



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ – UEM
CENTRO DE CIÊNCIAS HUMANAS, LETRAS E ARTES
DEPARTAMENTO DE GEOGRAFIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA – DOUTORADO EM
GEOGRAFIA**

**MODELAGENS HIDROLÓGICAS APLICADAS À ANÁLISE DO ESCOAMENTO
SUPERFICIAL DA BACIA DO RIO IVAÍ-PR**

ORDILEI APARECIDO GASPAR DE MELO

Orientador: Prof. Dr. Manoel Luiz dos Santos

TESE DE DOUTORADO

**MARINGÁ - PR
2017**

ORDILEI APARECIDO GASPAR DE MELO

**MODELAGENS HIDROLÓGICAS APLICADAS À ANÁLISE DO ESCOAMENTO
SUPERFICIAL DA BACIA DO RIO IVAÍ-PR**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geografia “Doutorado” área de concentração: Análise Regional e Ambiental, do Departamento de Geografia da Universidade Estadual de Maringá, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Geografia.

Orientador: Prof. Dr. Manoel Luiz dos Santos.

**MARINGÁ - PR
2017**

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
Ficha catalográfica elaborada por Rosângela A. A. Silva – CRB 9ª/1810

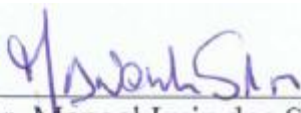
M485c	<p>Melo, Ordilei Aparecido Gaspar de. Modelagens Hidrológicas Aplicadas a Análise do Escoamento Superficial da Bacia do Rio Ivaí-PR / Ordilei Aparecido Gaspar de Melo. — Maringá, 2017. 119f.: il. color., figs., tabs. quadros</p> <p>Orientador: Prof. Dr. Manoel Luiz dos Santos</p> <p>Tese (Doutorado) – Universidade Estadual de Maringá, Centro de Ciências Humanas, Letras e Artes Programa de Pós-Graduação em Geografia, 2017. Bibliografia</p> <p>1. Solos - Bacia do Rio Ivaí, PR. 2. Escoamento superficial. 3. Modelos hidrológicos. 4. Equação de Kirkby. 5. Modelo SWAT. I. Santos, Manoel Luiz dos, orient. II. Universidade Estadual de Maringá. Programa de Pós-Graduação em Geografia. III. Título.</p> <p>CDD 20.ed. 910.91693 551.483</p>
-------	--

MODELAGENS HIDROLÓGICAS APLICADAS À ANÁLISE DO ESCOAMENTO
SUPERFICIAL DA BACIA DO RIO IVAÍ – PR

Tese de Doutorado apresentada a Universidade Estadual de Maringá, como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor em Geografia, área de concentração: Análise Regional e Ambiental, linha de pesquisa Análise Ambiental.

Aprovada em **20 de abril de 2017**.

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Manoel Luiz dos Santos
Orientador - UEM



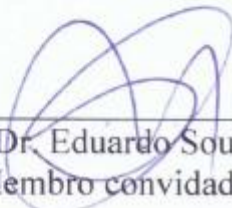
Prof. Dr. Ericson Hideki Hayakawa
Coorientador - UNIOESTE



Prof. Dr. Nelson Douhi
Membro convidado - UEMOP



Prof. Dr. Hélio Silveira
Membro convidado - UEM



Prof. Dr. Eduardo Souza de Moraes
Membro convidado - UEM

AGRADECIMENTOS

Ao Grupo de Estudos Multidisciplinares do Ambiente (GEMA) por disponibilizar seus laboratórios e equipamentos necessários para realização da pesquisa.

A todos os professores, funcionários e demais colegas que integram o grupo (GEMA) pelas contribuições.

Ao Prof. Dr. Manoel Luiz dos Santos, pela orientação, amizade e principalmente pela confiança depositada na realização deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Nelson Vicente L. Gasparetto, pela sua amizade e pelas contribuições em todas as etapas deste trabalho.

Ao Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Estadual de Maringá, em especial à secretária Miriam, pelo apoio e amizade.

Ao Profa Dr^a. Lucimara Liberali, coordenadora do curso de graduação em Geografia da Unimeo Ctesop-Assis Chateaubriand pelo entusiasmo e amizade.

Ao Prof. Dr. Nelson Douhi meu professor da graduação, pela amizade, pelos ensinamentos e por ter acreditado na realização deste trabalho.

Aos professores Fabrício Jacob Begoso, Fabiane politti Begoso Alves, Fábio Begoso, Marcos Daciulis diretores do Centro Técnico-Superior do Oeste Paranaense – CTESOP pelo apoio, entusiasmo e amizade.

À Secretaria de Estado da Educação – SEED pela licença concedida para o desenvolvimento da pesquisa.

Aos colegas de trabalho do Colégio Estadual Jardim Europa pela amizade, entusiasmo e compreensão.

Aos amigos: Luiz Fernando Mori, Carlos Erasto Alves, Valdemir da Silva, Marciano Barbosa de Almeida, Vilma Rúbio Fanegas, Pedro França Junior, Maria Estela Casalle Dallavila, Isabel Teresinha Leli, Dayani Duarte Manieri, e, em especial a Rafaela Harumi Fugita e Danielle Bressiani entre outros, os quais nunca hesitaram em ajudar, contribuindo diretamente na realização deste trabalho e compartilhando desta conquista.

Aos meus pais Maria e Luiz e meus irmãos pela compreensão, carinho e apoio em todas as etapas deste trabalho.

RESUMO

Esta pesquisa apresenta uma análise do escoamento superficial da bacia hidrográfica do rio Ivaí, Paraná relacionando as características dos solos, uso e cobertura da terra, declividade e clima, bem como ressalta a importância desta dinâmica nos processos geomorfológicos da área. O escoamento superficial (*runoff*) é um dos elementos determinantes para os processos erosivos na vertente, e, conseqüentemente influi no aporte de sedimentos que chega até os canais de drenagem, portanto, tal análise é importante para o maior conhecimento da dinâmica ambiental da área de estudo. A bacia do rio Ivaí ocupa uma área de 36,587 km², sendo abrangida por diferentes compartimentos geomorfológicos (Segundo e Terceiro Planalto Paranaense), tendo substrato geológico complexo, o que originou tipos de solos também variados. Neste trabalho foi realizada uma comparação entre os índices de escoamento superficial obtidos por Santos et al. (2013) para a bacia por meio da aplicação da equação de Kirkby (1976, 1980) e os resultados obtidos por meio da aplicação do modelo SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*) tendo como base o ano de 2009. A aplicação do modelo SWAT foi precedida pelo levantamento das características físicas e de uso da terra da bacia servindo de base para as entradas (inputs) no modelo em ambiente SIG. Nesse sentido, esta pesquisa pretendeu comparar essas duas metodologias no sentido de se verificar qual modelo melhor representa a dinâmica do escoamento superficial da Bacia do rio Ivaí. Por meio da comparação entre os mapas síntese elaborados pelas duas metodologias pôde-se observar que as maiores taxas de escoamento superficial ocorrem em setores distintos. A equação de Kirkby gerou as maiores taxas no setor inferior da bacia (900-1200 e >1200 mm/ano), fortemente influenciadas pelas variáveis solos e precipitação média por evento, enquanto que a aplicação do modelo SWAT mostrou as maiores taxas (573-713 mm/ano) nos setores médio (sub-bacias 12, 15, 16 e 24) e inferior (sub-bacias 3 e 10) da bacia influenciadas por uma complexa relação entre as propriedades dos solos, uso e cobertura da terra, precipitação, evapotranspiração e declividade. A produção de sedimentos (ton/ha) por sub-bacia gerada pelo SWAT apresentou maiores índices em sub-bacias dos três setores (25, 23, 14 e 26 no setor médio, 3 no setor inferior e 21 no superior). Esses limiares foram influenciados, sobretudo pelos índices de escoamento superficial, os elevados índices pluviométricos e as declividades. As variáveis requeridas pelo modelo SWAT se mostraram sensíveis, em maior ou menor grau em suas interações. Sendo assim, conclui-se que as diferenças entre os modelos não se concentram apenas nas variáveis que utilizam, mas também nos efeitos das interações entre as mesmas.

Palavras-chave: Análise, escoamento superficial, modelos hidrológicos, modelo SWAT, equação de Kirkby, bacia do rio Ivaí/PR.

ABSTRACT

This research presents an analysis of the surface runoff of the Ivaí river basin, Paraná, relating soil characteristics, land use and cover, slope and climate, as well as the importance of this dynamics in the geomorphological processes of the area. Runoff is one of the determining factors for the erosive processes in the slope, and consequently it influences on the sediment input which reaches the drainage channels, therefore, this analysis is important for a greater knowledge of the environmental dynamics in the area of study. The Ivaí River basin occupies an area of 36,587 km², being covered by different geomorphological compartments (Second and Third Paraná's plateau), which have a complex geological substrate, which also originated varied types of soils. This study compared the surface runoff indexes obtained by Santos et al. (2013) for the basin by applying the Kirky equation (1976, 1980) and the results obtained by applying the SWAT (Soil and Water Assessment Tool) model, based in 2009. The application of the SWAT model was preceded by a survey of physical characteristics and use of the basin land, serving as basis for inputs for the model in a GIS environment. In this sense, this research intended to compare these two methods in order to verify which model best represents the dynamics of the surface flow of the Ivaí River basin. By comparison between the synthesis maps elaborated by the two methodologies, it was possible to observe that the highest rates of surface runoff occur in different sectors. The Kirkby equation generated the highest rates in the lower basin sector (900-1200 and > 1200 mm / year), strongly influenced by soil variables and average precipitation per event, while the SWAT model showed the highest rates (573- 713 mm / year) in the middle sectors (sub-basin 12, 15, 16 and 24) and lower basin sectors (sub-basin 3 and 10), influenced by a complex relation between soil properties, land use and cover, precipitation, evapotranspiration and slope. The sediment yield (ton / ha) per sub-basin generated by the SWAT showed higher indices in sub-basins of the three sectors (25, 23, 14 and 26 in the medium sector, 3 in the lower sector and 21 in the upper sector). These thresholds were influenced mainly by the indices of surface runoff, high rainfall indexes and declivities. The variables required by the SWAT model were shown to be more or less sensitive in their interactions. Thus, we concluded that the differences between models are not only focused on the variables they use, but also on the effects of interactions between them.

Key-words: Analysis, runoff, hydrological models, SWAT model, Kirkby's equation, Ivaí River basin/PR.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

km - Quilômetro

km² - Quilômetro quadrado

m - Metro

mm - Milímetros

m/s - Metros por segundo

ANA - Agência Nacional de Águas

ANION_EXCL - Porosidade

APA - Área de Proteção Ambiental

APP - Área de Preservação Permanente

CAPES - Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior

CBERS - Satélite Sino-Brasileiro de Recursos Terrestres

CLAY - Porcentagem de argila

CMNP - Companhia Melhoramentos Norte do Paraná

CN – Cúrvia Número

CONAMA - Conselho Nacional de Meio Ambiente

DEWPT - Temperatura do ponto de orvalho

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

ENOS - El Niño Oscilação Sul

GEMA - Grupo de Estudos Multidisciplinares do Ambiente

GPS - Global Positioning System

ha - Hectares

HYDGRP – Grupo hidrológico dos solos

HRU – Unidade de Resposta Hidrológica

IAP - Instituto Ambiental do Paraná

IBAMA - Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Renováveis

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia

INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

IPARDES – Instituto Paranaense de Desenvolvimento Econômico e Social

ITCG - Instituto de Terras Cartografia e Geociências

KINEROS – KINematic runoff and EROsion

LANDSAT - Land Remote Sensing Satellite

MDE - Modelo Digital de Elevação
MINEROPAR - Minerais do Paraná
MUSLE - Equação Universal de Perda de Solo Modificada
NRCS - Natural Resources Conservation Service
PCPD - Número de dias que houve precipitação no mês
PCPMM - Precipitação média
PCPSTD - Desvio padrão da precipitação
PCPSKW - Coeficiente de assimetria para a precipitação
PGE - Programa de Pós-graduação em Geografia
PR_W1- Probabilidade de dias úmidos seguidos de dias secos
PR_W2- Probabilidade de dias úmidos seguidos de dias úmidos
RAINHHMX - Precipitação máxima de 0,5 hora
ROCK – Porcentagem de seixos
SCS - Serviço de Conservação do Solo
SIG - Sistema de Informação Geográfica
SIMEPAR – Sistema Meteorológico do Paraná
SOL_ALB - Albedo
SOL_AWC - Água disponível no solo
SOLARAV - Média diária de radiação solar para o mês
SOL_BD - Densidade aparente
SOL_CBN - Carbono orgânico
SOL_K - Condutividade hidráulica saturada
SOL_ZMX - Profundidade máxima que a raiz alcança
SOL_Z - Profundidade da camada
SILT – Porcentagem de silte
SRTM - Shuttle Radam Topography Mission
SWAT - Soil and Water Assessment Tool
TOPMODEL – Topography Based Hydrological Model
TMPMX - Temperatura máxima
TMPMN - Temperatura mínima
TMPSTDMX - Desvio padrão da temperatura máxima
TMPSTDMN - Desvio padrão da temperatura mínima
UEM - Universidade Estadual de Maringá
USDA – United States Department of Agriculture

USLE – Equação Universal de Perda de Solo

USLE_K - Erodibilidade

UTM – Universal Transversa de Mercator

WEPP – Water Erosion Prediction Project

WGEN – Weather Generation

WINDAV - Velocidade média diária do vento no mês

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Localização da bacia hidrográfica do rio Ivaí.....	19
Figura 2 - Geologia da bacia do rio Ivaí.....	22
Figura 3 - Compartimentação da bacia do rio Ivaí de acordo com as características geológico-geomorfológicas.	23
Figura 4 - Compartimentos Morfoesculturais da bacia do rio Ivaí.	24
Figura 5 - Clima da bacia do rio Ivaí.....	26
Figura 6 - (1) Distribuição da cobertura florestal do Paraná; (2) Previsão.....	28
Figura 7 - Vegetação primitiva da bacia do rio Ivaí.....	30
Figura 8 - Rede hidrográfica da bacia do Rio Ivaí	31
Figura 9 - Municípios inseridos total ou parcialmente a bacia do rio Ivaí	34
Figura 10 - Estrutura Geral de Sistemas de Informação Geográfica	44
Figura 11 - Fluxograma com as etapas de realização da pesquisa.	50
Figura 12 - Figura 12 - Relação entre precipitação e escoamento superficial no método SCS da Curva de Número.....	54
Figura 13 - Classificação textural do solo	63
Figura 14 - Tela para edição dos dados característicos dos solos	64
Figura 15 - Localização das cenas dos satélites LANDSAT/TM na bacia do Ivaí.	66
Figura 16 - Tela para edição dos parâmetros das estações climáticas pelo modelo SWAT....	73
Figura 17 – Modelo Digital de Elevação da bacia do Ivaí com as sub-bacias delimitadas pelo modelo SWAT.....	77
Figura 18 - Declividade da bacia do Rio Ivaí.	78
Figura 19 - Tipos de solo da bacia do rio Ivaí.....	80
Figura 20 - Porcentagem de área ocupada por cada uma das classes temáticas.....	85
Figura 21 - Uso e cobertura da terra da bacia do rio Ivaí para o ano de 2009 com a reclassificação realizada pelo modelo SWAT.....	86
Figura 22 - Sub-bacias delimitadas pelo modelo SWAT com a localização das estações climatológicas.....	87
Figura 23 - Índices pluviométricos da bacia do rio Ivaí para o ano de 2009.....	89
Figura 24 - Distribuição espacial dos valores de evapotranspiração potencial da bacia do rio Ivaí para o ano de 2009 gerado pelo modelo SWAT.	90
Figura 25 - Escoamento superficial das sub-bacias delimitadas pelo modelo SWAT para o ano de 2009.....	91

Figura 26 - (A e B). A: Processos erosivos em área de pastagem sobre Neossolos Litólicos; B: Processos erosivos em área de pastagem sobre Nitossolos em Corumbataí o Sul/PR.....	92
Figura 27 - Processos erosivos em uma porção da sub-bacia de número 10 – Bacia do Córrego Coruja próximo a área urbana de Cianorte/PR.....	95
Figura 28 - Figura 28 - Processos erosivos e assoreamento de canal próximo à rodovia PR 680, no Município de Maria Helena/PR (sub-bacia 7).....	96
Figura 29 - Mapa síntese de escoamento superficial da bacia do rio Ivaí para o ano de 2009, elaborado por meio da aplicação do modelo SWAT.....	98
Figura 30 - Mapa síntese de escoamento superficial da bacia do rio Ivaí para o ano de 2009 elaborado por meio da aplicação de equação de Kirkby (1976, 1980).....	100
Figura 31 - Produção de sedimentos (ton/ha) por sub-bacia para o ano de 2009.....	104
Figura 32 - Produção de sedimentos por sub-bacia para o ano de 2009, elaborado por meio da aplicação do modelo SWAT.....	108

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Síntese das Formações rochosas presentes na bacia do rio Ivaí. As formações estão ordenadas em ordem decrescente de idade.....	20
Quadro 2 - Unidades geomorfológicas da bacia do rio Ivaí	25
Quadro 3 - Classificação hidrológica do Solo para as condições brasileiras	60
Quadro 4 - Propriedades e principais aplicações das bandas 3, 4 e 5 das bandas TM e ETM dos satélites LANDSAT 5 e 7.....	65
Quadro 5 - Estações climatológicas com seus respectivos códigos, latitudes, longitudes, altitudes, período dos dados analisados.....	67
Quadro 6 - Sub-bacias geradas pelo SWAT com área e elevação média.....	76
Quadro 7 - Características físicas das classes de solo após reclassificação	84

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Relação entre classificação textural e estrutura e condutividade hidráulica	61
Tabela 2 - Erodibilidade dos solos	62
Tabela 3 - Relação entre classificação textural e capacidade de água disponível no solo.	62
Tabela 4 - Síntese das características de precipitação, evapotranspiração potencial, uso e cobertura da terra, geologia, solos e declividade e o escoamento superficial para o ano de 2009 na bacia do rio Ivaí.....	97
Tabela 5 - Síntese dos índices de precipitação, de escoamento superficial, características de uso e cobertura da terra, geologia, solos e declividade das sub-bacias com maior produção de sedimentos (ton/há) ano de 2009 na bacia do rio Ivaí.....	107

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 Hipótese	18
2 CARACTERIZAÇÃO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO IVAÍ	19
2.1 Geologia da Bacia do Ivaí	20
2.2 Geomorfologia.....	22
2.3 Clima	25
2.4 Fitogeografia.....	27
2.5 Rede Hidrográfica.....	30
2.6 Aspectos Políticos e Socioeconômicos.....	32
3 REFERENCIAL TEÓRICO	34
3.1 Os Modelos Matemáticos e sua Importância.....	35
3.2 A Modelagem Ambiental em Ambiente SIG	43
3.3 A Modelagem e a Representação da Dinâmica dos Sistemas Ambientais.....	45
4 MATERIAIS E MÉTODOS	49
4.1 Escoamento Superficial	51
4.1.1 Vazão de pico	54
4.1.2 Fator Erodibilidade do Solo.....	55
4.1.3 Fator de Uso e Manejo do Solo	55
4.1.4 Fator de Práticas Conservacionistas	56
4.1.5 Fator topográfico	56
4.1.6 Fator de fragmentação esparsa	57
4.2 Definição dos Parâmetros Característicos da Área de Estudo para Geração do Banco de Dados	57
4.3 Modelo Digital de Elevação (MDE).....	57
4.4 Declividade.....	58
4.5 Parâmetros de Solos	58
4.6 Uso e Cobertura da Terra.....	64
4.7 Parâmetros Climáticos.....	66
4.7.1 Estimativas de dados de temperatura.....	68
4.7.2 Estimativas de dados de precipitação	69
4.7.3 Temperatura do ponto de orvalho.....	71
4.7.4 Radiação solar.....	72

4.7.5 Velocidade do vento	72
4.8 Delimitação das Sub-bacias, Determinação das HRUs e Simulação	73
5 DADOS REQUERIDOS PELO MODELO SWAT E DISCRETIZAÇÃO DOS PARÂMETROS CARACTERÍSTICOS DA ÁREA DE ESTUDO.....	75
5.1 Modelo Digital de Elevação	75
5.2 Declividade	77
5.3 Solos	79
5.4 Uso e Cobertura da Terra.....	85
5.5 Dados das Estações Climatológicas e Pluviométricas.....	87
6 RESULTADOS E DISCUSSÃO	88
6.1 Análise da Pluviosidade e da Evapotranspiração da Bacia do Rio Ivai	81
6.2 Análise do Escoamento Superficial da Bacia	91
6.3 Análise da Produção de Sedimentos na Bacia.....	102
CONCLUSÕES.....	109
REFERÊNCIAS	111

1 INTRODUÇÃO

Este estudo compõe um arcabouço de trabalhos realizados na temática de análise de bacias hidrográficas, a aplicação das metodologias propostas nessa pesquisa irá contribuir com discussões, novos conhecimentos e perspectivas sobre modelagem ambiental e sua aplicabilidade, bem como discutir os efeitos das ações antrópicas em suas diversas atividades e utilização dos recursos naturais.

O desenvolvimento desta pesquisa teve como foco a análise do escoamento superficial (*runoff*) da bacia do rio Ivaí e a relação com as características dos solos, uso e cobertura da terra, declividade e clima bem como a importância desta dinâmica nos processos geomorfológicos da área. A referida bacia ocupa uma área de 36,587 km², sendo abrangida por diferentes compartimentos geomorfológicos (Segundo e Terceiro Planalto Paranaense), tendo substrato geológico complexo, o que originou tipos de solos também variados.

O estudo da relação entre as características físicas e de uso da terra e os processos geomorfológicos que atuam na área de estudo demandam uma análise da bacia hidrográfica como sistema, no qual há interdependência e variabilidade espacial de interações entre as variáveis, o que resulta em comportamentos e respostas complexos.

De acordo com Santos et al, (2013), o escoamento superficial ou escoamento direto é uma das principais variáveis que influenciam no regime hidrológico dos canais fluviais; é um dos principais modeladores do relevo, influenciando diretamente na produção de sedimentos em uma bacia hidrográfica e na agração dos sistemas fluviais. O conhecimento das características do escoamento superficial de uma bacia hidrográfica é fundamental para a análise geoambiental da bacia e para a gestão dos seus recursos naturais.

A análise da dinâmica do ciclo hidrológico, ou mais especificamente de uma fração do mesmo, neste caso, o escoamento superficial, pode auxiliar no entendimento da dinâmica de uma bacia hidrográfica à medida que umas séries de processos interdependentes ocorrem tendo como início a precipitação que incide sobre a bacia e que, por sua vez, interage com outras variáveis tais como a cobertura vegetal, tipo de rocha, solos, inclinação das vertentes e uso da terra para as atividades econômicas básicas.

Conforme ressalta Paiva (2008), qualquer mudança significativa nas variáveis da bacia de drenagem possui reflexo nas variáveis hidrológicas, alterando, por exemplo, a descarga fluvial. Ou seja, a água que escorre na superfície pode vir a percorrer em menor tempo a extensão da vertente, e chegar ao canal fluvial antes de infiltrar no solo para o lençol freático;

caso isso ocorra, a água que entra no sistema permanece menor tempo sendo processada e escoada para fora do sistema.

O objetivo geral desta pesquisa foi analisar o escoamento superficial (runoff) da bacia do rio Ivaí e as relações dessa dinâmica com as características físicas e o uso da terra da bacia mediante a utilização/comparação de diferentes modelos hidrológicos. Para a realização da análise proposta foi feita uma comparação entre os resultados de escoamento superficial obtidos por Santos et al, (2013), para a bacia por meio da equação de Kirky (1976, 1980) e os resultados obtidos por meio da aplicação do modelo SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*) para o ano de 2009.

A equação Kirkby, (1976, 1980) propõe a análise do escoamento superficial mediante a quantificação da produção de sedimentos considerando as características climáticas e dos solos, tais como precipitação anual (mm), evapotranspiração (mm), precipitação média por evento (mm) e capacidade de armazenamento de água no solo. Esse modelo foi utilizado por Santos e Morais (2012), para estimar a produção de sedimentos na bacia do Ribeirão Maringá, Paraná, mediante a adoção de técnicas de geoprocessamento para integrar as variáveis em ambiente SIG.

O modelo SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*) é um modelo de domínio público desenvolvido conjuntamente pela USDA *Agricultural Research Service* (USDA-ARS) e Texas A & M *AgriLife Research*. O SWAT pode ser utilizado para avaliar a qualidade e simular a quantidade de águas superficiais e subterrâneas em bacias hidrográficas, para analisar e prevenir os efeitos erosivos, prever o impacto ambiental do uso da terra, das práticas de manejo da terra e mudanças climáticas. É amplamente utilizado para gestão regional de bacias hidrográficas.

O estudo do escoamento superficial se justifica pela importância que este processo representa para o entendimento da dinâmica erosiva da bacia hidrográfica. É importante destacar a contribuição teórico-metodológica a respeito dos procedimentos utilizados para a realização de modelagem ambiental em ambiente de um sistema de informação geográfica e no entendimento das variáveis que mais influenciam os índices de escoamento superficial.

Apesar da importância socioeconômica e ambiental da bacia do rio Ivaí para o estado do Paraná poucos são os estudos sistemáticos a respeito da mesma. Este fato aumenta a importância deste estudo na medida em que este sistema fluvial ainda corre em seu leito natural, e está sendo desenvolvidos pelo Estado do Paraná, estudos de viabilidade de implantação de usinas hidroelétricas em seu curso principal. Esta pesquisa complementar os estudos até então desenvolvidos no PGE-UEM/ GEMA, na bacia hidrográfica do rio Ivaí.

1.1 Hipótese

A bacia do rio Ivaí, devido a sua complexidade climática, geológico-geomorfológica e a intensa ocupação por atividades econômicas, apresenta diferenças nos valores de escoamento superficial. A distribuição espacial das precipitações anuais e da evapotranspiração também conferem características peculiares de escoamento superficial aos diferentes setores da bacia. Sendo assim, a modelagem do escoamento e da produção de sedimentos nesta bacia hidrográfica deve demonstrar o comportamento destes processos sedimentares, indicando quais áreas são mais suscetíveis aos processos erosivos. Demonstrando assim que as modelagens ambientais podem ser uma importante ferramenta para processos de tomada de decisão e planejamento em grandes bacias hidrográficas.

2 CARACTERIZAÇÃO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO IVAÍ

A bacia hidrográfica do rio Ivaí é a segunda maior do estado do Paraná, está situada entre as coordenadas geográficas 22°56'17" - 25°35'27" de latitude sul e 50°44'17" - 53°41'43" de longitude oeste, ocupando uma área de 36.587 km² e aproximadamente 20% do território paranaense (Figura. 1). Possui um formato alongado e orientação norte-noroeste. O rio Ivaí nasce na confluência do rio dos Patos com o rio São João, na serra da Boa Esperança, nas proximidades do município de Ivaí, a uma altitude de 1120 metros e percorre uma extensão 798 km até sua desembocadura no rio Paraná, na altitude de 225 m.

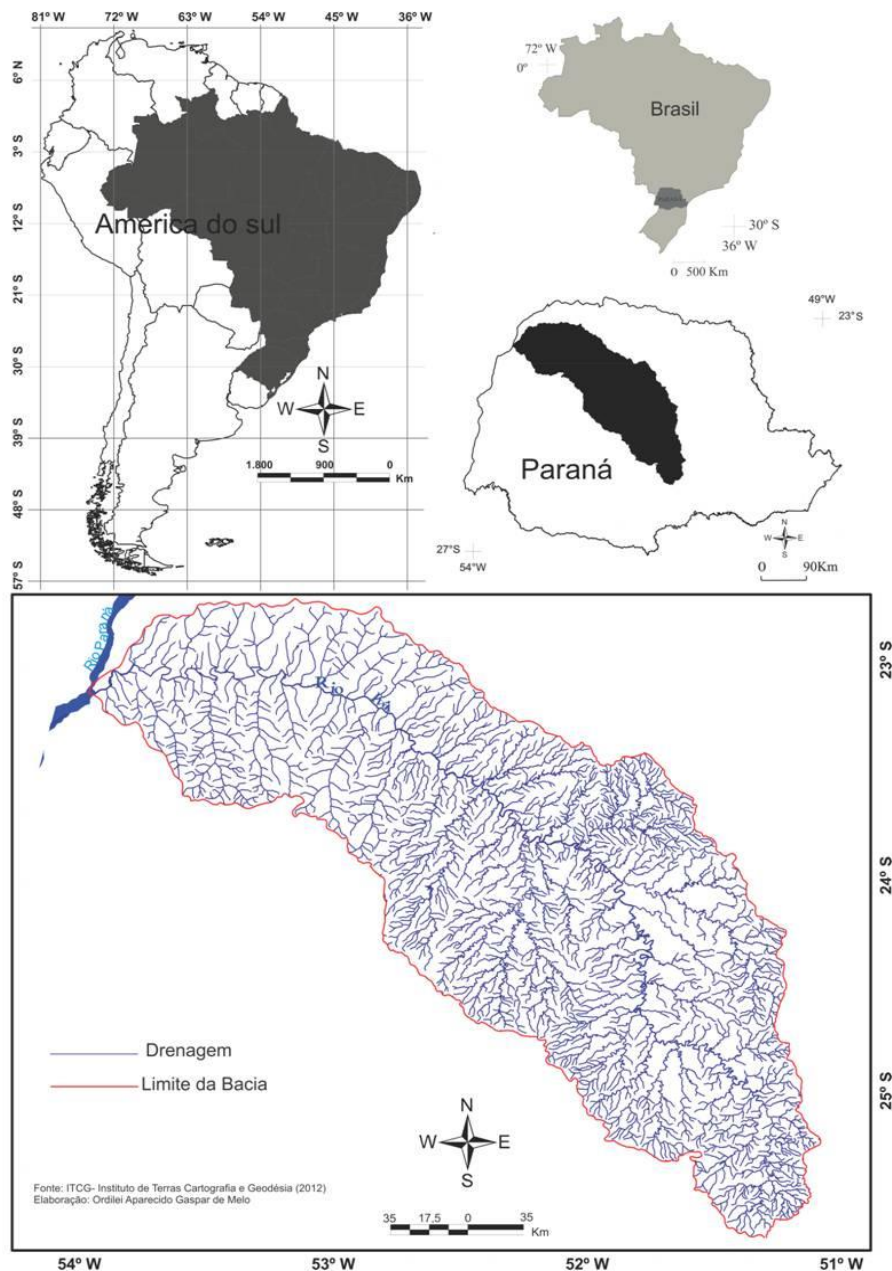


Figura 1 - Localização da bacia hidrográfica do rio Ivaí.

2.1 Geologia da Bacia do Ivaí

O substrato da bacia hidrográfica do rio Ivaí é constituído, desde a sua nascente até próximo ao seu curso médio, por uma geologia bastante complexa e de acordo com a Mineropar (2001), apresenta vários tipos de rochas sedimentares das formações paleozoicas e mesozoicas da Bacia do Paraná (Grupo Passa Dois). No curso médio do rio, dominam as eruptivas básicas Cretáceas da Formação Serra Geral (Grupo São Bento) e, no curso inferior, o canal fluvial escava os arenitos da Formação Caiuá e depósitos sedimentares recentes que constituem a planície aluvial, (Quadro 1 e Figura 2).

Quadro 1- Síntese das Formações rochosas presentes na bacia do rio Ivaí. As formações estão ordenadas em ordem decrescente de idade.

Idade Geológica	Nome do Grupo	Nome da Formação	Características sedimentares	Espessura (m)	Local de Ocorrência
Cenozóico		Sedimentos recentes Aluviões	Pelitos, areias e cascalhos. Sedimentos inconsolidados	?	Toda a bacia Planície aluvial e terraços
Mesozóico	Grupo Caiuá	Formação Rio Paraná	Formação Rio Paraná constitui-se de arenitos marrom-avermelhados e arroxeados, finos a médios, quartzosos, secundariamente arcoseanos. Estratificação cruzada de médio a grande porte, tangencial na base.	20-270	Curso inferior
		Formação Goio Erê	Formação Goio-Erê é constituída de arenitos quartzosos freqüentemente subarcoseanos, marrom avermelhados a cinza-arroxeados, de granulação fina a muito fina, ocasionalmente média. Ocorrem sob forma de estratos tabulares de poucos metros de espessura com estratificação cruzada, intercalados com bancos de espessura métrica a decimétrica, de aspecto maciço ou de estratificação subhorizontal mal definida.		
	Grupo São Bento	Formação Serra Geral	Derrames de basalto toelítico, preto, afanítico, contendo camadas intertrapianas de arenitos róseos, com texturas finas a médias.	50-1000	Curso médio e inferior
		Formação Botucatu	Arenitos róseos a avermelhados, de texturas finas e caracterizados por estratificações cruzadas de grande porte e estratificações acanaladas.	50-260	Curso Médio
		Formação Pirambóia	Arenitos esbranquiçados, amarelados, avermelhados, siltico argilosos, com granulação média a muito fina, grãos polidos, subangulares e subarredondados, mal selecionados;	5-20	Curso Médio

			com presença de intercalação de argilitos e siltitos.		
Paleozóico	Grupo Passa Dois	Formação Rio do Rastro	Sedimentos clásticos de cores variegadas. Composto predominantemente de siltitos e arenitos finos esverdeados e arroxeados na parte basal e argilitos e siltitos vermelhos com intercalações lenticulares de arenitos finos	15-70	Curso Superior a Médio
		Formação Terezina	Siltitos arenosos de cores cinza esverdeado e verde com intercalações de arenitos de texturas finas a médias, bancos de calcários oolíticos, coquinas e folhelhos cinza escuros.	60-85	Curso Superior
		Formação Serra Alta	folhelhos finos, preto-esverdeados, com pequenas lentes calcárias, por xistos listrados, cinzento-esverdeados e por arenitos argilosos, vermelho-amarelados, tendo como uma de suas particularidades a presença de faixas estreitas ou nódulos grossos de sílex.	95-145	Curso Superior
		Formação Irati	Argilitos e folhelhos cinza-escuros a pretos, piro-betuminosos associados a níveis de rochas carbonáticas	60-105	Curso Superior

Fonte: Mineropar (2001).

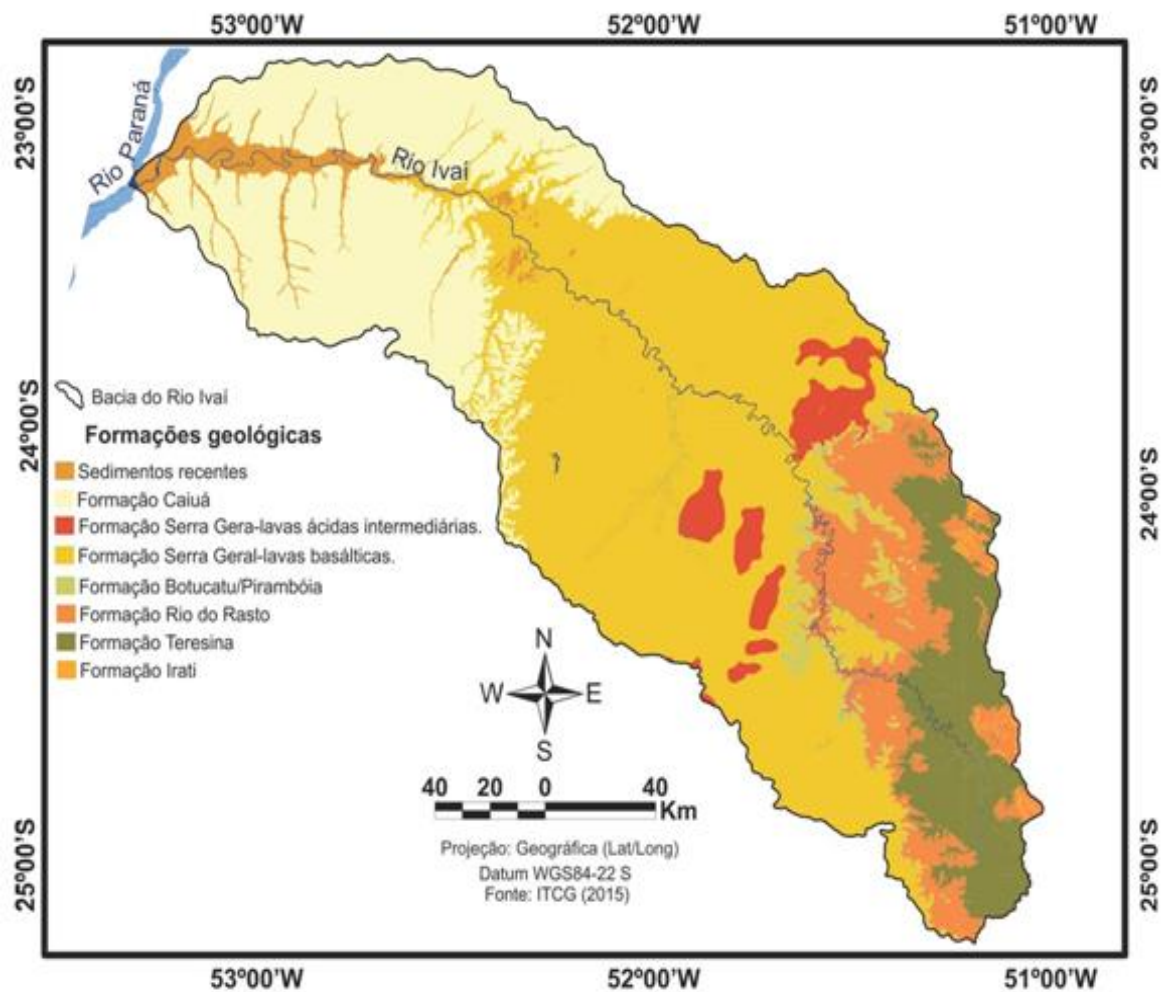


Figura 2 - Geologia da bacia do rio Ivaí

2.2 Geomorfologia

A bacia do rio Ivaí se desenvolve de um modo geral acompanhando o mergulho monoclinal das camadas paleozóicas e mesozóicas da Bacia Sedimentar do Paraná. A área da bacia é cortada por uma série de lineamentos estruturais de origem e tamanhos variados, dominados por falhas, fraturas e lineações com direção preferencial NW-SE, paralela ao Arco de Ponta Grossa (CPRM apud FUJITA, 2009).

A bacia foi anteriormente dividida por diversos autores em três setores distintos (superior, médio e inferior) de acordo com as características geológico-geomorfológicas, esta divisão facilita os estudos do sistema fluvial, pois o mesmo pode ser analisado por setor (Figura 3). O alto curso do rio Ivaí (setor superior) atravessa as formações sedimentares complexas da Bacia do Paraná, no médio curso (setor médio) o canal sobrepõe-se às

Formações Serra Geral e Caiuá e no baixo curso (setor inferior), os sedimentos inconsolidados da sua planície aluvial também na área de domínio da Formação Caiuá.

