASSIS, 1996)

Intensidade de precipitação (mm)	Classes de Precipitação
0,1 – 5	Muito Fraca
5 – 10	Fraca
10 – 15	Moderadamente Fraca
15 – 20	Moderada
20 – 25	Moderadamente Forte
25 – 30	Forte
> 30	Muito Forte

Fonte. Trannin (2013).

Amaral (2010) reitera em seu estudo, que a determinação do transporte de sedimentos numa bacia possui como uma das variáveis a vazão do curso d’água, sendo que o aumento da vazão influencia diretamente no aumento de sedimentos transportados.

5.3.2 Resultados medidos da descarga líquida (Vazão)

Os dados de descarga líquida, obtidos nas estações chuvosas e de estiagem dos anos de 2012 e 2013 estão apresentados na Tabela 18.

Tabela 18 - Descarga líquida (vazão) obtida na estação chuvosa e na estação seca dos anos de 2012 e 2013, nos pontos de amostragem da bacia hidrográfica contribuinte da PCH Costa Rica (MS)

Ponto de Amostragem	Vazões (m ³ s ⁻¹)			
	Ano 2012		Ano 2013	
	Estação chuvosa	Estação seca	Estação chuvosa	Estação seca
1	0,064	0,086	0,09	0,06
2	37,101	17,671	59,61	44,62
3	36,976	15,470	46,9	28,8
4	38,203	16,908	47,37	29,38
5	2,418	0,929	2,08	1,34
6	0,691	0,247	0,38	0,37
7	2,357	0,781	1,76	1,33
8	1,388	0,284	1,55	0,52
9	0,266	0,054	1,94	1,44
10	nd*	nd*	11,87	7,89
11	0,484	0,332	0,78	0,2
12	0,462	0,300	0,42	0,22
13	1,256	0,817	2,31	1,01
14	0,59	0,352	0,87	0,82
15	1,495	0,438	0,65	0,56
16	4,073	2,663	4,81	3,04
17	-	-	3,90	1,2

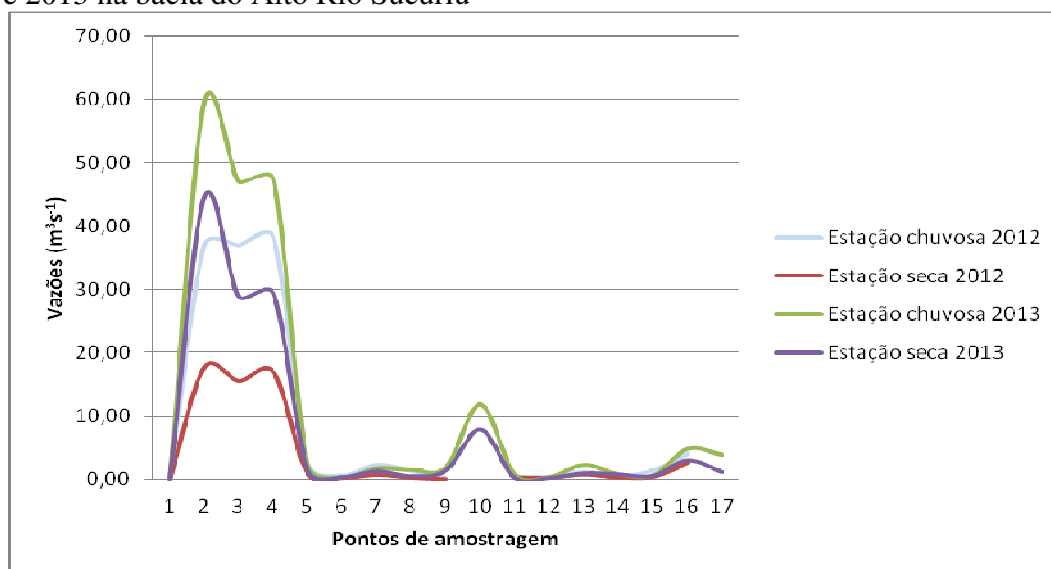
* nd: não determinado; **O ponto 10, que nas campanhas de 2012 não foi amostrado por tratar-se de meandro abandonado, foi reposicionado para as coletas de 2013; ***O ponto 17 (só fez parte das coletas do ano de 2013) corresponde a uma travessia do rio que contém o ponto 01 (voçoroca), próximo ao núcleo urbano de Costa Rica, importante para mensurar a comparação entre o material originado da voçoroca e o que chega ao exutório.

Fonte. Trannin (2013).

De acordo com os dados apresentados na Tabela 18, foi possível verificar que, quanto mais próximo das nascentes dos cursos d'água, menores os valores das vazões medidas. Em 2012 não foi possível a determinação da vazão no ponto 10, por se tratar de um meandro abandonado. Em 2013 o ponto 10 foi reposicionado e foi adicionado o ponto 17, que corresponde a uma travessia do rio que contém o ponto 1 (voçoroca), próximo ao núcleo urbano de Costa Rica, importante para mensurar a comparação entre o material sedimentar que é originado na voçoroca e o que chega ao exutório. A Figura 64 apresenta a distribuição das vazões nos períodos amostrados, podendo-se observar um comportamento similar quando

se compara dados da mesma estação, nos anos de 2012 e 2013, havendo diferença na amplitude dos dados somente entre as estações, com vazões maiores no período chuvoso.

Figura 64 - Vazões obtidas nos pontos amostrados na estação chuvosa e seca dos anos de 2012 e 2013 na bacia do Alto Rio Sucuriú



Fonte: Trannin (2013).

5.3.3 Descarga sólida total

Barcelos et al. (2012) explicam que a descarga sólida total é gerada pela concentração de sólidos em suspensão e pelas características do leito, como largura, profundidade média, velocidade da água e vazão, além da extensão da bacia, uso da terra e precipitação. Os dados de descarga sólida total de sedimentos, obtidos nas estações chuvosas e de estiagem dos anos de 2012 e 2013, estão apresentados na Tabela 19.

Avaliando-se a descarga sólida total de sedimentos e as vazões nos períodos de chuva e de seca, foi possível observar que as vazões não sofreram grandes variações na maioria dos pontos amostrados; os pontos 2, 3 e 4, próximos ao reservatório da PCH Costa Rica, como era de se esperar, apresentaram grande aporte de sedimentos da fração média e fina originados da bacia contribuinte, parte da bacia do Alto Sucuriú e, com a diminuição da velocidade, este material causa o assoreamento quando atinge o reservatório.

Tabela 19 - Descarga sólida total de sedimentos obtida na estação chuvosa e seca, nos pontos amostrados da bacia hidrográfica contribuinte da PCH Costa Rica (MS), nos anos de 2012 e 2013

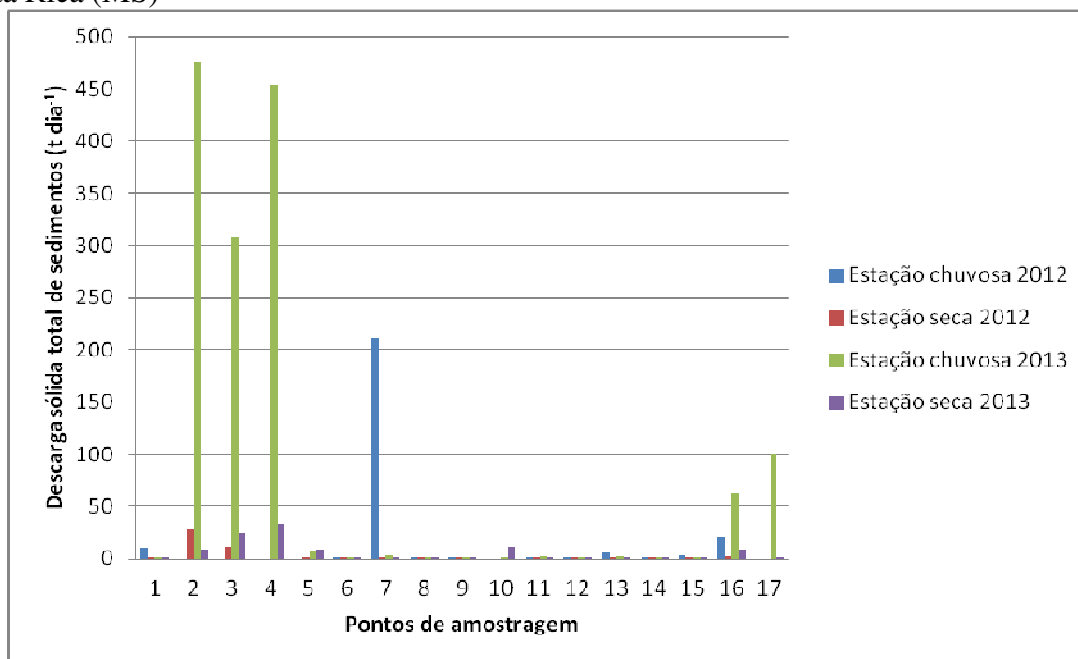
Pontos de amostragem	Descarga sólida total de sedimentos (Mg dia ⁻¹)			
	Ano 2012		Ano 2013	
	Estação chuvosa	Estação seca	Estação chuvosa	Estação seca
1	9,784	0,05	1,269	0,011
2	231,592	28,672	475,02*	8,54
3	76,916	10,833	308,31	23,77
4	238,185	-	453,85	32,55
5	34,379	1,011	7,57	9,22
6	1,245	0,069	0,32	0,368
7	210,808	0,802	4,06	1,27
8	0,674	0,046	0,42	0,556
9	0,17	0,046	1,39	0,477
10**	nd*	nd*	1,39	10,616
11	0,786	0,15	2,51	0,036
12	0,201	0,758	0,09	0,047
13	5,489	1,343	2,22	1,058
14	0,146	0,055	0,39	0,095
15	3,742	0,175	1,17	0,32
16	21,052	2,362	63,03	9,4
17***	-	-	100,73****	1,76*

* nd: não determinado; **O ponto 10, que nas campanhas de 2012 não foi amostrado por tratar-se de meandro abandonado, foi reposicionado para as coletas de 2013; ***O ponto 17 (só fez parte das coletas do ano de 2013) corresponde a uma travessia do rio que contém o ponto 01 (voçoroca), próximo ao núcleo urbano de Costa Rica, importante para mensurar a comparação entre o material originado da voçoroca e o que chega ao exutório. *****Método de Colby*, todos os demais foram determinados pelo *Método de Einstein*.

