



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
AMBIENTAL

LUAN CARLOS DE ANDRADE SANTOS

MODELAGEM HIDROLÓGICA DE TRÊS BACIAS
HIDROGRAFICAS DO ALTO E MÉDIO PAJEÚ, ESTADO DE
PERNAMBUCO

RECIFE - PE

Fevereiro/2023

LUAN CARLOS DE ANDRADE SANTOS

MODELAGEM HIDROLÓGICA DE TRÊS BACIAS
HIDROGRÁFICAS DO ALTO E MÉDIO PAJEÚ, ESTADO DE
PERNAMBUCO

Dissertação submetida ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal Rural de Pernambuco, para obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental, na Área de Concentração de Tecnologia e Gestão do Meio Ambiente – Gestão Ambiental e de Recursos Hídricos.

Orientador: Prof. Dr. Genival Barros Júnior

Coorientador: Prof. Dr. José Ramon Barros Cantalice

RECIFE - PE

Fevereiro/2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal Rural de Pernambuco
Sistema Integrado de Bibliotecas
Gerada automaticamente, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

S237m

Santos, Luan Carlos de Andrade

Modelagem hidrológica de três bacias hidrográficas do alto e médio Pajeú, Estado de Pernambuco / Luan Carlos de Andrade Santos. - 2023.

95 f. : il.

Orientador: Genival Barros Junior.

Coorientador: Jose Ramon Barros Cantalice.

Inclui referências e anexo(s).

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Recife, 2023.

1. Hidrologia. 2. Erosão. 3. Semiárido. 4. Escoamento Superficial. 5. Gestão de Recursos Hídricos. I. Junior, Genival Barros, orient. II. Cantalice, Jose Ramon Barros, coorient. III. Título

CDD 620.8

LUAN CARLOS DE ANDRADE SANTOS

Modelagem hidrológica de três bacias hidrográficas do alto e médio Pajeú, Estado de Pernambuco

Dissertação submetida ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal Rural de Pernambuco, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental, na Área de Concentração de Tecnologia e Gestão do Meio Ambiente – Gestão Ambiental e de Recursos Hídricos.

Aprovada em 12 de fevereiro de 2023

Prof. Dr. Genival Barros Júnior
Presidente da banca e Orientador
Universidade Federal Rural de Pernambuco/UAST

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Genival Barros Júnior
UFRPE – Orientador

Prof. Dr. Marcus Metri
UFRPE – Examinador interno - PPEAMB

Prof^a. Dr^a. Wanda Lira
UFRN – Examinadora externa

AGRADECIMENTOS

Agradeço acima de tudo a Deus, por tudo que tem feito e por tudo que irá fazer pelas bênçãos alcançadas, pelo seu amor e infinita graça a qual não sou merecedor. A Ele devo tudo.

Ao meu amor, Layza Daiane, a qual muito em breve constituiremos uma linda família, muito obrigado pelo seu companheirismo, compreensão e cuidado para comigo. Você faz parte dessa conquista!

Aos meus pais Ivanice de Andrade e Luís Carlos por todo o suporte, abdições e apoio incondicional. Ao meu querido irmão, Lucas de Andrade por estar ao meu lado em todos os momentos.

Aos meus amigos/irmãos que Deus me presenteou, obrigado pelas orações, conselhos, momentos de alegria, ânimo e direcionamentos. As minhas amadas sobrinhas Alice, Manuela e Malu, que conquistam meu coração todos os dias.

Ao meu orientador Prof. Genival Barros Júnior, pelo apoio e ensinamento, sempre com muita calma, cordialidade e compreensão. Ao meu coorientador Prof. Ramon Cantalice por todo o suporte, paciência e incentivo, o senhor tem a minha admiração.

Aos que fazem parte do Laboratório de Conservação do Solo e Água da UFRPE, pela acolhida e aprendizado.

Ao órgão de fomento FACEPE, pela concessão da bolsa de estudo. A Universidade Federal Rural de Pernambuco e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental.

Enfim, agradeço a todos que de forma direta ou indireta contribuíram para que chegasse a este momento.

*“A tua palavra é lâmpada que ilumina os meus passos
e luz que clareia o meu caminho.”*

Salmos 119:105

Modelagem hidrológica de três bacias hidrográficas do alto e médio Pajeú, Estado de Pernambuco

RESUMO

A compreensão dos processos hidrológicos é fundamental em estudos ambientais, apesar de que pouco ainda se sabe sobre as interações entre a vegetação e os solos de uma bacia hidrográfica com os regimes hidrológicos em ambientes semiáridos brasileiros. O presente trabalho se propôs a aplicar e aferir o desempenho de diferentes métodos de modelagem hidrológica (Curva Número, Método Racional, Racional Modificado, I Pai Wu e o TR-55) em três sub-bacias inseridas nas regiões do Alto e Médio Pajeú, sendo elas a bacia do Riacho Exú, do Riacho Cachoeira e do Riacho Jacu. As vazões reais consideradas foram obtidas através de campanhas de medições, realizadas no ano de 2009 e extrapoladas por meio de modelos teóricos de Probabilidade. Os dados de entrada para os modelos foram obtidos por meio da análise da cobertura vegetal (presença e uso) e do solo (ocupação e uso), realizadas a partir de dados secundários e técnicas de geoprocessamento. Os cinco modelos utilizados foram testados respeitando as recomendações inerentes as particularidades intrínsecas de cada um deles. A distribuição estatística que melhor possibilitou a extrapolação dos dados observados foram, o modelo Gama foi o que melhor se ajustou aos dados das bacias do riacho Exú ($r=0,99$; $\chi^2=20,071$) e Cachoeira ($r=0,982$; $\chi^2=0,058$), e o Log-Normal obteve um melhor ajuste para a bacia do riacho Jacú ($r=0,968$; $\chi^2=0,045$). As métricas de erro e eficiência indicaram que para a bacia do riacho Exú, o moledo da Curva Número, apresentou um melhor ajuste e um menor erro (NS=0,997 e MPE=-0,871). Para a bacia do riacho Cachoeira, a modelagem mais adequada ficou por conta do modelo Racional Modificado (NS= 0,995 e MPE=-1,067). O Jacú por sua vez, apresentou uma modelagem mais ajustada para o modelo Racional (NS=0,993 e MPE=-1,247). As avaliações de desempenho indicaram que as modelagens mais tradicionalmente difundidas (Curva Número e o Método Racional) apresentaram resultados mais consistente, destacando que o presente trabalho contribuiu para o aprofundamento do conhecimento das características hidrológicas existentes nas microbacias do Pajeú, bem como na definição dos métodos mais adequados para a aplicação de modelos hidrológicos em ambientes semiáridos, colaborando com o desenvolvimento de técnicas de conservação do solo e água.

Palavras-Chave: Hidrologia; Erosão; Semiárido; Escoamento superficial; Gestão de Recursos Hídricos.

Hydrological modeling of three river basins in the upper and middle Pajeú, State of Pernambuco

ABSTRACT

Understanding hydrological processes is fundamental in environmental studies, although little is known about the interactions between vegetation and soils in a watershed with hydrological regimes in Brazilian semi-arid environments. The present work proposed to apply and measure the performance of different methods of hydrological modeling (Number Curve, Rational Method, Modified Rational, I Pai Wu and the TR-55) in three sub-basins inserted in the Upper and Middle Pajeú regions, being the Riacho Exú, Riacho Cachoeira and Riacho Jacu basins. The actual flows considered were obtained through measurement campaigns, carried out in 2009 and extrapolated through theoretical models of Probability. The input data for the models were obtained through the analysis of vegetation cover (presence and use) and soil (occupation and use), carried out from secondary data and geoprocessing techniques. The five models used were tested respecting the recommendations inherent to the intrinsic particularities of each one of them. The statistical distribution that best allowed the extrapolation of the observed data were the Gama model was the one that best adjusted to the data from the Exú stream basins ($r=0.99$; $\chi^2=20.071$) and Cachoeira ($r=0.982$; $\chi^2=0.058$), and the Log-Normal obtained a better fit for the Jacú stream basin ($r=0.968$; $\chi^2=0.045$). The error and efficiency metrics indicated that for the Exú stream basin, the curve number moledo presented a better fit and a smaller error (NS=0,997 e MPE=-0,871). For the Cachoeira stream basin, the most appropriate modeling was due to the Modified Rational model (NS= 0,995 e MPE=-1,067). The Jacú, in turn, presented a more adjusted modeling for the Racional model (NS=0,993 e MPE=-1,247). The performance evaluations indicated that the more traditionally disseminated modeling (Number Curve and the Rational Method) presented more consistent results, highlighting that the present work contributed to the deepening of the knowledge of the existing hydrological characteristics in the Pajeú microbasins, as well as in the definition of the methods more suitable for the application of hydrological models in semi-arid environments, collaborating with the development of soil and water conservation techniques.

Keywords: Hydrology; Erosion; semiarid; Surface runoff; Water resources management.

LISTA DE FIGURAS

Figura 01 – Representação de uma bacia hidrográfica.....	14
Figura 02 – Representação esquemática dos componentes dos processos hidrológicos.	16
Figura 03 – Diferentes tipos de precipitação.	18
Figura 04 – Ábaco de distribuição espacial da chuva (K)	30
Figura 05 – Mapa de localização da Bacia Hidrográfica do rio Pajeú.	36
Figura 06 – Mapa de hidrografia da bacia hidrográfica do Pajeú.	37
Figura 07 – Mapa de localização das sub-bacias analisadas.	39
Figura 08 – Mapa de Uso e Cobertura vegetal da bacia no riacho Exu.	58
Figura 09 – Mapa de Uso e Cobertura vegetal da bacia no riacho Cachoeira.....	59
Figura 10 – Mapa de Uso e Cobertura vegetal da bacia no riacho Jacu.....	59
Figura 11 – Agrupamento de solo e sua respectiva classificação segundo seu grupo hidrológico para a bacia do Exú.	62
Figura 12 – Agrupamento de solo e sua respectiva classificação segundo seu grupo hidrológico para a bacia do Cachoeira.	63
Figura 13 – Agrupamento de solo e sua respectiva classificação segundo seu grupo hidrológico para a bacia do Jacú.....	63
Figura 14 – Distribuições estatísticas aplicadas para a bacia do riacho Exu.....	67
Figura 15 – Distribuições estatísticas aplicadas para a bacia do riacho Cachoeira.....	67
Figura 16 – Distribuições estatísticas aplicadas para a bacia do riacho Jacu.....	68
Figura 17 – Espacialização do coeficiente <i>Runoff</i> para a bacia do Riacho Exu.....	71
Figura 18 – Espacialização do coeficiente <i>Runoff</i> para a bacia do Riacho Cachoeira. ...	72
Figura 19 – Espacialização do coeficiente <i>Runoff</i> para a bacia do Riacho Jacu.	72
Figura 20 – Espacialização do coeficiente “CN” para a bacia do Riacho Exu.	73
Figura 21 – Espacialização do coeficiente “CN” para a bacia do Riacho Cachoeira. Fonte: Autor, 2023.....	74
Figura 22 – Espacialização do coeficiente “CN” para a bacia do Riacho Jacu. Fonte: Autor, 2023.....	74
Figura 23 – Distribuição de valores de CN por área para as bacias analisadas.....	76
Figura 24 – Comparação entre as estimativas de vazões médias geradas pelos modelos hidrológicos de CN, IPW e RM frente aos dados observados, bem como a dispersão dos dados estimados em cada modelagem para a bacia do riacho Exú.	81
Figura 25 – Comparação entre as estimativas de vazões médias geradas pelos modelos hidrológicos de IPW, RM e TR-55 frente aos dados observados, bem como a dispersão dos dados estimados em cada modelagem para a bacia do riacho Cachoeira.	83
Figura 26 – Comparação entre as estimativas de vazão média realizadas pelos modelos hidrológicos de RM, TR-55 e Racional frente aos dados de vazão média observados, bem como a dispersão dos dados estimados em cada modelagem para a bacia do riacho Jacú.	85

LISTA DE TABELAS

Tabela 01 - Coeficiente de escoamento “C” para bacias agrícolas (Solo do grupo B) ..	28
Tabela 02 - Fatores de conversão dos grupos hidrológicos de solo	28
Tabela 03 – Descrição das diferentes condições de unidade antecedente.	31
Tabela 04 – Valores de Curva Numero para solos hidrológicos na condição II	32
Tabela 05 – Conversão das condições de Unidade antecedente com a curva número... ..	32
Tabela 06 – Fator de ajustamento em função da porcentagem de água de chuva retida em poças d’água ou em brejos.....	34
Tabela 07 – Valores de C_0 , C_1 e C_2 obtidos em função do tipo de chuva e da relação I_a/P	34
Tabela 08 – Parâmetros Morfométricos utilizados e suas respectivas identificações. ...	41
Tabela 09 - Lista de imagens MDE utilizadas por bacia.	42
Tabela 10 – Lista de imagens multiespectrais utilizadas por bacia.	42
Tabela 11 – Classificação dos GHSs segundo a classificação do NRCS/USDA.	44
Tabela 12 – Medições de vazões obtidas para a bacia do riacho Exu – 2009.	45
Tabela 13 – Medições de vazões obtidas para a bacia do riacho Cachoeira – 2009.	46
Tabela 14 – Medições de vazões obtidas para a bacia do riacho Jacu – 2009.	46
Tabela 15 – Formulações de Tempo de Concentração (TC) aplicados.	51
Tabela 16 – Valores do fator de rugosidade n para o uso na Equação 18.	51
Tabela 17 – Parâmetros geométricos das bacias hidrográficas dos riachos do Exu, Cachoeira e Jacu.	53
Tabela 18 – Parâmetros morfométricos de drenagem das bacias hidrográficas dos riachos Exu, Cachoeira e Jacu.....	54
Tabela 19 – Parâmetros morfométricos do relevo das bacias hidrográficas dos riachos do Exu, Cachoeira e Jacu.....	56
Tabela 20 – Classificação e estratificação de declividade para as bacias do riacho Exu, Cachoeira de Jacu com base no que prescreve a EMBRAPA, 1979.	57
Tabela 21 – Tabela de Uso e Cobertura Vegetal de todas as bacias analisadas.	58
Tabela 22 – Valores obtidos dos parâmetros de ajustes das funções avaliadas com os dados disponíveis para cada bacia.	65
Tabela 23 – Valores obtidos da estatística do teste de aderência de Qui-Quadrado na avaliação das funções de distribuição às séries de vazões observadas e suas consequentes correlações.	65
Tabela 24 – Valores de coeficiente <i>Runoff</i> obtido para a Bacia do Riacho Exu.	69
Tabela 25 – Valores de coeficiente <i>Runoff</i> obtido para a Bacia do Riacho Cachoeira. .	69
Tabela 26 – Valores de coeficiente <i>Runoff</i> obtido para a Bacia do Riacho Jacu.	70
Tabela 27 – Erro Médio Percentual (MPE) e o ajuste de Nash Sutcliffe (NS) para cada TC aplicado as modelagens hidrológicas nas bacias sob estudo.	77
Tabela 28 – Desempenho dos modelos CN, IPW e RM para a bacia do Exú.	79
Tabela 29 – Desempenho dos modelos IPW, RM e TR-55 para a bacia do Cachoeira. .	82
Tabela 30 – Desempenho dos modelos RM, TR-55 e Racional para a bacia do Jacú. ..	84

Sumário

1. INTRODUÇÃO	11
2. OBJETIVO	13
2.1. OBJETIVO GERAL	13
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	13
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
3.1. HIDROLOGIA DE SUPERFÍCIE.....	14
3.1.1. Bacia hidrográfica.....	14
3.1.2. Processos hidrológicos	15
3.1.3. Precipitação e escoamento superficial.....	17
3.1.4. Evapotranspiração	20
3.1.5. Processos de transferência de sedimentos	21
3.2. HIDROLOGIA DO AMBIENTE SEMIÁRIDO	22
3.3. MODELAGEM HIDROLÓGICA.....	23
3.4. MODELOS PARA A ESTIMATIVA DO ESCOAMENTO SUPERFICIAL	25
3.4.1. Método Racional.....	26
3.4.2. Método Racional Modificado.....	28
3.4.3. Método I Pai Wu.....	29
3.4.4. Método CN-NRCS	31
3.4.5. Método TR - 55	33
4. MATERIAL E MÉTODOS	36
4.1. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	36
4.2. DEFINIÇÃO DA BASE DE DADOS.....	40
4.3. DETERMINAÇÃO DA SÉRIE DE DADOS HIDROLÓGICOS.....	44
4.3.1. Série Histórica	44
4.3.2. Funções de Distribuições de Probabilidade (FDPs)	47
4.3.3. Validação das FDPs.....	49
4.4. MODELAGEM.....	50

4.5.	AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DOS MODELOS HIDROLÓGICOS ...	51
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	53
5.1.	DADOS DE ENTRADA PARA ALIMENTAÇÃO DOS MODELOS	53
5.1.1.	Caracterização Morfométrica das Bacias	53
5.1.2.	Uso e Cobertura Vegetal.....	57
5.1.3.	Determinação do Grupo Hidrológico de Solos (GHSs)	62
5.2.	ANÁLISE DE FREQUÊNCIA DOS DADOS DE VAZÃO.....	64
5.3.	MODELAGEM HIDROLÓGICA.....	69
5.3.1.	Cálculo do Coeficiente de Escoamento Superficial e sua relação com a conservação do solo e água	69
5.3.2.	Implicações da CN para o escoamento superficial.....	73
5.3.3.	Análise do Tempo de Concentração para as bacias sob estudo.....	77
5.3.4.	Cálculo de Vazões Máximas e Avaliação de Desempenho dos Modelos por bacia hidrográfica.....	79
6.	CONCLUSÕES	87
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	88

1. INTRODUÇÃO

A compreensão dos processos hidrológicos é fundamental em estudos ambientais, na gestão dos recursos hídricos e em projetos de obras hidráulicas. O tempo em que a água permanece nas diversas partes da hidrosfera, influencia na disponibilidade hídrica, na dinâmica de elementos, nutrientes e poluentes, bem como, nas interações com as ações antrópicas diversas (GOLDENFUM; TUCCI, 1998).

A respeito dos fatores climáticos, Santos (2018), afirmou que, não apenas a escassez torna-se preocupante, mas também a ocorrência de excessos de água que provocam enchentes. No Semiárido brasileiro, essas características são potencializadas devido as suas particularidades climáticas intrínsecas. Naturalmente a fonte hídrica da região é a precipitação, que por sua vez ocorre em período concentrado entre três e quatro meses, com uma evapotranspiração potencial duas vezes superior às quantidades de chuva precipitada (ANDRADE et al., 2020).

Segundo Cantalice et al. (2013), o comportamento hidrológico do Semiárido brasileiro apresenta um padrão distinto, com caráter intenso, pela concentração dos volumes de chuvas em curtos períodos de tempo e de pouca duração. A grande variabilidade na ocorrência das chuvas, e a irregular ocorrência espacial e temporal das mesmas, geram escoamentos superficiais e subsuperficiais que muitas vezes ocorrem na forma de eventos extremos, rápidos e de picos simples com grande variabilidade anual e interanual.

Assim, para Andrade et al. (2020), devem haver estratégias para melhorar os serviços ecossistêmicos adequando o manejo da floresta local, e os demais tipos de vegetação para redução do escoamento superficial, necessitando de uma visão integrada de como os processos ecohidrológicos podem ser manejados para favorecer os sistemas áridos e semiáridos. No entanto, pouco ainda se sabe sobre as interações entre a vegetação e os solos de uma bacia hidrográfica com os regimes hidrológicos, fatores estes que determinam o comportamento dos escoamentos superficiais e subsuperficiais.

Outro fator que contribui diretamente na dificuldade da predição do escoamento superficial em bacias hidrográficas e a falta de disponibilidade de dados de medições de variáveis hidrológicas, como a vazão de seus rios e riachos e a evaporação, dificultando a caracterização da disponibilidade espaço-temporal da água em uma dada região. Devido a este fato, aliado à complexidade logística do monitoramento e gestão da informação, há uma escassez de dados hidrológicos nas bacias hidrográficas brasileiras (SANTOS; FONTES, 2014).

Portanto, na região semiárida brasileira, acumulam-se uma série de fatores, quais sejam climáticos, edáficos, logístico/metodológicos, dentre outros, associados a um rotineiro cenário de stresse hídrico. É neste quadro que se procura superar um grande desafio para gestão dos recursos hídricos nestas regiões, sobretudo no processo de tomada de decisão.

Neste cenário de incertezas e inconsistências, a modelagem hidrológica apresenta-se como uma ferramenta que facilita a compreensão e representação técnica a respeito dos fenômenos físicos envolvidos, e na previsão de cenários utilizando, de forma eficiente, os dados disponíveis para as análises (SCHULER et al., 2003).

Segundo Galbetti (2015), a utilização da modelagem hidrológica deve ser alimentada a partir do conhecimento de seus parâmetros e respectivos limites de uso e aplicação. Todas as características que são intrínsecas a região semiárida, devem ser levadas em consideração no processo de modelagem, para que haja o desenvolvimento de uma simulação hidrológica mais realista possível.

Entretanto, esse não é um processo trivial devido à dificuldade de estimar valores que representem adequadamente diferentes áreas, sobretudo em ambientes semiáridos. Existem métodos hidrológicos para quantificação e conhecimentos de pequenas e médias bacias hidrográficas que são pouco conhecidos ou até não aplicados, sendo estes especificamente desenvolvidos para bacias hidrográficas semiáridas (ALMEIDA; SERRA, 2017; GALBETTI, 2015).

De acordo com Almeida & Serra (2017), o conhecimento de tais modelos, pode proporcionar a geração de informações adequadas para uma efetiva tomada de decisão, seja por meio de intervenções estruturais, planejamento de cenários vindouros, manejo de uso do solo, ou até no subsídio de estratégias de redução do escoamento superficial em ambientes semiáridos, proporcionando o desenvolvimento de técnicas para elevar os conteúdos de umidade no solo, promover menor intensidade dos processos erosivos, dentre outros.

Neste sentido, o presente trabalho se propõe em verificar a performance de diferentes métodos de modelagem hidrológica em bacias hidrográficas semiáridas, quais sejam, a Curva Número, o Método Racional, o Método Racional Modificado, o Método I Pai Wu e o TR-55, frente as respostas hidrológicas destas bacias hidrográficas, com vista a melhorar a acuidade da gestão e planejamento dos recursos hídricos em um contexto semiárido.

2. OBJETIVO

2.1. OBJETIVO GERAL

Avaliar a performance dos modelos hidrológicos Curva-número, Método Racional, Método Racional Modificado, O Pai Wu e TR-55 em bacias hidrográficas do semiárido brasileiro.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar a caracterização morfométrica e a análise de uso e cobertura vegetal para as bacias do riacho Exú, Cachoeira e Jacú na Bacia Hidrográfica do Rio Pajeú;
- Analisar as funções de distribuições estatísticas que melhor se adequam a série de dados hidrológicos para as bacias do riacho Exú, Cachoeira e Jacú;
- Avaliar o desempenho dos modelos hidrológicos a serem aplicados, por meio dos índices de desempenho, quais sejam, o método Nash Sutcliffe (NS), Viés, Erro Percentual Médio (MPE) e a Raiz do Erro Médio Quadrático (RMSE).

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. HIDROLOGIA DE SUPERFÍCIE

3.1.1. Bacia hidrográfica

Os elementos fundamentais para o estudo do ciclo hidrológico ocorrem na esfera terrestre, sendo a bacia hidrográfica, segundo Tucci (2012), a área na qual torna-se possível observar a variação dos diferentes processos que nela ocorrem, por meio do registro das variáveis hidrológicas, promovendo o entendimento dos fenômenos e possibilitando representá-los matematicamente.

Entende-se por bacia hidrográfica (Figura 01), uma área que drena as águas de chuvas por meio de canais e tributários para um curso principal, com vazão efluente convergindo para uma única saída (ROCHA; KURTS, 2001). Analogamente, uma bacia de contribuição pode ser definida como uma área de captação das águas pluviais, que converge o escoamento superficial para um único ponto de saída, denominado exutório.

Segundo Tucci et al. (1995), a bacia hidrográfica também pode ser considerada um sistema físico, onde o balanço líquido hidrológico, decorrente da entrada de água proveniente da precipitação e saída por meio do escoamento superficial, resultante das perdas decorrentes dos volumes infiltrados, evaporados e transpirados ao longo da área da bacia.

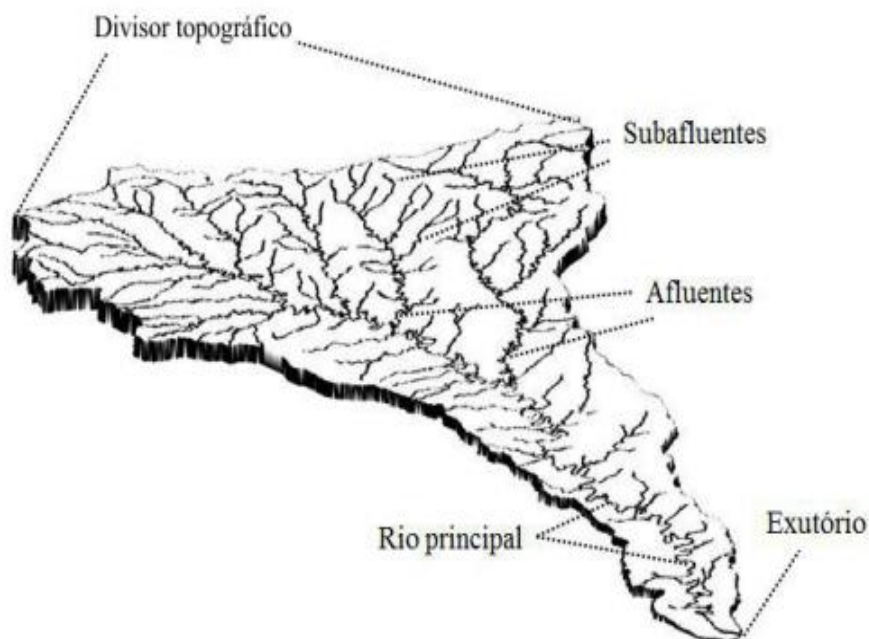


Figura 01 – Representação de uma bacia hidrográfica.

Fonte: (BERNARDI et al., 2013)

Segundo a Lei 9.433/97 (Política Nacional de Recursos Hídricos), a bacia hidrográfica é a unidade territorial para implementação do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos (SISNAMA), o que torna a bacia a área de atuação das políticas de recursos hídricos, planejamento e gerenciamento. Ao considerar a água como um bem de domínio público, recurso natural limitado e dotado de valor econômico, sua gestão volta-se para o uso múltiplo, visando ser descentralizada e participativa.

Segundo Lino (2009), o uso da bacia hidrográfica como unidade de estudo e planejamento ocorre por ser uma unidade geográfica onde os recursos naturais se integram, constituindo uma área de fácil reconhecimento e caracterização. O conceito de bacia hidrográfica ao longo do tempo vem sendo ampliado, com a abrangência para além dos aspectos hidrológicos envolvendo o conhecimento da estrutura biofísica da bacia, bem como das mudanças nos padrões de uso da terra.

Vários autores ressaltam a importância do conceito de bacia hidrográfica análogo ao de ecossistema, como uma unidade prática, seja para estudo, seja para o gerenciamento ambiental, reconhecendo neste sentido bacia hidrográfica como uma unidade ecossistêmica e morfológica que melhor reflete os impactos das interferências antrópicas (CHIN, 2000; FILHO et al., 2019; JENKIS; PERERS; RODHE, 1994; LINO, 2009; LINSLEY; KOHLER; PAULHUS, 1975).

Entendendo que a bacia hidrográfica possui características essenciais, que permitem a integração multidisciplinar entre diferentes sistemas de gerenciamento, estudo e atividade ambiental, especialmente por ser um processo descentralizado de conservação e proteção do ambiente (PIRES; SANTOS; DEL PRETTE, 2002).

Por convenção, considera-se o rio principal a maior trajetória de fluxo entre sua nascente e o exutório. Os fluxos secundários, por sua vez, conduzem a água para o rio principal. Pode-se considerar a bacia (hidrográfica ou de contribuição) como um sistema físico onde o volume de água precipitado é a entrada e o volume de água escoado pelo exutório é a saída (VIEIRA, 2015).

3.1.2. Processos hidrológicos

Segundo Tucci (2012), a junção de todos os componentes, sejam eles físicos, climáticos e biológicos que viabilizam o ciclo da água e sua dinâmica na terra é chamado de processos hidrológicos.

O ciclo hidrológico pode ser caracterizado, de acordo com Lorandi e Cançado (2002), por um fenômeno natural de circulação fechada da água entre a superfície terrestre e a atmosfera regido pela radiação solar, associado à gravidade e à rotação terrestre.

Existem diversos componentes do ciclo hidrológico que se encontram interligados de maneira intrínseca e complexa, exercendo uma influência distinta a depender da conjuntura formada pelos processos hidrológicos em cada área.

A variabilidade espacial das unidades fisiográficas, hidrológicas e biológicas na superfície terrestre, associado às características climáticas locais, confere em uma diversidade de ambientes. Existem unidades da superfície terrestre, que diferem no seu comportamento hidrológico, apesar de serem regidas pelas mesmas leis. As regiões áridas e semiáridas, por exemplo, apresentam características físicas tão distintas, que alguns componentes no processo hidrológico se tornam mais relevantes que outros (BECKER; BRAUN, 1999; MONTE-MOR, 2012; SEN, 2008).

A Figura 02 abaixo apresenta a simplificação esquemática dos componentes dos processos hidrológicos em uma bacia hidrográfica.

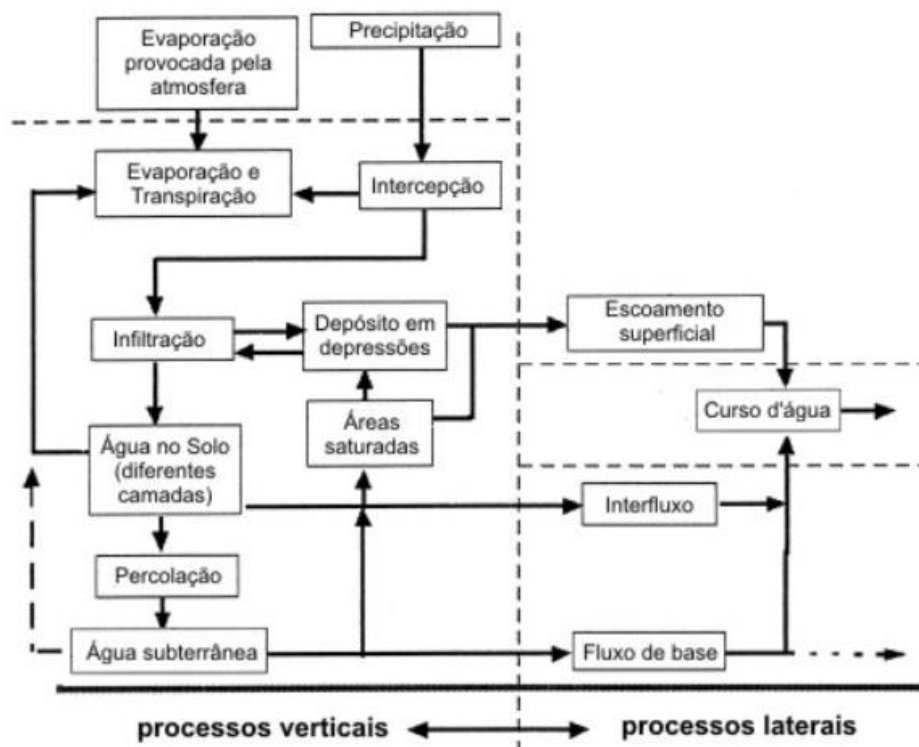


Figura 02 – Representação esquemática dos componentes dos processos hidrológicos.

Fonte: (MONTE-MOR et al., 2012).

A completude ideal de um ciclo hidrológico só pode ocorrer se todos os componentes do processo estiverem plenamente funcionando. O ciclo hidrológico por sua vez é definido por Goldenfum e Tucci (1998), como fenômeno global de circulação fechada, na qual a água passa do ambiente terrestre para a atmosfera em forma de vapor,

e regressa em fase líquida ou sólida.

Nos tópicos a seguir são apresentados alguns dos principais componentes hidrológicos existentes em um ciclo hidrológico, bem como sua influência no sistema como um todo.

3.1.3. Precipitação e escoamento superficial

As precipitações constituem o mais importante componente do ciclo hidrológico, formando o elo entre a água da atmosfera e a água do solo, principalmente no que diz respeito ao escoamento superficial. Por precipitação, entende-se como sendo a água proveniente do vapor de água da atmosfera depositada na superfície terrestre sob forma de chuva, granizo, neblina, neve, orvalho ou geada (BERTONI; TUCCI, 2007). No presente trabalho o termo precipitação é referido como sinônimo apenas para a chuva.

Os elementos básicos necessários para o processo de formação das precipitações são: a umidade atmosférica, decorrente principalmente da evapotranspiração; os mecanismos de resfriamento do ar; a presença de núcleos higroscópicos, ou seja, núcleos que apresentam atrações químicas pelas moléculas de água; e os mecanismos de crescimento de gotas, como a coalescência e difusão de vapor (SILVA et al., 2012).

As precipitações são classificadas em convectivas, orográficas e frontais ou ciclônicas (Figura 03). Collischonn (2006) e Soares (2014) definem esses tipos de precipitação da seguinte forma:

- As **precipitações convectivas** são provocadas pela ascensão brusca do ar úmido aquecido nas proximidades do solo. Essa ascensão ocorre devido à menor densidade do ar quente junto ao solo em relação ao ar mais frio das camadas superiores. Qualquer perturbação que ocorra, como, por exemplo, uma rajada de ventos, provoca uma ascensão violenta das camadas de ar mais quentes, capaz de atingir grandes altitudes. Esse tipo de precipitação em região tropical é o tipo mais comum, são as chamadas chuvas de verão, com uma característica local com grande variabilidade de intensidade.
- As **precipitações orográficas** são originadas quando ventos quentes e úmidos, geralmente procedentes do oceano para o continente, encontram barreiras montanhosas, elevam-se e se resfriam havendo a condensação do vapor.
- As **precipitações ciclônicas** provêm da movimentação de massas de ar de alta pressão para baixa pressão. Nas regiões de convergência atmosférica, as massas úmidas de ar quente são violentamente impulsionadas para as camadas superiores da atmosfera, resultando no seu resfriamento e na consequente

condensação do vapor, de forma a produzir chuva.

