



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGEHARIA CIVIL

BRUNO DE MELO SILVA

**MODELAGEM HIDROLÓGICA E HIDRODINÂMICA PARA AVALIAÇÃO DE
INUNDAÇÕES NA ZONA URBANA DE CARUARU, PE**

Recife
2019

BRUNO DE MELO SILVA

**MODELAGEM HIDROLÓGICA E HIDRODINÂMICA PARA AVALIAÇÃO DE
INUNDAÇÕES NA ZONA URBANA DE CARUARU, PE**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil do Centro de Tecnologia e Geociências da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Área de concentração: Tecnologia
Ambiental e Recursos Hídricos.

Orientador: Prof. Dr. José Almir Cirilo.

Recife
2019

Catálogo na fonte
Bibliotecária Margareth Malta, CRB-4 / 1198

S586m Silva, Bruno de Melo.
Modelagem hidrológica e hidrodinâmica para avaliação de inundações na zona urbana de Caruaru, PE / Bruno de Melo Silva. - 2019.
108 f. ils., tabs.

Orientador: Prof. Dr. José Almir Cirilo.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2019.
Inclui Referências e Anexo.

1. Engenharia Civil. 2. Bacia do rio Ipojuca. 3. CAWM IV. 4. Modelo hidrológico concentrado. 5. Vulnerabilidade a inundações. I. Cirilo, José Almir. (Orientador). II. Título.

UFPE

624 CDD (22. ed.)

BCTG/2020-2



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

A comissão examinadora da Defesa de Dissertação de Mestrado

**MODELAGEM HIDROLÓGICA E HIDRODINÂMICA PARA AVALIAÇÃO DE
INUNDAÇÕES NA ZONA URBANA DE CARUARU, PE**

defendida por

Bruno de Melo Silva

Considera o candidato APROVADO

Recife, 31 de julho de 2019.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. José Almir Cirilo (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Artur Paiva Coutinho (Examinador externo)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Alfredo Ribeiro Neto (Examinador interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Dedico esse trabalho à minha família, em especial aos meus pais que são meu exemplo de vida, sempre me apoiando e incentivando a superar todos os obstáculos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por me proporcionar uma vida com saúde e condições de estar aqui hoje. Por me guiar e proteger em todos os momentos da minha vida.

Aos meus pais Elenilma Maria de Melo Silva e José Severino da Silva, por sempre acreditar e mim, me ajudarem e proporcionarem condições para alcançar meus sonhos.

A toda minha família, meus irmãos, tias, tios, avós, primas e primos por serem meus melhores amigos e me ajudam a ser sempre uma pessoa melhor.

Ao Mestre Prof. Almir Cirilo, meu orientador, por ser um verdadeiro anjo em minha vida, por acreditar em mim e no meu potencial e proporcionar tantas oportunidades em minha vida, oportunidades essas tanto acadêmicas, quanto profissionais e pessoais. Nunca esquecerei o quanto o senhor me ajudou, mesmo sem saber, nos momentos mais difíceis da minha “vida adulta”.

À minha namorada, por me apoiar e estar sempre presente nos momentos fáceis e difíceis que tenho passado.

Aos amigos que sempre estiveram comigo nos momentos mais difíceis e também nos momentos mais divertidos. Deixo um agradecimento especial a Fellipe Alves que está comigo nessa jornada acadêmica desde o primeiro dia de aula ainda na graduação e que me apoiou e incentivou a estar aqui hoje.

As amigas que fiz no mestrado, Mayara Arruda e Livia Fragoso, que muito me ajudaram a completar essa jornada.

A Maria Alice Feitoza e José Bandim Neto, que contribuíram imensamente com esse trabalho.

À Prefeitura Municipal de Caruaru, que possibilitou a realização deste trabalho sem me afastar das atividades profissionais e me apoiando no aperfeiçoamento desde sempre.

Aos professores e mestres que compartilharam suas experiências e conhecimentos.

Aos amigos e colegas de trabalhos, em especial à **dra. Nyadja Menezes, Francisco Batista, Wolney Leite, Ailza Melo, Rodrigo Lira e Jéssica Tabosa**, por proporcionarem dias de trabalho repletos de alegria e companheirismo e pelo exemplo de comprometimento profissional e ética no serviço público.

RESUMO

Durante o ano de 2017 o Estado de Pernambuco sofreu com um cenário crítico em relação à sua segurança hídrica, de uma maneira paradoxal: mais de 125 municípios pernambucanos declararam estado de emergência graças à estiagem. Por outro lado, chuvas intensas ocorreram em 2017 provocando cheias nos rios, levando 27 cidades a decretar estado de calamidade devido às enchentes. Caruaru, a maior cidade do interior de Pernambuco, faz parte desse cenário incomum e serve de estudo de caso para o presente trabalho. Foi realizada a modelagem hidrológica da bacia do rio Ipojuca da sua nascente até Caruaru por meio de um novo modelo desenvolvido na UFPE para bacias do semiárido, o Campus Agreste Watershed Model (CAWM IV). Trata-se de modelo hidrológico concentrado com proposta de grande simplicidade de uso, onde é necessária a calibração de apenas três parâmetros para sua utilização. As simulações realizadas no CAWM até o ano de 1989 tiveram resposta hidrológica de razoável a boa quando analisados o Coeficiente de Nash e outros indicadores de desempenho usuais. Nos demais períodos ocorre a influência de reservatórios e forte redução nos dados de precipitação disponíveis, o que afetou a qualidade das simulações. Para o período selecionado os indicadores de eficiência de forma geral atendem aos valores de referência encontrados na literatura. Analisou-se a adequação do modelo hidrológico CAWM IV agregado a modelo de operação de reservatórios para balanço hídrico nos reservatórios de Pão de Açúcar, Belo Jardim e Bitury, de modo a quantificar o impacto dos mesmos na redução de picos de cheia e na reprodução dos eventos mais recentes. Neste último caso observa-se que os resultados foram prejudicados efetivamente pela qualidade dos dados de chuva. Realizou-se a modelagem hidrodinâmica bidimensional com o suporte do software HEC-RAS, a fim de quantificar a magnitude de vazões que provocam inundações na zona urbana de Caruaru, chegando-se à conclusão que vazões da ordem de $130\text{m}^3/\text{s}$ começam a apresentar inundações em alguns pontos da cidade.

Palavras-chave: Bacia do rio Ipojuca. CAWM IV. Modelo hidrológico concentrado. Vulnerabilidade a inundações.

ABSTRACT

During 2017, the State of Pernambuco suffered from a critical scenario regarding its water security, in a paradoxical way: more than 125 municipalities declared a state of emergency due to drought. On the other hand, intense rainfall occurred in 2017, leading 27 govern of municipalities to declare a state of disaster due to flooding. Caruaru, the largest city in the interior of Pernambuco, is part of this unusual scenario and serves as a case study for the present work. Hydrological modeling of the Ipojuca river basin from its source to Caruaru was carried out using a new model developed at UFPE for semiarid basins, the Campus Agreste Watershed Model (CAWM IV). It is a lumped hydrological model with a proposal of great simplicity of use, since it is necessary to calibrate only three parameters. The simulations performed in CAWM IV until 1989 had a reasonable to good hydrological response when the Nash Coefficient and other usual performance indicators were analyzed. In more recent periods there is the influence of reservoirs and a significative reduction in the available precipitation data, which affected the quality of the simulations. For the selected period, efficiency indicators generally meet the reference values found in the literature. The suitability of the aggregated CAWM IV hydrological model to the Pão de Açúcar, Belo Jardim and Bitury reservoirs balance model was analyzed to quantify their impact on flood peaks reduction and the reproduction of the most severe recente events. In the latter case it is observed that the results were effectively harmed by the quality of the rainfall data. Two-dimensional hydrodynamic modeling was performed with the support of the HEC-RAS software to quantify the magnitude of flows that cause flooding in the urban area of Caruaru, with the conclusion that discharges of the order of $130\text{m}^3/\text{s}$ start flooding process in some parts of the city.

Keywords: Ipojuca River Basin. CAWM IV. Lumped Hydrological Model. Flood Vulnerability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Bacias Hidrográficas de Pernambuco	17
Figura 2 – Matriz definição da vulnerabilidade a inundações	18
Figura 3 – Trechos inundáveis de rios no estado de Pernambuco.....	19
Figura 4 – Representação das barragens de controle de cheias na bacia dos rios Una e Sirinhaém.....	20
Figura 5 – Reservatórios no Estado de Pernambuco	21
Figura 6 – A Estrada dos Remédios na cheia de 1975	27
Figura 7 – Ilha do Retiro no dia 19 de julho de 1975.....	27
Figura 8 – Abrangência dos decretos estaduais de emergência no Estado de Pernambuco.....	28
Figura 9 – Principais atividades envolvidas em Geoprocessamento.....	29
Figura 10 – Esquema do modelo CAWM IV.....	37
Figura 11 – Área de estudo na Bacia do Rio Ipojuca	49
Figura 12 – Mapa de localização da Bacia do Rio Ipojuca.....	50
Figura 13 – Mapa da bacia do Rio Ipojuca e limite dos municípios integrantes	52
Figura 14 – Hidrografia da bacia do rio Ipojuca.....	53
Figura 15 – Representação do sistema de reservatórios da bacia hidrográfica do rio Ipojuca.....	55
Figura 16 – Principais reservatórios na Bacia do Rio Capibaribe.....	56
Figura 17 – Isoietas anuais médias na bacia do Rio Ipojuca.	61
Figura 18 – Sub-bacias em estudo na Bacia do Rio Ipojuca.....	62
Figura 19 – Estações pluviométricas utilizadas nesta pesquisa.....	63
Figura 20 – Polígonos de Thiessen criados para as sub-bacias em estudo.	65
Figura 21 – Influência do parâmetro B_e nas vazões simuladas pelo CAWM IV.	72
Figura 22 – Áreas incrementais na bacia do rio Capibaribe.....	79
Figura 23 – Malha de simulação bidimensional sobre o Modelo Digital do Terreno – MDT da cidade de Caruaru-PE.....	80
Figura 24 – Mapa de classificação do solo na Bacia do Rio Ipojuca até a Cidade de Caruaru	85
Figura 25 – Vazões calculadas e observadas para o posto de Caruaru (parte 1).....	89
Figura 26 – Vazões calculadas e observadas para o posto de Caruaru (parte 2).....	90
Figura 27 – Vazões calculadas e observadas para o posto de Caruaru (parte 3).....	91

Figura 28 – Vazões calculadas e observadas para o posto de Caruaru, caso as barragens existissem em 1975.....	93
Figura 29 – Vazões calculadas e observadas para o posto de Caruaru em evento de 2004	94
Figura 30 – Vazões calculadas e observadas para o posto de Caruaru em evento de 2011	94
Figura 31 – Resultados da simulação hidrodinâmica bidimensional para o evento de 2004.	96
Figura 32 – Simulação cheia de 2004 com delimitação da vazão máxima suportada. Localidade 01 – Passagem Molhada Rua dos Sapateiros ...	97
Figura 33 – Simulação cheia de 2004 com delimitação da vazão máxima suportada. Localidade 02 – Ponte Nova	98
Figura 34 – Simulação cheia de 2004 com delimitação da vazão máxima suportada. (localidade 03 – Passagem molhada José Liberato as Rendeiras).....	99

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Compilação histórica dos principais eventos de inundações ocorridas no Estado de Pernambuco.....	23
Tabela 2 – Termos da equação da continuidade	34
Tabela 3 – Municípios que integram a bacia do Rio Ipojuca	51
Tabela 4 – Informações gerais dos principais reservatórios.	54
Tabela 5 – Características técnicas do reservatório Pão de Açúcar	57
Tabela 6 – Características técnicas do reservatório Belo Jardim.....	58
Tabela 7 – Características técnicas do reservatório Bitury	60
Tabela 8 – Postos pluviométricos utilizados na modelagem hidrológica	63
Tabela 9 – Postos pluviométricos utilizados no cálculo da chuva média	67
Tabela 10 – Postos fluviométricos utilizados no estudo	68
Tabela 11 – Valores da normal climatológica para o posto de Pesqueira	69
Tabela 12 – Características técnicas dos produtos do PE3D.....	70
Tabela 13 – Valores de desempenho recomendados para simulações mensais.....	75
Tabela 14 – Postos pluviométricos utilizados na operação das barragens	77
Tabela 15 – Parâmetros físicos necessários para o cálculo do coeficiente K.	84
Tabela 16 – Parâmetros finais para cada sub-bacia	84
Tabela 17 – Indicadores de desempenho para os intervalos estudados.....	87
Tabela 18 – Vazões regularizadas pelos reservatórios	92

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	OBJETIVOS GERAIS	16
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
2.1	BACIAS HIDROGRÁFICAS DE PERNAMBUCO	17
2.2	RISCO DE INUNDAÇÕES E BARRAGENS EM PERNAMBUCO.....	18
2.3	HISTÓRICO DE CHEIAS EM PERNAMBUCO	22
2.4	GEOPROCESSAMENTO.....	28
2.5	SISTEMA DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA (SIG)	30
2.6	MODELAGEM HIDROLÓGICA	31
2.7	MODELAGEM HIDRODINÂMICA	33
2.8	O MODELO CAMPUS AGRESTE WATERSHED MODEL (CAWM IV) ...	36
2.9	OPERAÇÃO DE RESERVATÓRIOS	42
2.10	ESTUDOS HIDROLÓGICOS E/OU HIDRODINÂMICOS	44
3	METODOLOGIA DA PESQUISA	49
3.1	ÁREA DE ESTUDO	49
3.1.1	Descrição da Bacia.....	50
3.1.2	Hidrografia e uso da água	52
3.1.2.1	<i>Reservatório de Pão de Açucar</i>	56
3.1.2.2	<i>Reservatório Pedro Moura Jr. (Belo Jardim)</i>	57
3.1.2.3	<i>Reservatório Eng. Severino Guerra (Bitury)</i>	58
3.1.3	Clima e precipitações	60
3.2	DADOS HIDROLÓGICOS	61
3.2.1	Dados pluviométricos	62
3.2.2	Cálculo da precipitação média	65
3.2.3	Dados Fluviométricos	67

3.2.4	Dados de evaporação	68
3.3	DADOS TOPOGRÁFICOS.....	69
3.4	MODELAGEM HIDROLÓGICA	73
3.5	MODELO DE OPERAÇÃO DE RESERVATÓRIOS	76
3.5.1	Dados utilizados	76
3.5.2	Balanço hídrico.....	77
3.6	MODELAGEM HIDRODINAMICA BIDIMENSIONAL	79
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	82
4.1	MODELAGEM HIDROLÓGICA	82
4.2	OPERAÇÃO DE RESERVATÓRIOS	92
4.3	MODELAGEM HIDRODINÂMICA BIDIMENSIONAL DA ÁREA URBANA DE CARUARU	94
5	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	100
	REFERÊNCIAS.....	101
	ANEXO A – Inundação Caruaru 2017.....	107

1 INTRODUÇÃO

No ano de 2017 o Estado de Pernambuco sofreu com um cenário crítico em relação à sua segurança hídrica, de uma maneira paradoxal: por um lado enfrentava mais de 05 anos de seca (segundo a APAC - Agência Pernambucana de Águas e Clima essa seca é a maior já registrada nos últimos 50 anos), que levou mais de 125 municípios pernambucanos a declarar estado de emergência graças à estiagem). Por outro lado chuvas intensas, no final do mês de maio de 2017, atingiram a Zona da Mata e o Agreste do Estado provocando cheias nos rios, transbordamentos de canais e grande destruição em cidades ribeirinhas, levando a ser decretado estado de calamidade em 27 cidades devido às enchentes (SDS-PE). Esse é um cenário bem incomum e raro de se ver, cidades que estão em estado de emergência pela seca e pelas enchentes ao mesmo tempo.

Segundo Andrade *et al.* (2012) as ações antrópicas são responsáveis por modificações consideráveis no ambiente de bacias hidrográficas, tendo em vista sua influência quantitativa e qualitativa direta sobre os processos hidrológicos. De forma geral, o resultado final dessas modificações é percebido apenas quando da ocorrência de eventos hidrológicos extremos e de suas consequências, tais como estiagens severas, inundações e destruições, produção e transporte de sedimentos em bacias hidrográficas, prejudicando drasticamente a agricultura, além da possibilidade de aumento no aporte de nutrientes em mananciais com influência direta na qualidade da água.

Conhecer o comportamento hidrológico permite investigar as relações existentes entre o regime de vazões e as características ecológicas influenciadas por tal regime e ajuda a entender a estrutura e o funcionamento do ecossistema. Entretanto, mais do que conhecer o comportamento atual do ecossistema, é importante poder prever seu comportamento futuro frente a possíveis impactos decorrentes de atividades antrópicas e a cenários de variabilidade climática, que podem inclusive amplificar os impactos antrópicos (PAZ; COLLISCHONN; TUCCI, 2009).

A realização de estudos hidrológicos em bacias hidrográficas surge da necessidade de se compreender o funcionamento do balanço hídrico, dos processos que controlam o movimento da água e seus prováveis impactos sobre a quantidade e a qualidade da água (ANDRADE *et al.* 2012).

É de grande relevância para o Estado de Pernambuco a gestão dos recursos hídricos, com ferramentas eficientes no sentido de auxiliar o monitoramento e gestão das águas é a modelagem hidrológica. A utilização de tais ferramentas e a análise dos resultados obtidos são de fundamental importância na gestão de bacias hidrográficas e no conhecimento dos processos hidrológicos pertencentes aos cursos d'água, para a preservação deste recurso finito e a manutenção da qualidade de vida da população pertencente a este ambiente (SILVA, 2017).

O monitoramento da infraestrutura hídrica é fundamental para o acompanhamento da eficiência no controle de cheias em resposta a diferentes cenários extremos, pois vários aspectos podem modificar a resposta das bacias hidrográficas, a exemplo das mudanças climáticas. O acompanhamento pode ser realizado a partir da modelagem hidrológica, utilizando-se modelos matemáticos capazes de reproduzir o ciclo hidrológico e assim espelhar o escoamento superficial como consequência do evento chuvoso. A simulação hidrodinâmica também é relevante pelo fato de conseguir reproduzir o comportamento da propagação da vazão ao longo do corpo hídrico com e sem a presença de barragens (GOMES, 2019).

Após as enchentes dos anos de 2010 e 2011 vários estudos e teses foram realizados para avaliar os processos ocorridos nas áreas mais atingidas do Estado, principalmente a Bacia Hidrográfica do Rio Una. Tanto em 2010 como nas inundações recentes que ocorreram em maio de 2017 verificou-se que a o Agreste também sofreu muito dano e mostrou a necessidade de estudos hidrológicos e modelagem matemática nessa área do Estado. Assim sendo, a cidade de Caruaru, maior cidade do interior de Pernambuco, inserida na Bacia Hidrográfica do Rio Ipojuca, serviu de caso para o presente estudo.

1.1 OBJETIVOS GERAIS

O objetivo geral deste trabalho consiste em Identificar a magnitude de vazões que provocam inundação na zona urbana de Caruaru, diante de cenários simulados através da modelagem hidrológica, hidrodinâmica e modelo de operação de barragens.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Este trabalho visa atingir os seguintes objetivos específicos:

- Estruturar e avaliar o modelo hidrológico CAWM IV para as sub-bacias que compõem a bacia do rio Ipojuca da nascente até à cidade de Caruaru;
- Analisar a adequação do modelo hidrológico CAWM IV agregado a modelo de operação de reservatórios para quantificação da vazão regularizada;
- Estruturar base de dados que venha a auxiliar as ações de planejamento urbano para reduzir os danos provocados pelas inundações.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste item é apresentado um levantamento da atual infraestrutura hídrica para contenção de cheias no estado de Pernambuco, bem como um histórico das principais cheias que ocorreram até a data da presente pesquisa. São expostos também breves conceitos dos principais modelos hidrológicos existentes, uma apresentação do novo modelo hidrológico introduzido neste trabalho, o CAWM IV, bem como do modelo utilizado na operação de barragens e da modelagem hidrodinâmica.