Fonte. Trannin (2013).

Na Figura 65, pode-se constatar que os maiores valores de descarga de sólidos totais ocorreram nos pontos 2, 3 e 4, 16 e 17 no período chuvoso de 2013, destacando-se que os pontos 16 e 17 localizam-se na região de cabeceira da bacia e que, uma área extensa à montante deste ponto, são desenvolvidas atividades agroindustriais.

Figura 65 - Descarga de sólidos totais amostrada na bacia hidrográfica contribuinte da PCH Costa Rica (MS)



Fonte. Trannin (2013).

5.3.4 Concentrações de sólidos em suspensão

As concentrações de sólidos em suspensão, obtidas nas estações chuvosas e de estiagem dos anos de 2012 e 2013, estão apresentadas na Tabela 20, sendo possível observar uma grande variabilidade para as duas estações nos dois anos. No entanto, os valores elevados, obtidos para a concentração de sólidos em suspensão durante a estação chuvosa de 2012 nos pontos 1, 7, 8, 13 e 15 não foram observados na estação seca de 2012. Este comportamento evidencia a elevada influência da precipitação pluviométrica sobre os processos erosivos, que são intensificados na estação chuvosa e, conseqüentemente, provocam aumento da concentração de sólidos em suspensão, principalmente, em cursos d'água de baixa vazão. A variabilidade nas concentrações de sólidos em suspensão ocorreu entre as estações chuvosa e seca e entre os anos avaliados.

Tabela 20 - Concentrações de sólidos em suspensão, obtidas na estação chuvosa e seca, nos pontos amostrados da bacia hidrográfica contribuinte da PCH Costa Rica (MS), nos anos de 2012 e 2013

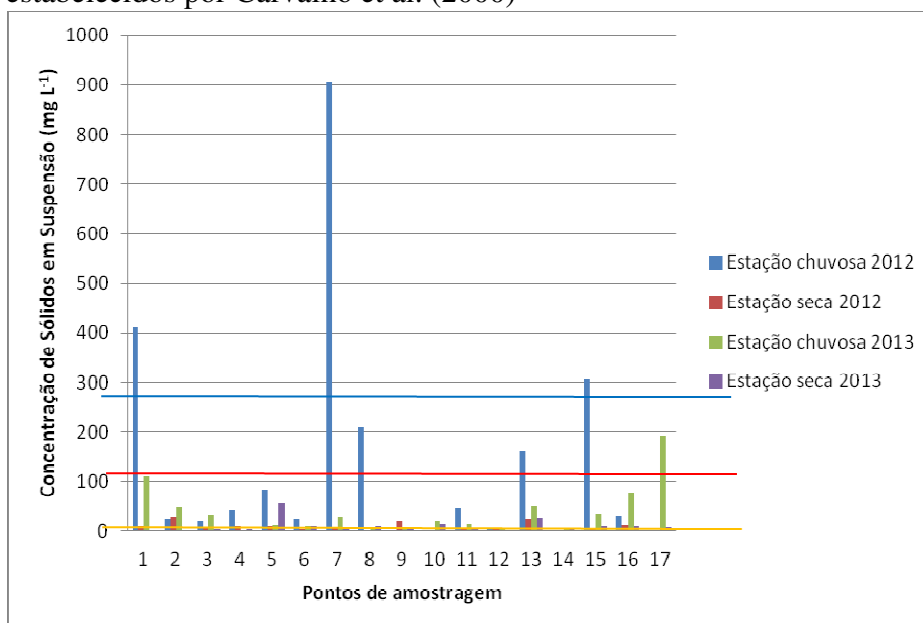
Pontos de amostragem	Concentração de Sólidos em Suspensão (mg L ⁻¹)			
	Ano 2012		Ano 2013	
	Estação chuvosa	Estação seca	Estação chuvosa	Estação seca
1	412	9,95	111,1	2,88
2	24,07	29,84	48,7	2,45
3	18,12	8,68	34,53	3,98
4	42,99	10,54	Nd	4,92
5	83,9	10,35	11,67	58,02
6	25,05	4,19	11,01	11,37
7	906,3	5,48	29,64	7,19
8	210,2	2,06	5,39	10,58
9	2,64	18,87	7,65	6,87
10**	nd*	nd*	19,67	15,19
11	47,52	6,36	15,14	4,60
12	6,54	4,74	3,70	2,95
13	160,2	22,88	50,77	27,61
14	2,5	2,67	7,10	3,34
15	308,3	5,05	35,26	9,59
16	32,13	11,82	79,22	9,86
17***	-	-	192,9	8,08

* nd: não determinado; **O ponto 10, que nas campanhas de 2012 não foi amostrado por tratar-se de meandro abandonado, foi reposicionado para as coletas de 2013; ***O ponto 17 (só fez parte das coletas do ano de 2013) corresponde a uma travessia do rio que contém o ponto 01 (voçoroca), próximo ao núcleo urbano de Costa Rica, importante para mensurar a comparação entre o material originado da voçoroca e o que chega ao exutório.

Fonte. Trannin (2013).

De acordo com Carvalho et al. (2000) pode-se considerar como baixos, os valores de concentração de sólidos em suspensão inferiores a 50 mg L⁻¹, altos, os valores entre 150 e 300 mg L⁻¹ e muito altos, os valores acima de 300 mg L⁻¹. Com base nestes limites estabelecidos por Carvalho et al. (2000), pode ser observado na Figura 66, que os pontos 1, 7, 8, 13, 15 apresentaram valores de concentração de sólidos em suspensão considerados altos e muito altos, destacando-se o ponto 7, com concentrações de sólidos em suspensão muito elevadas na estação chuvosa de 2012.

Figura 66 - Concentrações de sólidos em suspensão amostrados no período de chuva e seca nos anos de 2012 e 2013 na bacia contribuinte da PCH Costa Rica (MS), e os limites estabelecidos por Carvalho et al. (2000)



Fonte. Trannin (2013).

5.3.5 Granulometria dos sólidos em suspensão do Alto Rio Sucuriú

A carga sólida em suspensão, normalmente, é constituída de partículas de granulometria reduzida (silte e argila) que, por serem muito pequenas, se conservam em suspensão pelo fluxo turbulento (VESTENA, 2008). As Tabelas 21 a 24 apresentam a granulometria dos sólidos em suspensão obtida nas estações chuvosa e seca de 2012 e 2013.

Tabela 21 - Granulometria dos sedimentos em suspensão, obtida nos 16 pontos amostrais da bacia hidrográfica contribuinte da PCH Costa Rica (MS), na estação chuvosa em 2012

Granulometria dos sólidos em suspensão, %	Pontos de amostragem															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	11	12	13	14	15	16	
Areia muito grossa	nd	nd	nd	Nd	nd	nd	1,1	0,5	nd	0,9	nd	nd	nd	0,1	0,1	
Areia grossa	0,8	0,2	nd	Nd	8	nd	13,7	0,7	nd	1,9	nd	3,8	10,2	7,9	0,1	
Areia média	32,4	ND	nd	0,1	42,7	16,9	66,6	62,2	nd	15,1	9,2	66,7	8,4	64	14,6	
Areia fina	52,5	20,8	4,3	33,4	34,6	43,1	12,7	34,6	nd	38,3	31,3	17,7	36,2	26	49	
Areia muito fina	12,2	24,3	11,3	32,7	10	18,3	2,5	1,6	nd	23,6	13,1	10,1	29,9	1,1	25,1	
Silte + argila	2,1	54,7	84,4	33,8	4,7	21,7	3,4	0,4	100	20,2	46,4	1,7	15,3	0,6	11,1	

* nd: não determinado; **Excluíram-se os pontos 10 e 17, devido à ausência de análises nos dois anos, o que impossibilitou a comparação dos resultados.

Fonte. Trannin (2013).