Estas precipitações podem ser frontais e não-frontais. As não-frontais são formadas da convergência horizontal de duas massas de ar quente para regiões de baixa pressão, promovendo a ascensão vertical do ar no ponto de convergência. As precipitações frontais se originam da ascensão de uma massa de ar quente sobre uma de ar frio, de características diferentes, na zona de contato entre elas. Esse tipo de precipitação ocasiona enchentes em grandes bacias, pois são precipitações de longa duração e intensidade

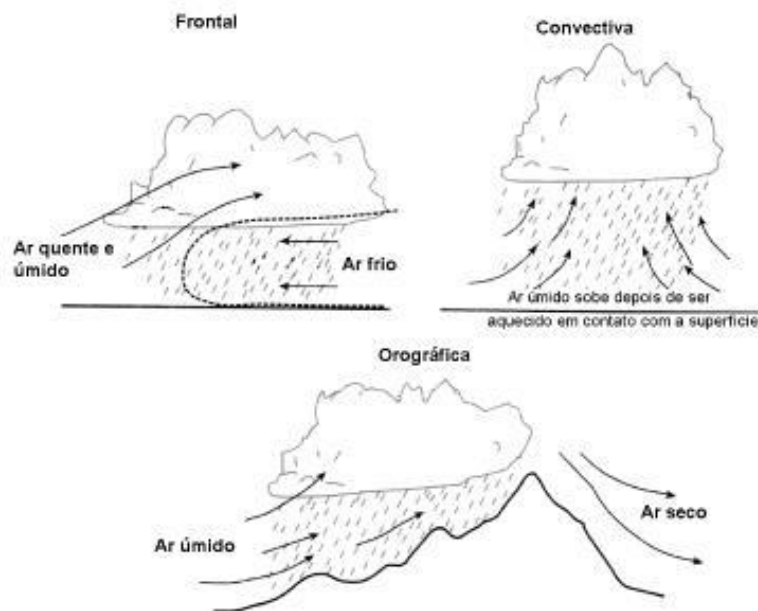


Figura 03 – Diferentes tipos de precipitação.

Fonte: (MONTE-MOR et al., 2012).

Lorandi e Cançado (2002), afirmam que as precipitações variam tanto do ponto de vista geográfico como também do aspecto sazonal. O entendimento dessas variações torna-se de grande importância para um adequado planejamento dos recursos hídricos, na análise de previsões sejam elas de intensidade de chuvas, secas e enchentes dentre outras finalidades. Ainda segundo o autor, dentre os fatores que influenciam a distribuição da precipitação citam-se:

- **Latitude:** influencia na distribuição desigual das pressões e temperatura, e na circulação geral da atmosfera, analisada em macroescala;
- **Distância do mar ou de outras fontes de água:** ao passo que as nuvens se distanciam do mar, em direção ao continente, elas vão perdendo força. Tornando-se uma relação praticamente proporcional, quando não se considera

outras fontes de umidade;

- **Altitude:** A altitude máxima de precipitação gira em torno de 2.500m, onde a variação do nível de precipitação com a altitude é entre 0,5 e 1,5 mm por metro;
- **Orientação das encostas:** Sendo a precipitação influenciada por correntes eólicas, o fato de uma encosta ou vertente está mais ou menos exposta aos ventos, tem reflexo nas quantidades precipitadas.

A determinação da intensidade da precipitação é muito importante para o controle de inundações, dentre outros processos que possuam a capacidade de produzir escoamento superficial. Segundo Vieira (2015), durante e após as chuvas intensas, grande parte da vazão registrada é proveniente da própria chuva, que não consegue penetrar no solo e escoar, atingindo cursos de água aumentando a vazão, formando assim os picos de vazão e, conseqüentemente, as enchentes.

O escoamento superficial é o processo do ciclo hidrológico que trata do conjunto das águas que, por gravidade, se desloca por sobre a superfície da terra. O deslocamento da água por superfície de bacias, rios, canais e reservatórios trata-se de uma pequena parcela importante do ciclo hidrológico (MOR et al., 2012).

Segundo Pruski, Brandão e Silva (2004), o escoamento superficial varia em função de uma série de fatores, podendo ser classificado em agroclimático e fisiográfico. Dentre os fatores agroclimáticos, destacam-se a intensidade e duração da precipitação, a cobertura e os tipos de uso do solo, e a evapotranspiração. Os fatores fisiográficos englobam a área, declividade e forma da bacia, tipo de solo, topografia, rede de drenagem e obras hidráulicas presentes na bacia hidrográfica.

De acordo com Brandão et al. (2006), as condições que mais influenciam no escoamento superficial são:

- Tipo de solo: interferindo diretamente na taxa de infiltração da água no solo e na capacidade de retenção da água sobre a superfície;
- Topografia: influenciando na capacidade de escoamento e armazenamento da água, uma vez que áreas mais íngremes tem menor capacidade de armazenamento superficial;
- Rede de drenagem: uma área mais irrigada, com uma maior rede de drenagem, permite a rápida concentração do escoamento superficial, favorecendo a ocorrência de maiores vazões;
- Obras hidráulicas presentes na bacia: as obras de drenagem, provocam um aumento na velocidade de escoamento, enquanto que, as obras com finalidade

de contenção do escoamento provocam retardo na vazão máxima.

A transferência de água entre a superfície terrestre e a atmosfera ocorre na forma de evapotranspiração, que é a soma da evaporação direta e a transpiração de animais e principalmente das plantas. A água que precipita no continente acaba tomando vários destinos.

Ainda segundo Brandão et al. (2006), uma porção é interceptada e retorna para a atmosfera em forma de evaporação, outra porção infiltra no solo, subdividindo-se em uma parcela que se deposita em depressões o que gera regiões saturadas, podendo ocorrer escoamento superficial, infiltração ou evaporação, e em outra que se movimenta no solo em maiores profundidades, formando o interfluxo e fluxo de base.

Quando o volume precipitado é maior que a taxa de infiltração se origina o escoamento superficial sobre a superfície do terreno, e este que, concentrando-se em canais naturais, dá lugar aos cursos de água (PRUSKI; BRANDÃO; SILVA, 2004).

3.1.4. Evapotranspiração

O termo evapotranspiração condensa dois processos muito importantes no balanço hídrico, a evaporação e a transpiração. Segundo Studart e Campos (2006), cerca de 70% da quantidade de água precipitada sobre a superfície terrestre retorna à atmosfera pelos efeitos da evaporação e transpiração. A evapotranspiração é o processo pelo qual a água, em seu estado líquido evapora, seja a água interceptada pela vegetação, disponível no solo, ou por meio da transpiração das plantas através das folhas (GÓES, 2009).

Os principais fatores intervenientes são as condições climáticas (vento, umidade, temperatura e radiação), características gerais da vegetação (por exemplo, altura, índice da área das folhas), características fisiológicas das plantas (por exemplo, regulação de estômatos em dependência da disponibilidade de água no solo e temperatura) e características do solo na superfície e no interior além da umidade real do solo. Neste aspecto, todos os componentes da evapotranspiração são intimamente relacionados entre si (GÜNTNER; BRONSTERT, 2004).

A evaporação da superfície das águas, além dos outros fatores, é influenciada pela profundidade de massa de água; uma maior profundidade confere uma maior diferença de temperatura entre a superfície atmosférica e a massa de água. Torna-se válido mencionar que, a existência de vegetação diminui as perdas por evaporação da superfície do solo, sendo compensado pela transpiração vegetal, a depender dos fatores intervenientes que estão intrínsecos a este processo (PINTO et al., 1976).

A evapotranspiração é importante para a realização de estudos relacionados à agricultura, os quais envolvem cálculo da necessidade de irrigação, monitoramento do crescimento de culturas, o manejo de irrigação e além da gestão de recursos hídricos (GÓES, 2009).

Studart e Campos (2006) afirmaram que, a mensuração da evapotranspiração é fundamental em projetos hidráulicos, uma vez que servem de base na determinação da capacidade de reservatórios, dimensionamento de sistemas de drenagem, obras de abastecimento humano, dentre outros. Em ambientes áridos e semiáridos, em que a evapotranspiração atinge valores mais elevados, a desconsideração do fenômeno implica numa superestimativa das disponibilidades hídricas.

3.1.5. Processos de transferência de sedimentos

Os processos de transferência de sedimentos são questões ambientais muito importantes que afetam diretamente a sociedade, pois intensificam o transporte de poluentes que estão agregados às partículas de sedimentos, reduzem a capacidade de reservatórios e o potencial agrícola em função da desagregação e do transporte destas partículas (SILVA; SANTOS, 2008). Estes processos são resultado de uma série de combinações e fatores interligados, que apresentam uma grande variabilidade espacial e temporal, o que torna um fenômeno de difícil mensuração.

Em grande parte dos casos, as perdas de solo causados pela erosão hídrica, altera a capacidade de retenção e a distribuição da água no perfil de solo, o que gera maiores volumes de escoamento superficial e conseqüentemente maiores taxas de erosão. A produção de sedimentos em uma bacia hidrográfica é fruto de contínuos processos erosivos, por meio de uma complexa interação entre vários processos hidrogeológicos (SANTOS et al., 2011).

Desta forma, Lino (2009) defende a importância de estudar a influência do escoamento superficial com os demais processos hidrológicos, com o objetivo de entender a dinâmica de sedimentos e desenvolver medidas de mitigação para o processo erosivo que ocorra em qualquer bacia.

Desta forma, a compreensão da dinâmica de produção de sedimento torna-se importante para o planejamento de vários processos de conservação do solo e da água nas bacias hidrográficas (MULLA, 2003). Esta produção, bem como a transferência destes sedimentos são influenciadas pelo comportamento hidrológico em um contexto de bacia hidrográfica, por meio suas características climáticas e geomorfológicas, além das ações antrópicas (TUCCI, 2012).

Segundo Bertol e Almeida (2000), a ação dos processos erosivos pode ser subdividida em três fases. A primeira consiste na desagregação das partículas do solo, que ocorre por virtude da gravidade e pelo do impacto direto das gotas de chuva sobre a superfície do terreno, e o conseqüente escoamento superficial concentrado.

Em um segundo momento, as partículas desprendidas na fase anterior, são transportadas pelos agentes erosivos como a gravidade, água e vento, sendo uma fase bastante influenciada pela topografia do terreno. Destaca-se que o potencial abrasivo resultante do transporte de partículas provoca desprendimento de novas partículas.

A terceira e última fase do processo erosivo é a deposição e acumulação de partículas, no momento em que a energia dos agentes de transporte é reduzido, ou ocorre uma redução na declividade, ou mesmo quando a vegetação passa a reter parte ou a totalidade das partículas (BOCHET; GARCÍA-FAYOS, 2004).

A vegetação do semiárido, por sua vez, é caracterizado por apresentar uma vegetação do tipo Caatinga, com plantas xerófilas caducifólias, ou seja, plantas que perdem suas folhas em determinada época do ano devido à falta de chuva, no entanto, com a reposição do conteúdo de água no solo esta vegetação apresenta um rápido crescimento vegetativo. Devido às suas características e o tempo de resposta mediante a eventos de chuvosos, a vegetação semiárida acaba apresentando forte influência sobre os processos hidrológicos da região (FREITAS, 1994).

3.2. HIDROLOGIA DO AMBIENTE SEMIÁRIDO

Como já foi mencionado anteriormente, a região Semiárida brasileira caracteriza-se por apresentar uma grande variabilidade climática, sendo marcada por frequentes períodos de estiagem e secas, como também, pela má distribuição das chuvas durante o período chuvoso do ano (MOLLE, 1994).

Entre os principais fatores que determinam a variabilidade do clima na região, se acham a posição geográfica, o relevo, as características da superfície e os sistemas de atmosféricos atuantes. Segundo Assis (2012), existem ao menos seis sistemas atmosféricos que influenciam as precipitações de forma significativa no Nordeste brasileiro, sendo eles: a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT); as bandas de nebulosidade associada à frente frias; os distúrbios de leste; os ciclones na média e alta troposfera; os Vórtices Ciclônicos de Ar Superior (VCAS) e as brisas terrestres e marítimas.

Devido a essa grande variabilidade climática registrada na região Nordeste do Brasil, com forte influência sobre o Semiárido brasileiro, é fácil identificar a existência

de dois períodos bem característicos, um chuvoso e outro seco. Destaca-se que as mudanças no uso do solo estão diretamente dependentes e relacionadas à sazonalidade (ASSIS, 2012).

A representação da variabilidade climática, ou seja, sua sazonalidade, é necessário para uma correta avaliação dos impactos nos recursos naturais existentes, dentre os quais destacam-se os recursos hídricos e seu gerenciamento. Uma má representação desta sazonalidade compromete a avaliação dos impactos das mudanças climáticas sobre os recursos hídricos e a agricultura (RAMALHO; GUERRA, 2017).

As bacias da região semiárida brasileira apresentam solos com fragilidades tanto do ponto de vista físico quanto geoquímico (solos parcialmente salinos e carbonáticos) além de possuírem, em sua maior parte, subsolo de natureza cristalina. As dependências do sistema climático associado às características do solo e subsolo, faz com que os rios pertencentes ao Semiárido assumam comportamento intermitente, o que, notadamente, acarreta problemas na modelagem hidrológica (FREITAS, 1994) (MONTENEGRO; RAGAB, 2012).

Desta forma, os processos de intemperismo hídrico são retardados por meio dos longos períodos de estiagem. As taxas de evaporação são elevadas, representando uma perda significativa na disponibilidade hídrica da região. O déficit de precipitação, por sua vez, confere ao semiárido, solos secos durante grande parte do ano, principalmente em função da pouca profundidade proporcionada pelo afloramento da rocha cristalina (ARAÚJO, 2011).

Esta pouca profundidade dos solos no Semiárido favorece a redução da taxa de infiltração, o que exerce influencia significativa no regime de vazão na época chuvosa. Como a precipitação é a principal fonte de recarga dos recursos hídricos, espera-se que em um determinado período do ano a vazão dos rios encontre seus valores de pico, enquanto que em momentos de estiagem, a vazão chega a valores mínimos e, em muitos casos, esta é zerada, com registro da perda da sua vazão básica (MOLLE, 1994). Por conta deste cenário complexo e desafiador, a região Semiárida brasileira apresenta uma característica peculiar que deve ser levada em consideração no processo de modelagem para o desenvolvimento de uma simulação hidrológica mais realista possível.

3.3. MODELAGEM HIDROLÓGICA

Um modelo é a representação simplificada da realidade; trata-se de um processo no qual os princípios de uma ou mais teorias são aplicados para se reproduzir um

determinado fenômeno real. Para Tucci (2005), o modelo é a representação de algum tipo de objeto ou sistema, numa linguagem de fácil acesso e uso, com o objetivo de entendê-lo e buscar suas respostas para diferentes entradas.

Seja por meio de operações lógicas computacionais ou por meio de conjuntos de equações simultâneas, a modelagem é uma ferramenta utilizada para auxiliar no entendimento dos processos complexos do mundo real (WHEATER; SOROOSHIAN; SHARMA, 2007).

Com o passar do tempo, a modelagem foi adquirindo traços específicos e cada vez mais robustez, a ponto de se tornar uma ferramenta específica para aprimorar o conhecimento sobre aspectos ecohidrológicos das bacias hidrográficas, passando a ser considerada um instrumento metodológico da pesquisa científica (CHRISTOFOLETTI, 1999). No contexto de estudos ambientais, os modelos auxiliam no entendimento da dinâmica dos elementos, uso e ocupação do solo, bem como nas intervenções antrópicas existentes.

Sendo assim, por meio de técnicas de modelagem de sistemas ambientais, os modelos hidrológicos surgiram e passaram a proporcionar simulações de processos naturais de fluxo de água, sedimentos, nutrientes, produtos químicos e orgânicos microbiológicos em bacias hidrográficas, o que ajuda a compreender e representar o comportamento da bacia hidrográfica e prever condições diferentes das observadas (MONTE-MOR et al., 2012). Ainda segundo estes autores, os métodos de modelagem hidrológica vêm ao longo do tempo sendo amplamente utilizados para uma série de finalidades, tornando-se cada vez mais necessário associar algum tipo de modelagem hidrológica para entender, e propor soluções, frente a um problema relacionado a recursos hídricos ou de meio ambiente.

Segundo Tucci (2005) a estrutura atual dos modelos hidrológicos Chuva-Vazão é baseada nos seguintes elementos:

1) Discretização da bacia hidrográfica: os modelos empregam critérios de subdivisão espacial para representar a bacia. E podem ser:

- Concentrado: toda a bacia é representada por uma precipitação média e os processos hidrológicos por variáveis concentradas no espaço;
- Distribuído por sub-bacias: o modelo permite a subdivisão da bacia em sub-bacias, conforme a drenagem principal da mesma;
- Distribuído por módulos: realizada por formas geométricas sem relação direta com a forma da bacia, mas caracterizando internamente os componentes do

processo.

2) Variáveis de entrada, sendo as variáveis mais frequentemente utilizadas ligadas a precipitação e evapotranspiração.

- Precipitação: é a principal variável de entrada. Apresenta limitações quanto à falta de dados, tamanho das séries e densidade de postos. Uma das principais fontes de erro do uso destes modelos é a incerteza no registro das precipitações;
- Evapotranspiração: apesar de existirem poucos dados a respeito da evapotranspiração, é possível fazer uma estimativa da mesma através de informações climatológicas.

3) Estrutura básica da integração dos processos que integram a representação da parte do ciclo hidrológico estudado. Esta é separada em dois módulos:

- Bacia: o balanço vertical dos fluxos e o escoamento na sub-bacia são simulados;
- Canal: o escoamento em rios, canais definidos, propagando a vazão de montante e recebendo contribuição da bacia são simulados.

4) Aquisição dos dados físicos das bacias: diversidade de características naturais e do uso do solo deriva em grande quantidade de informações a serem acrescentadas para os modelos.

5) Determinação dos parâmetros: alguns parâmetros de modelo são estimados com base nas características físicas da bacia, os demais devem ser ajustados com base em observações das variáveis de entrada e de saída.

3.4. MODELOS PARA A ESTIMATIVA DO ESCOAMENTO SUPERFICIAL

Goldenfum e Tucci (1998) citam que a vazão máxima de escoamento superficial pode ser estimada com base no ajuste de uma distribuição estatística, na regionalização de vazões ou na precipitação. Quando se encontra disponível uma série de dados históricos representativos é possível ajustar uma distribuição estatística. Quando não existem dados, a série não é confiável ou pouco extensa, utiliza-se a regionalização de vazões ou precipitações, com base na série de dados dos postos próximos da região.

No entanto, a grande escassez de dados, sejam eles fluviométricos ou pluviométricos no Semiárido brasileiro, inviabiliza a regionalização de dados em diversas de regiões. Diante deste cenário, as vazões máximas de escoamento superficial podem ser

estimadas por meio de modelos que buscam representar os principais processos naturais existentes, com base em dados regionais de intensidade de precipitação, uso do solo, tipo de solo e diversos outros fatores que auxiliam na determinação da vazão na bacia desejada (GENOVEZ, 2003).

Nesta seção serão apresentados os cinco modelos hidrológicos a serem avaliados no presente trabalho, destacando suas principais características quanto a construção, disponibilidade para uso e dados de entrada disponíveis.

3.4.1. Método Racional

Introduzido por volta de 1889 pelo engenheiro irlandês Mulvaney, o Método Racional, foi o primeiro método a apresentar estruturas que vão além das experimentações e observações realizadas na Europa e Estados Unidos, como exemplo das fórmulas de Meyer, Creek, Cook, dentre outras (TOMAZ, 2013).

Embora seja uma metodologia bastante simples, poucos métodos alcançaram o mesmo nível de aceitação geral como o método Racional. A aplicação adequada do método pode conduzir a resultados satisfatórios tanto em áreas rurais como urbanas (DAEE, 1999).

Este método permite a determinação da vazão máxima de escoamento superficial a partir de dados de chuvas para pequenas bacias, partindo do princípio básico de que uma chuva de intensidade uniforme e constante será igual ao tempo de concentração (GENOVEZ, 1991).

Segundo Galbetti (2015), a equação do método é simples e exprime um estado permanente de transformação da chuva em vazão.

$$Q_p = 0,278 CIA \quad \text{Equação 01}$$

Sendo:

Q_p = Vazão de pico em m³/s;

C = Coeficiente de escoamento superficial (adimensional);

I = Intensidade da chuva em mm/min;

A = área da bacia de contribuição em km².

Segundo (DAEE, 1999), a aplicação do método depende dos seguintes dados e informações:

- Planimetria para determinação da área;
- Existência de uma relação de Intensidade-Duração-Frequência representativa do regime de chuvas intensas na área;

- Escolha de um escoamento superficial representativo das condições da bacia;
- Determinação do tempo de concentração, ou seja, o tempo de percurso da água desde o ponto mais distante até a seção de interesse. Após o tempo de concentração toda a bacia estará contribuindo para o escoamento, desde que a duração da chuva excedente seja, no mínimo, igual ao tempo de concentração.

Segundo Goldenfum e Tucci (1998), no Método Racional a complexidade real do processo de escoamento superficial é ignorada, desprezando tanto o armazenamento de água na bacia quanto às variações da intensidade de precipitação e do coeficiente de escoamento superficial durante a precipitação. Outra limitação do método é que ele não permite caracterizar o volume de cheias e a distribuição temporal das vazões, calculando a vazão de pico ou vazão máxima de escoamento superficial.

Segundo Pinto et al. (1976), a fórmula racional deve ser manejada com extrema cautela, pois envolve diversas simplificações. O método apresenta uma significativa imprecisão quanto maior for a área da bacia, devendo ser aplicado somente em pequenas bacias, ou seja, com área de drenagem inferior a 3 km² (300 ha) conforme proposto por Tucci, Porto e Barros (1995).

O coeficiente C, também conhecido como coeficiente de deflúvio ou coeficiente de “*run-off*”, é a relação entre a precipitação total e o volume escoado superficialmente. Segundo Genovez (1991), o método Racional utiliza o coeficiente C relacionando a intensidade da precipitação e a área para a obtenção do pico de cheia. Portanto, além da relação entre precipitação e escoamento, o coeficiente de deflúvio indica a relação entre a vazão máxima e a intensidade da precipitação.

O coeficiente de escoamento depende dentre diversos fatores, da intensidade, duração e distribuição da chuva, do tipo do solo, da utilização da terra, da rede superficial de drenagem existente, do efeito do armazenamento e da retenção superficial sobre a descarga (GENOVEZ, 1991).

Existe um grande número de equações, além da obtenção a partir de diversas tabelas disponíveis em literaturas especializadas. No presente trabalho apresentamos as tabelas originais do método descrito por Horn e Schwab (1963), apresentadas nas Tabela 01 e 02 a seguir. Nelas, o coeficiente C é função da cobertura do solo e de suas condições hidrológicas, intensidade de precipitação e o grupo hidrológico de solo. Quando a área de contribuição se apresentar de forma heterogênea, deve ser usado um valor médio ponderado em função do tamanho de cada sub-área.

Tabela 01 - Coeficiente de escoamento “C” para bacias agrícolas (Solo do grupo B)

Condições de cobertura e hidrologia	Coeficiente C para precipitações de:		
	25 mm/h	100 mm/h	200 mm/h
Cultura em linha, prática ruim	0,63	0,65	0,66
Cultura em linha, boa prática	0,47	0,56	0,62
Grãos pequenos, prática ruim	0,38	0,38	0,38
Grãos pequenos, boa prática	0,18	0,21	0,22
Prado, rotação, boa	0,29	0,36	0,39
Pasto, permanente, bom	0,02	0,17	0,23
Floresta, madura, boa	0,02	0,10	0,15

Fonte: (HORN; SCHWAB, 1963)

Tabela 02 - Fatores de conversão dos grupos hidrológicos de solo

Condições de cobertura e hidrologia	Fatores de conversão do coeficiente de escoamento C do grupo de solo B para:		
	Grupo A	Grupo C	Grupo D
	Cultura em linha, prática ruim	0,89	1,09
Cultura em linha, boa prática	0,86	1,09	1,14
Grãos pequenos, prática ruim	0,86	1,11	1,16
Grãos pequenos, boa prática	0,84	1,11	1,16
Prado, rotação, boa	0,81	1,13	1,18
Pasto, permanente, bom	0,64	1,21	1,31
Floresta, madura, boa	0,45	1,27	1,40

Fonte: (HORN; SCHWAB, 1963)

3.4.2. Método Racional Modificado

Na literatura, são apresentadas diversas propostas de modificações e ajustes ao Método Racional que visam diminuir os fatores que geram erro ou visam tornar este Método mais robusto, adicionando outras variáveis. Na tentativa de ampliar o uso do método para bacias maiores e corrigir a tendência de superestimativa da vazão, algumas propostas tentam corrigir empiricamente, adicionando os chamados coeficientes de retardo. A Equação 02 adotada pelo DAEE (2005) é um exemplo desse tipo de ajuste, onde sua aplicabilidade estende-se para bacias de até 100 km².

$$Q_p = 0,278 CIA\varphi \quad \text{Equação 02}$$

Sendo:

Q_p = Vazão de pico em m³/s;

C = Coeficiente de escoamento superficial (adimensional);

I = Intensidade da chuva em mm/min;

A = Área da bacia de contribuição em km²;

φ = Coeficiente de retardo, apresentado pela seguinte equação:

$$\varphi = \frac{1}{\sqrt[n]{100A}} \quad \text{Equação 03}$$

Onde:

$n = 4$ para declividades inferiores a 0,5%

$n = 5$ para declividades variando de 0,5 a 1,0%

$n = 6$ para declividades superiores a 1,0%

3.4.3. Método I Pai Wu

Este método constitui-se em um aprimoramento do Método Racional, porém com o acréscimo dos efeitos de distribuição espacial da chuva e a forma da bacia, podendo ser aplicado para bacias com áreas de drenagem de 2 km² até 200 km² (DAEE, 1999).

O DAEE (1999) complementa que, embora o método possua uma maior abrangência e apresente fatores importantes em sua análise, o mesmo apresenta limitações como a desconsideração das abstrações iniciais, não analisa a distribuição temporal, além de desconsiderar a umidade antecedente da bacia, assim como ocorre no Método Racional.

O método iniciou com uma proposta de analisar os dados observados em 21 pequenas bacias hidrográficas do estado de Indiana (USA) para obter as relações entre a forma dos hidrogramas e algumas características das bacias, apresentando boas previsibilidades, sendo rapidamente difundido e analisado sob as mais diversas condições (TOMAZ, 2013).

A seguinte equação é usada para obter a vazão de pico pelo Método I Pai Wu:

$$Q_p = 0,278 CIA^{0,9}K \quad \text{Equação 04}$$

Onde:

Q_p = Vazão de pico em m³/s;

C = Coeficiente de escoamento superficial (adimensional);

I = Intensidade da chuva em mm/min;

A = Área da bacia de contribuição em km²;

K = Coeficiente de distribuição espacial da chuva;

O cálculo do coeficiente C de escoamento superficial é dado por meio da seguinte equação:

$$C = \left(\frac{C_2}{C_1}\right) \cdot \left(\frac{2}{1+F}\right) \quad \text{Equação 05}$$

Sendo:

C_1 = Coeficiente forma da bacia

C_2 = Coeficiente volumétrico de escoamento;

F = Fator de forma da bacia.

Onde:

$$C_1 = \frac{4}{(2+F)} \quad e, \quad F = \frac{A}{E^2} \quad \text{Equação 06}$$

Estando “E” apresentado como o comprimento axial da bacia. Para a determinação do C_2 , considera-se a capacidade de geração de escoamento superficial, levando em consideração o uso e ocupação, as condições hidrológicas presentes, a intensidade de precipitação, bem como os grupos hidrológicos de solos presentes na bacia. Adotou-se, portanto, o coeficiente C descritos nas tabelas 01 e 02 para compor o C_2 .

Para encontrar o Coeficiente de distribuição espacial da chuva (K), é necessário a utilização do ábaco de distribuição espacial da chuva, conforme Figura 04 a seguir.

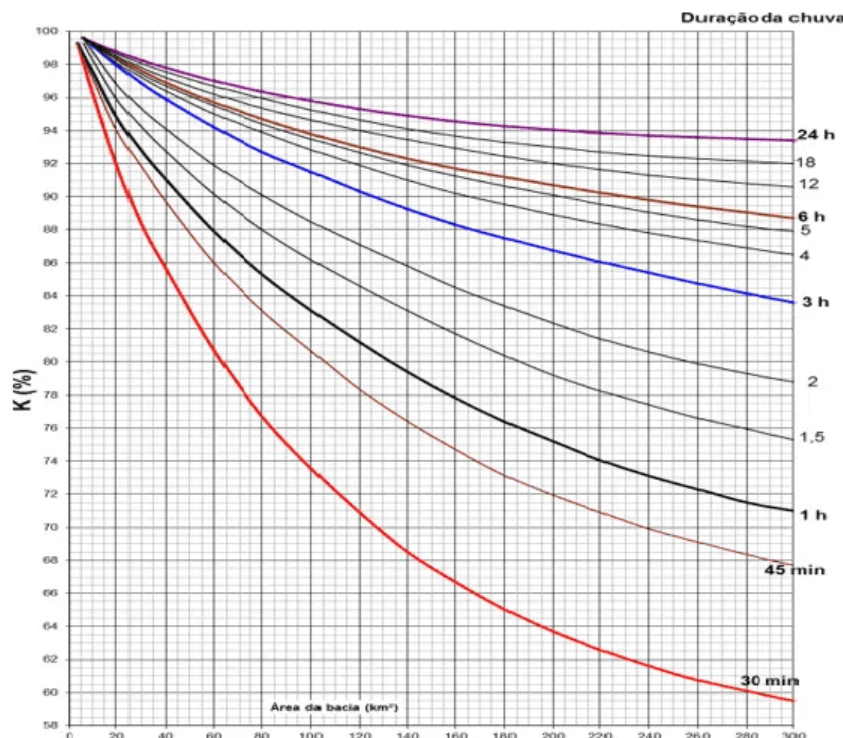


Figura 04 – Ábaco de distribuição espacial da chuva (K)

Fonte: Soil Conservation Service, (1972).

3.4.4. Método CN-NRCS

Este método foi criado nos Estados Unidos em 1954 pelo *Natural Resources Conservation Service (NRCS)*, sendo desenvolvido para calcular o escoamento superficial a partir de dados de precipitação e outros parâmetros da bacia. Segundo (SILVA et al., 2006), o método da Curva Número possui como parâmetros principais em sua modelagem o potencial máximo de retenção da água pelo solo e a abstração inicial.

A precipitação é convertida em abstrações iniciais até o tempo de ocorrência das mesmas. As abstrações iniciais correspondem a toda precipitação que ocorre antes do início do escoamento superficial, incluindo as interceptações e o armazenamento além da infiltração ocorrida durante o processo (NASCIMENTO, 2015; SILVA et al., 2006).

O método propõe uma equação empírica para o cálculo dos volumes de escoamento superficial, em função de um valor igualmente empírico, chamado de CN. O modelo pressupõe que a bacia hidrográfica tem uma dada capacidade de retenção de água, considerando todas as abstrações presentes na bacia. Ao mesmo tempo, é possível a determinação do valor de infiltração total (GALBETTI, 2015).

Diversas tabelas especializadas estão disponíveis para a determinação do valor da Curva Número, conforme apresenta-se nas Tabelas 03, 04 e 05 a seguir, que foram disponibilizadas pelo *Natural Resources Conservation Service (NRCS, 1972)* relacionando o valor de CN de acordo com o uso do solo, suas práticas de manejo e as condições hidrológicas presentes para cada tipo de unidade antecedente (condições I, II e III).

Tabela 03 – Descrição das diferentes condições de unidade antecedente.

Condições	Descrição Geral	Precipitação anterior de 5 dias (mm)	
		Estação dormente	Estação de crescimento
I	Condições ótimas do solo deste o limite inferior de plástico até o ponto de murcha	< 13	<36
II	Valor médio para inundações anuais	13 - 28	36 – 53
III	chuvas fortes ou chuvas leves e baixas temperaturas nos 5 dias anteriores à tempestade	>28	>53

Fonte: (NRCS, 1972).

Tabela 04 – Valores de Curva Numero para solos hidrológicos na condição II

Uso da Terra	Tratamento os prática	Condição Hidrológica	Grupo Hidrológico dos Solos			
			A	B	C	D
Pousio	Linha reta	-	77	86	91	94
Cultura em linha	Linha reta	Pobre	72	81	88	91
	Linha reta	boa	67	78	85	89
	Em curvas	Pobre	70	79	84	88
	Em curvas	boa	65	75	82	86
	Terraços	Pobre	66	74	80	82
	Terraços	boa	62	71	78	81
Pequenos Grãos	Linha reta	Pobre	65	76	84	88
	Linha reta	boa	63	75	83	87
	Em curvas	Pobre	63	74	82	85
	Em curvas	boa	61	73	81	84
	Terraços	Pobre	61	72	79	82
	Terraços	boa	59	70	78	81
Leguminosas e similares ou prado de rotação	Linha reta	Pobre	66	77	85	89
	Linha reta	boa	58	72	81	83
	Em curvas	Pobre	64	75	83	85
	Em curvas	boa	55	69	78	83
	Terraços	Pobre	63	73	80	83
	Terraços	boa	51	67	76	80
Pasto ou faixa		Pobre	68	79	86	89
		Justo	49	69	79	84
		Boa	39	61	74	80
	Em curvas	Pobre	47	67	81	88
	Em curvas	Justo	25	59	75	83
	Em curvas	Boa	6	35	70	79
Prado (Permanente)		Boa	30	58	71	78
Bosques (lotes de fazendas de bosques)	-	Pobre	45	66	77	83
	-	Justo	36	60	73	79
	-	Boa	25	55	70	77
Fazendas	-	-	59	74	82	86
Estradas e passagens (Superfícies difíceis)	-	-	74	84	90	92

Fonte: (NRCS, 1972).