2.1 BACIAS HIDROGRÁFICAS DE PERNAMBUCO

O Plano Estadual de Recursos Hídricos divide o território pernambucano em 29 Unidades de planejamento (UP), sendo 13 compostas pelas Bacias Hidrográficas de maior relevância hídrica para o estado: Goiana, Capibaribe, Ipojuca, Sirinhaém, Una, Mundaú, Ipanema, Moxotó, Pajeú, Terra Nova, Brígida, Garças e Pontal, e 16 constituídas da junção de pequenos grupos de bacias dos quais seis são de pequenos rios litorâneos (GL1 a GL6), nove de pequenos rios interiores (GI1 a GI9) e uma de pequenos rios que compõem a rede de drenagem do arquipélago de Fernando de Noronha (PERH-PE, 1998). É apresentado na Figura 1 a divisão das bacias hidrográficas do estado de Pernambuco.

Figura 1 – Bacias Hidrográficas de Pernambuco



Fonte: SEPLAN-PE/CONDEPE/FIDEM, 2005.

2.2 RISCO DE INUNDAÇÕES E BARRAGENS EM PERNAMBUCO

No ano de 2014 a Agência Nacional de Águas (ANA) publicou o Atlas de Vulnerabilidade a Inundações do Brasil, no qual a mesma classificou e identificou a ocorrência e os impactos das inundações nos principais rios das bacias hidrográficas brasileiras, inclusive as pernambucanas. A partir do cruzamento de informações de frequência e impacto dos eventos de inundação foi elaborada uma matriz de vulnerabilidade.

A análise da frequência se deu de acordo com os seguintes intervalos:

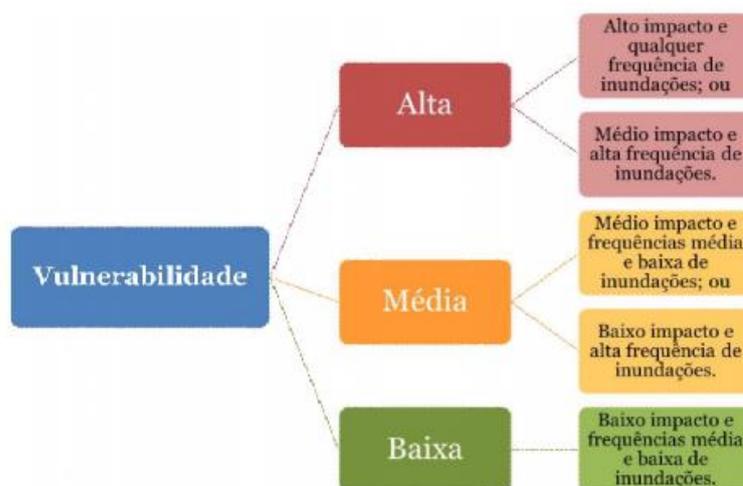
- Alta – Eventos de inundações graduais observados em um período inferior a cinco anos.
- Média – Eventos de inundações graduais observados no intervalo de cinco a dez anos.
- Baixa – Há mais de dez anos não são observados eventos de inundação.

Caracterizada a frequência dos eventos, analisou-se o impacto associado a eles:

- Alto – Alto risco de dano à vida humana e danos significativos a os serviços essenciais, instalações e obras de infraestrutura públicas e residenciais.
- Médio – Danos razoáveis a serviços essenciais, instalações e obras de infraestrutura públicas e residências.
- Baixo – Danos Localizados.

Por fim foi definida a matriz de vulnerabilidade que pode ser visualizada na Figura 2.

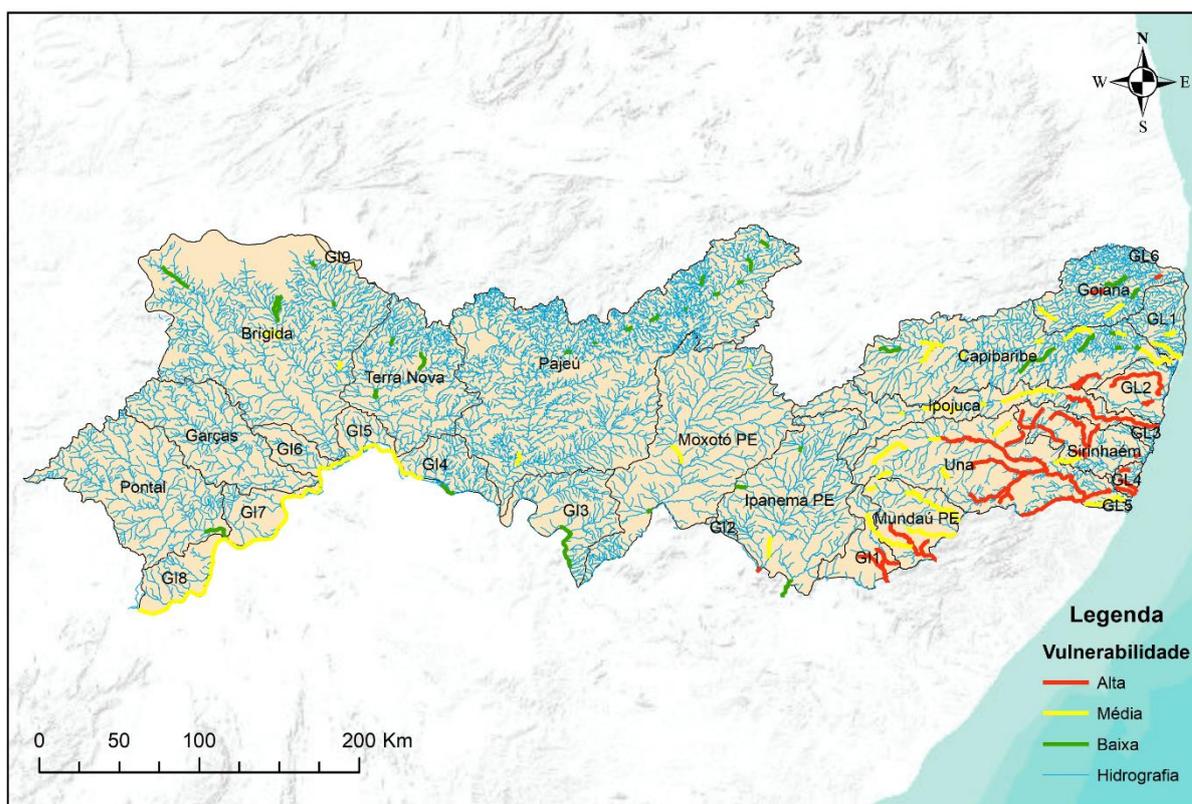
Figura 2 – Matriz definição da vulnerabilidade a inundações



Fonte: ANA, 2012.

Em Pernambuco foram identificados 397 trechos inundáveis em 76 cursos d'água em 134 dos 185 municípios. Do total, 157 (40%) foram considerados de alta vulnerabilidade a inundações graduais; 164 (41%), de média e 76 (19%), de baixa. A parte leste do estado concentra o maior número de trechos altamente vulneráveis, como o rio Una, por exemplo. É apresentado na Figura 3 o mapa de vulnerabilidade dos rios pernambucanos.

Figura 3 – Trechos inundáveis de rios no estado de Pernambuco



Fonte: ANA, 2012.

Analisando a Figura 3 pode-se inferir que os trechos de rios mais vulneráveis às inundações se encontram principalmente nas bacias do Mundaú, Una, Sirinhaém e Ipojuca. Em um grau abaixo encontram-se trechos na bacia Capibaribe e em outras bacias menores de rios litorâneos são observados trechos de alta a média vulnerabilidade a inundações. Segundo Gomes (2019), isto se deve ao fato que os rios dessa área mais ao leste do estado passam por zonas densamente urbanizadas, onde eventos extremos podem causar grandes impactos à população.

Após as enchentes que aconteceram nos anos de 2010 e 2011 na Mata Sul do Estado, um conjunto de ações foi tomado pelo governo do estado de Pernambuco a fim de minimizar o efeito de novas inundações graduais. Foi planejado investimentos na construção de novas barragens para contenção de cheias, ampliação da calha dos rios nos trechos urbanos e a criação de novos sistemas de previsão de eventos críticos de catástrofes naturais (ALVES, 2017).

Do investimento proposto pelo governo do estado para atenuar os problemas de inundações na Mata Sul, a parte mais importante está concentrada no Sistema Integrado de Contenção de Cheias que deverá controlar as enchentes em áreas das bacias hidrográficas dos rios Una e Sirinhaém. O sistema proposto contempla a construção de cinco barragens de contenção. Além dessa finalidade visando sempre o fundamento básico do multiuso dos recursos hídricos, as barragens também deverão contribuir para o abastecimento da população urbana e rural, a produção irrigada de verduras e proporcionar condições de lazer (SIRH, 2011). De acordo com o governo do estado de Pernambuco estas cinco barragens vão proteger de enchentes 2.060km² (30,58%) da bacia hidrográfica do rio Una, onde estão inseridas áreas de 28 municípios, sendo dez sedes municipais. É apresentado na Figura 4 o esquema ilustrativo com a localização das novas barragens: Igarapeba (42.500.000 m³), Serro Azul (303.000.000 m³), Painelas II (17.000.000 m³), Gatos (6.300.000 m³) e Barra de Guabiraba (16.000.000 m³).

Figura 4 – Representação das barragens de controle de cheias na bacia dos rios Una e Sirinhaém

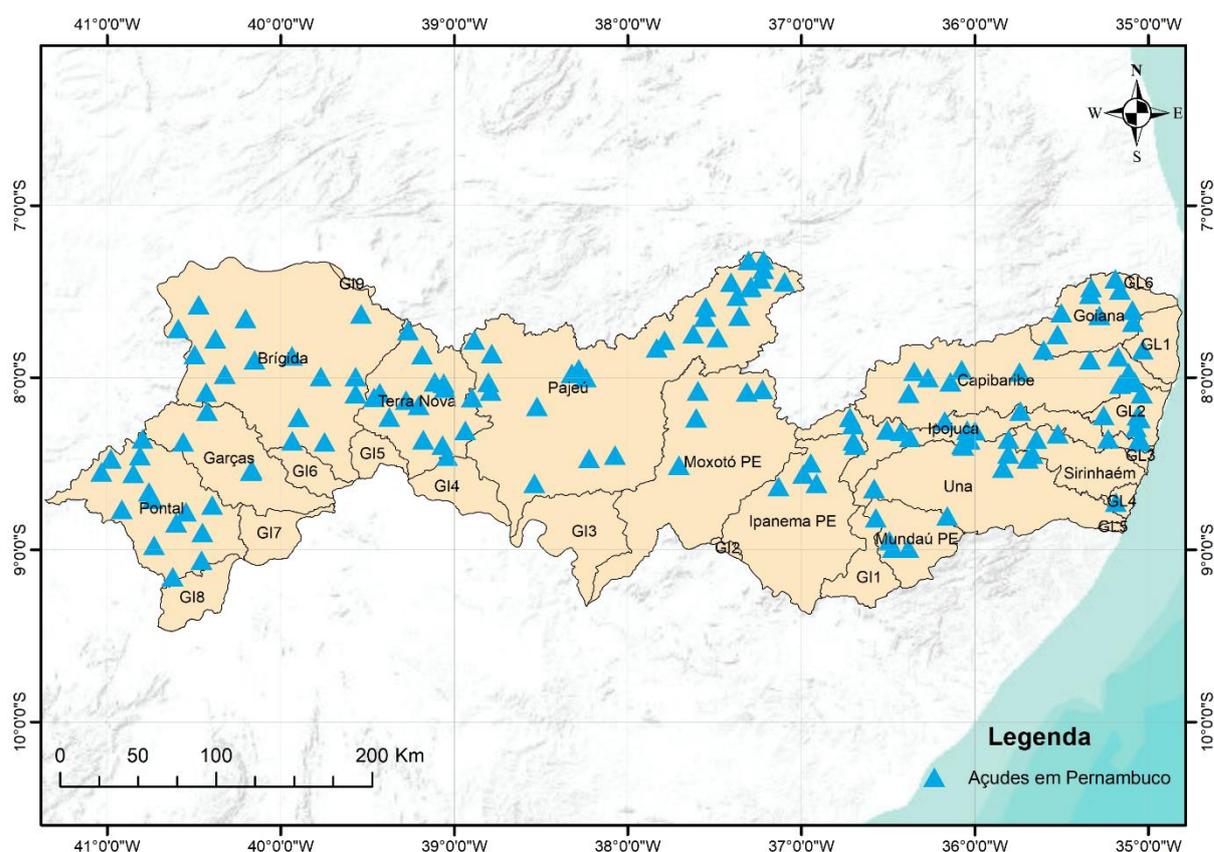


Fonte: SIRH, 2011.

Os eventos de cheias mais recentes no Estado de Pernambuco ocorreram no final de maio de 2017 e atingiram principalmente a Mata Sul e o Agreste, resultando em enchentes catastróficas principalmente nas bacias dos rios Una e Ipojuca. Esse evento provocou inundações que atingiram 31 municípios. Desses, 27 declararam estado de calamidade pública. Caruaru foi o único município da Bacia do Rio Ipojuca que declarou estado de calamidade (CEXCHUV, 2017).

Segundo levantamento recente feito por Gomes (2019), o Estado de Pernambuco possui 110 reservatórios que são utilizados em sua grande maioria para o abastecimento de cidades, dos quais 27 tem finalidade de controle de cheias. A Figura 5 apresenta a localização dos reservatórios, todos monitorados pela Agência Pernambucana de Águas e Clima (APAC).

Figura 5 – Reservatórios no Estado de Pernambuco



Fonte: Adaptado de APAC, 2019.

2.3 HISTÓRICO DE CHEIAS EM PERNAMBUCO

Segundo Tucci (2003), as inundações urbanas são tão antigas quanto as cidades ou quaisquer aglomerados humanos. Esses eventos podem ocorrer de forma natural e/ou podem ser potencializados devido a ações antrópicas.

Em Pernambuco os registros de inundações remontam ao ano 1632, dos mais diversos impactos sobre a localidade, mas sempre causando danos à população. A Tabela 1 a seguir lista o resumo dos principais eventos de inundações ocorridas no Estado de Pernambuco, conforme compilação feita por vários autores.

Tabela 1 – Compilação histórica dos principais eventos de inundações ocorridas no Estado de Pernambuco.

Ano	Descrição do Evento
1632	Primeira enchente registrada no Recife em 28 de janeiro, motivando a destruição de muitas casas ribeirinhas estabelecidas às margens do Rio Capibaribe.
1638	É construída a primeira barragem no leito do rio Capibaribe para proteção contra enchentes, ordenada por Maurício de Nassau. Conhecido como o Dique de Afogados, possuindo mais de 2km de extensão, hoje se tornou uma rua no Recife, a rua Imperial.
1824	Durante os meses de fevereiro a abril, estação mais chuvosa da região, ocorre uma nova enchente que atinge o Recife.
1842	Em junho, uma enchente atinge novamente o Recife. Foi a primeira grande enchente no Rio Capibaribe onde várias casas foram derrubadas, pontes desabaram, trens descarrilharam e milhares de pessoas ficaram feridas e desabrigadas.
1854	Maior enchente já registrada no século XIX. Teve uma duração de três dias consecutivos e atingiu todos os bairros do Recife. Houve sérias consequências no Porto do Recife, onde os navios se chocaram uns contra os outros. A muralha que protegia a Rua da Aurora veio abaixo, o Cais da Casa da Detenção foi derrubado e a cidade ficou totalmente isolada, sem comunicações com o interior.
1862	Outra grande enchente registrada no Recife.
1869	As pontes da Torre, Remédios e Barbalho foram destruídas e foram rompidos os aterros da via férrea do Recife. Maior enchente até então, tendo o imperador Pedro II determinado que o engenheiro Rafael Arcanjo Galvão viesse a Pernambuco “estudar o problema”.
1870	Em 16 de julho, o bacharel em matemática e ciências físicas José Tibúrcio Pereira de Magalhães, diretor de Obras e Fiscalização do Serviço Público do Estado, sugere a construção de diversas barragens na bacia do Rio Capibaribe, a fim de evitar cheias no Recife.
1884	Registro de enchente.
1894	Mais uma enchente no rio Capibaribe atinge todos os subúrbios da cidade do Recife.
1899	Em 1 de julho muitos bairros foram atingidos por cheia no rio Capibaribe. O município de Vitória de Santo Antão também foi atingido e o segundo encontro da ponte sobre o Rio Itapicuru desabou.
1914	Registro de enchente provoca várias mortes no Recife.
1920	Em 14 de abril, uma enchente deixou o Recife sem comunicação com o resto do Estado durante três dias. Postes caíram, linhas telegráficas foram interrompidas, pontes vieram abaixo, entre elas a da Torre. Os bairros da Caxangá, Cordeiro, Várzea e Iputinga ficaram totalmente isolados do resto da cidade.

1924	Outra enchente no Recife deixa os bairros da Ilha do Leite, Santo Amaro, Afogados, Dois irmãos, Apipucos, Tore, Zumbi e Cordeiro completamente submersos. O prédio do Serviço de Saúde e assistência desabou e as obras do Quartel do Derby sofreram grandes prejuízos
1960	Registro de enchente.
1961	Duas mil pessoas ficaram desabrigadas no Recife com nova enchente.
1965	Grande enchente castiga o Recife, sendo que os bairros da Caxangá, Iputinga, Zumbi e Bongi ficaram completamente inundados. Nas áreas mais próximas ao Rio Capibaribe a água cobriu o telhado das casas.
1966	Mais uma enchente catastrófica atinge o rio Capibaribe, chegando a água a 2 metros de altura nas áreas mais baixas da cidade. Em pouco tempo, toda a Avenida Caxangá foi tomada pela água. Na capital e interior, mais de 10 mil casas (a maioria mocambos) foram destruídas e outras 30 mil sofreram danos, como paredes derrubadas. Morreram 175 pessoas e mais de 10 mil ficaram desabrigadas. O nível do Rio Capibaribe subiu 9,20 metros além do nível normal. O presidente da República, Marechal Humberto de Alencar Castelo Branco, veio ao Recife verificar os danos causados.
1967	A Sudene apresenta relatório de uma comissão de técnicos, constituída logo após a enchente de 1966, para encontrar soluções para o problema. O relatório sugere a construção de barragens nos seus principais afluentes e no próprio Rio Capibaribe, que é a mesma sugestão apresentada quase um século antes pelo engenheiro José Tibúrcio.
1970	Ocorrem duas enchentes em Pernambuco. Em julho, as águas atingem a zona da Mata Sul e o Agreste do Estado, por conta do transbordamento dos rios Una, Ipojuca, Formoso, Tapacurá, Pirapama, Gurjaú, Amaraji e outros. A cidade que mais sofreu foi o Cabo, que teve 4 dos seus 5 hospitais inundados e várias indústrias pararam suas atividades. No Recife, as águas do Capibaribe causaram grande destruição. Na capital e interior, 500 mil pessoas foram atingidas e 150 morreram; 1.266 casas foram destruídas em 28 cidades. Só no Recife, 50 mil pessoas ficaram desabrigadas.
1973	Um material de propaganda da Secretaria de Obras do governo do Estado anuncia, em letras garrafais, que a Barragem de Tapacurá, inaugurada naquele ano, era solução definitiva para dois graves problemas que afetavam o Recife: abastecimento de água da população e "o fim" das enchentes no Recife.
1974	Outra enchente atinge o Recife. A Comissão de Defesa Civil, que tinha previsão do avanço das águas, retirou a tempo a população das áreas ribeirinhas. Em São Lourenço da Mata, uma ponte ficou parcialmente destruída e a população isolada. No município de Macaparana, 20 pessoas morreram, por conta do transbordamento do riacho Tiúma.