Tabela 22 - Granulometria dos sedimentos em suspensão, obtida nos 16 pontos amostrais da bacia hidrográfica contribuinte da PCH Costa Rica (MS), na estação chuvosa em 2013

Granulometria dos sólidos em suspensão, %	Pontos de amostragem*															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	11	12	13	14	15	16	
Areia muito grossa	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	
Areia grossa	0,2	nd	1,9	nd	nd	1,1	3,8	nd	nd	3,2	2,6	nd	nd	nd	3,6	
Areia média	9,4	nd	8,7	4,0	3,7	0,7	nd	nd	nd	20,5	12,8	nd	3,8	0,5	42,4	
Areia fina	57,7	nd	20,7	31,1	45,8	11	15,4	ND	28,6	33,8	19,1	nd	20,3	34,7	38,6	
Areia muito fina	29,4	nd	15,1	21,7	26,9	45,3	32,1	64,8	32,1	15,5	13,3	nd	7,2	37,2	9,7	
Silte + argila	3,3	100	53,6	43,2	23,6	41,9	48,7	35,2	39,3	27,1	52,2	100	68,7	27,6	5,7	

* nd: não determinado; **Excluíram-se os pontos 10 e 17, devido à ausência de análises nos dois anos, o que impossibilitou a comparação dos resultados.

Fonte. Trannin (2013).

Tabela 23 - Granulometria dos sedimentos em suspensão, obtida nos 16 pontos amostrais da bacia hidrográfica contribuinte da PCH Costa Rica (MS), na estação seca em 2012

Granulometria dos sólidos em suspensão, %	Pontos de amostragem															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	11	12	13	14	15	16	
Areia muito grossa	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	
Areia grossa	nd	0,2	1,9	5,6	0,4	5,6	4,2	ND	1,1	nd	nd	10,4	nd	1,9	22,4	
Areia média	7,1	9,6	3,5	10,9	4,4	7,2	1,5	2,7	9,3	3,7	20,7	40,6	nd	4,9	24,9	
Areia fina	10,7	49,8	7,4	21,3	40,0	10,8	23,7	6,1	23,7	10,5	26,8	30,7	nd	26,3	31,6	
Areia muito fina	14,1	33,8	10,2	32,7	27,3	29,9	25,0	13,7	15,5	14,1	10,4	8,4	35,9	16,6	11,1	
Silte + argila	68,1	6,6	77,0	29,5	27,9	46,5	45,6	77,5	50,4	71,7	42,1	9,9	64,1	50,3	10,0	

* nd: não determinado; **Excluíram-se os pontos 10 e 17, devido à ausência de análises nos dois anos, o que impossibilitou a comparação dos resultados.

Fonte. Trannin (2013).

Tabela 24 - Granulometria dos sedimentos em suspensão, obtida nos 16 pontos amostrais da bacia hidrográfica contribuinte da PCH Costa Rica (MS), na estação seca em 2013

Granulometria dos sólidos em suspensão, %	Pontos de amostragem															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	11	12	13	14	15	16	
Areia muito grossa	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	
Areia grossa	nd	0,5	2,2	1	nd	nd	0,8	nd	nd	nd	nd	5,0	27,8	nd	nd	
Areia média	0,3	4,5	5,5	4,2	0,2	7,1	12,9	8,2	17,7	nd	nd	82,1	2,8	6,5	28,4	
Areia fina	0,4	1,0	25,7	17,6	0,6	42,0	64,0	53,3	61,0	2,9	13,2	9,9	19,5	30,8	36,1	
Areia muito fina	21,4	4,4	13,3	22,3	0,9	20,4	18,0	23,4	17,0	57,4	38,4	1,9	35,3	21,8	24,1	
Silte + argila	77,9	89,6	53,3	54,9	98,3	30,5	4,3	15,1	4,3	39,7	48,4	1,1	14,6	40,9	11,0	

* nd: não determinado; **Excluíram-se os pontos 10 e 17, devido à ausência de análises nos dois anos, o que impossibilitou a comparação dos resultados.

Fonte. Trannin (2013).

Comparando-se os dados obtidos na estação chuvosa com os da estação seca, foi possível verificar que os padrões granulométricos não diferiram de forma significativa entre

as quatro campanhas. A grande participação das frações areia fina e areia muito fina na descarga de sólidos em suspensão, pode ser justificada pela predominância, nesta bacia, de solos muito arenosos, como os Neossolos Quartzarênicos, sendo verificado em levantamentos de campo que, mesmo os Latossolos da região, apresentam em sua maioria textura arenosa ou areno-argilosa.

5.3.5 Granulometria dos Sólidos de Fundo

Nas tabelas 25 a 28 são apresentadas as composições granulométricas da descarga sólida de fundo, dos pontos amostrados na bacia hidrográfica contribuinte da PCH Costa Rica, nas estações chuvosa e seca de 2012 e 2013, respectivamente.

Tabela 25 - Porcentagem da granulometria dos sedimentos de fundo, obtida nos 16 pontos amostrais da bacia hidrográfica contribuinte da PCH Costa Rica (MS), na estação chuvosa 2012

Granulometria sedimentos de fundo %	Pontos de amostragem														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	11	12	13	14	15	16
Cascalho grosso	18,2	nd	nd	nd	nd	nd	nd	0,7	nd	nd	nd	nd	nd	nd	3,5
Cascalho médio	5,8	0,2	nd	2,0	nd	nd	1,3	3,2	nd	0,5	0,3	nd	nd	nd	8,6
Cascalho fino	13,4	2,5	2,2	2,0	0,3	nd	2,3	4,2	nd	1,6	1,3	nd	0,1	0,2	1,9
Cascalho muito fino	4,7	6,6	1,1	1,0	0,8	nd	5,1	7,4	nd	7,9	1,6	nd	0,3	0,5	0,5
Areia muito grossa	0,9	5,9	1,7	1,0	1,3	0,1	5,8	5,1	9,3	15	1,0	nd	0,9	1,2	0,2
Areia grossa	0,9	15	6,9	5,0	15,6	0,9	18	6,9	10,8	35	16	7,5	8,4	12	0,5
Areia média	29,3	58	33	60	68,2	55,5	57,2	36,8	28,9	31	70	79,3	64,1	63	14,6
Areia fina	24	12	34	30	13,5	31,8	9,8	33,3	35,9	6,8	9,1	13,1	25,1	22	56,4
Areia muito fina	2,5	0,4	17	1,0	0,3	0,6	0,4	1,9	9,8	1,4	0,2	0,1	1,0	0,6	12,7
Silte + argila	0,3	0,1	3,5	0	nd	0,1	0,1	0,5	5,3	0,5	0,1	nd	0,1	0,1	1,1

* nd: não determinado; **Excluíram-se os pontos 10 e 17, devido à ausência de análises nos dois anos, o que impossibilitou a comparação dos resultados.

Fonte: Trannin (2013).

Tabela 26 - Porcentagem da granulometria dos sedimentos de fundo, obtida nos 16 pontos amostrais da bacia hidrográfica contribuinte da PCH Costa Rica (MS), na estação chuvosa 2013

Granulometria sedimentos de fundo %	Pontos de amostragem															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	11	12	13	14	15	16	
Cascalho grosso	23,4	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	
Cascalho médio	17,7	nd	nd	0,5	nd	nd	nd	nd	1,3	nd	nd	nd	nd	nd	nd	
Cascalho fino	10,3	nd	0,1	1,2	nd	nd	0,6	nd	4,1	nd	nd	nd	nd	nd	nd	
Cascalho muito fino	3,7	nd	0,2	0,8	nd	nd	2,1	nd	7,2	0,3	nd	0,7	2,1	0,5	0,1	
Areia muito grossa	1,7	nd	0,2	0,7	0,3	2,6	2,9	3,5	5,7	3,7	nd	0,9	2,5	0,7	0,1	
Areia grossa	1,2	30,6	1,3	3,6	2,2	4,9	11	12,0	8,4	21,3	3,6	15,9	7,2	10,0	11,7	
Areia média	22,3	26,9	33,7	69,3	37,0	25,6	51,6	24,1	41,5	47,7	68,6	77,2	41,9	65,3	63,9	
Areia fina	17,7	18,9	56,4	23,6	49,7	54,7	28	31,2	28,8	22,9	26,6	5,1	40,0	22,5	23,0	
Areia muito fina	1,7	10,9	7,8	0,3	9,9	10,4	3,3	15,7	2,4	3,2	1,1	0,2	5,5	0,9	1,1	
Silte + argila	0,3	12,8	0,3	nd	0,9	1,8	0,5	13,5	0,6	0,9	0,1	nd	0,8	0,1	0,1	

* nd: não determinado; **Excluíram-se os pontos 10 e 17, devido à ausência de análises nos dois anos, o que impossibilitou a comparação dos resultados.

Fonte. Trannin (2013).

De acordo com a Tabela 25, na estação chuvosa, a fração predominante é a de areia média e areia fina, sendo a maior participação da areia média obtida no ponto 13, que contribuiu com 79,3% da composição da descarga sólida de fundo. Nas frações de granulometria maior, destacou-se a participação de cascalho fino e muito fino, que atingiu 13,4% de cascalho fino no ponto 1. Na estação seca, os dados granulométricos foram semelhantes aos obtidos na estação chuvosa, sendo que no ponto 13 a maior concentração foi de areia média (59,5%) e no ponto 1, a maior concentração é a de cascalhos, contendo 29,2% de cascalhos muito finos.