Tabela 05 – Conversão das condições de Unidade antecedente com a curva número.

Curva Número da Condição II	Fator de conversão da Curva Número para a condição II	
	Condição I	Condição III
10	0,40	2,22
20	0,45	1,85

30	0,50	1,67
40	0,55	1,50
50	0,62	1,40
60	0,67	1,30
70	0,73	1,21
80	0,79	1,14
90	0,87	1,07
100	1,00	1,00

Fonte: (NRCS, 1972).

O valor da abstração inicial (I_a) representa todas as perdas antes do *runoff*. O valor de $I_a = 0,2 S$, sendo S o potencial máximo de retenção após começar o *runoff*. O valor de S está em função da Curva Número CN, logo:

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad \text{Equação 07}$$

O valor da chuva excedente ou *Runoff* ou escoamento superficial Q é dado por:

$$Q = \frac{(P - 0,2S)^2}{(P + 0,8S)} \quad \text{Equação 08}$$

3.4.5. Método TR - 55

Publicado em junho de 1986, através do *Natural Resources Conservation Service* (NRCS, 1986), do Departamento de Agricultura nos Estados Unidos, o *Technical Release 55*, ou seja, TR-55 destina-se a pequenas bacias urbanas, podendo ser aplicado em qualquer outra bacia em que certas limitações sejam atendidas.

Apresentando uma metodologia própria para determinar o pico de descarga e volume de detenção, o método não apresenta o hidrograma completo e pode ser facilmente usado em várias bacias.

O Método TR-55 resulta em uma análise de vazão de pico na forma de:

$$Q_p = Q_u A Q F_p \quad \text{Equação 09}$$

Sendo:

Q_p = Vazão de pico em m³/s

Q_u = Pico de descarga unitário em m³/s/cm/km²,

A = área de drenagem em km²,

Q = centímetros de lamina para uma chuva de 24 horas, e

F_p = Fator de ponderação ou ajustamento.

Tabela 06 – Fator de ajustamento em função da porcentagem de água de chuva retida em poças d'água ou em brejos

Porcentagem retida de água de chuva (%)	F_p
0	1,00
0,2	0,97
1,0	0,87
3,0	0,75
5,0*	0,72

Fonte: (CHIN, 2000).

(*) Se a porcentagem for maior que 5%, considerações especiais devem ser tomadas para se achar a chuva excedente

O pico de descarga unitário Q_u é fornecido pela equação 10 em função do tempo de concentração (t_c) em horas.

$$\log(Q_u) = C_0 + C_1 \cdot \log t_c + C_2 \cdot (\log t_c)^2 - 2,366 \quad \text{Equação 10}$$

Sendo:

C_0 , C_1 e C_2 obtidos da Tabela 07

TC = Tempo de concentração (h), sendo que $0,1 \text{ h} \leq TC \leq 10 \text{ h}$

Tabela 07 – Valores de C_0 , C_1 e C_2 obtidos em função do tipo de chuva e da relação

I_a/P

Tipos de chuva conforme SCS (Estados Unidos)	I_a/P	C_0	C_1	C_2
I	0,10	2,30550	-0,51429	-0,11750
	0,20	2,23537	-0,50387	-0,08929
	0,25	2,18219	-0,48488	-0,06589
	0,30	2,10624	-0,45695	-0,02835
	0,35	2,00303	-0,40769	0,01983
	0,40	0,87733	-0,32274	0,05754
	0,45	1,76312	-0,15644	0,00453
	0,50	1,67889	-0,06930	0,0

IA	0,10	2,03250	-0,31583	-0,13748
	0,20	1,91978	-0,28215	-0,07020
	0,25	1,83842	-0,25543	-0,02597
	0,30	1,72657	-0,19826	0,02633
	0,50	1,63417	-0,09100	0,0
II	0,10	2,55323	-0,61512	-0,16403
	0,30	2,46532	-0,62257	-0,11657
	0,35	2,41896	-0,61594	-0,08820
	0,40	2,36409	-0,59857	-0,05621
	0,45	2,29238	-0,57005	-0,02281
	0,50	2,20282	-0,51599	-0,01259
III	0,10	2,47317	-0,51848	-0,17083
	0,30	2,39628	-0,51202	-0,13245
	0,35	2,35477	-0,49735	-0,11985
	0,40	2,30726	-0,46541	-0,11094
	0,45	2,24876	-0,41314	-0,11508
	0,50	2,17772	-0,36803	-0,09525

Fonte: Chin, 2000.

O valor da abstração inicial (I_a) e posteriormente o valor da chuva excedente (Q) são obtidos por meio do método da Curva Número.

O TR-55 (1986) diz que, para valores de I_a/P menores que 0,10 e maiores que 0,50, temos uma redução na precisão da vazão de pico que será obtida. Aconselhando ainda que, para a aplicação do método o valor de CN deverá ser maior que 40 e que a bacia deve ser homogênea, isto é, que o uso do solo e a cobertura seja uniformemente distribuída na bacia.

Chin (2000), sugere que as variações do coeficiente CN na bacia devem ser de $\pm 5\%$ (cinco por cento). Os autores do TR-55 (1986) recomendam ainda que quando for aplicado o método gráfico estimativo de pico, as vazões devem ser calculadas antes e depois do desenvolvimento, usando os mesmos procedimentos para estimativa do tempo de concentração (TC), aconselhando ainda o uso de outro método caso se queira a hidrógrafa, ou seja, a representação gráfica da vazão que passa por uma seção, ou ponto de controle, em função do tempo.

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A Bacia Hidrográfica do Rio Pajeú encontra-se inserida na região do Nordeste do Brasil, caracterizando-se por ser a maior Bacia do estado de Pernambuco, situada geograficamente entre as latitudes 9°27' e 11°30' Sul e entre as longitudes 40°22' e 41°30' oeste (Figura 05), ocupando uma área de 16.685 km², aproximadamente 16,97% do território estadual (PERNAMBUCO, 2019).

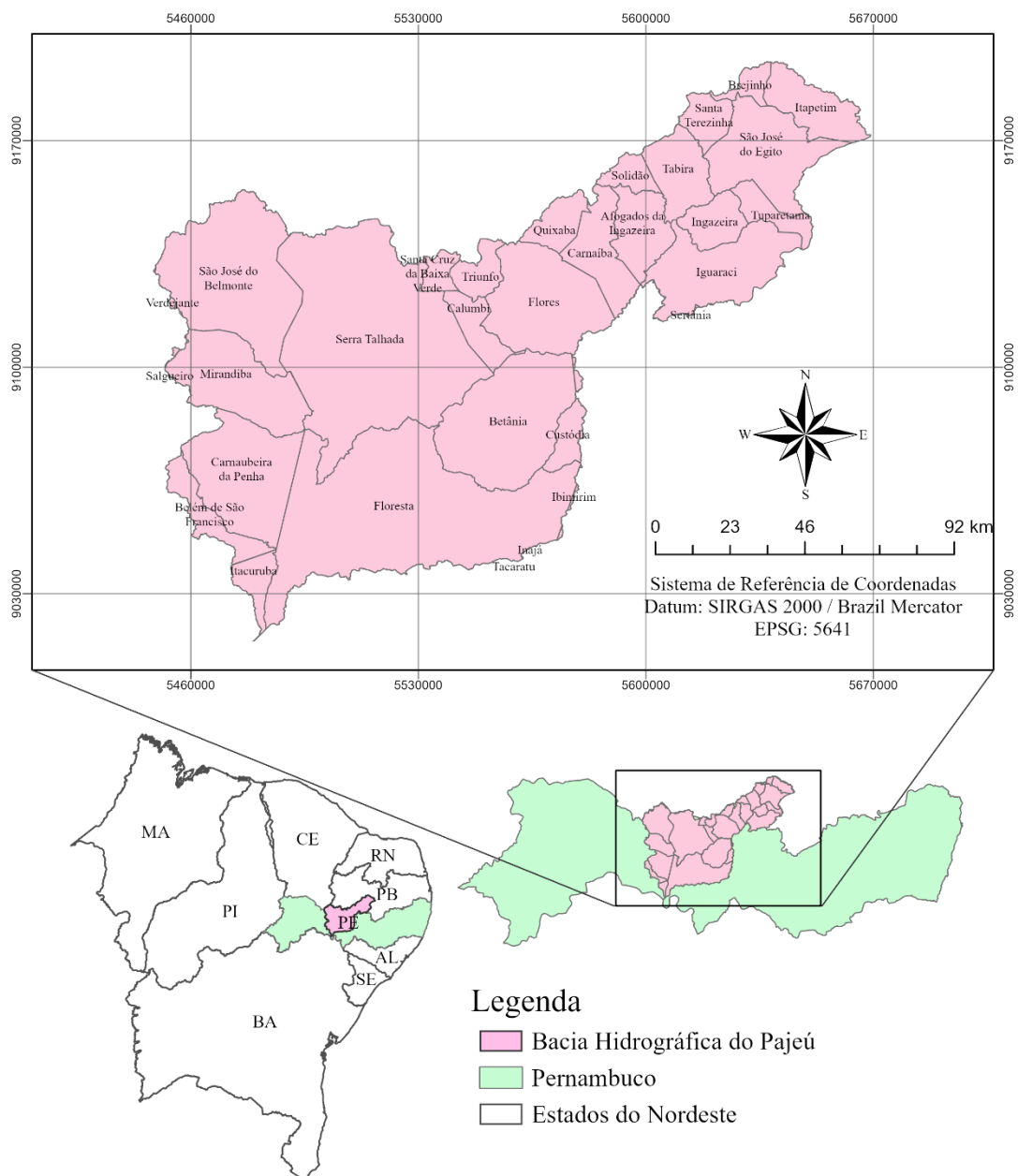


Figura 05 – Mapa de localização da Bacia Hidrográfica do rio Pajeú.

Fonte: Autor, 2023.

Segundo a Agência Pernambucana de Águas e Clima (APAC, 2013), os municípios que se encontram totalmente inseridos na bacia do rio Pajeú são: Afogados da Ingazeira, Betânia, Brejinho, Calumbi, Flores, Ingazeira, Itapetim, Quixabá, Santa Cruz da Baixa Verde, Santa Terezinha, São José do Egito, Serra Talhada, Solidão, Tabira, Triunfo e Tuparetama. Já os municípios de Belém do São Francisco, Custódia, Ibimirim e Salgueiro têm apenas parte de seus territórios inseridos na bacia.

Ainda segundo a APAC (2013), sete municípios possuem suas sedes inseridas na bacia (Carnaíba, Carnaubeira da Penha, Floresta, Igaraci, Itacuruba, Mirandiba e São José do Belmonte) o que totaliza 27 municípios contando com uma população em torno de 630 mil habitantes.

O Rio Pajeú é o rio que nomeia a bacia, sendo o principal curso de água da mesma (Figura 06). Seus afluentes principais são: A) margem direita, os riachos Tigre, Barreira, Brejo, São Cristóvão e Belém; e, B) margem esquerda, os riachos do Cedro, Quixabá, São Domingos, Poço Negro e do Navio (APAC, 2013).

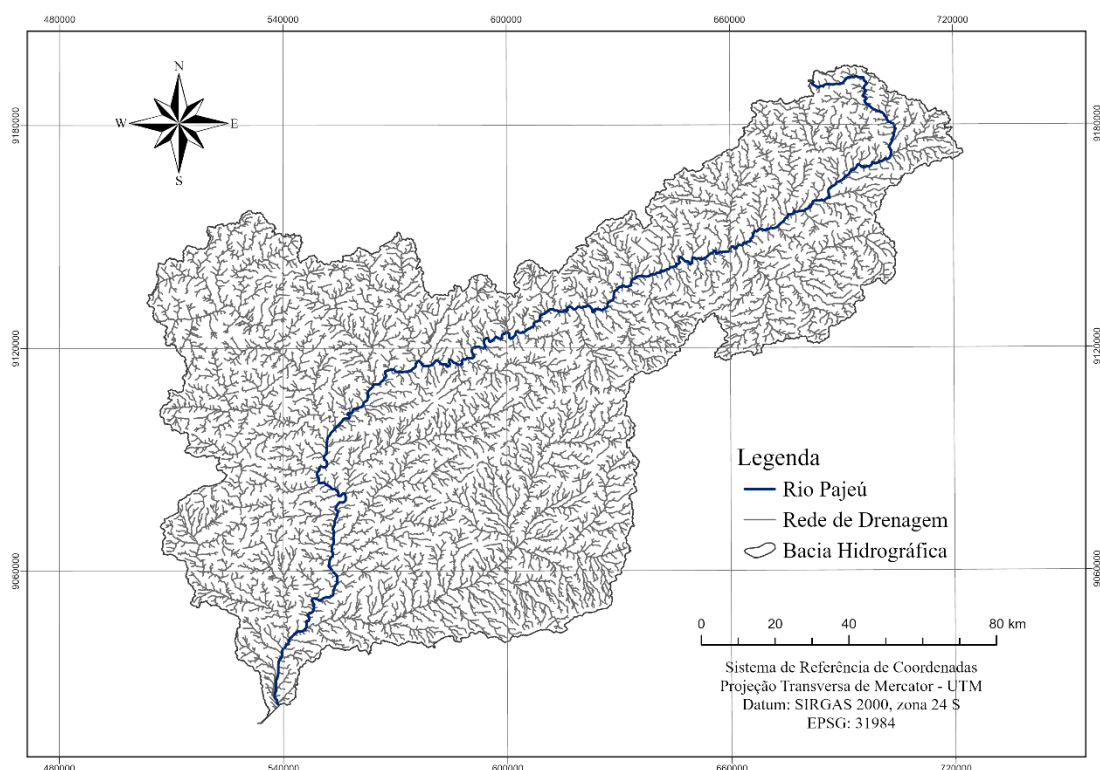


Figura 06 – Mapa de hidrografia da bacia hidrográfica do Pajeú.

Fonte: Autor, 2023.

Segundo o que preconiza Christofolletti (1980), a Bacia do Pajeú apresenta um padrão exorreico de escoamento e uma geometria de drenagem dentrítica, com o Rio Pajeú percorrendo uma extensão de 353 km, nascendo no município de Brejinho,

especificamente na Serra da Balança, em níveis hipsométricos de 800 metros, seguindo inicialmente no sentido nordeste-sudoeste, e em seguida apontando para o sul, indo desaguar no Rio São Francisco, na região do Lago de Itaparica, no município de Itacuruba (APAC, 2013; RIBEIRO, 2016).

Constituindo a Unidade de Planejamento Hídrico 9 (UPH-9), de acordo com o Plano Estadual de Recursos Hídricos de Pernambuco, a bacia do Pajeú apresenta regime fluvial intermitente característico de ambiente semiárido. A mesma limita-se ao norte com os estados do Ceará e Paraíba, ao sul com o grupo de bacias de pequenos rios interiores 3-GI3 (UP22) e a bacia do rio Moxotó (UP8), a leste com a bacia do rio Moxotó e o Estado da Paraíba, e a oeste com a bacia do rio Terra Nova (UP10) e o grupo de bacias de pequenos rios interiores 4-GI4 (UP23) (PERNAMBUCO, 2019).

O clima da região da bacia hidrográfica do Pajeú, baseado na classificação de Köppen é predominantemente semiárido do tipo Bw "h", sua parte norte apresenta temperatura média do ar de 20°C e precipitação média de 1207 mm/ano, enquanto que a porção sul da bacia apresenta temperatura de 26,2°C e 467 mm/ano, com uma altitude média variando de 900 metros a 350 metros, consecutivamente (SOARES; NOBREGA; GALVÍNCIO, 2018). A determinação do período chuvoso entre os meses de janeiro e abril, se dá principalmente por conta do deslocamento anual da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), principal sistema atmosférico atuante na área. (FEITOSA; SANTOS; ARAÚJO, 2011).

A principal formação de cobertura vegetal na bacia do rio Pajeú é a Caatinga Hiperxerófila, típica de regiões mais secas do Semiárido brasileiro. Características como a hierarquia topográfica, o relevo, o embasamento geológico, o solo e a umidade influenciam tal formação vegetal, apresentando três tipos fisionômicos distintos: arbórea, arbóreo-arbustiva e arbustiva (FEITOSA, 2012). Ainda segundo este autor, esta bacia apresenta grande diversidade de solos, devido a heterogeneidade do material geológico de sua formação, além de variações consideráveis de fertilidade e profundidade do solo, uma vez que tanto os fatores pedogenéticos quanto o intemperismo são processos lentos influenciados pelo relevo e clima local.

A área da bacia do rio Pajeú apresenta a distribuição das unidades de solos basicamente sob dois domínios morfoestruturais, estando o primeiro relacionado às áreas mais elevadas de domínio do Planalto da Borborema, e o segundo, às áreas rebaixadas e aplainadas da Depressão Sertaneja (EMBRAPA, 2006; RIBEIRO, 2016).

As áreas sob o domínio do Planalto da Borborema apresentam uma formação significativa de Neossolos Litólicos, pouco evoluídos, com baixa capacidade de retenção

hídrica e fertilidade natural muito variada; em sua área de abrangência também são encontrados os Argissolos Vermelho–amarelos com boa profundidade e de fertilidade natural variada; além de pequenas porções de Cambissolos pouco evoluídos. Já no domínio da depressão Sertaneja, em áreas mais planas e mais rebaixadas, ocorrem a formação de Luvisolos, que são solos rasos com elevado teor de argila e de alta fertilidade; os Planossolos, com fertilidade natural variável, além dos Argissolos Vermelhos, que vão de rasos até muito profundos e fertilidade natural variável (EMBRAPA, 2006).

As áreas investigadas na presente pesquisa localizam-se na região do Alto e Médio Pajeú, onde foram selecionadas três sub-bacias de proporções distintas entre si, nas quais aplicou-se as metodologias, segundo descrito no item 3.4 do presente documento, sendo elas: a) a sub-bacia do riacho Cachoeira (FILHO et al., 2019), localizada no município de Tabira, região do Alto Pajeú, considerada como uma bacia de porte mediano; b) a sub-bacia do riacho Exu, localizada na Região do Médio Pajeú no município de Serra Talhada, considerada uma bacia de grande porte (CANTALICE et al., 2013) e, c) a micro-bacia do riacho Jacu (CANTALICE et al., 2015), bacia de pequeno porte também localizada no município de Serra Talhada no Médio Pajeú. A Figura 07 apresenta o mapa de localização indicando as sub-bacias selecionadas para o estudo.

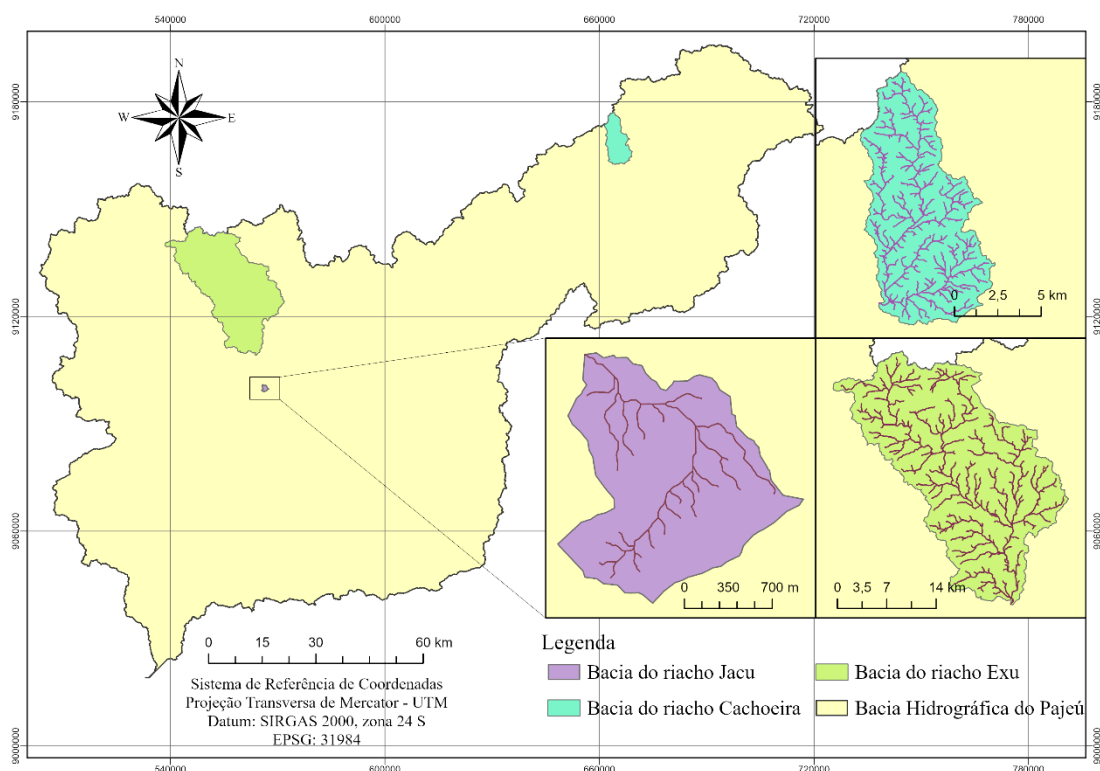


Figura 07 – Mapa de localização das sub-bacias analisadas.

Fonte: Autor, 2023.

Estas bacias foram selecionadas por apresentarem distintas proporções geométricas entre si e por contarem com um banco de dados hidrológicos e sedimentológicos que permitiu a aplicação e avaliação dos métodos hidrológicos propostos na presente metodologia.

4.2. DEFINIÇÃO DA BASE DE DADOS

Para o bom desenvolvimento de modelos hidrológicos, torna-se crucial a composição de uma base de dados de entrada sólida, que permita com que a modelagem ocorra da maneira mais ajustada possível da realidade apresentada em campo.

Os dados de entrada utilizados no presente estudo foram separados em: a) dados morfométricos da microbacia; b) dados de uso e cobertura vegetal; e, c) dados de agrupamentos de solo. Cada um desses dados de entrada fornece diversos parâmetros que montam a base para o desenvolvimento dos modelos hidrológicos analisados.

É importante enfatizar que as características físicas de uma bacia, sejam elas relacionadas à sua geometria, hidrologia ou relevo, constituem elementos de grande importância para avaliação de seu comportamento hidrológico (VILLELA; MATTOS, 1975). Sendo assim, os parâmetros morfométricos das bacias apresentam-se como importantes indicadores dos regimes de escoamento superficiais existentes, apresentando sua relevância em estudos hidrológicos por possibilitar a comparabilidade entre bacias, além de relacionar seus aspectos morfológicos a dinâmica hidrológica existente.

No presente estudo, os parâmetros morfométricos avaliados foram divididos em características geométricas, do relevo e da rede de drenagem para uma melhor compreensão. Na caracterização geométrica foram avaliados parâmetros que indicassem o formato das bacias bem como suas proporcionalidades, avaliando indicadores como: Área de Drenagem (A), Perímetro da bacia (P), Comprimento Axial (E), Coeficiente de Compacidade (Kc), Fator de Forma (F) e Índice de Circularidade (IC).

As características de drenagem relacionadas a morfometria da bacia, foram analisadas a partir do Comprimento Total de Drenagem (Lt), Comprimento do Canal Principal (Lp), Densidade de Drenagem (Dd), ordem dos cursos d'água e do Índice de Sinuosidade (Is).

Já as características do relevo das bacias foram avaliadas por meio da Variação Altimétrica (ΔH), da declividade do canal principal por meio de três métodos distintos (S1, S2 e S3), além da declividade média das bacias.

Na Tabela 08 estão apresentadas as equações utilizadas no cálculo, bem como os parâmetros morfométricos considerados no estudo.

Tabela 08 – Parâmetros Morfométricos utilizados e suas respectivas identificações.

	Parâmetros Morfométricos	Equação/Identificação	Unidade
Características Geométricas	Área de Drenagem	A	km ²
	Perímetro da bacia	P	km
	Comprimento Axial	E	km
	Coefficiente de Compacidade	$K_C = 0,28 * P / \sqrt{A}$	-
	Fator de Forma	$F = A / E^2$	-
	Índice de Circularidade	$IC = \frac{12,57 * A}{P^2}$	-
Características de Drenagem	Comprimento Total de Drenagem	L_t	km
	Comprimento do Canal Principal	L_p	km
	Densidade de Drenagem	$Dd = L_t / A$	km/km ²
	Ordem dos cursos d'água	-	-
	Índice de sinuosidade	$I_s = L_p / L_v$	-
Características do Relevo	Variação Altimétrica	ΔH	m
	Método Direto	$S1 = \Delta H / L_p$	m/m
	Declividade do Álveo	$S2 = \frac{2 * \sum A_{tt}}{L_p^2}$	
Média Harmônica	$S3 = \left[\frac{L_p}{\sum_{i=1}^n \frac{L_i}{\sqrt{I_i}}} \right]^2$		

Fonte: Autor, 2023.

Onde o L_v é o comprimento vetorial dos extremos do canal principal; A_{tt} é a área abaixo da curva do perfil topográfico; I_i é a declividade de cada trecho i e o L_i é o comprimento horizontal de cada trecho i .

Vale ressaltar que para a extração dos dados morfométricos, sejam eles geométricos, hidrológicos ou de relevo, foram utilizados Modelos Digitais de Elevação (MDE) obtido pelo satélite ALOS (*Advanced Land Observing Satellite*), lançado em janeiro de 2006 pela JAXA (*Japan Aerospace Exploration Agency*), sendo o sensor de micro-ondas PALSAR (*Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar*), responsável pela obtenção das imagens, a qual apresenta-se com resolução espacial de 12,5 metros (compatível com a escala 1:62.500). Os dados são de livre acesso e são distribuídos pela *ASF data search vertex* administrado pela *National Aeronautics and*

Space Administration – NASA. Abaixo são listadas as imagens necessárias e utilizadas para a identificação das características morfométricas das bacias.

Tabela 09 - Lista de imagens MDE utilizadas por bacia.

Bacias Analisadas	Identificação das imagens
Bacia do Riacho Exu	AP_27262_FBS_F7020_RT1.dem.tif AP_27262_FBS_F7030_RT1.dem.tif
Bacia do Riacho Cachoeira	AP_26766_FBS_F7030_RT1.dem.tif
Bacia do Riacho Jacu	AP_27262_FBS_F7020_RT1.dem.tif

Fonte: Autor, 2023.

A identificação do uso e da cobertura vegetal de bacias hidrográficas é primordial para toda e qualquer modelagem hidrológica, tendo em vista a complexa dinâmica que o uso e cobertura vegetal tem como os processos hidrológicos. Havendo uma modificação dessa interação, todo um regime hidrológico também é modificado (ANDRADE et al., 2017).

No presente estudo a análise de Uso e Cobertura Vegetal foi processada a partir classificação supervisionada por meio da fotointerpretação automática (processamento digital) posteriormente validado pela fotointerpretação convencional (vetorização dos alvos de interesse). As imagens foram obtidas do satélite CBERS 04A (*China-Brazil Earth Resources Satellite*) por meio de sua Câmera Multiespectral e Pancromática de Alta Varredura (WPM) que apresenta uma resolução espacial na banda pancromática de 2 metro e nas multiespectrais de 8 metros. Com o intuito de obter a melhor resolução espacial possível, foi realizada a fusão das imagens por meio da ferramenta pansharpening, obtendo dessa forma imagens multiespectrais com resolução de 2 metros. Abaixo são listadas as imagens necessárias e utilizadas para a elaboração do uso e cobertura vegetal por bacia.

Tabela 10 – Lista de imagens multiespectrais utilizadas por bacia.

Bacias Analisadas	Identificação das imagens
Bacia do Riacho Exu	CBERS_4A_WPM_20201003_196_123_L4_DN CBERS_4A_WPM_20200828_197_123_L4_DN
Bacia do Riacho Cachoeira	CBERS_4A_WPM_20210814_195_122_L4_DN
Bacia do Riacho Jacu	CBERS_4A_WPM_20210204_196_123_L4_DN

Fonte: Autor, 2023.

As imagens são de livre acesso e são distribuídos pela Divisão de Geração de Imagens do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (DGI/INPE). Tais imagens possibilitaram a identificação de áreas correspondentes a Solo Descoberto, Caatinga Arbustiva, Caatinga Arbórea e áreas de Agricultura/Pecuária; as classes foram selecionadas em função de duas importante características: a) por apresentarem distintas características quanto a geração de escoamento superficial; e b) por serem classes típicas e predominantes em um ambiente semiárido.

O processamento de todas as imagens de satélite utilizadas (Alos Palsar; Cbers 4A-WPN), a manipulação dos parâmetros escolhidos, bem como toda a integração dos mapas temáticos e cruzamento de informações, foram realizados por meio do software ArcGIS Pro 2.5.0 com a licença estudantil.

Para cada bacia analisada foi montada uma base de dados distinta, para a manipulação dos parâmetros de forma independente. Adotou-se neste trabalho a projeção UTM Sirgas 2000, zona 24S, EPSG: 31984.

Para a representação das classes de solos presentes nas bacias, foram tomados como base os dados obtidos pelo Zoneamento Agroecológico de Pernambuco (ZAPE, 2002), desenvolvido pela EMBRAPA em uma escala de 1:100.000; o ZAPE tem como objetivo subsidiar gestores e tomadores de decisão com informações sobre os recursos naturais do estado, possibilitando a elaboração de planejamentos e o aproveitamento das terras em bases sustentáveis.

Fator de elevada importância para a aplicação dos métodos de modelagem, a determinação dos Grupos Hidrológicos de Solos depende intimamente das interações entre o tipo de solo, uso do solo e do clima encontrado na bacia, e como essas interações influenciam na geração do escoamento superficial (RODRIGUES et al., 2013).

O tipo solo e as condições de uso associadas, são fatores decisivos na avaliação em relação a capacidade de geração de escoamento superficial. Fatores como a textura, capacidade de drenagem e hidromorfismo, são essenciais para a determinação do grupo hidrológico o qual cada agrupamento de solo pertence (GENOVEZ; NETO; SARTORI, 2005). Com base em tais fatores, os solos das bacias do riacho Exu, Cachoeira e Jacu, foram analisados com foco em seus atributos físico-hídricos de forma a possibilitar a devida classificação dos GHSs existentes.

Tais interações, resultam em distintas proporções entre escoamento superficial e infiltração, atribuídos a um GHS específico as características físicas e de escoamento semelhantes. A inclinação da superfície do solo não é considerada na atribuição dos GHSs.

A Tabela 11 apresenta os Grupos Hidrológicos de Solos com a sua descrição em relação aos tipos de solo e às condições de uso, divididos em quatro grupos hidrológicos de solo: A, B, C e D segundo a classificação apresentado pelo *United States Department of Agriculture Natural Resources Conservation Service* (NRCS/USDA, 1972).

Tabela 11 – Classificação dos GHSs segundo a classificação do NRCS/USDA.

GHSs	Descrição
A	Menor potencial de escoamento superficial. Inclui areias profundas com pouco silte e argila, também solos profundos e bastante permeáveis. A água é transmitida livremente através do solo.
B	Potencial de escoamento moderadamente baixo. Inclui solos arenosos menos profundos e/ou solos mais agregados que A. Mas o grupo como um todo tem infiltração acima da média após a saturação completa, apresentando uma transmissão de água através do solo desimpedida.
C	Potencial de escoamento moderadamente alto. Compreende solos rasos e solos contendo bastante silte e argila, porém menores que os do grupo D. O grupo apresenta infiltração abaixo da média após a saturação apresentando uma transmissão de água através do solo um tanto restrita.
D	Maior potencial de escoamento. Inclui principalmente solos com argilas expansivas, mas o grupo também inclui alguns solos rasos com horizontes quase impermeáveis perto da superfície (ruptura textural). O movimento da água através do solo é restrito ou muito restrito.

Fonte: (NRCS, 1972)

4.3. DETERMINAÇÃO DA SÉRIE DE DADOS HIDROLÓGICOS

4.3.1. Série Histórica

Para a devida comparação com os resultados obtidos por meio dos modelos hidrológicos, se faz necessário a utilização de valores de medições de vazões reais, obtidas para cada bacia hidrográfica de estudo. No entanto, devido a ausência de monitoramentos contínuos, tanto de precipitação, como de vazão nas bacias analisadas, situação bastante comum para a região, os dados de vazão real utilizados no presente trabalho foram obtidos através de campanhas de medições, realizadas pelo laboratório de Manejo e Conservação do Solo com períodos variados para cada bacia. Para a bacia do

riacho Exu as coletas ocorreram entre os anos de 2008 e 2009, para o riacho Cachoeira as campanhas ocorreram no ano de 2018, já para a bacia do riacho Jacu houve coletas entre os anos de 2007 a 2010.

As campanhas de medições de vazões para as bacias do riacho Exu, Cachoeira e Jacu são apresentadas nas tabelas 12, 13 e 14, respectivamente.

Tabela 12 – Medições de vazões obtidas para a bacia do riacho Exu – 2008 a 2009.