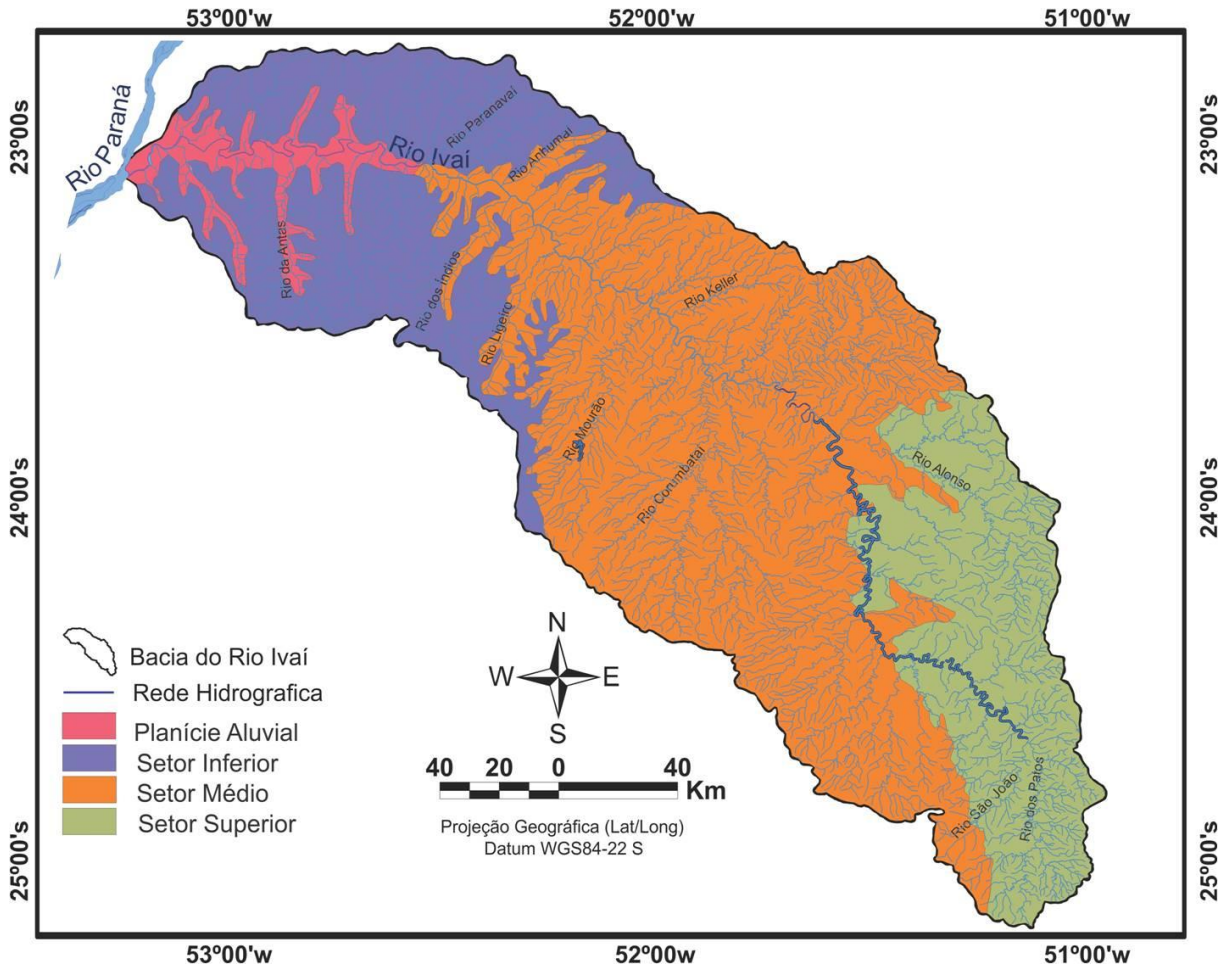


Figura 3 - Compartimentação da bacia do rio Ivaí de acordo com as características geológico-geomorfológicas.

Fonte: modificado de Leli et al, (2017).

De acordo com a classificação realizada por Maack (2002), a bacia do rio Ivaí encontra-se situada no Segundo e Terceiro Planalto Paranaense. O Segundo Planalto é caracterizado por apresentar “escarpas de estratos”, denominadas de cuestras, configurado por um relevo suavemente ondulado, com colinas, outeiros e boqueirões, mas também paisagens de outeiros e vales junto a serra da Boa Esperança.

O Terceiro Planalto Paranaense representa o reverso da cuesta da escarpa da Serra Geral, constituída por espessos derrames de lavas basálticas e pelos arenitos da Formação Caiuá (Kr). Na bacia do rio Ivaí, no compartimento denominado de Terceiro Planalto Paranaense, desenvolvem-se o baixo e médio curso do rio Ivaí. No médio curso, o relevo apresenta-se suavemente ondulado a ondulado, com topos alongados, vertentes convexas, com

presença de saltos e cachoeiras. Já em área de domínio da Formação Caiuá, o relevo configura-se uniforme e horizontalizado de colinas convexas, caracterizado por extensas chapadas e platôs suavemente ondulados.

Recentemente, a partir da análise da interação entre as formas de relevo, origem das rochas, eventos tectônicos e dinâmica morfogenética, Santos et al, (2006); identificaram para o estado do Paraná três grandes unidades morfoestruturais, cinco unidades morfoesculturais e cinquenta sub-unidades morfoesculturais.

Segundo Fujita (2009), dentre as unidades identificadas pelo autor, a bacia do rio Ivaí (Figura 4), devido a sua grande extensão, abrange duas unidades morfoestruturais, representadas pela Bacia Sedimentar do Paraná e pelas Bacias Cenozóicas e Depressões Tectônicas; três unidades morfoesculturais, representadas pelo Segundo e Terceiro Planalto e pelas planícies; e por vinte sub-unidades morfoesculturais, inseridas nas unidades anteriores, as quais estão listadas no quadro 2.

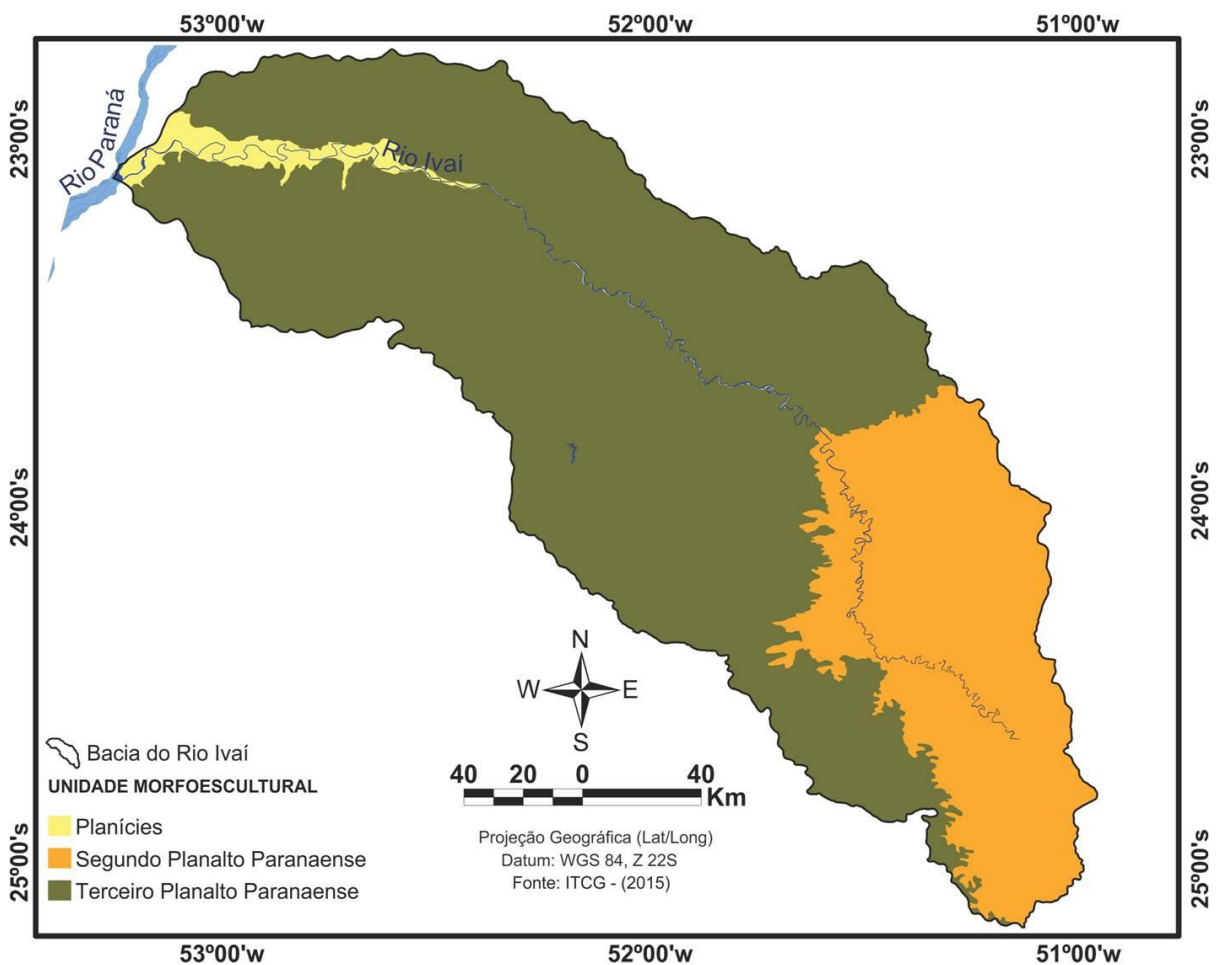


Figura 4 - Compartimentos Morfoesculturais da bacia do rio Ivaí.

Quadro 2 - Unidades geomorfológicas da bacia do rio Ivaí.

Unidade Morfoestrutural	Unidade Morfoescultural	Sub-unidade Morfoescultural
Bacia Sedimentar do Paraná	Segundo Planalto Paranaense	Planalto de Ponta Grossa Planalto do Guatá Planalto de Irati Planaltos Residuais da Formação Teresina Planalto de Prudentópolis Planaltos Residuais da Formação Serra Geral Planalto do Alto Ivaí Planalto Cândido de Abreu Planalto de Ortigueira Planalto de Santo Antônio da Platina
	Terceiro Planalto Paranaense	Planlto Pitanga/Ivaiporã Planalto de Palmas/Guarapuava Planalto do Alto/Médio Piquiri Planalto de Apucarana Planalto de Londrina Planalto de Maringá Planalto de Campo Mourão Planalto de Paranaíba Planalto de Umuarama
Bacias Sedimentares Cenozóicas e Depressões Tectônicas	Planícies	Planícies Fluviais

Fonte: adaptada de Santos et al (2006). Organização: Fujita (2009).

2.3 Clima

Baseado na classificação de Koëpen a bacia hidrográfica do rio Ivaí possui dois tipos climáticos principais (Figura 5), o temperado (Cfb), que compreende o curso superior da bacia, que apresenta temperatura média no mês mais frio abaixo de 18oC (mesotérmico), com verões frescos, temperatura média no mês mais quente abaixo de 22oC e sem estação seca definida, e o subtropical (Cfa), que apresenta temperaturas médias que variam de 8°C a 22°C, com verões quentes e presença de geadas, que abrange os cursos inferior e médio (IAPAR, 1994).

Conforme Andrade (2003), a bacia do rio Ivaí localiza-se numa região de transição de baixa para média latitude (tropical para subtropical), o que ocasiona características tanto de clima temperado como tropical na bacia. O autor verificou que a bacia do rio Ivaí apresenta uma variabilidade temporal e espacial na pluviometria, e apesar de não ser tão pronunciada, apresenta períodos chuvosos e de seca. Os meses mais chuvosos são os meses de janeiro,

fevereiro e março, por sua vez os períodos mais secos compreendem os meses de junho, julho e agosto.

O trecho que representa a parte baixa da bacia apresenta os menores índices pluviométricos com uma amplitude de 32% na mediana da bacia, com um leve déficit hídrico nos meses de julho e agosto, porém, os volumes totais anuais em torno de 1500 mm configuram índices pluviométricos numa condição de clima úmido (DOUHI, 2013).

Segundo Andrade (2003); Baldo (2006), na região a montante do rio Ivaí as altas altitudes (orografia) associadas à continentalidade são as variáveis determinantes para o aumento da precipitação e do tipo climático predominante, Clima Subtropical, já a região mais a jusante sofre grande influência do Trópico de Capricórnio e da Massa Tropical continental, proporcionando um Clima com características de tropicalidade.

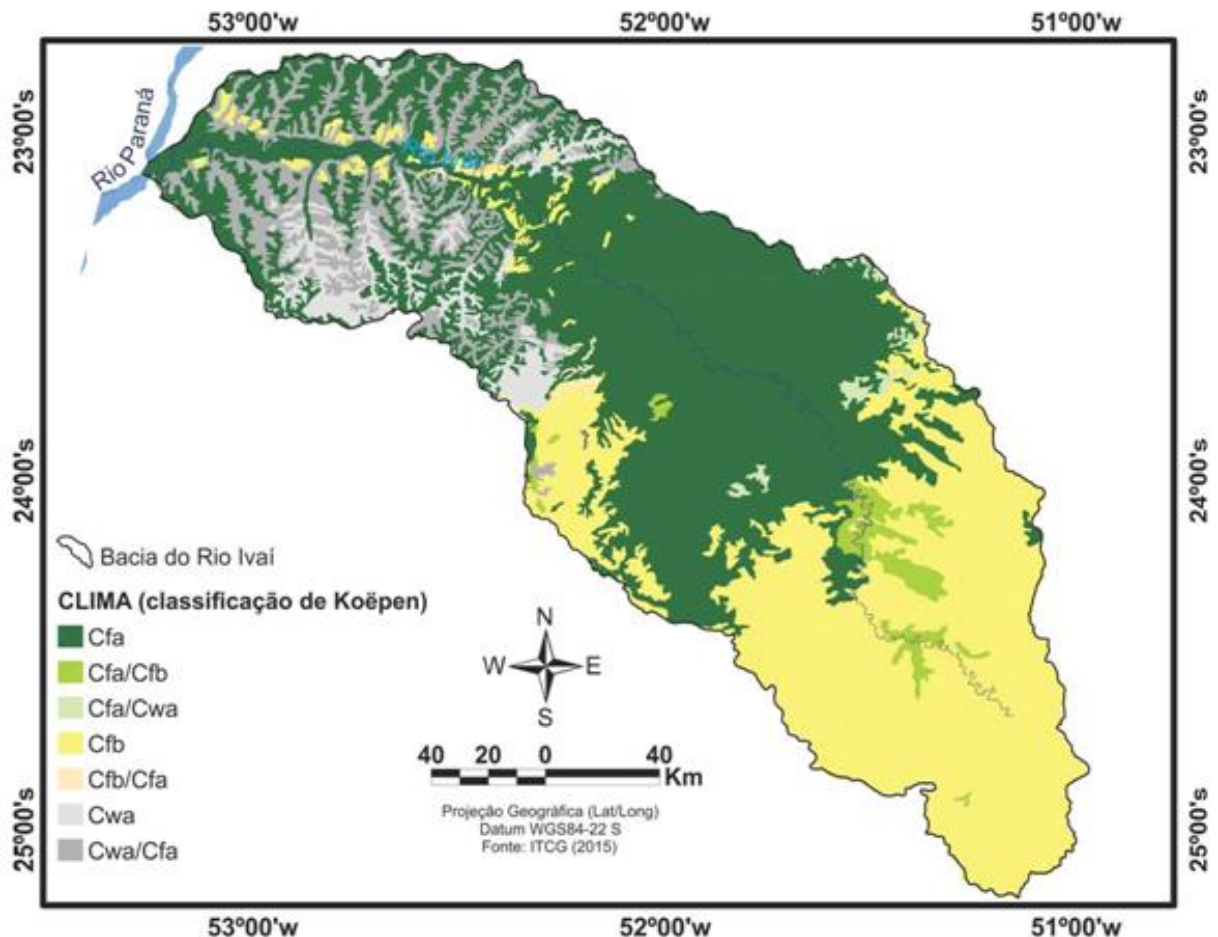


Figura 5 – Clima da bacia do rio Ivaí.

Legenda: Cfb: C = Mesotérmico (Temperado ou Subtropical), f = sempre úmido, b = verão brando; Cfa: C = Mesotérmico (Temperado ou Subtropical), f = sempre úmido, a = verão quente; Cwa: C = Mesotérmico (Temperado ou Subtropical), w = inverno seco, a = verão quente.

2.4 Fitogeografia

As unidades fitogeográficas do estado do Paraná, segundo Roderjan (2002), são representadas por 5 (cinco) unidades, dentre estas as que compõem a área de estudo na Bacia hidrográfica do Ivaí, a Floresta Estacional Semidecidual e a Floresta Ombrófila Mista, e fragmento de vegetação de cerrado, especialmente de Campo Mourão.

Do total da área do Estado do Paraná, mais de 83% era recoberta por mata, este percentual vai rapidamente diminuindo a partir da década de 1930, quando a ação antrópica no Estado ocorre de maneira mais intensa (MAACK, 1981).

A vegetação natural do Paraná do início do século XX até o ano de 1980 foi cedendo espaço ao rápido avanço das fronteiras agrícolas. Essa expansão agrícola ocorreu de forma intensa causando drástica redução às formações vegetais sendo que em 1980 o estado possuía apenas 15% de sua área com cobertura vegetal nativa reduzindo para 11,7% no período entre 1980 a 2002 (IPARDES, 2010).

De acordo com o IPARDES (2010), a redução da vegetação nativa ocorreu em todas as bacias hidrográficas tendo como principal agente o processo intensivo da agropecuária, relacionado aos solos e declividades que são condições essenciais para a agricultura. Atualmente a bacia do rio Ivaí apresenta apenas 8% da vegetação nativa (Figura 6), além de bastante reduzidas, essas formações vegetais surgem na forma de fragmentos na maioria das vezes dispersos, em avançado estágio de degradação como resultado do desenvolvimento de atividades agropecuárias e do processo de urbanização.

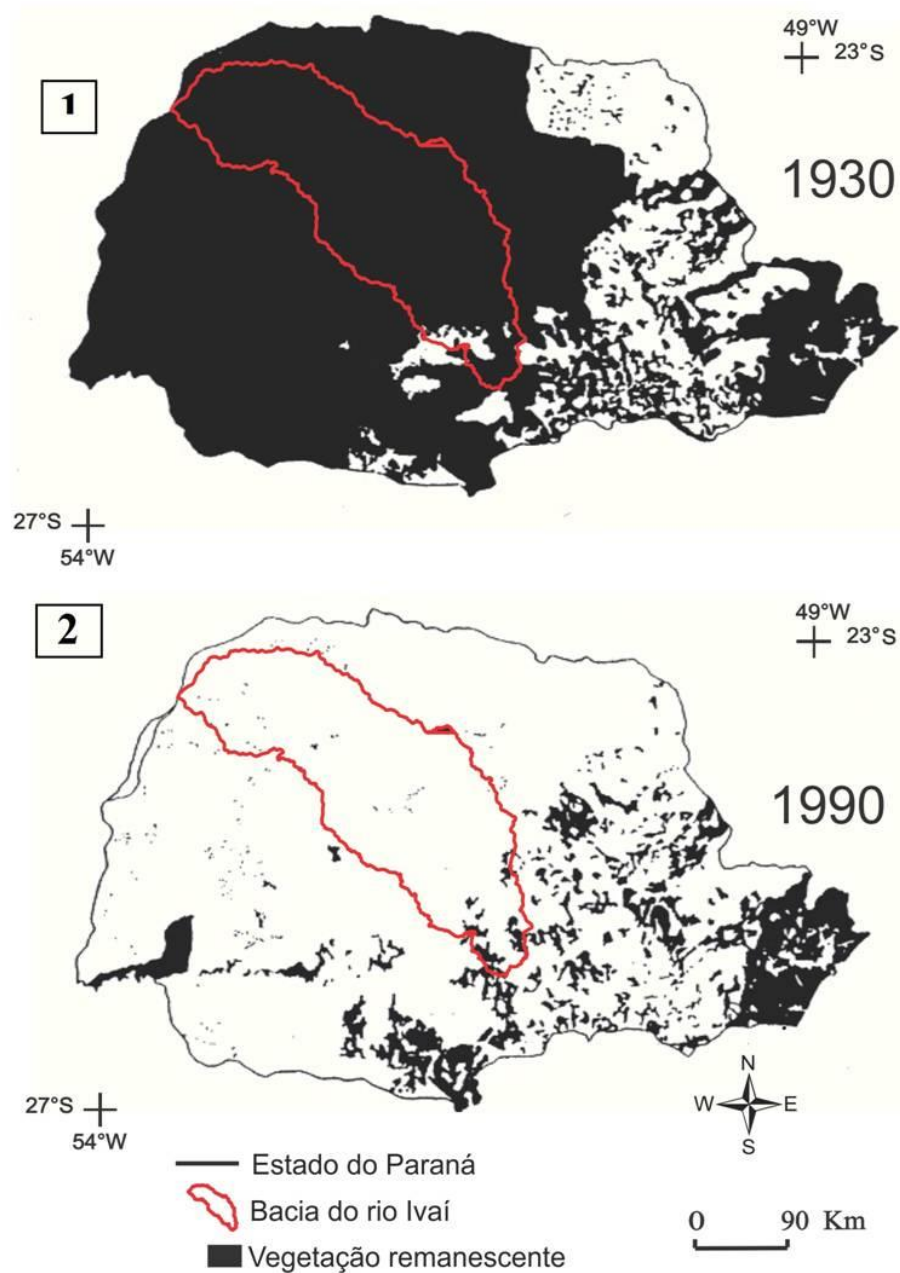


Figura 6 - (1) Distribuição da cobertura florestal do Paraná em 1930; Área florestal de 64,12% do estado. (2) Previsão de distribuição da cobertura florestal do Paraná para 1990; Área florestal de 11,9% do estado.

Fonte: Adaptado de Gubert Filho (1988).

A maior parte da bacia do Ivaí é coberta pela Floresta Estacional Semidecidual (Figura 7), este é um tipo de vegetação que está condicionado à dupla estacionalidade climática, uma tropical com épocas de intensas chuvas de verão, com temperaturas médias em torno de 22°C, seguidas por estiagem acentuada, e outra subtropical sem período seco, mas com seca fisiológica provocada pelo intenso frio do inverno com temperaturas médias em torno de 15°C. Estes climas determinam uma estacionalidade foliar dos elementos arbóreos

dominantes, os quais têm adaptação ora à deficiência hídrica, ora à queda da temperatura nos meses frios (IBGE, 1997).

Na bacia do rio Ivaí, a Floresta Estacional Semidecidual encontra-se na região correspondente ao terceiro Planalto paranaense sob forma de Floresta Estacional Semidecidual Aluvial (na planície aluvial no entorno dos rios) e floresta estacional semidecidual submontana (abaixo dos 500 m de altitude) e montana (acima de 500m de altitude).

Destaca-se ainda nesta bacia, em menores proporções a Floresta Ombrófila Mista que ocupa regiões com altitudes superiores a 500m, que apresentam temperaturas médias anuais em torno de 18°C, mas que apresentam de 3 a 6 meses com temperaturas inferiores a 15°C e precipitação média de 1500 mm, distribuída durante o ano (SANTOS, 2001). A Floresta Ombrófila Mista é entendida como uma mistura de floras de diferentes origens definida pelo padrão fitofisionômico típico. Para Roderjan (2002), esta formação vegetal contempla as floras tropicais (afro-brasileira) e temperadas (austro-brasileira) marcadas fisionalmente pelas araucárias.

Quanto à vegetação do cerrado, encontra-se em pequenos fragmentos considerados como relictual da época pleistocênica semi-árida, em disclimax, considerando-se as condições climáticas atuais. Stevaux (1996), afirma que a mancha de Cerrado embutida na mata pluvial em Campo Mourão é uma evidência de condições ambientais diferentes das atuais. Portanto, de acordo com Bigarella (1971), a vegetação do Cerrado testemunha vestígios paleobotânicos no município de Campo Mourão, situa-se na área de interflúvio dos rios Ivaí e Piquiri, e isto dificultou a cobertura total de floresta nesta área.

A formação vegetacional do Cerrado é caracterizada pelo seu aspecto fisionômico com presença de árvores de galhos tortuosos e de pequeno porte, raízes profundas que é uma propriedade para a busca de água em solos profundos em épocas secas, árvores de cascas duras e grossas, folhas cobertas de pêlos e a presença de gramíneas e ciperáceas no estrato inferior ao das árvores (UZUNIAM, 2004).

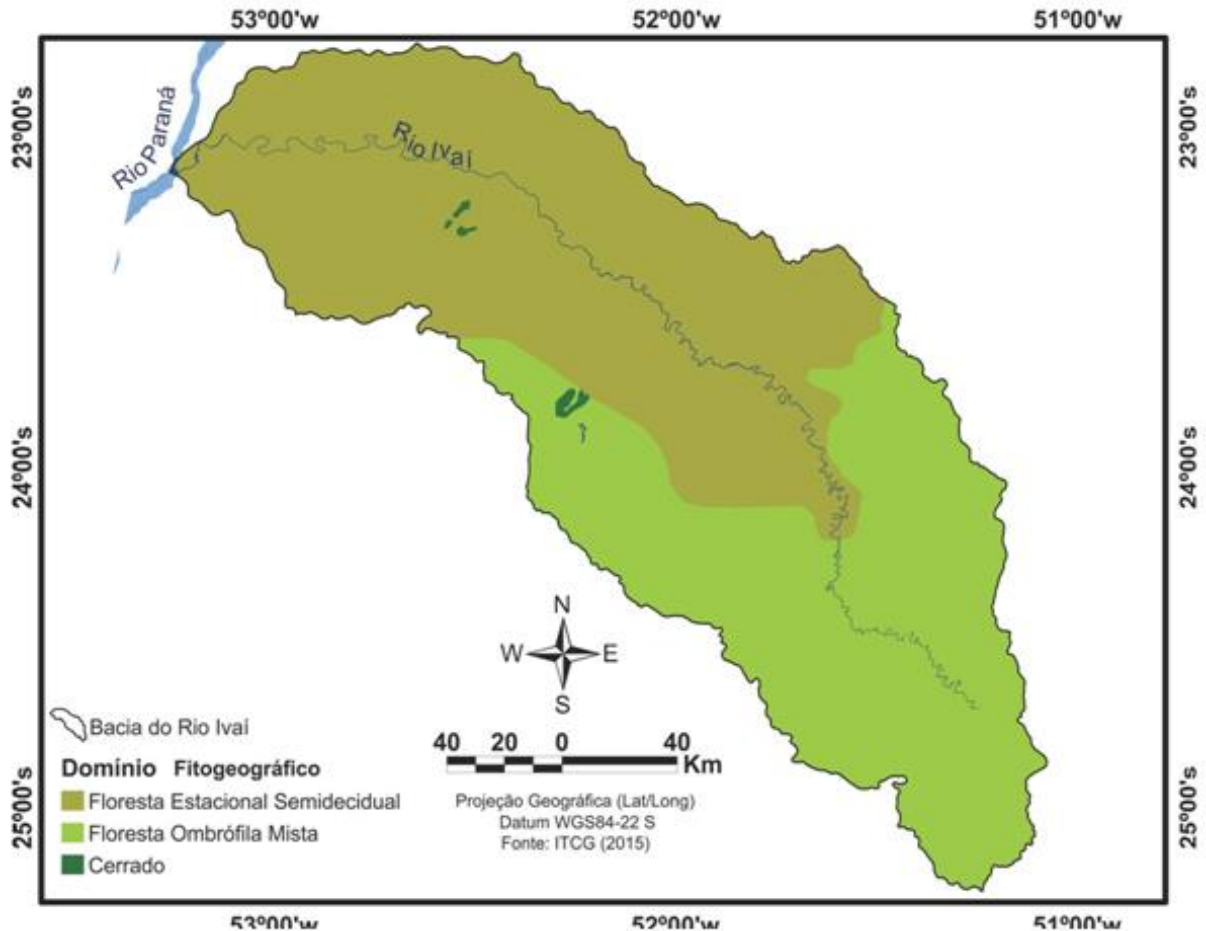


Figura 7 - Vegetação primitiva da bacia do rio Ivaí

2.5 Rede Hidrográfica

A bacia do rio Ivaí apresenta uma densa rede de drenagem (Figura 8), dentre os seus principais tributários pode-se destacar os rios Patos e São João (tributários formadores), Alonso ou rio do Peixe, Anhumai, Antas, Corumbataí, Keller, Ligeiro, Mourão, Paranaíba, entre outros (MAACK, 2002). De acordo com Baldo (2006), o rio Ivaí é classificado como um rio antecedente, predominantemente de planalto, apresentando vários saltos e cachoeiras em seu percurso, principalmente no alto e médio curso.

O curso do rio Ivaí desenvolve-se no sentido geral noroeste, com orientação para oeste no baixo curso, tendo claras evidências de imposição estrutural. Constitui-se ainda no único tributário paranaense a desenvolver uma extensa planície aluvial, onde são identificados terraços fluviais, alagadiços, meandros abandonados e a ocorrência de inundações ocasionais (DOUHI, 2013).

De acordo com Destefane (2005), o rio Ivaí em seu percurso desenvolve um padrão bastante irregular mostrando-se sinuoso, configurando curvas irregulares e muitas vezes com quebras abruptas formando “cotovelos”. Essa sinuosidade apresenta uma maior ou menor amplitude e frequência que parece estar na dependência da geologia e geomorfologia da bacia.

De acordo com Douhi (2013), em sua pesquisa que o rio Ivaí ainda possui uma condição natural relativamente preservada, principalmente em relação ao controle de fluxo, tendo em vista que não apresenta barramentos e nem outras formas de intervenções mais significativas em seu leito. As maiores intervenções se verificam fora do canal fluvial e estão associadas à urbanização e as atividades agropecuárias, sendo fatores que influenciam na qualidade da água e no comportamento hidrológico, exercendo um papel de controle principalmente das inundações na planície aluvial.

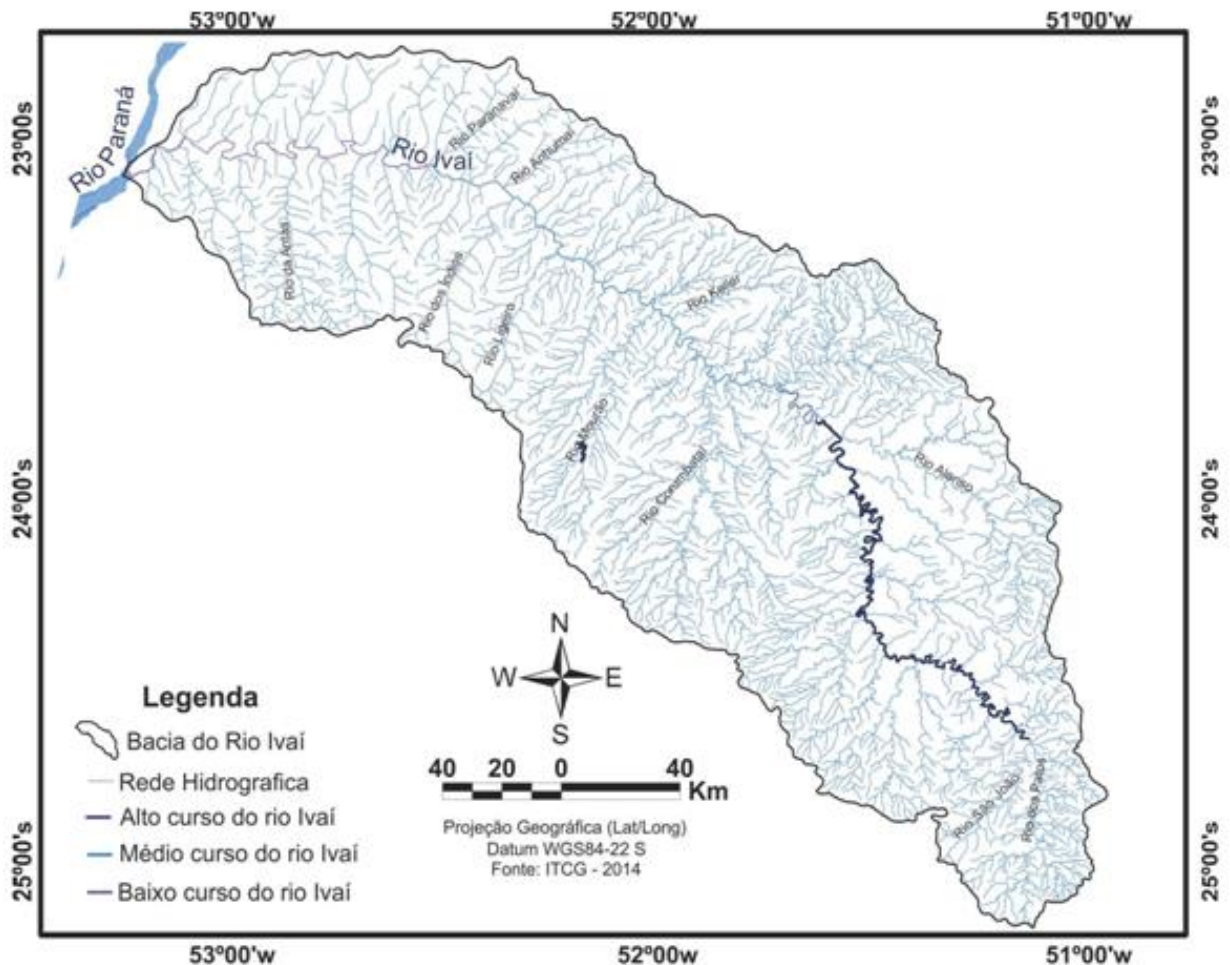


Figura 8 - Rede hidrográfica da bacia do Rio Ivaí

2.6 Aspectos Políticos e Socioeconômicos

A bacia do rio Ivaí abrange 107 municípios (Figura 9) inseridos total ou parcialmente em sua área (ITCG, 2015). Esses municípios apresentam diferenças em suas características, a saber: extensão territorial, população, PIB, IDH. Segundo Douhi (2013), entre os municípios que se inserem na bacia do Ivaí, destacam-se Maringá, Guarapuava, Apucarana, Umuarama, Campo Mourão, Sarandi, Paranavaí e Cianorte, os quais apresentam maior número de habitantes e melhor desenvolvimento industrial e comercial, desempenhando o papel de polos regionais, principalmente nos casos de Maringá, Guarapuava e Campo Mourão. Concentram-se também na bacia alguns dos municípios paranaenses com os piores Índices de Desenvolvimento Humano (IDH) como Ortigueira, Mato Rico, Reserva, Santa Maria do Oeste, Rosário do Ivaí, Cândido de Abreu, entre outros, refletindo as desigualdades regionais internas do Estado.

As diferentes formas de ocupação, produção e desenvolvimento que se verificam na bacia do rio Ivaí são resultantes da combinação de influências de diversos fatores naturais como às características geomorfológicas. Os tipos de solos, de clima, assim como dos aspectos históricos, políticos e culturais dos povos que ocuparam e ocupam as diferentes porções da bacia (DOUHI, 2013).

O histórico de ocupação da bacia teve como característica principal as atividades econômicas tradicionais movidas por ciclos econômicos extensivos e extrativos como mencionados por Destefane (2005); Paiva (2008); Douhi (2013). De acordo com Bray (1987), inicialmente, as florestas foram devastadas para dar lugar às plantações de café nas décadas de 1940 e 1950 até aproximadamente a década de 1970, e depois para implantação de culturas temporárias, como a soja, cana-de-açúcar, pastagens, entre outras.

Nas porções média e superior da bacia predominam a pecuária e a agricultura de subsistência com algumas áreas de agricultura comercial. Também ocorrem as culturas de fumo e a silvicultura, além de grandes reservas florestais, faxinais. Na porção inferior da bacia predominam a agropecuária mais modernizada com emprego de técnicas e equipamentos mais sofisticados. Neste caso, predomina a produção comercial principalmente das culturas de soja, milho, cana-de-açúcar e arroz (DOUHI, 2013).

3 REFERENCIAL TEÓRICO

Recentemente, o rio Ivaí vem sendo estudado em sua totalidade no tocante às características climáticas: Andrade (2002), e Baldo (2006), destacam a influência exercida pelos fenômenos El Niño e La Niña no comportamento pluviométrico da bacia do rio Ivaí; Hidrológicas. Destefani (2005), descreve o regime hidrológico do rio Ivaí, periodicidade e sazonalidade nos períodos de cheia e estiagem; de evolução do uso da terra. Paiva (2008), visou estabelecer a relação entre o desflorestamento e a modificação do fluxo de base na Bacia do Ivaí. Em sua pesquisa o autor ressalta que a bacia do rio Ivaí sofreu um significativo desflorestamento a partir de 1950, fato que possivelmente provocou alterações no regime hidrológico do rio Ivaí.

Maior ênfase tem sido dada ao baixo curso em trabalhos relacionados aos processos hidrossedimentares. Biazin, (2005); Kuerten (2006); Barros (2006), realizaram estudos acerca do regime hidrológico, climático, da dinâmica sedimentar e das alterações dessas variáveis frente às ações antrópicas em sua bacia de drenagem; Geologia e Geomorfologia de sua planície aluvial. Santos et al, (2008), segundo os autores a planície aluvial do rio Ivaí mostra por intermédio de suas diferentes unidades morfoestratigráficas e referentes associações faciológicas a complexa evolução da arquitetura aluvial. Escavada sobre as litologias da Formação Caiuá, teve sua evolução associada a estruturação da bacia hidrográfica do rio Paraná, provavelmente já a partir do Terciário.

Sobre a Geomorfologia Fluvial, Morais (2010), analisou a evolução da planície de inundação e confluência do rio Ivaí e rio Paraná. Os resultados encontrados atestam uma diversidade de ambientes na construção da Planície Paraná-Ivaí e uma dinâmica espacial da confluência durante o Pleistoceno Recente. Sobre solos aluviais no curso inferior do sistema fluvial, Sala (2014), elaborou um Mapa de Unidades Geoambientais da margem esquerda da planície aluvial do rio Ivaí. Por meio desta pesquisa confirmou-se que todas as unidades geoambientais apresentam potencialidades quanto ao uso, principalmente agrícola voltados para o cultivo de arroz e a pecuária. Porém, a predisposição a períodos de alagamento e os solos rasos são fatores limitantes para outras modalidades de cultura, fatores que também imprimem certa fragilidade ambiental nessas unidades. Sobre regime e sistemas de controle das cheias do baixo Ivaí e cartografia das áreas inundáveis, Douhi (2013), definiu os limites espaciais inundados na planície aluvial por meio da elaboração de uma carta de inundação. A análise das cotas de inundação permitiram identificar os valores de maior relevância espacial e o tempo de recorrência para cada evento extremo.

3.1 Os Modelos Matemáticos e sua Importância

Explicar as interações existentes entre os componentes de um sistema dinâmico não é uma tarefa fácil. Tal dificuldade está em mensurar a organização do mesmo acima da enumeração, ou seja, da junção de elementos que, por vezes não se apresentam de forma linear (previsível) no tempo e no espaço. Para analisar tais sistemas tem sido crescente a adoção de modelos para melhorar a compreensão dos processos ambientais.

O avanço da tecnologia da informática, o processamento e integração de dados e geração de cenários reais ou hipotéticos possibilitaram o surgimento de novas perspectivas para a análise dinâmica desses processos. A adoção de modelos matemáticos bem como sua operacionalização tem sido apoiada pelo desenvolvimento dos Sistemas de Informação Geográfica (SIG), onde o usuário tem a possibilidade de optar em utilizar uma interface que lhe instrumentalizem, e que melhor represente à dinâmica do processo ou fenômeno estudado.