Tabela 27 - Porcentagem da granulometria dos sedimentos de fundo, obtida nos 16 pontos amostrais da bacia hidrográfica contribuinte da PCH Costa Rica (MS), na estação seca 2012

Granulometria sedimentos de fundo %	Pontos de amostragem															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	11	12	13	14	15	16	
Cascalho grosso	13,8	4,9	nd	nd	1,2	nd	17,1	ND	nd	2,1	2,4	nd	3,5	2,9	nd	
Cascalho médio	24,5	6,1	nd	0,5	1,8	1,6	7,3	2,1	nd	2,9	7,9	nd	3,4	1,1	nd	
Cascalho fino	18,6	5,3	nd	1,2	7,4	5,1	4,7	2,4	nd	1,2	12,8	nd	3,8	2,6	nd	
Cascalho muito fino	29,2	4,0	nd	1,0	4,6	5,7	3,7	5,8	nd	1,7	13,7	nd	4,4	3,4	0,1	
Areia muito grossa	0,7	1,2	0,5	2,5	1,1	2,2	1,9	4,8	0,3	4,8	4,9	0,3	2,1	2,1	0,1	
Areia grossa	0,5	3,5	9,8	18,5	7,0	9,2	5,6	11,3	2,9	19,1	6,1	5,6	6,8	15,3	6,3	
Areia média	7,2	33,5	43,7	37,8	46,5	41,8	31,7	33,0	56,1	40,7	30,8	59,5	48,9	55,5	38,5	
Areia fina	5,1	29,0	15,1	29,2	26,6	31,4	24,8	34,5	30,4	22,9	17,4	16,8	23,2	14,9	42,2	
Areia muito fina	0,6	10,0	17,9	5,8	3,5	2,5	2,7	4,2	8,5	3,4	3,1	17,8	2,5	1,8	11,4	
Silte + argila	0,2	2,5	12,0	3,5	0,3	0,5	0,5	1,9	1,8	1,2	0,9	nd	1,4	0,4	1,4	

* nd: não determinado; **Excluíram-se os pontos 10 e 17, devido à ausência de análises nos dois anos, o que impossibilitou a comparação dos resultados.

Fonte. Trannin (2013).

Tabela 28 - Porcentagem da granulometria dos sedimentos de fundo, obtida nos 16 pontos amostrais da bacia hidrográfica contribuinte da PCH Costa Rica (MS), na estação seca 2013

Granulometria sedimentos de fundo %	Pontos de amostragem*															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	11	12	13	14	15	16	
Cascalho grosso	0,3	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	
Cascalho médio	4,4	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	
Cascalho fino	15,6	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	
Cascalho muito fino	6,3	3,7	3,7	nd	nd	nd	5,6	nd	0,4	nd	nd	0,3	0,4	12,7	1,8	
Areia muito grossa	1,1	0,9	0,9	0,9	nd	1,9	0,8	1,9	0,2	nd	nd	5,6	2,1	0,6	0,5	
Areia grossa	7,0	7,4	7,4	3,3	1,0	6,4	5,7	6,4	4,9	1,6	0,5	8,4	11,6	9,2	20,2	
Areia média	50,4	74,7	74,7	18,5	52,5	32,3	62,4	32,3	61,3	48,3	10,0	46,5	78,6	60,5	67,5	
Areia fina	12,5	13,0	13,0	53,8	42,9	45,2	24,4	45,2	28,0	22,5	70,4	29,5	7,1	16,6	9,5	
Areia muito fina	1,7	0,2	0,2	20,6	3,3	11,0	1,0	11,0	4,7	4,0	17,1	6,6	0,1	0,4	0,5	
Silte + argila	0,7	0,1	0,1	2,9	0,3	3,2	0,1	3,2	0,5	0,7	2,3	3,1	0,1	nd	nd	

* nd: não determinado; **Excluíram-se os pontos 10 e 17, devido à ausência de análises nos dois anos, o que impossibilitou a comparação dos resultados.

Fonte: Trannin (2013).

5.3.6 Fração orgânica dos sedimentos em suspensão

Na Tabela 29 e na Figura 65 são apresentados os dados obtidos para a fração orgânica dos sedimentos em suspensão, nos pontos de amostragem da bacia hidrográfica contribuinte da PCH Costa Rica, nos períodos de chuva e de seca, nos anos de 2012 e 2013.

Tabela 29 - Fração orgânica dos sedimentos em suspensão presente na bacia contribuinte da PCH Costa Rica (MS) nas estações chuvosa e seca dos anos de 2012 e 2013

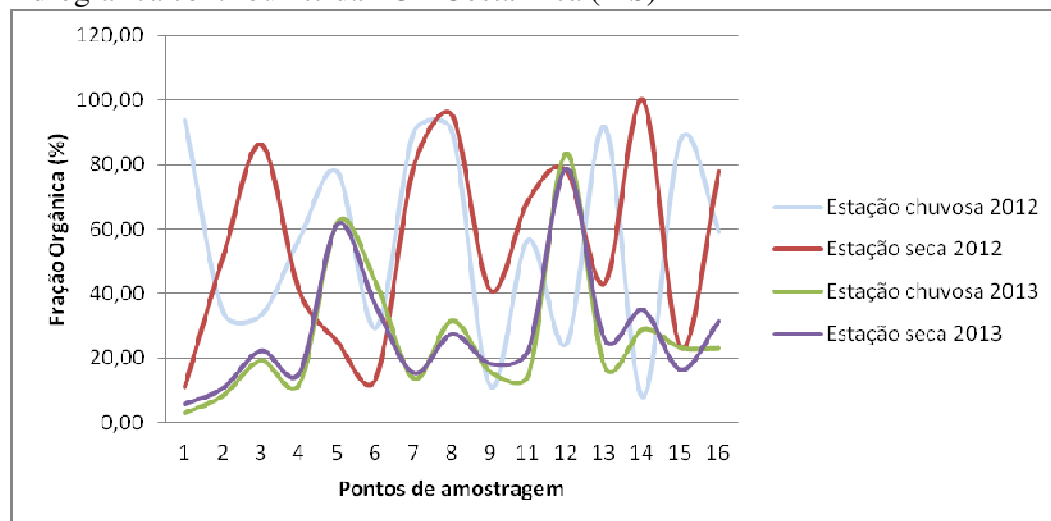
Ponto de Amostragem	Fração Orgânica (%)			
	Ano 2012		Ano 2013	
	Estação chuvosa	Estação seca	Estação chuvosa	Estação seca
1	94,00	11,11	3,20	5,80
2	34,40	51,43	8,60	10,70
3	33,50	86,21	19,40	22,30
4	57,30	40,74	12,10	15,40
5	77,80	25,00	62,10	61,40
6	29,50	13,64	43,60	36,20
7	90,40	79,55	13,80	15,40
8	90,50	95,35	31,70	27,40
9	11,60	41,18	16,00	18,30
11	56,90	68,97	14,90	22,50
12	24,70	78,05	83,30	78,60
13	92,00	43,14	17,60	25,80
14	8,20	100,00	29,00	34,90
15	88,00	23,33	23,40	16,40
16	59,40	77,88	23,20	31,40

* Excluíram-se os pontos 10 e 17, devido à ausência de análises nos dois anos, o que impossibilitou a comparação dos resultados.

Fonte: Trannin (2013).

Na Figura 67 foi possível observar que em 2013 as frações orgânicas obtidas nos diferentes pontos de amostragem apresentaram comportamento semelhante nas estações chuvosa e seca, diferindo apenas na amplitude dos resultados obtidos. No ano de 2012, não ocorreu uma similaridade dos dados obtidos ao longo de todos os pontos amostrados e das estações do ano. Pode-se observar que nos pontos 2, 3, 11, 12, 13, 14 e 16 houve um aumento da fração orgânica em relação à fração mineral no período de seca, ocorrendo o inverso no período chuvoso. Este comportamento pode ter ocorrido devido ao uso agrícola com elevada mecanização do solo nesta bacia, aliado a uma menor vazão dos cursos hídricos no período de inverno, com a consequente redução de sedimentos grosseiros em suspensão, o que também foi verificado na análise granulométrica dos sedimentos em suspensão neste período.