Ordem	Q (m ³ /s)	P _{ocorrência}	Ordem	Q (m ³ /s)	P _{ocorrência}
1	32,055	0,015873	32	0,295	0,507936
2	28,086	0,031746	33	0,239	0,523809
3	21,942	0,047619	34	0,230	0,539680
4	19,398	0,063492	35	0,212	0,555555
5	14,972	0,079365	36	0,211	0,571428
6	11,751	0,095238	37	0,194	0,587301
7	9,992	0,111111	38	0,192	0,603174
8	7,843	0,126984	39	0,186	0,619047
9	6,394	0,142857	40	0,179	0,634920
10	6,372	0,158730	41	0,178	0,650793
11	4,952	0,174603	42	0,176	0,666666
12	4,829	0,190476	43	0,164	0,682539
13	4,655	0,206349	44	0,157	0,698412
14	3,370	0,222222	45	0,149	0,714285
15	2,505	0,238095	46	0,144	0,730150
16	2,422	0,253968	47	0,139	0,746031
17	1,612	0,269841	48	0,137	0,761904
18	1,571	0,285714	49	0,136	0,777777
19	0,933	0,301587	50	0,124	0,793650
20	0,869	0,317460	51	0,116	0,809520
21	0,677	0,333333	52	0,112	0,825396
22	0,668	0,349206	53	0,107	0,841269
23	0,598	0,365079	54	0,106	0,857142
24	0,568	0,380952	55	0,105	0,873015
25	0,551	0,396825	56	0,099	0,888888
26	0,502	0,412698	57	0,096	0,904761
27	0,476	0,428571	58	0,087	0,920634

28	0,424	0,444444	59	0,085	0,936507
29	0,315	0,460317	60	0,077	0,952380
30	0,307	0,476190	61	0,070	0,968253
31	0,304	0,492063	62	0,053	0,984126

$P_{\text{ocorrência}}$ = Probabilidade de Ocorrência

Tabela 13 – Medições de vazões obtidas para a bacia do riacho Cachoeira – 2018.

Ordem	Q (m ³ /s)	$P_{\text{ocorrência}}$
1	0,388	0,0625
2	0,243	0,1250
3	0,272	0,1875
4	0,280	0,2500
5	0,257	0,3125
6	0,251	0,3750
7	0,185	0,4375
8	0,182	0,5000
9	0,115	0,5625
10	0,119	0,6250
11	0,125	0,6875
12	0,122	0,7500
13	0,318	0,8125
14	0,048	0,8750
15	0,051	0,9375

$P_{\text{ocorrência}}$ = Probabilidade de Ocorrência.

Tabela 14 – Medições de vazões obtidas para a bacia do riacho Jacu – 2007 a 2010.

Ordem	Q (m ³ /s)	$P_{\text{ocorrência}}$
1	0,345	0,058824
2	0,237	0,117647
3	0,215	0,176471
4	0,130	0,235294
5	0,124	0,294118
6	0,123	0,352941
7	0,117	0,411765

8	0,100	0,470588
9	0,090	0,529412
10	0,089	0,588235
11	0,086	0,647059
12	0,082	0,705882
13	0,071	0,764706
14	0,061	0,823529
15	0,046	0,882353
16	0,038	0,941176

$P_{\text{ocorrência}}$ = Probabilidade de Ocorrência.

4.3.2. Funções de Distribuições de Probabilidade (FDPs)

Para as séries de vazões obtidas em campo, foram testadas quatro Funções de Distribuições de Probabilidade (FDPs), sendo essas distribuições a Normal, Log Normal, Gumbel e Gama com o intuito de selecionar a distribuição de probabilidade que melhor represente os dados hidrológicos das bacias em estudo.

Segundo Silva et al. (2012), a função de utilizar modelos teóricos de distribuição de probabilidade, em estudos hidrológicos, é de fazer uma ponte entre as distribuições empíricas (amostra conhecida) e as distribuições populacionais (amostra completa/desejada), procurando manter as características das séries históricas e gerar extrapolação de uma população, ou seja, proporcionar a extensão, neste caso, de séries hidrológicas.

Abaixo são apresentadas as distribuições estatísticas utilizadas no presente estudo.

- Distribuição Normal

A mais importante e mais divulgada distribuição contínua, a distribuição Normal, adequa-se quando o número de variáveis aumenta indefinidamente, qualquer que seja a função de distribuição de cada uma das variáveis aleatórias. Por conta de tal característica de distribuição de dados, a distribuição Normal adapta-se bem a um grande número de variáveis hidrológicas, resultante da soma de um grande número de variáveis aleatórias (GUIMARÃES, 2011).

A distribuição Normal apresenta-se com uma variável aleatória “x”, contemplando a Função de Densidade de Probabilidade (FDP) como sendo:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad -\infty < x > +\infty \quad [11]$$

Simbolicamente, a distribuição Normal escreve-se, $N(\mu, \sigma)$, sendo os parâmetros μ e σ determinados por:

$$\mu = \bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad e \quad \sigma = + \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad [12]$$

- Distribuição Log-Normal

Segundo Guimarães (2011), trata-se de uma generalização da distribuição Normal, tornada assimétrica por uma mudança da variável “x” que é substituída por “y = ln x”. Se uma variável aleatória “y” tem distribuição normal, então a variável “x” assume a condição de Log-normal, e a sua função densidade passa a ser dada por:

$$f(x) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(y-\mu_y)^2}{2\sigma_y^2}} \quad x > 0 \quad [13]$$

Onde, μ_y e σ_y são, respectivamente a média e o desvio padrão da variável $y=\ln x$, dados por,

$$\mu_y = \bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n} \quad e \quad \sigma_y = s_y = + \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{n - 1}} \quad [14]$$

- Distribuição Assintótica de Extremos Tipo I – Gumbel

Mais conhecida por distribuição de Gumbel, recomendada em aplicações de eventos máximos, por exemplo, como a distribuição das precipitações máximas anuais, ou a distribuição das vazões de picos anuais (GUIMARÃES, 2011). Uma variável “x”, tem distribuição Gumbel, quando a FDP se apresenta como:

$$f(x) = \frac{1}{\alpha} e^{\left[-\frac{x-u}{\alpha} e^{-\left(\frac{x-u}{\alpha}\right)}\right]} \quad -\infty < x < +\infty \quad [7]$$

Onde os parâmetros α e u , podem ser determinados por,

$$\alpha = \frac{\sqrt{6}S_x}{\pi} \quad e \quad u = \bar{x} - 0,5772\alpha \quad [8]$$

- Distribuição Gama

A distribuição Gama é frequentemente aplicada na determinação de probabilidade de precipitação de vazões para duração de dias, semanas, meses e até anos (GUIMARÃES, 2011). Diz-se que uma variável aleatória “x”, tem distribuição Gama quando a FDP se apresenta como:

$$f(x) = \frac{\lambda^\beta x^{\beta-1} e^{-\lambda x}}{\Gamma(\beta)} \quad x, \beta, \lambda > 0 \quad [9]$$

Onde os parâmetros β e λ , são determinados por,

$$\beta = \frac{\bar{x}^2}{s_x^2} = \frac{1}{cv^2} \quad e \quad \lambda = \frac{\bar{x}}{s_x^2} \quad [10]$$

4.3.3. Validação das FDPs

A validação dos ajustes de distribuições estatísticas é feita por meio de testes de aderência que objetivam verificar a existência ou não de diferenças estatisticamente significativas entre os valores observados e as estatísticas estimadas.

No presente estudo, para avaliar a qualidade dos ajustes das distribuições de probabilidade, foram utilizados como teste de aderência o Coeficiente de Correlação de Pearson (r) e o teste Qui-Quadrado (χ^2), apresentados nas equações 14 e 15 respectivamente.

O Coeficiente de Correlação de Pearson (r) é uma medida adimensional que pode assumir valores entre o intervalo de -1 e 1. Tal coeficiente determina a intensidade e a direção das relações lineares (Equação 14). Quanto mais próximo aos extremos do intervalo, mais forte será a correlação entre as variáveis, enquanto que a proximidade da unidade nula indica uma fraca correlação linear. A correlação negativa ou esquerda ($r < 0$) representa correlações inversamente proporcionais, enquanto que a correlação positiva ou direita ($r > 0$) indica uma correlação proporcional entre as variáveis.

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{[\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2][\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2]}} \quad [11]$$

Empregou-se para o teste Qui-Quadrado (χ^2) um nível de 5% de significância levando como a hipótese H_0 a afirmação da distribuição obtida pela função densidade de probabilidade avaliada não sendo diferente da distribuição observada. O Teste Qui-Quadrado (χ^2) é um teste não-paramétrico e inferencial utilizado, basicamente, para três finalidades específicas:

- verificar as distribuições de probabilidade de cada categoria de uma variável em relação a um valor teórico esperado (aderência),
- verificar se as categorias de distribuição são as mesmas para diferentes subpopulações de interesse (homogeneidade) e
- verificar se duas variáveis são independentes (independência).

Apesar das diferentes finalidades de uma pesquisa, o sistema matemático é o mesmo. Abaixo é apresentado na equação 15 a descrição matemática do Teste Qui-Quadrado (χ^2).

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(O_i - E_i)^2}{E_i} \quad [15]$$

Onde a variável “O” é o valor observado; “E” é o valor esperado; e “i” refere-se ao intervalo amostral.

Os melhores resultados obtidos na análise de frequência, validados pelos testes anteriormente descritos, proporcionará a estimação ajustada de uma série de dados populacionais, que servirá como parâmetro comparativo para os resultados das modelagens hidrológicas.

4.4. MODELAGEM

Para as três sub-bacias analisadas, quais sejam, o Riacho Jacu, Exú e Cachoeira, foram aplicados os cinco modelos já descritos na presente metodologia: O Método Racional; Racional Modificado; I Pai Wu; Método CN e o Método TR-55, estando todos os modelos destrinchados no tópico 3.4 do presente trabalho.

O período de retorno utilizado para realização das modelagens considerou 10, 25, 50, 100 e 500 anos. A equação de chuva utilizada foi elaborada por SILVA et al. (2012) que desenvolveram a equação pelo método não linear, por meio de dados pluviométricos para o município de Serra Talhada, obtendo um coeficiente de correlação de 0,9970. A equação de chuva utilizada é descrita pela seguinte expressão:

$$i = \frac{998,140 \cdot Tr^{0,136}}{(t + 10,525)^{0,753}} \quad [16]$$

Foram utilizados quatro diferentes métodos de Tempo de Concentração (TC) para a realização das modelagens, sendo eles o TC de Hathaway, Kirpich, Dooge e George Ribeiro.

Tabela 15 – Formulações de Tempo de Concentração (TC) aplicados.

Fórmula	Equação	Nº
Kirpich (1940)	$tc = 0,0663 \cdot L^{0,77} \cdot S^{-0,385}$	[17]
Hathaway (1945)	$tc = 0,606 \cdot (L \cdot n)^{0,467} \cdot S^{-0,234}$	[18]
Dooge (1956)	$tc = 0,3649 \cdot A^{0,14} \cdot S^{-0,17}$	[19]
George Ribeiro (1961)	$tc = 0,222 \cdot (1,05 - 0,2p)^{-1} \cdot LS^{-0,04}$	[20]

Fonte: Autor, 2023.

Onde:

TC – Tempo de Concentração;

L – Comprimento do talvegue, em km;

S – Declividade da bacia, em m/m;

A – Área de drenagem da bacia hidrográfica, em km²;

p - Fração de área com mata, adimensional, varia entre 0 e 1;

n – Fator de rugosidade.

O fator de rugosidade, coeficiente que se assemelha ao coeficiente de Manning, deve apresentar um valor máximo de 0,8. Os valores recomendados desse coeficiente, para diversos tipos de uso do solo, encontram-se na Tabela 16.

Tabela 16 – Valores do fator de rugosidade *n* para o uso na Equação 18.

Tipo de Superfície	Valor de <i>n</i>
Superfície impermeável	0,02
Solo descoberto	0,1
Gramas, culturas em linhas ou solos moderadamente descobertos	0,2
Pastagem	0,4
Floresta decídua	0,6
Floresta conífera, ou floresta decídua com solos profundos	0,8

Fonte: (NRCS, 1972)

4.5. AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DOS MODELOS HIDROLÓGICOS

A validação e a verificação do desempenho dos modelos hidrológicos foram realizadas com base na aplicação da eficiência estatística a ser obtida pelo método Nash e Stoulliffe (1970), no Viés, no Erro Médio Percentual, e na Raiz do Erro Médio Quadrático.

O método de Nash e Sutcliffe (NS) é o método mais utilizado para avaliação da

eficiência de modelos hidrológicos, seus valores variam de infinito negativo até o valor máximo de 1, que representa a eficiência máxima. O índice de eficiência é obtido pela seguinte expressão:

$$NS = 1 - \frac{\sum(Q_{obs} - Q_{est})^2}{\sum(Q_{obs} - \overline{Q_{obs}})^2} \quad [17]$$

O Erro Percentual Médio (MPE) trata-se de uma medida relativa que essencialmente dimensiona o erro médio para ser apresentado em unidades percentuais, em vez das unidades da variável. A principal vantagem do MPE é que ele permite comparar variações entre dados de diferentes dimensões. O MPE é apresentado por meio da seguinte equação:

$$MPE = \frac{100\%}{n} \sum \frac{(Q_{obs} - Q_{est})}{Q_{obs}} \quad [18]$$

A Raiz do Erro Médio Quadrático (RMSE) avalia o erro por meio do quadrado das diferenças entre vazões estimadas e observadas. Essa estatística possui maior influência sobre erros de maior magnitude; um RMSE mínimo indica uma provável variação mínima dos dados, portanto, apresentando uma boa estimativa. O REQM é apresentado com o emprego da equação 19.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum (Q_{obs} - Q_{est})^2} \quad [19]$$

Como forma de padronização das variáveis utilizadas, toma-se Q_{obs} como a vazão observada (medidas em campo); Q_{est} a vazão estimada (modelos hidrológicos); e “n” o número total de dados.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. DADOS DE ENTRADA PARA ALIMENTAÇÃO DOS MODELOS

A seguir, apresenta-se a sistematização dos dados de entrada levantados e que são comuns para todos os modelos analisados.

5.1.1. Caracterização Morfométrica das Bacias

A Tabela 17 apresenta o levantamento e os respectivos valores encontrados referentes as características morfométricas de cada bacia, o que segundo Christofolletti (1969), permite um conhecimento prévio de suas características e posteriormente, o devido acoplamento de tais características aos modelos hidrológicos, a fim de se obter resultados que apresentem um máximo de aproximação com a realidade ou até mesmo serem fidedignos. Esta é uma etapa considerada crucial para dar início ao processo de modelagem hidrológica propriamente dito.

Tabela 17 – Parâmetros geométricos das bacias hidrográficas dos riachos do Exu, Cachoeira e Jacu.

Parâmetros Morfométricos	Unidades	Bacia Hidrográfica			
		Exú	Cachoeira	Jacu	
Características Geométricas	Área de drenagem (A)	Km ²	574,49	68,98	2,24
	Perímetro (P)	Km	166,93	48,37	6,93
	Comprimento Axial (E)	km	46,32	15,58	2,70
	Coefficiente de Compacidade (Kc)	-	1,95	1,63	1,3
	Fator de Forma (F)	-	0,27	0,28	0,03
	Índice de Circularidade (IC)	-	0,26	0,37	0,59

Fonte: Autor, 2023.

A análise da Tabela 17, permite notar grandes diferenças proporcionais nas bacias analisadas; do ponto de vista geométrico, são importantes parâmetros para a definição dos índices de forma das bacias, além de serem importantes dados de entrada na modelagem hidrológica.

Segundo Christofolletti (1969), o Coeficiente de Compacidade igual a unidade, indica uma bacia perfeitamente circular, quanto menor o Kc, mais circular será a bacia, menor será o tempo de concentração e maior será a tendência de haver picos de enchentes; dentre as bacias estudadas, apenas o Riacho Jacu apresentou um índice próximo a unidade

(Kc de 1,3), atestando seu formato mais circular em comparação as demais. Valores semelhantes de Kc foram obtidos por Piscoya (2012) para a mesma bacia do riacho Jacu.

Os elevados valores de Kc encontrados para as bacias do Exu e Cachoeira, denotam uma tendência à forma mais alongada conforme descrito anteriormente por Christofolletti (1969).

Estes valores encontram ressonância no Fator de forma (F), indicando a mesma tendência observada no índice anterior, com as bacias do Exu e Cachoeira apresentando valores próximos (0,27 e 0,28), respectivamente, diferenciando-se da bacia do riacho Jacu, já que o valor encontrado para esta variável foi de apenas 0,03 (Tabela 17), indicando, segundo Bernardi et al. (2013), uma maior tendência de concentração de escoamento, conseqüentemente maior possibilidade de enchentes em condições normais de eventos climáticos. O Índice de Circularidade cujos valores de 0,26, 0,37 e 0,59 para as bacias dos riachos Exu, Cachoeira e Jacu, respectivamente, corroboram com os resultados anteriores, indicando um formato mais circular da bacia do riacho Jacu em detrimento das demais bacias.

O índice sugere que bacias mais alongadas favoreçam um melhor escoamento superficial, pois os diferentes tempos de escoamento em suas respectivas áreas de contribuição, ameniza a influência da intensidade de chuva (GOLDENFUM; TUCCI, 1998).

A tabela 18 apresenta o compilado das características morfométricas de drenagem analisadas para cada bacia hidrográfica com seus respectivos valores encontrados.

Tabela 18 – Parâmetros morfométricos de drenagem das bacias hidrográficas dos riachos Exú, Cachoeira e Jacu.

Parâmetros Morfométricos		Unidades	Bacia Hidrográfica		
			Exú	Cachoeira	Jacu
Características da rede de drenagem	Comprimento total de drenagem (Lt)	Km	484,23	160,93	8,93
	Comprimento do canal principal (Lp)	Km	60,93	17,36	2,71
	Densidade de drenagem (Dd)	Km/Km ²	0,84	2,33	3,99
	Ordem dos cursos d'água	-	5	6	3
	Índice de sinuosidade (Is)	-	1,56	1,43	1,63

Fonte: Autor, 2023.

No que se refere as características relacionadas a rede de drenagem das bacias (Tabela 18), valores semelhantes foram encontrados por Santos (2013), Filho et al. (2019) e Piscoya (2012) para as bacias do riacho Exu, Cachoeira e Jacu, respectivamente; reforça-se que, dados constituem-se em importantes parâmetros de entrada para os modelos hidrológicos e seus valores são determinantes para o adequado entendimento da geração de escoamento superficial (PRUSKI; BRANDÃO; SILVA, 2004).

Segundo o que parametriza Villela e Mattos (1975), a Densidade de drenagem (Dd) pode variar de 0,5 km/km², para bacias com drenagem pobre, a 3,5 km/km² ou mais, para bacias excepcionalmente bem drenadas. Apresentando valores de 0,84, 2,33 e 3,99 km/km², respectivamente para as bacias do riacho Exu, Cachoeira e Jacu, constata-se que a bacia do riacho Exu apresenta uma densidade de drenagem relativamente pobre, enquanto as demais apresentam boa densidade de drenagem, chegando à bacia do Jacu a ser considerada uma bacia excepcionalmente bem drenada.

O Índice de Sinuosidade (Is) está diretamente relacionado com a capacidade de geração do escoamento e infiltração, bem como a capacidade de geração de sedimentos (capacidade erosiva), pois leva em consideração a velocidade de escoamento dos canais de drenagem da bacia (SANTOS et al., 2012). Segundo estes autores, os valores de Is próximo de 1 reflete a ocorrência de canais retilíneos, já os valores maiores que 2 representa a ocorrência de canais tortuosos, valores intermediários são chamados de transicionais. Os valores de Is explicitados na Tabela 18, apontam para uma condição transacional no canal de escoamento, evidenciando que as três bacias não possuem uma forma retilínea de escoamento, mas também não podem ser consideradas como sinuosas.

Em termos de características de relevo, a declividade, exerce grande influência nos processos hidrológicos em uma bacia, sobretudo na infiltração da água, geração de escoamento superficial e, conseqüentemente, no tempo de concentração, portanto, trata-se de um importante parâmetro para o manejo de bacias (VILLELA; MATTOS, 1975). Na Tabela 19 são apresentadas de forma compilada as características morfométricas do relevo após o apanhado e a análise realizada para cada bacia hidrográfica e seus respectivos valores encontrados.

Tabela 19 – Parâmetros morfométricos do relevo das bacias hidrográficas dos riachos do Exu, Cachoeira e Jacu.

Parâmetros Morfométricos		Unidades	Bacia Hidrográfica			
			Exu	Cachoeira	Jacu	
Características do relevo	Varição altimétrica (ΔH)	m	607	275	227	
	Declividade do canal principal (Álveo)	S1	m/m	0,00615	0,01379	0,02041
		S2		0,00323	0,01047	0,01795
		S3		0,00303	0,00621	0,01621

Fonte: Autor, 2023.

A declividade do canal principal foi calculada pelos três principais métodos, já detalhados na metodologia descrita no presente trabalho (Tabela 08), sendo o S3 o que melhor representa a declividade do rio, segundo Tucci; Porto e Barros (1995) por considerar o tempo de percurso da água ao longo de todo o perfil longitudinal. Portanto, optando-se pelos valores obtidos no modelo S3 como dados de entrada nas modelagens hidrológicas para cada uma das bacias estudadas no presente trabalho.

A bacia do Jacú, embora seja a menor bacia analisada, a mesma apresentou uma maior declividade ao longo do curso do rio; tal fator, associado a forma mais arredondada indicada pelos parâmetros geométricos apresentados anteriormente, sugerem como descrito por Feitosa; Santos e Araújo (2011), um menor tempo de concentração, evidenciando uma maior propensão a enchentes, quando comparado as demais bacias analisadas.

A partir da análise dos dados apresentados na Tabela 20, constata-se que todas as bacias, em função das declividades, encontram-se classificadas entre o relevo suave ondulado a ondulado, segundo a classificação da EMBRAPA (1979).

Destaca-se aqui a bacia do riacho Jacú que apresentou cerca de 42,83% de sua área inserida na classe ondulado (8 - 20%), o que pode indicar uma maior geração de fluxo de pico quando comparado as demais bacias.

Tabela 20 – Classificação e estratificação de declividade para as bacias do riacho Exu, Cachoeira de Jacu com base no que prescreve a EMBRAPA, 1979.

Classes (%)	Relevo	Exu (%)	Cachoeira (%)	Jacu (%)
0 – 3	Plano	13,13	11,46	7,55
3 – 8	Suave ondulado	39,21	39,73	27,89
8 – 20	Ondulado	32,26	38,64	42,83
20 – 45	Forte ondulado	12,18	9,85	16,14
45 – 75	Montanhoso	2,98	0,32	5,59
> 75	Escarpado	0,24	0	0

Fonte: Autor, 2023.

5.1.2. Uso e Cobertura Vegetal

Para esta análise, as classes de cobertura mapeadas a partir das imagens multiespectrais (Tabela 10) foram: Caatinga Arbórea; Caatinga Arbustiva; Solo Descoberto e Agricultura/Pecuária.

As características de Caatinga Arbórea compreendem áreas em estágios avançados de regeneração ou áreas de caatinga “preservada”. Na classificação sugerida por Paraíba (2004), essa classe teria semelhança com a caatinga tipo T3 (caatinga arbustiva arbórea fechada) e T4 (caatinga arbórea fechada). Nessa classe, as árvores são mais altas possuindo um estrato vertical mais homogêneo e adensado.

A classe Caatinga Arbustiva compreende vegetação de porte predominantemente arbustivo, podendo também, apresentar vegetação de porte arbóreo; no entanto, com a densidade das árvores menor, ou seja, vegetação arbórea espaçadas. Na classificação também sugerida por Paraíba (2004), a Caatinga arbustiva apresenta semelhanças com o tipo T2 (caatinga arbustivo arbórea aberta).

A classe de “Solo Descoberto” compreende áreas com afloramentos rochosos ou ausência de cobertura vegetal contínua (PARAÍBA, 2004). O uso do solo para a agricultura e pecuária foram agrupados em uma única classe, por apresentarem semelhanças espectrais principalmente em períodos secos, além de apresentarem valores próximos de coeficiente de escoamento em todos os modelos hidrológicos utilizados.

A Tabela 21 apresenta o compilado do uso e da cobertura vegetal para as bacias do riacho Exu, Cachoeira e Jacu. As Figuras 08, 09 e 10 apresentam a espacialização das características encontradas em cada bacia.

Tabela 21 – Tabela de Uso e Cobertura Vegetal de todas as bacias analisadas.

Uso e Cobertura Vegetal	Exu		Cachoeira		Jacu	
	(km ²)	(%)	(km ²)	(%)	(km ²)	(%)
Caatinga Arbórea	101,09	17,60	14,95	21,68	1,20	53,71
Caatinga Arbustiva	287,93	50,12	29,41	42,63	0,83	36,96
Solo Descoberto	10,39	1,81	1,63	2,37	-	-
Agricultura/Pecuária	175,08	30,47	22,99	33,32	0,21	9,33
Total	574,49	100,00	68,98	100,00	2,24	100,00

Fonte: Autor, 2023.

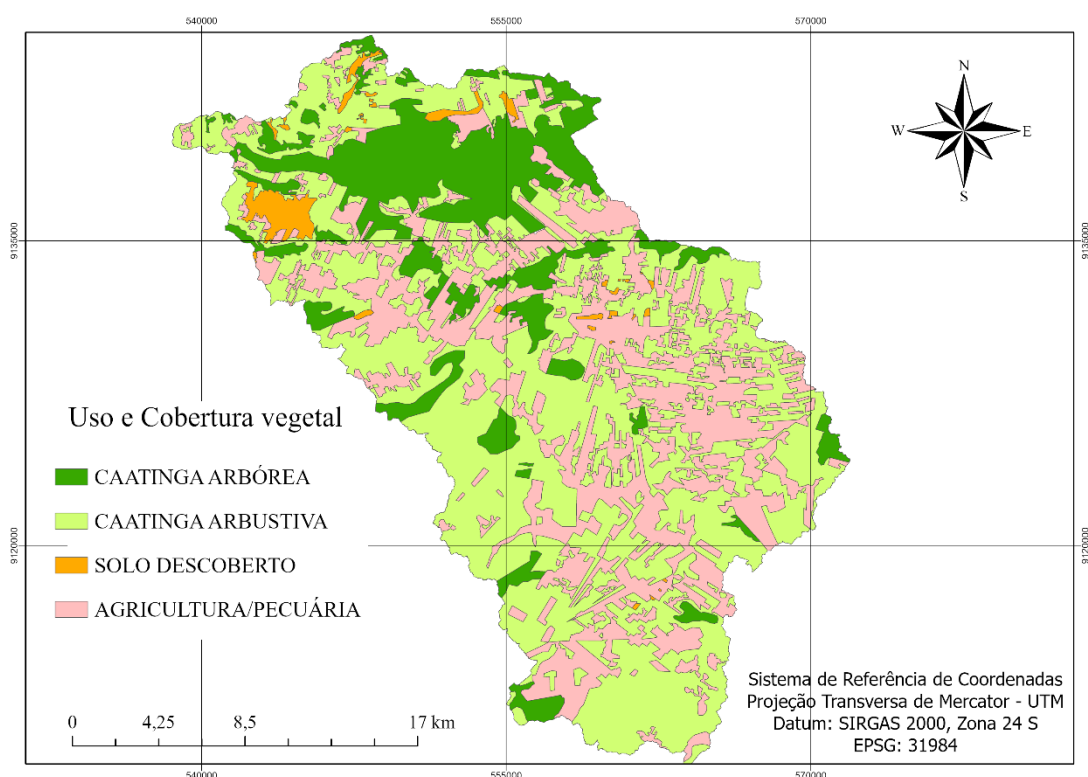


Figura 08 – Mapa de Uso e Cobertura vegetal da bacia no riacho Exu.

Fonte: Autor, 2023.

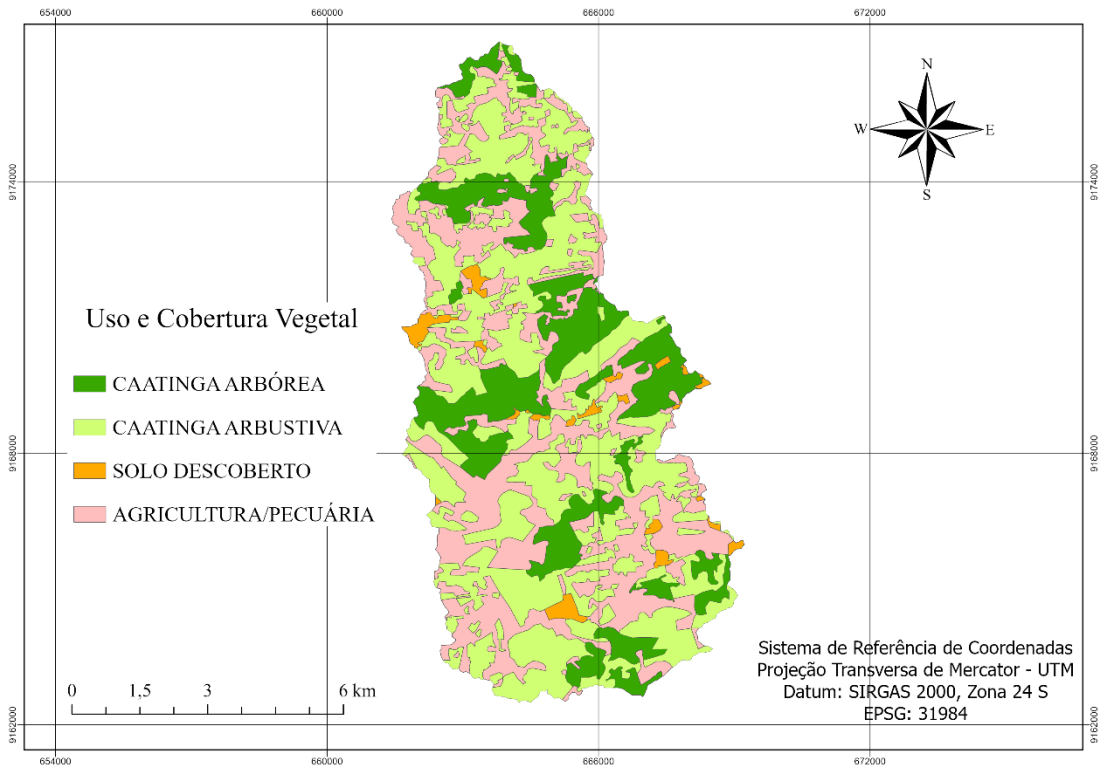


Figura 09 – Mapa de Uso e Cobertura vegetal da bacia no riacho Cachoeira.

Fonte: Autor, 2023.

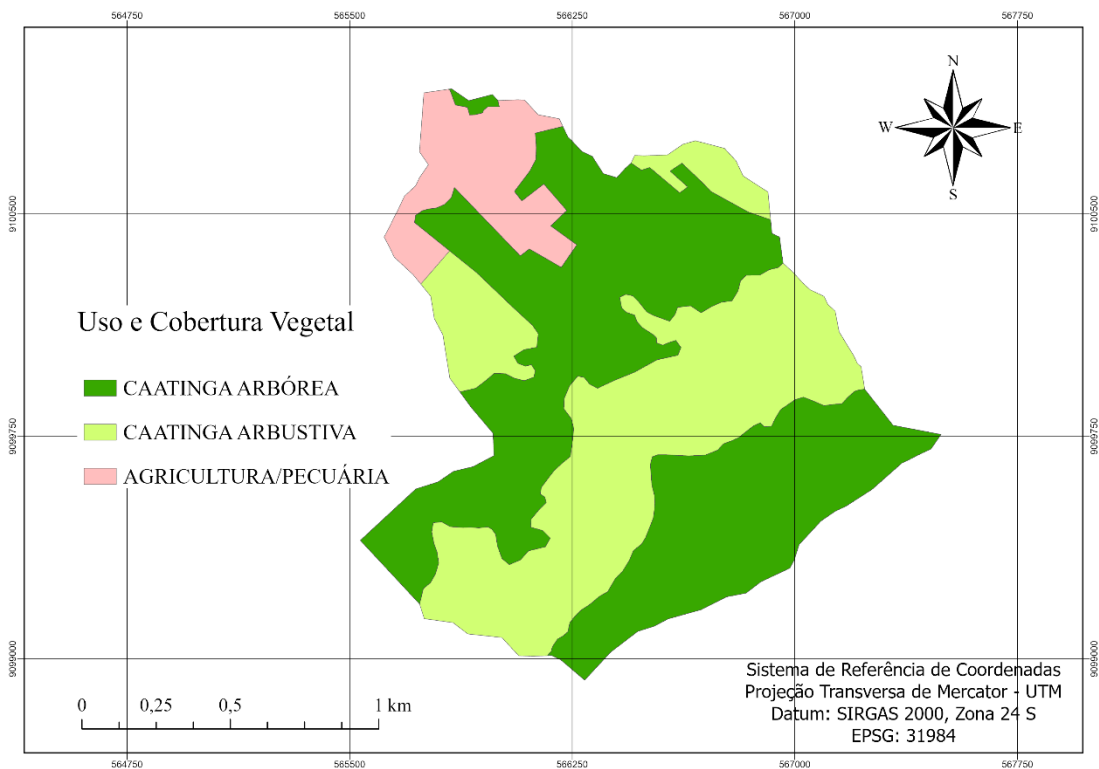


Figura 10 – Mapa de Uso e Cobertura vegetal da bacia no riacho Jacu.

Fonte: Autor, 2023.

O tipo predominante de cobertura vegetal presente nas três bacias analisadas é a caatinga hiperxerófila, ocorrendo em solos relativamente rasos, constituindo uma vegetação caducifólia de baixo a médio porte. Em sua composição florística podemos citar espécies importantes como: catingueira, favela, angico, juazeiro, jurema, dentre tantas outras mais (PARAÍBA, 2004). De forma geral a caatinga hiperxerófila, no presente trabalho, está separada nas classes de caatinga arbórea e caatinga arbustiva.

A classe de caatinga arbórea ocupa porcentagens distintas entre as bacias analisadas. Na bacia do riacho Exu a porcentagem de 17,60% de ocupação está concentrada nas áreas mais elevadas da bacia e em alguns pontos espaçados. Na bacia do riacho Cachoeira a caatinga arbórea (21,68% da área total da bacia) concentra-se na parte mais central. A bacia do riacho Jacu, caracterizada aqui neste estudo por ser de pequena magnitude, apresenta característica mais adensada para este tipo de cobertura vegetal que expressivamente ocupa mais de 53% de sua área.