1975	<p>(A maior cheia da história da bacia do Rio Capibaribe): A enchente ocorreu entre os dias 17 e 18 de julho, deixando 80% da cidade do Recife sob as águas. A Figura 6 apresenta uma das principais avenidas do Recife, a Estrada dos Remédios, tomada pelas águas. Outros 25 municípios da cidade do Recife foram atingidos. Morreram 107 pessoas e 350 mil ficaram desabrigadas.</p> <p>Na capital e interior, 1.000 km de ferrovias foram destruídos, pontes desabaram, casas foram arrastadas pelas águas. Só no Recife, 31 bairros, 370 ruas e praças ficaram submersos; 40% dos postos de gasolina da cidade foram inundados; o sistema de energia elétrica foi cortado em 70% da área do município; quase todos os hospitais recifenses ficaram inundados, tendo o depósito de alimentos do Hospital Pedro II sido saqueado. Na Figura 7, observa-se imagem de um dos principais estádios de Pernambuco, a Ilha do Retiro, quase submerso pela água. Por terra, o Recife ficou isolado do resto do País durante dois dias.</p> <p>O governador Moura Cavalcanti decretou estado de calamidade pública na capital e em 9 municípios do interior. O presidente da República, em cadeia nacional de televisão, anunciou medidas para socorrer as cidades pernambucanas atingidas. No Recife, a cheia atingiu seu ponto culminante às 4h da madrugada do dia 18.</p>
1977	<p>Em 1 de Maio, nova enchente do Rio Capibaribe deixa 16 bairros do Recife embaixo d'água. Olinda e outras 15 cidades do interior do Estado também foram atingidas. Mais de 15 mil pessoas ficaram desabrigadas e só não foram registradas mortes porque a população das áreas ribeirinhas foi retirada 24 horas antes. São Lourenço da Mata foi o município mais atingido. Em Limoeiro houve desabamento de ponte.</p>
1978	<p>Em 29 de Maio, o presidente da República, Ernesto Geisel, vem ao Recife inaugurar a Barragem de Carpina, construída para conter as enchentes do Rio Capibaribe. Com 950 metros de comprimento, 42 metros de altura, a barragem tem capacidade para armazenar 270 milhões de m³ de água e ficava em princípio a maior parte do ano seca, só enchendo no período chuvoso. Hoje ela é utilizada para abastecimento de água de diversas cidades e para pesca, porém restringindo o volume armazenado no início dos períodos chuvosos a no máximo 50 milhões de m³.</p>
2000	<p>Entre os dias 30 de julho e 1 de agosto fortes chuvas castigaram o estado, inclusive a Região Metropolitana do Recife, deixando um total de 22 mortos, 100 feridos e mais de 60 mil pessoas desabrigadas. Cidades foram parcialmente destruídas onde as águas dos rios transbordaram e levaram pontes e casas. As chuvas atingiram 300 milímetros em apenas três dias e só na RMR aconteceram 102 deslizamentos de barreiras. No município de Belém de Maria, com 15 mil habitantes, 450 casas foram arrastadas pelas águas.</p> <p>O centro de Palmares ficou completamente debaixo de água e em Barreiros a água atingiu o teto do hospital da cidade. Dos 33 municípios seriamente atingidos, em 16 foi decretado estado de emergência e em 17, estado de calamidade pública, entre os quais Rio Formoso, Gameleira, Belém de Maria, Goiana, Cupira e São José da Coroa Grande.</p>

2004	<p>Fortes chuvas entre 08 de janeiro a 02 de fevereiro de 2004 castigaram todas as regiões do Estado, deixando 36 mortos e cerca de 20 mil pessoas desabrigadas. As chuvas (jamais registradas entre os dois primeiros meses do ano) foram provocadas por fenômenos atípicos (frente fria e outros) e destruíram pontes e estradas, açudes romperam, casas desabaram, populações inteiras ficaram ilhadas.</p> <p>Treze cidades ficaram em estado de calamidade pública e setenta e seis em estado de emergência. Petrolina, no sertão do São Francisco, ficou vários dias isolada, depois que as águas levaram a estrada de acesso à cidade. Todos os reservatórios do Sertão e Agreste transbordaram, inclusive o de Jucazinho, em Surubim, cuja barragem foi a última a entrar em operação na bacia do Capibaribe, em 1998. De acordo com levantamento do governo estadual, os prejuízos em todo o Estado chegaram a R\$ 54 milhões.</p>
2005	<p>Entre os dias 30 de maio e 02 de junho, fortes chuvas provocaram enchentes em 25 cidades do Agreste, Zona da Mata e Litoral pernambucanos, deixando 36 mortos e mais de 30 mil pessoas desabrigadas. Cerca de 7 mil casas foram parcialmente ou totalmente destruídas; 40 pontes foram danificadas; 11 rodovias estaduais foram atingidas. As cidades mais atingidas foram Moreno, Vitória de Santo Antão, Jaboatão, Nazaré da Mata, Pombos, Ribeirão, Cabo e Escada. O município que teve o maior número de casas destruídas ou parcialmente danificadas foi Vitória, com 5 mil casas.</p>
2010	<p>No dia 03 de maio, nova enchente castiga os Estados de Alagoas e Pernambuco, deixando um rastro de destruição por 30 cidades. Em Pernambuco, houve 16 mortes, mais de 80 mil pessoas ficaram desabrigadas em 14 cidades do Agreste, Litoral e Zona da Mata. As chuvas danificaram 2.013 quilômetros de estradas e 79 pontes caíram. As cidades afetadas: Palmares, Cortês, Água Preta, Barreiros, Correntes, Vitória de Santo Antão, Barra de Guabiraba, Jaqueira, Escada, Nazaré da Mata, Primavera, Amaraji, Chã Grande e Gravatá.</p>
2011	<p>Fortes chuvas atingem a Zona da Mata e a Região Metropolitana do Recife afetando 144.532 pessoas, segundo balanço pela Defesa Civil do estado. O levantamento contabilizou pessoas que tiveram prejuízos com chuvas e enchentes, além de 4.080 famílias que estão desabrigadas (perderam suas casas) e outras 8.503 desalojadas (abrigadas em casas de parentes e amigos), 48 cidades foram inundadas no estado. Destas, 16 decretaram situação de emergência. Duas mortes foram registradas, uma em Camaragibe e outro em Jaqueira.</p>

Fonte: Adaptado de Gomes, 2019.

Registro fotográfico do evento de 1975, ilustrado a seguir nas Figura 6 e 7.

Figura 6 – A Estrada dos Remédios na cheia de 1975



Fonte: Empório Pernambucano, 2019.

Figura 7 – Ilha do Retiro no dia 19 de julho de 1975

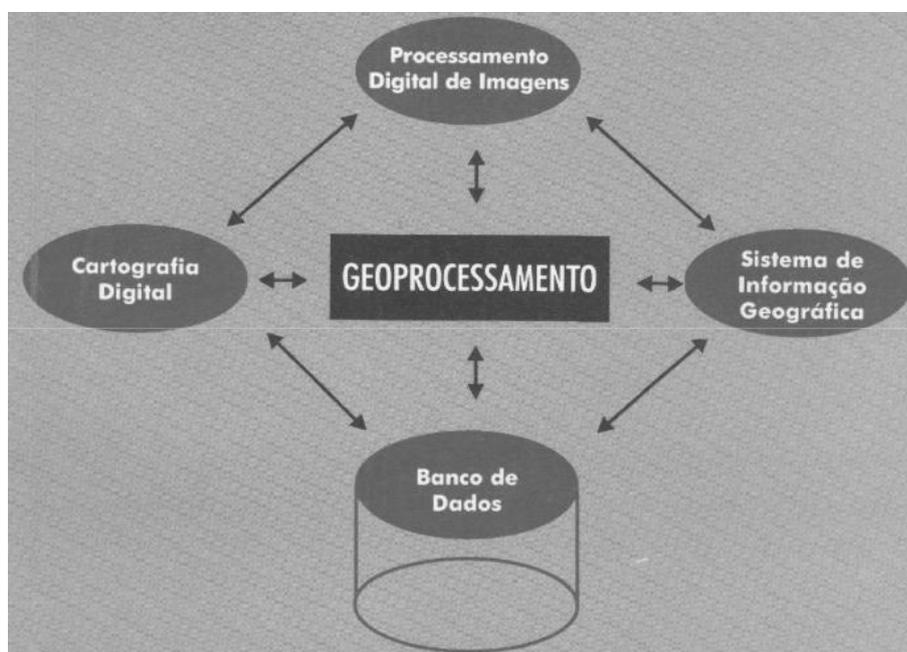


Fonte: Diário de Pernambuco, 2019.

dados e criar um banco de dados georreferenciados dessas informações (FARIAS C. C.,2010). É apresentado na Figura 9 esquema com as principais atividades envolvidas nos processos de geoprocessamento.

O geoprocessamento pode ser definido como sendo o conjunto de tecnologias destinadas a coleta e tratamento de informações espaciais, assim como o desenvolvimento de novos sistemas e aplicações, com diferentes níveis de sofisticação. Em linhas gerais o termo geoprocessamento pode ser aplicado a profissionais que trabalham com cartografia digital, processamento digital de imagens e sistemas de informação geográfica. (ROSA, 2013, p. 59).

Figura 9 – Principais atividades envolvidas em Geoprocessamento



Fonte: ROSA, 2013.

O termo Geoprocessamento expressa o conhecimento de técnicas matemáticas e computacionais para o tratamento da informação geográfica. Essa tecnologia influencia de maneira crescente as áreas de Cartografia, Análise de Recursos Naturais e Planejamento Urbano e Regional. As ferramentas computacionais utilizadas para Geoprocessamento são chamadas de Sistemas de Informação Geográfica (SIG), que permitem realizar análises complexas, ao integrar dados de diversas fontes e podendo criar bancos de dados georreferenciados. Tornando possível automatizar a produção de vários tipos de documentos inclusive geração de bases cartográficas. Em países de grandes dimensões como o Brasil, existe grande carência de informações adequadas para a tomada de decisões sobre os problemas

urbanos, rurais e ambientais, o Geoprocessamento apresenta um grande potencial para gerar dados e atenuar essa carência (MENDES E CIRILO, 2013)

2.5 SISTEMA DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA (SIG)

São sistemas automatizados utilizados para armazenar, analisar e manipular dados geográficos, esses dados representam objetos e/ou fenômenos em que a localização geográfica é uma característica inerente à informação e indispensável para analisá-la (CÂMARA, 2006).

O SIG é uma classe especial de sistema de informação que monitora não apenas os eventos, atividades e coisas, mas também onde esses eventos atividades e coisas acontecem ou existem (LONGLEY *et al.*, 2009).

Segundo DeMers (2016) Apud Santos (2017) a história do SIG começou na década de 50 do século passado, quando Jacqueline Tyrwhitt, urbanista britânica, fez uso de sobreposições de transparências combinando quatro mapas temáticos (geologia, elevação, hidrologia e terra) colocados sobrepostos, resultando ao final do processo em um único mapa com informações dos quatro mapas base.

Câmara (2006) apresenta um resumo das principais características de uma SIG:

- Integrar, numa única base de dados, informações espaciais provenientes de dados cartográficos, dados de censo e cadastro urbano e rural, imagens de satélite, redes e modelos numéricos de terreno.
- Combinar as várias informações, através de algoritmos de manipulação, para gerar mapeamentos derivados.
- Consultar, recuperar, visualizar e plotar o conteúdo da base de dados geocodificados.
- Os dados tratados em SIG's incluem imagens de satélite, modelos numéricos de terreno, mapas temáticos, redes e dados tabulares.

Segundo Ramirez e Souza (2007), os sistemas de informações geográficas podem ser utilizados para as mais diversas finalidades, como: planejamento do uso do solo, monitoramento ambiental, monitoramento de safras agrícolas, tomadas de decisões em prospecção mineral, como banco de dados geográficos, dentre outros.

Os problemas enfrentados na gestão de uma bacia hidrográfica são de alta dificuldade e necessitam de uma ação conjunta para poder resolvê-los. Ações localizadas não são suficientes para resolver os problemas de toda uma Bacia, é necessária a realização de estudos de toda a área e o comportamento macro da nascente até exutório, analisando assim os impactos gerais que podem acontecer. Dessa maneira o SIG, torna-se uma ferramenta eficiente e indispensável na tomada de decisão. O SIG associado a modelos hidrológicos matemáticos permite simular por longos períodos de tempo a produção de água da bacia hidrográfica, além de simular os efeitos produzidos quando aplicados a outros tipos de uso e ocupação da terra, na busca daquele que melhor se adapte para a produção de água na região (SANTOS, 2017).

2.6 MODELAGEM HIDROLÓGICA

A palavra *modelo* significa aquilo que serve de objeto para imitação. Na modelagem hidrológica o objeto a ser imitado é o ciclo hidrológico sobre uma determinada área, onde, por exemplo, podem ser quantificados, a partir do volume de água precipitado e da evaporação, diversas etapas do processo físico até a vazão gerada por essa precipitação sobre a bacia hidrográfica, que geralmente é o objetivo principal do modelo hidrológico.

Os modelos hidrológicos buscam representar a etapa terrestre do ciclo hidrológico, quantificando a precipitação que cai sobre a bacia através dos diversos processos físicos até ser gerado o escoamento numa determinada seção de um rio. A partir da ocorrência da precipitação, fragmenta-se o conhecimento pela análise de cada um dos processos que ocorrem: interceptação vegetal e nas cavidades do terreno, evapotranspiração, infiltração e percolação, balanço das águas nas camadas superior e inferior do solo e o escoamento superficial, subsuperficial, subterrâneo e

em rios, canais e lagos. Desta forma, os modelos hidrológicos conseguem integrar todos estes processos de modo a obter variáveis intermediárias e de saída da bacia, como a vazão (GOMES 2019, TUCCI, 2010).

A modelagem hidrológica baseia-se no desenvolvimento de representações matemáticas destinadas a simular processos relativos ao ciclo hidrológico, por exemplo, o processo de infiltração da água no solo e a recarga de aquíferos, ou mesmo o escoamento superficial e a vazão na rede de drenagem. Os modelos servem como uma ferramenta de auxílio, permitindo melhor compreensão dos fenômenos hidrológicos em uma bacia hidrográfica, assim como possibilita prever o comportamento da bacia sob diferentes cenários. A maior parte dos modelos se dedica em representar apenas alguns dos processos que ocorrem numa bacia hidrográfica, uma vez que a representação de todo o ciclo acarreta num custo computacional alto em relação aos objetivos práticos do modelo (LIMA, 2011).

De acordo com Tucci (2005), até à década de 1950, os estudos hidrológicos em sua grande maioria focavam-se em analisar as estatísticas dos processos, com um foco no desenvolvimento dos modelos ditos empíricos, os quais representam os processos hidrológicos sem levar em conta os fenômenos físicos envolvidos. Nos anos seguintes apareceram os primeiros modelos hidrológicos do tipo chuva-vazão, que consistiam na previsão dos efeitos da precipitação sobre uma bacia em termos de hidrogramas obtidos para o exutório, sendo, em sua maioria, modelos concentrados, do tipo determinístico e semi-conceitual.

A modelagem hidrológica é uma ferramenta importante e eficiente no monitoramento e gestão das águas. É de fundamental importância na gestão de bacias hidrográficas e no conhecimento dos processos hidrológicos pertencentes aos cursos d'água.

A utilização de técnicas de geoprocessamento auxiliada por ferramentas de SIG é capaz de modelar digitalmente uma determinada área, representando assim as singularidades da mesma, como a superfície do terreno, o tipo, ocupação e uso do solo, declividade e comprimento da rede hidrográfica e demais informações que possam levar o modelo digital de determinada área ao mais próximo de representar

a realidade física da mesma e com isso, simular e estudar o comportamento de eventos reais e/ou fictícios, usando os dados gerados nesse processo para tomada de decisões mais assertivas, de modo a evitar ou minimizar danos causados por eventos extremos de chuva e/ou seca.

2.7 MODELAGEM HIDRODINÂMICA

A hidrodinâmica é o estudo do movimento dos fluidos, sendo a representação matemática destes fenômenos as equações deduzidas a partir da aplicação dos princípios da conservação de três grandezas: energia, massa e quantidade de movimento. Apesar de não serem os únicos fenômenos que acontecem no movimento dos fluidos a aplicação destas leis são suficientes para a formulação da representação matemática do escoamento (TUCCI, 1998)

O escoamento da água pode ser representado considerando uma, duas ou três dimensões espaciais. Grande parte dos sistemas de rios e canais podem ser modelados utilizando-se apenas equações unidimensionais, pois nesses sistemas temos a dimensão longitudinal bem predominante em comparação às outras duas dimensões.

São conhecidos por modelos hidrodinâmicos aqueles modelos matemáticos que utilizam as equações da continuidade e dinâmica conhecidas como equações de Saint Venant.

Em 1871, Saint Venant estabeleceu suas hipóteses para desenvolver as equações do escoamento não-permanente gradualmente variado. Estas equações formam um sistema de equações diferenciais parciais quase linear, contendo alguns coeficientes experimentais, representados pelas equações da continuidade ou conservação da massa ((1) e a equação dinâmica ou da conservação da quantidade de movimento ((2), sem considerar o efeito dinâmico da contribuição lateral. Apesar das simplificações utilizadas nas hipóteses essas equações são tratadas como completas e precisa de esquemas numéricos avançados para serem resolvidas (BATISTA *et al*, 2003).

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = q_l \quad (1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(\frac{Q^2}{A})}{\partial x} + gA \frac{\partial y}{\partial x} = gA(S_0 - S_f) \quad (2)$$

onde: Q = vazão; x = distância ao longo do canal; A = área da seção transversal; t = tempo; q_l = contribuição lateral por unidade de largura; y = profundidade; S_0 = declividade de fundo; S_f = declividade da linha de energia devida à resistência; g = aceleração da gravidade. A equação dinâmica pode ser decomposta em cinco termos conforme Tabela 2.

Tabela 2 – Termos da equação da continuidade

Termo	Força	Descrição
$F1 = gAS_f$	Atrito	Força de atrito com o fundo e com as margens do rio, que tende a desacelerar o escoamento.
$F2 = gAS_0$	Peso	Força resultante do peso da massa da água no volume de controle.
$F3 = gA \frac{\partial y}{\partial x}$	Pressão	Força associada à diferença de pressão entre os contornos de montante e jusante do volume de controle.
$F4 = \frac{\partial(\frac{Q^2}{A})}{\partial x}$	Inércia advectiva	Advecção de quantidade de movimento para dentro do volume de controle.
$F5 = \frac{\partial Q}{\partial t}$	Inércia local	Aceleração local da água no volume de controle.

Fonte: Adaptado de Fan, Pontes & Paiva, 2014.

Os modelos baseados em simplificações das equações de Saint Venant exigem relativamente poucos dados de entrada e ainda assim produzem resultados aceitáveis na maior parte das aplicações. Entretanto deve-se ter cuidado na escolha, pois a decisão vai depender das características da região de estudo. Segundo Paiva (2009) os modelos baseados nas equações completas de Saint-Venant ainda apresentam inconvenientes, pois exigem uma grande quantidade de dados de entrada, e quando utilizados em bacias de grandes dimensões necessitam de pré-processamento mais bem elaborado dos dados topográficos.

No caso de planícies com grandes dimensões, a inundação da área fora da calha dos rios e canais é responsável por conduzir o fenômeno de propagação da onda de cheia. Nesses casos as equações unidimensionais não são adequadas já que as mesmas admitem que o escoamento ocorre predominantemente na direção longitudinal, não assumindo os fluxos independentes na planície e nem a interação canal-planície.

Nos estudos de inundações em sistemas rio-planície a aplicação de modelos hidrodinâmicos 2D tem se mostrado mais satisfatório, por melhor representar o escoamento sobre áreas onde ocorrem as trocas de volume de água entre a calha principal do rio e a planície de inundação assumindo assim o escoamento em ambos (PAZ,2010).

As equações de Saint-Venant também podem ser utilizadas para simular o escoamento não-permanente bidimensional, tendo como variáveis a profundidade e as velocidades em duas dimensões espaciais, conforme as equações apresentadas abaixo:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + u \frac{\partial h}{\partial x} + h \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial h}{\partial y} + h \frac{\partial v}{\partial y} = q \quad (3)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + g \frac{\partial h}{\partial x} = g(S_{0x} - S_{fx}) \quad (4)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + g \frac{\partial h}{\partial y} = g(S_{0y} - S_{fy}) \quad (5)$$

onde t é o tempo em s; u é a velocidade média do escoamento na direção x em m/s; v é a velocidade média do escoamento na direção y em m/s; g é a aceleração da gravidade em m²/s; h é a altura da lâmina d'água em m; S_{0x} é a declividade média do fundo do canal na direção x em m/m; S_{fx} é a declividade da linha de energia na direção x em m/m; S_{0y} é a declividade média do fundo do canal na direção y em m/m e S_{fy} é a declividade da linha de energia na direção y em m/m.