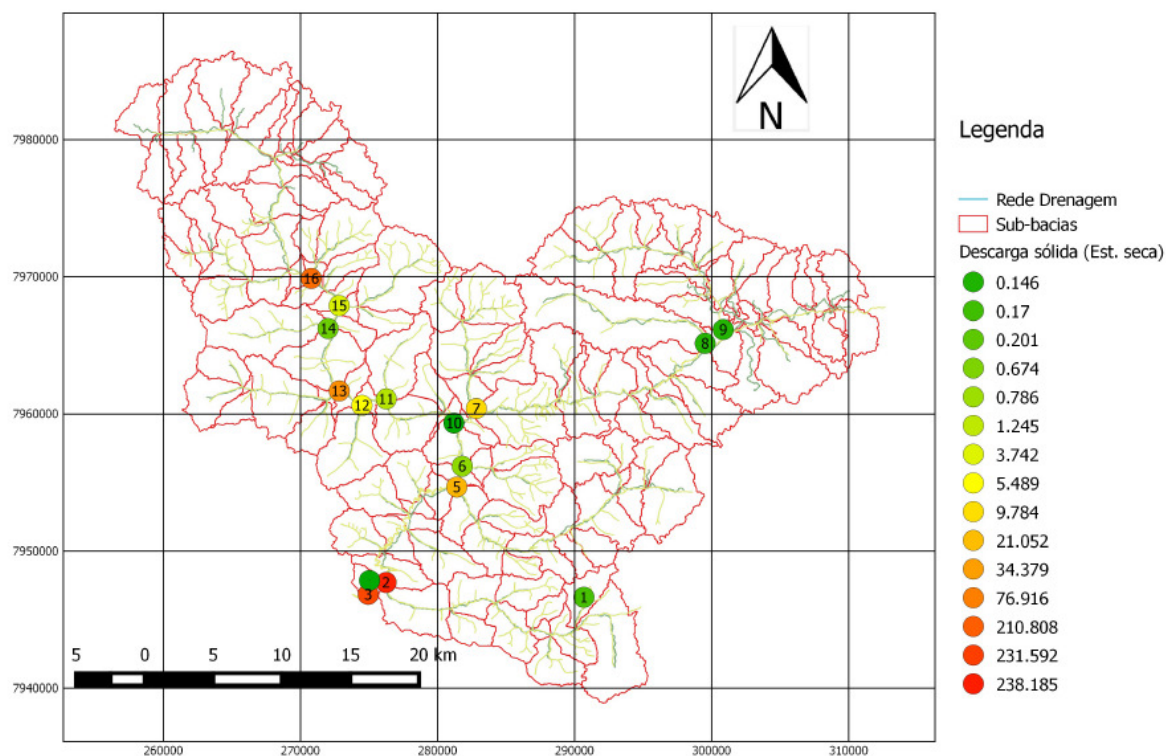
Figura 67 - Fração orgânica dos sedimentos em suspensão, presente nos pontos amostrados na bacia hidrográfica contribuinte da PCH Costa Rica (MS)



Fonte. Trannin (2013).

A coleta e interpretação sistemática de dados hidrossedimentológicos nas estações chuvosa e seca dos anos de 2012 e 2013 permitiram uma quantificação amostral dos impactos causados pela erosão dos solos, com a identificação dos pontos que mais contribuem para o assoreamento dos cursos d'água da bacia hidrográfica do Alto Rio Sucuriú e que, conseqüentemente, afetam o desempenho da PCH Costa Rica (Figuras 68 e 69).

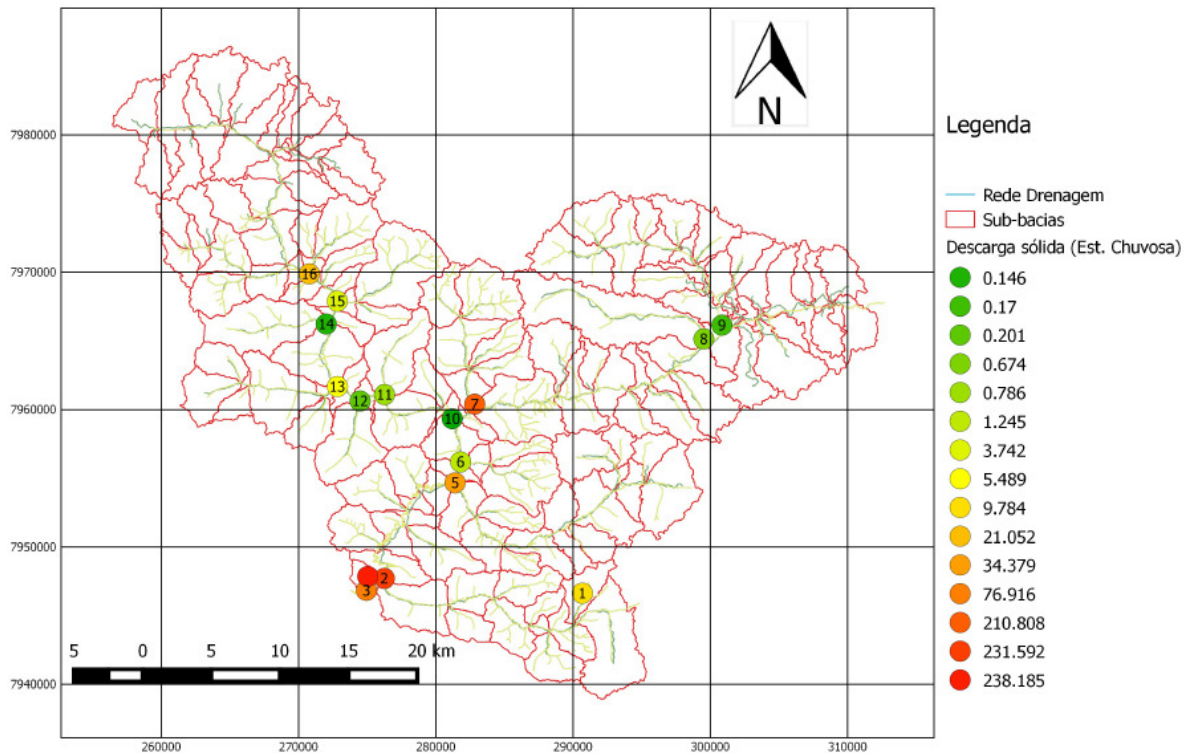
Figura 68 - Descarga sólida total em Mg dia^{-1} na bacia contribuinte da PCH Costa Rica correspondente à estação seca.



Fonte. Elaborado pelo Autor.

A deposição de sedimentos e o consequente assoreamento do reservatório foram evidenciados pela presença de frações mais finas como silte e argila na composição granulométrica dos sedimentos de fundo, na região de redução na velocidade de escoamento, próxima ao reservatório da PCH Costa Rica, comumente chamada de zona de formação de remansos.

Figura 69 - Descarga sólida total em Mg dia^{-1} na bacia contribuinte da PCH Costa Rica correspondente à estação chuvosa.



Fonte. Elaborado pelo Autor.

O monitoramento do comportamento hidrossedimentológico da bacia do Alto Rio Sucuriú identifica alguns dos fatores que influenciam no assoreamento da PCH Costa Rica, destacando-se as elevadas precipitações pluviométricas, a fragilidade dos solos e o uso e ocupação do solo por atividades agropecuárias, principalmente pelas monoculturas de soja e algodão.

A grande proporção de areia, presente nos sólidos em suspensão e o maior teor de matéria orgânica, encontrado na estação chuvosa, evidenciam a grande quantidade de solo exposto pelas atividades agrícolas desenvolvidas na bacia contribuinte da PCH Costa Rica, e indica que são necessárias medidas mitigatórias para que o assoreamento não prejudique o desempenho dessa PCH na produção de energia, e não afete a produtividade agrícola, destacando-se a necessidade de medidas estruturais e não estruturais, com observação à legislação ambiental de uso do solo, orientação aos proprietários rurais na adoção de medidas conservacionistas e na manutenção das matas ciliares, por meio da recomposição vegetal.

O volume derivado dos 1.049.521,72 Mg ano⁻¹ (704.377m³) de sedimentos equivale a 117.396 caminhões de sedimentos, que saem anualmente da bacia do Alto Rio Sucuriú, em uma lâmina de solo com altura de 0,0566 mm. Por outro lado, a maior voçoroca da bacia do Alto Rio Sucuriú produziu ao longo de aproximadamente 50 anos, o volume de 2.271.682,51m³ de sedimentos, o equivalente a 6,47% de sedimentos gerados anualmente do apurado pelo modelo para toda a bacia, o que corresponde a 5729,9 Mg ha⁻¹ ano⁻¹, sendo 679,60 vezes maior que a média da bacia (8,43 Mg ha⁻¹ ano⁻¹). Esse resultado evidencia a gravidade da formação de voçorocas para a produção de sedimentos e danos ambientais causados pelo assoreamento de rios e reservatórios, com impacto direto sobre a produção energética da PCH Costa Rica.

Dos resultados obtidos da análise dos aspectos geotécnicos e geomorfológicos associados à pedologia da bacia contribuinte da PCH Costa Rica, observou-se que 69,86% da área em estudo apresentam condições naturais de alto potencial erosivo e de produção de sedimentos, o que por si é um resultado bastante representativo dos problemas operacionais enfrentados na manutenção da PCH.

A faixa de terras correspondente simultaneamente à classe de solo Neossolo Litólico, Degraus estruturais, Bordas erosivas e Frentes erosivas de alto potencial de movimentos naturais de massa e portadoras de escarpas sujeitas a desprendimento de blocos, apesar de concentrar a maior dinâmica de modificação do terreno, aparentemente, não explica a totalidade do potencial de produção de sedimentos, considerando que a área correspondente é de 118,34km² ou 9,23% da bacia. No entanto, sua associação com a classe simultânea de Latossolo Vermelho distrófico, planaltos com predomínio de espessos pacotes de arenito em deposição mista, chapadas e platôs, e o predomínio de solos arenosos finos ou areno-silto-argilosos de alto potencial erosivo, se submetidos à concentração das águas das chuvas e com relevo favorável a formação de processos erosivos pela ação das águas pluviais e pelo vento, cuja área corresponde a 777,63km² ou 60,63% do total, auxilia na compreensão dos processos atuantes na bacia, pois totalizam mais de dois terços da área estudada, em condições críticas de produção de sedimentos.