É possível discernir a possibilidade de criação de estruturas de dados particulares, que se destinem a representar sistemas e permitir seu estudo. Estas estruturas de dados são os modelos e podem assumir diversas formas e níveis de complexidade. São exemplos os “diagramas, os fluxogramas funcionais, os procedimentos de álgebra de mapas, as equações matemáticas, as bases de dados georreferenciados, bem como as abordagens computacionais mais complexas para a simulação de sistemas e processos ambientais” (SILVA, 2007, p. 34).

Modelos ambientais são representações matemáticas criadas para representar fenômenos ou processos do mundo real. Estes modelos são simplificações da realidade, de onde se abstraem os elementos mais importantes para uma aplicação, e são construídos a partir da observação dos dados espaciais e seus relacionamentos. Os modelos ambientais são usados para aumentar o conhecimento sobre um processo, prever valores ou comportamentos em áreas não observadas e comprovar, ou não, hipóteses feitas sobre processos (MOORE et al, 1993).

A argumentação segundo Van Deursen (1995), sobre modelos matemáticos revela o estado e a dinâmica de um sistema (a paisagem) em uma determinada configuração (dinâmico ou estático) utilizando equações matemáticas. Ressalta também que a modelagem ambiental é uma importante ferramenta para a obtenção de informações quantitativas para planejamento e avaliação dos recursos da terra e da água em conjunto. Os resultados de tal modelagem podem levar a uma melhor compreensão da dinâmica da paisagem, porque eles esclarecem sobre como processos como a erosão do solo ou o transporte de poluentes podem modificar a paisagem.

Os modelos são aproximações da realidade, devendo possuir como características a simplicidade – facilidade de compreensão pelos usuários, a representatividade – descrevendo o processo que se deseja representar, e a precisão – bom índice de correlação estatística (CHECCHIA, 2005). De acordo com Moore et al, (1993), estes modelos variam de equações empíricas simples, tais como, equações de regressão linear, até conjuntos de equações diferenciais complexas derivadas dos fundamentos da física.

Os modelos surgiram da necessidade de representar os processos físicos da natureza analisando os fenômenos inerentes aos elementos constituintes de um sistema estabelecendo relações entre os mesmos para análise e simulação de cenários. Um modelo, segundo Tucci, (2005), é a representação de algum objeto ou sistema, numa linguagem de fácil acesso e uso, com o objetivo de entendê-lo e buscar suas respostas para diferentes entradas, ou, de maneira mais direta, é uma representação do comportamento do sistema.

A modelagem tem crescido significativamente como uma atividade de pesquisa desde os anos de 1950, refletindo desenvolvimentos conceituais nas próprias técnicas de modelagem, desenvolvimento tecnológico em computação, desenvolvimentos científicos em resposta à necessidade crescente de sistemas para estudar (especialmente os ambientes) de forma integrada, e um aumento da demanda por extrapolação (especialmente previsão) no espaço e no tempo (MULLIGAN; WAINWRIGHT, 2004, p.8).

Esses autores ressaltam ainda que a modelagem tornou-se uma das mais poderosas ferramentas para cientistas ambientais para uma melhor compreensão das interações entre o ambiente, os ecossistemas e as populações de seres humanos e outros animais. Este entendimento é cada vez mais importante em termos ambientais (monitoramento e gestão) e o desenvolvimento de meios cada vez mais sustentáveis de dependência humana em sistemas ambientais.

A modelagem deve considerar que os processos da natureza resultam de interações espaço-temporais complexas entre os diversos elementos que os compõem, ou seja, as propriedades ambientais. No modelo matemático de um processo, as propriedades ambientais são tratadas como variáveis do modelo enquanto que suas inter-relações são representadas por operações aritméticas ou lógicas (FELGUEIRAS, 2001).

O uso desses sistemas computacionais é crescente para a representação de ambientes. Isto se deve, exatamente, à capacidade que possuem de considerar, de forma integrada, a variabilidade taxonômica, a expressão territorial e as interações temporais verificáveis em uma base de dados georreferenciada (SILVA, 2007, p. 24).

Os processos ambientais no mundo real são, tipicamente, tridimensionais, dependentes do tempo e complexos. Segundo Steyaert (1993), essa complexidade pode incluir comportamento não linear, componentes estocásticos e realimentações em múltiplas escalas de tempo e de espaço. Assim sendo, a natureza espaço temporal dos fenômenos ambientais, devido a sua importância para compreensão do fenômeno em estudo, coloca algumas questões à modelagem ambiental. Estas questões se referem a criação de modelos matemáticos e computacionais com representações, uma vez que o fenômeno deve ser, de alguma forma, representado.

As intensidades com que os fenômenos hidrológicos ocorrem, podem ser postas como funções do tempo, ou do espaço, ou de ambos, em escalas geográficas diversas que vão desde a global até a local, passando pela escala usual da bacia hidrográfica. A tais funções associa-se o conceito de processos hidrológicos. Os processos associados ao ciclo hidrológico podem ser classificados, grosso modo, em determinísticos ou estocásticos embora, em geral, sejam, de fato, uma combinação de ambos (NEGHETTINI e PINTO, 2007, p. 3).

Os modelos hidrológicos procuram representar a parte terrestre do ciclo hidrológico, transformando a precipitação que cai sobre a bacia em vazão numa determinada seção de um rio.

O conhecimento foi inicialmente fragmentado pela análise de cada um dos processos, como a avaliação da precipitação, interceptação vegetal, evapotranspiração, infiltração e percolação, balanço de água nas camadas superior e inferior do solo e o escoamentos superficial, sub-superficial, subterrâneo e em rios, canais e lagos. Os modelos vieram para integrar todos estes processos de forma a obter variáveis intermediárias e de saída da bacia como a vazão (TUCCI, 2010, p.2).

Ainda neste contexto, para Rennó e Soares (2000), a bacia hidrográfica é o objeto de estudo da maioria dos modelos hidrológicos. Pode constituir a unidade espacial para modelos agregados que consideram as propriedades médias para toda a bacia. Segundo Schiavetti e Camargo (2002), na perspectiva de um estudo hidrológico, o conceito de bacia hidrográfica envolve explicitamente o conjunto de terras drenadas por um corpo d'água principal e seus afluentes e representa a unidade mais apropriada para o estudo qualitativo e quantitativo do recurso água e dos fluxos de sedimentos e nutrientes.

Os modelos hidrológicos são representações matemáticas, que através de conjuntos de equações buscam descrever o comportamento de uma bacia hidrográfica. Estes consistem em instrumentos tecnológicos de grande utilidade nos estudos sobre o comportamento de bacias hidrográficas, seja este comportamento referente a uma variável isolada do ciclo hidrológico ou a várias delas, em conjunto (MEIRA NETO; FONTES; MEDEIROS, 2011).

Os modelos são classificados, dentre outras formas, de acordo com o tipo de variáveis utilizadas na modelagem (estocásticos ou determinísticos), o tipo de relações entre essas variáveis (empíricos ou conceituais), a forma de representação dos dados (discretos ou contínuos), a existência ou não de relações espaciais (pontuais ou distribuídos), e a existência de dependência temporal (estáticos ou dinâmicos). (RENNÓ; SOARES, 2000, p.6).

Os processos hidrológicos determinísticos são aqueles que resultam da aplicação direta de leis da Física, Química ou Biologia.

Em hidrologia, são raríssimas as ocorrências das regularidades inerentes aos processos puramente determinísticos, nos quais as variações espaço-temporais podem ser completamente explicadas por um número limitado de variáveis, a partir de relações funcionais ou experimentais unívocas. A resposta hidrológica de uma superfície completamente impermeável, de geometria simples e totalmente definida, a um pulso conhecido, uniforme e homogêneo de precipitação, pode ser considerado um raro exemplo de um processo hidrológico puramente determinístico (NAGUETTINI e PINTO, 2007, p.3).

Um modelo é dito estocástico quando pelo menos uma das variáveis envolvidas tem comportamento aleatório. Caso os conceitos de probabilidade sejam negligenciados durante a elaboração de um modelo, este será denominado determinístico. Note, no entanto, que uma variável de entrada pode ser aleatória, mas o modelo ainda assim é determinístico quando cada valor de entrada produz um único valor de saída. “Sistemas multivariados não-lineares podem levar a resultados caóticos que erroneamente são interpretados como variáveis aleatórias” (RENNÓ e SOARES, 2000, p 6).

Quase todos os processos hidrológicos são considerados estocásticos, ou governados por leis de probabilidades, por conterem componentes aleatórias as quais se superpõem a regularidades eventualmente explicitáveis, tais como as estações do ano ou às variações da radiação solar no topo da atmosfera ao longo da órbita da Terra em torno do Sol. Nesse sentido, em um dado ponto do espaço geográfico, são considerados processos hidrológicos estocásticos a precipitação, a evapotranspiração, os escoamentos superficial e subsuperficial, os afluxos de sedimento em suspensão, as concentrações de oxigênio dissolvido, as conformações do leito fluvial, as temperaturas da água, as capacidades de infiltração, dentre tantos outros (NAGUETTINI; PINTO, 2007, p.4).

Ainda neste contexto, de acordo com Tucci (1998), os modelos empíricos utilizam funções matemáticas ou advindas de ajustes estatísticos visando à melhor representação da saída com base na entrada. Segundo Rennó e Soares (2000, p.7), “os modelos podem ser empíricos, quando utilizam relações baseadas em observações. No entanto, são pouco robustos, uma vez que são específicos para aquela região para qual as relações foram estimadas”.

Os modelos podem ser também baseados em processos (modelos conceituais) e, em geral, são “mais complexos que os empíricos, uma vez que procuram descrever todos os processos que envolvem determinado fenômeno estudado” (RENNÓ e SOARES, 2000, p.7).

Conforme Tucci (1998), os modelos são ditos conceituais quando levam em consideração os conceitos físicos relacionados aos processos hidrológicos.

Apesar dos fenômenos naturais variarem continuamente no tempo, na maioria das vezes, estes fenômenos são representados por modelos discretos. A escolha do intervalo de tempo (passo) no qual o modelo será executado depende basicamente do fenômeno estudado, da disponibilidade de dados e da precisão desejada nos resultados. Em geral, “quanto menor o intervalo de tempo maior será a precisão dos resultados, aumentando também o custo computacional para geração destes resultados” (RENNÓ e SOARES, 2000, p 7).

Os modelos podem ainda ser classificados como pontuais (concentrados ou agregados) ou distribuídos. Em modelos pontuais, considera-se que todas as variáveis de entrada e saída são representativas de toda área estudada. Por outro lado, os modelos distribuídos consideram a variabilidade espacial encontrada nas diversas variáveis do modelo. De maneira geral, “alguma discretização do espaço é feita e conseqüentemente cada elemento pode ser tratado como um ponto que representa homogeneamente toda sua área. Modelos distribuídos mais realísticos consideram também a existência de relação espacial entre elementos vizinhos” (RENNÓ e SOARES, 2000, p.7).

Finalmente, de acordo com os autores, os modelos podem ser estáticos quando, com um conjunto de dados de entrada produz-se um resultado oriundo da resolução das equações do modelo em um único passo. Já modelos dinâmicos utilizam o resultado de uma interação como entrada para uma próxima interação.

Diversos modelos têm sido desenvolvidos para estimar a produção de sedimentos, quantidade e qualidade da água na escala da bacia hidrográfica, entre os quais podem ser citados o modelo KINEROS – *KINematic runoff and EROsion*, o TOPMODEL – *Topography Based Hydrological Model*, o modelo WEPP – *Water Erosion Prediction Project* e o modelo SWAT – *Soil and Water assessment Tool*.

O modelo KINEROS segundo Woolhiser, Smith e Goodrich (1990), é um modelo físico que descreve os processos de interceptação, infiltração, escoamento superficial e erosão em pequenas bacias agrícolas e urbanas. O modelo considera a superfície da bacia hidrográfica sendo representada por um conjunto de elementos (planos e canais) equivalentes à topografia da mesma. Cada plano (encosta) e canal podem ser descritos por seus parâmetros específicos. As equações diferenciais parciais que descrevem o escoamento superficial são

resolvidas por meio de técnicas de diferenças finitas, sendo possível considerar a variabilidade espacial dos parâmetros relativos à precipitação, infiltração, escoamento superficial e erosão.

A simulação é feita para eventos específicos de chuva, com intervalos de tempo em minutos. O TOPMODEL é um modelo de transformação de chuva em vazão do tipo conceitual e distribuído, o qual utiliza relações físicas para representar bacias hidrográficas e seus processos hidrológicos. Dentre as variáveis de entrada requeridas no modelo, a precipitação e a evapotranspiração potencial são consideradas homogêneas em toda a bacia, devendo-se assumir valores médios para as mesmas (BEVEN et al, 1995).

O modelo utiliza, efetivamente, a evapotranspiração real, a qual é calculada em função da evapotranspiração potencial e da umidade armazenada na zona radicular das plantas. Com base no índice topográfico e nas variáveis de entrada, o modelo faz a simulação da dinâmica do escoamento superficial provindo das áreas de contribuição. Possibilita, ainda, o cálculo da vazão numa determinada seção de um curso d'água, considerando a bacia hidrográfica como um todo, ou subdividindo-a em várias sub-bacias.

O WEPP, de acordo com Flanagan e Frankenberger (2002), é um modelo baseado em processos físicos, constitui-se em um pacote tecnológico desenvolvido por um programa da USDA, órgãos estaduais e agências locais, consultores privados individuais e outras organizações norte-americanas ligadas ao planejamento e avaliação dos recursos naturais.

Flanagan et al., (2013) ressalta que o WEPP é um modelo de previsão de erosão do solo baseado em processos físicos que inclui, além do modelo básico que simula processos físicos fundamentais (incluindo infiltração e destacamento de solo), uma série de interfaces de programas e de bases de dados que permitem a aplicação na engenharia, planejamento ambiental e conservação do solo.

A análise pode ser realizada dividindo-se a bacia hidrográfica em regiões homogêneas de geração de escoamento superficial, ou por meio do GeoWEPP, o qual possibilita o uso do WEPP associado ao Modelo Digital de Elevação, sendo as regiões homogêneas delimitadas automaticamente com o uso de recursos do ArcGis. O GeoWEPP foi desenvolvido para gerar uma série de interfaces para os usuários, facilitando a utilização de diferentes fontes de dados (RENSCHLER, 2002).

Conforme Neitsch et al, (2011), o SWAT é um modelo matemático de parâmetros distribuídos, que incorpora as características de vários outros modelos. O modelo permite que diferentes processos físicos sejam simulados em bacias hidrográficas. Possui o objetivo de analisar os impactos das alterações no uso do solo sobre o escoamento superficial e subterrâneo, produção de sedimentos e qualidade da água em bacias hidrográficas agrícolas

não monitoradas. O modelo opera em intervalos de tempo diários e possibilita a simulação de muitos anos, porém, não permite a simulação de eventos isolados.

Com diversas atualizações e revisões o modelo SWAT possui como principais características, segundo Adriolo et al, (2008):

Trata-se de um modelo de base física que requer informações específicas sobre o clima, propriedades do solo, topografia, vegetação e práticas de gestão de solo que ocorram na bacia hidrográfica. Os processos físicos associados à movimentação hídrica, movimentação sedimentar, crescimento das plantas, ciclo de nutrientes, etc. São diretamente moldados pelo modelo SWAT usando estes dados de entrada. Esta primeira característica denota sua capacidade de simulação em bacias sem monitoramento, ou seja, favorecendo resultados realistas; utiliza dados normalmente disponíveis: os dados mínimos necessários para análise geralmente estão disponíveis nas agências governamentais;

Computacionalmente eficiente, é capaz de simular bacias de diferentes tamanhos com estabelecimento de diferentes cenários e estratégias de manejo da terra, por longos períodos, com baixo investimento de capital e tempo; é um modelo contínuo no tempo favorecendo as simulações de longos períodos.

O modelo SWAT vem sendo aplicado em vários países do mundo, por profissionais de diversas áreas, em bacias hidrográficas de diferentes ordens e complexidades para análise de produção de sedimentos, vazão, qualidade da água entre outros. O SWAT foi elaborado originalmente para aplicação em bacias de grandes áreas, no entanto a existência de poucas estações climatológicas pode restringir a coerência dos resultados, ainda mais quando a bacia apresenta grande variação de altitude e latitude.

Mishra et al, (2007), simularam a vazão e a quantidade de sedimentos por meio do modelo SWAT na bacia hidrográfica do rio Banha, no nordeste da Índia. Com base nos tipos de uso do solo das sub-bacias delimitadas pelo modelo, os autores compararam os parâmetros chuva, vazão e sedimentos através do método de análise de regressão. Atestaram que as sub-bacias que possuem maiores percentuais de área coberta com mata nativa apresentaram maior controle sobre a vazão e a produção de sedimentos, e assim, possuem melhor proteção contra aos processos erosivos. No entanto, as sub-bacias com expressivas áreas de cultivo de arroz possuem baixa taxa de infiltração gerando elevados índices de vazão e de produção de sedimentos. Assim sendo, as simulações realizadas por meio da aplicação do modelo SWAT mostraram que os valores de vazão e produção de sedimentos são fortemente influenciados pelas características da bacia e o uso do solo.

Adriolo et al, (2008), aplicaram o modelo SWAT na bacia hidrográfica do rio Apucarantina (504 km²) no norte do estado do Paraná visando a calibração do modelo SWAT para a produção e transporte de sedimentos. Os resultados obtidos permitiram avaliar a viabilidade de utilização de modelagem distribuída de base física para a simulação das condições de produção e transporte de sedimentos na bacia.

De acordo com Baldissera (2005), esse modelo foi aplicado na bacia hidrográfica do rio Cuiabá/MT (29.000 km²) para a simulação das vazões de água na bacia em diferentes cenários: I - com reservatório originado pelo fechamento de uma barragem; II- com 100% de vegetação natural. A autora ressalta que para a simulação hidrológica em diferentes cenários é necessário um levantamento detalhado das características físicas dos solos permitindo assim uma simulação mais confiável dos cenários em função do uso e cobertura da terra.

Por conseguinte Uzeika, (2009), utilizou o modelo SWAT na bacia hidrográfica de Arvorezinha (1,19 km²), no Rio Grande do Sul, para diferentes cenários de uso e cobertura da terra: vegetação nativa, condição de uso do solo com manejo tradicional (aração) e no terceiro cenário a técnica de manejo do solo do cultivo mínimo e sucessão entre fumo no verão e aveia no inverno. Os resultados mostraram que o primeiro cenário não apresentou volumes significativos de escoamento superficial e de produção de sedimentos e que o escoamento superficial foi mais acentuado no segundo e terceiro cenários, com destaque para o segundo cenário que apresentou um índice de escoamento superficial 40% mais elevado que o terceiro. Os resultados demonstraram que as práticas de manejo do solo são importantes como medidas de controle dos processos erosivos.

Em estudos de Souza, Santos e Kobiyama (2009), o modelo SWAT foi adotado como ferramenta na concessão de outorga de direito de uso dos recursos hídricos na bacia hidrográfica do Altíssimo Rio Negro (787,8 km²) localizada ao norte do estado de Santa Catarina e ao sul do estado do Paraná. Os resultados indicam grande variação espacial das vazões simuladas, notadamente para as vazões mínimas e nas sub-bacias com área de drenagem inferior a 100 km². Como geralmente estas bacias pequenas não são monitoradas, a modelagem torna-se uma ferramenta útil na gestão de recursos hídricos. A sua característica do SWAT de modelo distribuído permite ao órgão responsável pela concessão da outorga obter o comportamento das vazões em diversos pontos da bacia, possibilitando assim uma concessão embasada em dados mais precisos.

3.2 A Modelagem Ambiental em Ambiente SIG

Historicamente, a tecnologia de Geoprocessamento enfatizou a representação de fenômenos espaciais no computador de forma estática. Isto se deve ao fato de que a principal abstração utilizada em Sistemas de Informações Geográficas é o mapa. No entanto, um significativo conjunto de fenômenos espaciais, tais como: “escoamento da água da chuva, planejamento urbano e dispersão de sementes, entre outros – são inerentemente dinâmicos, e as representações estáticas comumente utilizadas em SIG não os capturam de forma adequada” (PEDROSA e CAMARA, 2007, p. 237).

Os Sistemas de Informação Geográfica (SIGs) têm se consolidado como ferramentas imprescindíveis à aquisição, modelagem, integração e armazenamento de dados referenciados espacialmente, auxiliam na combinação e sintetização de variáveis distintas apresentando alto grau de confiabilidade. De acordo com Burrough e McDonnell (1998), o SIG é por definição um conjunto poderoso de ferramentas para coleta, armazenamento, recuperação, transformação e apresentação de dados espaciais do mundo real para um conjunto particular de propósitos.

Estas definições de SIG refletem segundo Câmara, Davis e Monteiro (2001), cada uma à sua maneira, a multiplicidade de usos e visões possíveis desta tecnologia e apontam para uma perspectiva interdisciplinar de sua utilização. Conforme estes autores, as principais características dos SIGs são:

Inserir e integrar, numa única base de dados, informações espaciais provenientes de dados cartográficos, dados censitários e cadastro urbano e rural, imagens de satélite, redes e modelos numéricos de terreno;

Oferecer mecanismos para combinar as várias informações, através de algoritmos de manipulação e análise, bem como para consultar, recuperar, visualizar e plotar o conteúdo da base de dados georreferenciados.

A Figura 10 indica o relacionamento dos principais componentes ou subsistemas de um SIG. Cada sistema, em função de seus objetivos e necessidades, implementa estes componentes de forma distinta, mas todos os subsistemas citados devem estar presentes num SIG.

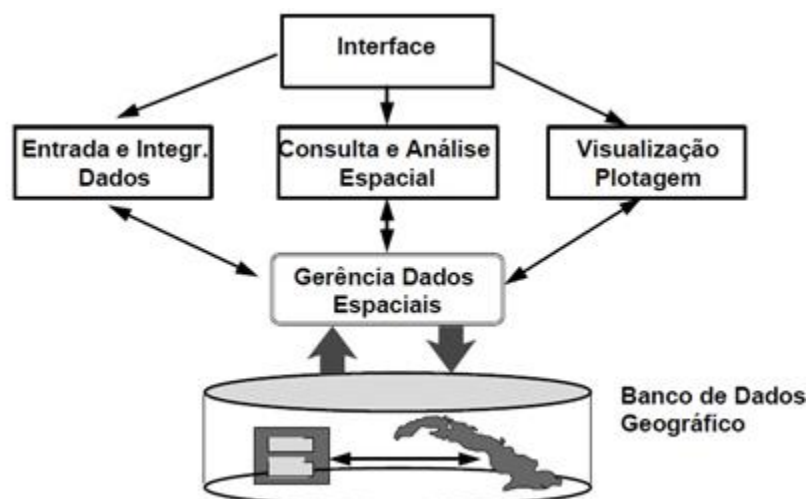


Figura 10 - Estrutura Geral de Sistemas de Informação Geográfica
 Fonte: Câmara, Davis e Monteiro (2001).

De acordo com a análise da figura entende-se que a potencialidade principal de um SIG está na sua capacidade de realizar análises complexas a partir da integração, em uma base de dados única, de representações de dados espaciais.

Um dado espacial é caracterizado por sua posição espaço-temporal, (x, y, z, t) , e por atributos a ele associados. Um dado de temperatura, por exemplo, pode ser observado em várias posições do espaço tridimensional (x, y, z) e em diferentes períodos de tempo (t) . As medidas de temperatura são os valores do atributo observado em posições desse sistema espaço-temporal (FELGUEIRAS, 2001, p. 38).

Os procedimentos de análise espacial, desenvolvidos no ambiente de um SIG, possibilitam, no estágio tecnológico atual, a análise de processos, alguns simples e outros mais complexos, do mundo real. Para isto é necessário a criação de modelos ambientais, que representem adequadamente o fenômeno natural em estudo (FELGUEIRAS, 2001).

O conceito metodológico básico de um SIG é a utilização de uma chave espacial inequívoca (*spatial key geocode*) que reúne informações temáticas e de localização, denominada geodados, com a ajuda da qual todos os fenômenos geográficos na superfície da Terra podem ser relacionados entre si. A grande vantagem desse princípio consiste no fato de que objetos das mais diferentes categorias podem ser integrados por meio dessa chave espacial, são determinados os processos que ocorrem no espaço, e assim, eles se tornam aparentes (LANG; BLASCHKE, 2009).

A representação em ambiente digital abrange procedimentos de discretização e quantificação de atributos que integram processos reais contínuos no tempo e no espaço, por isso a importância de estruturas computacionais (SIGs) que representem essa continuidade no

comportamento dos atributos e/ou os fenômenos a que estão propensos. Os modelos computacionais são organizados com base nessas estruturas, por meio das quais os geodados podem ser inseridos, manipulados e integrados.

Atualmente, modelos computacionais simples são executados diretamente nos SIGs através de operações básicas, lógicas e aritméticas, contidas nos seus módulos de análise ou de álgebra de dados espaciais. Modelos complexos são, muitas vezes, executados fora do ambiente do SIG, por sistemas de modelagem específicos. Nestes casos, os SIGs são usados como base de armazenamento de dados espaciais e também como ferramentas de visualização para os dados de entrada e de saída dos modelos (FELGUEIRAS, 2001).

3.3 A Modelagem e a Representação da Dinâmica dos Sistemas Ambientais

De acordo com Meirelles, Camara e Almeida (2007), torna-se necessário considerar o ambiente como um sistema, isto é, uma entidade que tem expressão espacial, a ser modelada segundo sua variabilidade taxonômica e a distribuição territorial das classes de fenômenos nela identificados como relevantes. Ainda mais, deve ser levada em conta a dinâmica daqueles sistemas ambientais, dinâmica esta a ser retratada segundo uma sucessão de instâncias escolhidas para representar a evolução (alteração) do ambiente em uma determinada faixa de tempo.

Von Bertalanffy (1973), define sistema como “conjunto de elementos em interação”. Podem ser fechados, isto é, sistemas que são considerados estarem isolados de seu ambiente e abertos que, trocam energia e matéria com o ambiente. Segundo esse autor, sistemas fechados são aqueles em que o estado final é inequivocadamente determinado pelas condições iniciais. Desta forma, se as condições iniciais ou o processo forem alterados o estado final também será modificado. Isto porém, não é o que acontece nos sistemas abertos. Nestes o mesmo estado final pode ser alcançado partindo de diferentes condições iniciais e por diferentes maneiras.

Um sistema é um conjunto de objetos relacionados e os processos que apontam esses objetos juntos. Referindo-se aos sistemas fluviais, objetos, como encostas, a rede de canais e várzeas estão ligados entre si pelos processos que movem a água e sedimento entre eles. Em comum com outros sistemas, o sistema fluvial é hierárquico, em que existem sub-sistemas integrados que operam dentro dele (CHARLTON, 2008).

No caso de um sistema aberto como a bacia hidrográfica, foco desta pesquisa, em que há uma intensa troca de energia e matéria (entradas e saídas) ocorre uma forte interação entre

o sistema atmosférico, o substrato rochoso, o relevo, solo, a cobertura vegetal e as atividades econômicas básicas. Estas últimas são as que têm acarretado maiores modificações no funcionamento do sistema como um todo, principalmente, em decorrência das mudanças do uso e ocupação do solo.

De acordo com Kemp (1993), a dinâmica dos sistemas hidrológicos e atmosféricos da Terra implica que todos os sistemas ambientais estão fortemente inter-relacionados, dinâmica e espacialmente. Impactos em um único local, geralmente, têm efeitos em outros. Dados espaciais, sistemas de gerenciamento de dados e técnicas analíticas para a conversão desses dados em informações são ferramentas vitais na avaliação e gerenciamento de ambientes naturais.

O sistema fluvial é controlado por fatores bem conhecidos que influenciam os processos de erosão e deposição, a saber: 1) a geologia (rocha e tectônica) 2) clima (precipitação e temperatura); 3) relevo; 4) cobertura vegetal; 5) solo (textura, permeabilidade, capacidade de armazenamento, erodibilidade); Este controle é complexo e muitas vezes uma variável está relacionada a vários outros fatores. Em nível qualitativo o aumento da precipitação ou relevo geralmente aumenta a atividade dos processos erosivos, considerando que a sua diminuição reduz a erosão e promove a deposição. Estes fatores podem ser influenciados por alterações climáticas ou pelo impacto humano. O sinal e intensidade das reações do processo para as mesmas mudanças nos fatores de controle podem ser diferente em diferentes partes do sistema fluvial (WAINWRIGHT et al, 2003, p. 22).

Segundo esses autores a erosão do solo pelo escoamento superficial é um processo significativo sobre grandes áreas da Terra. Isso leva ao desenvolvimento de formas de relevo específicas em curtas ou longas escalas tempo. Em alguns casos, a paisagem pode ser dramaticamente alterada em questão de horas, como resultado de um evento tempestade extrema. Compreender a erosão do solo é, portanto, fundamental para ser capaz de explicar a geomorfologia dessas áreas.

O escoamento superficial do terreno, é um processo natural, que, associado a extensão do comprimento de rampa e ao grau de declividade das vertentes pode ser fator determinante na fragilidade dos terrenos frente aos processos erosivos. Para Bigarella e Mazuchowski (1985), o escoamento superficial desempenha um papel decisivo no mecanismo erosivo e a intensidade do fenômeno depende da velocidade, isto é, onde as vertentes são mais íngremes podem acentuar a velocidade do escoamento. Segundo Cunha (1995), uma encosta com baixa declividade e comprimento de rampa, também pode ser vulnerável aos processos de erosão quando submetida a uma grande vazão de escoamento de águas superficiais, esse fator pode ocorrer dependendo das características de uso da área.

De acordo com Charlton (2008), se a intensidade da precipitação excede a capacidade de infiltração, o solo não pode absorver toda a água e há excesso na superfície movendo para

o baixo declive como escoamento superficial, mais especificamente, fluxo por terra ou Hortoniano. Como a definição de Horton implica que propriedades do solo controlam a capacidade de infiltração; estes incluem a permeabilidade do solo, a presença de vegetação e raízes de plantas e a quantidade de água já existente no solo.

De acordo com Beven (2004), Robert Elmer Horton (1875-1945) é comemorado na literatura hidrológica como o criador da ideia de que a água das enxurradas é primariamente resultado do escoamento superficial gerado por um excesso de precipitação sobre a capacidade de infiltração do solo. Para Horton (1933), a infiltração divide a precipitação em duas partes, que prosseguem diferentes cursos através do ciclo hidrológico. Uma parte vai via fluxo em canais para o mar; a outra vai, inicialmente, para o solo e daí através da água subterrânea novamente para o fluxo ou então volta à atmosfera por meio do processo de evaporação.

O mecanismo de saturação proposto por Horton (1933), ocorre quando a intensidade da precipitação excede a condutividade hidráulica dos solos. O teor de umidade na superfície aumenta como uma função do tempo e, num dado momento, a superfície torna-se saturada e uma zona de saturação invertida começa a propagar pelo solo na vertente. Neste momento, a taxa de infiltração cai abaixo da taxa de precipitação e escoamento superficial é produzido.

O fluxo por terra ou processo de escoamento superficial acontece sempre que parte, ou até mesmo o total da água precipitada, deixa de infiltrar. As principais razões do escoamento superficial são a baixa densidade, ou ausência da cobertura vegetal; a declividade, quando permite o desenvolvimento da componente paralela; o comportamento do material de superfície; a “capacidade de campo”; a intensidade e duração das chuvas, dentre outras variáveis (CASSETI, 2005).

Como a maioria dos processos naturais, a saturação do solo e o escoamento superficial associado são afetados pela variabilidade da natureza.

Alguns processos naturais prestam-se ao tratamento em grandes quantidades, com processos caracterizados pelos parâmetros que representam o efeito de soma de muitas variações de menor escala. O escoamento tende, no entanto, a ser um processo não-linear em muitos locais, e muitas vezes é afetado pelas variações espaciais naturais na escala de uma ordem de grandeza menor do que a escala de interesse. Variações em pequena escala em condições de superfície ou condições de solo dentro de uma bacia hidrográfica podem dificultar a representação de processos de geração de escoamento por parte da matemática (SMITH e GOODRICH, 2005, p.1715).

O escoamento superficial é processo e ao mesmo tempo produto. É processo quando há a remoção de partículas de solo e o conseqüente transporte até um canal de drenagem com

incremento no aporte de sedimentos, produto ao passo que é resultado da saturação do solo, que após um período de precipitação excede sua capacidade de infiltração e percolação (componente vertical) deixando o excesso de água disponível para a componente paralela.

Horton (1933), descreve quantitativamente os mecanismos que ocasionam o escoamento superficial a partir da intensidade da precipitação e da capacidade de infiltração do solo. Para Hornberger et al, (1998), o escoamento superficial ou hortoniano refere-se ao processo de escoamento gerado em perfis de solos alterados por ações antrópicas ou compactados por pisoteio de animais ou ainda em locais onde a densidade de vegetação é baixa, fazendo com que as taxas de infiltração sejam inferiores a intensidade da precipitação.

A produção de sedimentos e o assoreamento dos rios, lagos e reservatórios são fortemente influenciados pela erosão hídrica e escoamento superficial das águas das chuvas, bem como, pela característica do transporte de sedimentos nos canais de drenagem (TUCCI, 2007). Portanto, a modelagem da dinâmica do escoamento superficial pode ser de grande importância para o gerenciamento dos recursos hídricos e prever os efeitos das mudanças no uso e cobertura da terra em bacias hidrográficas.

Machado (2002), ressalta que uma das técnicas mais utilizadas para estimar o volume do escoamento superficial em bacias hidrográficas é a desenvolvida pelo *Soil Conservation Service – SCS do United States Department of Agriculture – USDA* dos Estados Unidos da América, denominado de método da Curva Número ou CN. De acordo com Grove (1998), o CN é baseado na relação entre a intensidade da precipitação, condições de superfície do solo e volume de escoamento superficial, sendo o CN uma função do uso e cobertura da terra, condições hidrológicas e grupo hidrológico do solo e condições de umidade antecedente.

Devido ao fato de ser facilmente aplicado e requerer a inserção de apenas quatro parâmetros, o método CN vêm sendo utilizado em modelos hidrológicos complexos como o SWAT, empregado neste trabalho. Segundo Beskow et al, (2009), a estimativa do escoamento superficial em bacias hidrográficas é de suma importância para conservação dos recursos naturais; entretanto, esse é um processo complexo e dinâmico, principalmente no contexto de sua variabilidade espacial.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

A realização desta pesquisa teve como base a aquisição, sistematização, correlação e interpretação dos dados que consistiram em:

a) Revisão bibliográfica: nesta etapa foram levantadas informações sobre a temática em diferentes meios, assim como informações referentes a trabalhos produzidos sobre a área de estudo que pudessem contribuir para a pesquisa;

b) Trabalho de gabinete: representou a elaboração da base cartográfica com a manipulação das imagens de radar (SRTM) para a elaboração do Modelo Digital de Elevação e da declividade, aquisição de dados cartográficos para posterior elaboração dos mapas geológico, geomorfológico, de clima, vegetação original e hidrográfico. Levantamento de imagens de satélite para elaboração do mapa de uso e ocupação do solo. Nesta etapa também foi realizado o levantamento de dados climáticos da área por meio da aquisição das séries históricas de várias estações distribuídas pela área de estudo;

c) Análise, preparação, sistematização e interpretação dos dados: compreende as etapas de análise dos dados de entrada no modelo hidrológico (uso e ocupação do solo e tipos de solo), cálculo das variáveis climáticas para preparação do banco de dados climático (WGEN), geração do modelo, interpretação dos resultados obtidos com a simulação e redação da tese.

As etapas da pesquisa, bem como as principais metodologias aplicadas, estão representadas de forma sintética no fluxograma das etapas de realização, que serviu de orientação para o desenvolvimento da pesquisa (Figura 11).

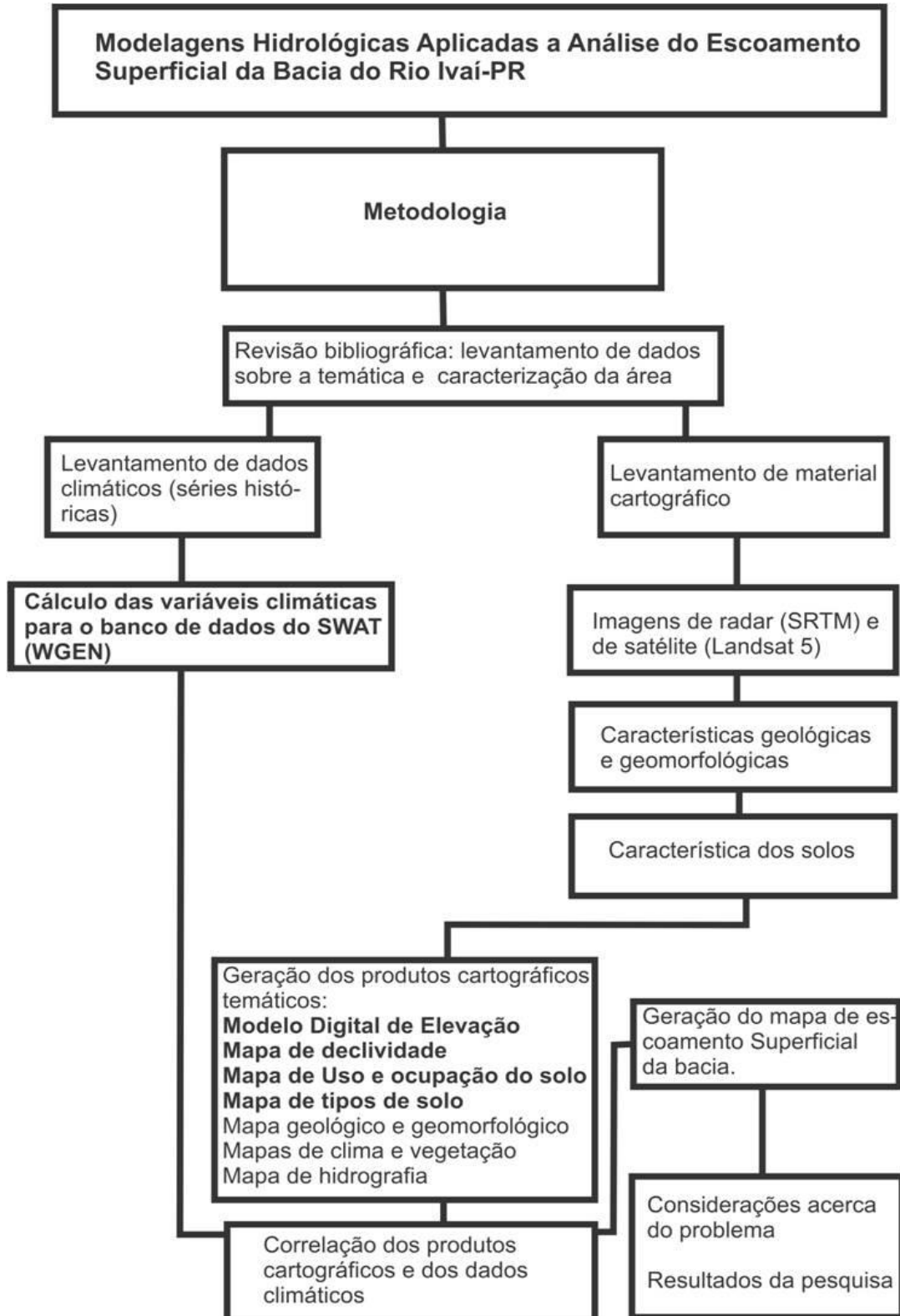


Figura 11 - Fluxograma com as etapas de realização da pesquisa.