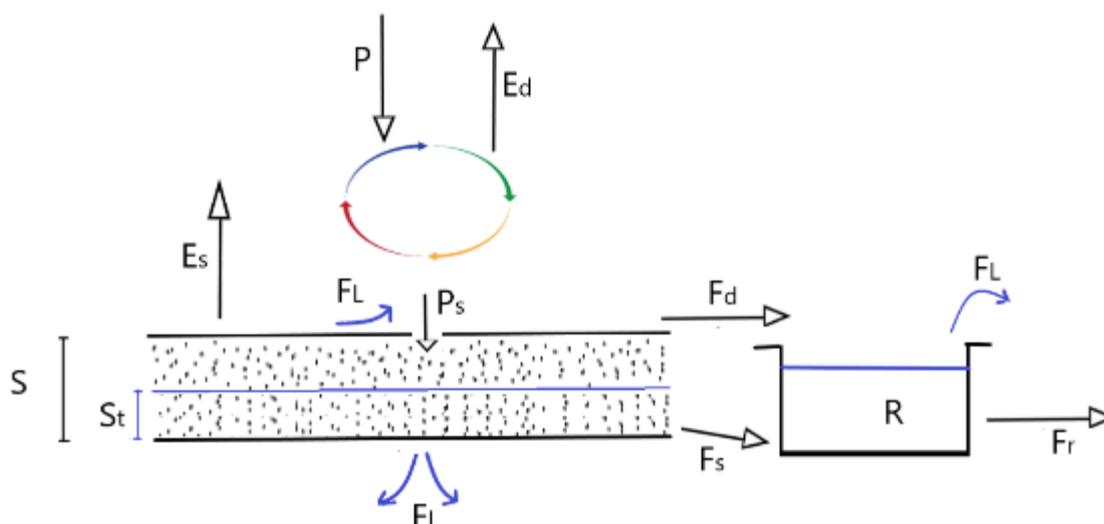
2.8 O MODELO CAMPUS AGRESTE WATERSHED MODEL (CAWM IV)

O modelo hidrológico utilizado nessa pesquisa foi CAWM IV que é um modelo hidrológico concentrado, desenvolvido na Universidade Federal de Pernambuco Campus Agreste, que possui como principal característica a sua simplicidade e poucos parâmetros a calibrar. Tem como um de seus principais objetivos a regionalização de parâmetros, ou seja, a transferência de seus valores entre bacias distintas, mas que possuam características semelhantes.

O CAWM IV tem como objetivo simular o escoamento superficial em bacias hidrográficas de regiões semiáridas, visando trazer um modelo que represente melhor estas áreas e preencher a lacuna sobre esse tipo de modelo. Visou-se aproveitar o potencial de procedimentos mais modernos de entrada e saída de dados e a possibilidade de utilização de informações geradas por técnicas de geoprocessamento sobre bases espaciais como SRTM – Shuttle Radar Topography Mission e o Programa Pernambuco Tridimensional - PE3D.

O modelo se encontra em sua quarta versão e sua fundamentação será descrita logo a seguir. As três primeiras versões do CAWM e suas respectivas conceituações podem ser encontradas em Feitoza (2018). Esta versão do modelo tem seu esquema representado na Figura 10 e possui em sua conceituação dois reservatórios, um reservatório do solo (**S**) e o reservatório da calha fluvial (**R**). Neste modelo, o balanço chuva-evaporação é feito de forma imediata. Se houver precipitação suficiente, toda a evapotranspiração é atendida e descontada. Se não, toda a precipitação é considerada como evapotranspiração direta (**E_d**) e registra-se uma parcela não atendida (**E_n**), que poderá ser total ou parcialmente retirada do reservatório do solo (**S**).

Figura 10 – Esquema do modelo CAWM IV.



Fonte: Cirilo, 2018.

Quando a precipitação for maior que a evapotranspiração, o valor excedente é denominado de chuva efetiva, ou seja, é a precipitação descontada da evapotranspiração. A chuva efetiva ($P_n = P - E_d$), que cai no solo, se distribui em três parcelas:

A primeira parcela é a recarga do solo (P_s), baseada no conceito de recarga apresentado por Edijatno e Michel (1989), e é calculada por meio da (6):

$$P_s = \frac{S \cdot \left(1 - \left(\frac{S_t}{S}\right)^2\right) \cdot \tanh\left(\frac{P_n}{S}\right)}{1 + \frac{S_t}{S} \tanh\left(\frac{P_n}{S}\right)} \quad (6)$$

Sendo S o valor máximo de S_t , que é a capacidade máxima de retenção de água no solo e S_t é o armazenamento de água no solo ao longo do tempo. No CAWM IV, o parâmetro S passa a ser variável de decisão (parâmetro a calibrar) ou pode ser estimado a partir do Curve Number médio da área em estudo.

A segunda parcela é a evapotranspiração complementar E_s , extraída das camadas mais superficiais do solo e limitada pelo valor E_n . Esta variável tem sua magnitude dependente do valor atribuído ao parâmetro α . A expressão para sua avaliação é dada pela (7):

$$E_s = \left(1 - e^{-\frac{\alpha \cdot S_t}{S}}\right) \cdot E_n \quad (7)$$

Onde:

E_n – Evapotranspiração potencial não atendida ($E_n = E - E_d$)

E – Evapotranspiração potencial

E_s – Evapotranspiração complementar (mm)

A constante α é definida para especificar a magnitude da evapotranspiração complementar. Este parâmetro foi introduzido para ajustar os dados pouco precisos dessa variável, se necessário podendo ser definido por calibração, conforme foi realizado nesta pesquisa. O balanço hídrico de longo período feito pelo modelo compara as lâminas de precipitação, vazão e evapotranspiração para identificar se a evapotranspiração está sub ou superdimensionada, com α podendo variar de 0 a um valor elevado (50, por exemplo), o que significa nenhuma ou máxima evapotranspiração complementar.

Da chuva efetiva P_n , descontados P_s e E_s , chega-se à terceira parcela, que representa o escoamento superficial direto para a calha fluvial F_d , dado pela (8):

$$F_d = P_n - P_s - E_s \quad (8)$$

Onde:

F_d – Escoamento superficial direto (mm)

P_n – Chuva efetiva (mm)

P_s – Recarga do solo (mm)

A partir do reservatório do solo com lâmina de água S_t armazenada no tempo t , ocorre o fluxo F_s que percola em direção ao reservatório da calha dos rios R . O fluxo que percola é representado pela (9):

$$F_s = K_s * S_t \quad (9)$$

Onde:

F_s – Percolação em direção ao reservatório da calha fluvial.

K_s – Parâmetro a ser calibrado no modelo associado à permeabilidade dos solos.

S_t – Armazenamento no solo ao longo do tempo, medido em mm.

A lâmina de água R armazenada no reservatório da calha fluvial é acrescida dos fluxos F_d e F_s . Esse reservatório não é limitado para considerar os extravasamentos por ocasião das cheias. Dele sai o escoamento fluvial F_r , dado pela Equação 7. A relação não linear obtida na (10) é utilizada no CAWM em todas as suas versões para representar o escoamento na calha fluvial, diferente da concepção usual de reservatório linear adotada na maioria dos modelos hidrológicos.

$$F_r = K * R^b \quad (10)$$

Onde:

b – definido como uma constante que tem o valor de $b = 5/3$. Este valor é justificado adiante.

R – Lâmina de água na calha fluvial.

K – Parâmetro característico para cada sub-bacia que pode ser calculado através da expressão conceituada a seguir.

A expressão para cálculo do parâmetro K foi desenvolvida como uma forma de regionalizar o parâmetro dentro de uma mesma bacia, por sub-bacias com áreas e extensões de rio fracionadas, bem como avaliar os valores do parâmetro em situações onde o passo de tempo Δt seja alterado. O desenvolvimento da expressão é esclarecido a seguir:

Considerando que o volume do reservatório da calha fluvial (V_{sup}) pode ser representado pela capacidade do conjunto de rios que compõem a bacia com extensão total L_t e a área de seção equivalente A_e , tem-se a (11):

$$V_{sup} = A_e * L_t \quad (11)$$

Como nos modelos hidrológicos, os volumes são representados em milímetros por unidade de área da bacia hidrográfica em Km^2 , a acumulação R é dada pela (12):

$$R = \frac{V_{sup}}{c * A_b} = \frac{A_e * L_T}{c * A_b} \quad (12)$$

Sendo a constante $c = 1000$ utilizada para compatibilizar as unidades utilizadas.

Considerando $V = A.L$ o volume de água acumulada em um trecho de rio com extensão L , a seguinte relação pode ser obtida pela equação (13):

$$Q = \frac{I^{1/2}}{n \cdot L^{5/3} \cdot B^{2/3}} V^{5/3} = K^* \cdot V^{5/3} \quad (13)$$

Por similaridade, a (13) sugere que o valor do expoente b da (10) pode ser estimado como $5/3$. As equações seguintes são desenvolvidas considerando as simplificações de utilizar uma área retangular equivalente para as seções da rede de rios A_e e sua largura superficial B_e .

Considerando o escoamento na calha equacionado pela Fórmula de Manning com as simplificações de seção retangular de largura equivalente B_e , assim como raio hidráulico aproximadamente igual à lâmina escoada, tem-se o escoamento representado pela (14):

$$Q = \frac{1}{n} \cdot A_e \cdot R_h^{2/3} \cdot I^{1/2} \cong \frac{1}{n} \cdot A_e \cdot y^{2/3} \cdot I^{1/2} \cong \frac{1}{n} \cdot \frac{A_e^{5/3}}{B_e^{2/3}} I^{1/2} \quad (14)$$

Onde $A_e = B_e \cdot y$ e $R_h \cong y$

A relação entre a vazão (m^3/s) e a lâmina escoada (mm) é dada pela (15):

$$Q = \frac{F_r \cdot c \cdot A_b}{\Delta t} \quad (15)$$

Onde Δt é o passo de tempo em segundos.

Combinando a (15) com o último termo da (14), tem-se a (16):

$$\frac{F_r \cdot c \cdot A_b}{\Delta t} = \frac{1}{n} \cdot \frac{A_e^{5/3}}{B_e^{2/3}} I^{1/2} \quad (16)$$

Explicitando a área equivalente na (12), tem-se a (17) e substituindo na (16), chega-se à (18):

$$A_e = \frac{c \cdot A_b \cdot R}{L_T} \quad (17)$$

$$\frac{F_r \cdot c \cdot A_b}{\Delta t} = \frac{1}{n} \cdot \left(\frac{c \cdot A_b \cdot R}{L_T} \right)^{5/3} \frac{I^{1/2}}{B_e^{2/3}} \quad (18)$$

Substituindo-se a (10) ($F_r = K \cdot R^b$ sendo $b = 5/3$) na (18) e explicitando o K , chega-se à expressão final do parâmetro obtida pela (19):

$$K = \frac{\Delta t}{n} \cdot \left(\frac{c^2 \cdot A_b^2}{B_e^2 \cdot L_T^5} \right)^{1/3} I^{1/2} \quad (19)$$

Portanto, o parâmetro K é calculado de acordo com as características da bacia e estas informações podem ser obtidas a partir de técnicas de geoprocessamento utilizando o modelo digital do terreno.

As perdas de água no sistema podem ser devidas a diversas causas: volumes de retenção nas depressões do solo e pela vegetação, gradativamente evaporados; volumes de extravasamento que não retornam à calha fluvial, igualmente evaporados; infiltração nas fendas do embasamento cristalino. Essa perda é extraída do reservatório da calha fluvial (R), considerando que o efeito do extravasamento seja o mais significativo. Utiliza-se para cálculo das perdas a (20):

$$F_L = K_L \cdot R^{1,5} \quad (20)$$

Onde:

K_L – Coeficiente de perdas a ser calibrado no modelo.

R – Lâmina de água na calha fluvial.

F_L - Perdas de água do sistema.

O expoente 1,5 tem sido testado e aprovado nas diversas simulações desenvolvidas.

Portanto, os parâmetros a calibrar do modelo CAWM IV são: K_s , K_L e eventualmente α e S . Nas simulações feitas até agora se constata que é possível ajustar o modelo adequadamente com o parâmetro $b = 5/3$ fixo. O parâmetro K tem se mostrado adequado para rios sem declividades acentuadas. Caso isso não aconteça, é necessário calibrar o valor desse parâmetro ou adotar valores artificialmente elevados para a largura da seção equivalente B_e . Além disso, o parâmetro S pode deixar de ser calibrado, utilizando-se para sua estimativa a capacidade de retenção máxima de água do solo S calculada a partir do Curve Number médio da bacia através da (21). Este procedimento foi realizado para a geração dos resultados desta pesquisa e demonstrou-se adequado para as calibrações e validações dos demais parâmetros.

$$S = 254 \left(\frac{100}{CN} - 1 \right) \quad (21)$$

2.9 OPERAÇÃO DE RESERVATÓRIOS

Os modelos de operação de reservatórios são utilizados de diferentes formas no gerenciamento dos recursos hídricos de uma bacia hidrográfica, são utilizados na concepção dos projetos dos reservatórios, definição do volume de água outorgável, definição do nível de racionamento de água de acordo com a estação climática ou ainda na operação em tempo real para controle de cheias. A modelagem para cada uma destas situações incorpora diferentes níveis de detalhamento da bacia hidrográfica e do reservatório (isolado ou do sistema de reservatórios) (RIBEIRO, 2011).

Um modelo de operação de reservatórios reproduz o desempenho hidrológico de uma bacia hidrográfica e auxilia o sistema na implementação de regras operacionais de acordo com as vazões afluentes fornecidas. Em geral os modelos são baseados no balanço de massa para reproduzir o caminhamento de água por meio do sistema

de reservatórios. Varias interações são feitas comparando a performance do sistema diante da configuração das alternativas de reservatórios, armazenamentos, regras de operação, níveis de demanda e séries de vazões afluentes. Os modelos de simulação devem também ser capaz de analisar a operação dos sistemas de reservatórios, utilizando medidas hidrológicas e de performance econômica, de forma que possa analisar por exemplo: vazões firmes, rendimento da geração hidroelétrica, danos causados por enchentes e etc. (WURBS, 1993). Por serem de fácil entendimento e manipulação, os modelos de simulação são amplamente aceitos por altas escalas gerenciais, geralmente constituídos por não especialistas ou até mesmo por leigos. Tornando a simulação uma ótima ferramenta no estudo da operação de sistemas de recursos hídricos complexos, incorporando a experiência e o julgamento do decisor ao modelo (ROBERTO, 2002).

A operação de controle de cheias pode ser estabelecida através dos meios estruturais e não estruturais como alternativa para o fornecimento de proteção contra enchentes, redução dos riscos e importância dos danos causados. A utilização de ferramentas computacionais, tais como modelos matemáticos, hidrológicos e climáticos, auxilia a operação do reservatório a fim de propor possíveis cenários de vazões, mitigando efeitos de cheias e secas. (CABRAL *et. al.*, 2013).

De forma geral os modelos de operação de reservatórios são de simples concepção e baseados no balanço de massa analisando a vazão afluente ao reservatório e prevendo a uma possível vazão de saída. São normalmente baseados no Método de Pulz, que utiliza em sua formulação a equação de conservação da massa associada a uma relação cota-área-volume do reservatório e equações dos dispositivos de descarga para, em conjunto, quantificarem o balanço hídrico no reservatório.

Vários modelos foram desenvolvidos no intuito de simular o balanço de massa dos reservatórios e auxiliar os gestores nas tomadas de decisões quanto à operação dos reservatórios. O Laboratório de Sistema de Suporte a Decisão da USP, desenvolveu a Plataforma AQUANET que contém simulador/otimizador de sistemas de reservatórios, utilizando programação linear com algoritmo de rede de fluxo para otimizar a alocação sob sistema de prioridades (PORTO,2003) .

Outro modelo de operação de reservatórios mais complexo é o HEC-ResSim. Este software de simulação de sistema de reservatórios foi desenvolvido pelo Corpo de Engenheiros do Exército dos EUA, Instituto de Recursos Hídricos, e é usado para modelar a operação de reservatórios em um ou mais reservatórios de acordo com uma variedade de metas e restrições operacionais (GOMES, 2019).

Diante destas considerações, o modelo de operação de reservatórios utilizado nesta pesquisa também tem como princípio o balanço de massa hídrica e foi desenvolvido para simular o fluxo vertido pelas barragens em estudo de acordo com as vazões simuladas no modelo hidrológico CAWM IV. O modelo se encontra em formato de planilha MS Excel e sua metodologia estará descrita a seguir na seção 3.5. Considerou-se no balanço a retirada da vazão regularizável para outros fins, o que efetivamente se faz nesses mananciais. Deduzidas a evaporação e a retirada, o balanço de massa é feito com o auxílio da curva cota-área-volume. As características dos sistemas de descarga (seção, cotas, equações) são inseridas no modelo para cálculo da vazão defluente.

2.10 ESTUDOS HIDROLÓGICOS E/OU HIDRODINÂMICOS

Vários estudos hidrológicos e hidrodinâmicos foram realizados na última década. Comenta-se a seguir alguns desses estudos e resultados.

Edjatinio *et. al.* 1999 descreveram o GR3J um novo modelo hidrológico utilizando vazões diárias, cuja característica principal é a sua simplicidade, ao envolver apenas três parâmetros a calibrar. Apesar de sua simplicidade, alcançou, em média, resultados valiosos em um conjunto de 140 simulações na França e superou um modelo linear envolvendo 16 parâmetros. Posteriormente o modelo foi aprimorado por Perrin *et al* (2003) e aplicado com sucesso a uma grande quantidade de bacias hidrográficas em diferentes continentes.

Sunkar e Tonbul (2010) estudaram o rio Iluh, que atravessa a cidade de Batman, na Turquia. Em outubro de 2006, o rio Iluh e seus afluentes causaram 10 mortes e danos materiais de cerca de 15 milhões de euros. Os autores verificaram que além

de fatores humanos, as características hidrográficas do rio Iluh também são eficazes na ocorrência de tais inundações. Foram realizadas várias análises hidrográficas, entre elas: ensaios granulométricos para determinar o tipo de solo; ensaios de infiltração para encontrar a capacidade de infiltração; e análises do perfil e inclinação em mapas digitais. Depois foi modelado no HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center's River Analysis System) o trecho do rio que permanece no centro da cidade. Observou-se que a declividade aumenta ao longo da bacia e a encosta fica na faixa de 0 a 12%. Os resultados revelaram que a declividade não é tão elevada, sendo uma vantagem em relação a não ocorrência de inundações na cidade, por aumentar a penetração de água no solo. Mas a fraca capacidade de infiltração da bacia impede essa penetração. A forma do rio Iluh e localização do leito principal no centro da bacia são também eficazes para a ocorrência de inundações. A vazão máxima estimada para o evento de 2006 foi de 450m³/s. Em resumo, as características hidrográficas do rio Iluh são de grande importância no que diz respeito à ocorrência de inundações na cidade de Batman.

Yarrakula et al. (2010) estudou o rio Subernarekha, um dos mais longos rios interestaduais no leste da Índia e que apresenta uma área de mineração onde qualquer inundações pode resultar em um acúmulo de poluentes radioativos na região circundante. No estudo, foi feita a modelagem hidrodinâmica do rio Subernarekha com o modelo HEC-RAS, conduzindo para o desenvolvimento de uma previsão de inundações. A modelagem hidrodinâmica do rio Subernarekha teve um alcance de 154 km, de Jamshedpur a Bhosraghat, prevendo níveis de inundações. Os resultados da modelagem em termos de nível de água e vazão foram comparados com dados disponíveis para a enchente de 1997. O coeficiente de eficiência de Nass-Sutcliffe para a vazão foi encontrado na faixa de 0,85-0,94, enquanto que o desvio da vazão de pico foi de -18,32% para 0,11% e o desvio do nível de água máximo só variou de -5,53% para 0,32%. Assim, o modelo hidrodinâmico para o rio Subernarekha pôde prever enchentes para diferentes períodos de retorno.