Nesse sentido, os dados obtidos na bacia à montante da PCH Costa Rica demonstraram uma grande vulnerabilidade em relação à produção de sedimentos, o que pode ser observado na região, principalmente pela presença de grandes voçorocas. Os dados obtidos nesse estudo demonstram a dimensão regional do problema, uma vez que se trata de uma bacia com

aproximadamente 1.200km² de área, e uma crescente alteração antrópica no uso do solo, com substituição de áreas para cultivo de commodities em sistema Plantation, ocupando grandes áreas com alto grau de mecanização e, conseqüentemente, aumento dos processos erosivos.

Em suma, as condições locais à montante da PCH Costa Rica são de alto potencial de produção de sedimentos, e na ocorrência de um evento extremo de chuvas concentradas, poderá provocar grandes transtornos ao conjunto gerador, podendo inclusive promover a paralisação do empreendimento e causar grandes prejuízos.

Foi possível observar que existe uma vulnerabilidade natural relacionada à geologia, pedologia e a geomorfologia que condiciona o surgimento dos processos erosivos intensos no município de Costa Rica. Além da vulnerabilidade natural, o uso e ocupação do solo em Costa Rica pela agricultura intensiva, agrava a perda de solo por processos erosivos e, conseqüentemente, aumenta a produção de sedimentos que assoreiam os rios e o reservatório da PCH. As condições observadas apontam sérias implicações ao uso desse curso d'água para fins de geração de energia, a deposição de material é de tal magnitude que mesmo com intervenções mecânicas em tempo integral, a formação de banco de sedimentos exerce pressão constante ao aproveitamento, conforme se observa na Figura 70.

Figura 70 - Recorte de Imagem orbital disponibilizada no GoogleEarth, de 2014, onde nota-se novamente a formação de um grande banco de sedimentos imediatamente à montante da planta geradora



Fonte. Visualização direta na versão livre do Google Earth.

6. CONCLUSÕES

A modelagem pelo SWAT e o uso de geotecnologias foi eficiente na avaliação e quantificação do potencial de perdas de solo e de contribuição para o assoreamento de reservatórios de hidrelétricas, mesmo em cenário de escassez de dados de séries históricas.

O diagnóstico da bacia hidrográfica contribuinte da PCH Costa Rica evidenciou a vulnerabilidade natural do meio físico aos processos erosivos laminares e lineares, relacionada à geologia, geomorfologia, pedologia e uso do solo, sendo esta a principal causa do assoreamento dos cursos d'água e de seus efeitos sobre o desempenho desta hidrelétrica na produção de energia, com valores médios que variaram entre 0,6 a 3,7 Mg ha⁻¹ mês⁻¹ no período de 1984 a 2011.

A avaliação das mudanças no uso do solo entre os anos de 1984 e 2011 demonstrou que além da vulnerabilidade natural do meio físico, a remoção da vegetação de Cerrado para uso agropecuário, sem a adoção de práticas conservacionistas, intensificou os processos erosivos nas últimas décadas, comprometendo o desempenho da PCH Costa Rica na produção de energia.

A utilização do SWAT para a modelagem da bacia apresentou nos valores dos dados simulados e observados uma correlação ou momento de Pearson forte e positiva (acima de 0,6) e moderada positiva (entre 0,3 e 0,6) para calibração e validação respectivamente, o que permite utilizar os dados quantitativos de sedimentos gerados na bacia.

7. RECOMENDACOES

Como recomendações pode se afirmar que, para que os processos erosivos intensos sejam controlados é necessária a adoção de medidas mitigatórias, de modo que estas bacias se mantenham produtivas e ao mesmo tempo preservadas ambientalmente, sendo imprescindível a fiscalização efetiva dos órgãos públicos competentes para que o Código Florestal (Lei 12.651/2012) seja respeitado, o que contribuirá diretamente com a recuperação do ambiente, para a produção de alimentos e geração de energia elétrica (pela PCH Costa Rica, por exemplo). Além disso, é prioritária a implementação de políticas públicas de conservação do solo e da água, e de recuperação ambiental, para controlar a degradação atual desta bacia.

As ferramentas de modelagem se baseiam em dados existentes para calibração e validação e somente após essas fases podem trabalhar diferentes cenários ambientais, assim, teremos ainda um grande desafio para a utilização efetiva do SWAT como ferramenta para predição de cenários em bacias hidrográficas no Brasil, visto que há uma grande carência de dados de séries históricas consistidas, necessárias a qualquer tipo de modelagem ambiental, todavia, trata-se de uma ferramenta extremamente promissora, e para tanto, serão necessários esforços governamentais no sentido de valorizar as atividades de coleta e sistematização de dados de séries históricas.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABBASPOUR K. C.; VEJDANI M.; HAGHIGHAT S. SWAT-CUP calibration and uncertainty programs for SWAT. In **Proceedings** Intl. Congress on Modelling and Simulation (MODSIM'07), 1603-1609. L. Oxley and D. Kulasiri, eds. Melbourne, Australia: Modelling and Simulation Society of Australia and New Zealand. 2007.

ALMEIDA, R. A.; ARAÚJO, G. H. S.; GUERRA, A. J. T. **Gestão Ambiental de Áreas Degradadas**. 2 ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2007. 320p.

ALMENDINGER, J.E.; MURPHY, M.S.; ULRICH J.S.. Use of the Soil and Water Assessment Tool to scale sediment delivery from field to watershed in an agricultural landscape with topographic depressions. **J. Environ. Qual.** 43:9–17 (this issue). doi:10.2134/jeq2011.0340. 2014.

ARAGÃO, L.E. et al. Utilização de técnicas de classificação digital de imagens Landsat TM-5 na identificação de áreas florestais afetadas pela extração seletiva de madeira: parte baixa do Rio Capim, PA. In: X Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. Foz do Iguaçu, PR, 21-26 abr, 2001. **Anais...São José dos Campos: INPE**, 2001, p. 1509-1512. [INPE-8244-PRE/4033].

ARAUJO, M. L. M. N; Impactos Ambientais nas margens do Rio Piancó causados pela agropecuária. **Revista brasileira de gestão ambiental**. v.4, n.1, 2010. 20 p.

ARNOLD, J. G., ALLEN, P. M. A comprehensive surface ground water flow model. **J. Hydrol.** 142 (1-4): 47-69. 1993.

ARNOLD, J. G. Regional estimation of base flow and groundwater recharge in the upper Mississippi basin. **J. Hydrol.** 227: 21-40. 2000.

ARNOLD, J. G., WILLIAMS, J. R. Validation of SWRRB: Simulator for water resources in rural basins. **J. Water Resour. Plan. Manage.** ASCE 113(2): 243-256. 1987.

ARNOLD, J.G. & FOHRER, N. SWAT 2000: Current capabilities and research opportunities in applied watershed modeling. **Hydrol. Process**, 9:563-572, 2005.

ASTHANA, B.N.; NIGAM, P.S.. Distribution of Sediment in Reservoirs. **Journal of the Institute of Engineers** (India), v. 60. 1980.

BALDISSERA, GISELE C. **Aplicabilidade do modelo de simulação hidrológica SWAT (Soil and Water Assessment Tool), para a bacia hidrográfica do Rio Cuiabá/MT**. Cuiabá

- MT. Dissertação (mestrado em Física e Meio Ambiente). Universidade Federal do Mato Grosso. 2005.

BARBEDO, A.G.A. **Estudo Hidrossedimentológico na Bacia do Alto Paraguai – Pantanal**. 2003. 107f. Dissertação (Mestrado em Saneamento Ambiental e Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Campo Grande, 2003.

BARROSO, D.G.; SILVA, M.L.N. **Poluição e conservação dos recursos naturais: solo e água**. Informe agropecuário, v.176, n.16, p. 17-24. 1992.

BEESON, P.C. et al. Sediment delivery estimates in water quality models altered by resolution and source of topographic data. **J. Environ. Qual.** 43:26–36 (this issue).doi:10.2134/jeq2012.0148. 2014.

BERMANN, C. Impasses e controvérsias da hidroeletricidade. **Estudos Avançados**, v. 21, p. 139-153. 2007.

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

BHUYAN, S. J. et al. Soil loss predictions with three erosion simulation models. **Environmental Modeling & Software**, 17, p. 137-146. 2002.

BIEGER, K., G. HORMANN, N. FOHRER. Simulation of streamflow and sediment with the Soil and Water Assessment Tool model in a data scarce catchment in the Three Gorges Region, China. **J. Environ. Qual.** 43:37–45 (this issue). doi:10.2134/jeq2011.0383. 2014.

BIEHL, L. AND DAVID LANDGREBE, "MultiSpec - A Tool for Multispectral-Hyperspectral Image Data Analysis," **Proceedings**. 13th Pecora Symposium, Sioux Falls, SD, August 20-22, 1996.

BONUMA, N.B. et al. Simulating landscape sediment transport capacity by using a modified SWAT model. **J. Environ. Qual.** 43:55–66 (this issue) .doi:10.2134/jeq2012.0217. 2014.

BORAH, D. K., BERA, M. Watershed scale hydrologic and nonpoint source pollution models: Review of mathematical bases. **Trans. ASABE** 46(6): 1553-1566. 2003.