Autores como Andrade et al. (2017); Cantalice et al. (2015); Felix (2015) e Monte-Mor (2012) comentaram sobre a importância da cobertura vegetal nos mais diversos compartimentos que integram o ciclo hidrológico, assim como Brandão et al. (2006) que afirmaram, que enquanto maior o adensamento vegetativo, menor serão os impactos da gota de chuva sob o solo, menor será a taxa de escoamento superficial, conseqüentemente menor será a taxa de perda de solo.

A caatinga arbustiva é o tipo de vegetação mais representativa, apresentando porcentagens de ocupações expressivos em todas as bacias analisadas; esta classe contempla vegetações com porte abaixo de dois metros, menos adensadas, com registro de uma significativa presença de vegetação herbácea ou rasteiras.

Desta forma, com vegetação mais espaçada e de menor porte, em tal classe, o predomínio do processo de escoamento superficial trona-se mais relevante, favorecendo por exemplo a erodibilidade de solos e processos de assoreamento (VETTORAZZI; CRUCIANI; MACHADO, 2003).

As bacias analisadas podem ser classificadas como bacias agrícolas, por apresentarem atividades econômicas voltadas à agropecuária, com predominância da agricultura familiar cultivando mandioca, milho, feijão e banana, culturas que são comumente cultivadas em áreas próximas aos cursos de água e em áreas de várzeas (SILVEIRA, 2005). A pecuária extensiva, principalmente de caprinos, assume um papel de grande relevância nas atividades econômicas desenvolvidas nas três bacias analisadas, o que potencializa os impactos negativos sobre os solos e, conseqüentemente, sobre o

comportamento da infiltração e escoamento superficial da água (PRUSKI; BRANDÃO; SILVA, 2004).

As áreas ocupadas pelas atividades agropecuárias nas bacias do riacho Exu (30,47% de ocupação de sua área total) e Cachoeira (33,32%) contrastam com a bacia do riacho Jacu que apresenta apenas 9,33% de sua área destinada ao uso agrícola, com estas atividades concentrando-se nas porções mais baixas da bacia próximo a seu exultório. Entretanto, independentemente da magnitude destas áreas em cada uma das bacias, o manejo adotado para os cultivos agrícolas e criatórios precisam demandar ações de conservação e proteção dos solos e das matas naturais em função das ameaças que representam aos ciclos hidrológicos locais e a capacidade de produção de água, fundamental para a manutenção da vida produtiva dos ecossistemas (SCHWAB et al., 1981).

A análise das imagens revela ainda que não foram encontradas áreas de solo exposto na bacia do riacho Jacu, no entanto, nas bacias do Exu e Cachoeira estas se apresentaram significativas, seja por uso inadequado do solo (com ou sem uso agrícola), ou por afloramentos rochosos. A bacia do riacho Exu apresentou uma concentração baixa de solo exposto apenas na porção Noroeste na bacia (1,81% da área total). Na bacia do Cachoeira, por sua vez, encontram-se pontos difusos de solo exposto (2,37% de sua área total), todos próximos das áreas de agricultura/pecuária, o que pode indicar um cenário de uso inadequado do solo (BRANDÃO et al., 2006).

De forma geral as três bacias não apresentam grandes distinções de uso e cobertura vegetal entre si, exibindo características vegetativas semelhantes, além de apresentarem as mesmas aptidões agrícolas, distinguindo-se apenas em termos proporcionais de seus usos e cobertura.

As características de vegetação apresentada pelo Exú, com maior concentração de caatinga arbustiva e atividade de agropecuária, indicam uma menor capacidade de interceptação do fluxo (BRANDÃO et al., 2006), diferente do que é apresentado no riacho Jacú, que apresentou uma maior concentração de caatinga arbórea, sugerindo um maior coeficiente de rugosidade para a bacia. Pois segundo (FILHO, 2019), áreas com maior rugosidade, apresentam maior porcentagem de retenção de água o solo, conseqüentemente menores taxas de erosão e menores potenciais de vazão de pico.

Torna-se importante mencionar que o diagnóstico de uso e cobertura do solo visa identificar áreas com potencial facilitador frente ao escoamento superficial (ANDRADE et al., 2017).

5.1.3. Determinação do Grupo Hidrológico de Solos (GHSs)

As Figuras 11, 12 e 13 a seguir espacializam os agrupamentos de solos encontrados, além de apresentar sua correspondente classificação segundo seu grupo hidrológico.

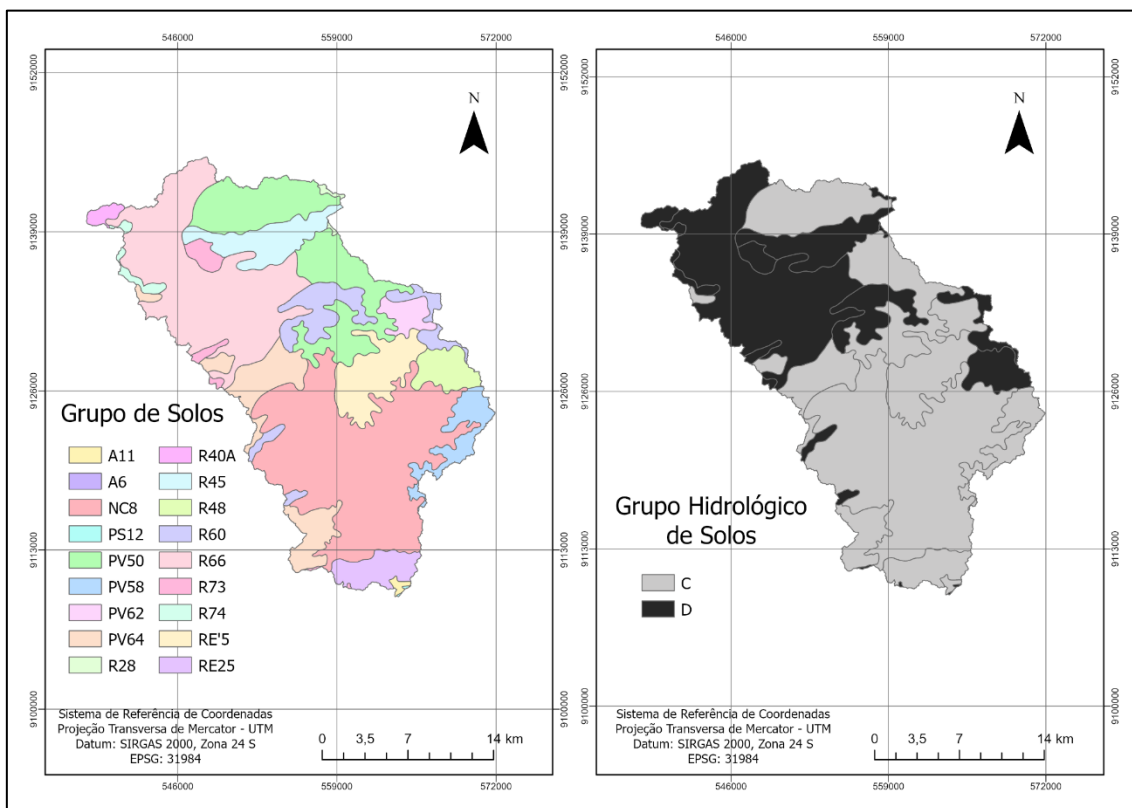


Figura 11 – Agrupamento de solo e sua respectiva classificação segundo seu grupo hidrológico para a bacia do Exú.

Fonte: Autor, 2023.

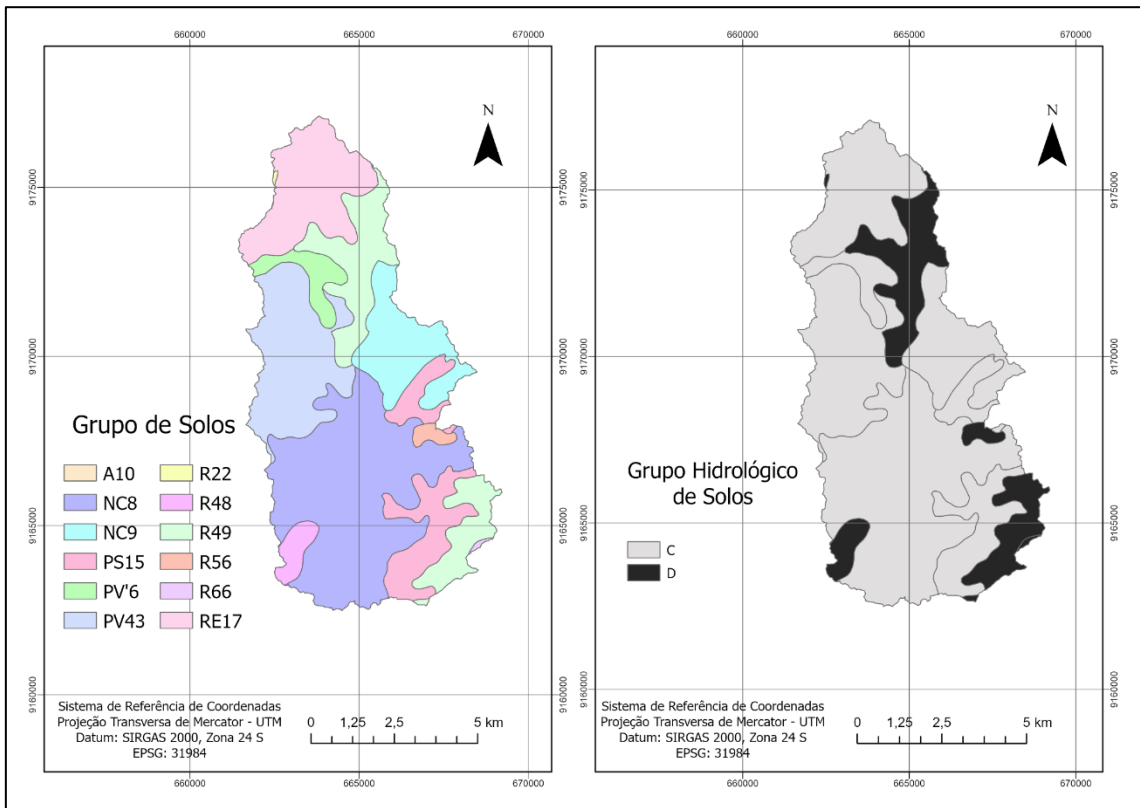


Figura 12 – Agrupamento de solo e sua respectiva classificação segundo seu grupo hidrológico para a bacia do Cachoeira.

Fonte: Autor, 2023.

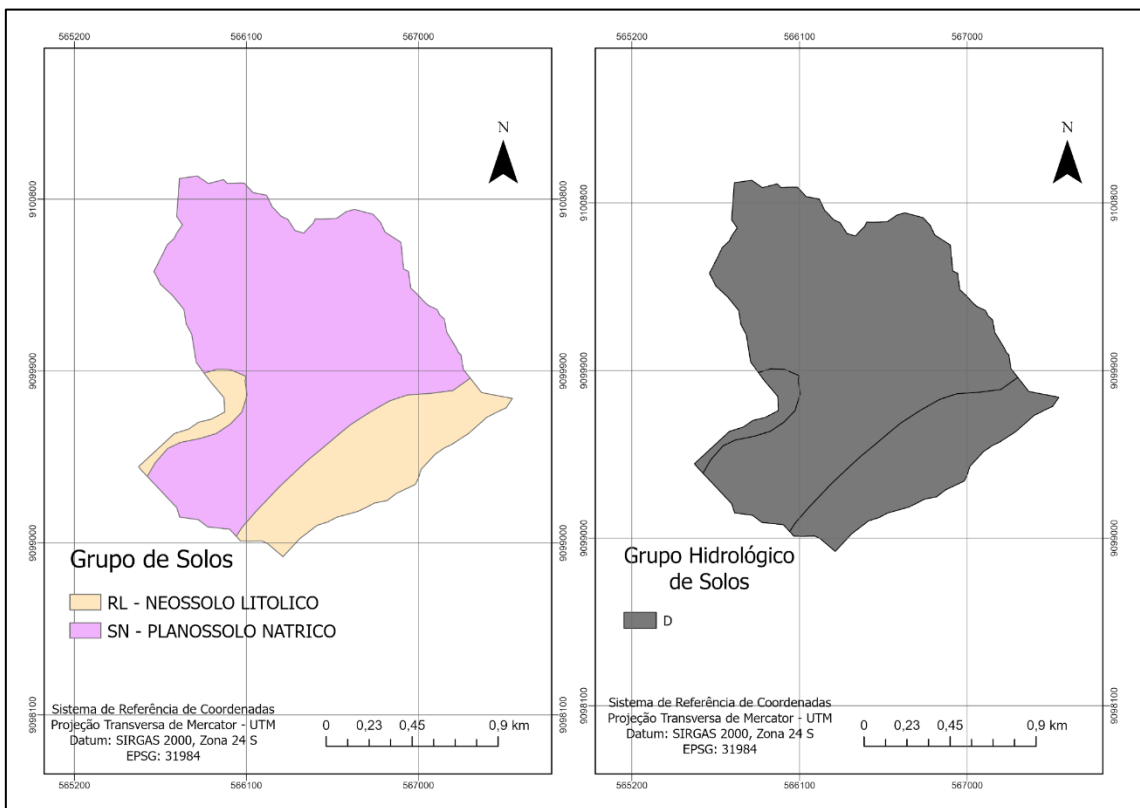


Figura 13 – Agrupamento de solo e sua respectiva classificação segundo seu grupo hidrológico para a bacia do Jacú.

Fonte: Autor, 2023.

Uma tabela contendo o detalhamento dos grupos de solos presentes nas três bacias analisadas, suas características, bem como a classificação quanto ao GHS, encontram-se disponibilizada no Anexo 01 do presente trabalho.

Os solos das bacias que apresentaram características como moderada capacidade de escoamento superficial, consideráveis diferenças texturais, presença de argila e infiltrações moderadas após a saturação, foram enquadrados do grupo hidrológico C (NRCS, 1972). Destaca-se aqui o agrupamento de solo A6 (encontrado na bacia do riacho Exu), que apresenta associação de solos aluviais de textura indiscriminada com cambissolos de textura média à argilosa, ambos eutróficos, estando sua maior parte associadas às áreas de Caatinga Hipoxerófila sendo classificada no grupo hidrológico C, assim como outros agrupamentos de solo com características semelhantes.

Já os solos que apresentaram características como alta capacidade de escoamento superficial, pouca profundidade, afloramentos rochosos ou pedregosidade, e baixíssima permeabilidade do solo foram enquadrados do grupo hidrológico D (NRCS, 1972). Aqui destacamos o agrupamento de solo R49 (encontrado na bacia do riacho Cachoeira) que apresenta associação de solos litólicos de textura média com presença de solos bruno não cálcico, estando mais associado em áreas de Caatinga Hipoxerófila, assim como este agrupamento, outros agrupamentos de solo com características semelhantes foram enquadrados no grupo hidrológico D.

Todos os agrupamentos de solos identificados nas três bacias analisadas estão classificados como solos dos grupos hidrológicos C e D. Não foi identificado nenhum tipo de solo que fosse passível de enquadramento aos GHSs A e B.

Em termos climáticos, a região, reconhecidamente, apresenta grande variabilidade inter e intra anual com precipitações torrenciais. Os agrupamentos de solos encontrados compreendem solos pouco profundos e pouco desenvolvidos, com baixo potencial drenante. Tais fatores somados resultam, de uma forma geral, em áreas com maiores potencialidades de geração de escoamento superficial (EMBRAPA, 2006; FEITOSA; SANTOS; ARAÚJO, 2011).

5.2. ANÁLISE DE FREQUÊNCIA DOS DADOS DE VAZÃO

Na Tabela 22 são apresentados os parâmetros de ajustes das funções de distribuições estatísticas avaliadas para as campanhas de medições de vazões de cada bacia estudada.

Tabela 22 – Valores obtidos dos parâmetros de ajustes das funções avaliadas com os dados disponíveis para cada bacia.

Bacias	Normal	Log Normal	Gumbel	Gama
Exu	$\mu = 3,16884$	$\mu_y = -0,57210$	$\alpha = 3,16884$	$\beta = 0,22558$
	$\sigma = 6,72637$	$\sigma_y = 1,79617$	$u = 6,72637$	$\lambda = 14,04752$
Cachoeira	$\mu = 0,19707$	$\mu_y = -1,78009$	$\alpha = 0,19707$	$\beta = 4,44559$
	$\sigma = 0,09992$	$\sigma_y = 0,62892$	$u = 0,09992$	$\lambda = 0,04433$
Jacu	$\mu = 3,16884$	$\mu_y = -0,57210$	$\alpha = 3,16884$	$\beta = 2,47688$
	$\sigma = 6,67191$	$\sigma_y = 1,79617$	$u = 6,67191$	$\lambda = 0,04931$

Fonte: Autor, 2023.

Na Tabela 23 são apresentados os valores dos critérios estatísticos utilizados para validação dos modelos de distribuição, avaliados para cada bacia, contendo o Coeficiente de Correlação de Pearson (r) e o teste de aderência Qui-Quadrado (χ^2) para cada caso analisado.

Tabela 23 – Valores obtidos da estatística do teste de aderência de Qui-Quadrado na avaliação das funções de distribuição às séries de vazões observadas e suas consequentes correlações.

Bacias	Distribuições testadas	Validação		Distribuição validada
		r	χ^2	
Exu	Normal	0,71	7.550,44 ^{NS}	Gama
	Log-Normal	0,96	39,85	
	Gumbel	0,83	3998,69 ^{NS}	
	Gama	0,99	20,07	
Cachoeira	Normal	0,973	0,086	Gama
	Log-Normal	0,958	0,072	
	Gumbel	0,978	0,084	
	Gama	0,982	0,058	
Jacu	Normal	0,89	0,10	Log-Normal
	Log-Normal	0,97	0,045	
	Gumbel	0,95	0,06	
	Gama	0,95	0,05	

Fonte: Autor, 2023.

NS: Não significativo a 5% de probabilidade

De acordo com o coeficiente de correlação e com o teste de aderência Qui-Quadrado ao nível de significância de 5% de probabilidade, o modelo teórico de probabilidade Gama foi o que melhor se ajustou aos dados das bacias do riacho Exu e Cachoeira. A bacia do riacho Jacu apresentou o melhor ajuste à distribuição Log-Normal ao nível de significância de 5% de probabilidade.

De forma geral, as distribuições de probabilidade Log-Normal e Gama foram as únicas que obtiveram ajustes favoráveis em todas as bacias analisadas, com destaque para a distribuição Gama que apresentou o melhor ajuste em duas das três bacias sob estudo, corroborando com Guimarães (2011), que afirmou que as distribuições estatísticas Log-Normal e Gama ajustam-se bem as variáveis hidrológicas, sendo frequentemente aplicadas na determinação de probabilidade de precipitações para durações predefinidas, sendo distribuições de fácil manuseio.

Os resultados encontrados para a bacia hidrográfica do riacho Jacu, corrobora com o estudo de Neto (2013) que encontrou ajustes às distribuições Weibull, Gumbel, Log-Normal e Gama para a mesma bacia.

Dentre as quatro distribuições estatísticas utilizadas, observou-se uma maior restrição ao ajuste das distribuições Normal e Gumbel, especificamente para a bacia hidrográfica do riacho Exu, que se apresentou não significativa para o teste do Qui-Quadrado com 5% de probabilidade, com correlações de 0,713 e 0,833, respectivamente. A elevada heterogeneidade dos dados observados no Exu pode justificar essa maior dificuldade de ajuste, semelhante ao comportamento observado por Neto (2013).

As Figuras 14, 15 e 16 expressam o comportamento gráfico das distribuições advindas das probabilidades utilizadas, demonstrando o quão próximos os pontos de vazões observadas encontram-se da distribuição estatística; quanto mais próximo os pontos estiverem concentrados na reta, maior será a probabilidade de os dados seguirem a distribuição testada. Este método gráfico apresenta-se como uma complementação visual do que foi apresentado nos testes estatísticos já discutidos anteriormente.

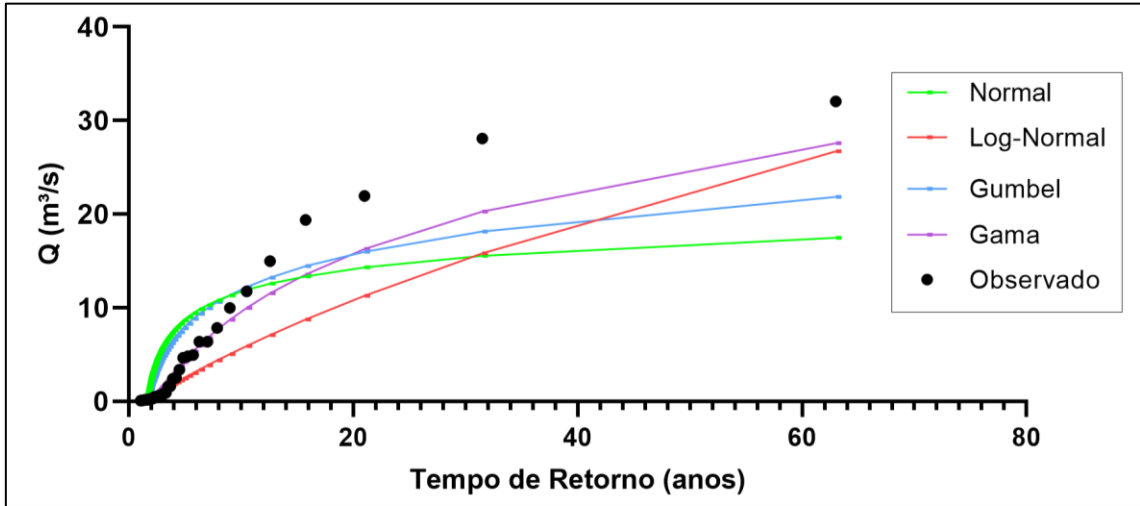


Figura 14 – Distribuições estatísticas aplicadas para a bacia do riacho Exu.

Fonte: Autor, 2023.

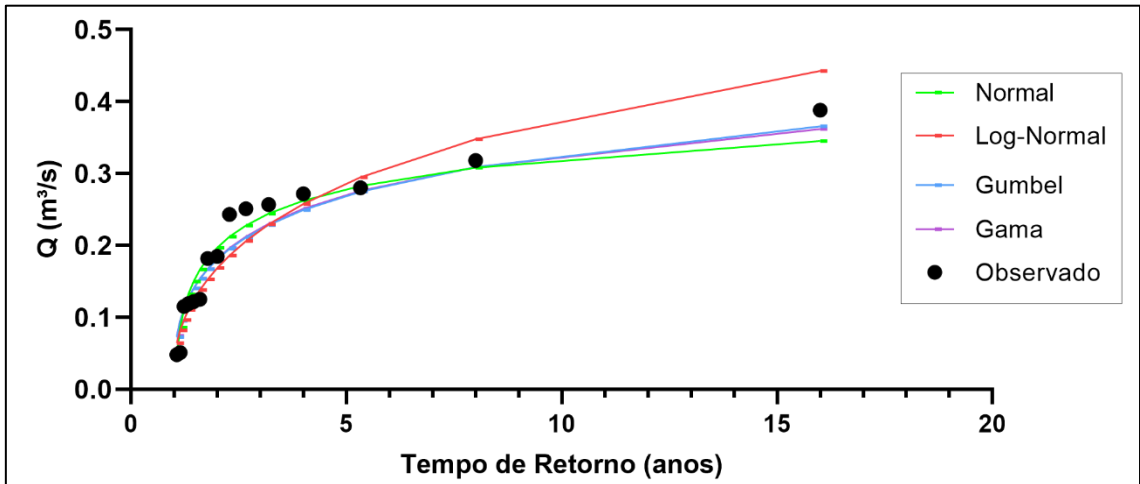


Figura 15 – Distribuições estatísticas aplicadas para a bacia do riacho Cachoeira.

Fonte: Autor, 2023.

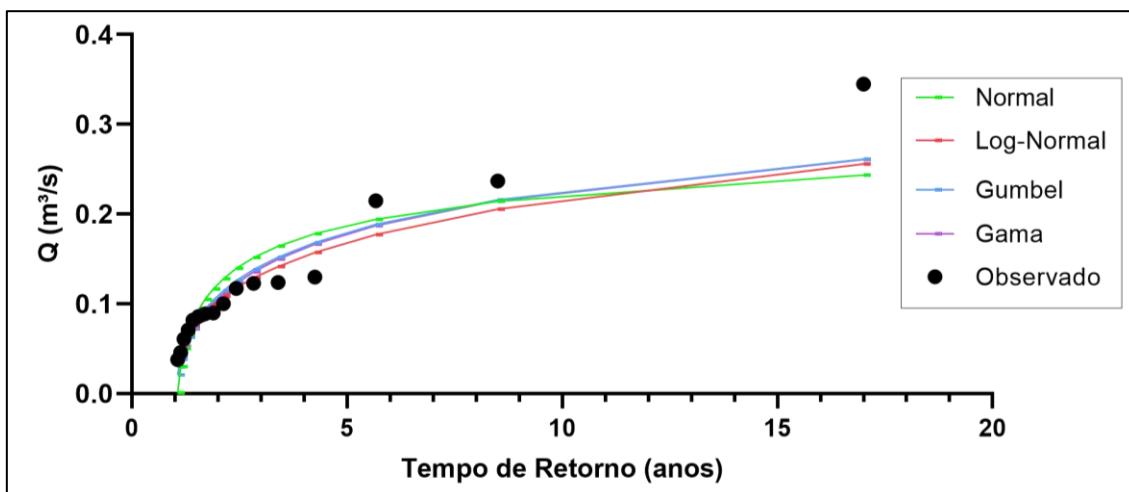


Figura 16 – Distribuições estatísticas aplicadas para a bacia do riacho Jacu.

Fonte: Autor, 2023.

Fica evidente na Figura 14, a maior dificuldade de ajuste aos dados da bacia do riacho Exu, quando comparados com os dados do Cachoeira e Jacu. As distribuições Normal e Gumbel não acompanham a tendência dos dados, enquanto que as distribuições Log-Normal e Gama tendem a acompanhar, embora com valores ainda subestimados; tais resultados gráficos foram corroborados com a análise estatística apresentada.

No geral, todas as distribuições estatísticas apresentaram algum nível de subestimação frente aos dados observados, exceto, a distribuição Log-Normal quando aplicado aos dados do riacho Cachoeira (Figura 15), que apresentou uma superestimação em comparação aos dados observados. Apesar da distribuição Gama ter apresentado, em seu contexto geral, o desempenho mais consistente, registra-se que graficamente ocorre uma tendência de subestimação dos dados em todas as bacias analisadas (NETO, 2013).

Para efeito de pesquisa foram selecionadas as distribuições de probabilidade validadas, conforme é apresentado na Tabela 23, como forma de comparação da eficiência das modelagens hidrológicas para as diferentes bacias analisadas.

Recomenda-se para pesquisas futuras, o aprofundamento de estudos relacionados as distribuições estatísticas que melhor respondem aos dados hidrológicos da região da bacia hidrográfica do Pajeú, tendo em vista os cenários de escassez de dados hidrológicos e a necessidade de melhorar cada vez mais a compreensão do comportamento hidrológico da região.

5.3. MODELAGEM HIDROLÓGICA

Apresenta-se a seguir o cálculo do Coeficiente de Escoamento Superficial bem como do CN. Vale salientar que, todos os cinco modelos aferidos, são modelos concentrados, sendo derivações do método Racional ou da Curva Número, como já discutidos em tópicos anteriores.

Por se tratar de modelos concentrados, a avaliação da variabilidade das vazões máximas no espaço não é possível, no entanto, com o intuito de melhorar a percepção das áreas mais propensas ou não ao escoamento superficial, Coeficiente de Escoamento Superficial e o CN foram espacializados conforme as variáveis que às regem e são apresentados nos tópicos seguintes.

Uma breve análise quanto as formulas de Tempo de Concentração mais adequada para cada bacia foi realizada e por fim, realizou-se a avaliação do desempenho de cada modelagem aplicada, apresentando-se a concepção das principais etapas na elaboração dos cálculos das modelagens hidrológicas.

5.3.1. Cálculo do Coeficiente de Escoamento Superficial e sua relação com a conservação do solo e água

A seguir apresenta-se o produto dos cálculos aplicados e desenvolvidos e que estão explicitados nas Tabelas 24, 25 e 26, nas quais aparecem os valores do coeficiente de *Runoff* de referência, variando de acordo com os os grupos hidrológicos que os solos se enquadram, o uso do solo em cada bacia, e a intensidade de chuva correspondente a 10, 25 e 50 anos de Tempo de Retorno (TR).

Tabela 24 – Valores de coeficiente *Runoff* obtido para a Bacia do Riacho Exu.

Uso do Solo	Grupo Hidrológico de solo C			Grupo Hidrológico de solo D		
	10 anos	25 anos	50 anos	10 anos	25 anos	50 anos
Caatinga Arbórea	0,01114	0,01306	0,01468	0,00925	0,01136	0,01314
Caatinga Arbustiva	0,15718	0,16256	0,16709	0,18718	0,19256	0,19709
Agricultura	0,49114	0,49306	0,49468	0,52114	0,52308	0,52468
Solo Descoberto	0,68623	0,68661	0,68693	0,70623	0,70661	0,70694

Fonte: Autor, 2023.

Tabela 25 – Valores de coeficiente *Runoff* obtido para a Bacia do Riacho Cachoeira.

Uso do Solo	Grupo Hidrológico de solo C			Grupo Hidrológico de soloD		
	10 anos	25 anos	50 anos	10 anos	25 anos	50 anos
Caatinga Arbórea	0,02181	0,02516	0,02797	0,02100	0,02467	0,02777

Caatinga Arbustiva	0,18709	0,19644	0,20432	0,21709	0,22644	0,23432
Agricultura	0,50182	0,50516	0,50797	0,53182	0,53516	0,53797
Solo Descoberto	0,68836	0,68903	0,68981	0,70836	0,70903	0,70959

Fonte: Autor, 2023.

Tabela 26 – Valores de coeficiente *Runoff* obtido para a Bacia do Riacho Jacu.

Uso do Solo	Grupo Hidrológico de solo C			Grupo Hidrológico de solo D		
	10 anos	25 anos	50 anos	10 anos	25 anos	50 anos
Caatinga Arbórea	0,04635	0,05294	0,05851	0,04798	0,05523	0,06135
Caatinga Arbustiva	0,25577	0,27423	0,28981	0,28577	0,30423	0,31981
Agricultura	0,52635	0,53294	0,53851	0,55635	0,56294	0,56850
Solo Descoberto	0,69327	0,69459	0,69571	0,71327	0,71459	0,71570

Fonte: Autor, 2023.

Uma das grandes dificuldades na obtenção do coeficiente *Runoff*, é que, apesar do método conter diversas tabelas disponíveis para enquadramento, estas não apresentam todas as classes de uso do solo, tipo de solo e declividade, o que dificulta sua aplicação, sendo necessários algumas adaptações, podendo aumentar os erros das estimativas de vazão (SANTOS, 2010). Os valores disponíveis nas tabelas acima, apresentam a variação da taxa de escoamento superficial prevista. Tais resultados são de extrema importância para analisar o balanço hídrico da bacia, bem como para seu planejamento ambiental, pois apresentam o comportamento da taxa de escoamento superficial sob vários cenários distintos.

Observa-se que para todas as bacias apresentadas, o valor de *Runoff*, apresenta pouca variação à medida que o tempo de retorno aumenta para o mesmo uso do solo. Para áreas de solo descoberto na bacia do Jacu por exemplo, a taxa de escoamento superficial fica em torno de 69% obtendo pouco crescimento à medida que o tempo de retorno aumenta.

No entanto, observa-se que com a mudança de uso e cobertura do solo, os valores de *Runoff*, se modificam abruptamente, deixando claro a influência que a rugosidade do terreno exerce sobre o escoamento superficial, corroborando com discussões amplamente explanada na literatura (CANTALICE et al., 2013, 2015; FILHO et al., 2019; PRUSKI; BRANDÃO; SILVA, 2004).

Para a mesma bacia do riacho Jacu, áreas de caatinga arbórea, pertencente ao grupo hidrológico C, apresenta uma taxa de deflúvio de 4,6% para uma precipitação 10 anos de tempo de retorno. Áreas de agricultura sob as mesmas condições, apresentam

uma taxa de 52,6% de escoamento superficial, um aumento na taxa de escoamento de mais de 11 vezes. As mesmas disparidades são observada para as demais bacias analisadas (Tabelas 24, 25 e 26).

Apesar da obtenção do coeficiente *Runoff*, aqui apresentado para as bacias em estudo, as variáveis que influenciam na determinação do coeficiente de escoamento, bem como a sensibilidade do coeficiente à tais variáveis, necessitam de estudos mais aprofundados, principalmente em ambientes semiáridos como é o caso da região do Pajeú (SANTOS, 2018). Validações experimentais dos resultados apresentados acima se fazem necessárias para o aprofundamento de tais discussões.

A apresentação da distribuição espacial do coeficiente de *Runoff* para cada uma das bacias encontra-se nas Figuras 17, 18 e 19, nas quais é possível observar a espacialização das faixas de valores encontradas para as bacias do Exu, Cachoeira e Jacu.