Santos (2013) realizou o estudo da propagação e do controle de cheias em bacias hidrográficas com grande variação de altitude, tendo como estudo de caso a bacia do rio Mundaú, foram aplicados os modelos integrados HEC-HMS e HEC-RAS com

a utilização de ferramentas de geoprocessamento. Como resultados da pesquisa, obteve a calibração e validação do modelo e a simulação do evento de 2010, chegando a propor um possível barramento a montante da cidade de Correntes para controle de enchentes.

Dantas *et. al.* (2014) realizaram uma análise regional de frequência, para identificar o padrão de ocorrência das inundações mais severas na bacia do rio Una e, a partir desse padrão, estabelecer estratégias e cenários que permitam prever e acompanhar a evolução das inundações. Foi feito um estudo de regionalização (com o método do Index-Flood) e classificação das chuvas intensas (com o método Standardized Precipitation Index), buscando definir padrões da distribuição de chuvas que geram as inundações na bacia. Utilizando-se de modelos hidrológicos e hidrodinâmicos, juntamente com os dados hidrológicos levantados, na composição de modelo para alerta de cheias e geração de cenários de inundação em cidades da bacia hidrográfica do rio Una. Como resultado, demonstra-se que a determinação de padrões de precipitação explica adequadamente a ocorrência dos principais eventos de cheia, possibilitando a previsão e o acompanhamento das inundações a partir da previsão meteorológica e do monitoramento pluviométrico.

Ribeiro Neto *et. al.* (2015) Reconstituiu o evento de grandes cheias ocorridas em junho 2010, utilizando o modelo chuva-vazão HEC-HMS e o modelo hidrodinâmico HEC-RAS. Simular os eventos de cheia ocorridos na bacia hidrográfica do rio Una, observando os principais aspectos que influenciam a formação da cheia no rio e como isso influencia o processo de calibração dos modelos. O resultado pôde ser comparado apenas com a profundidade da água espacializada na cidade de Palmares. Observou-se superestimação da profundidade calculada pelo modelo HEC-RAS, mas uma boa aderência à abrangência da área inundada.

Alves *et. al.* (2017) analisaram a influência da barragem de Serro Azul comparando dos eventos hidrológicos extremos, o primeiro ocorrido no ano de 2010 antes da construção da barragem e o segundo no ano de 2017, quando a barragem já se

encontrava em operação. Após à análise ficou constatado que, mesmo com o evento hidrológico de 2017 apresentando uma precipitação média 9,3% maior que a de 2010, a vazão observada na Cidade de Palmares teve um amortecimento de 30% na vazão de pico devido à barragem.

Alves (2017) desenvolveu um modelo de previsão de enchentes, capaz de integrar informações de previsão de chuva, modelagem hidrológica e modelagem hidrodinâmica. Avaliou a distribuição da vazão gerada através de modelo hidrológico HEC-HMS e simulou com o modelo hidrodinâmico HEC-RAS o efeito da construção de barragens nas cidades de Palmares, Água Preta e Barreiros para o maior evento de chuva já registrado, ocorrido em 2010. Os resultados encontrados indicaram relevante diferença quantitativa e posicional nos dados dos modelos de previsão. O modelo hidrológico HEC-HMS teve melhorias na distribuição de vazão ao longo da bacia e na estabilidade global das vazões geradas. O modelo hidrodinâmico demonstrou redução significativa na vazão de pico a montante das áreas urbanas de Palmares, Água Preta e Barreiros.

Silva (2019) realizou simulações hidrodinâmicas da bacia do rio Tejipió-PE, delimitando as regiões inundáveis a partir de eventos de chuvas intensas com a influência dos movimentos das marés e apresentou simulações para cenários futuros, onde se prevê o aumento do nível médio dos oceanos. Caracterizou a bacia com dados geográficos de alta resolução espacial obtidos pelo projeto Pernambuco 3D e, por meio de ferramentas de modelagem como o SWMM, para obtenção de vazões por trechos dos rios e riachos da bacia de estudo, realizou a análise hidrodinâmica desses corpos d'água utilizando o modelo HEC-HAS. Os resultados indicaram situações preocupantes quanto a cenários futuros. O sistema da bacia implantado no SIG possibilitará tomadas de decisão sobre projetos e obras na bacia do Tejipió, objetivando apresentar soluções para essas regiões, inclusive as decorrentes do aumento do nível médio do mar, como prevê estudos do IPCC, e auxiliar também no planejamento urbano

Gomes (2019) em seu estudo desenvolveu a integração entre modelagem hidrológica e operação de reservatórios para a avaliação da eficiência das barragens de Jucazinho, Carpina, Tapacurá e Goitá, no que concerne ao controle de cheias.

Para isso, buscou-se aprimorar e aplicar o Campus Agreste Watershed Model (CAWM IV), inédito modelo hidrológico concentrado com apenas três parâmetros a calibrar. Em complemento, simulou-se o comportamento das barragens através de um modelo que representa o balanço de massa nos reservatórios. As simulações hidrológicas com o CAWM IV demonstraram resultados aceitáveis e bons para todas as sub-bacias estudadas na bacia do rio Capibaribe. A simulação do modelo de operação dos reservatórios também representou satisfatoriamente as vazões de chegada nos postos fluviométricos de Limoeiro, Paudalho e São Lourenço e sinalizou a importância das barragens no controle de cheias para estas cidades. Porém, também concluiu que, mesmo com a presença das barragens, a cidade do Recife não está completamente imune ao efeito de eventos hidrológicos extremos, como o ocorrido em 2011.

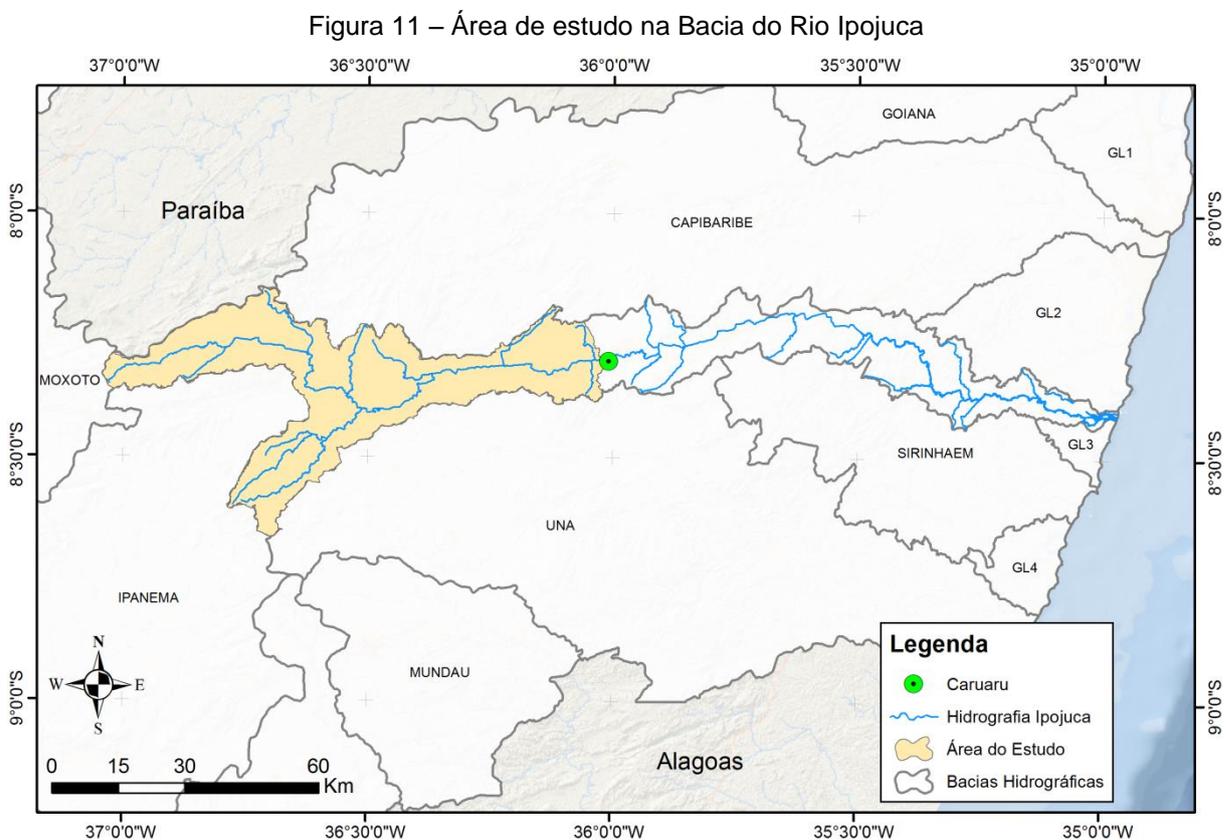
Ferraz (2019) assim como Gomes (2019) buscou aplicar uma nova ferramenta de modelagem hidrológica, o CAWM V, voltado à simulação em bacias hidrográficas com rios perenes. Em seguida realizou a integração do CAWM V com o modelo hidrodinâmico HEC-RAS, para avaliar a magnitude de possíveis inundações nas cidades da bacia do rio Sirinhaém, considerando dois cenários: o atual, sem controle de sua rede hidrográfica, e um fictício onde já estivessem construídas cinco barragens para contenção que fazem parte do programa do Estado de Pernambuco para minimizar as catástrofes na Mata Sul do estado. As simulações mostraram a redução da vazão de pico e da magnitude das inundações, bem como a possibilidade de oferta hídrica significativa que a construção das barragens trará para os usos múltiplos dos recursos hídricos na região. No entanto, observou-se que o percentual de redução das áreas inundáveis com a construção das barragens é baixo, o que requer que a necessidade de que a concepção das mesmas seja revista para que haja efetividade na redução das inundações.

3 METODOLOGIA DA PESQUISA

Neste capítulo caracteriza-se a área de estudo e são conceituados os materiais e métodos utilizados na modelagem hidrológica/hidrodinâmica e na operação de barragens.

3.1 ÁREA DE ESTUDO

Este trabalho foi desenvolvido na parte inicial da bacia do rio Ipojuca envolvendo o alto e médio curso até à cidade de Caruaru, pode-se observar a área do estudo na Figura 11. Foram realizados os estudos hidrológicos da nascente do rio Ipojuca até o posto fluviométrico localizado no início da zona urbana do município de Caruaru, de modo que as vazões registradas no posto representam a vazão de entrada para a modelagem hidrodinâmica do escoamento no rio Ipojuca ao longo do perímetro urbano da cidade de Caruaru.

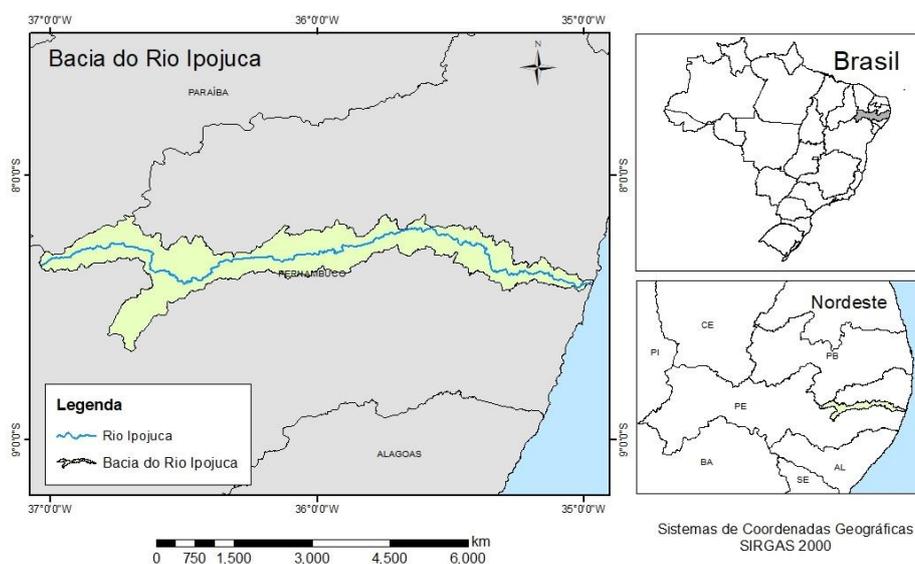


Fonte: O autor, 2019.

3.1.1 Descrição da Bacia

A Bacia do Rio Ipojuca localiza-se, em sua totalidade, no estado de Pernambuco, entre as latitudes de 8°09'50" e 8°40'20" sul e nas longitudes 34°57'52" e 37°02'48", a oeste de Greenwich conforme ilustrado na Figura 12. Ela ocupa uma área de 3.435,34 km, o que corresponde a 3,49% do Estado de Pernambuco. De acordo com o Plano Estadual de Recursos Hídricos de Pernambuco (1998), a bacia hidrográfica do rio Ipojuca constitui a unidade de planejamento - UP3, limitando-se ao norte com a Bacia Hidrográfica do Capibaribe (UP2) e o estado da Paraíba; ao sul, com as bacias dos rios Sirinhaém (UP4) e Una (UP5); o limite oeste é feito pelo Estado da Paraíba e pelas Bacias dos rios Moxotó (UP8) e Ipanema (UP7) e a leste pelo Oceano Atlântico e pelo grupo de pequenas bacias de rios litorâneos GL2 e GL3 (UP15 e UP16, respectivamente) (CONDEPE/FIDEM, 2011).

Figura 12 – Mapa de localização da Bacia do Rio Ipojuca



Fonte: O autor, 2019.

A bacia do rio Ipojuca atravessa as mesorregiões do Agreste e da Mata, cortando cidades importantes no Estado, não somente sob o aspecto da densidade populacional, mas também por sua inserção na economia de Pernambuco. É apresentado a seguir na Tabela 3 a bacia do Ipojuca, considerando os municípios drenados, a área do município, a área pertencente à bacia e o percentual da área da bacia ocupada pelo município e o percentual do município que pertence à bacia.

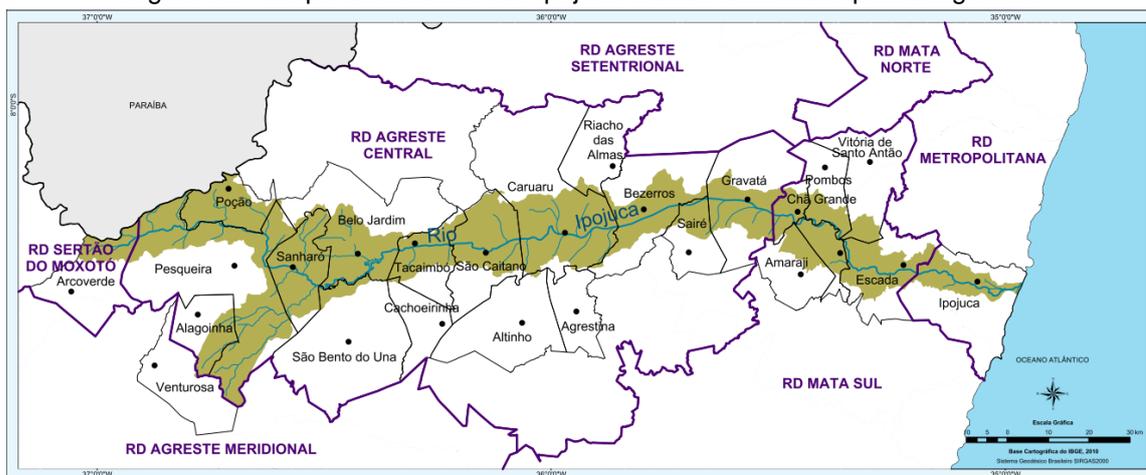
Tabela 3 – Municípios que integram a bacia do Rio Ipojuca

Municípios	Área do Município em km ²	Área do Município pertencente à bacia em km ²	% da bacia ocupada pelo Município	% do Município pertencente à bacia
ALAGOINHA	180,1	52,8	1,50	29,3
ALTINHO	452,6	5,4	0,15	1,2
AMARAJI	238,8	64,5	1,84	27,0
ARCOVERDE	380,6	102,8	2,93	27,0
BELO JARDIM	653,6	232,0	6,60	35,5
BEZERROS	545,7	234,1	6,66	42,9
CACHOEIRINHA	183,2	2,0	0,06	1,1
CARUARU	932,0	391,4	11,14	42,0
CHÃ GRANDE	83,7	69,8	1,99	83,4
ESCADA	350,3	203,5	5,79	58,1
GRAVATÁ	491,5	183,8	5,23	37,4
IPOJUCA	514,8	174,5	4,97	33,9
PESQUEIRA	1.036,0	677,1	19,27	59,7
POÇÃO	212,1	195,1	5,55	92,0
POMBOS	236,1	67,8	1,93	28,7
PRIMAVERA	96,5	78,1	2,22	80,9
RIACHO DAS ALMAS	313,9	11,3	0,32	3,6
SAIRÉ	198,7	76,1	2,17	38,3
SANHARÓ	247,5	240,6	6,85	97,2
SÃO BENTO DO UNA	715,9	77,3	2,20	10,8
SÃO CAETANO	373,9	255,4	7,27	68,3
TACAIMBÓ	210,9	130,8	3,72	62,0
VENTUROSA	326,1	3,9	0,11	1,2
VITÓRIA DE SANTO ANTÃO	345,7	42,9	1,22	12,4

Fonte: Adaptado CONDEPE/FIDEM, 2011.

É ilustrado a seguir na Figura 13 a Bacia hidrográfica do Ipojuca e todos os municípios por ela interceptado.

Figura 13 – Mapa da bacia do Rio Ipojuca e limite dos municípios integrantes



Fonte: CONDEPE/FIDEM, 2011.

3.1.2 Hidrografia e uso da água

O rio Ipojuca nasce nas encostas da serra do Pau D'arco, no município de Arcoverde, a uma altitude de aproximadamente 900m. Seu percurso, com cerca de 250 km, é preponderantemente orientado na direção oeste-leste (Figura 14), sendo seu regime fluvial intermitente, tornando-se perene a partir das proximidades da cidade de Caruaru. Próximo a Gravatá, as vazões mínimas e máximas são da ordem de 0,80 e 70m³/s, respectivamente. Seus principais afluentes são, pela margem direita, riacho Liberal, riacho Papagaio, riacho Pau Santo e rio do Mel e, pela margem esquerda, riacho Angelo Novo, riacho da Onça, riacho dos Mocós, riacho do Meio e riacho Pata Choca. O riacho Liberal, seu afluente mais importante, tem suas nascentes nas encostas da Serra do Bucu, município de Venturosa, a uma altitude aproximada de 1.000m, drenando ao longo dos seus 36km de extensão, além de áreas daquele município, também Alagoinha, Pesqueira e Sanharó, desaguando no rio Ipojuca, a cerca de 6km a jusante da cidade de Sanharó.

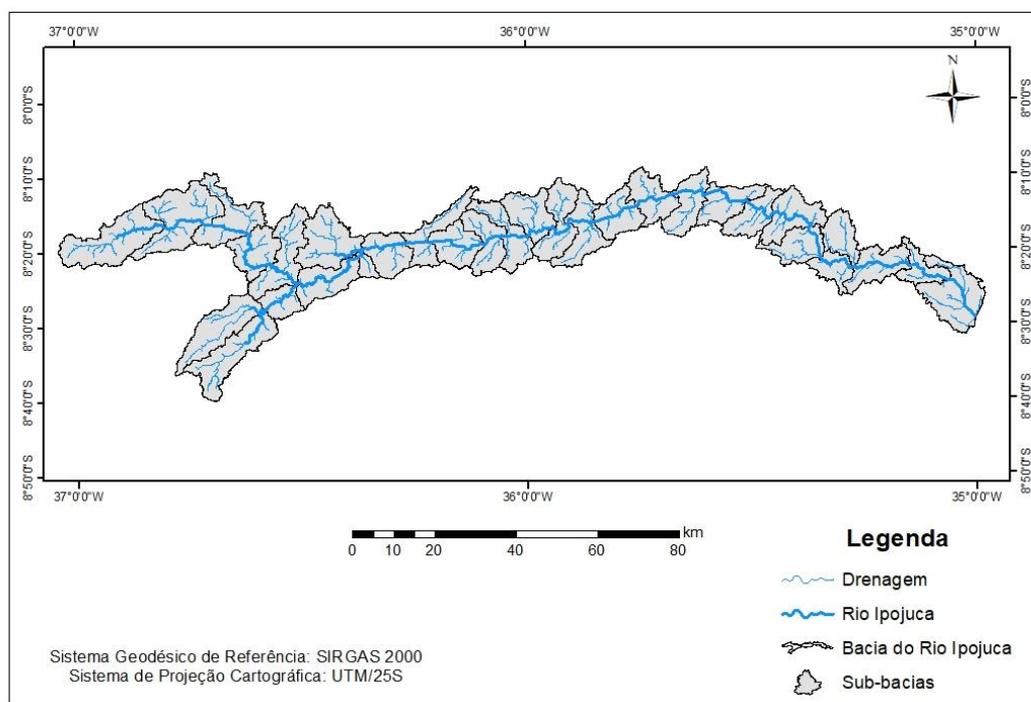
De acordo com a Companhia Pernambucana de Meio Ambiente (CPRH), as águas superficiais têm qualidade extremamente variável. A região da bacia onde se observa a maior concentração de sais é a sub-bacia do Riacho Liberal, de forma que a qualidade da água do próprio Ipojuca, a jusante da foz desse afluente, se mostra prejudicada enquanto outras contribuições laterais não permitem uma diluição suficiente.