A efetivação desta pesquisa se deu por meio da utilização/comparação de modelos hidrológicos aplicados na análise de bacias hidrográficas considerando as características físicas, climáticas e de uso e cobertura da terra e a influência na dinâmica do escoamento superficial da área de estudo. Foram elaborados produtos cartográficos para subsidiar as entradas (*inputs*) no modelo, tais como: Modelo Digital de Elevação (MDE), carta de uso e cobertura da terra, de declividade, geomorfológica e de tipos de solo, todos na escala 1:250.000, além da análise das características climáticas da área de estudo integrando, assim, os aspectos físicos e socioeconômicos da área. Para tanto foi imprescindível a utilização do Geoprocessamento apoiado por Sistemas de Informação Geográfica, tais como o ArcGis 10.2.2, Global Mapper 9, SPRING 4.3.3, entre outros.

4.1 Escoamento Superficial

Para a análise do escoamento superficial da bacia do rio Ivaí foi realizada uma comparação entre os resultados obtidos por Santos et al, (2013), por meio da aplicação da equação de Kirkby (1976, 1980), e a aplicação do modelo SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*). Foram elaborados mapas temáticos na escala 1: 250.000 (MDE, declividade, geológico, geomorfológico, de solos, de uso e cobertura da terra), aliadas à análise dos dados climáticos das estações do Instituto de Águas do Paraná, do INMET e do SIMEPAR para o ano de 2009. As dez estações adotadas para este estudo foram aquelas localizadas na área da bacia ou próximas à mesma e que possuíssem informações das séries históricas para precipitação, temperatura, umidade relativa do ar, velocidade do vento e radiação solar para complementar os dados a serem correlacionados e sintetizados, constituindo-se em dados fundamentais para a análise proposta.

Kirkby (1976), propõe a análise do escoamento superficial como uma etapa para o cálculo da quantificação da produção de sedimentos, considerando as características climáticas e dos solos, tais como precipitação anual (mm), evapotranspiração (mm), precipitação média por evento (mm) e capacidade de armazenamento de água no solo. Essa equação foi utilizada por Santos e Moraes (2012), para estimar a produção de sedimentos na bacia do Ribeirão Maringá, Paraná. Santos et al, (2013), também utilizaram a equação para o estudo do escoamento superficial da bacia do rio Ivaí, Paraná mediante a adoção de técnicas de geoprocessamento para integrar as variáveis em ambiente SIG por meio da equação:

$$OF=R \text{ ev} - (rc-h)/r$$

Onde:

A variável OF é o fluxo superficial (mm/ano);
 R é a precipitação anual (mm);
 rc-h é a capacidade de água disponível no solo (mm);
 “ev” é a evapotranspiração anual (mm);
 r é a precipitação média por evento (mm).

O modelo SWAT pode ser utilizado para simular a qualidade e quantidade de águas superficiais e subterrâneas em bacias hidrográficas, para avaliar e prevenir os efeitos erosivos, prever o impacto ambiental do uso da terra, das práticas de manejo da terra e mudanças climáticas. É amplamente utilizado para gestão regional de bacias hidrográficas (NEITSCH et al, 2011).

A utilização do modelo requer a subdivisão da bacia hidrográfica em sub-bacias, principalmente quando há diferenças bastante significativas nos tipos de solo e cobertura do solo na mesma área de estudo. A informação de entrada para cada sub-bacia é agrupada nas seguintes categorias: clima; unidades de resposta hidrológica HRUs; lagos/pântanos; água subterrânea, e canal principal, ou área drenada na sub-bacia. As unidades de resposta hidrológicas são agrupadas em áreas de terra dentro da sub-bacia que são compreendidas por uma única cobertura do solo e solo e manejo (NEITSCH et al, 2011).

De acordo com Neitch et al, (2011), os processos que caracterizam o SWAT consideram duas fases do ciclo hidrológico: a fase da terra (balanço hídrico, escoamento superficial, vazão de pico, erodibilidade do solo, fator de cobertura do solo, fator topográfico, práticas conservacionistas, evapotranspiração, escoamento subsuperficial lateral, água subterrânea, entre outros) e fase de propagação (propagação da vazão líquida e de sedimentos no canal principal, reservatórios). Para a realização desta pesquisa, porém, interessa apenas um fragmento desses processos, o escoamento superficial.

No modelo SWAT a erosão causada pela chuva e pelo escoamento é computada pela Equação Universal de Perdas de Solo Modificada (MUSLE) proposta por Williams, (1975). A MUSLE é uma equação modificada da Equação Universal de perda de solo (USLE) desenvolvida por Wischmeier e Smith (1965/1978). A USLE prevê a média anual bruta da erosão como uma função da força da chuva. Na MUSLE o fator de força da chuva é substituído pelo fator de escoamento. A equação da MUSLE é escrita na seguinte forma:

$$sed = 11,8(Q_{sup} \times q_{pico} \times \text{área}_{URH})^{0,56} \times K_{EUPS} \times C_{EUPS} \times LS_{EUPS} \times P_{EUPS} \times CFRG$$

Onde:

sed: produção de sedimento, após evento de precipitação, no dia (ton);
 Qsup: escoamento superficial (mm H²O/ha);
 qpico : taxa de escoamento de pico (m³/s);

área URH : área da unidade de resposta hidrológica na qual é estimado o aporte de sedimentos (ha);
 $Keups$: fator erodibilidade ($0,013 \text{ ton m}^2 \text{ hr (m}^3 - \text{ton cm)}^{-1}$)
 $Ceups$: fator de uso e manejo do solo (adimensional)
 $LSeups$: fator de práticas conservacionistas (adimensional)
 $Peups$: o produto do comprimento do declive e grau do declive proporciona o denominado “fator topográfico”, e $CFRG$: fator de fragmentação esparsa.

O escoamento superficial calculado por meio da MUSLE, na rotina de simulação do SWAT, se dá mediante o Método de Curva Número (CN), elaborado em 1954 pelo Serviço de Conservação do Solo (*Soil Conservation Service*, atualmente *Natural Resources Conservation Service-SCS*) dos Estados Unidos. O valor da Curva Número do SCS é uma função da permeabilidade do solo, uso da terra e condições hídricas do solo anteriores (NEITSCH et al, 2011). De acordo o SCS (1972), a equação que resulta na Curva Número é:

$$Q_{\text{sup}} = \frac{(P - 0,2S)^2}{(P + 0,8S)}$$

Onde:

Q_{sup} : escoamento superficial (mm),
 P : precipitação (mm), e
 S : capacidade máxima de armazenamento (mm)

O parâmetro S varia espacialmente, considerando alterações no solo, uso da terra, manejo e declividade e temporalmente devido a mudanças na umidade do solo (NEITSCH et al, 2011). Sua determinação considera o fator CN (Curva Número), e é dado pela seguinte equação – em unidades métricas:

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

O fator CN é determinado diariamente, no modelo SWAT, com limiares variando numericamente de 1 a 100, sendo o limite inferior representativo de um solo totalmente permeável e o limite superior de um solo que converterá toda a precipitação em escoamento (totalmente impermeável). Buscando a padronização das curvas o SCS obteve curvas que correlacionam a precipitação com o escoamento de várias bacias nos Estados Unidos da América (Figura 12) onde números adimensionais foram estabelecidos, as chamadas Curvas de Número ou CNs (NEITSCH et al, 2011).

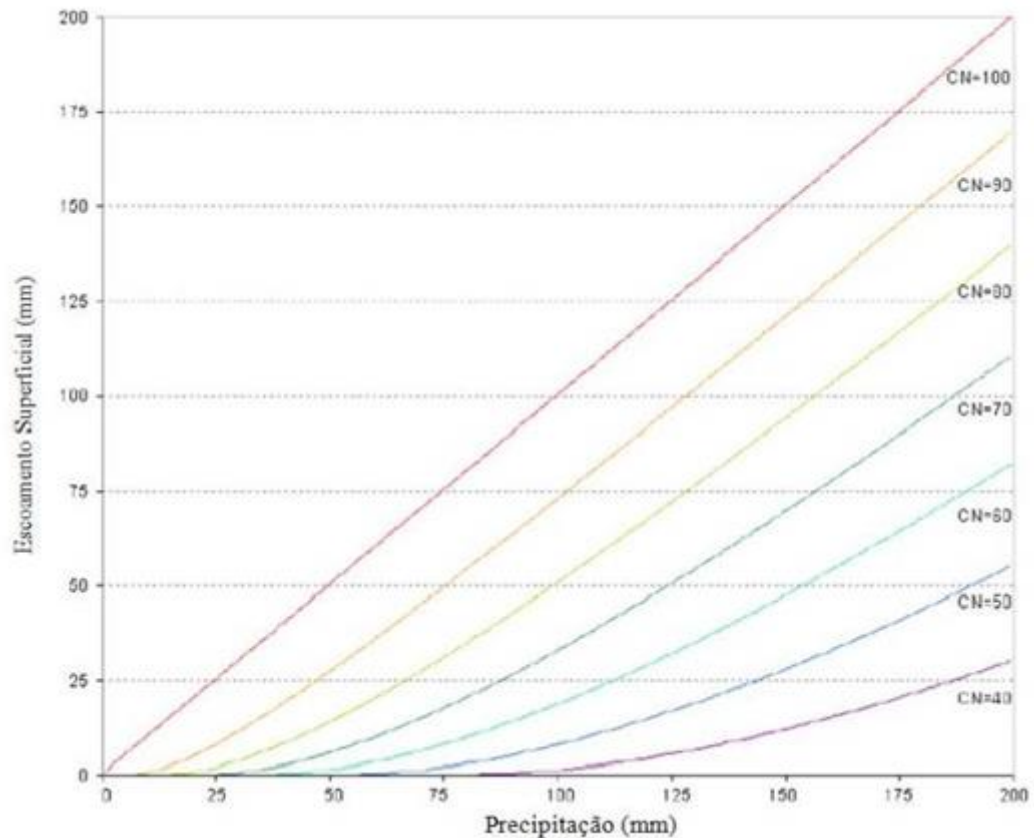


Figura 12 - Relação entre precipitação e escoamento superficial no método SCS da Curva de Número

Fonte: Neith et al, 2011.

4.1.1 Vazão de pico

A vazão de pico é a máxima taxa de escoamento superficial que ocorre em um evento de precipitação. É um indicador do potencial erosivo de uma precipitação sendo usado para estimar a perda de sedimentos na bacia hidrográfica (NEITSCH et al, 2011). O modelo SWAT calcula a vazão de pico por meio do Método Racional Modificado comumente usado para bacias pequenas, mas no modelo SWAT o cálculo é feito para as diversas Unidades de Resposta Hidrológica como apresentado na equação:

$$q_{pico} = \frac{\alpha_{tc} \times Q_{sup} \times A}{3,6 \times t_{conc}}$$

Onde:

q_{pico} : taxa de escoamento de pico (m^3/s);

α_{tc} : é a fração da precipitação que ocorre durante o tempo de concentração.

Q_{sup} : escoamento superficial (mm),

A : é a área da sub-bacia (km^2)

t_{conc} : é o tempo de concentração da sub-bacia

4.1.2 Fator Erodibilidade do solo

A medição direta deste fator em campo é economicamente dispendiosa e demanda tempo para coleta e análise de amostras em laboratório, por este motivo Wichmeier e Smith (1978), propuseram uma equação geral, para solos com fração de silte inferior a 70%, que considera a fração de matéria orgânica no solo, a estrutura do solo e o perfil de permeabilidade, além do diâmetro representativo das partículas.

$$K_{USLE} = \frac{0.00021 \cdot M^{1.14} \cdot (12 - OM) + 3.25 \cdot (c_{soilstr} - 2) + 2.5 \cdot (c_{perm} - 3)}{100}$$

Onde:

K_{usle}: fator erodibilidade (0,013 ton m² hr (m³ - ton cm)⁻¹)
M: é o parâmetro de tamanho das partículas,
OM: é a porcentagem de matéria orgânica (%),
C_{soilstr}: é o código de estrutura do solo utilizado na classificação do solo, e
C_{perm}: é a classe de permeabilidade do perfil

4.1.3 Fator de uso e manejo do solo

O fator de uso e manejo do solo é definido como o índice da perda de solo de terra cultivada sob condições específicas (WISCHMEIER; SMITH, 1978). A copa das árvores afeta a erosão, reduzindo a força das precipitações, por meio da interceptação das gotas. Os resíduos vegetais interceptam as gotas de chuva que caem bem próximas da superfície, assim, a gota não consegue retomar a velocidade de queda. Os resíduos também bloqueiam o fluxo de escoamento, reduzindo sua velocidade e capacidade de transporte. Como as coberturas vegetais variam durante o ciclo e crescimento das plantas, o SWAT atualiza o C USLE diariamente usando a equação:

$$C_{USLE} = \exp\left(\left[\ln(0.8) - \ln(C_{USLE,mm})\right] \cdot \exp[-0.00115 \cdot rsd_{surf}]\right) + \ln[C_{USLE,mm}]$$

Onde:

C_{usle}: fator de uso e manejo do solo (adimensional)
 Na qual *C_{usle,mm}* é o valor mínimo para o fator de cobertura e gestão para a cobertura vegetal do terreno e
rsdsurf: é a quantidade de resíduo na superfície do solo (kg/ha).

O fator C mínimo pode ser estimado por uma média anual conhecida do fator C, usando-se a seguinte equação:

$$C_{USLE,mm} = 1.463 \ln[C_{USLE,aa}] + 0.1034$$

Onde:

$C_{USLE,mm}$:é o fator mínimo de C para a cobertura do solo.

$C_{USLE,aa}$ é a média anual do fator C para a cobertura do solo.

4.1.4 Fator de práticas conservacionistas

O fator de práticas conservacionistas é a relação da perda de solo, para uma cultura específica, de uma determinada prática de manejo do solo com a plantação no sentido do declive (WICHMEIER e SMITH, 1978). Os autores ressaltam que tais práticas mudam o padrão, grau e direção do fluxo, reduzindo a quantidade e taxa de erosão do solo. Logo, áreas que apresentem tais práticas estão menos propensas aos processos erosivos, proporcionando obstáculos à erosão.

4.1.4 Fator topográfico

O fator topográfico representa a relação esperada da perda de solo por unidade de superfície em função do comprimento de rampa/declividade do terreno. O fator topográfico é calculado:

$$LS_{USLE} = \left(\frac{L_{hill}}{22.1} \right)^m \cdot (65.41 \cdot \sin^2(\alpha_{hill}) + 4.56 \cdot \sin \alpha_{hill} + 0.065)$$

Onde:

LS_{USLE} é fator topográfico,

L_{hill} é a extensão do declive (m),

m é o termo exponencial, e

α_{hill} é o ângulo da inclinação.

O termo exponencial m é calculado:

$$m = 0.6 \cdot (1 - \exp[-35.835 \cdot slp])$$

Em que:

slp é a inclinação da HRU expressada como elevação em relação à distância (m/m).

4.1.6 Fator de fragmentação esparsa

Este fator considera o afloramento de rocha na área, através da seguinte equação

$$CFRG = \exp(-0.053 \cdot rock)$$

CFRG é o fator de fragmentação esparsa
rock é a quantidade de rocha existente na primeira camada de solo (%).

4.2 Definição dos Parâmetros Característicos da Área de Estudo para Geração do Banco de Dados

O modelo SWAT possui em seu banco de dados interno, as informações referentes às estações meteorológicas e as características físico-hídricas dos solos dos Estados Unidos da América, sendo assim, considerando as diferenças entre este país e o Brasil fez-se necessário introduzir os dados específicos da área de estudo, ou seja, as informações obtidas das estações climáticas localizadas na área, as características dos solos e de uso e cobertura da terra para a edição do banco de dados, tal exercício é possível por meio da interface ArcSwat acoplada ao *software* ArcGis 10.2.2. São requeridos pelo modelo o Modelo Digital de Elevação (MDE) para a delimitação de sub-bacias, os mapas de uso e cobertura da terra, de tipos de solo e de declividade para reclassificação e sobreposição (*overlay*) para a geração das Unidades de Resposta Hidrológica (HRUs) e também os dados tabulares referentes às características climáticas da área para a edição do banco de dados climático do SWAT (WGEN) e a simulação.

4.3 Modelo Digital de Elevação (MDE)

Os dados utilizados para a elaboração do Modelo Digital de Elevação foram obtidos a partir de projetos de distribuição *online* gratuita. São dados SRTM obtidos por meio do programa TOPODATA, um banco de dados geomorfométricos do território nacional desenvolvido pelo INPE que traz, além do Modelo Digital de Elevação, derivações como declividade, orientação de vertentes, relevo sombreado, entre outras com resolução de 30m (VALERIANO; ROSSETTI, 2011).

Após a aquisição dos dados SRTM, os mesmos foram importados no SIG ArcGis 10.2.2, e por meio da ferramenta *create contour* foram geradas as curvas de nível. Com as

curvas de nível na tela foi possível criar a malha triangular com a ferramenta de análise 3D (3D *ANALYST*) a partir da qual o MDE foi gerado. O MDE, além de proporcionar o processo de delimitação das sub-bacias por meio da identificação da rede de drenagem e dos divisores de águas, também permite a extração de todos os parâmetros topográficos necessários para a execução do modelo.

O MDE também é utilizado no modelo para alcançar objetivos em duas frentes: 1 – compartimentação da bacia para menor generalização dos resultados e a geração das HRUs (Unidades de Resposta Hidrológica), ou seja, a área total na sub-bacia com uso e cobertura da terra e tipos de solo semelhantes é agrupada em uma unidade de resposta única, portanto, uma sub-bacia pode conter várias HRUs, e 2 – depois de compartimentada a bacia, os demais parâmetros podem ser distribuídos de maneira individualizada, desta forma o usuário pode optar se analisará os resultados de cada sub-bacia individualmente ou em conjunto, a depender dos objetivos e do grau de detalhamento requeridos pelo projeto.

A subdivisão da bacia permite ao modelo refletir as diferenças de evapotranspiração para várias culturas e solos. O escoamento está previsto separadamente para cada HRU e dirigido para obter o escoamento total para cada sub-bacia. Isto aumenta a certeza e há uma melhor descrição física do equilíbrio de água (NEITSCH et al, 2005).

4.4 Declividade

Após a aquisição dos dados SRTM, os mesmos foram importados no SIG ArcGis 10.2.2, e por meio da ferramenta 3D *Analyst – Surface analysis – Slope* foi gerada a declividade para a área representada por classes que variam de 0 a 3%, de 3 a 6%, de 6 a 9%, de 9 a 12%, de 12 a 20%, de 20^a 30% e declividades maiores que 30%. Os dados de declividade são requeridos pelo modelo SWAT para refletir as diferenças de relevo para geração das HRUs.

4.5 Parâmetros de Solos

O mapeamento dos solos na área de estudo foi obtido a partir do levantamento de reconhecimento de solos do estado do Paraná, Tomos I e II (EMBRAPA, 1984), com atualização para o novo Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (EMBRAPA, 2007). A base cartográfica utilizada para a elaboração do mapa de solos em ambiente SIG, foi obtida junto ao ITCG na escala 1:250.000, por meio do endereço eletrônico:

<http://www.itcg.pr.gov.br/>. O mapa de solos foi elaborado no SIG ArcGis 10.2.2 e posteriormente editado no *software* Corel Draw x7.

As informações necessárias para a edição do banco de dados de solos da interface ArcSwat são referentes a características físico-hídricas, tais como: grupo hidrológico dos solos referente ao método da Curva-Número (HYDGRP), a profundidade máxima que a raiz alcança (SOL_ZMX), porosidade (ANION_EXCL), profundidade da camada (SOL_Z), densidade aparente (SOL_BD), água disponível no solo (SOL_AWC), condutividade hidráulica saturada (SOL_K), erodibilidade (USLE_K), albedo (SOL_ALB), carbono orgânico (SOL_CBN) e percentagem de argila (CLAY), silte (SILT), areia (SAND) e seixo (ROCK).

Segundo Neitsch et al, (2005), o “*Natural Resources Conservation Service*” propôs uma classificação hidrológica dos solos, na qual solos que oferecem um determinado potencial de escoamento superficial para a mesma intensidade de precipitação são postos no mesmo grupo. Com isto, foram propostos quatro grupos hidrológicos do solo. São eles:

Grupo A: possuem elevada taxa de infiltração - por consequência produzem baixo escoamento superficial – mesmo quando úmidos. São solos arenosos profundos com pouco silte e argila, que possuem elevada transmissão de água.

Grupo B: possuem infiltração moderada. São solos menos arenosos e menos profundos que o do grupo A e com moderada transmissão de água.

Grupo C: gera escoamento superficial acima da média, devido a sua baixa capacidade de infiltração. São solos que possuem uma fração considerável de argila e são pouco profundos.

Grupo D: gera a maior proporção de escoamento superficial, motivo de sua baixa capacidade de infiltração. Solos que contém argilas expansivas e são pouco profundos.

Para a classificação dos solos da área de estudo quanto aos grupos hidrológicos foi utilizado o trabalho de Sartori (2004), que adaptou o método do Serviço de Conservação do Solo (SCS) do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos da América (USDA) que reúne os solos dos Estados Unidos nos quatro grandes grupos acima citados às características dos solos brasileiros (Quadro3).

Quadro 3 - Classificação hidrológica do Solo para as condições brasileiras

<p>Grupo Hidrológico A</p> <ul style="list-style-type: none"> * Solos muito profundos (prof. > 200 cm) ou profundos (100 a 200 cm); * Solos com alta taxa de infiltração e com alto grau de resistência e tolerância à erosão; * Solos porosos com baixo gradiente textural (< 1,20); * Solos de textura média; * Solos de textura argilosa ou muito argilosa desde que a estrutura proporcione alta macroporosidade em todo o perfil; * Solos bem drenados ou excessivamente drenados; * Solos com argila de atividade baixa (Tb), minerais de argila 1:1; * A textura dos horizontes superficial e subsuperficial pode ser: média/média, argilosa/argilosa e muito argilosa/muito argilosa. <p>Enquadra-se neste grupo o: LATOSSOLO AMARELO, LATOSSOLO VERMELHO AMARELO, LATOSSOLO VERMELHO, ambos de textura argilosa ou muito argilosa e com alta macroporosidade; LATOSSOLO AMARELO E LATOSSOLO VERMELHO AMARELO, ambos de textura média, mas com horizonte superficial não arenoso.</p>
<p>Grupo Hidrológico B</p> <ul style="list-style-type: none"> * Solos profundos (100 a 200 cm); * Solos com moderada taxa de infiltração, mas com moderada resistência e tolerância a erosão; * Solos porosos com gradiente textural variando entre 1,20 e 1,50; * Solos de textura arenosa ao longo do perfil ou de textura média com horizonte superficial arenoso; * Solos de textura argilosa ou muito argilosa desde que a estrutura proporcione boa macroporosidade em todo o perfil; * Solos com argila de atividade baixa (Tb), minerais de argila 1:1; * A textura dos horizontes superficial e subsuperficial pode ser: arenosa/arenosa, arenosa/ média, média/argilosa, argilosa/argilosa e argilosa/muito argilosa. <p>Enquadra-se neste grupo o: LATOSSOLO AMARELO e LATOSSOLO VERMELHO AMARELO, ambos de textura média, mas com horizonte superficial de textura arenosa; LATOSSOLO BRUNO; NITOSSOLO VERMELHO; NEOSSOLO QUARTZARÊNICO; ARGISSOLO VERMELHO ou VERMELHO AMA-RELO de textura arenosa/média, média/argilosa, argilosa/argilosa ou argilosa/muito argilosa que não apresentam mudança textural abrupta.</p>
<p>Grupo Hidrológico C</p> <ul style="list-style-type: none"> * Solos profundos (100 a 200 cm) ou pouco profundos (50 a 100 cm); * Solos com baixa taxa de infiltração e baixa resistência e tolerância à erosão; * São solos com gradiente textural maior que 1,50 e comumente apresentam mudança textural abrupta; * Solos associados a argila de atividade baixa (Tb); * A textura nos horizontes superficial e subsuperficial pode ser: arenosa/média e média/argilosa apresentando mudança textural abrupta; arenosa/argilosa e arenosa/muito argilosa. <p>Enquadra-se neste grupo o: ARGISSOLO pouco profundo, mas não apresentando mudança textural abrupta ou ARGISSOLO VERMELHO, ARGISSOLO VERMELHO AMARELO e ARGISSOLO AMARELO, ambos profundos e apresentando mudança textural abrupta; CAMBISSOLO de textura média e CAMBISSOLO HÁPLICO ou HÚMICO, mas com características físicas semelhantes aos LATOSSOLOS (latossólico); ESPODOSSOLO FERROCÁRBICO; NEOSSOLO FLÚVICO.</p>
<p>Grupo Hidrológico D</p> <ul style="list-style-type: none"> * Solos com taxa de infiltração muito baixa oferecendo pouquíssima resistência e tolerância a erosão; * Solos rasos (prof. < 50 cm); * Solos pouco profundos associados à mudança textural abrupta ou solos profundos apresentando mudança textural abrupta aliada à argila de alta atividade (Ta), minerais de argila 2:1; * Solos argilosos associados à argila de atividade alta (Ta); * Solos orgânicos. <p>Enquadra-se neste grupo o: NEOSSOLO LITÓLICO; ORGANOSSOLO; GLEISSOLO; CHERNOSSOLO; PLANOSSOLO; VERTISSOLO; ALISSOLO; LUVISSOLO; PLINTOSSOLO; SOLOS DE MANGUE; AFLORAMENTOS DE ROCHA; Demais CAMBISSOLOS que não se enquadram no Grupo C; ARGISSOLO VERMELHO AMARELO e ARGISSOLO AMARELO, ambos pouco profundos e associados à mudança textural abrupta.</p>

Fonte: Sartori, 2004.

Para o estabelecimento da condutividade hidráulica saturada dos solos foram observados os valores propostos por Dent e Young apud Baldissera (2005), que relaciona a classificação textural e a estrutura dos solos à condutividade hidráulica (Tabela 1).

Tabela 1 - Relação entre classificação textural e estrutura e condutividade hidráulica

Texture	Structure	Indicative hydraulic conductivity, K	
		(cm h ⁻¹)	(m day ⁻¹)
Coarse sand, gravel	Single grain	> 50	> 12
Medium sand	Single grain	25 - 50	6 - 12
Loamy sand, fine sand	Medium crumb, single grain	12 - 25	3 - 6
Fine sandy loam, sandy loam	Coarse, subangular blocky and granular, fine crumb	6 - 12	1.5 - 3
Light clay loam, silt, silt loam, very fine sandy loam, loam	Medium prismatic and subangular blocky	2 - 6	0.5 - 1.5
Clay, silty clay, sandy clay, silty clay loam, clay loam, silt loam, silt, sandy clay loam	Fine and medium prismatic, angular blocky, platy	0.5 - 2	0.1 - 0.5
Clay, clay loam, silty clay, sandy clay loam	Very fine or fine prismatic, angular blocky, platy	0.25 - 0.5	0.05 - 0.1
Clay, heavy clay	Massive, very fine or columnar	< 0.25	< 0.05

Fonte: Dent e Young apud Baldissera (2005).

Para a parametrização dos dados de entrada dos solos referentes a profundidade máxima que a raiz alcança (SOL_ZMX), porosidade (ANION_EXCL), profundidade da camada (SOL_Z), densidade aparente (SOL_BD), carbono orgânico (SOL_CBN) e percentagem de argila (CLAY), silte (SILT), areia (SAND) e seixo (ROCK) foram utilizadas as informações do Levantamento de Reconhecimento de Solos do Paraná, Tomos I e II, (EMBRAPA, 1984). O valor do (SOL_ALB) ou albedo do solo de 0,17 foi estabelecido para todos os solos e é utilizado para realização do balanço energético na rotina interna do modelo SWAT.

Para estimar a erodibilidade dos solos (USLE_K) foi utilizado o trabalho de Bertoni e Lombardi Neto (2005). Segundo os autores a erodibilidade evidencia a facilidade com que determinado solo erode, a partir do impacto da chuva e/ou do escoamento superficial, sendo estimado a partir das características inerentes ao tipo de solo e suas respectivas propriedades físicas (tabela 2).

Tabela 2 - Erodibilidade dos solos

Classe de solo	Erodibilidade (USLE_K)
Argissolo, Textura Média/Argilosa	0,36
Argissolo, Textura Arenosa/Média	0,36
Cambissolo, Textura Argilosa	0,30
Organossolo	0,37
Neossolo Litólico T. Média	0,35
Gleissolo, Textura Argilosa	0,37
Latossolo, Textura Argilosa	0,14
Latossolo, Textura Média	0,28
Nitossolo	0,20
Neossolo Flúvico, Textura Argilosa	0,47
Neossolo Flúvico, Textura Arenosa	0,47

Fonte: adaptado de Bertoni e Lombardi Neto, 2005.

A água disponível no solo (SOL_AWC), entendida como a diferença da quantidade de água no solo quando estiver na capacidade de campo e a quantidade de água quando estiver no ponto de murcha foi determinada observando-se os limiares propostos por Salter e Williams (1967, 1969) como mostra a tabela 3.

Tabela 3 - Relação entre classificação textural e capacidade de água disponível no solo.

Classe Textural	Capacidade de Água Disponível (mm/mm)
Areia	0,15
Areia Franca	0,158
Franco Arenoso	0,175
Franco	0,175
Franco Siltoso	0,192
Franco Argilo Arenoso	0,150
Franco Argiloso	0,183
Franco Argilo Siltoso	0,192
Argilo Arenosa	0,142
Argilo Siltosa	0,183
Argilosa	0,175

Fonte: Salter e Williams 1967, 1969.

Primeiramente estabeleceu-se a classe textural, segundo classificação do USDA (1986), (Figura 13) por meio de um macro do Excel fornecido pelo *Natural Resources Conservation Service Soils* (NRCS) órgão ligado ao USDA na qual as porcentagens de areia, silte e argila são digitados diretamente e a mesma realiza a classificação textural, disponível no endereço eletrônico: (<http://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detail/soils>), e só então correlacionou-se com o trabalho de Salter e Williams (1967 e 1969) por meio da tabela 2.

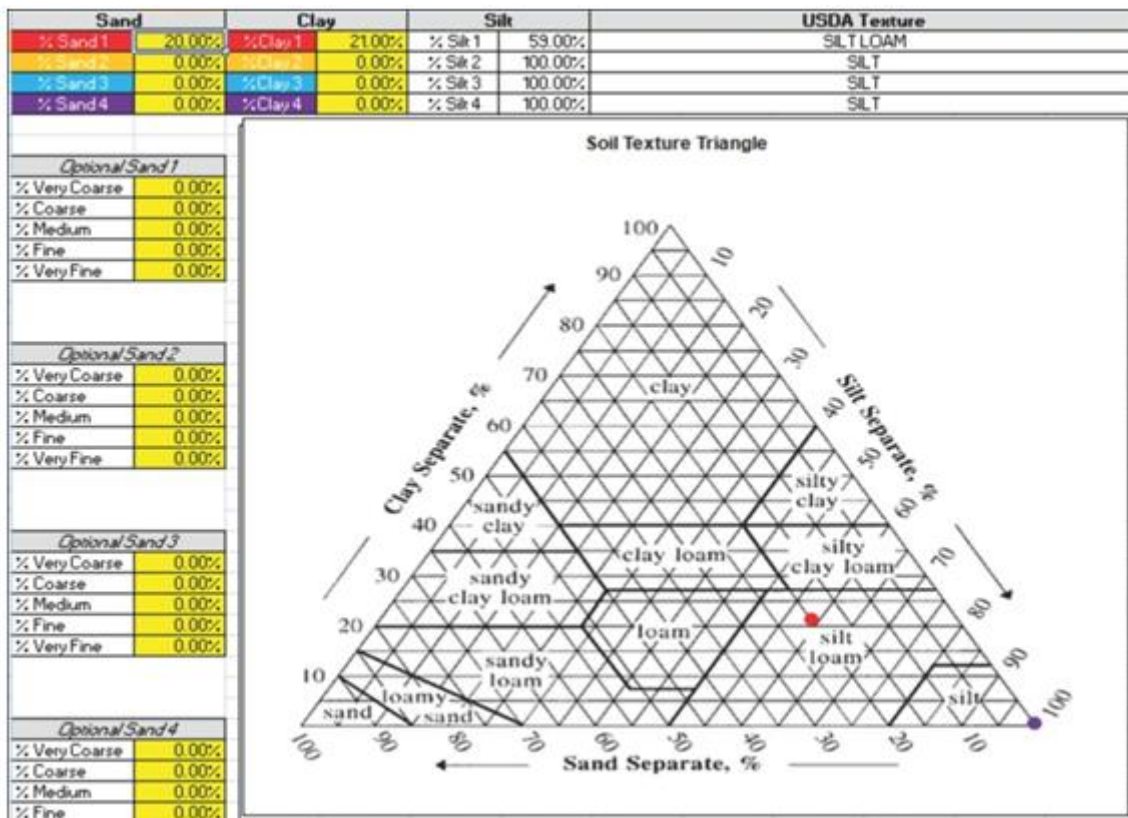


Figura 13 - Classificação textural do solo.

Fonte: NRCS - Natural Resources Conservation Service Soils, 2014.

Após o levantamento das propriedades físico-hídricas das classes de solos da área de estudo foi realizada a edição do banco de dados de solos do SWAT (Figura 14) para posterior reclassificação do mapa pedológico. Como resultado da edição e reclassificação foi gerado um novo mapa pedológico com as classes de solos e suas respectivas propriedades para integração com os mapas de declividade e uso e cobertura da terra e geração das HRUs.

Figura 14 - Tela para edição dos dados característicos dos solos

Fonte: NRCS - Natural Resources Conservation Service Soils, 2014.

4.6 Uso e Cobertura da Terra

Para a classificação das classes temáticas foram utilizadas imagens de satélite disponibilizadas pelo INPE, com as seguintes órbitas ponto e datas: 222/76 - 20/04/09, 223/76 - 11/04/09, 224/76 - 18/04/09, 222/77 - 04/04/09, 223/77 - 11/04/09, 222/78 - 04/04/09, 221/78 - 04/04/09. Essas imagens são de domínio público e estão disponibilizadas na Web no endereço <http://www.dgi.inpe.br>. As imagens de satélite estão em formato *Geotiff*, projeção UTM e datum WGS 84. Foram escolhidas as bandas 3, 4 e 5 do sensor TM, satélite LANDSAT 5, o quadro 4 mostra as propriedades de cada banda. Os arquivos foram manipulados no software ENVI 4.2, e nesse ambiente realizadas as composições RGB. As imagens foram georreferenciadas com base no mosaico de imagens LANDSAT da Nasa (<http://zulu.ssc.nasa.gov/mrsid>, 2016).

Quadro 4 - Propriedades e principais aplicações das bandas 3, 4 e 5 das bandas TM e ETM dos satélites LANDSAT 5 e 7.

Banda	Principais características e aplicações das bandas TM e ETM dos satélites LANDSAT 5 e 7
3	A vegetação verde, densa e uniforme, apresenta grande absorção, ficando escura, permitindo bom contraste entre as áreas ocupadas com vegetação (ex.: solo exposto, estradas e áreas urbanas). Apresenta bom contraste entre diferentes tipos de cobertura vegetal (ex.: campo, cerrado e floresta). Permite análise da variação litológica em regiões com pouca cobertura vegetal. Permite o mapeamento da drenagem através da visualização da mata galeria e entalhe dos cursos dos rios em regiões com pouca cobertura vegetal. É a banda mais utilizada para delimitar a mancha urbana, incluindo identificação de novos loteamentos. Permite a identificação de áreas agrícolas.
4	Os corpos de água absorvem muita energia nesta banda e ficam escuros, permitindo o mapeamento da rede de drenagem e delineamento de corpos de água. A vegetação verde, densa e uniforme, reflete muita energia nesta banda, aparecendo bem clara nas imagens. Apresenta sensibilidade à rugosidade da copa das florestas (dossel florestal). Apresenta sensibilidade à morfologia do terreno, permitindo a obtenção de informações sobre Geomorfologia, Solos e Geologia. Serve para análise e mapeamento de feições geológicas e estruturais. Serve para separar e mapear áreas ocupadas com pinus e eucalipto. Serve para mapear áreas ocupadas com vegetação que foram queimadas. Permite a visualização de áreas ocupadas com macrófitas aquáticas (ex.: aguapé). Permite a identificação de áreas agrícolas.
5	Apresenta sensibilidade ao teor de umidade das plantas, servindo para observar estresse na vegetação, causado por desequilíbrio hídrico. Esta banda sofre perturbações em caso de ocorrer excesso de chuva antes da obtenção da cena pelo satélite.

Fonte: INPE (2016).

A classificação escolhida foi a máxima verossimilhança que considera a ponderação das distâncias entre médias dos níveis digitais das classes, utilizando parâmetros estatísticos (INPE, 2003). Cada elemento a ser classificado é identificado através de características padrão. Cada classe recebeu cerca de 50 amostras de treinamento. Para compor um mosaico de imagens da bacia hidrográfica inteira foram necessárias nove cenas as quais podem ser visualizadas na figura 15.

As informações referentes aos tipos de uso e cobertura da terra da área foram extraídas de imagens do satélite LANDSAT 5 TM para o ano de 2009. Para auxiliar na leitura das imagens orbitais, foram elaboradas classes temáticas para classificação, quais sejam: Floresta, pastagem, corpos d'água, culturas temporárias, solo exposto e cana de açúcar.