BORAH, D. K., G. et al. Sediment and nutrient modeling for TMDL development and implementation. **Trans. ASABE** 49(4): 967-986. 2006.

BORGONOV, M.; CHIARINI, J.V. Cobertura vegetal do Estado de São Paulo I – Levantamento por fotointerpretação das áreas cobertas com cerrado, cerradão e campo, em 1962. **Bragantia**, São Paulo. 14:159- 179. 1965.

BOURAOUI, F. et al. Application of the SWAT model on the Medjerda River Basin (Tunisia). **PHYS. CHEM. EARTH** 30(8-10): 497-507. 2005.

BRASIL. ANEEL Agência Nacional de Energia Elétrica, 2001, **Atlas de Energia do Brasil**. Disponível em: http://www.aneel.gov.br/visualizar_texto.cfm?idtxt=1689, Acesso em 22 mar. de 2013.

BRASIL. ANEEL Agência Nacional de Energia Elétrica, 2001, **HidroWeb – Sistema de Informações Hidrológicas**. Disponível em: <http://hidroweb.aneel.gov.br> , Acesso em fevereiro de 2013.

BRASIL. Empresa de Pesquisa Energética. **Balanco Energético Nacional 2013 – Ano base 2012: Relatório Síntese Rio de Janeiro**: EPE, 55 p. 2013.

BRASIL. IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censo 2010**. Fornecido em meio eletrônico: [www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/censo2010/] Acesso em 21 abr. 2014.

BRASIL. Lei Nº 4.771, de 15 de setembro de 1965. **Institui o novo Código Florestal**, 1965.

BROWN, L. C., BARNWELL, T. O. JR. **The enhanced water quality models QUAL2E and QUAL2E-UNCAS: Documentation and user manual**. EPA document EPA/600/3-87/007. Athens, Ga.: USEPA. 1987.

BRUNE, G.M; ALLEN, R.E. **A consideration of factor influencing reservoir sedimentation**. In: The Ohio Valley Region. American Geophysical Union. v.2. 1941.

CABRAL, J. B. P. **Análise da sedimentação e aplicação de métodos de previsão para tomada de medidas mitigadoras quanto ao processo de assoreamento no reservatório de Cachoeira Dourada – GO/MG**. Tese (Doutorado em Geologia Ambiental) – Setor de Ciências da Terra da Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006.

CÂMARA, G. et al. SPRING: Integrating remote sensing and GIS by objectoriented data modeling. **Computers & Graphics**, v.20, n. 3, p. 395-403, 1996.

CAMARGO, P. B; SCHULZ, H. D; SILVA, A. M. **Erosão e Hidrossedimentologia em Bacias Hidrográficas**. São Carlos: RiMa, 2003. 140 p.

CAMPAGNOLI, F. Impactos sociais e econômicos da dinâmica sedimentar nos reservatórios hidrelétricos brasileiros. XVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS. JOÃO PESSOA/PB. **Anais**. ABRH. 2005.

CAMPAGNOLI, F. The production of the sediment from South American: propose of mapping of the erosion rates based on geological and geomorphological aspects. **Revista Brasileira de Geomorfologia**. Uberlândia: UFU. ano 7, n.1, , p. 3-8. 2006.

CARVALHO, N. O. **Hidrossedimentologia Prática**. 2 Ed., ver., atual. e ampliada. Rio de Janeiro: Interciência, 2008.

CARVALHO, N.O. Assoreamento de reservatórios – conseqüências e mitigação dos efeitos. In: IV Encontro Nacional de engenharia de Sedimentos. **Anais**. Santa Maria-RS. Cdrom. 1-22p. 2000.

CARVALHO, N.O.; CATHARINO, M.G. Avaliação do reservatório da UHE Itaipu, PR. In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 10.; Simpósio de Recursos Hídricos do Cone Sul, 1., São Paulo: Associação Brasileira dos Recursos Hídricos. **Anais**. p. 174- 183. . 1993.

CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia**. 2ª edição. São Paulo: Edgard Blücher, 1980. 188p.

COIADO, E.M. **Assoreamento de Reservatórios**. In: PAIVA J.B.D; PAIVA E.M.C.D (Orgs.). Hidrologia Aplicada à Gestão de Pequenas Bacias Hidrográficas. Porto Alegre: ABRH. p. 395-426. 2001.

DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA - DAEE. **Controle de erosão: bases conceituais e técnicas; diretrizes para planejamento urbano e regional; orientações para controle de voçorocas urbanas**. São Paulo 1989. 92p. In: MACHADO R. L. Perdas de solo e nutrientes em voçorocas com 93 diferentes níveis de controle e recuperação no Médio Vale do Rio Paraíba do Sul, RJ. Dissertação de mestrado, RJ. 2007.

DILE, Y. T., R. SRINIVASAN, 2014. Evaluation of CFSR climate data for hydrologic prediction in data-scarce watersheds: an application in the Blue Nile River Basin. **Journal of the American Water Resources Association (JAWRA)** 1-16. DOI: 10.1111/jawr.12182

DILL, P.R.J. **Assoreamento do Reservatório do Vacacaí-Mirim e sua relação com a deterioração da Bacia Hidrográfica contribuinte**. 2002. 108f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil – Área de Concentração em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Universidade Federal de Santa Maria, 2002.

EMBRAPA. **Boas práticas agrícolas para as áreas de nascentes do Rio Araguaia-GO/MT: Controle de Processos Erosivos e Aplicação Otimizada de Defensivos Agrícolas**. [s.n], 2003. 6 p.

FAO/UNESCO. Digital Soil Map of the World and Derived Soil Properties. Rev. 1. (CD Rom), 2003. Available from http://www.fao.org/catalog/what_new-e.htm . Acesso em 29 ago. 2014.

GALDINO, S. et al.. **Perdas de solo na bacia do alto Taquari**. Corumbá: Embrapa Pantanal, 40 p.(Embrapa Pantanal. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 44). 2003.

GARBRECHT, J. L. MARTZ , W. "The Assignment of Drainage Direction Over Flat Surfaces in Raster Digital Elevation Models," **Journal of Hydrology**, 193: 204-213. 1997.

GASSMAN, P.W et al. The Soil and Water Assessment Tool: Historical development, applications, and future directions. **Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineers (Invited Paper Series)** 50(4): 1211-1250. 2007.

GEORGE, C.;LEON, L.F. WaterBase: SWAT in an open source GIS. **The Open Hydrology Journal**, 2007.

GLYMPH, L.M. (1973). Sedimentation of Reservoirs. In: ACKERMANN, W.C. et al., ed. Man-made lakes: their problems and environmental. Washington DC: **American Geophysical Union**. p. 342-346.

GOLDSMITH, E.; HILDYARD, N.. **The Social and environmental effects of large dams**. San Francisco: Sierra Club Books. 1984.

GRAÇA, P. M. L. A. et al. Desenvolvimento metodológico para detecção e mapeamento de áreas florestais sob exploração madeireira: estudo de caso, região norte do Mato Grosso. In: XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. Goiânia, GO, 16-21 abr, 2005. **Anais...**São José dos Campos: INPE, 2005, p.1555-1562. [INPE-12649-PRE/7941].

GREEN, W. H.; AMPT G. A. Studies on soil physics: 1. The flow of air and water through soils. **J. Agric. Sci.** 4: 11-24. 1911.

GUERRA, A. T. **Dicionário Geológico-Geomorfológico**. 6ª edição. Rio de Janeiro:IBGE, 1978. 448p.

INFANTI, J.N.; FORNASARI, F.N. **Processos de dinâmica superficial**. In:Geologia de Engenharia. São Paulo: ABGE, p. 131-152. 1998.

IZAURREALDE, R. C. et al. Simulating soil C dynamics with EPIC: Model description and testing against long term data. **Ecol. Model.** 192(3-4): 362-384. 2006.

JHA, M. et al. Climate change sensitivity assessment on upper Mississippi river basin stream flows using SWAT. **J. American Water Resource. Assoc.** 42(4): 997-1015. 2006.

KNISEL, W. G. **CREAMS, a field scale model for chemicals, runoff, and erosion from agricultural management systems.** USDA Conservation Research Report No. 26. Washington, D.C.: USDA. 1980.

KRONKA, F.J.N, et al. **Áreas de domínio do cerrado no Estado de São Paulo.** São Paulo: Instituto Florestal. 84p. 1998.

KRONKA, F.J.N, et al. **Inventário florestal do Estado de São Paulo.** Instituto Florestal. São Paulo. 199p. 1993.

KUWAJIMA, J.I. **Análise do modelo SWAT como ferramentas de prevenção e de estimativa de assoreamento no reservatório do Lobo (Itirapina/Brotas/SP).** 2012. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

LANE, E.W. (1955). The Importance of Fluvial Morphology in Hydraulic Engineering. American Society of Civil Engineering, **Proceedings**, 81, paper 745: p. 1-17.

LELIS, T. A.; CALIJURI, M. L. A. Modelagem hidrossedimentológica de bacia hidrográfica na região sudeste do Brasil, utilizando o SWAT. **Ambi-Agua**, Taubaté, v. 5, n. 2, p. 158-174, 2010.