A Zona da Mata é dominada pela produção canavieira. Na região de Gravatá são cultivadas as olerícolas, flores, plantas ornamentais, mandioca, bem como ocorre a pecuária de corte ou de leite. A bovinocultura ocupa uma posição de destaque nos municípios de Sanharó, São Caetano e Pesqueira.

O clima de brejo, na porção norte de Belo Jardim, favorece a produção da banana e cenoura, enquanto o município de Caruaru apresenta uma diversidade de atividades econômicas. Outra área com clima de brejo existem ao sul de São Caetano e sudoeste de Caruaru, com o Brejo do Buraco e o Brejo de Serra dos Cavalos com predominância de plantação de chuchu, banana, horticultura e floricultura.

O aproveitamento hidroagrícola atual, no trecho semi-árido do vale restringe-se, fora as glebas da empresa Peixe em Pesqueira (dedicada à agroindústria de doces e derivados de tomate), a pequenas áreas aluviais nas imediações da calha do Ipojuca, no trecho entre São Caetano e Gravatá, dedicados a capineiras e hortaliças variadas.

Figura 14 – Hidrografia da bacia do rio Ipojuca



Fonte: O autor, 2019.

O sistema de reservatórios da bacia hidrográfica do rio Ipojuca, em toda a sua extensão, é composto por sessenta e seis reservatórios. Desse total, trinta e três possuem capacidade abaixo de 100 mil metros cúbicos, apenas seis têm capacidade máxima acima de um milhão de metros cúbicos e desses, apenas três reservatórios têm capacidade máxima superior a 10 milhões de metros cúbicos, concentrando 65% do potencial de acumulação da bacia do Ipojuca que é da ordem de 76 milhões de m³.

Os principais reservatórios atuantes na bacia do rio Ipojuca são: Pão de Açúcar, Pedro Moura Jr. (Belo Jardim), Eng. Severino Guerra (Bitury), Duas Serras, Manuíno, Brejão e Taquara. É apresentado na Tabela 4 algumas características destes reservatórios quanto à capacidade máxima, finalidade e ano de construção. O governo do estado desapropriou áreas do município de Ipojuca, próximo à foz, para construção da barragem Engenho Maranhão, com capacidade da ordem de 50 milhões de m³, mas as obras não foram iniciadas.

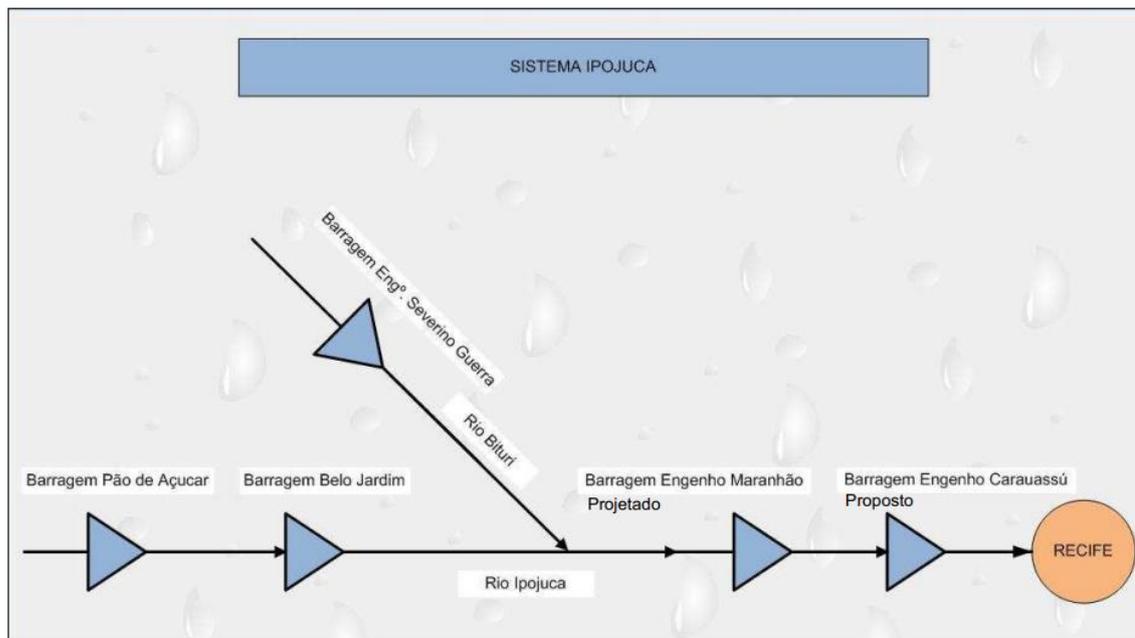
Tabela 4 – Informações gerais dos principais reservatórios.

Reservatório	Município	Capacidade (x10⁶ m³)	Finalidade	Ano de construção
Pão de Açúcar	Pesqueira	34,23	Abastecimento e piscicultura	1987
Belo Jardim	Belo Jardim	30,74	Abastecimento	1998
Bitury	Belo Jardim	16,41	Abastecimento	1961
Duas Serras	Poção	2,03	Abastecimento	
Manuíno	Bezerros	2,02	Abastecimento	1990
Brejão	Sairé	1,63	Abastecimento	
Taquara	Caruaru	1,35	Abastecimento	1998

Fonte: Adaptado Pernambuco – TOMO I, 2010.

O conjunto de reservatórios da bacia hidrográfica do rio Ipojuca tem basicamente a função de abastecimento urbano e agropecuário. Um diagrama unifilar detalhado na Figura 15, ilustra o sistema de reservatórios da bacia hidrográfica do rio Ipojuca.

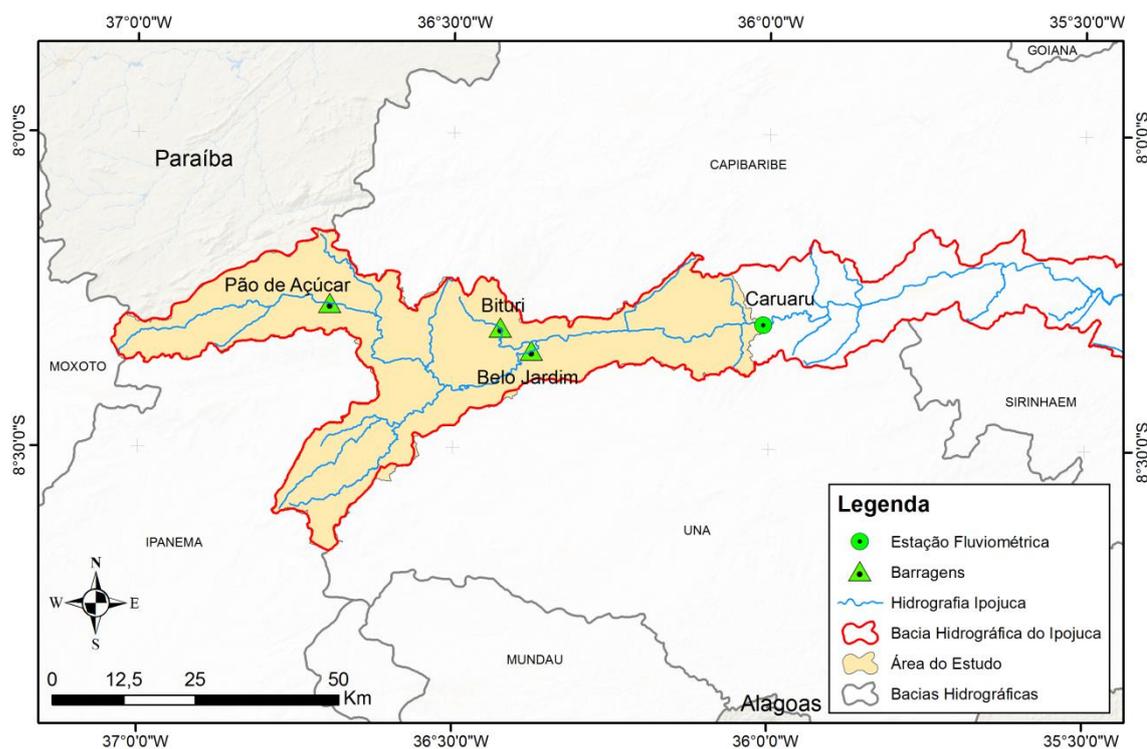
Figura 15 – Representação do sistema de reservatórios da bacia hidrográfica do rio Ipojuca.



Fonte: Pernambuco – TOMO I, 2010.

Os três maiores reservatórios, com potencial de acumulação superior a 10 milhões de metros cúbicos serão melhores apresentados a diante. É apresentado na Figura 16 a localização destes reservatórios inseridos na bacia do Rio Ipojuca.

Figura 16 – Principais reservatórios na Bacia do Rio Capibaribe



Fonte: O autor, 2019.

3.1.2.1 Reservatório de Pão de Açúcar

Localizado no município pernambucano de Pesqueira, o reservatório tem capacidade para armazenar 34.230.600m³ de água e destina-se ao abastecimento das cidades de Pesqueira e Sanharó, além de atender as demandas de irrigação e pesca.

O reservatório Pão de Açúcar, construído como regulador de um sistema de perenização do rio com barragens sucessivas teve sua finalidade original modificada, passando a ser utilizada como manancial para o abastecimento público. Como hoje esta barragem se situa em terras que passaram a pertencer à reserva dos índios Xucurus, o uso das águas requer um processo mais delicado de negociação.

A bacia hidrográfica, delimitada a partir do barramento tem área em torno de 403,50km², situada em uma região com índices pluviométricos da ordem de 800 mm anuais. O coeficiente de escoamento é de 3,9% e o deflúvio médio anual de 30 mm.

Na Tabela 5 são apresentadas as principais características técnicas do reservatório Pão de Açúcar.

Tabela 5 – Características técnicas do reservatório Pão de Açúcar

Reservatório Pão de Açúcar	
Área da Bacia Hidrográfica	438 km ²
Volume Total do Reservatório	34,23 x 10 ⁶ m ³
Cota de coroamento	741 m
Extensão do coroamento	640 m
Cota do sangradouro	736 m
Extensão do sangradouro	175 m

Fonte: Adaptado de Pernambuco, 2010.

3.1.2.2 Reservatório Pedro Moura Jr. (Belo Jardim)

Este reservatório encontra-se no rio Ipojuca, localizado a cerca de 4km a Sudeste da cidade de Belo Jardim. Esse local permite que o reservatório receba afluxos dos riachos Liberal e Papagaio – afluentes do rio Ipojuca pela margem direita.

A bacia hidrográfica, delimitada a partir da seção de barramento, possui área total de aproximadamente 1.317,16km². Entretanto, desse total, apenas 913,66km² configuram-se em área não controlada, pois a montante do reservatório Belo Jardim localiza-se o reservatório Pão de Açúcar.

A capacidade máxima de armazenamento do reservatório Belo Jardim é de 30.740.000m³, o que corresponde a uma área da bacia hidráulica de aproximadamente 320ha.

Sua principal finalidade é o abastecimento urbano do sistema adutor Bitury, que supre várias cidades do Agreste.

A pluviometria média na bacia hidrográfica é da ordem de 650 mm, sendo os meses de março e abril responsáveis por cerca de 38% do total médio anual. Seu coeficiente de escoamento é de 3,1% e o deflúvio médio anual de 20 mm. Na Tabela 6, são apresentadas as principais características técnicas do reservatório Belo Jardim.

Tabela 6 – Características técnicas do reservatório Belo Jardim

Reservatório Belo Jardim	
Área da Bacia Hidrográfica	1.250 km ²
Volume Total do Reservatório	30,74 x 10 ⁶ m ³
Cota de coroamento	741 m
Extensão do coroamento	640 m
Cota do sangradouro	736 m
Extensão do sangradouro	175 m

Fonte: Adaptado Pernambuco, 2010.

3.1.2.3 Reservatório Eng. Severino Guerra (Bitury)

O reservatório Eng. Severino Guerra (Bitury) está localizado no município de Belo Jardim, agreste Setentrional de Pernambuco. Foi construído no início da década de 60, pelo DNOCS - Departamento Nacional de Obras Contra a Seca, sendo projetado para atender apenas ao abastecimento de água dos moradores de Belo Jardim. O reservatório cujo nome oficial é Eng. Severino Guerra. Os rios Bitury, Tabocas e Taboquinhas, além de pequenos riachos, contribuem para alimentar o volume de água armazenada no reservatório.

A bacia hidrográfica, delimitada a partir da seção de barramento, possui uma área total de 68,57 km², em uma região com índices pluviométricos em torno de 600 mm.

O reservatório tem capacidade total de acumulação de 17 milhões de metros cúbicos, porém está com sua capacidade de armazenamento reduzida em 20%, devido ao assoreamento da sua bacia hidráulica. Com o passar do tempo o reservatório Bitury tornou-se responsável pelo abastecimento público de água de mais seis municípios através do sistema adutor Bitury. Além de Belo Jardim, são atendidos pelo sistema de abastecimento os municípios de: Lajedo, Cachoeirinha, Pesqueira, Sanharó, São Bento do Una e Tacaimbó. Também passou a atender à demanda do parque industrial da região com indústrias de grande e médio porte. Esse acréscimo de demanda foi feito sem ter havido nenhum aumento da sua capacidade de acumulação. São beneficiados com suas águas cerca de 400.000 habitantes, entre eles 810 famílias que vivem da atividade agropecuária.

As terras, às margens do reservatório, estão sendo irrigadas com captação direta do reservatório, para culturas de ciclo curto de tomate, couve, repolho, hortaliças em geral, bananeiras e outras fruteiras. O inconveniente desta prática é o retorno para o reservatório das águas já utilizadas na agricultura, carreando adubos químicos ou agrotóxicos. Além disso, existe também a jusante do barramento, a ocorrência de áreas irrigadas intensivamente.

As encostas das serras estão sendo desmatadas para dar lugar à agricultura irrigada, trazendo problemas de erosão, carreamento dos solos e assoreamento do reservatório.

As águas do rio ao se aproximarem da cidade, ainda com aspecto límpido, começam a receber lixo, esgotos, chorumes de criatórios e efluentes diversos, alcançando a ponte Nova já com uma condição sanitária deplorável. Na Tabela 7 a seguir são apresentadas as principais características técnicas do reservatório Eng. Severino Guerra (Bitury).

Tabela 7 – Características técnicas do reservatório Bitury

Reservatório Bitury	
Área da Bacia Hidrográfica	69 km ²
Volume Total do Reservatório	17,00 x 10 ⁶ m ³
Cota de coroamento	98,7 m
Extensão do coroamento	354 m
Cota do sangradouro	95,20 m
Extensão do sangradouro	68 m

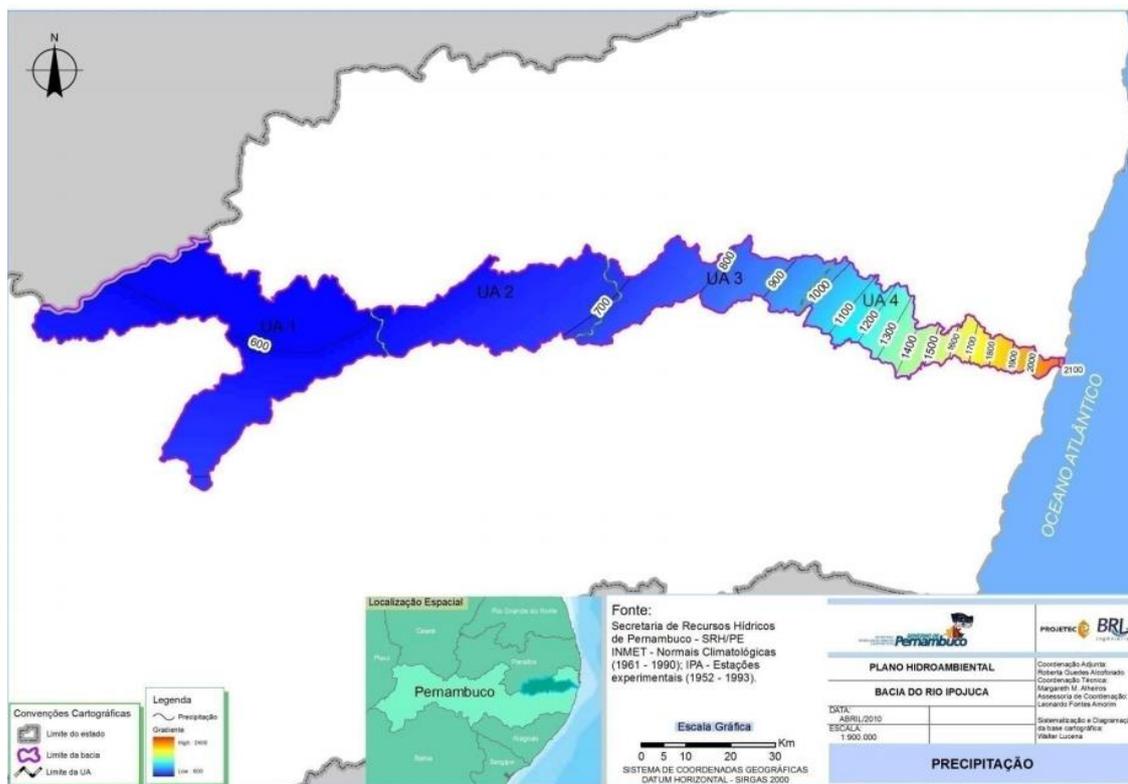
Fonte: Adaptado de Pernambuco, 2010.

3.1.3 Clima e precipitações

A bacia hidrográfica do Ipojuca apresenta dois climas predominantes: o semi-árido, que abrange a área do agreste, com exceção dos brejos, com temperatura média em torno de 26°C. Apresenta um curto período de chuvas, concentrado nos meses de outono-inverno, com taxas pluviométricas que variam de 600 a 900 mm anuais. O segundo domina a porção do Litoral-Mata, sendo quente e úmido, com chuvas de outono-inverno (também chamado de pseudo-tropical, em virtude da coincidência da estação chuvosa), com totais pluviométricos anuais acima de 1.000 mm, apresentando temperatura média em torno de 24°C.

O clima da bacia hidrográfica do rio Ipojuca é caracterizado também como tropical chuvoso de monção com o verão seco. De acordo com os resultados apresentados no Plano Hidroambiental da Bacia do rio Ipojuca, publicado em 2010, os totais anuais precipitados apresentaram uma média de 1133,59 mm. Nas nascentes a precipitação gira em torno dos 640 mm, passando para uma média de 794,73 mm, no seu curso médio, chegando a 2.267,05 mm próximo ao litoral. Na Figura 17 podemos observar a distribuição média da precipitação na Bacia.

Figura 17 – Isoietas anuais médias na bacia do Rio Ipojuca.