Para as entradas (*inputs*) no modelo SWAT é necessária a reclassificação do mapa de uso e cobertura da terra para as classes temáticas existentes na rotina interna do modelo, assim, além das classes temáticas e seus dados de localização são integradas também características inerentes ao crescimento das plantas (Nitrogênio, Fósforo, produção de biomassa, conversão de energia solar em biomassa,...), sejam estas pertencentes a áreas florestadas, lavouras perenes ou temporárias, proteção do solo frente aos processos erosivos (USLE) e densidade de ocupação das áreas urbanas e industriais já gravadas no modelo

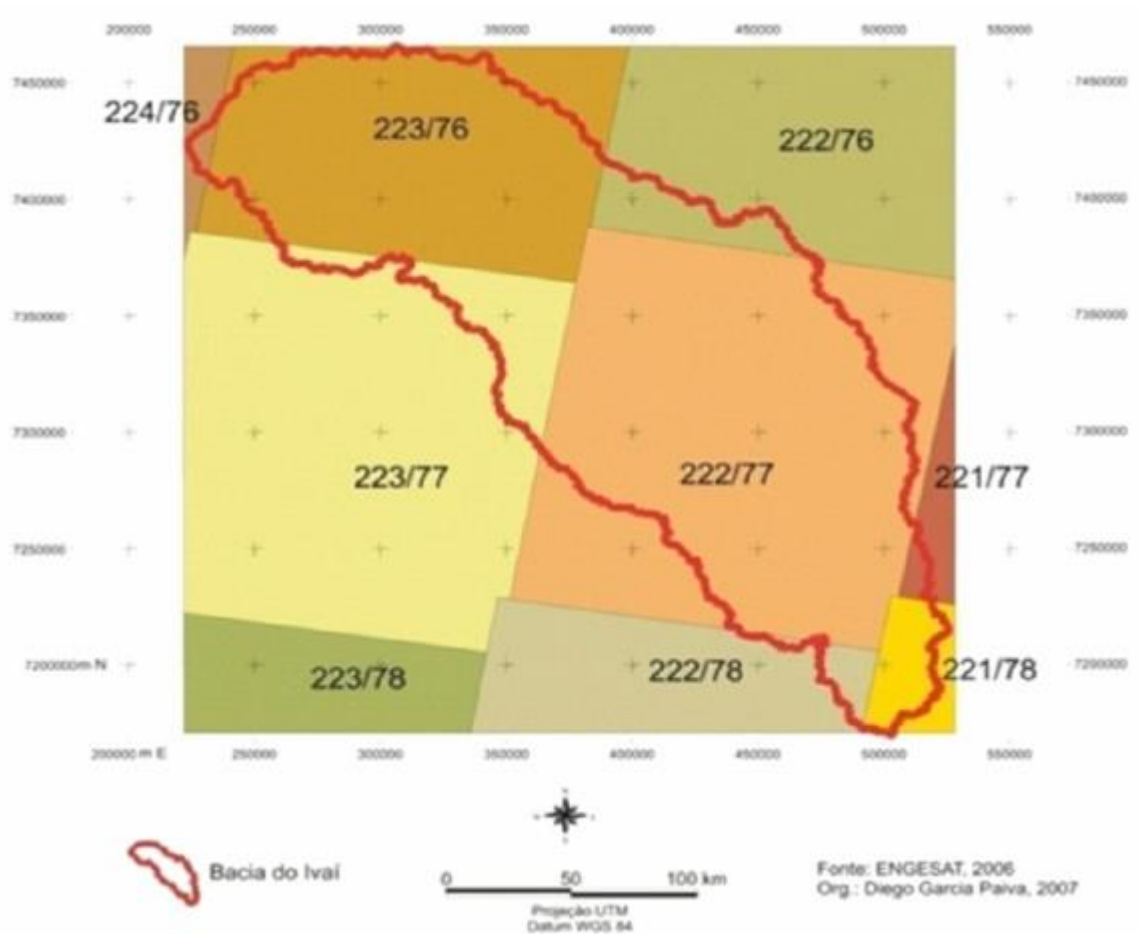


Figura 15 - Localização das cenas dos satélites LANDSAT/TM na bacia do Ivaí.
Fonte: Paiva, 2008.

4.7 Parâmetros Climáticos

Os dados climáticos requisitados pelo modelo SWAT visam cumprir três objetivos principais: a estimativa da evapotranspiração potencial, o preenchimento automático de falhas e elaboração de cenários futuros. Tais objetivos são alcançados através do gerador climático WGEN onde são inseridas as estações climáticas, bem como os dados coletados pelas mesmas durante a série histórica. O modelo atribui a cada sub-bacia a série temporal diária de uma das dez estações climáticas distribuídas pela área de acordo com a proximidade das coordenadas geográficas. Nesta pesquisa foi utilizada a série histórica de 2004 a 2013 e adotado o ano de 2009 para análise do escoamento superficial.

O modelo SWAT inclui o gerador climático WGEN. O arquivo de entrada deve conter os dados médios necessários para a geração de dados climáticos diários que são gerados pelo modelo. Foram utilizados dados climáticos diários de precipitação, temperatura (mínima e

máxima), radiação solar, velocidade de vento e umidade relativa do ar para as estações de Campo Mourão, Irati, Ivaí e Maringá fornecidos pelo INMET (<http://www.inmet.gov.br/projetos/rede/pesquisa>, 2016).

Os dados das estações automáticas de Cândido de Abreu, Paranavaí e Umuarama foram solicitados junto ao SIMEPAR. Também foram utilizados dados de precipitação fornecidos pelo Sistema de Informação Hidrológica do Instituto de Águas do Paraná (<http://www.sih-web.aguasparana.pr.gov.br/sih-eb/gerarRelatorioAlturasDiariasPrecipitacao>, 2016).

As estações climáticas, seus códigos, localização e altitude podem ser visualizados no Quadro 5. O modelo SWAT exige uma série histórica de dados climáticos para a simulação, sendo assim para este trabalho foram utilizados dados da série histórica de 2004 a 2013 para assegurar a maior precisão.

Quadro 5 - Estações climatológicas com seus respectivos códigos, latitudes, longitudes, altitudes, período dos dados analisados.

Nº Código Estação	Latitude	Longitude	Altitude/ Período
1. 2451003 *Cândido de Abreu	24° 49' 48"	51° 08' 32"	550 m/2004-2013
2. 2352031 * Cianorte	23° 47' 34"	52° 38' 29"	572 m/2004-2013
3. 2353031 Icaraíma	23° 22' 59"	53° 37' 00"	450 m/2004-2013
4. 2550000 Rio dos Patos	25° 12' 00"	50° 55' 59"	690 m/2004-2013
5.2352017 *Paranavaí	23° 04' 59"	52° 25' 59"	480 m/2004-2013
6.2353008 *Umuarama	23° 37' 00"	53° 22' 00"	480 m/2004-2013
7. 83767 ** Maringá	23° 4' 00''	51° 91' 00''	542 m/2004-2013
8. 83783 **Campo Mourão	24° 05' 00"	52° 36' 00"	616,4m/2004-2013
9. 83836 **Irati	25° 46' 00"	50° 63' 00"	836,9m/2004-2013
10. 83811 **Ivaí	25° 00' 00"	50° 86' 00"	808 m/2004-2013

Legenda: *SIMEPAR, **INMET e Instituto de Águas do Paraná.

Para fins de comparação com a pesquisa de Santos et al, (2013), foi utilizado o ano de 2009 para a simulação. Segundo os autores, a escolha deste ano se justifica uma vez que os dados de precipitação e temperatura foram os mais completos para os postos pluviométricos e estações climatológicas. Constataram também que as estações climatológicas dentro da bacia, além de poucas, não estão bem distribuídas na mesma. Portanto, usaram também dados de estações que, embora estivessem localizadas fora da bacia hidrográfica, não distassem mais de 100 km do limite da mesma.

4.7.1 Estimativas de dados de temperatura

Os dados médios de temperatura exigidos pelo modelo para o gerador climático (WGEN) são: TMPMX: Temperatura máxima (°C), TMPMN: Temperatura mínima (°C), TMPSTDMX: Desvio padrão da temperatura máxima (°C), TMPSTDMN: Desvio padrão da temperatura mínima (°C). Para o cálculo desses parâmetros, a plataforma SWAT traz uma série de equações que podem ser utilizadas para tal, porém, para agilizar o trabalho, esses mesmos cálculos foram realizados no software Microsoft Excel (2007).

A estimativa de temperatura máxima (TMPMX) é obtida por meio da equação:

$$\mu_{mx,mon} = \frac{\sum_{d=1}^N T_{mx,mon}}{N}$$

Onde:

$\mu_{mx,mon}$ é a temperatura máxima média diária para o mês (°C),
 $T_{mx,mon}$ é a temperatura máxima diária registrada d no mês mon (°C), e N é o número total de registros das temperaturas máximas no mês.

A estimativa de temperatura mínima (TMPMN) é obtida por meio da equação:

$$\mu_{mn,mon} = \frac{\sum_{d=1}^N T_{mn,mon}}{N}$$

Onde:

$\mu_{mn,mon}$ é a temperatura mínima média diária para o mês (°C),
 $T_{mn,mon}$ é a temperatura mínima diária registrada d no mês mon (°C), e N é o número total de registros das temperaturas mínimas no mês.

Desvio padrão da temperatura máxima (°C), (TMPSTDMX). Este parâmetro quantifica a variabilidade na temperatura máxima de cada mês. O desvio padrão é calculado:

$$\sigma_{mx,mon} = \sqrt{\left(\frac{\sum_{d=1}^N (T_{mx,mon} - \mu_{mx,mon})^2}{N - 1} \right)}$$

Onde:

$\sigma_{mx,mon}$ é o desvio padrão para a temperatura máxima diária no mês mon (°C).

$T_{mx,mon}$ é a temperatura máxima diária registrada d no mês mon (°C), é a temperatura máxima diária média para o mês (°C), e N é o número total de registros das temperaturas máximas no mês mon .

Desvio padrão da temperatura mínima (°C) (TMPSTDMN). Este parâmetro quantifica a variabilidade na temperatura mínima para cada mês e é calculado:

$$\sigma_{mn_{mon}} = \sqrt{\frac{\sum_{d=1}^N (T_{mn,mon} - \mu_{mn_{mon}})^2}{N-1}}$$

Onde:

$\sigma_{mn_{mon}}$ é o desvio padrão para a temperatura mínima diária no mês mon (°C), $T_{mn,mon}$ é a temperatura mínima diária registrada d no mês mon (°C), $\mu_{mn_{mon}}$ é a temperatura mínima diária média para o mês (°C), e N é o número total de registros das temperaturas mínimas no mês mon .

4.7.2 Estimativas de dados de precipitação

O modelo exige alguns dados referentes às condições de precipitação médias mensais: precipitação média (PCPMM), desvio padrão da precipitação (PCPSTD), probabilidade de dias úmidos seguidos de dias secos (PR_W1), probabilidade de dias úmidos seguidos de dias úmidos (PR_W2), coeficiente de assimetria para a precipitação (PCPSKW), número de dias que houve precipitação no mês (PCPD), Precipitação máxima de 0,5 hora (mm) (RAINHHMX).

Para a estimativa de precipitação média (PCPMM) seguiu-se a equação:

$$\bar{R}_{mon} = \frac{\sum_{d=1}^N R_{day.mon}}{yrs}$$

Onde:

\bar{R}_{mon} é a precipitação média mensal (mm).
 $R_{day,mon}$ é a precipitação diária registrada d no mês mon (mm).
 R é o número total de registros no mês mon utilizados para calcular a média.
 yrs é o número de anos de registros diários de precipitação usado no cálculo.

Para o cálculo do desvio padrão da precipitação (PCPSTD), equação:

$$\sigma_{mon} = \sqrt{\left(\frac{\sum_{d=1}^N (R_{day,mon} - \bar{R}_{mon})^2}{N-1} \right)}$$

Onde:

σ_{mon} é o desvio padrão de precipitação diária no mês (mm). $R_{day,mon}$ é

a quantidade de precipitação para o registro d no mês mon (mm), \bar{R}_{mon} é a precipitação média para o mês (mm) e N é o número total de registros diários de precipitação no mês.

Probabilidade de dias úmidos seguidos de dias secos (PR_W1):

$$P_i(W/D) = \frac{days_{W/D,i}}{days_{dry,i}}$$

Onde:

$P_i(W/D)$ é a probabilidade de um dia úmido após um dia seco no mês i ,
 $days_{W/D,i}$ é o número de vezes que ocorreu um dia úmido seguido de um dia seco no mês i para todo o período de registro,
 $days_{dry,i}$ é o número de dias secos no mês i , durante todo o período de registro.
 Um dia seco é um dia com 0 mm de precipitação.
 Um dia úmido é um dia com > 0 milímetros de precipitação.

Probabilidade de dias úmidos seguidos de dias úmidos (PR_W2):

$$P_i(W/W) = \frac{days_{W/W,i}}{days_{wet,i}}$$

Onde:

$P_i(W/W)$ é a probabilidade de um dia úmido após um dia de chuva no mês i ,
 $days_{W/W,i}$ é o número de vezes que ocorre um dia de chuva seguido de um dia de chuva no mês i para todo o período de registro,
 $days_{wet,i}$ é o número de dias chuvosos no mês i durante todo o período de registro.

Cálculo do coeficiente de assimetria para a precipitação (PCPSKW):

$$g_{mon} = \frac{N \cdot \sum_{d=1}^N (R_{day,mon} - \bar{R}_{mon})^3}{(N-1) \cdot (N-2) \cdot (\sigma_{mon})^3}$$

Onde:

g_{mon} é o coeficiente de assimetria para a precipitação no mês, N é o número total de registros diários de precipitação no mês mon , $R_{day,mon}$ é a quantidade de precipitação registrada.

precipitação média para o mês (mm) e σ_{mon} é o desvio padrão para a

precipitação diária no mês mon (mm). (Nota: os valores diários de precipitação de 0 mm são incluídos no cálculo do coeficiente de assimetria).

Estimativa do número de dias que houve precipitação no mês (PCPD):

$$\bar{d}_{wet,i} = \frac{days_{wet,i}}{yrs}$$

Onde:

$\bar{d}_{wet,i}$ é o número médio de dias de precipitação no mês i ,
 $days_{wet,i}$ é o número de dias chuvosos no mês i ,
durante todo o período de registro,
 yrs é o número de anos de registro.

O valor da precipitação máxima de 0,5 hora (mm) (RAINHHMX) representa a mais extrema intensidade de precipitação de 30 minutos registrados em todo o período de registro.

Diante da dificuldade para o estabelecimento de alguns destes dados, foi utilizado o software “pcpSTAT”, desenvolvido por Liersch (2003b), este software calcula os parâmetros estatísticos diários de precipitação usados pelo gerador climático do modelo SWAT resultando em um arquivo de saída (*output*) com os dados médios calculados.

4.7.3 Temperatura do ponto de orvalho

A temperatura do ponto de orvalho (DEWPT) é a temperatura à qual a pressão de vapor real presente na atmosfera é igual à pressão de vapor de saturação. Este valor é calculado pela soma da temperatura do ponto de orvalho para cada dia do mês para todos os anos de registro e dividindo pelo número de dias somados:

$$\mu_{dew,mon} = \frac{\sum_{d=1}^N T_{dew,mon}}{N}$$

Onde:

$\mu_{dew,mon}$ é a temperatura do ponto de orvalho média diária para o mês (°C),
 $T_{dew,mon}$ é a temperatura do ponto de orvalho para o dia d no mês mon (°C)
 N é o número total de registros diários de ponto de orvalho por mês.

A temperatura do ponto de orvalho (DEWPT) foi calculada seguindo médias mensais, utilizando dados diários de temperatura e umidade relativa do ar. Estes dados diários foram

organizados em duas tabelas em um arquivo de texto (txt) e inseridos diretamente no *software* “*dew*”, desenvolvido por Liersch (2003).

4.7.4 Radiação solar

Média diária de radiação solar para o mês (MJ/m²/dia) (SOLARAV). Este valor é calculado pela soma da radiação solar total para cada dia do mês para todos os anos de registro e dividindo pelo número de dias somados:

$$\mu rad_{mon} = \frac{\sum_{d=1}^N H_{day,mon}}{N}$$

Onde:

μrad_{mon} é a radiação média diária solar para o mês (MJ / m² /day),
 $H_{day,mon}$ é o total de radiação solar que atinge a superfície da Terra para o dia d no mês mon (MJ / m² / day)
 N é o número total de registros de radiação solar diária por mês.

As estações climáticas disponibilizam a informação de horas diárias de insolação, porém o SWAT requer informações referentes a radiação solar em MJ/m²/d. Para a conversão da insolação em radiação solar foi utilizada uma planilha do Excel com fórmulas baseadas em Linacre, (1992) e Allen et al, (1998), que consideram a latitude, a Distância Relativa Inversa Terra-Sol, declinação solar, ângulo do pôr do sol, radiação extraterrestre e duração do dia.

4.7.5 Velocidade do vento

Velocidade média diária do vento no mês (m/s) (WINDAV). Este valor é calculado pela soma dos valores médios ou velocidade média do vento para cada dia do mês para todos os anos de registro e dividindo pelo número de dias somados:

$$\mu wnd_{mon} = \frac{\sum_{d=1}^N \mu_{wnd,mon}}{N}$$

Onde:

μwnd_{mon} é a velocidade do vento média diária para o mês (m/s),
 μ é a velocidade média do vento para o dia d no mês mon (m/s),
 N é o número total de registros de velocidade do vento diárias no mês.

Os dados referentes à velocidade do vento foram obtidos juntamente com os dados de precipitação e temperatura disponibilizados na série histórica e organizados em arquivo de texto para inserção no gerador climático WGEN.

Depois de obtidos os dados para as estações climáticas e realizados os cálculos, os atributos das estações podem ser inseridos no modelo (nome ou código da estação, longitude, latitude, altitude, período de simulação) e os valores calculados podem ser editados diretamente no banco de dados (Figura 16). Na rotina interna do modelo já existem estações climáticas registradas, porém, localizadas nos Estados Unidos da América, porém deve-se optar pelas estações específicas da área de estudo selecionando a pasta com as mesmas (WGEN user), assim o modelo irá buscar a localização de cada uma e ligar com os arquivos de precipitação, temperatura, radiação solar, velocidade do vento e umidade relativa do ar contidos na pasta de cada estação.

Month	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
Value	28	29.1	27.9	25.9	22.5	20.2	21.4	23.6	25.2	26.1	28.1	29.1

Figura 16 - Tela para edição dos parâmetros das estações climáticas

4.8 Delimitação das Sub-bacias, Determinação das HRUs e Simulação

O processo de subdivisão da bacia hidrográfica através da interface ArcSWAT inicia com a introdução do Modelo Digital de Elevação (MDE) no modelo e está sujeito a algumas opções por parte do usuário. Na primeira, denominada de “Mask” é possível restringir a área máxima a qual a ferramenta delimita as sub-bacias por meio da inserção de uma máscara com os limites da bacia em formato *raster*. A segunda diz respeito à imposição da rede de drenagem, indicando linhas preferenciais para formação da rede de drenagem. Esta opção é

denominada como “*burn in*”, por meio da qual se pode inserir a rede de drenagem da bacia em formato vetorial (linhas). A partir daí é estabelecida à área de drenagem mínima de contribuição para formação de um canal – de modo que menores valores implicam em maior quantidade de sub-bacias. Por fim, indica-se o exutório da bacia por meio da seleção de um dos chamados pontos de controle gerados no processo de delimitação, esse ponto específico localizado no exutório da bacia é o ponto de partida para a delimitação das sub-bacias.

Depois se procede com a inserção e reclassificação dos mapas de uso e cobertura da terra, de tipos de solo, bem como a definição de intervalos de declividade, sendo possível a definição de até cinco classes para a formação das Unidades de Resposta Hidrológica (HRUs). Em seguida, é possível trabalhar com níveis mínimos de sensibilidade na formação das HRUs para execução do modelo, de modo que a interface permite limites para o estabelecimento dessas HRUs. Assim, limiares mínimos (0% por exemplo) permitem que todos os tipos de uso e cobertura da terra, tipos de solo e intervalos de declividade sejam considerados pelo modelo SWAT na criação das HRUs mesmo que ocupem áreas pouco significativas favorecendo uma maior precisão.

Logo após os dados climáticos tabulares são inseridos no modelo por meio da ferramenta *Weather Data definition* onde é possível localizar as estações que serão utilizadas para a simulação bem como as tabelas em formato *txt* contendo os dados de precipitação, temperatura, radiação solar, velocidade do vento e umidade relativa do ar. Com os dados climáticos inseridos segue-se para o *SWAT simulation*, por meio desta ferramenta o modelo realiza a simulação do cenário proposto pelos dados de entrada e prepara os arquivos de saída (*outputs*) de manejo, pesticida, sedimentos, fluxo de água, nutrientes do solo, entre outros em formato tabular (*accs*), dependendo dos objetivos do trabalho e da forma de apresentação dos dados pode-se, a partir destes dados produzir gráficos e/ou mapas.

5 DADOS REQUERIDOS PELO MODELO SWAT E DISCRETIZAÇÃO DOS PARÂMETROS CARACTERÍSTICOS DA ÁREA DE ESTUDO

Os dados requeridos para entrada nos modelos hidrológicos são fundamentais para a elaboração da base de dados sobre a qual o modelo vai construir as relações em sua rotina interna e realizar as simulações. Esses dados, na maioria das vezes são encontrados em estado bruto, ou seja, sem tratamento ou correção de incertezas, cabe ao usuário tratar os dados transformando-os em informações confiáveis. A necessidade de dados de entrada varia de modelo para modelo, sendo os mais importantes os climáticos, físicos de solo, uso e cobertura da terra e de relevo.

5.1 Modelo Digital de Elevação (MDE)

O Modelo Digital de Elevação gerado para a bacia do rio Ivaí (Figura 17) tem altitudes que variam de 226.9m na sua foz com o rio Paraná no Terceiro Planalto Paranaense, setor inferior da bacia, até 1289.2m em seu setor superior na transição entre o Segundo e o Terceiro Planalto Paranaense, essa variação se deve às características dos diferentes compartimentos morfoestruturais e morfoesculturais identificados por Santos et al, (2006).

Segundo Destefane (2005), o setor superior abrange o Segundo Planalto Paranaense possuindo altitudes que variam de cerca de 1200m (Serra da Boa Esperança) até 500 m na transição para o Terceiro Planalto. Relevo bastante movimentado com freqüente ocorrência de saltos e corredeiras tanto na drenagem principal como nos tributários. O setor médio, no Terceiro Planalto Paranaense apresenta altitude de 500 a 300m. Relevo tabular formado por mesetas passando a morros mais arredondados a jusante. O setor inferior apresenta altitudes entre 300 até 226.9m. Relevo suave de colinas e chapadas. São raras as corredeiras tanto no Ivaí como em seus afluentes.

Os parâmetros topográficos tais como a declividade e comprimento de rampa são determinantes para estimar a produção de sedimentos na escala da bacia hidrográfica. Assim, torna-se imprescindível para os modelos distribuídos de base física como o SWAT delinear as sub-bacias e extrair a rede de drenagem. De acordo com Calijuri et al, (1998), a representação do sistema de drenagem da bacia hidrográfica e seu grau de ramificação permite caracterizar a velocidade do escoamento, e, conseqüentemente, a propagação dos sedimentos ao longo da mesma.

Na aplicação do modelo SWAT, dada a extensão da área e a variação das altitudes foram delimitadas 27 sub-bacias das quais as de número 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 e 10 situam-se no setor inferior, 9, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 22 e 26 no setor médio e 21 e 27 no setor superior (Quadro 6).

Quadro 6 - Sub-bacias geradas pelo SWAT com área e elevação média

Sub-bacias	Setor da bacia	Área em hectares	Elevação média (m)
1	Inferior	169995,8730	319.5
2	Inferior	116770,7991	336.72
3	Inferior	72244,5601	376.85
4	Inferior	100847,5083	354.69
5	Inferior	133136,4036	377.62
6	Inferior	86693,4721	389.20
7	Inferior	110430,9704	359.25
8	Inferior	82565,2115	436.66
9	Médio/Inferior	97456,4371	382.99
10	Inferior	75340,7555	493.07
11	Médio	254330,3391	424.8
12	Médio	138886,480	426.52
13	Médio	102027,011	505.25
14	Médio	153040,5171	608.4
15	Médio	161739,3519	575.17
16	Médio	72097,1222	527.14
17	Médio	75340,7555	454.68
18	Médio	89937,1054	574.51
19	Médio	3096,1954	416.66
20	Médio	85808,8448	634.44
21	Superior	249317,4512	657.46
22	Médio	105860,3962	695.9
23	Médio/Superior	252708,5224	655.15
24	Médio	116770,7991	871.93
25	Médio	117065,6749	805.45
26	Médio	84481,9039	1010.8
27	Superior	356799,6641	772.44

Planalto Paranaense, onde dominam as rochas sedimentares da Bacia do Paraná, as declividades são mais pronunciadas, em algumas porções ultrapassam os 30%.

No Terceiro Planalto, área de domínio das rochas eruptivas básicas, setor médio da bacia, o relevo apresenta menores amplitudes altimétricas com predomínio das baixas declividades, entre 0 e 12% podendo chegar a 20% em alguns segmentos de cabeceiras de drenagem e interflúvios dos tributários localizados nessa porção. No setor inferior, área de domínio da Formação Caiuá as declividades apresentam variação de 0-12%, na porção representada pela planície aluvial do rio Ivaí por se tratar de um ambiente deposicional com pouca variação espacial de altitude, as declividades também têm pouca variação de 0-6% (figura 18).

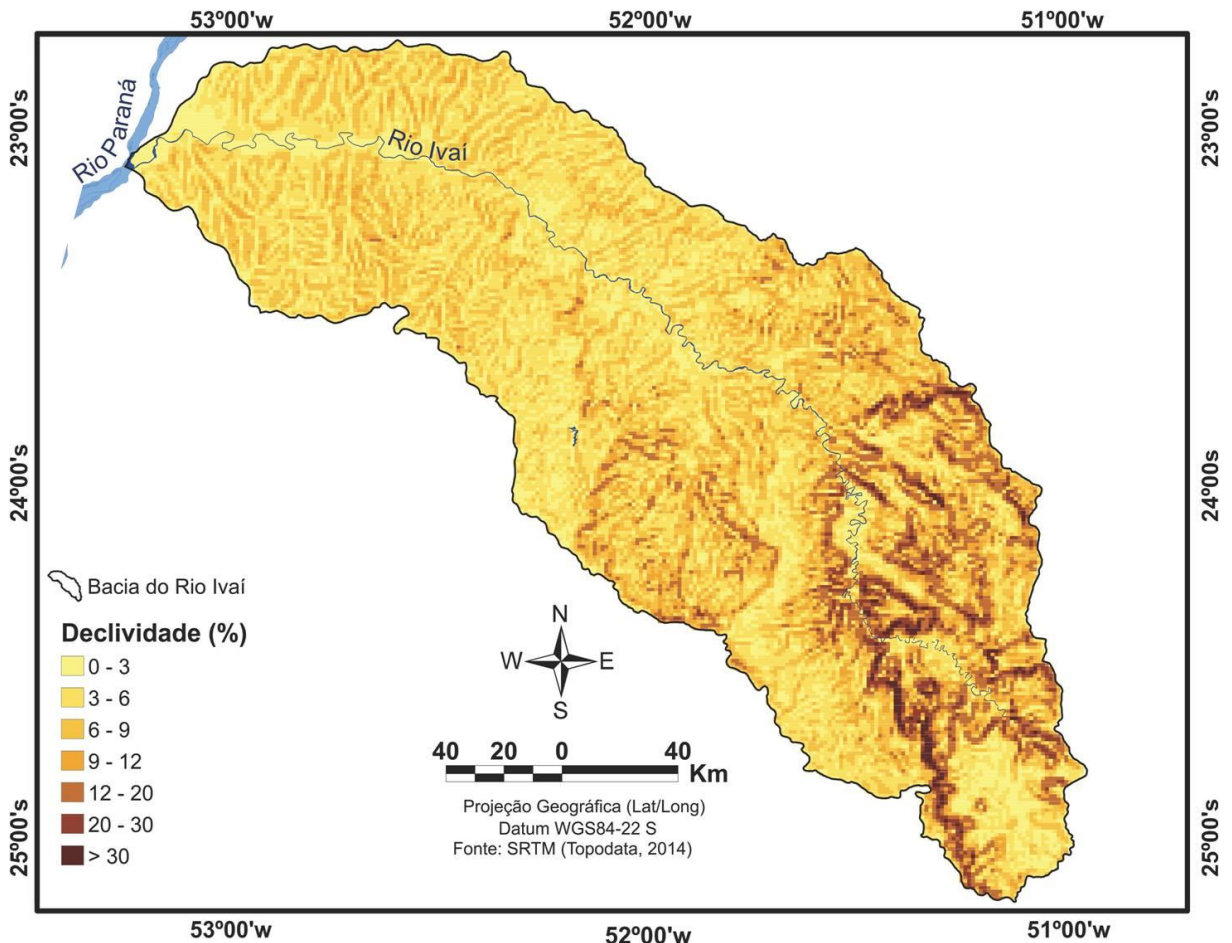


Figura 18 – Declividade da bacia do Rio Ivaí.

5.3 Solos

Os dados de solos utilizados pelo SWAT podem ser divididos em dois grupos, características físicas e características químicas. As propriedades físicas do solo governam o movimento do ar através do perfil e têm um impacto importante sobre o ciclo da água dentro da HRU. Entradas para características químicas são usadas para definir os níveis iniciais dos produtos químicos diferentes no solo. Enquanto as propriedades físicas são necessárias, a informação sobre as propriedades químicas é opcional. O arquivo de entradas do solo (.sol) define as propriedades físicas para todas as camadas do solo (ARNOLD et al, 2011).

Os solos encontrados na área de pesquisa foram agrupados de acordo com as suas classes (Argissolos, Latossolos, Cambissolos, Gleissolos, Neossolo Litólico, Neossolo Flúvico, Nitossolos e Organossolos), e textura, que variou de média, argilosa, arenosa, arenosa/média e média/argilosa (Figura 19).

No setor superior da bacia predominam os solos do tipo Neossolos Litólicos de textura média e argilosa nas áreas de maior declividade e Cambissolos de textura argilosa. Ocorrem ainda nessa área, os Argissolos de textura média/argilosa, em menor proporção, mas de forma significativa os Latossolos de textura argilosa, geralmente sobre o topo dos interflúvios menos dissecados.

No setor médio da bacia a interação entre o substrato geológico, a geomorfologia e os processos geomorfológicos associados deram origem a uma maior heterogeneidade dos tipos de solos em comparação com os demais setores da bacia. Segundo Douhi (2013), neste setor predominam os Nitossolos de textura argilosa, que dominam as vertentes e os topos mais estreitos e dissecados. Os Neossolos Litólicos de textura média, normalmente estão associados aos locais mais dissecados e de maiores declividades. De acordo com a EMBRAPA (2006), os Latossolos de textura média e argilosa, que constituem solos profundos e bem evoluídos, associados à ocorrência dos arenitos, ocupando os topos de alguns interflúvios e também os Argissolos de textura arenosa/média, que recobrem segmentos de vertentes nas áreas onde o substrato geológico é constituído por arenitos da Formação Caiuá.

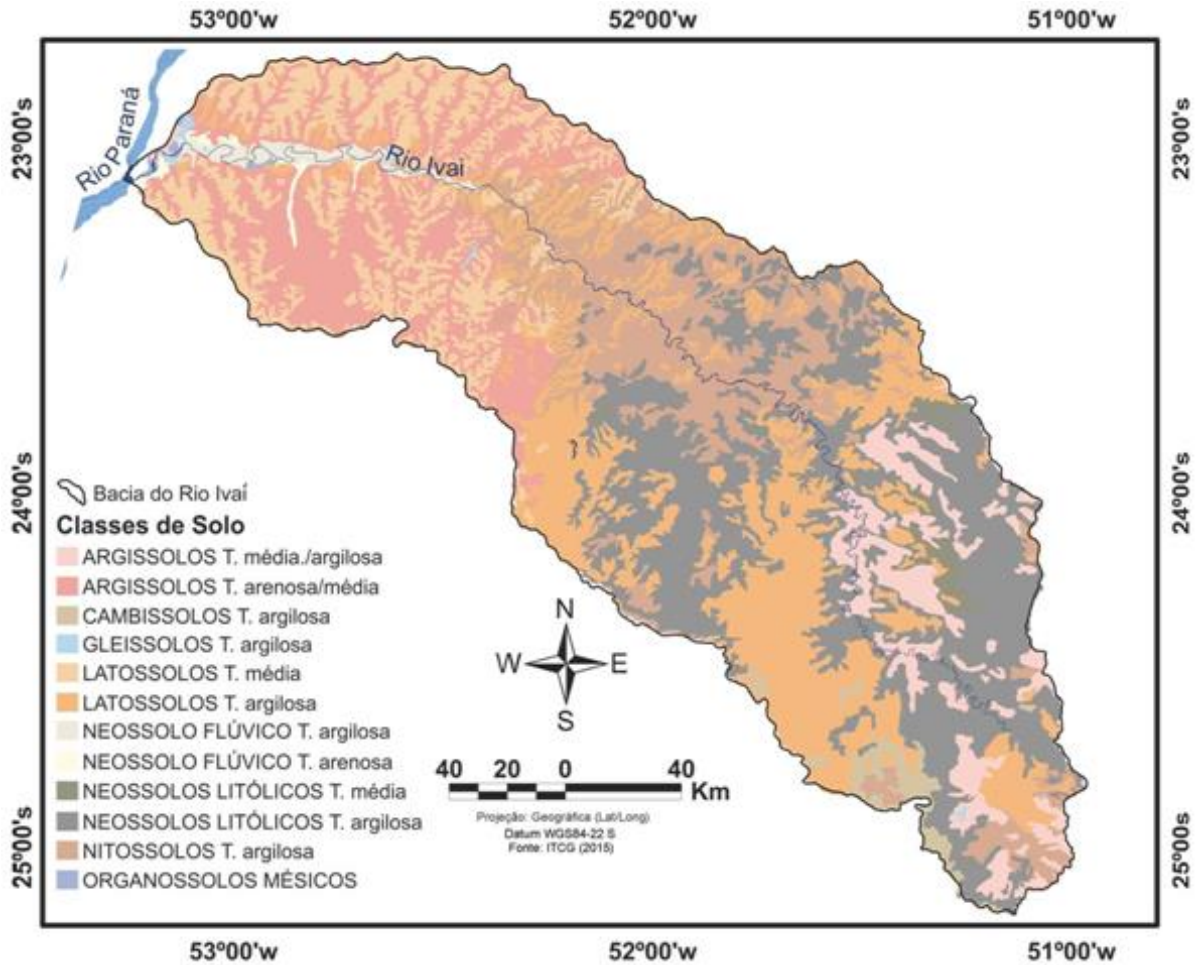


Figura 19 - Tipos de solo da bacia do rio Ivaí

No setor inferior da bacia do Ivaí, na área de ocorrência dos arenitos da Formação Caiuá, ocorrem os Latossolos de textura média e os Argissolos de textura arenosa/média. Segundo Santos et al, (2008) ocorrem ainda na planície aluvial do rio Ivaí, solos pouco desenvolvidos do tipo Neossolo Flúvico que recobre os terraços, a planície e algumas ilhas e algumas manchas de Gleissolos e Organossolos. Esses solos de acordo com a Embrapa (2006), são de médio a mal drenados, o processo de remoção de água desses solos é lento, permanecendo com elevados teores de umidade boa parte do ano. Esta condição é o reflexo da morfologia suave do terreno e da elevação do lençol freático, principalmente durante os eventos de alta precipitação. As classes de solos e suas características são descritas a seguir

Os Argissolos de acordo com a EMBRAPA (2006), grande parte dos solos desta classe apresenta um evidente incremento no teor de argila do horizonte superficial para o horizonte B, com ou sem decréscimo nos horizontes subjacentes. A transição entre os horizontes A e Bt é usualmente clara, abrupta ou gradual. São de profundidade variável, desde forte a

imperfeitamente drenados, de cores avermelhadas ou amareladas, e mais raramente, brunadas ou acinzentadas. A textura varia de arenosa a argilosa no horizonte A e de média a muito argilosa no horizonte Bt, sempre havendo aumento de argila daquele para este.

Os Argissolos são solos formados a partir da alteração de rochas sedimentares (arenito da Formação Caiuá, Botucatu, Piramboia e Rio do Rastro), particularmente. A profundidade do solum (A+B) varia desde 100 cm ou menos, até 200 cm ou mais. O horizonte A que pode ou não apresentar A, tem também espessura bastante variável, atingindo principalmente nas variedades que apresentam AB, até 100 cm ou pouco mais, enquanto que nas variedades onde este horizonte não se faz presente chega a atingir espessura em torno de 200 cm (EMBRAPA, 2006).

Os Argissolos são encontrados ao longo da bacia em relevo suave ondulado onde as declividades variam de 8% a 20%. A característica marcante desses solos é a diferença textural entre os horizontes A e E mais arenoso e o subsuperficial Bt, mais argiloso, como foi demonstrado nos trabalhos de (EMBRAPA, 1984).

Os Latossolos são definidos de acordo com EMBRAPA (2006), como solos em avançado estágio de intemperização, muito evoluídos, resultado de intensas transformações no material original. São, em geral, muito profundos e apresentam seqüência de horizontes A, Bw, C com pouca diferenciação de horizontes e transições usualmente difusas ou graduais. Devido ao elevado grau de intemperismo, apresentam-se, normalmente, ácidos e com baixa saturação por bases, podendo ocorrer; no entanto, solos com elevada saturação por bases em regiões que apresentam estação seca pronunciada ou originados a partir de rochas básicas.

Os Latossolos são solos que apresentam espessura superior a 3 m de profundidade; são muito porosos, friáveis e ocorrem geralmente em áreas de relevo plano a suave ondulado onde a declividade varia de 0 a 8%. Embora os Latossolos em geral sejam considerados como solos resistentes à erosão, principalmente os de textura argilosa, formados a partir da alteração do basalto da Formação Serra Geral, o mesmo não se pode afirmar para os Latossolos de textura média, oriundos da alteração do arenito da Formação Caiuá, Botucatu, Piramboia e Rio do Rastro (EMBRAPA, 1984).

Os Nitossolos compreendem solos constituídos por material mineral, com horizonte B nítico, textura argilosa ou muito argilosa (teores de argila maiores que 350g/kg de solo a partir do horizonte A), bom estágio de desenvolvimento (evolução e profundidade), estrutura em blocos subangulares ou angulares, ou prismática, de grau moderado ou forte, com cerosidade expressiva nas superfícies dos agregados. São solos constituídos por material mineral, que apresentam horizonte B nítico abaixo do horizonte A com argila de atividade baixa ou caráter

alítico na maior parte do horizonte B, dentro de 150cm da superfície do solo. Têm textura argilosa ou muito argilosa (teores de argila maiores que 350g/kg de solo a partir do horizonte A) e relação textural igual ou menor que 1,5. (EMBRAPA, 2006).

Os Organossolos de acordo com a EMBRAPA (2006), compreendem solos pouco evoluídos, com preponderância de características devidas ao material orgânico, de coloração preta, cinzenta muito escura ou brunada, resultantes de acumulação de restos vegetais, em graus variáveis de decomposição, em condições de drenagem restrita (ambientes mal a muito mal drenados), ou em ambientes úmidos de altitudes elevadas, saturados com água por apenas poucos dias durante o período chuvoso. Em ambientes sujeitos a forte hidromorfismo, devido ao lençol freático permanecer elevado grande parte do ano, as condições anaeróbicas restringem os processos de mineralização da matéria orgânica e limitam o desenvolvimento pedogenético, conduzindo à acumulação expressiva de restos vegetais. Os Organossolos são solos rasos normalmente encontrados em relevos planos, próximos às margens dos rios. São solos porosos que apresentam alta capacidade de armazenamento de água devido aos elevados teores de matéria orgânica.

Os Neossolos Litólicos são solos rasos com menos de 40 cm de espessura e estão assentados diretamente sobre a rocha ou sobre o horizonte C ou Cr. De acordo com a Embrapa (1984), na bacia do rio Ivaí esses solos são formados a partir da alteração de diferentes materiais de origem, tais como de rochas eruptivas básicas, arenitos, siltitos e folhelhos pertencentes à Formação Serra Geral, Caiuá, Botucatu, Piramboia, Rio do Rastro, Terezina e Irati respectivamente. Ocorrem em sua grande maioria em locais de topografia acidentada, normalmente em relevo forte ondulado, montanhoso e até escarpado. Esses solos ocupam uma grande extensão espacial, principalmente nos setores médio e superior da bacia.

De acordo com Santos et al, (2013), os Cambissolos na bacia do rio Ivaí, foram encontrados em relevo forte ondulado a montanhoso e devido a essa característica topográfica são muito susceptíveis à erosão, muito embora possam ser encontradas algumas manchas desse solo em relevo plano.