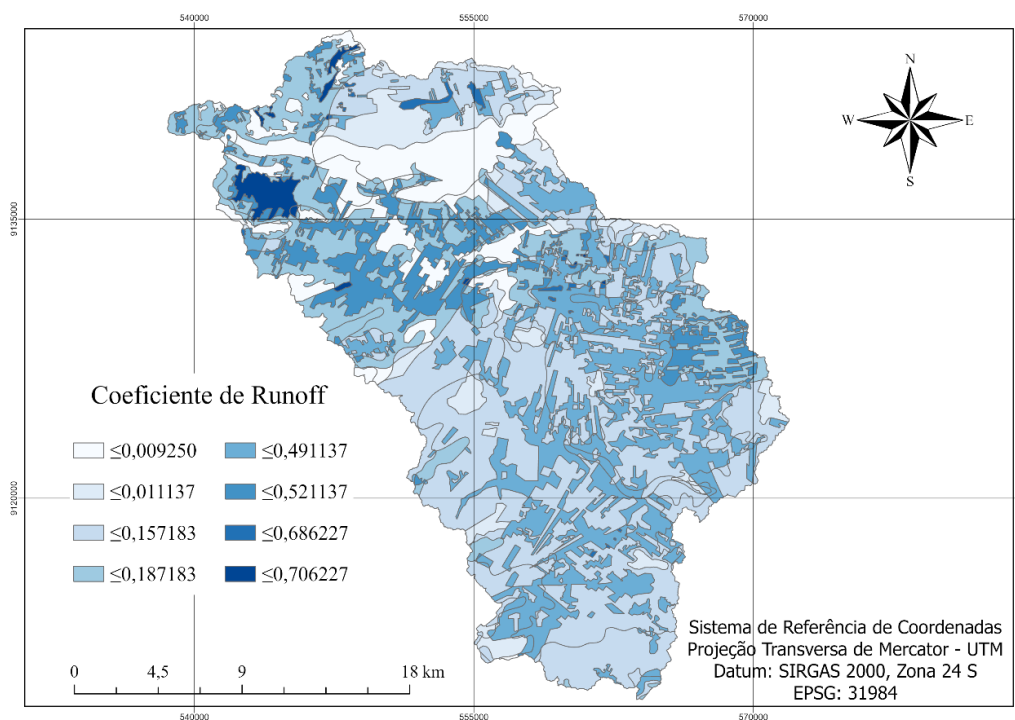


Figura 17 – Espacialização do coeficiente *Runoff* para a bacia do Riacho Exu.

Fonte: Autor, 2023.

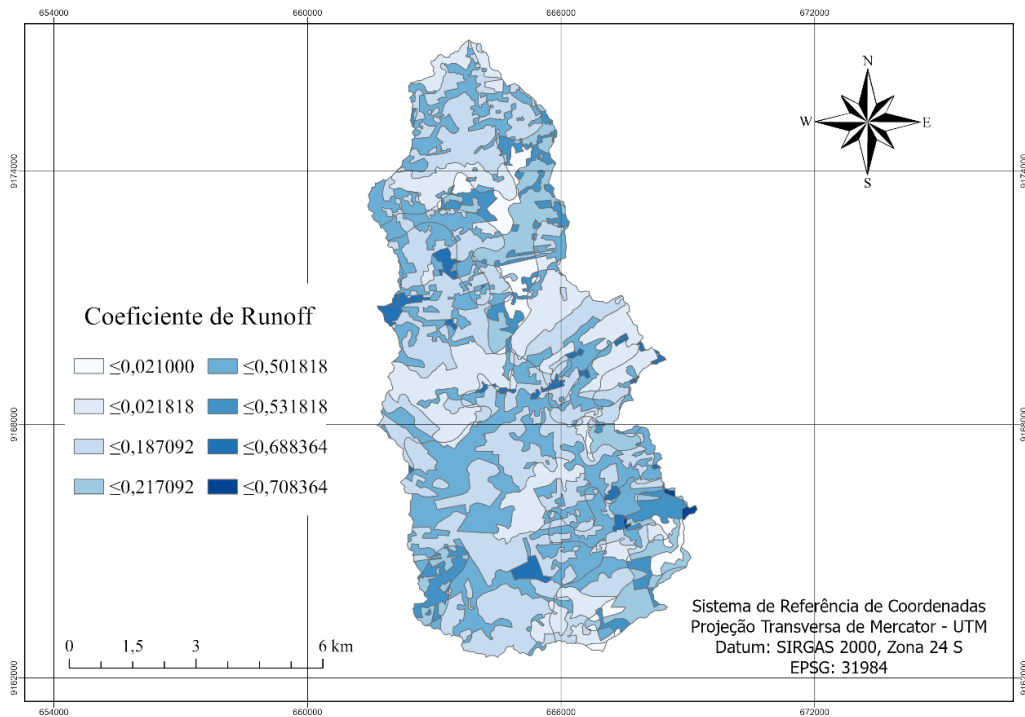


Figura 18 – Espacialização do coeficiente *Runoff* para a bacia do Riacho Cachoeira.

Fonte: Autor, 2023.

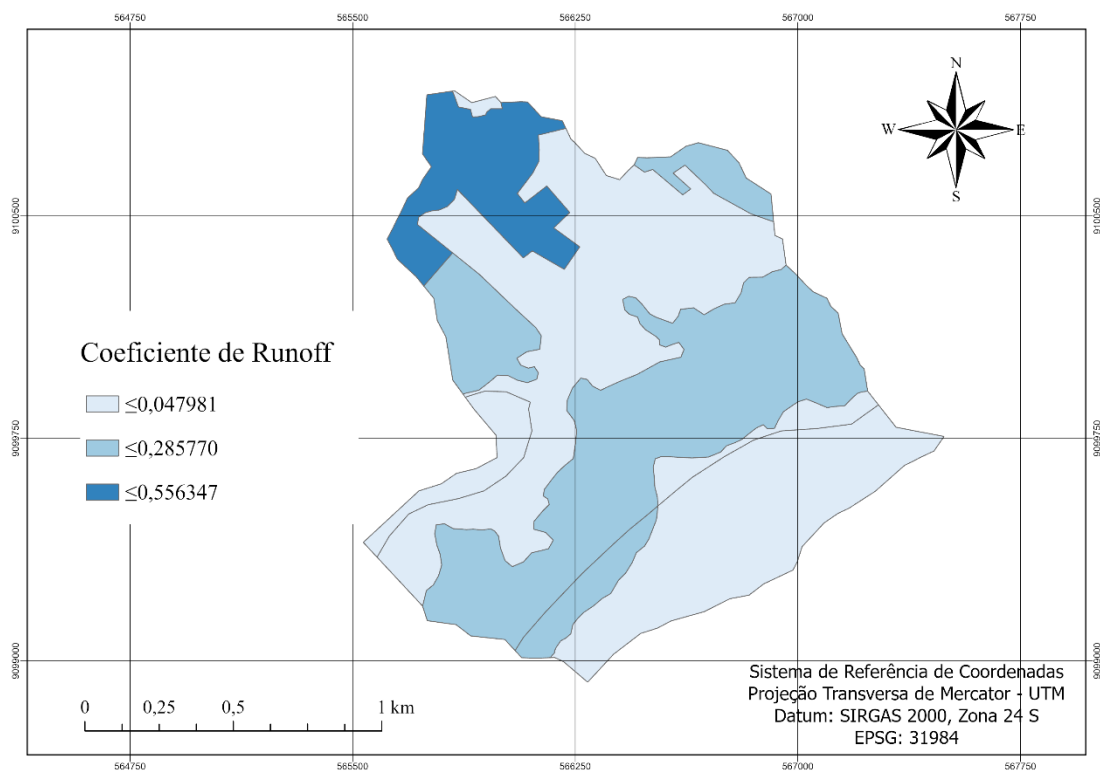


Figura 19 – Espacialização do coeficiente *Runoff* para a bacia do Riacho Jacu.

Fonte: Autor, 2023.

5.3.2. Implicações da CN para o escoamento superficial

Através de métodos de geoprocessamento, torna-se possível, a espacialização dos valores de CN em cada bacia, por meio da superposição de camadas de dados de entrada, possibilitando a verificação e identificação das áreas de possíveis maiores ou menores deflúvios. Tal coeficiente é utilizado para aplicações de métodos que necessitem do número de deflúvio (CN) como o método CN/NRCS e o TR55, modelados no presente trabalho. As espacializações realizadas para as bacias em estudo podem ser observadas nas Figuras 20, 21 e 22, apresentadas a seguir.

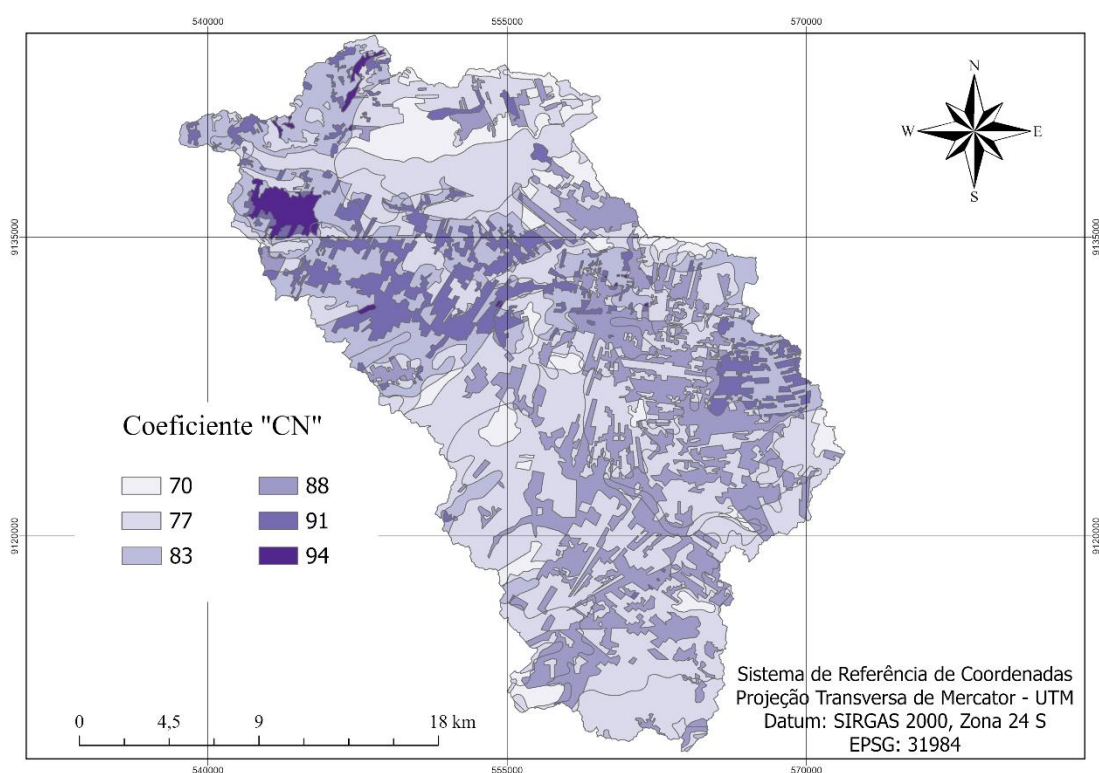


Figura 20 – Espacialização do coeficiente “CN” na condição hidrológica II, para a bacia do Riacho Exu.

Fonte: Autor, 2023.

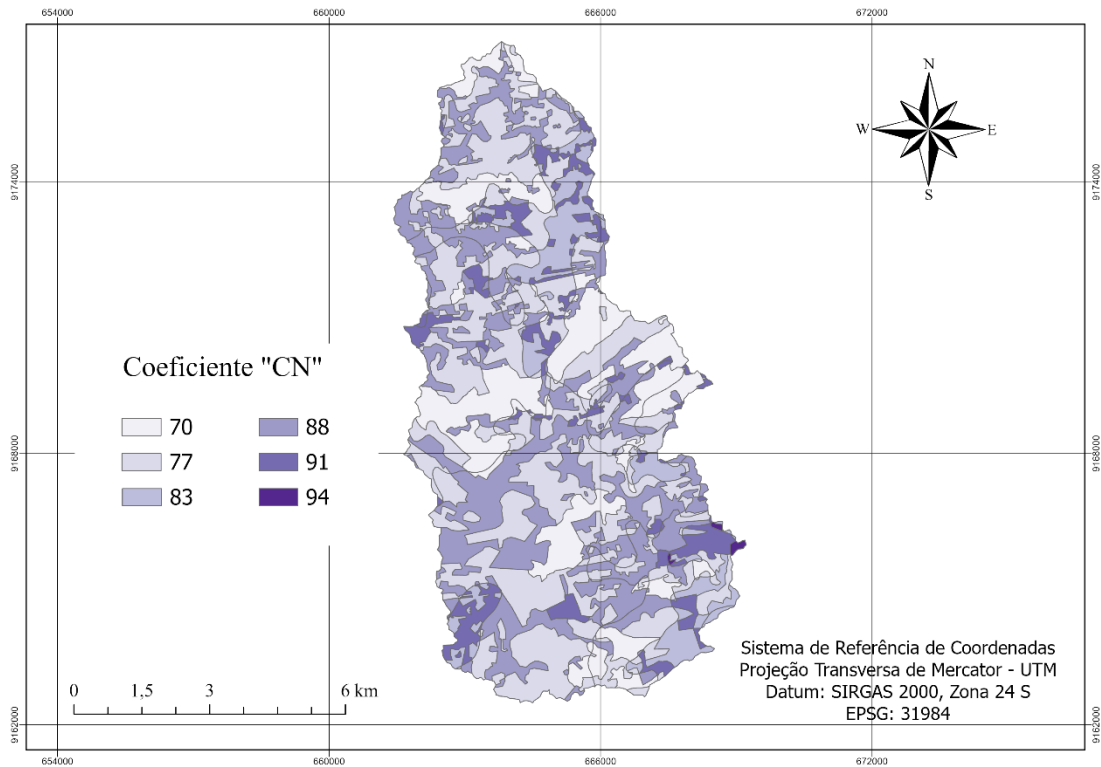


Figura 21 – Espacialização do coeficiente “CN” na condição hidrológica II, para a bacia do Riacho Cachoeira. Fonte: Autor, 2023.

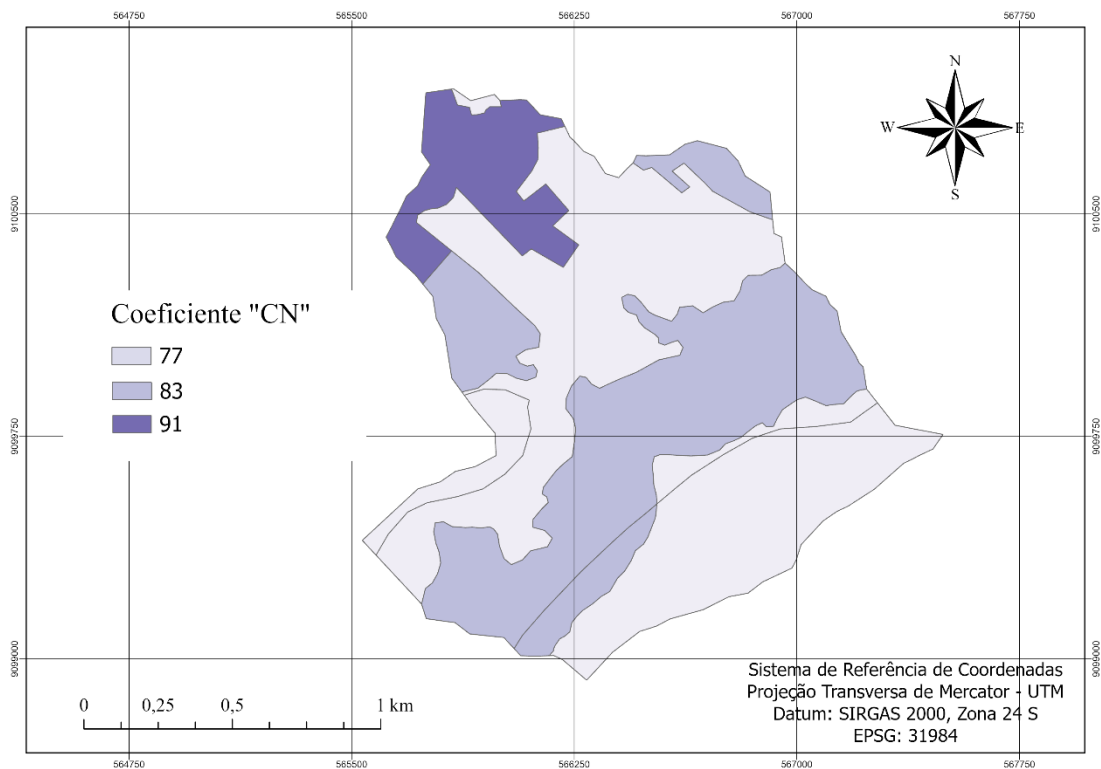


Figura 22 – Espacialização do coeficiente “CN” na condição hidrológica II, para a bacia do Riacho Jacu. Fonte: Autor, 2023.

Os maiores valores de Curva Número encontrados para a Bacia do Riacho Exu (Figura 20), estão localizados principalmente na porção Noroeste da bacia, com valores de CN = 94 ocupando 7,89 km², o que representa cerca de 1,37% da área da bacia; nesta região predomina a condição de solo descoberto, contando com uma associação de diversos agrupamento de solo, todos pertencentes ao grande grupo dos Neossolos Regolíticos, enquadrando-se no grupo hidrológico D (GENOVEZ; NETO; SARTORI, 2005; NRCS, 1972). Por outro lado, os menores valores obtidos para a mesma bacia foram encontrados em áreas de Caatinga Arbórea, associada a vários agrupamentos de solos, dentre os quais destaca-se o PV50 (consultar Anexo 01), pertencente ao grupo hidrológico C, abrangendo 24,69 km² ou 4,29% da área da bacia.

Para a Bacia do Riacho Cachoeira (Figura 21), os maiores valores de CN, foram encontrados sob a presença de solo exposto associado aos agrupamentos de solos R49 e R56 (Anexo 01), ambos pertencentes ao grupo hidrológico D (GENOVEZ; NETO; SARTORI, 2005; NRCS, 1972); ao todo, as áreas com CN = 94 apresentaram aproximadamente 0,13 km² ou cerca de 0,19%, sendo áreas de elevada taxa de escoamento superficial, porém de pouca expressividade na bacia. Já os menores valores obtidos para esta mesma bacia, assim como na Bacia do Riacho Exu, foram encontrados em áreas de Caatinga Arbórea estando associado a vários agrupamentos de solos, dentre os quais pode-se citar PV43, NC9 e RE17 (Anexo 01), todos pertencentes ao grupo hidrológico C. A soma de todas as combinações que obtiveram o CN = 70 apresentam uma área de aproximadamente 12,53 km² representando 18,16% da área total da bacia, tratando-se de regiões com maior rugosidade promovendo uma maior taxa de infiltração da água no solo (BRANDÃO et al., 2006).

Na bacia do Riacho Jacu, por apresentar um número reduzido de combinações de dados de entrada, os valores de Curva Número resumem-se em apenas três, o valor de CN = 91, o maior valor encontrado, representa cerca de 9,32% da bacia, contando com uma área de apenas 0,21 km², sendo áreas de Agricultura/Pecuária associada com Planossolo Nátrico apresentando-se como áreas de grande susceptibilidade a erosões (SANTOS, 2013). O menor valor encontrado, CN = 77, apresenta uma significativa abrangência na bacia, sendo encontrado em mais de 50% de sua área, ou seja, cerca de 1,2 km²; nestas áreas predomina a Caatinga Arbórea associadas com Planossolo Nátrico (32,31%) e Neossolo Litólico (21,42%), condições que favorecem o processo de infiltração da água no solo (MOHAMOUD; EWING; BOAST, 1990). Vale ressaltar que os tipos de solos encontrados da Bacia do Riacho Jacu encontram-se enquadrados no grupo hidrológico D.

A fim de apresentar todas as distribuições dos valores de CN por área, o gráfico abaixo apresenta de forma condensada as distribuições dos valores para as três bacias analisadas.

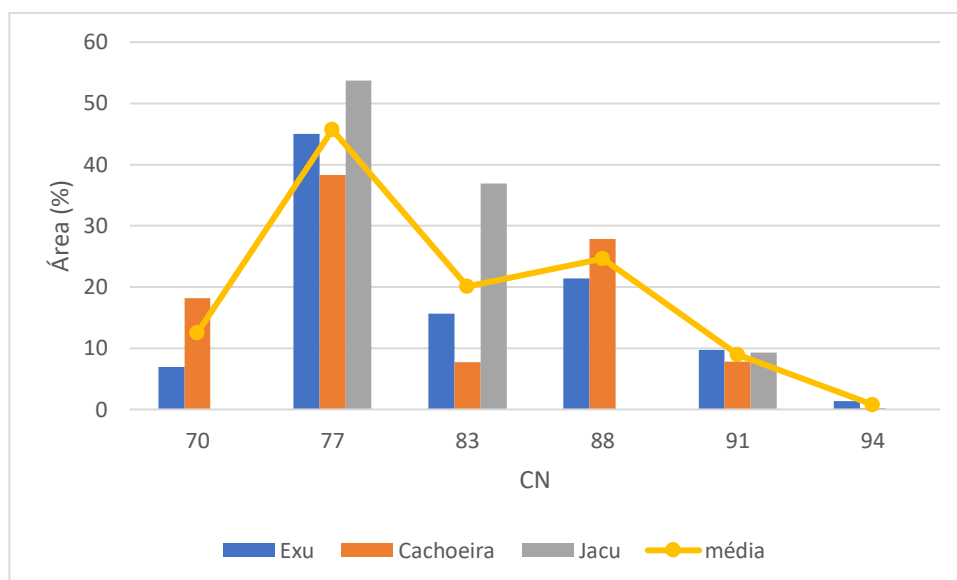


Figura 23 – Distribuição de valores de CN por área para as bacias analisadas.

Fonte: Autor, 2023.

É importante mencionar que valores de CN entre 77 e 88 representam mais de 80% da área das bacias (Figura 23), com destaque para a Bacia do Riacho Jacu. Essas informações demonstram-se relevantes, pois esta faixa de valores de CN incidem sobre áreas de caatinga arbustiva e áreas de agricultura/pecuária, demonstrando que tais ocupações são as mais influentes na predição do escoamento superficial, fora das faixas de valores máximos ou mínimos de impermeabilização.

Uma vez apresentado a espacialização dos valores de CN, e conseqüentemente a análise de suas distribuições, ressalta-se que, a determinação de um valor de CN único e representativo para uma bacia hidrográfica é um ponto crucial para a correta estimativa de escoamento superficial para métodos concentrados (LINSLEY; KOHLER; PAULHUS, 1975). Neste sentido, em uma etapa posterior, a obtenção da lâmina de escoamento superficial da bacia é feita por meio de cálculos de ponderação dos valores de CN por suas respectivas áreas de incidência, a fim de encontrar um valor único e representativo para o cálculo do método empregado.

5.3.3. Análise do Tempo de Concentração para as bacias sob estudo.

Para a obtenção de modelagens hidrológicas bem ajustadas, torna-se necessário a escolha adequada da formula de Tempo de Concentração que melhor represente cada bacia analisada.

Com a ausência de dados para mensurar os valores reais de TC para cada bacia, realizou-se inicialmente a modelagem utilizando as quatro diferentes formulas de TC, para posteriormente avaliar os percentuais de erro e o ajuste Nash que cada TC gerou nas modelagens hidrológicas processadas. A partir desse processo tornou-se possível filtrar as formulas que mais se ajustaram, tornando-se mais uma etapa importante na validação dos dados.

A Tabela 27 apresenta o compilado do Erro Médio Percentual (MPE) e o ajuste de Nash Sutcliffe (NS) para cada TC aplicado as modelagens hidrológicas nas bacias sob estudo.

Tabela 27 – Erro Médio Percentual (MPE) e o ajuste de Nash Sutcliffe (NS) para cada TC aplicado as modelagens hidrológicas nas bacias sob estudo.

Bacia	Fórmulas	TC (horas)	MPE	NS
Exu	Kirpich	14,6399	-1,02769	0,923775
	Hathaway	10,0633	0,95643	0,971909
	Dooge	13,2369	-0,61593	0,977802
	George Ribeiro	18,6625	-1,76386	0,651093
Cachoeira	Kirpich	4,2225	-1,36189	0,921485
	Hathaway	4,7380	-1,50003	0,899100
	Dooge	4,9130	-2,34790	0,632740
	George Ribeiro	5,1209	-1,94645	0,792770
Jacu	Kirpich	0,6993	1,87265	0,920044
	Hathaway	0,5448	-1,24249	0,887451
	Dooge	1,0233	6,15383	0,681480
	George Ribeiro	0.8166	1,07506	0,965939

Fonte: Autor, 2023.

Uma das mais difundidas formulas de Tempo de Concentração existente, a formula de Kirpich, apresenta uma ampla faixa de aplicação, sendo grandemente utilizada na literatura (SILVEIRA, 2005). Os dados submetidos a formula de TC de Kirpich

apresentaram bons ajustes, apresentando um coeficiente NS > 0,92, sendo considerado satisfatório para utilização, em todas as bacias analisadas (YOUNG et al., 2002).

Já o erro médio percentual (MPE), que indica a tendência e margem de erros intrínsecos em cada bacia analisada, apresentou para as bacias do Exú e Cachoeira uma tendência de subestimação com um erro de 1,027 e 1,361 %, respectivamente, conforme apresentado na Tabela 27. Já a bacia do Jacú apresentou uma tendência de superestimação ao erro de cerca de 1,87%.

Já a fórmula de Hathaway, apesar de sua aplicação ser mais restritiva, esperava-se um bom ajuste para as condições das bacias semiáridas, sobretudo na bacia do Jacu em função do seu menor porte. Tal expectativa advém da inclusão do fator de rugosidade em sua fórmula do Tempo de Concentração, tornando-a mais assertiva em bacias cujo fator de escoamento superficial seja predominante, a exemplo de como apresentam-se as bacias semiáridas (WHEATER; SOROOSHIAN; SHARMA, 2007).

Dada as restrições de área prevista pela fórmula de Hathaway, esperava-se que, enquanto maior a bacia maior seriam os erros intrínsecos, no entanto, ao contrário do esperado, destaca-se que as bacias do Exú (MPE de 0,95% e um NS de 0,971) e Cachoeira (MPE de -1,5% e NS de 0,899) obtiveram um resultado mais ajustado em comparação a bacia do Jacú (MPE de -1,24% e NS de 0,887), que apresenta um menor porte.

Apesar de encontrar resultados, que a princípio, aparentam ser contraditórios com a literatura, ressalta-se que o uso e cobertura vegetal apresentado no tópico 5.1.2 indica que as bacias do Exú e Cachoeira apresentam maiores taxas de caatinga arbustiva, agricultura/pecuária e solo descoberto. Tais características de cobertura vegetal, podem sugerir que a preponderância do escoamento superficial na fórmula de Hathaway seja mais importante do que a área de abrangência na aplicação da fórmula em ambientes semiáridos (BRAGA, 2000).

A fórmula de Dooge apresenta, segundo Silveira (2005), uma área de aplicação que varia de 145,04 a 947,94 km², enquadrando-se neste espectro como a melhor condição de ajuste para a bacia do Exú, fato que se comprovou a partir das análises da Tabela 27 onde observa-se um MPE com subestimação de 0,615% e NS de 0,977 para esta bacia.

A fórmula de George Ribeiro por sua vez, sinaliza que as menores bacias apresentam um melhor ajuste, pois trata-se de um método voltado para pequenas bacias rurais (SILVEIRA, 2005), fato que foi constatado frente as bacias analisadas. Neste aspecto a bacia do Jacú apresentou uma superestimação de 1,075% do erro médio e um Nash de 0,965, sendo o resultado mais satisfatório obtido entre os comparativos explicitados na Tabela 27.

Feita as devidas avaliações do Tempo de Concentração, a seleção adequada do TC para a utilização na modelagem em cada bacia sob estudo, baseou-se nos dados que melhor se ajustaram, explicitados na Tabela 27. Desta forma temos: a) para a bacia do Exu, observa-se que todos, exceto a formula de George Ribeiro, obtiveram um bom ajuste, apresentando uma maior assertividade com a fórmula de Dooge, sendo esta escolhida para as modelagens na bacia; b) para a bacia do Cachoeira apenas Kirpich e Hathaway apresentaram bons ajustes, sendo Kirpich o escolhido e c) para a bacia do Jacú, Kirpich e George Ribeiro obtiveram bons ajustes, sendo a última selecionada por apresentar um menor erro percentual e um melhor ajuste de NS.

5.3.4. Cálculo de Vazões Máximas e Avaliação de Desempenho dos Modelos por bacia hidrográfica

Realizado os devidos cálculos de Escoamento superficial e a seleção do TC mais ajustado, as condições técnicas para as modelagens foram geradas. Salienta-se que a análise de vazões máximas é por natureza um desafio na modelagem hidrológica, pois estão relacionados a variação espacial e temporal das precipitações e, em ambientes semiáridos, associados ao baixo tempo de concentração do escoamento existente (TUCCI, 2005).

A seguir, apresenta-se os resultados das vazões máximas observadas e estimadas, além das medidas quantitativas de desempenho dos modelos hidrológicos para cada bacia analisada. Ressaltando-se que para cada bacia, foram utilizados apenas três modelos hidrológicos. Tal distinção ocorre com o intuito de compatibilizar cada modelo com suas abrangências de aplicações, frente as diferentes proporções de área apresentada por cada bacia analisada.

- Bacia do Exú

Na Tabela 28 são apresentados os resultados das medidas quantitativas do desempenho dos modelos Curva Número, I Pai Wu e Racional Modificado para a bacia do Exú.

Tabela 28 – Desempenho dos modelos CN, IPW e RM para a bacia do Exú.

Modelos	E (m ³ /s) ⁽¹⁾	a ⁽²⁾	b ⁽²⁾	r ² ⁽²⁾	Viés	MPE ⁽³⁾	RMSE ⁽⁴⁾	NS ⁽⁵⁾
CN	26,1304	1,04	-0,0198	0,994	-1,189	-0,871	2,6597	0,9970
IPW	25,5568	1,06	-0,6222	0,961	-1,763	-1,291	3,9423	0,9935

RM	26,0731	1,09	-1,9110	0,964	-1,247	-0,913	2,7880	0,9967
OBS⁽¹⁾	27,3199	-	-	-	-	-	-	-

Fonte: Autor, 2023.

(1) Vazão média estimada em m³/s (E) e observada em m³/s (OBS); (2) coeficientes angular (a), linear (b) e de determinação (r²) da regressão linear entre dados observados e estimados; (3) erro médio percentual; (4) raiz do erro quadrático médio; (5) índice de eficiência de Nash-Sutcliffe.

Analisando os valores de vazão preditos pelos modelos para a bacia do Exú, percebe-se que todos os modelos hidrológicos apresentaram uma pequena subestimação em relação aos valores observados, da ordem de menos de 2 m³/s de erro médio, com o modelo CN apresentando a menor subestimação entre os valores na proporção de 1,189 m³/s.

Autores como Haan; Barfield e Hayes (1994); Mulla (2003) e Tucci (2005), apontam para a tendência natural de subestimação dos dados presentes no método Racional para bacias de maior porte. Os métodos IPW e RM, tratam-se de modificações do Racional que buscam ampliar a área de aplicação, no entanto, para a bacia analisada, tais considerações metodológicas intrínsecas em cada método não foi suficiente para a obtenção de valores mais ajustados.

Com relação ao erro médio percentual (MPE) nota-se uma diferença de erro de estimativa de maior grandeza entre CN e IPW, na ordem de 0,42. Já o modelo Racional Modificado apresentou valores intermediários de viés e MPE quando comparado aos demais.

A eficiência de Nash-Sutcliffe (NS) aponta uma melhor exatidão para os dados formulados pelo modelo CN em comparação aos demais analisados, corroborando com as estatísticas de erro obtidas na aplicação dos modelos.

Como forma de analisar graficamente a disposição dos dados, a Figura 24 apresenta a comparação entre as estimativas realizadas pelos modelos hidrológicos frente aos dados observados, bem como apresenta a dispersão dos dados estimados em cada modelagem.

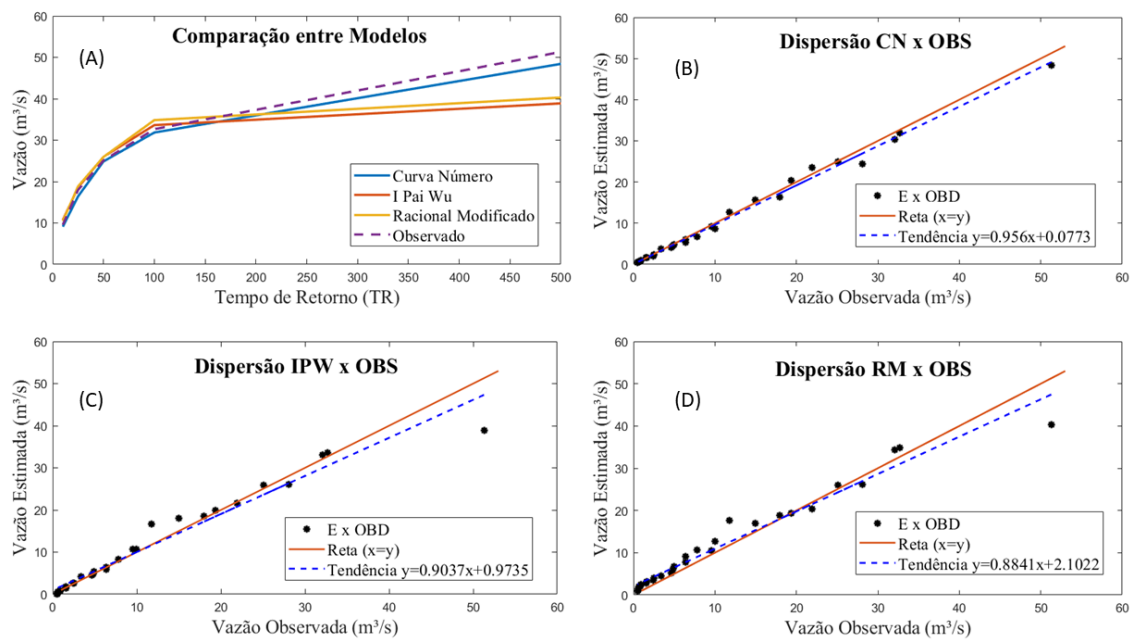


Figura 24 – Comparação entre as estimativas de vazões médias geradas pelos modelos hidrológicos de CN, IPW e RM frente aos dados observados, bem como a dispersão dos dados estimados em cada modelagem para a bacia do riacho Exú.