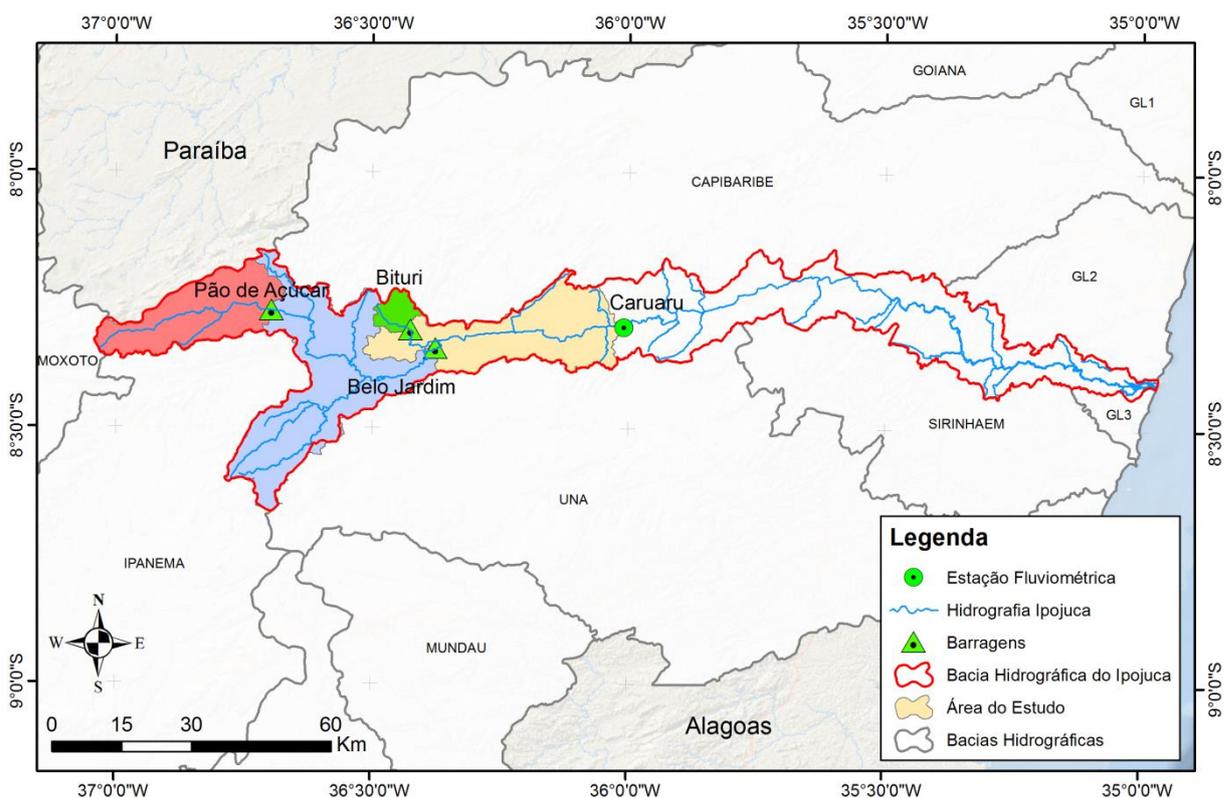


Fonte: Pernambuco, 2010.

3.2 DADOS HIDROLÓGICOS

A bacia do Rio Ipojuca foi dividida em 4 sub-bacias menores com exutórios nas três principais barragens da bacia (Pão de Açúcar, Belo Jardim e Bitury) localizadas a montante da cidade de Caruaru e a última sub-bacia tendo o exutório no posto fluviométrico de Caruaru, conforme representado na Figura 18. Foi realizada a modelagem hidrológica das sub-bacias com o objetivo de comparar a resposta hidrológica com os dados do posto fluviométrico de Caruaru. Para isso foram necessários dados pluviométricos e fluviométricos descritos a seguir.

Figura 18 – Sub-bacias em estudo na Bacia do Rio Ipojuca.



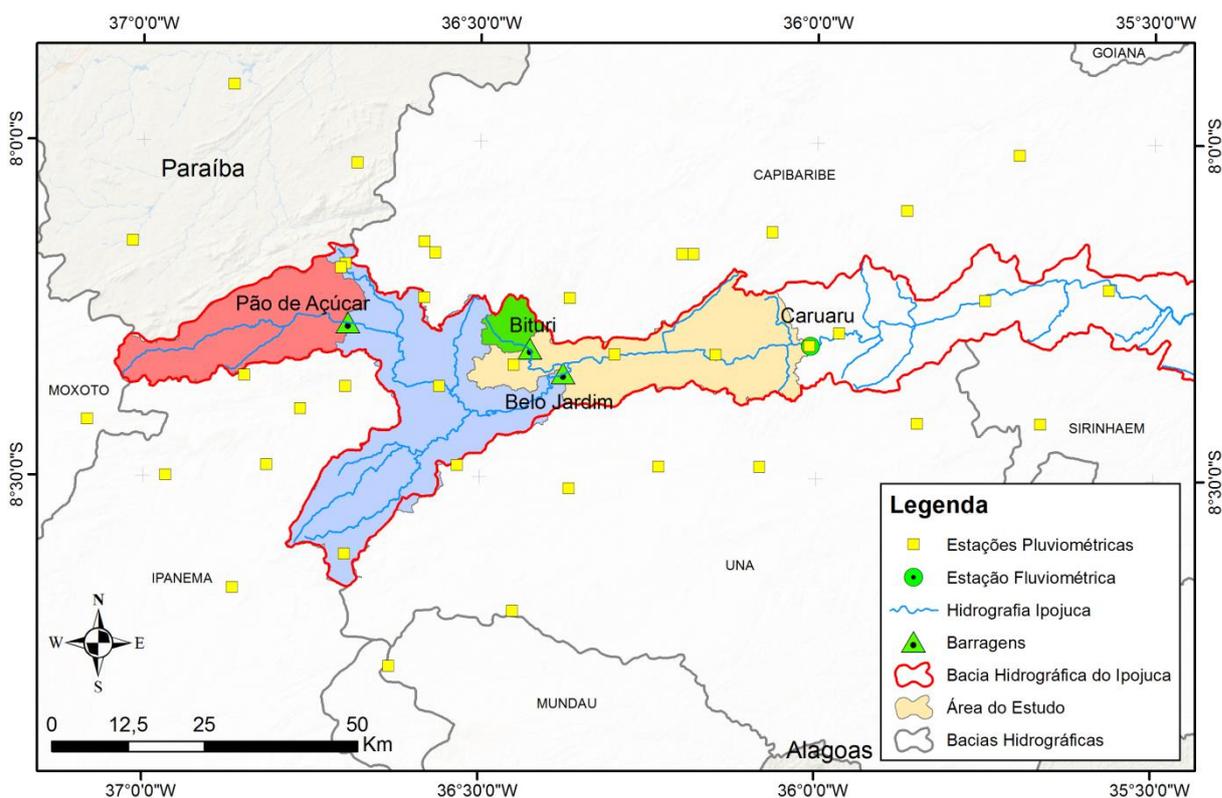
Fonte: O autor, 2019.

3.2.1 Dados pluviométricos

Os dados hidrológicos utilizados neste trabalho foram obtidos a partir da base de dados Hidroweb da Agência Nacional de Águas – ANA, onde se encontra reunido o maior acervo digital com dados das estações operadas por diferentes órgãos em todo o território nacional.

Foram coletados dados de 57 estações pluviométricas, mas após uma análise do material, 17 destas foram descartadas, pois não continham dados pluviométricos. As 40 estações pluviométricas restantes foram utilizadas no estudo e podem ser identificadas na Tabela 8 a seguir. Para cada posto, foram utilizados os dados de precipitação diária disponíveis entre os períodos de 01/03/1973 a 31/08/2018 e a disposição espacial destes postos pluviométricos escolhidos pode ser identificada na Figura 19.

Figura 19 – Estações pluviométricas utilizadas nesta pesquisa



Fonte: O autor, 2019.

Tabela 8 – Postos pluviométricos utilizados na modelagem hidrológica

Posto pluviométrico	Código	Latitude	Longitude
ALAGOINHA	836002	-8,4833	-36,8167
ALTINHO	836003	-8,4833	-36,0833
ARCOVERDE	837042	-8,4167	-37,0833
BARRA DO GUABIRABA	835002	-8,4167	-35,6667
BELO JARDIM	836004	-8,3333	-36,4500
BEZERROS	835007	-8,2333	-35,7500
CACHOEIRINHA	836007	-8,4833	-36,2333
CAETÉS	836008	-8,7833	-36,6333
CAMALAU	736021	-7,9167	-36,8667
CARAPOTOS (RIACHO DOCE)	836010	-8,1333	-36,0667
CARUARU	835009	-8,2833	-35,9667
CARUARU	835010	-8,2833	-35,9667
CARUARU	835106	-8,3028	-36,0108
CIMBRES	836011	-8,3500	-36,8500

Fonte: O autor, 2019.

... Continuação Tabela 8 – Postos pluviométricos utilizados na modelagem hidrológica.

Posto pluviométrico	Código	Latitude	Longitude
CUMARU (MALHADINHA)	835016	-8,0167	-35,7000
FAZENDA NOVA	836012	-8,1667	-36,2000
GRAVATA	835030	-8,2167	-35,5667
JUCATI (PINDORAMA)	836020	-8,7000	-36,4500
PEDRA	836029	-8,5000	-36,9667
PESQUEIRA	836031	-8,4000	-36,7667
PESQUEIRA	836032	-8,3667	-36,7000
POÇÃO	836034	-8,1833	-36,7000
POÇÃO	836093	-8,1894	-36,7069
SALOBRO	836042	-8,6167	-36,7000
SANHARÓ	836043	-8,3656	-36,5603
SANTA MARIA DA PARAÍBA	836001	-8,0333	-36,6833
SÃO BENTO DO UNA	836037	-8,5167	-36,3667
SÃO CAETANO	836039	-8,3167	-36,1500
SÃO CAETANO 463	836038	-8,3167	-36,1500
SÃO JOÃO DO TIGRE	836000	-8,6667	-36,8667
SÃO JOAQUIM DO MONTE	835049	-8,4167	-35,8500
SÃO SEBASTIÃO DO UMBUZEIRO	837000	-8,1500	-37,0167
SAPO QUEIMADO	836044	-8,4833	-36,5333
SERRA DO VENTO	836045	-8,2333	-36,3667
SÍTIO BARRIGUDA	835051	-8,1000	-35,8667
SÍTIO CANHOTO	836047	-8,1500	-36,5833
SÍTIO LAGOA DO FÉLIX	836048	-8,1667	-36,5667
SÍTIO LOGRADOURO	836049	-8,1667	-36,1833
TACAIMBO	836052	-8,3167	-36,3000
XUCURU (ALDEIA VELHA)	836055	-8,2333	-36,5833

Fonte: O autor, 2019.

Como a área de estudo desta pesquisa é extensa e são necessários dados de muitas estações, utilizou-se uma rotina em linguagem Python desenvolvida por Gomes (2019) para fazer o download das estações selecionadas de forma

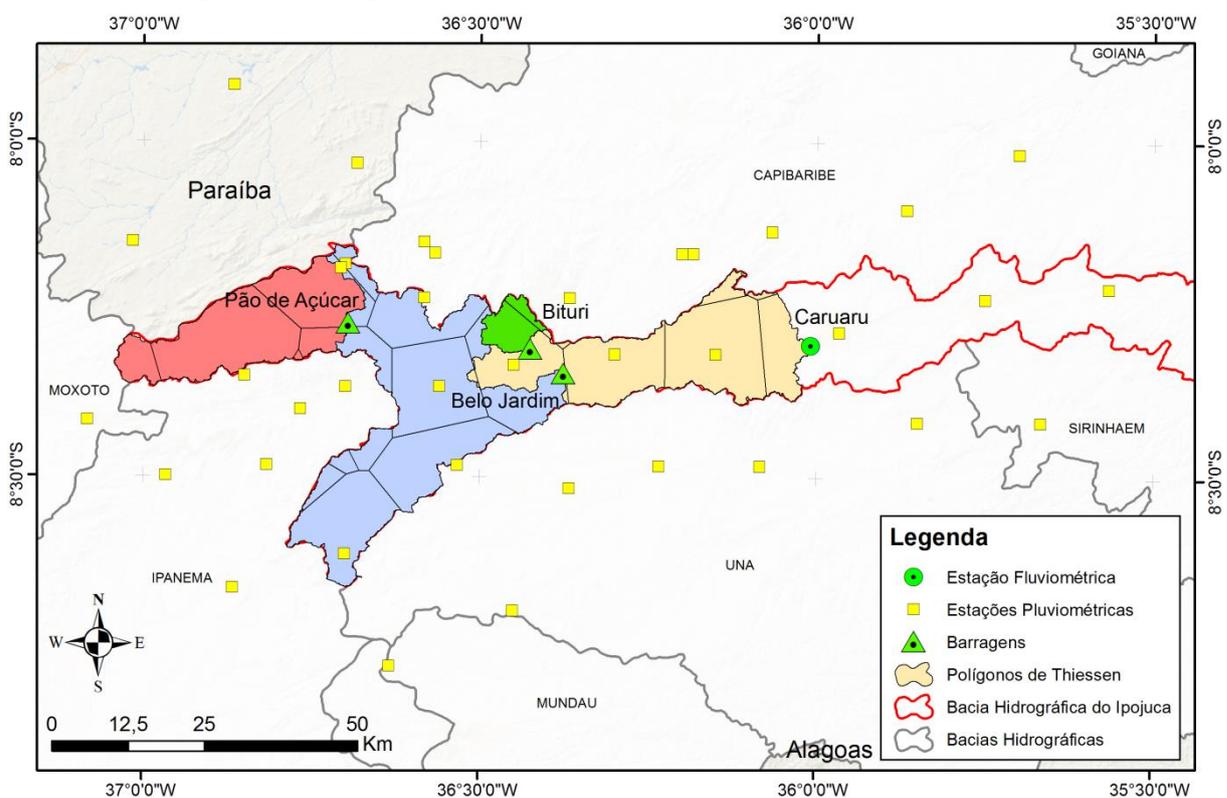
automatizada através do HIDROWEB. O algoritmo desenvolvido tem a função de baixar os dados pluviométricos das estações pelo código inserido em um arquivo .txt. A rotina reconhece o código de cada estação neste arquivo e faz o download automaticamente da série. Este algoritmo necessita apenas de um arquivo em formato .txt com os códigos das estações de interesse. O código, bem como seu tutorial de utilização, se encontra no seguinte repositório para livre download:

<https://github.com/mayaraarrudaeng/Hidroweb.git>

3.2.2 Cálculo da precipitação média

O cálculo da chuva média para cada sub-bacia em estudo foi realizado pelo método dos Polígonos de Thiessen. Este método consiste em atribuir pesos aos totais precipitados em cada estação, proporcionais à área de influência de cada estação na sub-bacia estudada. O cálculo para definição dos polígonos contendo a área de influência de cada posto foi realizado com o uso de software de geoprocessamento. A seguir, na Figura 20, é apresentado o traçado dos polígonos de Thiessen sobre a bacia do Rio Ipojuca até à área do estudo.

Figura 20 – Polígonos de Thiessen criados para as sub-bacias em estudo.



Fonte: O autor, 2019.

Para o processamento dos dados pluviométricos foram utilizados algoritmos escritos em linguagem Python, também desenvolvidos por Gomes (2019), com a finalidade de facilitar a obtenção da série final de chuva média necessária para a modelagem hidrológica. O primeiro algoritmo criado é intitulado de “matriz_chuva”: consiste em compilar os dados de todas as estações dentro de um determinado intervalo de tempo definido em uma única planilha MS Excel no formato .csv (arquivo de valores separado por vírgulas). Desta forma, cria-se um arquivo com todas as estações a serem utilizadas no cálculo da chuva média para cada sub-bacia em estudo.

Com a matriz de chuva criada para cada sub-bacia com o código anterior (matriz_chuva), o próximo passo foi utilizar o algoritmo intitulado “chuva_media” para o cálculo da chuva média em cada sub-bacia. Para isto, o código necessita da matriz de chuva criada e também de um arquivo .csv contendo o código da estação e a parcela de área de influência de cada estação pluviométrica calculada pelo Thiessen na sub-bacia. Todos estes algoritmos citados anteriormente estão disponíveis para download gratuito no seguinte repositório:

<https://github.com/mayaraarrudaeng/calculochuvamedia.git>

Quando não existe dado de precipitação em um posto em um determinado período, sua área de influência é distribuída proporcionalmente entre as demais. O arquivo contendo a chuva média e as datas correspondentes para cada sub-bacia em estudo é o dado de entrada requerido para o modelo hidrológico CAWM IV.

Após o processamento e definição dos polígonos de Thiessen através do software de geoprocessamento foram utilizados efetivamente 19 postos pluviométricos no cálculo da chuva média das subbacias em estudo. É possível observar na Tabela 9 a seguir os referidos postos.

Tabela 9 – Postos pluviométricos utilizados no cálculo da chuva média

Posto pluviométrico	Código	Latitude	Longitude
ALAGOINHA	836002	-8,4833	-36,8167
ARCOVERDE	837042	-8,4167	-37,0833
BELO JARDIM	836004	-8,3333	-36,4500
CARAPOTOS (RIACHO DOCE)	836010	-8,1333	-36,0667
CARUARU	835106	-8,3028	-36,0108
CIMBRES	836011	-8,3500	-36,8500
PESQUEIRA	836031	-8,4000	-36,7667
PESQUEIRA	836032	-8,3667	-36,7000
POÇÃO	836034	-8,1833	-36,7000
POÇÃO	836093	-8,1894	-36,7069
SALOBRO	836042	-8,6167	-36,7000
SANHARÓ	836043	-8,3656	-36,5603
SÃO CAETANO	836039	-8,3167	-36,1500
SÃO SEBASTIÃO DO UMBUZEIRO	837000	-8,1500	-37,0167
SAPO QUEIMADO	836044	-8,4833	-36,5333
SERRA DO VENTO	836045	-8,2333	-36,3667
SÍTIO LOGRADOURO	836049	-8,1667	-36,1833
TACAIMBO	836052	-8,3167	-36,3000
XUCURU (ALDEIA VELHA)	836055	-8,2333	-36,5833

Fonte: O autor, 2019.

3.2.3 Dados Fluviométricos

Se a bacia hidrográfica dispusesse de um conjunto de postos fluviométricos com registros confiáveis e de longo prazo, ter-se-ia um bom conhecimento do regime dos cursos de água, distinguindo-se aqueles que escoam na região do Agreste daqueles que drenam as áreas da Zona da Mata. Infelizmente, isso não ocorre na bacia do rio Ipojuca, sendo precária a situação da rede hidrométrica. Em toda extensão do rio Ipojuca tem-se poucas estações Fluviométricas. Dentro da área de estudo estão disponíveis somente duas dessas estações. A Tabela 10 fornece a posição dos postos fluviométricos utilizados no estudo.

Foi utilizado o posto pluviométrico de Caruaru para calibração e validação dos dados obtidos no modelo hidrológico. Como alguns períodos de dados apresentavam falhas em sua série, foi realizado um ajuste por regressão linear utilizando como apoio os postos de Sanharó e Gravatá, a fim de preencher os registros ausentes.

Tabela 10 – Postos pluviométricos utilizados no estudo

Posto Pluviométrico	Área de Drenagem (Km ²)	Código	Coordenadas geográficas		Órgão responsável
			Latitude	Longitude	
SANHARÓ	672	39310000	-8,3656	-36,5603	ANA/CPRM
CARUARU	2.128	39340000	-8,3028	-36,0108	ANA/CPRM
GRAVATÁ	2.650	39345000	-8,2128	-35,6022	ANA/CPRM

Fonte: O autor, 2019.

Foi realizado um ordenamento dos dados pluviométricos antes de ser utilizado no modelo hidrológico. Este tratamento consistiu na utilização de outro código escrito em Python intitulado “matriz_vazao”, que cria uma planilha com os dados de vazão correspondentes a cada estação ordenados em datas corridas anteriormente definidas. Isto facilitará a entrada dos dados no modelo hidrológico. Este código se encontra também disponível em:

<https://github.com/mayaraarrudaeng/matrizvazao.git>

3.2.4 Dados de evaporação

Os dados de evaporação utilizados no presente trabalho foram provenientes do Instituto Nacional de Meteorologia – INMET. Utilizaram-se os dados de evaporação total obtidos pela Normal climatológica para o intervalo de 1981 a 2010 no posto de Pesqueira. Este posto foi escolhido por estar inserido na Bacia do Rio Ipojuca e ser o posto com sua localização mais próxima do centro da área do estudo e com isso representar bem a evaporação nas sub-bacias delimitadas. Os valores mensais de evaporação utilizados podem ser observados na Tabela 11 a seguir.