Segundo a EMBRAPA (2006), os Cambissolos são solos constituídos por material mineral, têm espessura que varia de 50 a 130 cm com horizonte B incipiente subjacente a qualquer tipo de horizonte superficial, desde que em qualquer dos casos não satisfaçam os requisitos estabelecidos para serem enquadrados nas classes Vertissolos, Chernossolos, Plintossolos, Organossolos. Têm seqüência de horizontes A ou hístico, Bi, C, com ou sem R. Devido à heterogeneidade do material de origem, das formas de relevo e das condições climáticas, as características destes solos variam muito de um local para outro. Assim, a classe

comporta desde solos fortemente até imperfeitamente drenados, de rasos a profundos, de cor bruna ou bruno-amarelada até vermelho escuro.

O horizonte B incipiente (Bi) tem textura franco-arenosa ou mais argilosa, e o *solum*, geralmente, apresenta teores uniformes de argila, podendo ocorrer ligeiro decréscimo ou um pequeno incremento de argila do A para o Bi. Admite-se diferença marcante de granulometria do A para o Bi, em casos de solos desenvolvidos de sedimentos aluviais ou outros casos em que há descontinuidade litológica ou estratificação do material de origem.

Os Gleissolos compreendem solos hidromórficos, constituídos por material mineral, que apresentam horizonte glei dentro de 150cm da superfície do solo, imediatamente abaixo de horizontes A ou E (com ou sem gleização), ou de horizonte hístico com espessura insuficiente para definir a classe dos Organossolos; não apresentam textura exclusivamente areia ou areia franca em todos os horizontes dentro dos primeiros 150cm da superfície do solo ou até um contato lítico, tampouco horizonte vértico, ou horizonte B textural com mudança textural abrupta acima ou coincidente com horizonte glei ou qualquer outro tipo de horizonte B diagnóstico acima do horizonte glei. Horizonte plúntico, se presente, deve estar à profundidade superior a 200 cm da superfície do solo (EMBRAPA, 2006).

São solos formados principalmente a partir de sedimentos, estratificados ou não, e sujeitos a constante ou periódico excesso d'água, o que pode ocorrer em diversas situações. Comumente, desenvolvem-se em sedimentos recentes nas proximidades dos cursos d'água e em materiais colúvio-aluviais sujeitos a condições de hidromorfia, podendo formar-se também em áreas de relevo plano de terraços fluviais, lacustres ou marinhos, como também em materiais residuais em áreas abaciadas e depressões. São eventualmente formados em áreas inclinadas sob influência do afloramento de água subterrânea (surgentes). São solos que ocorrem sob vegetação hidrófila ou higrófila herbácea, arbustiva ou arbórea (EMBRAPA, 2006).

Para o banco de dados requerido pelo modelo SWAT fez-se necessário adicionar as características físicas dos solos da bacia (Quadro 7). As características físicas dos solos são requeridas pelo modelo porque auxiliam no entendimento da sua dinâmica físico-hídrica e na maneira que esta dinâmica e sua variabilidade espacial estão intrinsecamente relacionadas com o escoamento superficial e subsuperficial, evapotranspiração, produção de sedimentos, entre outras.

Quadro 7 - Características físicas das classes de solo após reclassificação.

Classes	ARG M/ARG	ARG A/MED	CAMB	GLEI	LAT ARG	LAT TM	NEO FLUV AREN	NEO FLUV ARG	NEO LITOL T M	NEO LITOL T ARG	NIT	ORG
NLAYERS	2	4	5	2	3	4	3	3	1	3	5	1
HYDGRP	C	C	C	D	A	B	C	C	D	D	C	D
SOL_ZMX	900	1.8	1.8	600	2.05	2	790	800	300	560	1.53	200
ANION_EXCL	0.32	0.47	0.74	0.39	0.64	0.39	0.43	0.33	0.4	0.43	0.33	0.4
SOL_Z1	200	280	280	300	420	150	320	200	300	350	100	200
SOL_BD1	1.7	1.37	0.61	1.4	0.86	1.62	1.6	1.6	1.6	1.6	1.38	1.6
SOL_AWC1	0.4	0.4	0.22	0.32	0.15	0.21	1.4	1.4	0.25	0.25	0.09	0.13
SOL_K1	110	120	5	3.2	1.5	250	32	14	16	18	20	6.8
SOL_CBN1	0.74	0.38	4.72	2.9	3.29	0.42	2.95	3.92	3.46	3.85	1.16	9.9
CLAY1	16	13	54	45	68	12	28	50	28	52	41	36
SILT1	6	7	35	32	27	1	8	40	43	35	29	42
SAND1	78	80	11	23	5	87	74	10	29	13	30	22
ROCK1	0	0	0	0	0	0	0	0	3	3	0	0
SOL_ALB1	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17
USLE_K1	0.36	0.36	0.3	0.37	0.14	0.28	0.47	0.47	0.35	0.35	0.2	0.37
SOL_Z2	900	550	610	600	1.05	500	580	400	-	450	410	-
SOL_BD2	1.7	1.31	0.71	1.4	0.76	1.57	1.6	1.6	-	1.6	1.15	-
SOL_AWC2	0.4	0.4	0.22	0.32	0.11	0.21	1.2	1.2	-	0.25	0.1	-
SOL_K2	18	113	4.1	3	0.9	210	20	16	-	14	15.2	-
SOL_CBN2	0.57	0.2	2.74	0.8	1.39	0.25	1.49	1.24	-	1.89	0.44	-
CLAY2	45	18	61	48	74	16	33	48	-	66	60	-
SILT2	4	7	28	32	17	4	5	42	-	27	15	-
SAND2	51	75	11	20	9	80	62	10	-	7	25	-
ROCK2	0	0	0	0	0	0	0	0	-	15	0	-
SOL_ALB2	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	-	0.17	0.17	-
USLE_K2	0.17	0.36	0.3	0.37	0.13	0.28	0.47	0.47	-	0.35	0.2	-
SOL_Z3	-	1.5	800	-	2.05	1.3	790	800	-	560	780	-
SOL_BD3	-	1.31	0.81	-	0.85	1.5	1.6	1.6	-	1.6	1.16	-
SOL_AWC3	-	0.4	0.22	-	0.15	0.17	1.2	1.2	-	0.25	0.1	-
SOL_K3	-	15	2.9	-	0.7	160	17	16	-	51.3	16	-
SOL_CBN3	-	0.1	1.91	-	1.42	0.24	1.29	0.77	-	0.45	0.32	-
CLAY3	-	12.5	67	-	74	18	34	43	-	24	60	-
SILT3	-	20.24	29	-	22	5	11	44	-	49	17	-
SAND3	-	67.26	4	-	4	77	55	13	-	27	23	-
ROCK3	-	0	0	-	0	0	0	0	-	29	0	-
SOL_ALB3	-	0.17	0.17	-	0.17	0.17	0.17	0.17	-	0.17	0.17	-
USLE_K3	-	0.2	0.3	-	0.13	0.28	0.47	0.47	-	0.35	0.2	-
SOL_Z4	-	1.8	960	-	-	2	-	-	-	-	1.13	-
SOL_BD4	-	1.31	1.01	-	-	1.51	-	-	-	-	1.16	-
SOL_AWC4	-	0.4	0.12	-	-	0.17	-	-	-	-	0.12	-
SOL_K4	-	13	3.2	-	-	158	-	-	-	-	13	-
SOL_CBN4	-	0.07	2.01	-	-	0.2	-	-	-	-	0.26	-
CLAY4	-	22	65	-	-	19	-	-	-	-	60	-
SILT4	-	7	31	-	-	3	-	-	-	-	12	-
SAND4	-	71	4	-	-	78	-	-	-	-	28	-
ROCK4	-	0	0	-	-	0	-	-	-	-	0	-
SOL_ALB4	-	0.17	0.17	-	-	0.17	-	-	-	-	0.17	-
USLE_K4	-	0.36	0.3	-	-	0.28	-	-	-	-	0.2	-
SOL_Z5	-	-	1.8	-	-	-	-	-	-	-	1.53	-
SOL_BD5	-	-	1.09	-	-	-	-	-	-	-	1.11	-
SOL_AWC5	-	-	0.04	-	-	-	-	-	-	-	0.12	-
SOL_K5	-	-	2.5	-	-	-	-	-	-	-	14	-
SOL_CBN5	-	-	0.69	-	-	-	-	-	-	-	0.2	-
CLAY5	-	-	71	-	-	-	-	-	-	-	51	-
SILT5	-	-	25	-	-	-	-	-	-	-	20	-
SAND5	-	-	4	-	-	-	-	-	-	-	29	-
ROCK5	-	-	0	-	-	-	-	-	-	-	0	-
SOL_ALB5	-	-	0.17	-	-	-	-	-	-	-	0.17	-
USLE_K5	-	-	0.3	-	-	-	-	-	-	-	0.2	-

Legenda: As siglas no quadro representam: quantidade de camadas de solo (NLAYER), Grupo hidrológico dos solos (HYDGRP), profundidade máxima que a raiz alcança (SOL_ZMX), porosidade (ANION_EXCL), profundidade da camada (SOL_Z), densidade aparente (SOL_BD), água disponível no solo (SOL_AWC), condutividade hidráulica saturada (SOL_K), erodibilidade (USLE_K), albedo (SOL_ALB), carbono orgânico (SOL_CBN) e percentagem de argila (CLAY), silte (SILT), areia (SAND) e seixo (ROCK).

5.4 Uso e Cobertura da Terra

As classes de uso e cobertura da terra são requeridas pelo modelo SWAT para refletir a influência de suas características sobre a dinâmica hidrológica da bacia hidrográfica. Após a realização da classificação das imagens Landsat da área para o ano de 2009, foram elencadas seis classes temáticas para este estudo: floresta, pastagem, corpos hídricos, culturas temporárias, solo exposto e cana de açúcar. A porcentagem de área ocupada por cada uma das classes temáticas (Figura 20).

Por meio do mapeamento das classes temáticas de uso e cobertura da terra, identificou-se que as áreas destinadas às pastagens cobrem grandes extensões em todos os setores da bacia, mais precisamente 62,68% do total. As áreas florestadas possuem maior extensão na parte superior da bacia e, em ocorrências pontuais nos demais setores da bacia, totalizando 17,56% do total da cobertura da área. A bacia do rio Ivaí, embora discretamente, ainda contém alguns remanescentes da vegetação natural, entretanto isso ocorre nas áreas onde a aptidão agrícola ou pastagem fica mais difícil. Os remanescentes de vegetação natural estão presentes na parte mais alta, onde o relevo é mais dissecado e o clima é do tipo subtropical; na parte mais baixa, existem muitas várzeas inundáveis com as cheias fluviais.

As áreas destinadas à cana-de-açúcar ocupam cerca de 2,26% da área da bacia e estão localizadas principalmente no setor inferior da bacia, área abrangida pela Formação Caiuá. Pode-se observar que, as áreas destinadas às pastagens apresentam grande expressão, devido às características físicas da área, como predominância das baixas declividades, solos de menor fertilidade natural e conseqüente menor valorização da terra para culturas como a soja por exemplo.

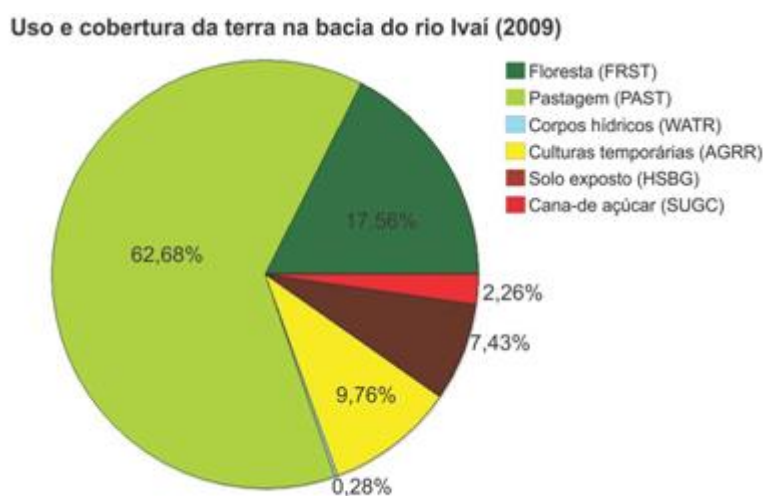


Figura 20 - Porcentagem de área ocupada por cada uma das classes temáticas.

As áreas destinadas às culturas temporárias principalmente soja e milho somam 9,76% do total da área da bacia, estão localizadas, de maneira geral no médio e médio/baixo curso da bacia (Figura 21) em terrenos abrangidos por Latossolos e Nitossolos, solos bem drenados e menos frágeis aos processos erosivos, com alta fertilidade natural o que garante maior produtividade às culturas agrícolas. Os dados demonstram a vocação agrícola da área, configurando-se numa atividade econômica de grande importância, principalmente no curso médio da bacia.

A classe temática de solo exposto (7,43% da área) está relacionada principalmente à época do ano em que as imagens orbitais utilizadas nesta pesquisa foram feitas (entre os dias 4 e 18 abril) o que coincide com o período no qual algumas culturas temporárias como soja e milho estão em fase inicial de crescimento (setor médio da bacia), e/ou as áreas ocupadas com cana de açúcar (setor médio/baixo da bacia) haviam sido recentemente colhidas. No Paraná a colheita da cana de açúcar inicia no mês de março, sendo assim, as áreas destinadas a esta cultura devem ser mais significativas do que está representado no mapa de uso e cobertura da terra da bacia do rio Ivaí (Figura 21).

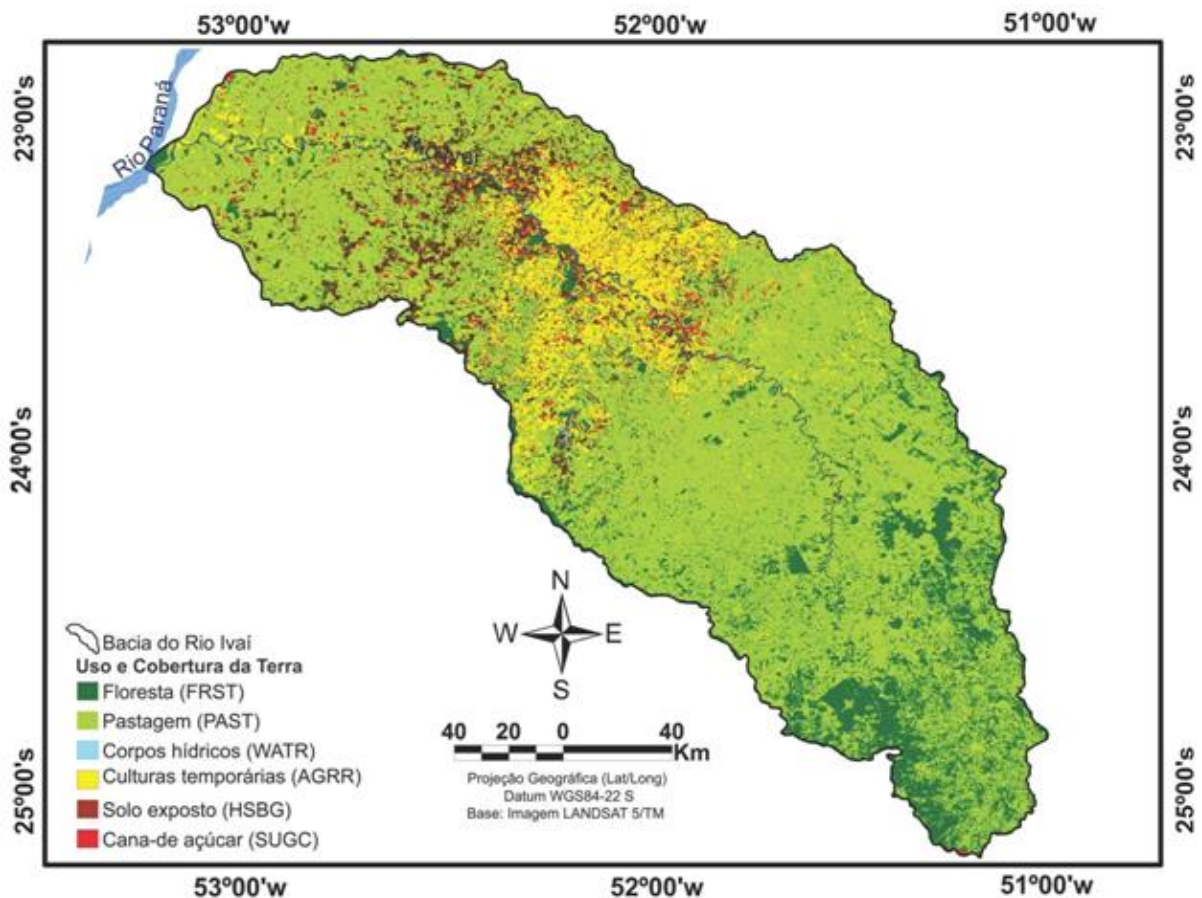


Figura 21 - Uso e cobertura da terra da bacia do rio Ivaí para o ano de 2009 com a reclassificação realizada pelo modelo SWAT.

5.5 Dados das Estações Climatológicas e Pluviométricas

O modelo SWAT requer para a geração da evapotranspiração total e potencial os dados referentes a radiação solar, temperatura, velocidade do vento e umidade relativa do ar, essas informações também foram obtidas para as estações climatológicas e inseridas no banco de dados do modelo, que em sua rotina interna relaciona tais informações com o arquivo contendo as sub-bacias resultando na distribuição espacial dos valores de evapotranspiração total e potencial das vinte e sete sub-bacias para o ano de 2009.

O levantamento de dados climáticos mostrou que dos três setores da bacia do rio Ivaí o setor médio é aquele que apresenta a menor cobertura de estações climatológicas (Figura 22), embora haja na bacia um número considerável de estações pluviométricas, também são requeridas informações de temperatura, velocidade do vento, radiação solar e umidade relativa do ar, por essa razão foram elencadas as estações que dispusessem dessas informações para compor o banco de dados climático do modelo.

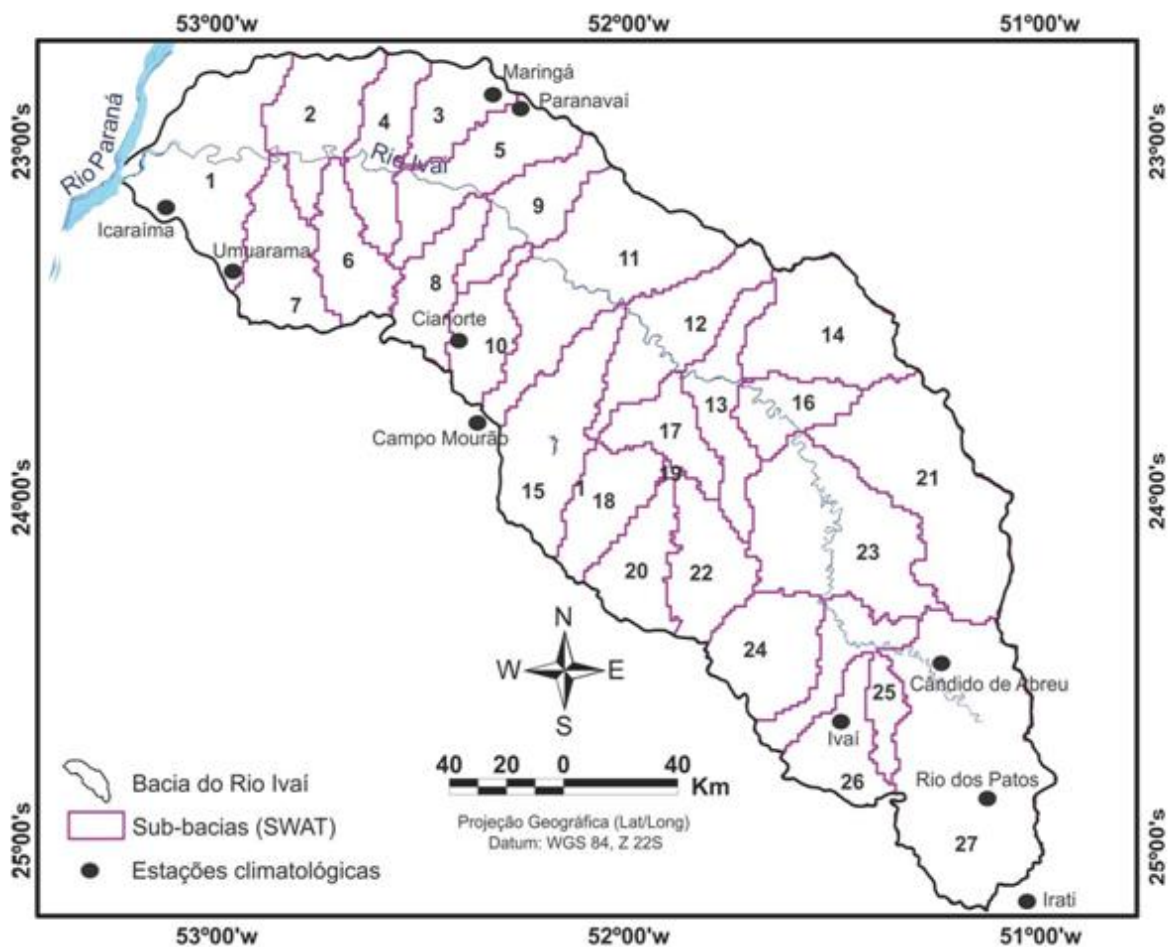


Figura 22 - Sub-bacias delimitadas pelo modelo SWAT com a localização das estações climatológicas

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 Análise da Pluviosidade e da Evapotranspiração da Bacia do Rio Ivaí

A análise dos resultados demonstra a complexidade que envolve a interação entre as variáveis de um sistema fluvial, que embora sejam reconhecidas e descritas na literatura evidenciam comportamentos distintos quanto às respostas obtidas por cada modelo de análise do escoamento superficial.

A figura 23 apresenta o mapa da distribuição espacial da precipitação acumulada (média) para o ano de 2009 para as sub-bacias delimitadas durante o processo de subdivisão da área requerida pelo modelo SWAT. Esse resultado foi alcançado por meio da edição do banco de dados climático (WGEN) inserindo-se as informações de dez estações climatológicas que se localizam no interior e no entorno da área territorial representada. O modelo atribui a cada sub-bacia os dados de precipitação da estação mais próxima.

O trecho que representa o setor inferior (sub-bacias 1, 2, 4, 5, 6, 7 e 8) e o setor médio/inferior e médio da bacia do rio Ivaí (sub-bacias 9 e 11) apresentam os menores índices pluviométricos por se localizarem em um setor de baixas altitudes (319.5 – 424.8 m em média), numa faixa de transição do clima tropical para o subtropical com precipitações médias anuais < 1.525.1-1.824.6 mm/ano. As sub-bacias 3 e 10, localizadas no setor inferior da bacia são uma exceção aos menores índices observados apresentando volumes pluviométricos de 1977.7-2007.2 mm/ano.

As sub-bacias 12, 13, 15, 17, 18, 19, 20 e 22 localizadas no setor médio apresentam índices pluviométricos de 1824.6 a 2007.2 mm/ano. No setor médio/superior e superior da bacia as sub-bacias 14, 16, 21, 23, 24, 25 e 27 apresentam os mais expressivos volumes pluviométricos, de 2007.2 a 2008.4 mm/ano. Estas sub-bacias estão localizadas nas porções com as maiores altitudes da bacia (608.4 – 1010.8 m em média), e, segundo Andrade (2003); Baldo (2006), sofrem influência da orografia, ou seja, com a elevação da altitude do relevo se elevam também os índices pluviométricos.

Andrade e Nery (2011), realizaram a delimitação dos grupos homogêneos de distribuição espacial da pluviometria da bacia do rio Ivaí e concluíram que os mesmos praticamente seguem os contornos das curvas de nível do relevo, o que indica um efeito orográfico fortemente influenciador da ocorrência de chuvas. De acordo com Douhi (2013), na bacia não são identificados períodos secos que possam configurar um regime sazonal,

embora os maiores volumes pluviométricos se concentrem nos períodos da primavera e do verão, influenciados pelos sistemas convectivos tropicais que atuam mais nesse período.

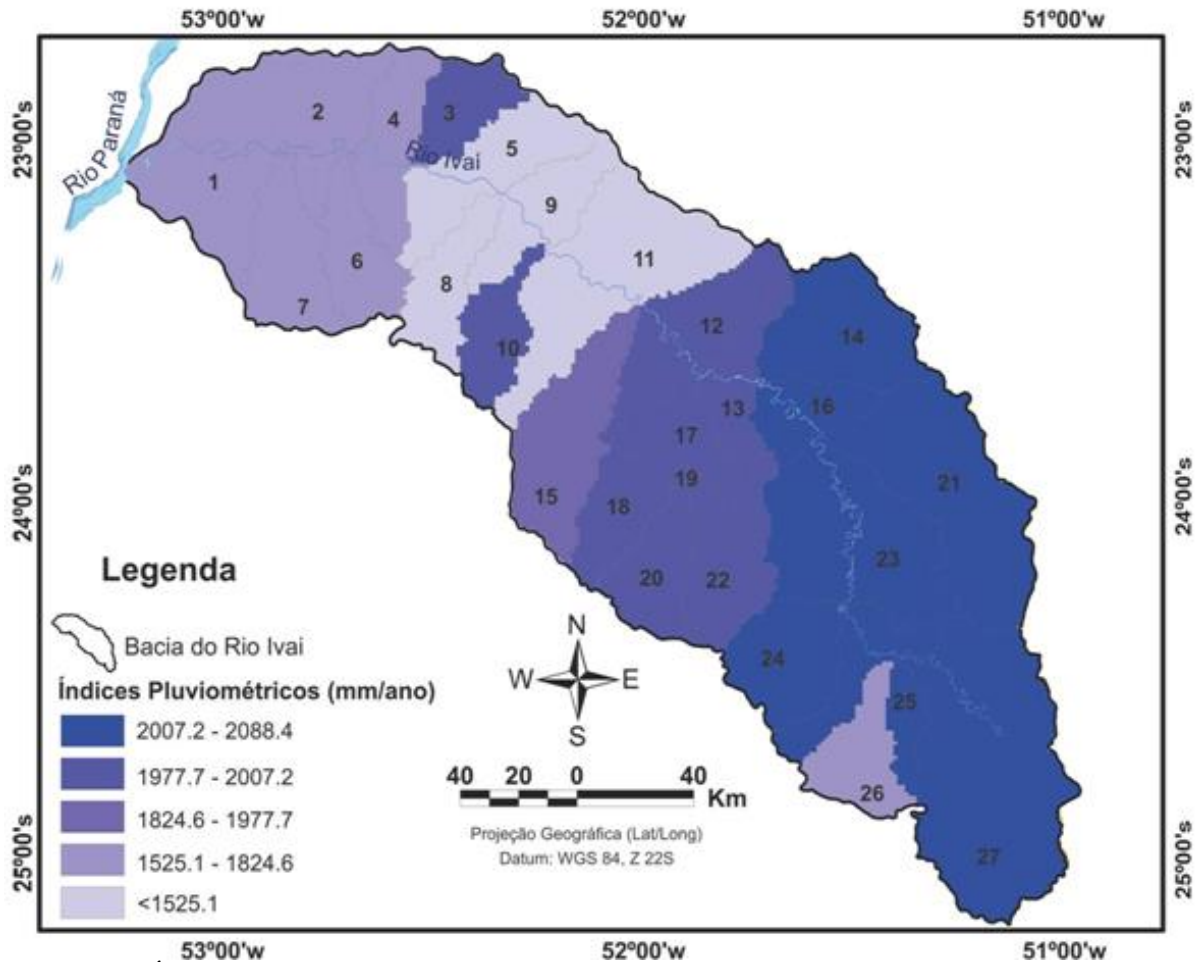


Figura 23 - Índices pluviométricos da bacia do rio Ivaí para o ano de 2009.

Com relação à evapotranspiração, Alencar et al, (2011) ressaltam que este fator exerce uma grande influência sobre os processos hidrológicos, pois está estreitamente relacionada com a dinâmica da umidade do solo, a recarga dos aquíferos e o escoamento superficial.

Por meio da análise da distribuição espacial dos valores de evapotranspiração potencial da bacia (Figura 24), pôde-se observar que no setor inferior (sub-bacias 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8) e médio/inferior (sub-bacia 9) os valores são os mais elevados, situando-se entre 1132.85 – 1166.24 mm/ano), esses índices podem estar relacionados ao fato de que nesse setor as temperaturas médias são mais elevadas em decorrência da atuação de sistemas tropicais como ressalta Douhi, (2013) acentuando a evaporação proveniente das superfícies e a transpiração das plantas, o que também foi constatado por Santos et al, (2013).

No setor inferior (sub-bacia 10) e médio (sub-bacias 11, 12, 13, 15, 17, 18, 19) os valores de evapotranspiração potencial variam de 888.62 a 1132.85 mm/ano. Nesta porção da bacia o uso e cobertura da terra é composto principalmente por culturas temporárias e pastagens, os solos predominantes são Nitossolos, Latossolos textura argilosa, Latossolos textura média e Argissolos textura arenosa/média.

O índice de evapotranspiração potencial de 820.79 a 833.45 foi identificado nas sub-bacias 20, 22, 26 no setor médio e o índice de 833.45 a 888.62 no setor superior (sub-bacias 21 e 27). De acordo com Santos et al, (2013), os valores de evapotranspiração potencial vão diminuindo em direção ao curso superior da bacia do rio Ivaí. As temperaturas são mais baixas se comparadas com as do setor médio/inferior e inferior da bacia em decorrência das maiores altitudes e do clima subtropical atuante nesta porção da área de estudo.

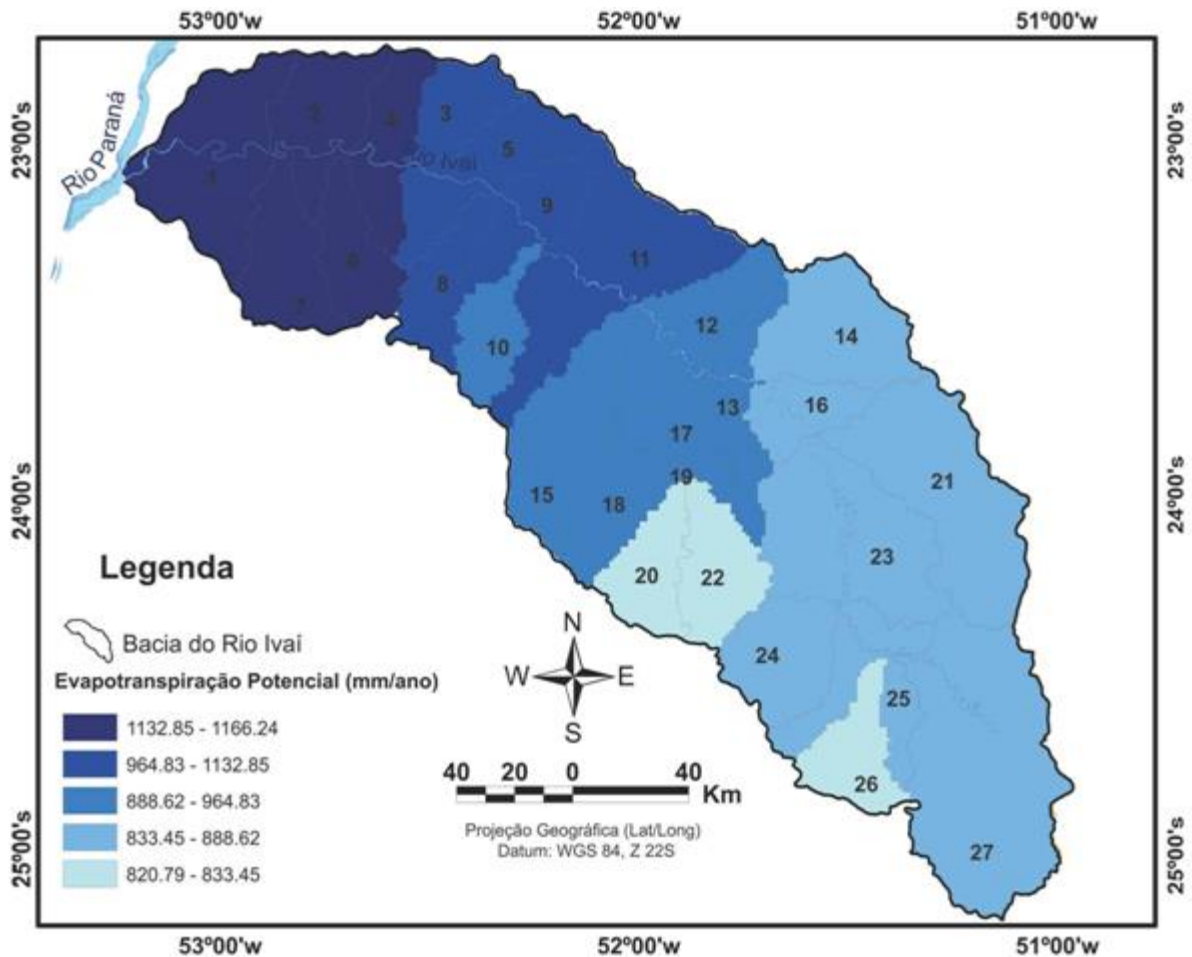


Figura 24 - Distribuição espacial dos valores de evapotranspiração potencial da bacia do rio Ivaí para o ano de 2009 gerado pelo modelo SWAT.

6.2 Análise do Escoamento Superficial da Bacia

A análise do escoamento superficial da bacia do rio Ivaí evidencia distintos comportamentos ao longo da área de estudo (Figura 25). Esta variabilidade do escoamento superficial na bacia pode estar diretamente relacionada a interação entre as propriedades de precipitação, cobertura do solo, uso da terra e dos tipos de solos da área, conforme já preconiza Smith e Goodrich (2005).

Ao comparar os mapas síntese elaborados pelas duas metodologias propostas nesta pesquisa notou-se que os maiores índices de escoamento superficial ocorrem em setores distintos da bacia. Santos et al, (2013), observaram os maiores índices no setor inferior da bacia (900-1200 e >1200 mm/ano) enquanto que a aplicação do modelo SWAT mostrou os maiores índices nos setores médio e inferior da bacia (573-713 mm/ano).

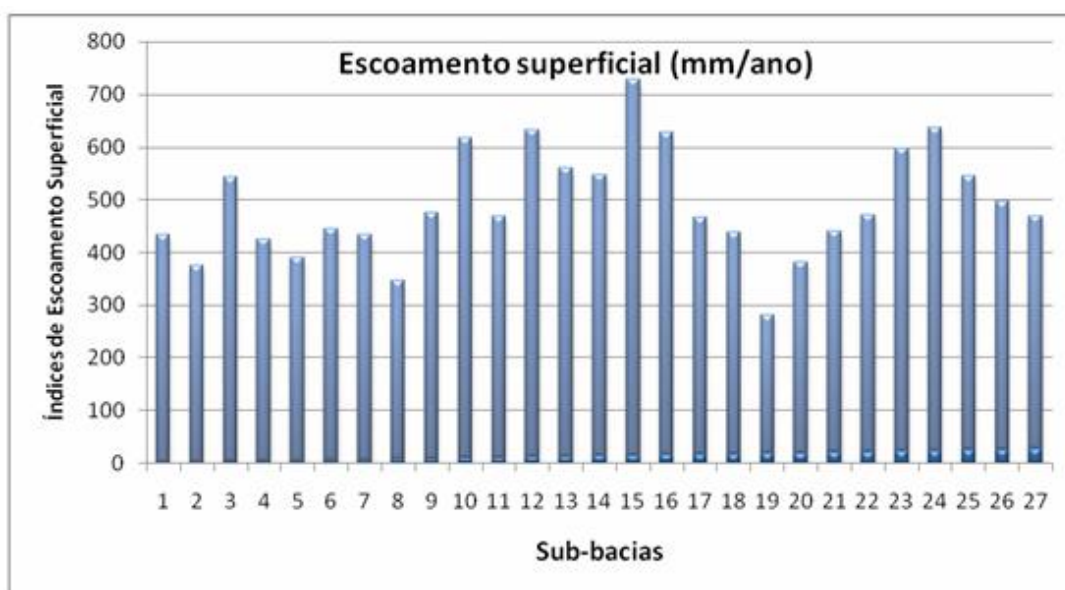


Figura 25 - Escoamento superficial das sub-bacias delimitadas pelo modelo SWAT para o ano de 2009.

O setor superior abrange duas sub-bacias 21 e 27, as mesmas apresentaram índice de escoamento superficial de 384 - 471 mm/ano. Estas áreas são abrangidas pelo contexto geológico complexo do Segundo Planalto Paranaense. O uso da terra é composto, sobretudo por pastagens e florestas, as declividades são acentuadas podendo ultrapassar os 30% e os índices pluviométricos variam de 2007.2 – 2088.4 mm/ano. Possivelmente, as variáveis que mais influenciam esses limiares de escoamento superficial são a associação entre declividades acentuadas, elevados índices pluviométricos, solos com baixa condutividade hidráulica (Neossolos Litólicos, 16; Latossolos de textura argilosa, 1.5; Nitossolos, 20; Cambissolos, 5

mm/hr), exceto os Argissolos de textura média/argilosa (110 mm/hr) (Quadro 7) e uso e cobertura da terra sobretudo de pastagem e floresta.

O setor médio abrange as sub-bacias 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 22, 23, 24, 25 e 26. Estas sub-bacias apresentaram índices de escoamento superficial que variam de 262 – 713 mm/ano.

As sub-bacias 12, 15, 16 e 24 apresentaram os índices de escoamento superficial mais elevados para o setor variando de 573 – 713 mm/ano. Estas sub-bacias estão localizadas em área de domínio da Formação Serra Geral, onde os solos predominantes são os Nitossolos, Latossolos de textura argilosa e Neossolos Litólicos e Cambissolos. Estes solos possuem baixos valores de condutividade hidráulica (20, 1,5, 18 e 5 mm/hr respectivamente). Este parâmetro representa a velocidade do deslocamento da água no solo, portanto, quanto menores os valores de condutividade hidráulica, mais rapidamente ocorre a saturação do solo durante os eventos chuvosos. Estas sub-bacias estão situadas em áreas com declividades de 0- >30%, com predominância da declividade de 0 – 12% e uso da terra composto principalmente por pastagens e culturas temporárias.

Em alguns setores dessa área, tem-se processos erosivos associados ao escoamento superficial. Esta condição é agravada pelas características dos solos, de uso da terra e pelas declividades. Esses fatores adicionados aos elevados índices pluviométricos, ao manejo e à conservação do solo inadequados condicionam o surgimento de feições erosivas como as que ocorrem em algumas porções do município de Corumbataí do Sul/PR, localizado entre as sub-bacias 12 e 15 (Figura 26).