Fonte: Autor, 2023.

Nota-se com base na Figura 24, um comportamento semelhante entre as estimativas dos modelos frente aos dados observados. O modelo hidrológico CN obteve uma menor dispersão dos dados e um melhor coeficiente de determinação (0,994), como pode ser observado nas Figuras 24AB, o que corrobora com as estatísticas de erro apresentado na Tabela 28. O CN apresentou-se como o mais assertivo dentre os três modelos analisados, principalmente na assertividade para valores de pico extremos.

Cabe salientar que a CN foi estimada levando em consideração a condição de hidrológica de umidade antecedente III (Tabela 03) com o intuito de simular as condições de vazões de pico de ambientes semiáridos nos períodos de maior precipitação. Tal recuso se mostrou satisfatório na sua aplicação, pois gerou valores mais próximos aos observados, quando comparado as condições hidrológicas I e II, na qual os registros de vazões se tornam ínfimos em ambientes semiáridos, o que valida a condição III como a mais assertiva para determinação de vazões de pico.

Novamente torna-se importante ressaltar que, os modelos IPW e RM, compartilham da mesma base metodológica, pois ambos se baseiam na obtenção do *Runoff* como taxa de escoamento superficial, resguardando-se os ajustes inerentes a cada um deles. Portanto, estão sujeitos a padrões de comportamento semelhantes (YOGI,

2018), como pode ser observado na Figura 24CD, onde os gráficos de dispersão apresentam comportamentos análogos.

Destaca-se ainda que os modelos IPW e RM apresentaram baixa acuidade na predição de valores extremos e uma maior dispersão nos dados quando comparados com o CN. Na análise da Figura 24C é possível constatar que em um cenário de predições de até 10 m³/s, o IPW se apresenta como um modelo assertivo, sendo capaz de superar as estatísticas do RM e se aproximar dos valores preditos no CN, no entanto, para vazões acima deste valor a dificuldade de predição pelo modelo também é aumentada.

- Bacia do Cachoeira

Na Tabela 29 estão apresentados os resultados das medidas quantitativas do desempenho dos modelos I Pai Wu, Racional Modificado e TR-55 para a bacia do Cachoeira.

Tabela 29 – Desempenho dos modelos IPW, RM e TR-55 para a bacia do Cachoeira.

Modelos	E (m ³ /s) ⁽¹⁾	a ⁽²⁾	b ⁽²⁾	r ² ⁽²⁾	Viés	MPE ⁽³⁾	RMSE ⁽⁴⁾	NS ⁽⁵⁾
IPW	0,5899	1,516	-0,2732	0,969	-0,062	-1,888	0,1375	0,9861
RM	0,6166	1,106	-0,0436	0,987	-0,033	-1,067	0,0777	0,9955
TR-55	0,4984	2,035	-0,3758	0,992	-0,153	-4,697	0,3421	0,9138
O⁽¹⁾	0,6514	-	-	-	-	-	-	-

Fonte: Autor, 2023.

(1) Vazão média estimada em m³/s (E) e observada em m³/s (O); (2) coeficientes angular (a), linear (b) e de determinação (r²) da regressão linear entre dados observados e estimados; (3) erro médio percentual; (4) quadrado médio do erro; (5) índice de eficiência de Nash-Sutcliffe.

Com relação as modelagens realizadas a partir do banco de dados da bacia do Cachoeira, dentre os três modelos analisados, o RM foi o modelo que apresentou valores mías ajustados frente aos dados observados, com um erro médio de apenas 0,033 m³/s de subestimação, o que denota uma boa acuidade do modelo na predição das vazões médias de escoamento na bacia.

Ainda segundo as métricas de erro apresentadas na Tabela 29, o modelo TR-55 apresentam um desempenho pífio, com uma subestimação média cerca de cinco vezes superior ao apresentado pelo modelo RM, o que torna inviável a sua aplicação para as características da bacia em estudo.

Torna-se válido destacar que o parâmetro “viés”, que apresenta o erro médio das estimativas, tem os valores positivos (superestimativas) anulados no tocante aos valores negativos (subestimativas), necessitando, portanto, de métricas complementares bem como uma análise gráfica da disposição dos dados para a melhor compreensão do comportamento dos dados (NETO, 2013).

O RMSE, trata-se de uma métrica que eleva os desvios ao quadrado para impedir que os desvios positivos e negativos se cancelem. Essa medida também tende a penalizar os erros de maior magnitude, indicando potenciais outliers ou erros sequenciais (GUIMARÃES, 2011). Tal métrica apresentou as mesmas tendências de erro indicadas anteriormente, apontando o modelo RM como o mais assertivo (RMSE = 0,0777) se contrapondo aos modelos IPW e TR-55 com erros observados de RMSE na ordem de 0,1375 e 0,3421 m³/s, respectivamente.

As análises gráficas da disposição dos dados modelados frente aos dados observados, bem como a apresentação da dispersão dos dados estimados em cada modelagem para a bacia do Riacho Cachoeira encontram-se explicitadas na Figura 25 a seguir.

A análise da Figura 25A permite constatar que os modelos testados apresentaram estimativa de vazões médias para a bacia do Riacho Cachoeira abaixo dos valores observados, corroborando com o explicitado na Tabela 29.

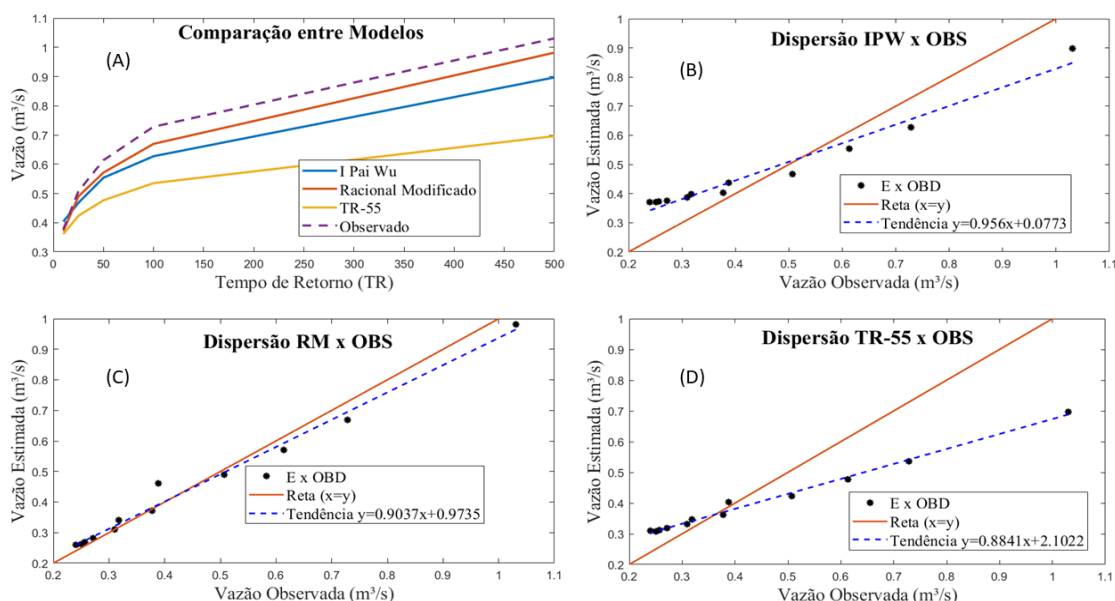


Figura 25 – Comparação entre as estimativas de vazões médias geradas pelos modelos hidrológicos de IPW, RM e TR-55 frente aos dados observados, bem como a dispersão dos dados estimados em cada modelagem para a bacia do riacho Cachoeira.

Fonte: Autor, 2023.

Quando se analisa o gráfico de dispersão do modelo TR-55 (Figura 25D) e o coeficiente de determinação apresentado na Tabela 29 para este modelo ($r^2 = 0,992$), detecta-se uma incongruência, uma vez que se observa um distanciamento entre os valores das retas “x” e “y”. Esta constatação indica que o modelo apresenta valores com baixa variância, acompanhado de uma taxa contínua de erros ao longo da amostra, denotando a dificuldade do modelo em obter valores assertivos para as vazões estimadas para a bacia do Riacho Cachoeira.

Comportamento semelhante também é observado no modelo IPW, no entanto, é possível afirmar que o modelo apresenta uma maior variabilidade de dados. Graficamente (Figura 25B) pode-se observar que o modelo superestima as menores vazões e subestima as maiores. Embora obtenha melhores parâmetros estatísticos, quando comparado ao TR-55, o modelo também não consegue estimar com qualidade as vazões médias quando comparadas aos valores observados.

A Figura 25C apresenta a dispersão dos dados obtidos pelo modelo RM, nota-se que o modelo acompanha bem toda a série de dados de vazões médias observados na bacia do Cachoeira. Com um NS de 0,9955 e um r^2 de 0,987, este modelo conseguiu responder bem com baixos índices de erro. Notas técnicas como o DAEE (1999), corroboram com tais resultados, pois já apontavam para o uso ótimo do modelo RM em bacias de porte semelhantes ao do riacho Cachoeira, indicando a viabilidade em sua aplicação.

- Bacia do Jacú

Na Tabela 30 estão apresentados os resultados das medidas quantitativas do desempenho dos modelos Racional Modificado, TR-55 e o Método Racional para a bacia do Jacú.

Tabela 30 – Desempenho dos modelos RM, TR-55 e Racional para a bacia do Jacú.

Modelos	E (m ³ /s) ⁽¹⁾	a ⁽²⁾	b ⁽²⁾	r ² ⁽²⁾	Viés	MPE ⁽³⁾	RMSE ⁽⁴⁾	NS ⁽⁵⁾
RM	0,5023	0,941	-0,1255	0,906	0,145	8,129	0,3246	0,7419
TR-55	0,3288	1,169	-0,0250	0,993	-0,028	-1,588	0,0634	0,9901
Racional	0,3349	1,265	-0,0678	0,982	-0,022	-1,247	0,0498	0,9939
O ⁽¹⁾	0,3572	-	-	-	-	-	-	-

Fonte: Autor, 2023.

(1) Vazão média estimada em (m³/s) (E) e observada em (m³/s) (O); (2) coeficientes angular (a), linear (b) e de determinação (r^2) da regressão linear entre dados observados e estimados; (3) erro médio percentual; (4) quadrado médio do erro; (5) índice de eficiência de Nash-Sutcliffe;

A análise comparativa entre as vazões médias estimadas pelos modelos em comparação com a vazão média obtida (Tabela 30), assim como para as demais bacias, permite constatar um comportamento distinto entre os modelos para a bacia do Riacho Jacu. Os modelos TR-55 e o Racional apresentaram resultados que subestimam a vazão; entretanto, apresentam um viés abaixo de $0,03 \text{ m}^3/\text{s}$ ao longo de toda a série de dados historicamente observados, denotando boa acuidade nas estimativas projetadas. Diferentemente, o modelo RM apresentou uma superestimação com um viés cuja magnitude de $0,145 \text{ m}^3/\text{s}$, desaconselha o uso do método para esta finalidade.

O RMSE que potencializa os maiores erros obtidos frente a toda série de dados analisados, ratifica o modelo Racional como o modelo mais assertivo para a predição dos dados para a bacia do Jacú, com o RMSE $0,0498 \text{ m}^3/\text{s}$, bem inferior quando comparado com o método RM ($0,3246 \text{ m}^3/\text{s}$). O índice de eficiência de Nash-Sutcliff indica um desempenho muito próximo entre o TR-55 e o Racional, no entanto as métricas de erro apontam este último modelo como o mais assertivo para as predições na bacia do Jacú.

A Figura 26 a seguir, apresenta graficamente o comportamento das vazões estimadas pelos modelos frente aos dados observados.

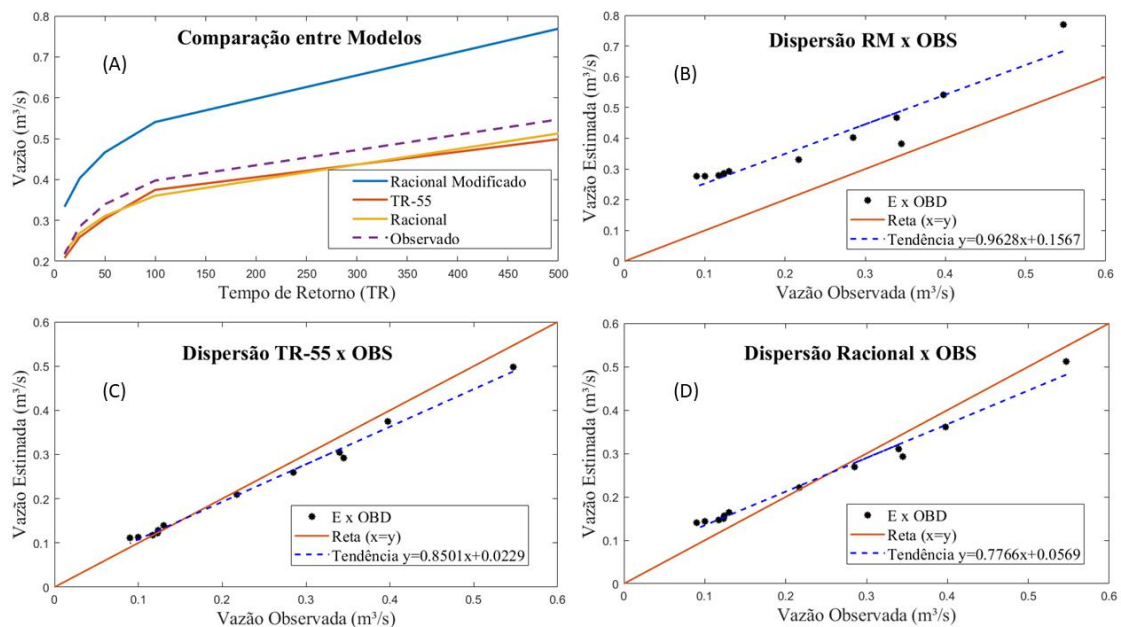


Figura 26 – Comparação entre as estimativas de vazão média realizadas pelos modelos hidrológicos de RM, TR-55 e Racional frente aos dados de vazão média observados, bem como a dispersão dos dados estimados em cada modelagem para a bacia do riacho Jacú.

Fonte: Autor, 2023.

Graficamente falando, os modelos TR-55 e Racional apresentaram comportamentos muito semelhantes entre si (Figura 26ACD) e ambos apresentaram valores próximos aos dados observados.

Observa-se que o método RM (Figuras 25AB) apresentou superestimativas ao longo de toda a série de dados, com o gráfico de dispersão ratificando o que foi explicitado pela estatística descrita na Tabela 30; destaca-se que o modelo segue uma tendência uniforme superestimando de forma proporcional todos os dados da série. Tal característica de erro faz com que o coeficiente de determinação se apresenta elevado ($r^2 = 0,906$), no entanto a eficiência de Nash-Sutcliffe (NS = 0,7419) indica que o modelo não é fidedigno frente aos dados observados, tornando-o incapaz de realizar as previsões.

O gráfico de dispersão apresenta o TR-55 como o modelo com o melhor coeficiente de determinação ($r^2 = 0,993$) por apresentar um agrupamento de dados mais homogêneos, no entanto, os erros inerentes ao TR-55 são mais acentuados em comparação ao Racional de acordo com os valores apresentados da Tabela 30.

6. CONCLUSÕES

Morfometricamente as bacias dos riachos Exú e Cachoeira apresentam formatos semelhantes, ambas com características mais alongadas, diferentemente da bacia do riacho Jacú que apresenta uma característica geométrica mais arredondada, indicando uma maior tendência a picos de escoamento e a propensão a formação de enchentes.

Todas as bacias apresentam canais com características transicionais. As bacias do Cachoeira e Jacú apresentaram boas densidade de drenagem, no entanto, o Exú apresentou uma densidade de drenagem deficitária, o que pode estar relacionado as condições pedológicas e geológicas existentes na bacia.

As bacias estudadas são caracterizadas como bacias agrícolas, distinguindo-se apenas em termos proporcionais de seus usos e cobertura do solo, apresentando as bacias riachos do Exú e Cachoeira uma maior concentração de Caatinga Arbustiva, indicando uma menor capacidade de interceptação do fluxo, diferente do que se constata para a bacia do riacho do Jacú, que apresenta uma maior concentração de Caatinga Arbórea, sugerindo um maior coeficiente de rugosidade, conseqüentemente, uma maior resistência ao escoamento.

O modelo teórico de probabilidade Gama foi o que melhor se ajustou aos dados das bacias do riacho Exu e Cachoeira, com o melhor ajuste para a bacia do riacho Jacu por conta da distribuição Log-Normal ao nível de significância de 5% de probabilidade.

As avaliações de desempenho indicaram que as modelagens já tradicionalmente difundidas apresentaram resultados mais consistentes, com as métricas de erro e eficiência indicando que para a bacia do riacho Exú a Curva Número, apresentou o melhor ajuste, com o modelo Racional Modificado sendo o mais adequado para as características da bacia do riacho Cachoeira e o modelo Racional a modelagem mais ajustada para as características da bacia do riacho Jacú.

Por fim, ressalta-se que este trabalho consolida o conhecimento das características hidrológicas existentes em microbacias do Pajeú no Sertão de Pernambuco, bem como define métodos adequados para a aplicação de modelos hidrológicos em ambientes semiáridos, colaborando com o desenvolvimento de técnicas de conservação do solo e água nesta região.

Recomenda-se a continuidade e o aprofundamento dos estudos aqui realizados em busca de ajustes que sejam pertinentes ao desenvolvimento de modelos cada vez mais adaptados e assertivos para o Semiárido brasileiro.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMEIDA, L.; SERRA, J. C. V. Modelos hidrológicos, tipos e aplicações mais utilizadas. **Revista FAE**, v. 20, n. 1, p. 129–137, jan. 2017.
- ANDRADE, C. W. L. DE et al. Modelagem hidrológica sob mudanças na cobertura vegetal de uma bacia hidrográfica no Nordeste do Brasil. **Journal of Environmental Analysis and Progress**, v. 2, n. 3, p. 239, 31 jul. 2017.
- ANDRADE, E. M. et al. Ecohydrology in a Brazilian tropical dry forest: thinned vegetation impact on hydrological functions and ecosystem services. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v. 27, 1 fev. 2020.
- APAC. **Relatório de situação de recursos hídricos do Estado de Pernambuco**. Recife: Companhia Editora de Pernambuco – Cepe, 2013.
- ARAÚJO, S. M. S. A região semiárida do nordeste do Brasil: Questões ambientais e possibilidades de uso sustentável dos recursos. **Revista Rios Eletrônica**, v. 5, n. 5, p. 89–98, 5 dez. 2011.
- ASSIS, J. M. O. DE. **Análise de Tendências de Mudanças Climáticas no Semiárido de Pernambuco**. Tese — Recife: Universidade Federal de Pernambuco, 2012.
- BECKER, A.; BRAUN, P. Disaggregation, aggregation and spatial scaling in hydrological modelling. **Journal of Hydrology**, v. 217, n. 3–4, p. 239–252, 30 abr. 1999.
- BERNARDI, E. C. S. et al. Bacia Hidrográfica como Unidade de Gestão Ambiental. **Ciência Naturais e Tecnológicas**, v. 13, n. 2, p. 159–168, 2013.
- BERTOL, I.; ALMEIDA, J. A. Tolerância de perda de solo por erosão para os principais solos do estado de Santa Catarina. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 24, n. 3, p. 657–668, set. 2000.
- BERTONI, J. C.; TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: Ciência e aplicação**. 4. ed. Porto Alegre: UFRGS, 2007.
- BOCHET, E.; GARCÍA-FAYOS, P. Factors Controlling Vegetation Establishment and Water Erosion on Motorway Slopes in Valencia, Spain. **Restoration Ecology**, v. 12, n. 2, p. 166–174, 2004.

BRAGA, J. C. **Modelo hidrológico de parâmetros distribuídos para obtenção do hidrograma de escoamento superficial em qualquer posição de uma bacia hidrográfica.** Dissertação—[s.l.] Universidade Federal de Viçosa, 2000.

BRANDÃO, V. S. et al. **Infiltração da Água no Solo.** 3. ed. Viçosa: UFV, 2006.

CANTALICE, J. R. B. et al. Relationship between bedload and suspended sediment in the sand-bed Exu River, in the semi-arid region of Brazil. **Hydrological Sciences Journal-Journal des Sciences Hydrologiques**, v. 58, n. 8, p. 2013, 2013.

CANTALICE, J. R. B. et al. Hydraulic roughness due to submerged , emergent and fl exible natural vegetation in a semiarid alluvial channel. **Journal of Arid Environments**, v. 114, p. 1–7, 2015.

CHIN, D. A. Fundamentals of Surface-Water Hydrology II: Runoff. Em: **Water-resources engineering.** Miami: Fourth Edition, 2000. p. 669–749.

CHRISTOFOLETTI, A. Análise morfométrica de bacias hidrográficas. Em: **Notícia Geomorfológica.** São Paulo: [s.n.]. v. 18p. 35–64.

CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia.** 2. ed. São Paulo: Blucher, 1980.

CHRISTOFOLETTI, ANTÔNIO. **Modelagem de sistemas ambientais.** São Paulo: Edgard Blucher, 1999.

COLLISCHONN, B. **Uso de precipitação estimada pelo satélite TRMM em modelo hidrológico distribuído.** Tese—Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2006.

DAEE. **Diretrizes de projeto para estudos hidrológicos: Método Racional.** São Paulo Departamento de Águas e Energia Elétrica, , 1999.

DAEE. **GUIA PRÁTICO PARA PROJETOS DE PEQUENAS OBRAS HIDRÁULICAS.** São Paulo Departamento de Águas e Energia Elétrica, , 2005.

EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos.** Rio de Janeiro Centro Nacional de Pesquisas de Solos, , 2006.

EMBRAPA. Reunião Técnica de Levantamento de Solo. Em: **Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos.** Rio de Janeiro: [s.n.]. p. 83.

EMBRAPA. **LEVANTAMENTO DE RECONHECIMENTO DE BAIXA E MÉDIA INTENSIDADE DOS SOLOS DO ESTADO DE PERNAMBUCO**. Boletim de ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA SOLOS, 2000.

FEITOSA, A. **ZONEAMENTO DE PEQUENAS BACIAS HIDROGRÁFICAS E CARACTERIZAÇÃO DE VÁRZEAS NA BACIA DO PAJEÚ, PERNAMBUCO**. Tese—Recife: Universidade Federal de Pernambuco, 2012.

FEITOSA, A.; SANTOS, B. DOS; ARAÚJO, M. DO S. B. DE. Morphometric Characterization and Identification of Areas Susceptible to Erosion on the Pajeú River Watershed. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 4, n. 4, p. 820–836, 22 jan. 2011.

FELIX, V. DE S. **Representação dos processos hidrológicos em bacia hidrográfica do semiárido paraibano com modelagem hidrológica distribuída**. Dissertação—[s.l.] Universidade Federal da Paraíba, 2015.

FILHO, J. A. DA S. et al. Drag coefficient and hydraulic roughness generated by an aquatic vegetation patch in a semi-arid alluvial channel. **Ecological Engineering**, v. 141, p. 105598, 2019.

FILHO, J. A. DA S. **Rugosidade hidráulica gerada por arranjo vegetal de um canal aluvial semiárido**. Dissertação—[s.l.] Universidade Federal Rural de Pernambuco, 2019.

FREITAS, M. A. DE S. Modelos Diários Chuva-Vazão Em Bacias Do Semi-Árido Brasileiro. **Revista Tecnologia**, n. 15, p. 31–38, dez. 1994.

GALBETTI, M. V. **Comparação dos modelos hidrológicos presentes no SSD ABC6 aplicados a uma bacia urbana**. Dissertação—São Carlos: Universidade de São Paulo, 8 jul. 2015.

GENOVEZ, A. M. **Avaliação dos métodos de estimação das vazões de enchente para pequenas bacias rurais do Estado de São Paulo**. Tese—Campinas: Universidade Estadual de Campinas, 1991.

GENOVEZ, A. M. Vazões Máximas. Em: PAIVA, J. B. D. DE; PAIVA, E. M. C. D. DE (Eds.). **Hidrologia aplicada a gestão de pequenas bacias hidrográficas**. 1. ed. Porto Alegre: ABRH, 2003. p. 628.

GENOVEZ, A.; NETO, F.; SARTORI, A. 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. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 10, n. 4, p. 5–18, 2005.

GÓES, V. C. **Simulação Hidrológico-Hidrodinâmica Integrada ao Geoprocessamento para Avaliação da Macrodrenagem em Centros Urbanos**. Tese—Recife: Universidade Federal de Pernambuco, 2009.

GOLDENFUM, J. A.; TUCCI, C. E. M. **Hidrologia de águas superficiais**. 3. ed. Brasília: ABEAS, 1998.

GUIMARÃES, R. C. **Probabilidade e estatística aplicado à hidrologia**. 1 Lisboa Departamento de Engenharia Rural, Universidade de Évora, , 2011.

GÜNTNER, A.; BRONSTERT, A. Representation of landscape variability and lateral redistribution processes for large-scale hydrological modelling in semi-arid areas. **Journal of Hydrology**, v. 297, n. 1–4, p. 136–161, 2004.

HAAN, C. T.; BARFIELD, B. J.; HAYES, J. C. Hydrologic Modeling. Em: **Design Hydrology and Sedimentology for Small Catchments**. [s.l.] Elsevier, 1994. p. 455–474.

HORN, D. L.; SCHWAB, G. O. Evaluation of Rational Runoff Coefficients for Small Agricultural Watersheds. **Transactions of the ASAE**, v. 6, n. 3, p. 0195–0198, 1963.

JENKIS, A.; PERERS, N. E.; RODHE, A. Hydrology. Em: MOLDAN, B.; CERNY, J. (Eds.). **Biochemistry of Small Catchments: A Tool for Environmental Research**. Chichester: John Wiley and Sons, 1994. p. 31–54.

LINO, J. F. DE L. **Análise da dinâmica hidrossedimentológica da bacia hidrográfica do Rio Preto (SC) com o modelo SWAT**. Dissertação—Santa Catarina: Universidade Federal de Santa Catarina, 2009.

LINSLEY, J. R. K.; KOHLER, M. A.; PAULHUS, J. L. H. **Hydrology for engineers**. 3. ed. Nova York: McGraw-Hill Education, 1975.

LORANDI, R.; CANÇADO, C. J. Parâmetros Físicos para o Gerenciamento de Bacias Hidrográficas. Em: SCHIAVETTI, A.; CAMARGO, A. (Eds.). **Conceitos de Bacias Hidrográficas - Teorias e Aplicações**. 1. ed. Ilhéus: Editus, 2002. v. 1p. 33–65.

MOHAMOUD, Y. M.; EWING, L. K.; BOAST, C. W. Small plot hydrology: I. Rainfall infiltration and depression storage determination. **Transactions of the ASAE**, v. 33, n. 4, p. 1121–1131, 1990.

MOLLE, F. **Marcos históricos e reflexões sobre a acudagem e seu aproveitamento**. 1. ed. Recife: SUDENE, 1994. v. 30

MONTE-MOR, R. C. A. **Análise de processos hidrológicos em bacias de rios intermitentes no semiárido mineiro**. Tese—Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 12 jul. 2012.

MONTENEGRO, S.; RAGAB, R. Impact of possible climate and land use changes in the semi arid regions: A case study from North Eastern Brazil. **Journal of Hydrology**, v. 434–435, p. 55–68, abr. 2012.

MOR, R. et al. Estabilidade Temporal da Distribuição Espacial da Umidade do Solo em uma Bacia Intermitente no Semiárido de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 17, n. 3, p. 101–113, 2012.

MULLA, D. J. Mathematical Models of Small Watershed Hydrology and Applications. **Journal of Environmental Quality**, v. 32, n. 1, p. 374–374, jan. 2003.

NASCIMENTO, C. M. L. DO. **Avaliação das relações chuva-vazão em telhados verdes modulares sob chuva simulada induzida**. Dissertação—Rio de Janeiro: Universidade Estadual do Rio de Janeiro, 2015.

NETO, J. G. C. **Distribuições estatísticas e correlações temporais de alguns parâmetros hidrológicos de uma bacia hidrográfica semiárida de Pernambuco**. Dissertação—Recife: Universidade Federal Rural de Pernambuco, 2013.

NRCS, N. R. C. S. Hydrologic Soil Groups. Em: **Soil Conservation Service National Engineering Handbook**. Part 630 H ed. [s.l.] United States Department of Agriculture, 1972.

PARAÍBA. **Atualização do diagnóstico florestal do Estado da Paraíba**. João PessoaSUDEMA - Centro de Estudos Técnicos e Científicos da Paraíba, , 2004.

PERNAMBUCO. **Atualização do plano estadual de recursos hídricos – PERH**. Recife APAC, , 2019.

PINTO, N. DE S. et al. **Hidrologia Básica**. São Paulo: Edgard Blucher, 1976.

PIRES, J. S. R.; SANTOS, J. E. DOS; DEL PRETTE, M. E. A Utilização do Conceito da Bacia Hidrográfica para a Conservação dos Recursos Naturais. Em: SCHIAVETTI, A.; CAMARGO, A. (Eds.). **Conceitos de Bacias Hidrográficas - Teorias e Aplicações**. 1. ed. Ilhéus: Editus, 2002. v. 1p. 261–291.

PISCOYA, V. C. **Manejo Em Bacia Hidrográfica Do Riacho Jacu: Produção De Sedimentos, Dimensionamento De Faixa De Vegetação Ciliar E Salinidade Da Água Em Barragem Subterrânea**. Tese—Recife: Universidade Federal Rural de Pernambuco, 9 jan. 2012.

PRUSKI, F. F.; BRANDÃO, V. DOS S.; SILVA, D. D. DA. **Escoamento Superficial**. 2. ed. Viçosa: Editora UFV, 2004.

RAMALHO, M. F. DE J. L.; GUERRA, A. J. T. O risco climático da seca no semiárido brasileiro. **Territorium**, v. 25, n. 25 (I), p. 61–74, 13 dez. 2017.

RIBEIRO, E. P. **Mudanças ambientais e desertificação na bacia hidrográfica do rio Pajeú**. Tese—Recife: Universidade Federal de Pernambuco, 9 mar. 2016.

ROCHA, J. S. M.; KURTS, S. M. J. M. **Manual de manejo integrado de bacias hidrográficas**. 4. ed. Santa Maria: UFSM/CCR, 2001.

RODRIGUES, J. O. et al. Respostas hidrológicas em pequenas bacias na região semiárida em função do uso do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 17, n. 3, p. 312–318, mar. 2013.

SANTOS, C. et al. Influence of the Catchment Discretization on the Optimization of Runoff-Erosion Modelling. **Journal of Urban and Environmental Engineering**, v. 5, n. 2, p. 91–102, 31 dez. 2011.

SANTOS, D. P. **Monitoramento e Modelagem de Processos Hidrológicos como Base para a Gestão de Recursos Hídricos em Região Semiárida**. Tese—Recife: Universidade Federal Rural de Pernambuco, 2018.

SANTOS, A. M. DOS et al. Análise morfométrica das sub-bacias hidrográficas Perdizes e Fojo no município de Campos do Jordão, SP, Brasil. **Revista Ambiente e Água**, v. 7, n. 3, p. 195–211, 2012.

SANTOS, B. V. C. D. DOS; FONTES, A. S. Modelagem Hidrológica de Sistema Hídrico Complexo do Semiárido Baiano. **Revista Eletrônica de Gestão e Tecnologias Ambientais**, v. 2, n. 1, p. 152, 4 set. 2014.

SANTOS, C. G. DOS. **EROSÃO HÍDRICA E TAXA DE ENTREGA DE SEDIMENTOS NA BACIA HIDROGRÁFICA SEMIÁRIDA DO RIACHO EXÚ, PE**. Tese—Recife: Universidade Federal Rural de Pernambuco, 29 ago. 2013.

SANTOS, L. C. C. **ESTIMATIVA DE VAZÕES MÁXIMAS DE PROJETO POR MÉTODOS DETERMINÍSTICOS E PROBABILÍSTICOS**. Tese—Vitória: Universidade Federal do Espírito Santo, 31 out. 2010.

SCHULER, A. et al. Propriedades Físicas dos Solos na Parametrização de um Modelo Hidrológico. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 8, n. 1, p. 61–70, 2003.

SCHWAB, G. O. et al. **Soil and water conservation engineering**. New York: John Wiley and Sons, 1981. v. 9

SCS, U. DESIGN HYDROGRAPHS. Em: MCKEEVER, V.; OWEN, W.; RALLISON, R. (Eds.). **NATIONAL ENGINEERING HANDBOOK**. 4. ed. [s.l: s.n.]. p. 127.

SEN, Z. **Wadi Hydrology**. 1. ed. Istambul: CRC Press, 2008. v. 1

SILVA, B. et al. Chuvas Intensas em Localidades do Estado de Pernambuco. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 17, n. 3, p. 135–147, 2012.

SILVA, J. M. A. et al. Metodologia para obtenção do hidrograma de escoamento superficial em encostas e canais. Parte I: desenvolvimento e avaliação. **Engenharia Agrícola**, v. 26, n. 3, p. 695–703, dez. 2006.

SILVA, R. M.; SANTOS, C. A. G. Sediment yield prediction through the use of a runoff-erosion model coupled to a GIS. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 12, n. 83, p. 520–526, 2008.

SILVEIRA, A. Desempenho de Fórmulas de Tempo de Concentração em Bacias Urbanas e Rurais. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 10, n. 1, p. 5–29, 3 mar. 2005.

SOARES, A.; PAZ, A.; PICCILLI, D. Assessment of rainfall estimates of TRMM satellite on Paraíba state. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 21, n. 2, p. 288–299, 1 abr. 2016.