LEONARD, R. A., KNISEL, W. G., STILL, D. A. GLEAMS: Groundwater loading effects of agricultural management systems. *Trans. ASABE* 30(5): 1403-1418.

LIERSCH, S. **The program pcpSTAT: User's Manual.** 2003. Disponível em: www.swat.tamu.edu/software/swat-model. Acesso em 20 jan. 2013.

LU, S., N. et al. Multiobjective calibration for comparing channel sediment routing models in the Soil and Water Assessment Tool. **J. Environ. Qual.** 43:110–120 (this issue). doi:10.2134/jeq2011.0364. 2014.

MACHADO, R.E.; VETTORAZZI, C.A. Simulação da produção de sedimentos para a microbacia hidrográfica do ribeirão dos Marins, SP. **R. Bras. Ci. Solo**, 4:735-741, 2003.

MAGALHÃES, R.A. Erosão: Definições, tipos e formas de controle. In: VII Simpósio Nacional de Controle de Erosão, **Anais**. Goiânia, 2011.

MAHMOOD, K. Reservoir sedimentation – impact, extent and mitigation. **World Bank Tech.** Paper N°. 71. Washington, DC. 1987.

MAIA, A.G. **As conseqüências do assoreamento na operação de reservatórios formados por barragens.** Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 273 p. 2006.

MATO GROSSO DO SUL. **Atlas Multirreferencial do Estado do Mato Grosso do Sul.** Secretaria de Planejamento e Coordenação Geral. Convênio do Estado\Fundação IBGE, 1990.

MATO GROSSO DO SUL. Secretaria de Estado de Planejamento e de Ciência e Tecnologia. **Susceptibilidade à erosão da macrorregião da Bacia do Paraná.** Campo Grande: SEPLAN; Brasília: IBGE, 1992. 277 p.il., anexo 1 mapa.

MAUSBACH, M. J., AND A. R. DEDRICK. The length we go: Measuring environmental benefits of conservation practices. **J.Soil Water Cons.** 59(5): 96A-103A. 2004.

MCCULLY, P. **Ríos silenciados. Ecología y política de las grandes represas.** Argentina: Proteger Ediciones, 450 p. 2001.

MIRANDA, R. B. **A influência do assoreamento na geração de energia hidrelétrica: Estudo de caso na Usina Hidrelétrica de Três Irmãos – SP.** (Dissertação de Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011. 117 p.

MONTEITH, J. L. Evaporation and the environment. In *The State and Movement of Water in Living Organisms*, **Proceedings**. 19th Symp. Swansea, U.K.: Society of Experimental Biology, Cambridge University Press. 1965.

MULLER, A.C. **Hidrelétricas, Meio Ambiente e Desenvolvimento.** Makron Books. São Paulo. 412 p. 1995.

NEITSCH, S. L et al. **Soil and Water Assessment Tool: input/output file documentation.** Texas: Soil And Water Research Laboratory & Blackland Research Center, 2004

NEITSCH, S.L. et al.. 2005. **Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation Version 2005.** Grassland, Soil and Water Research Laboratory; Agricultural Research Service; USA. 2005.

ODRESKI, L. L. R. **Evolução sedimentar e batimétrica da baía de Antonina - PR.** 79 f. Dissertação (Mestrado em Geologia Ambiental) – Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2002.

PAIVA, E. M. C. D.; PAIVA, J. B. D.; REINERT, D. J. Estimativa do assoreamento do reservatório do DNOS, em Santa Maria, RS. In: **Anais**. XVII Congresso Nacional Del Água, II Simpósio de Recursos Hídricos Del Conosur, Santa Fé – Argentina. 1998.

PAULA, E. V. **Análise da Produção de Sedimentos na Área de Drenagem da Baía de Antonina/PR uma abordagem geopedológica**. (Tese de Doutorado) Universidade Federal do Paraná, 2010. 220p.

PIMAN, T. et al. Assessment of Flow Changes from Hydropower Development and Operations in Sekong, Sesan, and Srepok Rivers of the Mekong Basin. **J. Water Resour. Plann. Manage.** 139(6), 723–732. 2013.

PRIESTLY, C. H. B.; TAYLOR, R. J. **On the assessment of surface heat flux and evaporation using large scale parameters**. Monthly Weather Rev. 100(2): 81-92. 1972.

RALLISON, R. E.; MILLER, N. **Past, present and future SCS runoff procedure**. In Rainfall Runoff Relationship, 353-364, ed. V.P. Singh. Littleton, Colo: Water Resources Publication. 1981.

ROSS, J. L. S. **Geomorfologia: Meio Ambiente e Planejamento**. 7.ed. São Paulo: Contexto, 2003. 85p.

SANTHI, C. et al.. An integrated modeling approach for estimating the water quality benefits of conservation practices at river basin scale. **J. Environ. Qual.** 43:177–198 (this issue). doi:10.2134/jeq2011.0460. 2014.

SANTOS, I. et al. **Use of the SWAT model to evaluate the impact of different land use scenarios on discharge and sediment transport in the Apucarantina River watershed, southern Brazil**. In: BANASIK, K. et al. (Org.). **Sediment Dynamics for a Changing Future**. 1ª ed. Wallingford: IAHS Press n° 337, vol. 1, Cap. 42, p. 322-328. 2010.

SANTOS, I. et al. **Desenvolvimento de modelo de avaliação da qualidade de água e transporte de sedimentos para pequenas e médias centrais elétricas: modelagem da erosão e transporte de sedimentos**. Curitiba/PR. Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (LACTEC), 2005.

SANTOS, J.R. et al. Dados multitemporais TM/Landsat aplicados ao estudo da dinâmica de exploração madeireira na Amazônia In: X Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. Foz do Iguaçu, PR, 21-26 abr, 2001. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2001, p. 1751-1755. [INPE-8219-PRE/4008].

SCHERER, C.M.S. **Análise estratigráfica e litofaciológica da Formação Botucatu (Neocomiano) no Estado do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, RS.** Tese de Doutorado. Instituto de Geociências – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 208 p. 1998.

SERRA FILHO, R. et al. **Levantamento da cobertura vegetal natural e do reflorestamento no Estado de São Paulo.** Boletim Técnico do Instituto Florestal. São Paulo. 11:1-56. 1974.

SHEPHERD, B., D. HARPER, MILLINGTON A. Modelling catchment scale nutrient transport to watercourses in the U.K. **Hydrobiologia** 395-396: 227-237. 1999.

SRINIVASAN, R. et al. Large area hydrologic modeling and assessment: Part II. Model application. **J. American Water Resour. Assoc.** 34(1): 91-102. 1998.

SUGUIO, K.; BARCELOS, J.H. Paleoclimatic evidence from the Areado Formation, Cretaceous, of the São Francisco Basin, state of Minas Gerais. **Rev. Bras. Geoc.** 13(4):232-236. 1983.

TARBOTON, D. **TAUDEM: Terrain Analysis Using Digital Elevation Models. ArcGIS Extension. Versão 5.1.** Utah State University. 2010. On-line. Disponível em: <http://hydrology.usu.edu/taudem/taudem5/downloads.html>. Acesso em: 01 nov. 2012.

TRANNIN, I. C. B. et al. **Reabilitação de voçorocas para a contenção do assoreamento e melhoria do desempenho de reservatórios na produção de energia elétrica.** Projeto P&D ANNEL/EDP-ENERPEIXE 2011-2013.

VALERIANO, M. M.; ROSSETTI, D. F.; ALBUQUERQUE, P. C. G. Topodata: desenvolvimento da primeira versão do banco de dados geomorfométricos locais em cobertura nacional. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2009, Natal, RN. **Anais...**, São José dos Campos, SP : INPE, 2009. v. CD-ROM. p. 1-8.

VANONI, V.A. **Sedimentation Engineering.** American Society of Civil Engineers. New York. 1977.

VÖRÖSMARTY, C. J. et al. The Potential Impact of Neo-Cartorization on Sediment Transport by the Global Network of Rivers. In **Proceedings.** Fifth IAHS Scientific Assembly at Rabat, Morocco, April-May 1997, eds. 1997.

WCD (WORLD COMMISSION OF DAMS). 2000. **Dams and Development: A New Framework for Decision-Making.** London: Earthscan. 2000.

WHITE, M.J. et al. SWAT check: A screening tool to assist users in the identification of potential model application problems. **J. Environ. Qual.** 43:208–214 (this issue). doi:10.2134/jeq2012.0039. 2014.

WILLIAMS, J.R., H.D. BERNDT. Sediment yield prediction based on watershed hydrology. **Trans. ASAE** 20:1100–1104. doi:10.13031/2013.35710. 1977.

WISCHMEIER, W.H., D.D. SMITH. 1978. **Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning.** USDA Agric. Hndbk. 537. USDA, Washington, DC. <http://eprints.icrisat.ac.in/7401/> Acesso 28 abr. 2013.

WORLD WATER ASSESSMENT PROGRAMME. 2009. **The United Nations World Water Development Report 3: Water in a Changing World.** Paris: UNESCO Publishing, and London:Earthscan. 2009.

ZABALETA, A. et al. Simulation climate change impact on runoff and sediment yield in a small watershed in the Basque Country, northern Spain. **J. Environ. Qual.** 43:235–245 (this issue). doi:10.2134/jeq2012.0209. 2014.