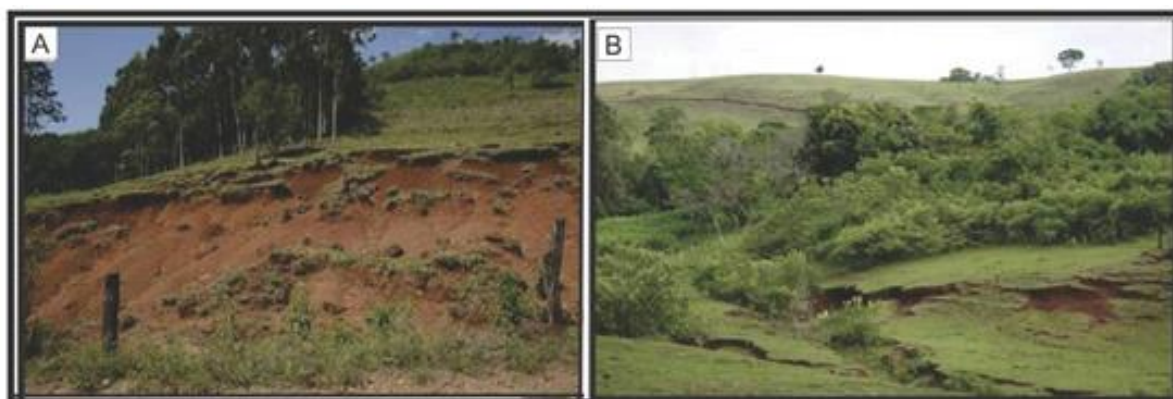


Figura 26 - (A e B). A: Processos erosivos em área de pastagem sobre Neossolos Litólicos; B: Processos erosivos em área de pastagem sobre Nitossolos em Corumbataí do Sul/PR.

Fonte: Colavite (2014).

Embora o uso da terra tenha pouca variação entre as sub-bacias 12, 15, 16 e 24 (principalmente pastagem e culturas temporárias), os mesmos sem o manejo e conservação adequados, costumemente exercem pouca proteção aos solos conforme descrito por Ross (1994). Adicionalmente, os índices pluviométricos são elevados (1824.6 – 2088.4 mm/ano) e os de evapotranspiração estão entre os mais baixos para a bacia (833.45 – 964.83 mm/ano), o que pode refletir diretamente nos resultados do escoamento superficial. Possivelmente a combinação entre os condicionantes acima, e os solos de textura argilosa com baixos índices de condutividade hidráulica e a baixa cobertura foliar conferem uma baixa taxa de infiltração e o consequente aumento do escoamento superficial. Associa-se a isso as declividades acentuadas em alguns setores dessas sub-bacias.

A diferença entre os valores de precipitação e evapotranspiração aumenta a umidade antecedente dos solos, que provoca saturação mais rapidamente durante as precipitações e consequentemente índices mais acentuados de escoamento superficial. Tsukamoto (1963) ressalta que a variação espacial do armazenamento inicial da umidade no perfil do solo indicará a sua dinâmica de saturação. Portanto, as sub-bacias que apresentaram os mais elevados índices de precipitação e menores índices de evapotranspiração ocasionaram os maiores valores de escoamento superficial (Tabela 4). Segundo Neitch (2011), o escoamento superficial é uma função da condição de umidade antecedente, bem como a energia gerada pela precipitação. Sendo assim, quanto maior o teor de umidade antecedente do solo, mais acentuado o índice de escoamento superficial da sub-bacia

O índice de 471 a 573 mm/ano tem ocorrência nas sub-bacias 13, 14, 23 e 25, em área de transição entre o contexto geológico complexo do Segundo Planalto Paranaense e a Formação Serra Geral no Terceiro Planalto. Os solos da área são os Latossolos de textura argilosa, Neossolos Litólicos, Nitossolos, Argissolos de textura média/argilosa e Cambissolos, índices pluviométricos entre 2.007.2 a 2.088.4, evapotranspiração de 883.45 – 964.83 mm/ano, as declividades são acentuadas (0 - >30%) e o uso da terra é de pastagens e áreas pontuais de solo exposto. Nestas sub-bacias o uso da terra exerce baixa proteção aos solos frente aos processos erosivos e os solos, exceto os Argissolos de textura média/argilosa possuem baixos índices de condutividade hidráulica (Quadro 7).

As sub-bacias 11, 18, 22 e 26 também localizadas no setor médio apresentaram índice de escoamento superficial de 384 a 471 mm/ano. Estão sob o contexto geológico da Formação Serra Geral. Os solos destas sub-bacias são Nitossolos, Latossolos de textura argilosa, Neossolos Litólicos e Cambissolos. O uso da terra é composto por pastagens, culturas

temporárias, e floresta e as declividades variam de 0 – 30%, porém com predominância das declividades de 9 – 12%.

Na sub-bacia 11 os índices pluviométricos são menores que 1525.1 mm/ano e o índice de evapotranspiração de 1121.6 mm/ano; na sub-bacia 18 os índices pluviométricos são de 1994 mm/ano e de evapotranspiração de 960.5 mm/ano; na sub-bacia 22 os índices pluviométricos são de 1994 mm/ano e de evapotranspiração de 833.4 mm/anosão; e na sub-bacia 26 os índices pluviométricos são de 1824.6 mm/ano, a evapotranspiração de 820.79 mm/ano. Estas sub-bacias, embora estejam localizadas no mesmo setor, apresentam uma expressiva variação de altitude (424.79 – 1010.8 m) tendo uma amplitude altimétrica de 586 m (Quadro 6). Isto em parte explica as diferenças na distribuição dos volumes de precipitação e nos valores de evapotranspiração potencial como descrito por Andrade e Nery (2011) e Santos et al, (2013). Os solos com baixos valores de condutividade hidráulica, as declividades e o uso da terra são as variáveis que, em conjunto mais influenciaram nos limiares de escoamento superficial dessas sub-bacias.

O setor inferior e médio/inferior da área do estudo abrange as sub-bacias 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 e 10. Essas apresentaram índices de escoamento superficial que variam de 262 – 573 mm/ano. A sub-bacia 10 apresentou o índice de escoamento superficial mais elevado para o setor (573 – 713 mm/ano). Este índice está associado às áreas de domínio dos arenitos da Formação Caiuá, com Latossolos de textura média e Argissolos de textura arenosa/média, com declividades de 0 a 12%, uso e cobertura da terra formada, sobretudo por pastagens, culturas temporárias e áreas pontuais de cana de açúcar, solo exposto e floresta. Os índices pluviométricos variam entre 1977.7 - 2007.2 mm/ano e de evapotranspiração de 888.62 – 964.83 mm/ano. Esta área tem potencial para o desenvolvimento de processos erosivos, principalmente se o manejo e conservação dos solos forem inadequados. Associados aos elevados índices pluviométricos, os baixos índices de evapotranspiração podem agravar a situação.

Na área é comum observar processos erosivos associados ao escoamento superficial. Por exemplo, em uma área de baixa declividade da bacia do Córrego Coruja, localizada em Cianorte/PR e no contexto da sub-bacia 10, verificam-se feições erosivas de expressivo porte (Figura 27). Essas feições erosivas, em parte resultaram da suscetibilidade natural dos tipos de solo da área à erosão e agravadas pela forma de uso da terra, sem o manejo e conservação adequados.



Figura 27 - Processos erosivos em uma porção da sub-bacia de número 10 – Bacia do Córrego Coruja próximo a área urbana de Cianorte/PR..

Fonte: O autor.

A sub-bacia 3 apresentou índices elevados de escoamento superficial de 471 a 573 mm/ano em áreas de Latossolos de textura média e Argissolos de textura arenosa/média. A declividade da área varia de 0 e 12%, o uso da terra constitui-se basicamente por pastagens e solo exposto. Os índices pluviométricos variam entre 1977.7-2007.2 mm/ano e o de evapotranspiração de 964.83 – 1132.85 mm/ano. Estes índices associados aos elevados índices pluviométricos, o uso da terra com manejo e conservação inadequados, as declividades, que embora não sejam acentuadas, podem favorecer o escoamento superficial. Mesmo que os solos da área possuam altos valores de condutividade hidráulica, podem ocasionar escoamento superficial quando submetidos a acentuados volumes de precipitação.

O índice de 384 a 471 mm/ano tem ocorrência nas sub-bacias 1, 4, 6, 7 e 9, em área de contexto geológico dos arenitos da Formação Caiuá, Argissolos de textura arenosa/média, Latossolos de textura média, Gleissolos e de maneira pontual, Organossolos. As declividades são menos pronunciadas devido à conformação geomorfológica da Formação Caiuá. Os índices pluviométricos estão entre os mais baixos para a bacia (1525.1 – 1824.6 mm/ano) e valores de evapotranspiração são os mais elevados (1132.85 – 1166.24 mm/ano). Entretanto, o uso da terra, sobretudo de pastagens, e de maneira pontual solo exposto, cana de açúcar e culturas temporárias oferecem baixa proteção aos solos o que ocasiona o surgimento de processos erosivos na área e o assoreamento dos rios (Figura 28). De acordo com Santos et al, (2013), um dos motivos pelo qual os solos da área ocasionam escoamento superficial é devido a ocorrência de chuvas concentradas nesse setor da bacia.



Figura 28 - Processos erosivos e assoreamento de canal próximo à rodovia PR 680, no Município de Maria Helena/PR (sub-bacia 7).

Fonte: O autor.

Legenda: A e B – Processo erosivo relacionado ao escoamento superficial em área de solo exposto; C – Processos erosivos em área de pastagem relacionados ao escoamento superficial em sulcos de pisoteio do gado; D – Assoreamento do rio Piaba.

O índice de 262 a 384 mm/ano de escoamento superficial ocorre nas sub-bacias 2, 5, 8 (Figura 29) também associado à Formação Caiuá, onde os solos predominantes são os Argissolos de textura arenosa/média e Latossolos de textura média. Muito embora essa região possua menores índices pluviométricos e baixa declividade (0-12%), a explicação para esse índice de escoamento superficial pode estar na ocorrência de chuvas concentradas, fato já descrito por Santos et al, (2013), associa-se a isto o contexto geológico, os tipos de solo e o uso da terra composto por pastagens.

Embora os resultados demonstrem que no setor inferior da bacia os índices de escoamento superficial são mais baixos, exceto os índices das sub-bacias 3 e 10, os solos desta porção se desenvolvem sobre os arenitos de Formação Caiuá, apresentam textura média e arenosa e são extremamente friáveis (GASPARETTO, 1999). Segundo Cunha (1999), além da fragilidade natural desses solos, o desmatamento, o uso e a ocupação generalizados estão entre os fatores que contribuem para a intensificação dos processos erosivos na área.

Tabela 4 - Síntese das características de precipitação, evapotranspiração potencial, uso e cobertura da terra, geologia, solos e declividade e o escoamento superficial para o ano de 2009 na bacia do rio Ivaí.

Sub-bacia/ setor	Escoamento superficial (mm/ano)	Precipitação (mm/ano)	Evapotranspiração potencial (mm/ano)	Uso e cobertura da terra	Geologia	Solos	Declividade (%)
21 e 27 (Superior)	384-471	2007.2-2088.4	820.79-888.62	Pastagens e florestas.	Contexto geológico complexo do Segundo Planalto Paranaense.	Neossolos Litólicos, Latossolos de textura argilosa, Nitossolos, Argissolos de textura média/argilosa e Cambissolos de textura argilosa.	0 - >30%.
12, 15, 16 e 24 (Médio)	573-713	1824.6-2088.4	833.45-964.83	Pastagens e culturas temporárias.	Formação Serra Geral.	Latossolos de textura argilosa, Nitossolos, Neossolos Litólicos, Cambissolos.	0 - 30%,
13, 14, 23 e 25 (Médio)	471- 573	2007.2-2088.4	833.45-964.83	Pastagens e solo exposto.	Transição: Contexto geológico do Segundo Planalto Paranaense e Terceiro Planalto (Formação Serra Geral)	Latossolos de textura argilosa, Neossolos Litólicos, Nitossolos, Argissolos de textura média/argilosa e Cambissolos.	0 ->30%
11, 18, 22 e 26 (Médio)	384 a 471	Entre 1525.1 e 2007.2	820.79-964.83	Pastagens, culturas temporárias e alguns fragmentos de floresta.	Formação Serra Geral.	Neossolos Litólicos, Latossolos de textura argilosa, Nitossolos e Cambissolos de textura argilosa.	0 - 30%,
10 (Inferior)	573-713	1977.7-2007.2	888.62-964.83	Pastagens, culturas temporárias, áreas pontuais de cana de açúcar, solo exposto e floresta.	Arenitos da Formação Caiuá.	Latossolos de textura média e Argissolos de textura arenosa/média.	0 - 12%
3 (Inferior)	471-573	1977.7-2007.2	964.83-1132.85	Pastagens e solo exposto.	Arenitos da Formação Caiuá.	Latossolos de textura média e Argissolos de textura arenosa/média.	0 - 12%,
1, 4, 6, 7, 9 (Inferior e médio/inferior)	384-471	1525.1-1824.6	1132.85-1166.24	Pastagens, e de maneira pontual solo exposto, cana de açúcar e culturas temporárias.	Arenitos da Formação Caiuá.	Argissolos de textura arenosa/média, Latossolos de textura média, Gleissolos e de maneira pontual Organossolos.	0 - 12%
2, 5 e 8 (Inferior)	262-384	1525.5-1824.6	964.83-1166.24	Pastagens.	Arenitos de Formação Caiuá.	Argissolos de textura arenosa/média e Latossolos de textura média.	0 - 12%

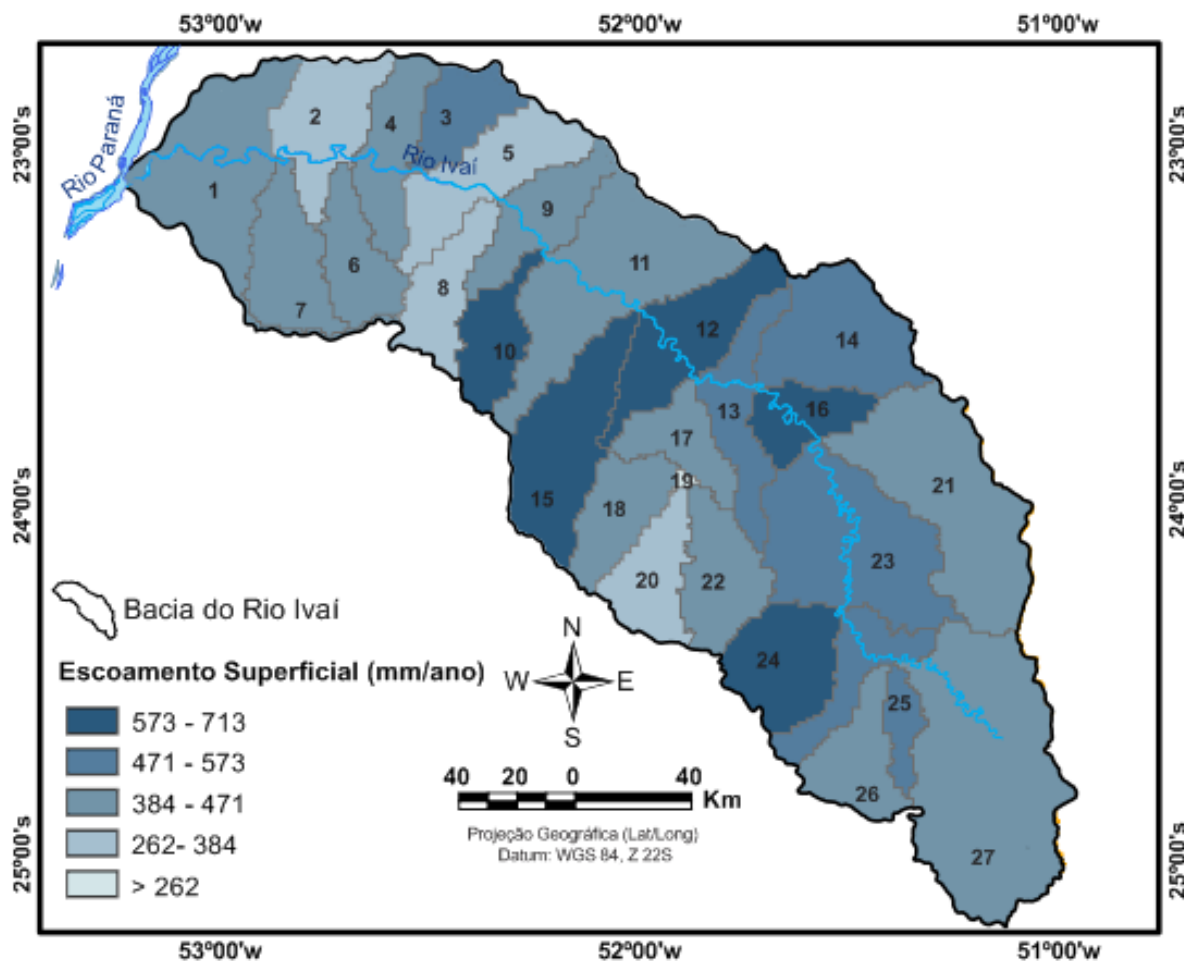


Figura 29 - Mapa síntese de escoamento superficial da bacia do rio Ivaí para o ano de 2009, elaborado por meio da aplicação do modelo SWAT.

Santos et al, (2013), aplicaram a metodologia proposta por Kirkby (1976, 1980) aliada a técnicas de geoprocessamento para obtenção de um panorama geral do escoamento superficial na bacia hidrográfica do rio Ivaí. A análise revela a aplicabilidade desse modelo para grandes áreas, a despeito de o mesmo não considerar o variável uso do solo e a declividade do terreno. Além disso, em razão da grande extensão da área de estudo, da pequena escala de trabalho e da espacialização restrita das estações climatológicas, as generalizações dos intervalos de escoamento superficial das águas foram inevitáveis.

A análise do escoamento superficial da bacia hidrográfica do rio Ivaí levou em conta somente as características climáticas e as características físicas dos solos. Como resultado as altas taxas de erosão verificadas no Terceiro Planalto paranaense, notadamente na região do Arenito Caiuá, evidenciaram a importância do escoamento superficial na produção de sedimentos nessa área.

Depois de analisar os resultados da integração dos dados requeridos pela metodologia, os autores encontraram valores de escoamento superficial que variam de menos que 300 mm a

valores superiores a 1200 mm anuais (Figura 30). Grandes áreas do curso médio e superior da área de estudo são caracterizadas por um baixo valor de escoamento superficial, menor que 300 mm/ano. Nas áreas com o predomínio dos Latossolos de textura argilosa os valores e escoamento superficial variam de 600 a 900 mm/ano enquanto que nos setores onde houve ocorrência dos Latossolos de textura média o escoamento superficial está entre 300 a 600 mm/ano.

Segundo Santos et al, (2013), os valores de escoamento superficial encontrados nas áreas com Argissolos variam de 300 a 900 mm/ano e são mais elevados principalmente na região Noroeste do estado, onde ocorre o arenito da Formação Caiuá. Os autores observaram ainda que no curso inferior da bacia, na região do arenito Caiuá onde são encontrados os Latossolos e Argissolos ocorre um aumento da precipitação por evento, muito embora se tenha uma menor taxa de precipitação anual, porém com menos dias de precipitações (precipitações mais concentradas).

A ocorrência de Neossolos Litólicos em conjunto com os Cambissolos devido à sua variação de espessura, declividade e capacidade de água disponível (5,2 mm), apresentaram os menores valores de escoamento superficial, inferiores a 300 mm/ano. Os Organossolos ocorrem em manchas muito reduzidas e estão associadas às áreas de ocorrência dos Gleissolos. Portanto em razão da escala deste trabalho e de sua localização geográfica eles estão inclusos dentro das áreas de menor escoamento superficial (menos de 300 mm/ano) e não podem ser individualmente representados (SANTOS et al, 2013).

Para as áreas do Segundo Planalto e do curso médio da bacia hidrográfica onde se verificam os menores índices de escoamento superficial tem-se a ocorrência de maiores valores de capacidade de água disponível (Neossolos Litólicos – 8.2 a 8.4 mm, Gleissolos – 12,08 mm e Cambissolos – 5.2 mm,) e menores índices de precipitação por evento. Muito embora ocorram elevados valores de precipitação, que ultrapassam os 1.914 mm anuais. No modelo adotado o escoamento superficial é inversamente proporcional à razão entre capacidade de armazenamento de água no solo e precipitação média por evento isso explica os baixos valores de escoamento encontrados para essas classes de solos (SANTOS et al, 2013, p. 265).

Leli (2010), analisando a variação espacial e temporal da carga suspensa do rio Ivaí, coletou amostras de carga suspensa de pontos nos três setores da bacia, alto, médio e baixo e observou que o maior aporte de sedimento suspenso para o canal principal vem de seus tributários mais importantes da margem esquerda: rio Corumbataí (Qss 97,5x103tonano-1) rio Mourão (Qss 45,8x103tonano-1) e o rio Ligeiro (Qss 35,1x103tonano-1), todos no setor médio e o rio das Antas (Qss 31,5x103tonano-1) no setor baixo.

Esses dados corroboram os resultados obtidos com a análise do escoamento superficial pelo modelo SWAT, visto que o escoamento superficial é um grande fornecedor de sedimentos para o canal. A distribuição espacial das áreas de maior produção de sedimentos constatados por Leli (2010) coincide com as sub-bacias com maior índice de escoamento superficial observados nesta pesquisa, porém, quando se analisa a produção de sedimentos por setor, enquanto que no trabalho de Leli (2010), a maior produção de sedimentos específica por bacia foi observado no setor inferior, o modelo SWAT gerou um maior escoamento superficial principalmente no setor médio (sub-bacias 12, 15, 16 e 24) e inferior da bacia (sub-bacias 3 e 10).

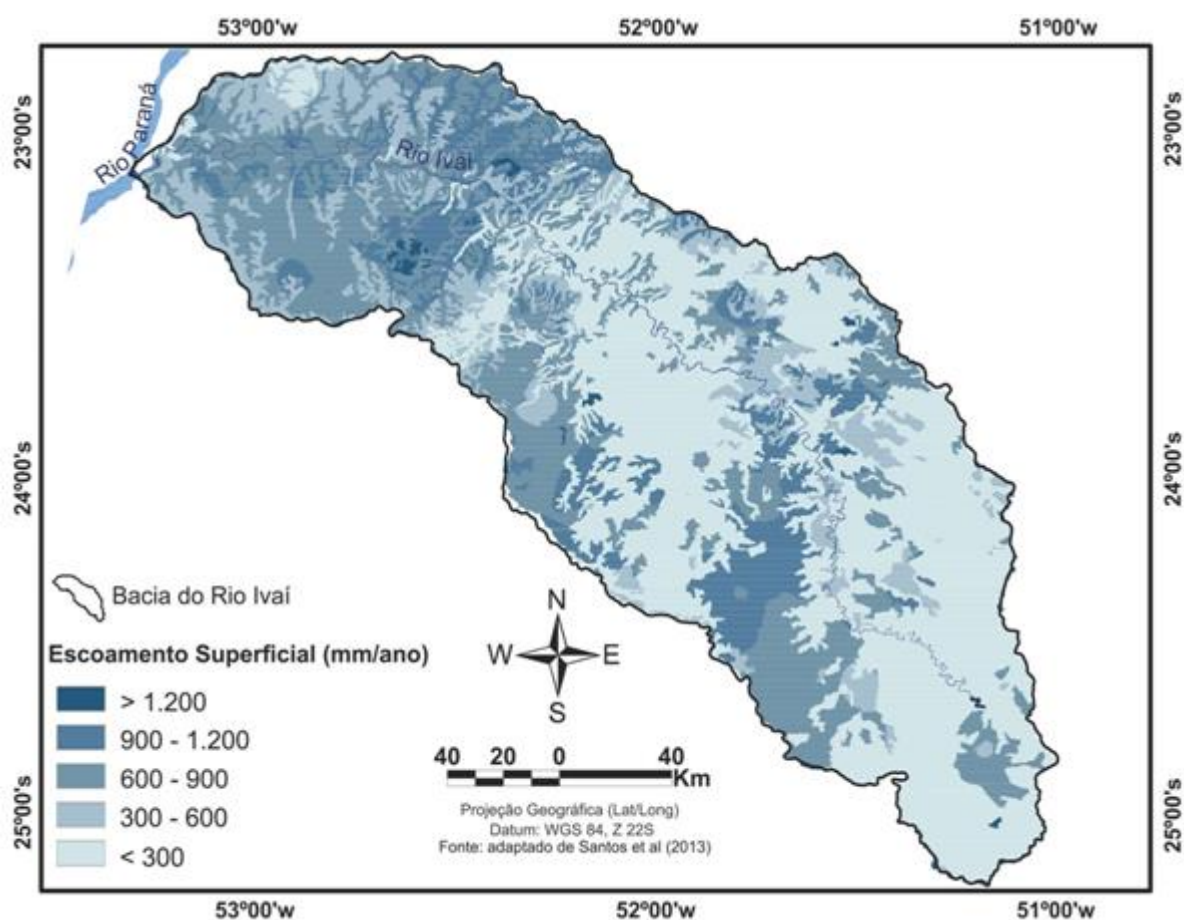


Figura 30 - Mapa síntese de escoamento superficial da bacia do rio Ivaí para o ano de 2009 elaborado por meio da aplicação de equação de Kirkby (1976, 1980).
Fonte: Adaptado de Santos et al, (2013).

No trabalho de Leli (2010), a maior produção de sedimentos específica por bacia (Qss) está no curso inferior (212 ton/ano), quando comparados com o setor médio (211 ton/ano) e superior (112 ton/ano), a despeito de sua muito menor área. Essa região é a de ocorrência do arenito de Formação Caiuá, e mostra que o trabalho de Santos et al, (2013), que aplica Kirkby

(1976, 1980) teve coerência quando mostra o maior escoamento no curso inferior a despeito da menor precipitação anual. Os autores observaram também que o curso superior tem os menores índices de escoamento superficial o que também coincide com o que Leli apresenta como a área de menor produção de sedimentos.

Os mapas síntese de índices de escoamento superficial elaborados por meio da aplicação de modelos que utilizam variáveis distintas (equação de Kirkby, (1976/1980), e a aplicação do modelo SWAT) originaram resultados numéricos também diferentes em termos absolutos para a bacia do rio Ivaí.

Santos et al, (2013), aplicaram a equação de Kirkby (1976/1980) e identificaram os maiores índices de escoamento superficial no setor inferior da bacia que, segundo sua pesquisa é onde ocorrem os menores índices de precipitação anual, porém, os maiores índices de precipitação por evento e os maiores índices de erodibilidade dos solos desta porção da bacia foram determinantes para a ocorrência dos índices mais elevados.

Após a análise da distribuição espacial das classes de escoamento superficial pôde-se notar que principalmente as classes de solo foram os parâmetros mais sensíveis da equação de Kirkby (1976/1980). Chegou-se a essa conclusão por meio da comparação entre o mapa de solos e o mapa de índices de escoamento superficial elaborado por meio desta metodologia. Algumas classes de solos (Argissolos de textura média/argilosa e arenosa/média) altamente erodíveis encontradas no setor inferior da bacia são compatíveis com as áreas de maior escoamento superficial, a semelhança do mapa de solos com o mapa de escoamento superficial é um indicativo de que este parâmetro foi preponderante para as classes de escoamento delimitadas pelo modelo.

O modelo SWAT por sua vez considera um maior número de variáveis (características dos solos, a declividade, as características climáticas e o uso e cobertura da terra) e apresentou áreas de maior índice de escoamento superficial principalmente no setor médio e inferior da bacia apresentando resultados por sub-bacia. Cada sub-bacia é composta por um número variável de Unidades de Resposta Hidrológica (HRUs) contendo tipos de solo, uso e cobertura da terra e declividade semelhantes, a soma do escoamento superficial de cada HRU resulta numa média que então é entendida pelo modelo como o escoamento superficial da sub-bacia.

Na análise dos produtos e processos geoambientais tem-se a interferência de um número muito grande de variáveis do meio físico e antrópico, que interagem com vários graus de dependência (KIRKBY, 1980). Para diferentes condições locais (uso da terra, clima, solos e relevo) e em diferentes escalas, os processos dominantes não são os mesmos (GRUNWALD e FREDE, 1999).). Isso coloca limitações para os modelos matemáticos que, por vezes não

são capazes de representar as interações e processos de menor escala. Sendo assim, assume-se que o escoamento superficial é influenciado por uma série de fatores que possuem grande variabilidade espacial e diferentes graus de interdependência, o que confere à análise desse processo uma considerável complexidade.

A análise do escoamento superficial com o SWAT demonstrou que as sub-bacias em que os índices de escoamento superficial foram mais acentuados, os índices pluviométricos foram os mais pronunciados e os de evapotranspiração os mais baixos evidenciando a sensibilidade do modelo quanto a estes parâmetros. Nessas sub-bacias o uso da terra é principalmente composto por pastagens e culturas temporárias que provém baixa proteção aos solos.

As propriedades do solo são preponderantes para a geração de escoamento superficial porque influenciam na capacidade de armazenamento de água e a infiltrabilidade conforme preconizado por Smith e Goodrich (2005). Com relação aos grupos hidrológicos dos solos da bacia, apenas os Latossolos de textura argilosa e Latossolos de textura média foram considerados de classes A e B respectivamente. Esses tipos de solo, segundo Sartori (2004), possuem de elevada a moderada taxa de infiltração. Os demais solos foram classificados nas classes C, que segundo o autor gera escoamento superficial acima da média e D que gera a maior proporção de escoamento superficial, motivo de sua baixa capacidade de infiltração.

Os baixos valores de condutividade hidráulica saturada para os horizontes dos solos das sub-bacias que apresentaram os maiores índices de escoamento superficial podem influenciar na quantidade de água disponível em seus horizontes, sobretudo os superficiais (Quadro 7). Sendo assim, assume-se que, estes fatores somados aos condicionantes acima descritos seriam responsáveis em ocasionar uma maior saturação do solo deixando o excesso de água disponível para escoar superficialmente.

6.3 Análise da Produção de Sedimentos na Bacia

Os sedimentos produzidos em uma bacia hidrográfica e exportados pelo canal fluvial são provenientes da erosão sobre as vertentes e da erosão sobre as margens e leito do canal principal e seus tributários (KNIGHTON, 1998). O escoamento superficial nas vertentes é um importante agente na dinâmica erosiva e produção de sedimentos na bacia ao passo que provoca a remoção de partículas do solo que são depositadas nas vertentes ou é direcionada até os canais fluviais.

Santos e Morais (2012), analisaram a produção de sedimentos na bacia hidrográfica do Ribeirão Maringá por meio do uso de modelos matemáticos. A aplicação da equação de Kirkby (1976), resultou em uma pequena variabilidade na distribuição espacial da produção de sedimentos. Já que a área estudada contou com dados homogêneos de pluviosidade, exceto para a capacidade de armazenamento de água no solo. Alia-se a isso o fato de que os solos da bacia desenvolvidos sobre os basaltos tem textura semelhantes, com exceção do Latossolo de textura média. A EUPS considera as práticas conservacionistas e o uso do solo, além das relações morfométricas da vertente. Esses fatores, aliados, mudam radicalmente os valores das perdas sazonais de solos. Na bacia do Ribeirão Maringá, isso se dá especialmente nos meses fevereiro, março e setembro, quando a precipitação, aliada à exposição do solo contribui significativamente para a aceleração dos processos erosivos da área.

Bortolotto (2011), analisando a distribuição espacial para a produção de sedimentos na bacia do rio Cunha em Santa Catarina com o modelo SWAT para o ano de 2001 obteve limiares que variam de 0,34 a 327 (ton/ha). Em sua pesquisa a autora observou que as duas sub-bacias que mais produziram sedimento (3 e 6) foram as caracterizadas por Cambissolos, elevado escoamento superficial (1.142,00 e 1.121,00mm, respectivamente) e declividades acentuadas. O uso da terra para cultivos agrícolas e pastagens colabora expressivamente com estes processos por não proporcionar resistência à passagem da água pelo solo e, em geral, haver baixa infiltração de água nas camadas de solo ocupadas por estes usos.

A análise da produção de sedimentos gerada pelo modelo SWAT para a bacia do rio Ivaí mostrou também comportamentos distintos ao longo da área de estudo. Os índices de produção de sedimentos situaram-se entre 0,56 a 31,86 ton/ha (Figura 31). Esses limiares foram influenciados pelos índices pluviométricos, características dos solos, declividade, escoamento superficial e uso e cobertura da terra.

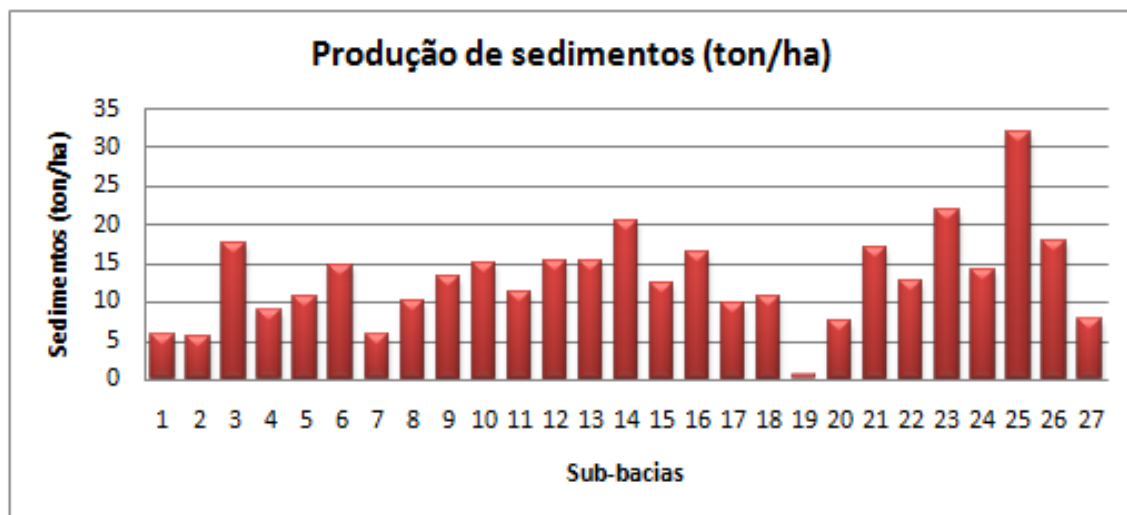


Figura 31 - Produção de sedimentos (ton/ha) por sub-bacia para o ano de 2009.

A figura 32 apresenta a distribuição espacial da produção de sedimentos (ton/ha) na bacia do rio Ivaí. De maneira geral, as sub-bacias que apresentaram as maiores taxas de produção de sedimentos por ordem de produção foram as de número 25, 23, 14, 26, 3 e 21. Abaixo segue a descrição da produção de sedimentos das sub-bacias por setor.

A sub-bacia 21, localizada no setor superior apresentou índices de produção de sedimentos da ordem de 16,35 – 21,78 ton/ha em área de contexto geológico complexo do Segundo Planalto na qual predominam os Neossolos Litólicos, Argissolos de textura média/argilosa, Latossolos de textura argilosa, algumas manchas pouco expressivas de Nitossolos e Cambissolos de textura argilosa. Estes limiares foram influenciados pelo uso da terra composto, sobretudo por pastagens, as declividades acentuadas podendo ultrapassar os 30%, os elevados índices pluviométricos de 2007.2 a 2088.4 mm/ano sobre solos com baixos valores de condutividade hidráulica (Quadro 7) e índice de escoamento superficial de 384 a 471 mm/ano.

O setor médio abrange as sub-bacias 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 22, 23, 24, 25 e 26, as mesmas apresentaram índices de produção de sedimentos que variam de 5,78 – 31,86 ton/ha. No entanto, para este setor apenas serão analisadas as sub-bacias que apresentaram os mais acentuados valores de produção de sedimentos.

A sub-bacia 25 localizada em uma área de transição entre o contexto geológico do Segundo Planalto Paranaense e o Terceiro Planalto (Formação Serra Geral) foi a que apresentou a maior produção de sedimentos de 21,78 - 31,86 ton/ha. Nessa área os solos são os Neossolos Litólicos, Latossolos de textura argilosa, Argissolos de textura média/argilosa e Cambissolos. Uso e cobertura da terra de pastagem e áreas pontuais de floresta, declividades

que variam de 0 - >30% com predominância das declividades de 20-30%, elevados índices pluviométricos de 2007.2 a 2088.4 mm/ano e elevado escoamento superficial (471-573 mm/ano).

As sub-bacias 14, 23 e 26 apresentaram produção de sedimentos de 16,35-21,78 ton/ha. Estas sub-bacias estão localizadas em contextos geológicos distintos (contexto geológico complexo do Segundo Planalto Paranaense e Formação Serra Geral no Terceiro Planalto), onde os solos predominantes são Latossolos de textura argilosa, Argissolos de textura média/argilosa, Neossolos Litólicos, Nitossolos e Cambissolos. O uso e cobertura da terra é principalmente de pastagens, floresta e áreas pontuais de culturas temporárias e declividades de 0 - >30% com predominância das declividades de 12-20%. Os índices pluviométricos das sub-bacias são de 1824.6-2085.7, mm/ano e escoamento superficial de 384 – 573 mm/ano.

As sub-bacias 12, 13, 15, 16, 22 e 24, também localizadas no setor médio da bacia apresentaram valores médios de produção de sedimentos, da ordem de 11, 34 – 16, 35 ton/ha. Esses limiares podem ter sido influenciados pelos elevados índices pluviométricos (1977.7-2088.4 mm/ano), pelas características de uso da terra, sobretudo de pastagens e culturas temporárias, floresta e áreas pontuais de cana de açúcar e solo exposto que provém uma baixa proteção do solo, as declividades de 0 - 30% com predominância das declividades de 9 – 12%, os mais altos índices de escoamento superficial (573-713 mm/ano) sobretudo nas sub-bacias 12, 15, 16 e 24 e devido aos baixos valores de condutividade hidráulica dos solos destas sub-bacias.

A sub-bacia 3 localizada no setor inferior apresentou índices de produção de sedimentos de 16,35 – 21,78 ton/ha. Esta sub-bacia está localizada em área abrangida pelos arenitos de Formação Caiuá. A área também apresentou índices elevados de escoamento superficial de 471 a 573 mm/ano, os solos são do tipo Latossolos de textura média e Argissolos de textura arenosa/média que são solos sabidamente erodíveis como descrito por Sala, (2005), Prado e Nóbrega (2005), Souza (2010), entre outros, declividades entre 0 e 12%, uso da terra formada por pastagens e solo exposto e índices pluviométricos entre 1977.7-2007.2 mm/ano. A suscetibilidade natural dos solos à erosão como já descrito na literatura, em que se pese os altos valores de erodibilidade, bem como os elevados índices pluviométricos, o uso da terra e os índices de escoamento superficial foram os fatores determinantes para o índice de produção de sedimentos observado na área.

As sub-bacias 4, 6, 9, apresentaram índices de produção de sedimentos de 11, 34 – 16, 35 ton/há. Estes limiares podem ter sido influenciados pelo uso da terra de pastagens, culturas

temporárias, cana de açúcar e solo exposto, índice pluviométrico que varia de <1225.1 – 1824.6 e índice de escoamento superficial de 384 – 471mm/ano. Associa-se a isto também a presença de Latossolos de textura média e Argissolos de textura arenosa/média, solos comprovadamente suscetíveis à erosão e as declividades de 0 – 12%.

As sub-bacias 5, 8 apresentaram valores de produção de sedimentos de 5,78 – 11,34 ton/ha. O uso do solo é de pastagens, solo exposto e cana de açúcar, os índices pluviométricos são os mais baixos para a bacia (< 1225.1 mm/ano) e o escoamento superficial é de 262 – 384 mm/ano.

As sub-bacias 1, 2 e 7 apresentaram os mais baixos valores de produção de sedimentos, de 0,56 - 5,78 ton/ha. Embora estas sub-bacias estejam na área de abrangência dos arenitos de Formação Caiuá, onde predominam Latossolos de textura arenosa/média e Argissolos de textura média, as precipitações anuais são menos pronunciadas (1525.1- 1824.6 mm/ano) o escoamento superficial é de 262 – 471 mm/ano e uso e cobertura da terra de pastagens e áreas pontuais de cultuas temporárias, solo exposto, cana de açúcar e florestas.