SOARES, D. B.; NOBREGA, R. S.; GALVÍNIO, J. D. INDICADORES CLIMÁTICOS DE DESERTIFICAÇÃO NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PAJEÚ, PERNAMBUCO. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 22, n. 14, p. 363–380, jun. 2018.

- STUDART, T. M. C.; CAMPOS, N. **Apostila de Hidrologia**. Fortaleza: [s.n.].
- TOMAZ, P. Capítulo 2 - Método Racional. Em: **Curso de Manejo de Águas Pluviais**. 1. ed. São Paulo: [s.n.]. v. 1p. 349.
- TR-55. **Urban Hydrology for Small Watersheds**. USDA/NRCS, , 1986.
- TUCCI, C. E. M. **Modelos hidrológicos**. 2. ed. Porto Alegre: ABRH, 2005.
- TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: Ciência e aplicação**. 4. ed. Porto Alegre: UFRGS/ABRH, 2012.
- TUCCI, C. E. M.; PORTO, R. L. L.; BARROS, M. T. L. DE. **Drenagem urbana**. 1ª ed. Porto Alegre: ABRH, 1995.
- VETTORAZZI, C.; CRUCIANI, D.; MACHADO, R. Simulação de Escoamento em uma Microbacia Hidrográfica Utilizando Técnicas de Modelagem e Geoprocessamento. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 8, n. 1, p. 147–155, 2003.
- VIEIRA, L. **Aplicação de modelos hidrológicos com SIG em obras civis lineares**. Tese—São Carlos: Universidade de São Paulo, 25 set. 2015.
- VILLELA, S. M.; MATTOS, A. **A Hidrologia Apliada**. São Paulo: Mc Graw-vill do Brasil, 1975.
- WHEATER, H. S.; SOROOSHIAN, S.; SHARMA, H. D. **Hydrological Modelling in Arid and Semi-Arid Areas**. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- YOGI, F. **Parâmetros de estudo em vazão de projeto para renovação de outorga de barramento**. Dissertação—Sorocaba: Universidade Federal de São Carlos, 27 jul. 2018.
- YOUNG, M. D. B. et al. Parched–Thirst: development and validation of a process-based model of rainwater harvesting. **Agricultural Water Management**, v. 55, n. 2, p. 121–140, jun. 2002.

Anexo 01- Descritivo dos Grupos de solos e seu respectivo Grupo Hidrológico.

Grupo de Solo	Características	Grupo Hidrológico
A10	Ass.: SOLOS ALUVIAIS tex. indisc. + CAMBISSOLO Ta e Tb tex. méd. subs. sed. fluv., ambos soló. e não soló. sód. e não sód. + SOLOS ALUVIAIS sal. e/ou sód. tex. indisc.; todos EUT. A fr. e mod. caat. hiper. de vz. com e sem carna. rel. pl. (50-30-20 %).	C
A11	Ass.: SOLOS ALUVIAIS sal. e/ou sód. + SOLOS ALUVIAIS soló. e não soló., ambos tex. indisc. + CAMBISSOLO Ta e Tb soló. e não soló. tex. méd. sed. fluv.; todos EUT. A fr. e mod. caat. hiper. de vz. com e sem carna. rel. pl. (40-30-30 %).	C
A6	Ass.: SOLOS ALUVIAIS sal. tex. indisc. + CAMBISSOLO Tb e Ta tex. méd. e arg. sed. fluv.; ambos EUT. A mod. soló. e não soló. caat. hipo. e/ou fl. cad. de vz. rel. pl. (70-30 %).	C
NC8	Ass.: BRUNO NÃO CÁLCICO não vér. e vér. + SOLOS LITÓLICOS EUT. tex. méd. com casc. a cascal. subs. gn. e xt.; ambos rel. s.ond. e pl. + PLANOSSOLO e SOLONETZ SOLODIZADO rel. pl. e s.ond.; todos A mod. caat. hiper.(45-30-25 %).	C
NC9	Ass.: BRUNO NÃO CÁLCICO não vér. e vér. + SOLOS LITÓLICOS EUT. tex. méd. com casc. a cascal. subs. gn. e xt.; ambos A mod. caat. hiper. rel. s.ond. e pl. (70-30 %).	C
PS12	Ass.: PLANOSSOLO e SOLONETZ SOLODIZADO + SOLOS LITÓLICOS EUT. tex. are. e méd. com casc. a cascal.	D

	subs. gr. e gn. + REGOSSOLO EUT. e DIST. soló. e não soló.; todos A fr. e mod. caat. hiper. rel. s.ond. e pl. + AFLORAMENTOS DE ROCHA. (40-20-20-20 %).	
PS15	Ass.: PLANOSSOLO e SOLONETZ SOLODIZADO + SOLOS LITÓLICOS EUT. tex. méd. com casc. a cascal. subs. gn., xt., gr. e grd.; ambos A fr. e mod. caat. hiper. rel. s.ond. e pl. (55-45 %).	C
PV43	Ass.: PODZÓLICO VERMELHO-AMARELO tex. méd./méd. e arg. com casc. a cascal. + CAMBISSOLO tex. méd. e arg. com e sem casc. a cascal. epiped. e não subs. gr., gn. e xt., ambos Tb p.prof. + SOLOS LITÓLICOS tex. méd. com casc. a cascal. subs. gn. e gr.; todos EUT. A mod. fl. cad. e/ou caat. hipo. rel. s.ond. e ond.+ AFLORAMENTOS DE ROCHA. (35-25-25-15 %).	C
PV50	Ass.: PODZÓLICO VERMELHO-AMARELO EUT. e DIST. p.prof. + PODZÓLICO VERMELHO-ESCURO EUT. prof. e p.prof., ambos Tb tex. méd./méd. e arg. epiped. e não rel. s.ond. e pl. + SOLOS LITÓLICOS EUT. tex. méd. com casc. a cascal. rel. s.ond. e ond. subs. gn., xt. e fil.; todos A mod. caat. hipo. (50-30-20 %).	C
PV58	Ass.: PODZÓLICO VERMELHO-AMARELO Tb prof. e p.prof. tex. méd./méd. e arg. com e sem casc. a cascal. + SOLOS LITÓLICOS tex. méd. com casc. a cascal. subs. gn. e xt., ambos EUT. rel. s.ond. e pl. + PLANOSSOLO e SOLONETZ SOLODIZADO rel. pl. e s.ond.; todos A fr. e mod. caat. hiper. (50-30-20 %).	C
PV'6	Ass.: PODZÓLICOS VERMELHO-AMARELO e VERMELHOESCURO Tb e Ta raso e p.prof. tex. méd./méd. e arg. com casc. a cascal. + SOLOS	C

	LITÓLICOS tex. méd. com casc. a cascal. subs. xt., gn. e later., ambos EUT. rel. ond. e f.ond. + BRUNO NÃO CÁLCICO não vér. e vér. rel. s.ond. a f.ond.; todos A mod. epiped. e não caat. hipo. e/ou hiper. (50-30-20 %).	
PV62	Ass.: PODZÓLICO VERMELHO-AMARELO tex. méd./méd. e arg. com casc. a cascal. + CAMBISSOLO tex. méd. e arg. com casc. a cascal. subs. gn.-anf., ambos Tb e Ta EUT. raso e p.prof. epiped. e não + BRUNO NÃO CÁLCICO vér. + SOLOS LITÓLICOS EUT. tex. méd. com casc. a cascal. subs. anf., gn. e bt.-xt.; todos A fr. e mod. caat. hiper. rel. s.ond. e ond. (30-30-20-20 %).	C
PV64	Ass.: PODZÓLICO VERMELHO-AMARELO Tb e Ta EUT. raso e p.prof. tex. méd./méd. e arg. com e sem casc. a cascal. + BRUNO NÃO CÁLCICO vér. e não vér. + SOLOS LITÓLICOS EUT. tex. méd. com casc. a cascal. subs. xt. e gn.; todos A fr. e mod. caat. hiper. rel. s.ond. (40-30-30 %).	C
R22	Ass.: SOLOS LITÓLICOS EUT. A mod. e fr. tex. méd. caat. hipo. rel. ond. e s.ond. subs. gn., gr. e grd. + AFLORAMENTOS DE ROCHA. (70-30 %).	D
R28	Ass.: SOLOS LITÓLICOS tex. méd. rel. ond. a mont. subs. gn., gr., mig. e grd. + PODZÓLICO VERMELHO-AMARELO Tb e Ta raso e p.prof. tex. méd./méd. e arg. com casc. a cascal. rel. ond. e f.ond.; todos EUT. A mod. caat. hipo. e/ou fl. cad. + AFLORAMENTOS DE ROCHA. (60-20-20 %).	D

R40A	Ass.: SOLOS LITÓLICOS tex. méd. com casc. a cascal. subs. gn., gr. e grd. + PODZÓLICOS VERMELHO-AMARELO e VERMELHOESCURO Tb p.prof. tex. méd./arg. com e sem casc. a cascal. epiped. e não; ambos EUT. A mod. caat. hipo. e/ou hiper. rel. ond. e f.ond. + AFLORAMENTOS DE ROCHA. (50-30-20 %).	D
R45	Ass.: SOLOS LITÓLICOS tex. méd. com casc. a cascal. rel. f.ond. e mont. subs. gr. e qtz. + PODZÓLICO VERMELHO-AMARELO Tb e Ta raso e p.prof. tex. méd./méd. e arg. com casc. a cascal. rel. ond. a mont.,ambos EUT. A fr. e mod. caat. hipo. e/ou hiper.+AFLORAMENTOS DE ROCHA.(40-30-30%).	D
R48	Ass.: SOLOS LITÓLICOS EUT. tex. méd. com casc. a cascal. subs. gr., gn. e xt. + BRUNO NÃO CÁLCICO não vér. e vér. + PLANOSSOLO e SOLONETZ SOLODIZADO; todos A fr. e mod. caat. hiper. rel. s.ond. e pl. (50-30-20 %).	D
R49	Ass.: SOLOS LITÓLICOS EUT. tex. méd. com casc. a cascal. subs gn. e xt. + BRUNO NÃO CÁLCICO não vér. e vér.; ambos A fr. e mod. caat. hiper. rel. pl. e s.ond. (60-40 %).	D
R56	Ass.: SOLOS LITÓLICOS EUT. A fr. e mod. tex. méd. com casc. a cascal. caat. hiper. rel. s.ond. e ond. subs. gn., gr., xt., mig. e grd. + AFLORAMENTOS DE ROCHA. (75-25 %).	D
R60	Ass.: SOLOS LITÓLICOS tex. méd. com casc. a cascal. rel. ond. e f.ond. subs. gn., gr. e mig. + PODZÓLICO VERMELHO-AMARELO Tb e Ta raso e p.prof. tex. méd./méd. e arg. com casc. a cascal. rel. s.ond. a	D

	f.ond., ambos EUT. A fr. e mod. caat. hiper. + AFLOUMENTOS DE ROCHA. (45-35-20 %).	
R66	Ass.: SOLOS LITÓLICOS tex. méd. e silt. com casc. rel. s.ond. e ond. subs. xt., fil. e gn. + PODZÓLICOS VERMELHO-AMARELO e VERMELHO - ESCURO Tb e Ta raso e p.prof. tex. méd./méd. e arg. com casc. a cascal. epiped. e não rel. s.ond.; todos EUT. A fr. e mod. caat. hiper. (60-40 %).	D
R73	Ass.: SOLOS LITÓLICOS EUT. e DIST. tex. are. e méd. rel. ond. e f.ond. subs. gn., qtz., gr., xt. e mig. + PODZÓLICO VERMELHOAMARELO Tb e Ta EUT. raso e p.prof. tex. méd./méd. e arg. com casc. a cascal. rel. s.ond. a f.ond., ambos A fr. e mod. caat. hiper.+AFLOUMENTOS DE ROCHA.(50-25-25 %).	D
R74	Ass.: SOLOS LITÓLICOS EUT. e DIST. tex. are. e méd. rel. ond. a mont. subs. gn., qtz., gr., xt. e mig. + PODZÓLICO VERMELHOAMARELO Tb e Ta EUT. raso e p.prof. tex. méd./méd. e arg. com casc. a cascal. rel. s.ond. a f.ond., ambos A fr. e mod. caat. hiper. + AFLOUMENTOS DE ROCHA. (50-25-25%).	D
RE17	Ass.: REGOSSOLO + PODZÓLICOS ACINZENTADO e AMARELO Tb abr. e não abr. tex. are. e méd./méd. e arg.; ambos DIST. e EUT. A fr. e mod. caat. hipo rel. s.ond. + AFLOUMENTOS DE ROCHA. (45- 30-25 %).	C
RE25	Ass.: REGOSSOLO EUT. e DIST. soló. e não soló. rel. pl. e s.ond. + SOLOS LITÓLICOS EUT. tex. are. e méd. com casc. a cascal. rel. s.ond. e pl. subs. gr. e gn. + PLANOSSOLO e SOLONETZ SOLODIZADO rel. pl. e s.ond.; todos A fr. e mod. caat. hiper. (50-25-25 %)	C

RE'5	Ass.: REGOSSOLO DIST. e EUT. e AREIAS QUARTZOSAS com e sem frag. tex. are. e méd. + PODZÓLICOS AMARELO e VERMELHOAMARELO Tb DIST. e EUT. tex. are. e méd./méd. + SOLOS LITÓLICOS EUT. e DIST. tex. are. e méd. com casc. a cascal. subs. gr., gn. e qtz.; todos A fr. e mod. caat. hiper. rel. pl. e s.ond. (50-25-25 %).	C
	NEOSSOLO FLUVICO	D
	NEOSSOLO LITOLICO	D

Fonte: Adaptado de (EMBRAPA, 2000).

Anexo 02 – Tabelas dos Coeficientes de Deflúvio das bacias analisadas

Bacia do Riacho Exu

Uso do Solo	Agrupamento de Solos	Grupo Hidrológico	Área (km ²)	CN	C		
					TR 10	TR 25	TR 50
Solo Descoberto	R60	D	0,179447	94	0,706227	0,7066114	0,70693545
Solo Descoberto	PV50	C	2,61231	91	0,686227	0,6866114	0,68693545
Solo Descoberto	R74	D	0,004754	94	0,706227	0,7066114	0,70693545
Solo Descoberto	R66	D	7,347048	94	0,706227	0,7066114	0,70693545
Solo Descoberto	NC8	C	0,150926	91	0,686227	0,6866114	0,68693545
Solo Descoberto	PV64	C	0,069852	91	0,686227	0,6866114	0,68693545
Agricultura	RE25	C	1,18368	88	0,491137	0,493057	0,494677252
Agricultura	R73	D	0,647179	91	0,521137	0,523057	0,524677252
Agricultura	R60	D	6,474512	91	0,521137	0,523057	0,524677252
Agricultura	PV62	C	4,106353	88	0,491137	0,493057	0,494677252
Agricultura	RE'5	C	14,484883	88	0,491137	0,493057	0,494677252
Agricultura	PV50	C	24,454832	88	0,491137	0,493057	0,494677252
Agricultura	R48	D	7,291287	91	0,521137	0,523057	0,524677252
Agricultura	PV58	C	3,770727	88	0,491137	0,493057	0,494677252
Agricultura	R40A	D	0,569089	91	0,521137	0,523057	0,524677252
Agricultura	R74	D	0,227856	91	0,521137	0,523057	0,524677252
Agricultura	R45	D	0,798974	91	0,521137	0,523057	0,524677252
Agricultura	R66	D	35,961672	91	0,521137	0,523057	0,524677252
Agricultura	NC8	C	60,313415	88	0,491137	0,493057	0,494677252
Agricultura	PV64	C	9,453665	88	0,491137	0,493057	0,494677252
Agricultura	A11	C	0,494834	88	0,491137	0,493057	0,494677252
Caatinga Arbustiva	RE25	C	14,798705	77	0,157183	0,1625596	0,167096305
Caatinga Arbustiva	R73	D	2,815754	83	0,187183	0,1925596	0,197096305
Caatinga Arbustiva	R60	D	19,803588	83	0,187183	0,1925596	0,197096305
Caatinga Arbustiva	PV62	C	5,476832	77	0,157183	0,1625596	0,167096305
Caatinga Arbustiva	RE'5	C	16,237392	77	0,157183	0,1625596	0,167096305
Caatinga Arbustiva	PV50	C	29,650641	77	0,157183	0,1625596	0,167096305
Caatinga Arbustiva	R48	D	7,137235	83	0,187183	0,1925596	0,197096305
Caatinga Arbustiva	PV58	C	11,898647	77	0,157183	0,1625596	0,167096305
Caatinga Arbustiva	R40A	D	2,615822	83	0,187183	0,1925596	0,197096305
Caatinga Arbustiva	R74	D	1,847841	83	0,187183	0,1925596	0,197096305
Caatinga Arbustiva	R45	D	0,733563	83	0,187183	0,1925596	0,197096305
Caatinga Arbustiva	R66	D	52,501413	83	0,187183	0,1925596	0,197096305
Caatinga Arbustiva	NC8	C	91,435064	77	0,157183	0,1625596	0,167096305
Caatinga Arbustiva	PV64	C	23,194927	77	0,157183	0,1625596	0,167096305
Caatinga Arbustiva	PS12	D	0,153024	83	0,187183	0,1925596	0,197096305
Caatinga Arbustiva	A11	C	0,734076	77	0,157183	0,1625596	0,167096305
Caatinga Arbórea	R73	D	4,48975	77	0,00925	0,0113627	0,013144977
Caatinga Arbórea	R60	D	6,262032	77	0,00925	0,0113627	0,013144977
Caatinga Arbórea	RE'5	C	0,679166	70	0,011137	0,013057	0,014677252
Caatinga Arbórea	R28	D	1,193964	77	0,00925	0,0113627	0,013144977
Caatinga Arbórea	PV50	C	24,699597	70	0,011137	0,013057	0,014677252

Caatinga Arbórea	R48	D	0,03458	77	0,00925	0,0113627	0,013144977
Caatinga Arbórea	PV58	C	1,961852	70	0,011137	0,013057	0,014677252
Caatinga Arbórea	R40A	D	0,350747	77	0,00925	0,0113627	0,013144977
Caatinga Arbórea	R74	D	2,087806	77	0,00925	0,0113627	0,013144977
Caatinga Arbórea	R45	D	22,984929	77	0,00925	0,0113627	0,013144977
Caatinga Arbórea	R66	D	21,773042	77	0,00925	0,0113627	0,013144977
Caatinga Arbórea	NC8	C	7,489168	70	0,011137	0,013057	0,014677252
Caatinga Arbórea	PV64	C	3,615808	70	0,011137	0,013057	0,014677252
Solo Descoberto	R66	D	0,000049	94	0,706227	0,7066114	0,70693545
Agricultura	R66	D	0,000049	91	0,521137	0,523057	0,524677252
Solo Descoberto	PV64	C	0,060392	91	0,686227	0,6866114	0,68693545
Agricultura	PV64	C	0,060392	88	0,491137	0,493057	0,494677252
Solo Descoberto	NC8	C	0,000247	91	0,686227	0,6866114	0,68693545
Caatinga Arbustiva	NC8	C	0,000247	77	0,157183	0,1625596	0,167096305
Solo Descoberto	R66	D	0,000014	94	0,706227	0,7066114	0,70693545
Caatinga Arbórea	R66	D	0,000014	77	0,00925	0,0113627	0,013144977
Solo Descoberto	R74	D	0,180829	94	0,706227	0,7066114	0,70693545
Solo Descoberto	R66	D	0,180829	94	0,706227	0,7066114	0,70693545
Agricultura	PV50	C	0,190959	88	0,491137	0,493057	0,494677252
Caatinga Arbustiva	PV50	C	0,190959	77	0,157183	0,1625596	0,167096305
Agricultura	R66	D	0,058487	91	0,521137	0,523057	0,524677252
Caatinga Arbustiva	R66	D	0,058487	83	0,187183	0,1925596	0,197096305
Agricultura	R60	D	0,001232	91	0,521137	0,523057	0,524677252
Caatinga Arbórea	R60	D	0,001232	77	0,00925	0,0113627	0,013144977
Agricultura	PV50	C	0,005044	88	0,491137	0,493057	0,494677252
Caatinga Arbórea	PV50	C	0,005044	70	0,011137	0,013057	0,014677252
Agricultura	R66	D	0,000341	91	0,521137	0,523057	0,524677252
Caatinga Arbórea	R66	D	0,000341	77	0,00925	0,0113627	0,013144977
Agricultura	R73	D	0,589111	91	0,521137	0,523057	0,524677252
Agricultura	PV64	C	0,589111	88	0,491137	0,493057	0,494677252
Agricultura	R60	D	0,090494	91	0,521137	0,523057	0,524677252
Agricultura	PV50	C	0,090494	88	0,491137	0,493057	0,494677252
Agricultura	R60	D	0,000004	91	0,521137	0,523057	0,524677252
Agricultura	NC8	C	0,000004	88	0,491137	0,493057	0,494677252
Agricultura	R60	D	0,000087	91	0,521137	0,523057	0,524677252
Agricultura	PV64	C	0,000087	88	0,491137	0,493057	0,494677252
Agricultura	A6	C	1,86785	88	0,491137	0,493057	0,494677252
Agricultura	NC8	C	1,86785	88	0,491137	0,493057	0,494677252
Agricultura	R74	D	0,119338	91	0,521137	0,523057	0,524677252
Agricultura	R66	D	0,119338	91	0,521137	0,523057	0,524677252
Agricultura	NC8	C	0,00003	88	0,491137	0,493057	0,494677252
Agricultura	PV64	C	0,00003	88	0,491137	0,493057	0,494677252
Caatinga Arbustiva	PV50	C	0,000304	77	0,157183	0,1625596	0,167096305
Caatinga Arbórea	PV50	C	0,000304	70	0,011137	0,013057	0,014677252
Caatinga Arbustiva	R66	D	0,000613	83	0,187183	0,1925596	0,197096305
Caatinga Arbórea	R66	D	0,000613	77	0,00925	0,0113627	0,013144977
Caatinga Arbustiva	RE25	C	0,110935	77	0,157183	0,1625596	0,167096305
Caatinga Arbustiva	R73	D	0,110935	83	0,187183	0,1925596	0,197096305

Caatinga Arbustiva	R73	D	0,648652	83	0,187183	0,1925596	0,197096305
Caatinga Arbustiva	PV64	C	0,648652	77	0,157183	0,1625596	0,167096305
Caatinga Arbustiva	R60	D	0,438757	83	0,187183	0,1925596	0,197096305
Caatinga Arbustiva	PV50	C	0,438757	77	0,157183	0,1625596	0,167096305
Caatinga Arbustiva	R60	D	0,000018	83	0,187183	0,1925596	0,197096305
Caatinga Arbustiva	R66	D	0,000018	83	0,187183	0,1925596	0,197096305
Caatinga Arbustiva	R60	D	0	83	0,187183	0,1925596	0,197096305
Caatinga Arbustiva	NC8	C	0	77	0,157183	0,1625596	0,167096305
Caatinga Arbustiva	R60	D	0,000062	83	0,187183	0,1925596	0,197096305
Caatinga Arbustiva	PV64	C	0,000062	77	0,157183	0,1625596	0,167096305
Caatinga Arbustiva	A6	C	1,26708	77	0,157183	0,1625596	0,167096305
Caatinga Arbustiva	NC8	C	1,26708	77	0,157183	0,1625596	0,167096305
Caatinga Arbustiva	R74	D	0,412584	83	0,187183	0,1925596	0,197096305
Caatinga Arbustiva	R66	D	0,412584	83	0,187183	0,1925596	0,197096305
Caatinga Arbustiva	NC8	C	0,000005	77	0,157183	0,1625596	0,167096305
Caatinga Arbustiva	PV64	C	0,000005	77	0,157183	0,1625596	0,167096305
Caatinga Arbórea	R73	D	0,408747	77	0,00925	0,0113627	0,013144977
Caatinga Arbórea	PV64	C	0,408747	70	0,011137	0,013057	0,014677252
Caatinga Arbórea	R60	D	0,342545	77	0,00925	0,0113627	0,013144977
Caatinga Arbórea	PV50	C	0,342545	70	0,011137	0,013057	0,014677252
Caatinga Arbórea	R60	D	0,000002	77	0,00925	0,0113627	0,013144977
Caatinga Arbórea	R66	D	0,000002	77	0,00925	0,0113627	0,013144977
Caatinga Arbórea	A6	C	0,228838	70	0,011137	0,013057	0,014677252
Caatinga Arbórea	NC8	C	0,228838	70	0,011137	0,013057	0,014677252
Caatinga Arbórea	R74	D	0,594007	77	0,00925	0,0113627	0,013144977
Caatinga Arbórea	R66	D	0,594007	77	0,00925	0,0113627	0,013144977
Caatinga Arbórea	R45	D	0,000008	77	0,00925	0,0113627	0,013144977
Caatinga Arbórea	R66	D	0,000008	77	0,00925	0,0113627	0,013144977
Caatinga Arbustiva	R74	D	0,000185	83	0,187183	0,1925596	0,197096305
Caatinga Arbustiva	R66	D	0,000185	83	0,187183	0,1925596	0,197096305
Caatinga Arbórea	R74	D	0,000185	77	0,00925	0,0113627	0,013144977
Caatinga Arbórea	R66	D	0,000185	77	0,00925	0,0113627	0,013144977

574,49033

Bacia do Riacho Cachoeira

Uso do Solo	Agrupamento de Solos	Grupo Hidrológico	Área (km ²)	CN	C		
					TR 10	TR 10	TR 10
Caatinga Arbórea	RE17	C	2,196456	70	0,021818	0,025156	0,027972753
Caatinga Arbórea	PV'6	C	0,12449	70	0,021818	0,025156	0,027972753
Caatinga Arbórea	PS15	C	1,887735	70	0,021818	0,025156	0,027972753
Caatinga Arbórea	R56	D	0,055235	77	0,021	0,024672	0,027770029
Caatinga Arbórea	R49	D	2,309885	77	0,021	0,024672	0,027770029
Caatinga Arbórea	PV43	C	3,012925	70	0,021818	0,025156	0,027972753
Caatinga Arbórea	NC9	C	3,190409	70	0,021818	0,025156	0,027972753

Caatinga Arbórea	NC8	C	2,113844	70	0,021818	0,025156	0,027972753
Caatinga Arbustiva	RE17	C	3,8157	77	0,187092	0,196438	0,204323709
Caatinga Arbustiva	R22	D	0,017059	83	0,217092	0,226438	0,234323709
Caatinga Arbustiva	PV'6	C	0,909182	77	0,187092	0,196438	0,204323709
Caatinga Arbustiva	PS15	C	2,176536	77	0,187092	0,196438	0,204323709
Caatinga Arbustiva	R56	D	0,481385	83	0,217092	0,226438	0,234323709
Caatinga Arbustiva	R49	D	4,131256	83	0,217092	0,226438	0,234323709
Caatinga Arbustiva	R66	D	0,082563	83	0,217092	0,226438	0,234323709
Caatinga Arbustiva	PV43	C	4,51103	77	0,187092	0,196438	0,204323709
Caatinga Arbustiva	NC9	C	1,925293	77	0,187092	0,196438	0,204323709
Caatinga Arbustiva	NC8	C	10,649191	77	0,187092	0,196438	0,204323709
Caatinga Arbustiva	R48	D	0,495402	83	0,217092	0,226438	0,234323709
Solo Descoberto	PV'6	C	0,009594	91	0,688364	0,689031	0,689594551
Solo Descoberto	PS15	C	0,155378	91	0,688364	0,689031	0,689594551
Solo Descoberto	R49	D	0,119151	94	0,708364	0,709031	0,709594551
Solo Descoberto	PV43	C	0,591334	91	0,688364	0,689031	0,689594551
Solo Descoberto	NC9	C	0,211241	91	0,688364	0,689031	0,689594551
Solo Descoberto	NC8	C	0,486623	91	0,688364	0,689031	0,689594551
Agricultura	RE17	C	2,869798	88	0,501818	0,505156	0,507972753
Agricultura	R22	D	0,025285	91	0,531818	0,535156	0,537972753
Agricultura	PV'6	C	1,100394	88	0,501818	0,505156	0,507972753
Agricultura	PS15	C	2,272926	88	0,501818	0,505156	0,507972753
Agricultura	R56	D	0,046059	91	0,531818	0,535156	0,537972753
Agricultura	R49	D	2,927939	91	0,531818	0,535156	0,537972753
Agricultura	PV43	C	2,545935	88	0,501818	0,505156	0,507972753
Agricultura	NC9	C	1,301848	88	0,501818	0,505156	0,507972753
Agricultura	NC8	C	8,940161	88	0,501818	0,505156	0,507972753
Agricultura	R48	D	0,816112	91	0,531818	0,535156	0,537972753
Caatinga Arbórea	PV43	C	0,000197	70	0,021818	0,025156	0,027972753
Caatinga Arbustiva	PV43	C	0,000197	77	0,187092	0,196438	0,204323709
Caatinga Arbórea	NC8	C	0,00024	70	0,021818	0,025156	0,027972753
Caatinga Arbustiva	NC8	C	0,00024	77	0,187092	0,196438	0,204323709
Caatinga Arbórea	RE17	C	0,000055	70	0,021818	0,025156	0,027972753
Agricultura	RE17	C	0,000055	88	0,501818	0,505156	0,507972753
Caatinga Arbórea	PS15	C	0,000002	70	0,021818	0,025156	0,027972753
Agricultura	PS15	C	0,000002	88	0,501818	0,505156	0,507972753
Caatinga Arbórea	PV43	C	0,000016	70	0,021818	0,025156	0,027972753
Agricultura	PV43	C	0,000016	88	0,501818	0,505156	0,507972753
Caatinga Arbórea	NC9	C	0,000206	70	0,021818	0,025156	0,027972753
Agricultura	NC9	C	0,000206	88	0,501818	0,505156	0,507972753
Caatinga Arbórea	R56	D	0,000227	77	0,021	0,024672	0,027770029
Caatinga Arbórea	NC9	C	0,000227	70	0,021818	0,025156	0,027972753
Caatinga Arbórea	R49	D	0	77	0,021	0,024672	0,027770029
Caatinga Arbórea	NC9	C	0	70	0,021818	0,025156	0,027972753
Caatinga Arbustiva	PV43	C	0,000022	77	0,187092	0,196438	0,204323709
Solo Descoberto	PV43	C	0,000022	91	0,688364	0,689031	0,689594551
Caatinga Arbustiva	PV'6	C	0,000014	77	0,187092	0,196438	0,204323709
Agricultura	PV'6	C	0,000014	88	0,501818	0,505156	0,507972753

Caatinga Arbustiva	PS15	C	0,000004	77	0,187092	0,196438	0,204323709
Agricultura	PS15	C	0,000004	88	0,501818	0,505156	0,507972753
Caatinga Arbustiva	PV43	C	0,000067	77	0,187092	0,196438	0,204323709
Agricultura	PV43	C	0,000067	88	0,501818	0,505156	0,507972753
Caatinga Arbustiva	NC9	C	0,000095	77	0,187092	0,196438	0,204323709
Agricultura	NC9	C	0,000095	88	0,501818	0,505156	0,507972753
Caatinga Arbustiva	A10	C	0,002173	77	0,187092	0,196438	0,204323709
Caatinga Arbustiva	PV43	C	0,002173	77	0,187092	0,196438	0,204323709
Caatinga Arbustiva	R56	D	0,009633	83	0,217092	0,226438	0,234323709
Caatinga Arbustiva	R49	D	0,009633	83	0,217092	0,226438	0,234323709
Caatinga Arbustiva	R56	D	0,083216	83	0,217092	0,226438	0,234323709
Caatinga Arbustiva	NC9	C	0,083216	77	0,187092	0,196438	0,204323709
Caatinga Arbustiva	R49	D	0,000004	83	0,217092	0,226438	0,234323709
Caatinga Arbustiva	PV43	C	0,000004	77	0,187092	0,196438	0,204323709
Caatinga Arbustiva	NC9	C	0,000017	77	0,187092	0,196438	0,204323709
Caatinga Arbustiva	NC8	C	0,000017	77	0,187092	0,196438	0,204323709
Solo Descoberto	A10	C	0,038812	88	0,688364	0,689031	0,689594551
Solo Descoberto	PV43	C	0,038812	91	0,688364	0,689031	0,689594551
Solo Descoberto	R56	D	0,017462	94	0,708364	0,709031	0,709594551
Solo Descoberto	NC9	C	0,017462	91	0,688364	0,689031	0,689594551
Agricultura	A10	C	0,037351	88	0,501818	0,505156	0,507972753
Agricultura	PV43	C	0,037351	88	0,501818	0,505156	0,507972753
Agricultura	R56	D	0,044702	91	0,531818	0,535156	0,537972753
Agricultura	NC9	C	0,044702	88	0,501818	0,505156	0,507972753
Caatinga Arbustiva	R56	D	0,000047	83	0,217092	0,226438	0,234323709
Caatinga Arbustiva	NC9	C	0,000047	77	0,187092	0,196438	0,204323709
Solo Descoberto	R56	D	0,000047	94	0,708364	0,709031	0,709594551
Solo Descoberto	NC9	C	0,000047	91	0,688364	0,689031	0,689594551

68,976282

Bacia do Riacho Jacu

Uso do Solo	Agrupamento de Solos	G.H	Área (km ²)	CN	C		
					TR 10	TR 10	TR 10
Agricultura	Planossolo Nátrico	D	0,208664	91	0,556346568	0,56294	0,568502561
Caatinga Arbustiva	Planossolo Nátrico	D	0,76712	83	0,28577039	0,304231	0,31980717
Caatinga Arbustiva	Neossolo Litólico	D	0,059716	83	0,28577039	0,304231	0,31980717
Caatinga Arbórea	Planossolo Nátrico	D	0,722926	77	0,047981225	0,055234	0,061352817
Caatinga Arbórea	Neossolo Litólico	D	0,47935931	77	0,047981225	0,055234	0,061352817

2,23778531