Prado e Nóbrega (2005), analisaram a perda de solos na bacia do rio Ipiranga em Cidade Gaúcha e notaram que as áreas sujeitas às maiores perdas de solo por erosão laminar são aquelas com cultivo de cana-de-açúcar e mandioca, os autores afirmam que a pastagem é o tipo de uso menos prejudicial quanto à erosão laminar para a área estudada. A cultura temporária é caracterizada pela sazonalidade no cultivo, sendo assim, o solo fica um período coberto e outro descoberto, dependendo da época do ano, do manejo e da quantidade de chuvas, as perdas de solo podem ser acentuadas ou atenuadas, por essa razão Ross (1994), classifica as culturas de ciclo curto como de forte risco a fragilidade aos processos erosivos.

Enquanto que na pesquisa de Prado e Nóbrega (2005), a bacia analisada possui solos homogêneos no que diz respeito ao material de origem, verificou-se que o uso do solo influenciou fortemente os índices de produção de sedimentos. Os resultados de produção de sedimentos para a bacia do rio Ivaí obtidos por meio do modelo SWAT demonstram uma forte influência do escoamento superficial, mesmo sobre solos com propriedades e material de origem distintos, soma-se a isto os elevados índices pluviométricos juntamente com as declividades, que, em algumas porções das sub-bacias podem superar os 30% (Tabela 5). Sendo assim entende-se que estas variáveis em conjunto seriam as responsáveis por acentuar a produção de sedimentos em algumas porções da área de estudo.

Tabela 5 - Síntese dos índices de precipitação, de escoamento superficial, características de uso e cobertura da terra, geologia, solos e declividade das sub-bacias com maior produção de sedimentos (ton/há) para o ano de 2009 na bacia do rio Ivaí.

Setor (sub-bacia)	Produção de sedimentos (ton/ha)	Precipitação (mm/ano)	Escoamento superficial (mm/ano)	Uso e cobertura da terra	Geologia	Solos	Declividade (%)
Superior (21)	16,35 -21,78	2007.2- 2088.4	384 - 471	Pastagem.	Contexto geológico complexo do Segundo Planalto.	Neossolos Litólicos, Argissolos de textura média/argilosa, Latossolos de textura argilosa, Nitossolos e Cambissolos.	0 - >30%.
Médio (25)	21,78 - 31,86	2007.2-2088.4	471 - 573	Pastagem e áreas pontuais de floresta.	Transição :contexto geológico do Segundo Planalto Paranaense e o Terceiro Planalto (Formação Serra Geral)	Neossolos Litólicos, Latossolos de textura argilosa, Argissolos de textura média/argilosa e Cambissolos.	0 - >30%.
Médio (14, 23 e 26)	16,35 -21,78	1525.2-2088.4	262 – 471	Pastagens, floresta e áreas pontuais de culturas temporárias.	Formação Serra Geral.	Latossolos de textura argilosa, Argissolos de textura média/argilosa, Neossolos Litólicos, Nitossolos e Cambissolos.	0 - >30%.
Médio (12, 13, 15, 16, 22 e 24)	11, 34 -16, 35	1977.7-2088.4	384 - 713	Pastagens e culturas temporárias, floresta e áreas pontuais de cana de açúcar e solo exposto.	Formação Serra Geral.	Latossolos de textura argilosa, Nitossolos, Neossolos Litólicos, Cambissolos.	0 - 30%
Inferior (3)	16,35 - 21,78	2007.2 -2088.4.	471 - 573	Pastagens e solo exposto.	Formação Caiuá.	Latossolos de textura média e Argissolos de textura arenosa/média.	0 - 12%
Inferior (4, 6 e 9)	11, 34-16, 35	<1225.1-1824.6	384 - 471	Pastagens, culturas temporárias, cana de açúcar e solo exposto.	Formação Caiuá	Latossolos de textura média e Argissolos de textura arenosa/média.	0 – 12%.
Inferior (1, 2 e 7)	0,56 - 5,78	1525.1- 1824.6	262 – 471	Pastagens e áreas pontuais de culturas temporárias, solo exposto, cana de açúcar e florestas.	Formação Caiuá	Latossolos de textura arenosa/média e Argissolos de textura média.	0 – 12%.

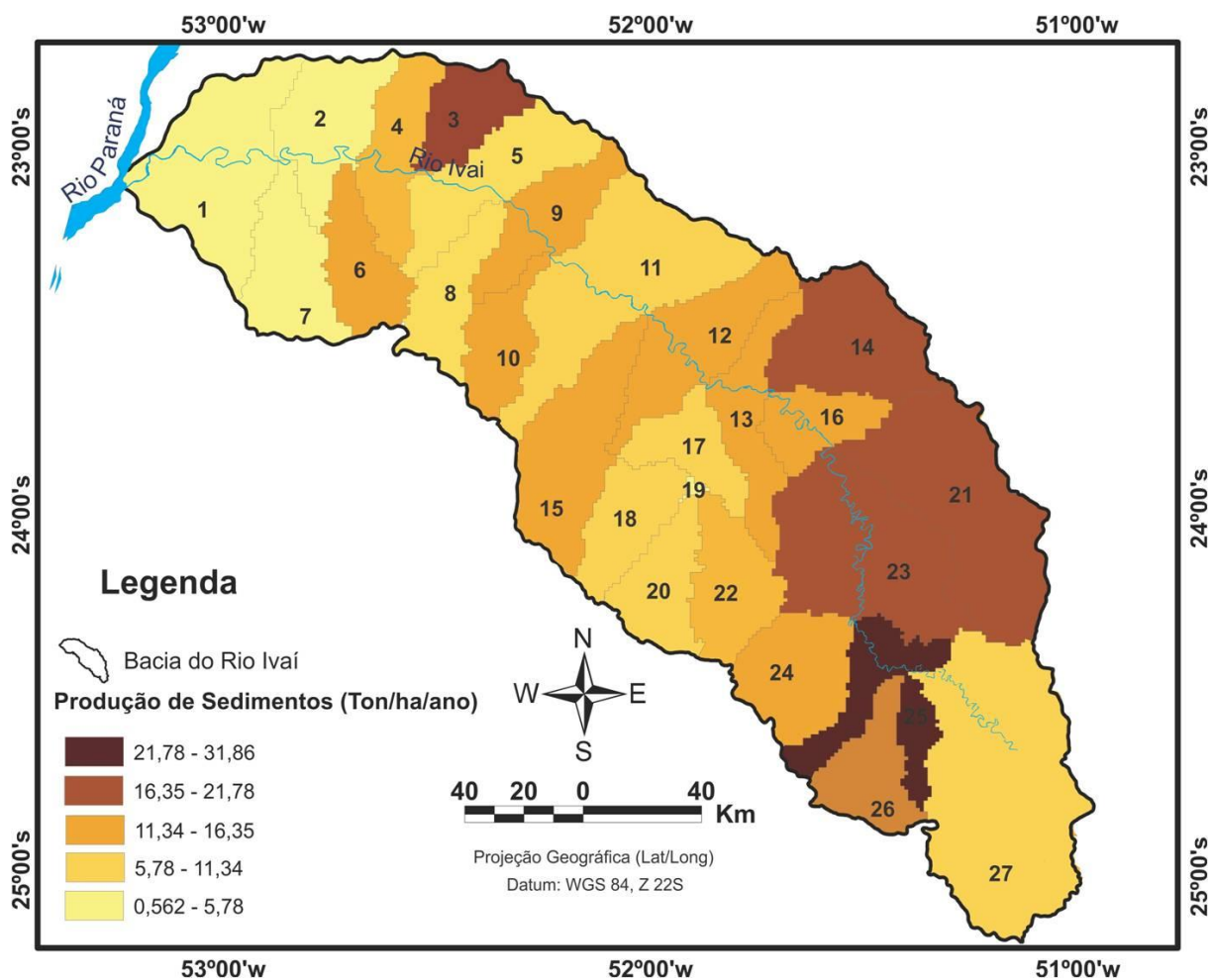


Figura 32 - Produção de sedimentos por sub-bacia para o ano de 2009, elaborado por meio da aplicação do modelo SWAT.

Quando se compara as figuras 29 e 32 nota-se que ambas apresentam relações espaciais. Pode-se ressaltar também uma dependência das variáveis de entrada, tanto para o escoamento superficial, quanto para a produção de sedimentos (declividade, uso e cobertura da terra, propriedades dos tipos de solo e clima), porém o estado final, ou seja, a síntese dos processos pode ser alcançada por meio de interrelações complexas envolvendo essas variáveis. Isso ocorre, principalmente devido à variabilidade espacial que algumas delas apresentam. Sendo assim, uma variável pode, direta ou indiretamente, influenciar e/ou ser influenciada pelo processo que se busca representar. A diferença nesse caso é que o escoamento superficial equivale ao processo, e a produção de sedimentos ao produto inerente à sua dinâmica.

CONCLUSÕES

Com o estudo houve a possibilidade de realizar uma avaliação das características físicas e de uso e cobertura da terra da bacia hidrográfica do rio Ivaí, bem como obter resultados que se referem ao escoamento superficial. A avaliação dos modelos hidrológicos adotados implica em compreender qualitativa e quantitativamente a relação entre as variáveis ambientais e socioeconômicas e a realidade. A interação dos dados requeridos pelos modelos ampliou o conhecimento do escoamento superficial da bacia do rio Ivaí, que sofre grande influência de variáveis como clima, tipos de solo, declividade e uso e cobertura da terra.

A análise do escoamento superficial da bacia do rio Ivaí por meio de diferentes metodologias originou também resultados distintos, além disso, o mapa síntese elaborado por Santos et al, (2013), por meio da aplicação da equação de Kirkby (1976, 1980), utilizou dados distribuídos por toda a área, dados climáticos (precipitação e temperatura) interpolados criando um mapa de isolinhas de evapotranspiração. Já o modelo SWAT, sub-divide a bacia e utiliza os dados climáticos para cada sub-bacia, ou seja, a estação climática utilizada é a mais próxima, isso pode colocar um limite para ambos os modelos, visto que as características climáticas variam no espaço e as estações são mal distribuídas pela área.

Santos et al, (2013), encontraram os maiores índices de escoamento superficial no setor inferior da bacia (900-1200 mm/ano), esse resultado foi fortemente influenciado pelas propriedades dos solos desta porção da bacia e pela precipitação média por evento. A principal dificuldade na utilização da metodologia/modelo foi a deficiência e/ou inexistência dos dados disponíveis, sobretudo dados climáticos.

A aplicação do modelo SWAT resultou em maiores índices de escoamento superficial nos setores médio e inferior da bacia (573-713 mm/ano). A má distribuição das estações climáticas também pode ter influenciado nos resultados, pois grandes áreas da bacia não foram cobertas pelos registros dos dados climáticos, principalmente o setor médio e como o modelo considera a estação mais próxima seria importante que cada uma das vinte e sete sub-bacias geradas pelo modelo tivesse uma estação em sua área.

Embora os maiores escoamentos superficiais estejam principalmente associados a valores elevados de precipitação e baixos índices de evapotranspiração. Por sua vez, essas variáveis interagem com as características dos solos, uso e cobertura da terra e declividade tornando a análise complexa. Tal fato mostra a interdependência entre as variáveis, visto que a ocorrência de escoamento superficial não pode ser determinada por variáveis isoladas e/ou por meio de uma única variável.

Os resultados obtidos por meio da aplicação do modelo SWAT para a produção de sedimentos na bacia (ton/ha) mostraram que sub-bacias localizadas nos três setores (25, 23, 14 e 26 no setor médio, 3 no setor inferior e 21 no superior) apresentaram as maiores taxas. Observou-se que as variáveis que mais influenciam na produção de sedimentos foram: escoamento superficial, os elevados índices pluviométricos e as declividades o que leva a crer que o escoamento superficial, representado no modelo pelo fator CN é uma variável que ocasiona incremento na produção de sedimentos em algumas porções da bacia, porém associada a outras variáveis também importantes.

Explicar a dinâmica ambiental da paisagem por meio da aplicação de modelos não é tarefa fácil, pois esta dinâmica possui interdependências intrínsecas que em muitos casos não se explicam por si só, por vezes envolvendo grande complexidade de interações entre os elementos (variáveis).

Os modelos aplicados ao estudo do escoamento superficial da bacia do rio Ivaí mostraram resultados discordantes em termos absolutos de escoamento superficial e também quanto aos setores da bacia em que os valores são mais elevados, o que é compreensível tendo em vista que utilizam variáveis distintas. A maior dificuldade no desenvolvimento desta pesquisa não está relacionada diretamente aos modelos e sua aplicabilidade, mas, às fontes de dados, principalmente os dados climáticos que devido a má distribuição das estações pode ser um fator limitante para ambos.

Quanto a aplicabilidade na área de estudo, os dois modelos foram adequados a escala de trabalho com alguma generalização, principalmente no que se refere aos tipos de solo e uso e cobertura da terra no caso do modelo SWAT, porém apresentaram virtudes expressas pela coerência nos resultados, que, embora sejam discordantes, exprimiram a interrelação das variáveis utilizadas, por essa razão mostraram-se aplicáveis para a área de estudo. No entanto, a aplicação das duas metodologias ainda precisa passar por uma correlação geostatística a fim de comparar também quantitativamente os resultados, além da necessidade de corroborar os resultados com dados de levantamentos de campo.

Assume-se nesta tese que o escoamento superficial é fortemente influenciado por uma série de variáveis que, em conjunto determinam a intensidade do processo e sua importância quanto agente erosivo na bacia. A complexidade que envolve a atuação de processos dinâmicos se deve à variabilidade espacial que algumas características inerentes aos atributos físicos (variáveis) apresentam. Os resultados atestam que as diferenças entre os modelos não se concentram apenas nas variáveis que utilizam, mas também nos efeitos das interações entre as mesmas.

REFERÊNCIAS

- ADRIOLO, M. V.; SANTOS, I.; GILBERTONI, R. C.; CAMARGO, A. S. G. Calibração do modelo SWAT para a produção e transporte de sedimentos. **VI Simpósio Brasileiro Sobre Pequenas e Médias Centrais Hidrelétricas**. Belo Horizonte, MG, 21 a 25 de abril de 2008. p. 1-18.
- ALENCAR, L. P.; SEDIYAMA, G.; MANTOVANI, E. C.; MARTINEZ, M. A. Tendências recentes nos elementos do clima e suas implicações na evapotranspiração da cultura do milho em Viçosa – MG. **Revista Eng. Agrícola**, Jaboticabal, v. 31, n. 4, p.631-642, 2011.
- ANDRADE, A. R. Variabilidade da precipitação pluviométrica da bacia hidrográfica do rio Ivaí – PR. **Dissertação** (Mestrado em Análise Regional e Ambiental)–Departamento de Geografia, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2003.
- ANDRADE, A. R.; NERY, J. T. Análise Sazonal e Espacial da Precipitação Pluvial na Bacia Hidrográfica Do Rio Ivaí – Paraná. **Boletim de Geografia**, Maringá, v. 29, n. 2, p. 107-121, 2011.
- ALLEN, R. G; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; Smith, M. *Crop evapotranspiration (guidelines for computing crop water requirements)*. FAO *Irrigation and Drainage*, 1998, n. 56. FAO, Roma, Itália. p. 290.
- ARNOLD, J.G.; KINIRY, J.R.; SRINIVASAN, R.; WILLIAMS, J.R.; HANEY, E.B.; NEITSCH, S.L. **Soil and Water Assessment Tool Input/Output File Documentation Version 2009** Soil and Water Research Laboratory - Agricultural Research Service Blackland Research Center - Texas AgriLife Research. Texas Water Resources Institute Technical Report No. 365 Texas A&M University System College Station, Texas 77843-2118. September 2011.
- BALDISSERA, G. C. Aplicabilidade do Modelo de Simulação Hidrológica SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*), para a Bacia Hidrográfica do Rio Cuiabá/MT. **Dissertação** (Mestrado em Física e Meio Ambiente) – Programa de Pós-Graduação em Física e Meio Ambiente, Universidade Federal do Mato Grosso, Cuiabá, 2005.
- BALDO, M. C. Variabilidade pluviométrica e a dinâmica atmosférica na bacia hidrográfica do rio Ivaí. **Tese** (Doutorado em Geografia) Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2006.
- BARROS, C. S. Dinâmica sedimentar e hidrológica do rio Ivaí com o rio Paraná, Icaraíma, PR. **Dissertação** (Mestrado em Geografia) – Departamento de Geografia, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2006.
- BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do solo**. 5. ed. São Paulo: Icone, 2005. 355 p.
- BESKOW, S.; MELLO, C. R.; COELHO, G.; SILVA, A. M.; VIOLA, M. R. Estimativa do Escoamento Superficial em uma Bacia Hidrográfica com Base em Modelagem Dinâmica e Distribuída. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33. P. 169-178, 2009.

BEVEN, K. Robert E. Horton's perceptual model of infiltration processes. **Hydrological Processes**. N. 18, 3447–3460 (2004)

BEVEN, K.J., QUINN, P., ROMANOWICZ, R., FREER, J., FISHER, J. E LAMB, R. Topmodel. **A users guide to the distribution versions (95.02)**. Centre for Research on Environmental Systems and Statistics Institute of Environmental and Biological Sciences, Lancaster University. 1995.

BLAZIN, P. C., Característica sedimentar e hidrológica do rio Ivaí em sua foz com o rio Paraná, Icaraíma-PR. **Dissertação** (Mestrado em análise regional e ambiental) –Departamento de Geografia, Universidade Estadual de Maringá. Maringá, 2005.

BIGARELLA, J.J. Variações Climáticas no Quaternário e Suas, Implicações no Revestimento Florístico do Paraná. **Boletim Paranaense de Geografia**, março-1964, Curitiba, 1971.

BIGARELLA, J. J.; MAZUCHOWSKI, Y. Z. **Visão integrada da problemática da erosão**. Simpósio Nacional de Controle de Erosão, Maringá, PR: ABGFE, ADEA, 1985.

BORTOLOTTI, N. L. Avaliação Hidrossedimentológica da Bacia do Rio Cunha, Município de Rio Dos Cedros, Santa Catarina com o Modelo SWAT. **TCC** (Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental). Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2011.

BURROUGH, P. A.; MCDONNELL, R. A. **Principles of geographical information systems**. New York: Oxford University Press, 1998

CALIJURI, M. L.; MEIRA, A. D.; PRUSKI, F. F. Geoprocessamento Aplicado aos Recursos Hídricos. **In. Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola**. 1998. Poços de Caldas. Anais. Lavras: UFLA/SBEA. P. 200-225.

CÂMARA, G.; DAVIS, C.; MONTEIRO, A. M. V. **Introdução à ciência da geoinformação**. INPE, São José dos Campos: 2001.

CARRIELO, F. Estimativas da Resposta Hidrológica das Sub-bacias Brasileiras, São José dos Campos, 2005. **Dissertação** (Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto) INPE – Instituto Nacional de Pesquisas espaciais.

CASSETI, V. **Geomorfologia**. [S.l.]: [2005]. Disponível em: <<http://www.funape.org.br/geomorfologia/>>. Acesso em: 12 de maio de 2013.

CHARLTON, R. **Fundamentals of Fluvial Geomorphology**. New York, Taylor & Francis, 2008.

CHECCHIA, T. Avaliação de perda de solo por erosão hídrica e Estudo de emergia na bacia do rio Caeté, Alfredo Wagner - Santa Catarina. Florianópolis, 2005. 127f. **Dissertação** (Pós-Graduação – Mestrado em Engenharia Ambiental) Universidade Federal de Santa Catarina.

CUNHA, S. B. **Uma atualização de bases e conceitos**, 2 ed (organizadora) Eletrônica, Rio de Janeiro – RJ. 1995.

CUNHA, J. E.; CASTRO, S. S.; SALOMÃO, F. X. T. Comportamento Erosivo de um Sistema Pedológico de Umuarama, Noroeste do Estado do Paraná. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 23. P. 943-951, 1999.

DESTEFANE, E. V. Regime Hidrológico do rio Ivaí-Pr. **Dissertação** (Mestrado em Geografia) Universidade Estadual de Maringá, 2005.

DOUHI, N. Regime e Sistemas de Controle das Cheias do Baixo Ivaí e Cartografia das Áreas Inundáveis. **Tese** (Doutorado em Geografia) Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2013.

EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**, Embrapa Solos. Rio de Janeiro – RJ. 2006.

EMBRAPA. Levantamento de reconhecimento dos solos do Estado do Paraná - tomo I e II. **Boletim técnico**. Londrina: EMBRAPA/SNLCS/IAPAR, 1984. 791p

FELGUEIRAS, C. A. **Modelagem ambiental com tratamento de Incertezas em sistemas de informação geográfica: O paradigma geoestatístico por indicação**. São José dos Campos, 2001. 215f. Tese (Doutorado em Computação Aplicada) Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.

GASPARETTO, N. V. L. As Formações Superficiais do Noroeste do Paraná e sua Relação com o Arenito Caiuá. **Tese** (Geoquímica e Geotectônica). Programa de Pós-Graduação em Geoquímica e Geotectônica. Universidade de São Paulo. São Paulo, 1999.

GROVE, M.; HARBOR, J.; ENGEL, B. Composite Vs. Distributed Curve Number: effectes on estimates of storms runoff depths. **Journal of the American Water Resources Association**. V. 34. N 5, 1998. p. 1015-1023.

GRUNWALD, S.; FREDE, H. G. Using the Modifield Agricultural Non-point Source Pollution Model in Germany Watersheds. **Catena**. v 37, p. 319-328, 1999.

FLANAGAN, D.C., FRANKENBERGER, J.R. Water erosion prediction project (WEPP): windows interface tutorial. **West Lafayette**: USDA-ARS/NSERL, 2002. 75p.

FUJITA, R. H. O Perfil Longitudinal do Rio Ivaí e sua Relação com a Dinâmica do Fluxo. **Dissertação** (Mestrado em Geografia) – Departamento de Geografia, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2009.

HORNBERGER, G. M.; RAFFENSPERGER, J. P.; WIBERG, P. L.; ESHLEMAN, K. N. **Elements of Physical Hydrology**. J. Hopkins, 1998. 302 p.

HORTON R. E. **The role of infiltration in the hydrologic cycle**. *Transactions, American Geophysical Union*, 1933. p. 446–460.

IAPAR - INSTITUTO AGRONÔMICO DO PARANÁ. **Cartas Climáticas do Estado do Paraná**. Londrina, 1994.

IBGE. **Recursos Naturais e Meio Ambiente: uma visão do Brasil**. 2 ed. Rio de Janeiro - RJ. DEDIT/CDDI, 1997. p. 113.

INPE - **Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais**. 2003. Disponível em: <http://www.dgi.inpe.br>. Acesso: em 12 de setembro de 2014.

INPE – **Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais**. Disponível em: http://www.dgi.inpe.br/Suporte/files/Cameras-LANDSAT57_PT.php. Acesso em: 26 de outubro de 2016.

IPARDES – Instituto Paranaense de Desenvolvimento Econômico e Social. **Nota Técnica: Dinâmica ambiental do Estado do Paraná**. n.13. Curitiba: 2010. Disponível em: WWW.ipardes.gov.br/biblioteca/docs/NT_13_Dinamica_Ambiental.pdf. Acesso em 02 de fevereiro de 2016.

ITCG. Instituiu de Terras, **Cartografia e Geodésia**. Disponível em: <http://www.itcg.pr.gov.br/modules/conteudo/conteudo.php?conteudo=51>. Acesso: em 04 de maio de 2015.

KEMP, K. K. **Environmental Modeling with GIS: A Strategy for Dealing with Spatial Continuity**. 1993. NCGIA - National Center for Geographic Information and Analysis. Disponível em: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.33.8404&rep=rep1&type=pdf>. Acesso em 14 de fevereiro de 2014.

KIRKBY, M.J. **Hydrological slope models: the influence of climate**. In: Derbyshire, E. *Geomorphology and Climate*. New York: John Wiley & Sons, 1976. p. 247-267.

KIRKBY, M. J. **Modeling water erosion processes**. In: KIRKBY, M. J.; MORGAN, R. P. C. *Soil erosion*, New York: John Wiley & Sons, 1980. p. 182-213.

KOBIYAMA, M et al. Papel da comunidade e da universidade no gerenciamento de desastres naturais. In: Simpósio Brasileiro de Desastres Naturais (1: 2004, Florianópolis). **Anais**, Florianópolis: UFSC, 2004. p. 834 – 846.

KNIGHTON, D., **Fluvial forms & processes**. Arnold, 383p, 1998.

KUERTEN, S. Variação longitudinal das características sedimentares e hidrológicas do rio Ivaí-PR em seu curso inferior. 2006. 75 f. **Dissertação** (Mestrado em Geografia) – Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2006.

LAMBIN, E. F. **Modelling Land-Use Change**. In: WAINWRIGHT, J. AND MULLIGAN, M. *Environmental Modelling: Finding Simplicity in Complexity*. New York, John Wiley & Sons, 2004. p. 245-254.

LANG, S.; BLASCHKE, T. **Análise da Paisagem com SIG**. Oficina de Textos. São Paulo: 2009.

LELI, I. T. Variação Espacial e Temporal da Carga Suspensa do Rio Ivaí. **Dissertação** (Mestrado em Geografia) – Departamento de Geografia, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2010.

LELI, I. T.; STEVAUX, J. C.; CREMON. E.H.; NÓBREGA, M. T. River Functioning Analysis from Suspended Sediment and Water Discharge Study: The Case of the Ivai River, Southern Brazil. **Revista Brasileira de Geomorfologia**. v. 18. n 1. p. 125-141, 2017.

LIERSCH. S. **The programs dew exe and dew 0.2 exe**. 2003. Disponível em: <http://swat.tamu.edu/software/links-to-related-software/>. Acesso: 13 de julho de 2014.

LIERSCH. S. **The program pcpSTAT**. 2003. Disponível em: <http://swat.tamu.edu/software/links-to-related-software/>. Acesso: 13 de julho de 2014.

LINACRE, E. **Climate and Data Resources: A Reference and Guide**. Routledge, 1992. Londres. 365 p.

MAACK, R. **Geografia Física do Estado do Paraná**. Rio de Janeiro, Livraria José Olympio Editora S/A. 2ª ed., p 248-255. 1981.

MAACK, H., **Geografia física do Paraná**. Secretaria da Cultura e do Esporte do Governo do Estado do Paraná. Ed. José Olympio Editora S.A., 450p, 2002.

MACHADO, R. E. Simulação de Escoamento e de Produção de Sedimentos em uma Microbacia Hidrográfica Utilizando Técnicas de Modelagem e Geoprocessamento. **Tese** (Doutorado em Agronomia: irrigação e drenagem). Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz. Universidade de São Paulo. São Paulo, 2002.

MEIRA NETO, A. A., FONTES, A. S., MEDEIROS, Y.D. P. **Aplicabilidade do modelo SWAT a um sistema hidrológico Complexo de clima semi-árido**. In.: XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Maceió: Alagoas, 2011.

MEIRELLES, M. S. P.; CAMARA, G; ALMEIDA, C. M. **Geomática: Modelos e Aplicações**. EMBRAPA, Brasília-Df, 2007.

MELO, O. A. G. Análise comparativa da fragilidade potencial e emergente da bacia hidrográfica do rio Baiano – Assis Chateaubriand-Pr. **Dissertação** (Mestrado em Geografia) – Departamento de Geografia, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2010.

MINEROPAR. **Atlas geológico do estado do Paraná**. Curitiba, 2001. Disponível em:< <http://www.mineropar.pr.gov.br/modules/conteudo/conteudo.php?conteudo=96>>. Acesso em: 23 de março de 2016.

MISHRA, A.; KAR, S.; SINGH, V. P. **Water Resource Management**. Prioritizing Structural Management by Quantifying the Effect of Land Use and Land Cover on Watershed Runoff and Sediment Yield. V 21(11). P. 1899-1913. 2007.

MOORE, I. D.; TURNER, A. K.; WILSON, J. P.; JENSON, S. K.; BAND, L. E. GIS and land surface subsurface process. In: GOODCHILD, M. F.; BRADLEY, O. P.; STEYAERT, L. T. ed. **Environmental Modeling with GIS**. New York: Oxford University Press, 1993.

MORAIS, E. S. Evolução da Planície de Inundação e Confluência do Rio Ivai e Rio Paraná na Região de Pontal do Tigre, Icaraíma – PR: Uma Abordagem Geomorfológica. **Dissertação**

(Mestrado em Geografia) – Departamento de Geografia, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2010.

MULLIGAN, M.; WAINWRIGHT, J. Modelling and Model Building. In: WAINWRIGHT, J. AND MULLIGAN, M. **Environmental Modelling: Finding Simplicity in Complexity**. New York, John Wiley & Sons, 2004. p. 7-73.

NAGHETTINI, M. PINTO, E. J. A. **Hidrologia estatística**. Belo Horizonte: CPRM, 2007. 561 p.

NEITSCH, S.L.; ARNOLD, J. G.; KINIRY, J. R.; WILLIANS, J. R. **Soild And Water Assessment Tool – Theoretical Documentation**. Temple: Blackland Research Center, Soil and Water Research Laboratory. 2005. 494p.

NEITSCH, S.L.; ARNOLD, J. G.; KINIRY, J. R.; WILLIANS, J. R. (2009) **Soild And Water Assessment Tool. Theoretical Documentation**. Disponível em: <http://swat.tamu.edu/media/46964/swat2005-theo-doc-spanish.pdf>. Acesso em: 09 de maio de 2015.

NEITSCH, S.L.; ARNOLD, J. G.; KINIRY, J. R.; WILLIANS, J. R. **Soild And Water Assessment Tool – Theoretical Documentation**. Temple: Blackland Research Center, Soil and Water Research Laboratory. 2011. 634p.

NRCS - Natural Resources Conservation Service Soils. **Soil texture triangle**. Disponível em: http://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detail/soils/survey/?cid=nrcs142p2_054167. Acesso: 22 de junho de 2014.

NASA. Disponível em: <http://zulu.ssc.nasa.gov/mrsid>. Acesso: em 23 de agosto de 2014.

PAIVA, D. G. Análise do Índice de Relação entre Fluxo de Base e Desflorestamento Por Meio de Imagens Orbitais e Análise Hidrológica: Baixo Curso do Rio Ivaí, PR. (**Mestrado em Geografia**) Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2008.

PEDROSA, B. M.; CAMARA, G. **Modelagem Dinâmica e Sistemas de Informações Geográficas**. In: Geomática: Modelos e Aplicações. EMBRAPA, Brasília-Df, 2007.

PRADO, J. P. B.; NÓBREGA, M. T. Determinação de perdas de solo na Bacia Hidrográfica do Córrego Ipiranga em Cidade Gaúcha, Estado do Paraná, com aplicação da Equação universal de perdas de solo (EUPS). **Acta Scientiarum. Technology**. Maringá, v. 27, n. 1, p. 33-42, 2005.

RENSCHLER C. **Geo-spatial Interface for the Water Erosion Prediction Project GeoWEPP**. ArcX. (2002). Disponível em: http://www.geog.buffalo.edu/~rensch/geowepp/GeoWEPP%20Manual_files/frame.htm. Acesso: 09 de maio de 2017.

RENNÓ, C. D.; SOARES, J. V. **Modelos Hidrológicos para Gestão Ambiental**. Programa de Ciência e Tecnologia para Gestão de Ecossistemas – INPE, São José dos Campos: 2000.

RODERJAN, C. V.; GALVÃO, F.; KUNIYOSHI, Y. S.; HATSCHBACH, G. G. **As unidades fitogeográficas do estado do Paraná.** Ciência & Ambiente, Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria, n. 24, p. 75-92, 2002.

ROSS, J. L. S. Análise empírica da fragilidade dos ambientes naturais e antropizados. In: **Revista do departamento de Geografia**, FFLCH/ USP. São Paulo, 1994.

SALA, M. G. Análise integrada dos elementos físicos, de uso e ocupação da bacia do Ribeirão Maringá – PR: Para fragilidade ambiental dos solos. (**Dissertação** de mestrado), Departamento de Geografia - Programa de Pós-Graduação - UEM-PR, 2005.

SALA, M. G. Unidades Geoambientais da Margem Esquerda da Planície Aluvial do rio Ivaí-PR. **Tese** (Doutorado em Geografia) Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2014.

SALTER, P.J.; WILLIAMS, J.B. *The influence of texture on the moisture characteristics of soils.* IV. *A method of estimating the available water capacities of profiles in the field.* **Journal of Soil Science.** 1967, vol.18, p. 174-181.

SALTER, P.J.; WILLIAMS, J.B. *The influence of texture on the moisture characteristics of soils.* V. *Relationships between particle size composition and moisture contents at the upper and lower limits of available water.* **Journal of Soil Science.** 1969. vol. 20, p. 126-131.

SANTOS, V. D. Aspectos fitogeográficos e ecológicos da vegetação natural do Estado do Paraná. Geojandaia, **Revista de geografia.** Jandaia do Sul. v. 1, n. 1, p. 15 – 37, 2001.

SANTOS, L. J. C et al, Mapeamento geomorfológico do estado do Paraná. **Rev. Bras. de Geomorfologia.** Ano 7, n^o2, 2006.

SANTOS, M. L.; STEVAUX, J. C.; GASPARETTO, N. V. L.; SOUZA FILHO, E. .E Geologia e Geomorfologia da Planície Aluvial do Rio Ivaí em seu Curso Inferior. **Rev. Bras. Geomorfologia**, v 9. n 1. p 23-34, 2008.

SANTOS, M. L.; MORAIS. E. S. Produção de sedimentos em bacia hidrográfica de pequena ordem: uso de modelos matemáticos, bacia do ribeirão Maringá, Paraná - Brasil. **Revista Brasileira de Geomorfologia.** v. 13, n 2, 2012.

SANTOS, M. L.; MORAIS. E. S.; SILVEIRA, H.; ALVES, F. C. Estudo do escoamento superficial na bacia hidrográfica do rio Ivaí, Paraná, Brasil. **Revista Brasileira de Geomorfologia.** v. 14, n 3, 2013.

SARTORI, A. Avaliação da Classificação Hidrológica do Solo para a Determinação do Excesso de Chuva do Método do Serviço de Conservação do Solo dos Estados Unidos. **Dissertação de Mestrado** - Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo – Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2004.

SARTORI, A.; LOMBARDI NETO, F.; GENOVEZ, A. M. Classificação Hidrológica de Solos Brasileiros para a Estimativa da Chuva Excedente com o Método do Serviço de Conservação do Solo dos Estados Unidos Parte 1: Classificação. **RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos.** v. 10, n4, 2005, p.05-18.

SCHIAVETTI, A & CAMARGO, A. F. M. **Conceitos de bacias hidrográficas**: teorias e aplicações – Ilhéus, BA. Editus, 2002. 293 p.:il;

SCS – Soil Conservation Service. **National Engineering Handbook**, Section 4, *Hidrology*, Chapter 10. Soil Conservation Service, Washington, 1972.

SILVA, X. **Geoprocessamento em Estudos Ambientais: Uma Perspectiva Sistêmica**. In: *Geomática: Modelos e Aplicações*. EMBRAPA, Brasília-Df, 2007.

SMITH, R. E.; GOODRICH, D. C. Rainfall Excess Overland Flow. In: **Encyclopedia of Hydrological Sciences**. Edited by M G Anderson. John Wiley & Sons, Ltd. 2005. p 1707-1718.

SOUZA, R. M.; SANTOS, I.; KOBAYAMA, M. O modelo SWAT como ferramenta para a gestão de recursos hídricos: avaliação de vazões de outorga na bacia hidrográfica do Altíssimo Rio Negro. **XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**. Campo Grande-MS, 2009.

SOUZA, V. Estimativa de perdas de solo por erosão laminar na Bacia do Córrego Pinhalzinho II com suporte de geoprocessamento. **Dissertação** (Mestrado em Geografia) – Departamento de Geografia, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2010.

STEYAERT L. T. ed. **Environmental Modeling with GIS**. New York: Oxford University Press, 1993. p. 196-230.

STEVANUX, J. C. **Mudanças Ambientais no Quaternário**. Fundamentos da Geografia Contemporânea. In Faculdade Estadual de Ciências e Letras de Campo Mourão, Curso de Especialização em Geografia, 1996.

TSUKAMOTO, Y. *Storm discharge from an experimental watershed*. **Journal of the Japanese Forestry Society**, v. 45, p. 186-190, 1963.

TUCCI, C. E. M. **Modelos Hidrológicos Distribuídos**. 14 de fevereiro de 2010. Disponível em: <http://rhama.net/wordpress/?p=134>. Acesso: 05 de março de 2015.

TUCCI, C. E. M. Escoamento Superficial. In. TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: ciência e aplicação**. 4 ed. Porto Alegre: UFRGS/Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2007. P. 391-442.

TUCCI, C. E. M. **Modelos Hidrológicos**. Editora da Universidade Federal do Rio Grande do Sul – ABRH. 2 ed. Porto Alegre, 2005.

TUCCI, C.E.M. **Modelos hidrológicos**. Porto Alegre, Ed. Universidade UFRGS, 1998.

TUCCI, C. E. M. e tal. **Hidrologia: Ciência e Aplicação**. 2 ed. Editora da Universidade ABRH, Porto Alegre, RS, 1997.

USDA – *United States Department of Agriculture*. Disponível em: <http://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/site/national/home/>. Acesso: 12 de maio de 2014.

UZEIKA, T. Aplicabilidade do Modelo SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*) na simulação da produção de sedimentos em pequena bacia hidrográfica rural. **Dissertação** (mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009. 144p.

UZUNIAM, Armênio. **Paisagem típica do cerrado brasileiro**. 2004, Disponível em: <http://www.suapesquisa.com/geografia/vegetacao/cerrado.htm> Acesso em 25 abril 2017.

VALERIANO, M. M.; ROSSETI, D. F. *Topodata: Brazilian full coverage refinement of SRTM data*. **Applied Geography**. Ed 32. 2011, p. 300-309.

VAN DEURSEN, Willen. **Geographical Information Systems and Dynamic Models: Development and application of a prototype spatial modelling language**. Rotterdam, Netherlands, 1995. Disponível em: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.97.5862&rep=rep1&type=pdf>. Acesso: 14 de fevereiro de 2014.

VON BERTALANFFY, L. **Teoria Geral dos Sistemas**. Trad. Francisco M. Guimarães. Vozes, Petrópolis – RJ, 1973. 351 p.

WAINWRIGHT, J.; PARSONS, A. J.; MICHAELIDES, K.; POWELL, D. M.; BRAZIER, R. **Linking Short- and Long-Term Soil-Erosion Modelling**. In.: *Long Term Hillslope and Fluvial System Modelling: Concepts and Case Studies from the Rhine River Catchment*. LANG, A.; HENNRICH, H.; DIKAU, R. (org) Berlin: 2003.

WICHMEIER, W. H.; SMITH, D. D. **Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning**. USDA. Maryland/EUA, 1978.

WILLIAMS, J. R. *Sediment-yield prediction with Universal Equation using Runoff Energy Factor*. **Transactions of the ASAE**. 1975. v. 12, 100-103.

WOOLHISER, D. A., SMITH, R. E., GOODRICH, D. C. (1990) *KINEROS: a kinematic runoff and erosion model: documentation and user manual*. **Report ARS-77**, United States Department of Agriculture, Agricultural Research Service, Washington, DC, USA. 130p.