Tabela 11 – Valores da normal climatológica para o posto de Pesqueira

Normal climatológica	
Posto: 82892 - Pesqueira	
1981 a 2010	
Meses	Evaporação total (mm)
Janeiro	223,4
Fevereiro	184,6
Março	184,6
Abril	133,4
Maiο	104,0
Junho	82,6
Julho	87,4
Agosto	113,2
Setembro	162,9
Outubro	216,8
Novembro	229,5
Dezembro	235,1
Ano	1957,5

Fonte: Adaptado de INMET (2010).

3.3 DADOS TOPOGRÁFICOS

Para a realização da simulação hidrológica são necessárias informações acerca da topografia da área de estudo. Há diversos meios para obter essas informações, um deles é através de técnicas de sensoriamento remoto, a partir da qual é gerado o modelo digital do terreno (MDT). O MDT pode ser definido como uma matriz de números que representam a distribuição geográfica de elevações. Portanto, o MDT corresponde à representação de uma superfície real em meio digital, fornecendo a altimetria de um terreno sob a forma de uma grade regular de pontos.

Para o desenvolvimento deste trabalho foi utilizado o MDT proveniente do Programa Pernambuco Tridimensional (PE3D), programa realizado pela Secretaria de Recursos Hídricos e Energéticos do Estado de Pernambuco, que realizou um mapeamento aéreo de todo o território pernambucano com a técnica LiDAR, que utiliza feixes de laser emitidos a partir de uma aeronave para escanear a superfície

da região gerando ao final do processo dados de altíssima qualidade sobre todo o relevo do estado de Pernambuco (CIRILO *et al*, 2014).

Os dados do PE3D estão disponíveis gratuitamente e podem ser obtidos pela internet, no site: www.pe3d.pe.gov.br para as áreas que já passaram por validação dos dados. O material para as demais áreas podem ser solicitados na Agência Pernambucana de Águas e Climas (APAC).

Foram utilizados na modelagem hidrológica do estudo os produtos na escala de 1:5000 que apresentam erro vertical inferior a 25cm. Para a modelagem hidrodinâmica da cidade de Caruaru foram utilizados os dados na escala de 1:1000, produto de melhor precisão que apresenta erro vertical máximo inferior a 10cm. Na Tabela 12 são apresentadas as especificações técnicas dos produtos do PE3D.

Tabela 12 – Características técnicas dos produtos do PE3D

	Escala 1:5000		Escala 1:1000	
	Ortofoto	Perfilamento Laser	Ortofoto	Perfilamento Laser
Extensão dos arquivos	.tif .tfw e .dwg	.xyz . xyzi e .tif	.tif .tfw e .dwg	.xyz . xyzi e .tif
Densidade de pontos	-	~ 1 ponto/m ²	-	~ 4 pontos/m ²
Resolução espacial	50 cm	1 m	12 cm	50 cm
Resolução radiométrica	8 bits	32 bits	8 bits	32 bits
Precisão planimétrica	~ 1 m	-	~ 25 cm	-
Precisão altimétrica*	-	25 cm	-	10 cm
Altura média de voo	4.800 m	2.800 m	700 m	700 m

* A precisão altimétrica dos produtos 1:5000 tem como referência o MAPGEO 2010, enquanto os produtos 1:1000 são referenciados segundo Referências de Nível (RN's) do IBGE.

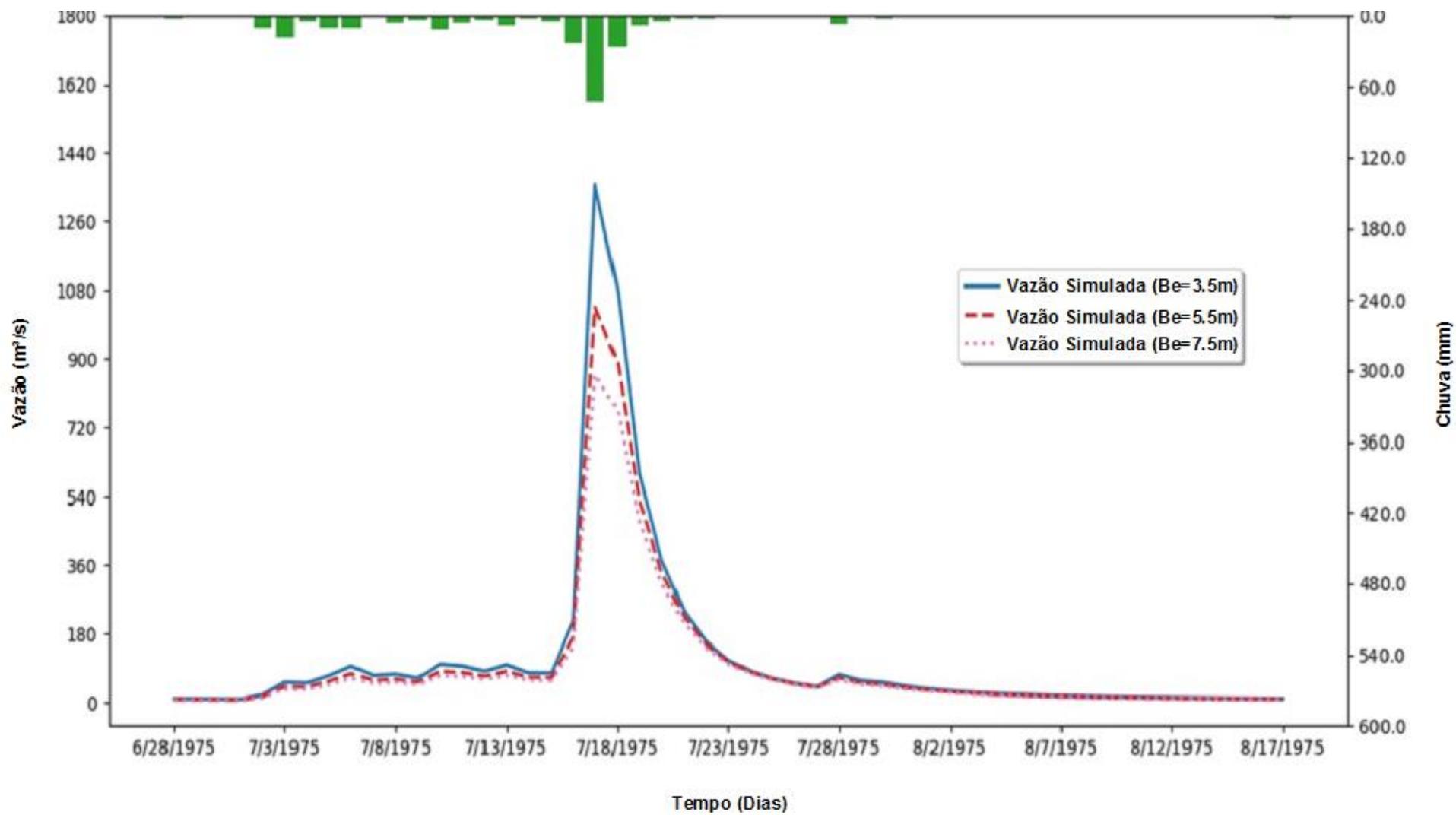
Fonte: ALVES, 2017.

A delimitação da bacia do rio Ipojuca e a geração da rede de rios foi executada utilizando o MDT do PE3D na Escala de 1:5000 com software de geoprocessamento. Após esse processo foram delimitadas as áreas das quatro sub-bacias de interesse, com o resultado já indicado na Figura 18. Após a criação da rede de drenagem e a delimitação das sub-bacias, foi possível a determinação de alguns parâmetros necessários para entrada no modelo hidrológico, sendo eles o somatório dos comprimentos da rede de drenagem de cada sub-bacia (m), a área da sub-bacia (km²) e a declividade do rio principal (m/m). Estes parâmetros são

necessários para o cálculo do parâmetro **K** apresentado na (19) apresentado na seção 2.8 deste trabalho.

A largura equivalente da rede (**B_e**) dos rios da bacia foi estimada. Esse valor pode ser ajustado analisando a magnitude dos picos de cheia. O valor de **B_e** é inversamente proporcional aos valores das vazões de pico calculadas no hidrograma, sendo assim, para valores maiores de **B_e** as vazões de pico diminuem, conforme pode ser observado na Figura 21, apresentada por Gomes (2019) em análise de simulação no rio Capibaribe, Pernambuco. O coeficiente de Manning *n* é a rugosidade da calha dos rios, tendo sido estimado o valor de 0,03. *C* é uma constante de conversão de unidades igual a 1000 para as selecionadas. Δt é o intervalo de tempo em segundos, no caso igual a 86400. Com todos esses parâmetros determinados, foi possível o cálculo do **K**.

O cálculo do parâmetro **K** tem levado a bons resultados para declividades normais de rios como o trecho em estudo do rio Ipojuca (da ordem de 10^{-4} ou menor), que não apresentam grandes declives. Para rios com declividades acentuadas, os valores de **K** obtidos não levam a bons resultados nas simulações. Isso é compreensível, visto que o modelo CAWM utiliza como base também equações de canal que apresentam em sua fundamentação pequenas declividades, se o local em estudo apresentar uma acentuada declividade o escoamento deixa de ser bem representado pela fórmula de Manning para escoamento sub-crítico, de onde deriva a expressão de cálculo. Nesses casos deve-se considerar **B_e** ou **K** como um parâmetro a calibrar. Outro aspecto a se considerar é que a densidade de drenagem deve ser bem detalhada, com rios de oito ordens segundo a classificação de Strahler. Isso permite maior refinamento na capacidade da calha fluvial.

Figura 21 – Influência do parâmetro B_e nas vazões simuladas pelo CAWM IV.

Fonte: Gomes, 2019

3.4 MODELAGEM HIDROLÓGICA

No presente trabalho, foi utilizado o modelo hidrológico Campus Agreste Watershed model versão 4 (CAWM IV). O modelo foi implementado em uma planilha digital no formato MS Excel. Suas formulações têm a função de calcular o balanço hídrico realizado na bacia a partir dos dados de entrada de precipitação, vazão e evaporação. Após o preenchimento dos dados, tem-se como resultado o balanço hídrico para a bacia.

Após a escolha dos intervalos a serem avaliados da série de dados de cada sub-bacia, será avaliado qual intervalo será escolhido para a calibração.

Com o resultado inicial do balanço hídrico calcula-se os indicadores de desempenho, responsáveis pela avaliação da qualidade de representação do modelo. Os principais indicadores de desempenho utilizados na modelagem hidrológica são:

NSE: coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe;

r^2 : coeficiente de determinação;

RMSE: raiz do erro médio quadrático;

Pbias %: percentual de tendências;

RSR: quociente da raiz do erro médio quadrático pela raiz do desvio padrão dos dados observados;

RMSE, *Pbias* e *RSR* são por sua vez obtidos por meio das seguintes equações:

$$RMSE = \frac{1}{n} \left[\sum_{i=1}^n (Q_{i,obs} - Q_{i,cal})^2 \right]^{1/2} \quad (22)$$

$$Pbias = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Q_{cal}(i) - Q_{obs}(i))}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs}(i))} 100 \right] \quad (23)$$

$$RSR = \left| \frac{\left[\sum_{i=1}^n (Q_{i,obs} - Q_{i,cal})^2 \right]^{1/2}}{\left[\sum_{i=1}^n (Q_{i,obs} - \overline{Q_{obs}})^2 \right]^{1/2}} \right| \quad (24)$$

O Coeficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE) varia de $-\infty$ a 1 e pode ser obtido da seguinte equação:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{i,obs} - Q_{i,cal})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{i,obs} - \overline{Q_{obs}})^2} \quad (25)$$

Onde n é o número total de dados do evento, $Q_{i,obs}$ é a vazão observada e $Q_{i,cal}$ é a vazão calculada, ambas no tempo i , enquanto $\overline{Q_{obs}}$ é a vazão média observada no período.

Diversos autores como Pushpalatha *et. al.* (2012) e Traore *et. al.* (2014), utilizam variações do Coeficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe, utilizando a raiz quadrada das vazões (NSE_{sqrtQ}), logaritmo decimal (NSE_{logQ}) e outras variáveis derivadas, como as equações apresentadas a seguir.

$$NSE_{sqrtQ} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\sqrt{Q_{i,obs}} - \sqrt{Q_{i,cal}})^2}{\sum_{i=1}^n (\sqrt{Q_{i,obs}} - \sqrt{Q_{obs}})^2} \quad (26)$$

$$NSE_{logQ} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\log Q_{i,obs} - \log Q_{i,cal})^2}{\sum_{i=1}^n (\log Q_{i,obs} - \log \overline{Q_{obs}})^2} \quad (27)$$

A grande maioria dos autores utiliza o coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe como um dos principais indicadores de performance da modelagem hidrológica, embora haja entendimento de que não deve ser o único (SCHAEFLI and GUPTA, 2007). Zappa (2002) propõe valores acima de 0,5 para NSE . Gotschalk e Motovilov (2000, apud Van Liew *et. al.* (2007), classificam como muito bons os valores de NSE acima de 0,75 e aceitáveis entre 0,75 e 0,36, seja para passo de tempo diário ou mensal. Moriasi *et al.* (2007) classificam os indicadores de desempenho NSE , $Pbias$ e RSR para calibração e validação indicados na Tabela 13.

Tabela 13 – Valores de desempenho recomendados para simulações mensais.

Valores de desempenho recomendados para simulações mensais	<i>NSE</i>	<i>Pbias</i> (%)	<i>RSR</i>
Ótimo	0,75 a 1,00	< ±10	0 a 0,5
Bom	0,65 a 0,75	de ±10 a ±15	0,5 a 0,6
Satisfatório	0,50 a 0,65	de ±15 a ±25	0,6 a 0,7
Insatisfatório	< 0,50	> ±25	> 0,7

Fonte: Adaptado de Moriasi et al., 2007.

Além dos indicadores citados, diversos autores utilizam as derivações de *NSE* utilizando a raiz quadrada (NSE_{sqrtQ}) e o logaritmo decimal das vazões (NSE_{logQ}) ao invés das vazões naturais na fórmula de Nash-Sutcliffe, indicados na (26 e (27. Segundo Traore et al (2014), valores maiores de *NSE* indicam o ajuste das vazões mais altas, NSE_{sqrtQ} as vazões médias e NSE_{logQ} as vazões mais baixas. Pushpalatha et al (2012) apresentam outras transformações aplicadas ao indicador *NSE* e concluem que NSE_{sqrtQ} é o indicador de performance mais apropriado para quantificar o ajuste da simulação tanto com as vazões altas como as baixas. Em concordância com essa afirmação, Patil et al (2014) propõem para a calibração dos valores dos parâmetros em modelos hidrológicos a expressão de cálculo de NSE_{sqrtQ} como função-objetivo. No modelo CAWM IV a função-objetivo é dada por:

$$F = \frac{NSE_{sqrtQ} \cdot 10^6}{\sum abs(Q_{obs} - Q_{calc})} \quad (28)$$

A constante 10^6 se destina a evitar valores muito baixos.

A função objetivo do intervalo escolhido para ser calibrado é otimizada através da ferramenta Solver do Microsoft Excel pelo método GRG não linear. Após a calibração do intervalo escolhido, os outros intervalos servem para validação do modelo.

Para avaliação do período contínuo das séries de vazões, foi calculado o desvio de vazão de acordo com a Equação 20 para a estação fluviométrica de Caruaru. Este índice foi utilizado para verificar o desvio absoluto entre as vazões calculadas e observadas.

3.5 MODELO DE OPERAÇÃO DE RESERVATÓRIOS

O modelo para simulação de operação dos reservatórios foi desenvolvido também na Universidade Federal de Pernambuco Campos Agreste e se encontra em formato de planilha MS Excel. O método é baseado no balanço de massa e foi realizado a simulação dos reservatórios de Pão de Açúcar, Belo Jardim e Bitury.

3.5.1 Dados utilizados

Para verificação do comportamento dos reservatórios em estudo e realização da simulação do balanço hídrico, foi necessário um conjunto de informações que compreendem as características do reservatório, sendo elas: capacidade máxima de acumulação, cota de coroamento, cota da soleira e extensão do vertedouro e curva cota x área x volume. Estas características foram obtidas pelas fichas técnicas das barragens, disponíveis no site da APAC.

Também foram necessários dados hidrológicos como as séries pluviométricas, evaporação e vazões afluentes. Os dados pluviométricos utilizados foram provenientes dos postos mais próximos às barragens para o cálculo do volume precipitado, conforme a Tabela 14. Os dados de evaporação foram os mesmos utilizados na modelagem hidrológica correspondentes ao posto de Pesqueira, explicitados na Tabela 11 da seção 3.2.4. Por fim, as vazões afluentes a cada barragem foram obtidas pelo modelo hidrológico CAWM IV no ponto à montante das barragens de acordo com as áreas de influência.

Tabela 14 – Postos pluviométricos utilizados na operação das barragens

Reservatório	Posto Fluviométrico	Código	Coordenadas geográficas	
			Latitude	Longitude
PÃO DE AÇÚCAR	POÇÃO	836093	-8,19	-36,71
BELO JARDIM	BELO JARDIM	836004	-8,33	-36,45
BITURY	BELO JARDIM	836004	-8,33	-36,45

Fonte: O autor, 2019.

3.5.2 Balanço hídrico

No presente trabalho foram realizados os estudos da operação das barragens no período entre 01/03/1973 a 28/02/2017, que consiste no período em que tem-se dados de vazão disponíveis na estação de Caruaru, podendo-se assim avaliar a influência das barragens. Na execução do estudo, foi utilizada a seguinte (29 para o balanço hídrico em cada reservatório, onde o intervalo de tempo considerado foi de 4 horas:

$$V_{t+4h} = V_t + (V_{afl} + V_{prec} - V_{evap} - V_{cap})/6 \quad (29)$$

Onde:

V_{t+4h} - Volume armazenado após 4h

V_t - Volume armazenado no início do intervalo de tempo

V_{afl} - Volume afluente ao reservatório no intervalo de tempo

V_{prec} - Volume precipitado sobre o reservatório no intervalo de tempo

V_{evap} - Volume evaporado do reservatório no intervalo de tempo

V_{cap} - Volume a ser captado do reservatório de acordo com a vazão regularizável.

Os volumes no segundo membro da Equação 26 foram divididos por 6 pois são seis intervalos de 4h contidos em um dia. A partir dos volumes calculados a cada 4h, são calculados os volumes médios, que é a média entre o volume em 4h e o volume no passo de tempo anterior, conforme (30):

$$V_{médio} = (V_{t+4h} + V_t)/2 \quad (30)$$

Onde:

$V_{m\u00e9dio}$ – Volume m\u00e9dio a cada 4h

V_{t+4h} - Volume armazenado ap\u00f3s 4h

V_t – Volume armazenado no intervalo de tempo anterior.

Com o volume m\u00e9dio calculado, obteve-se a cota m\u00e9dia em 4h atrav\u00e9s da equa\u00e7\u00e3o da curva cota x volume calculada. Para se calcular a vaz\u00e3o vertida em 4h, fez-se o teste l\u00f3gico a fim de constatar se a cota calculada \u00e9 maior ou menor do que a cota da soleira do vertedouro. Se a cota for menor, nenhuma vaz\u00e3o \u00e9 vertida, se for maior, a vaz\u00e3o vertida ser\u00e1 calculada pela (31):

$$Q_{vert} = 2.2 * L_{vert} * (Z_{t+4h} - Z_{vert})^{1.5} \quad (31)$$

Onde:

Q_{vert} – Vaz\u00e3o vertida no intervalo de tempo

L_{vert} – Extens\u00e3o do vertedouro na barragem considerada

Z_{t+4h} - Cota da \u00e1gua calculada para o intervalo de tempo

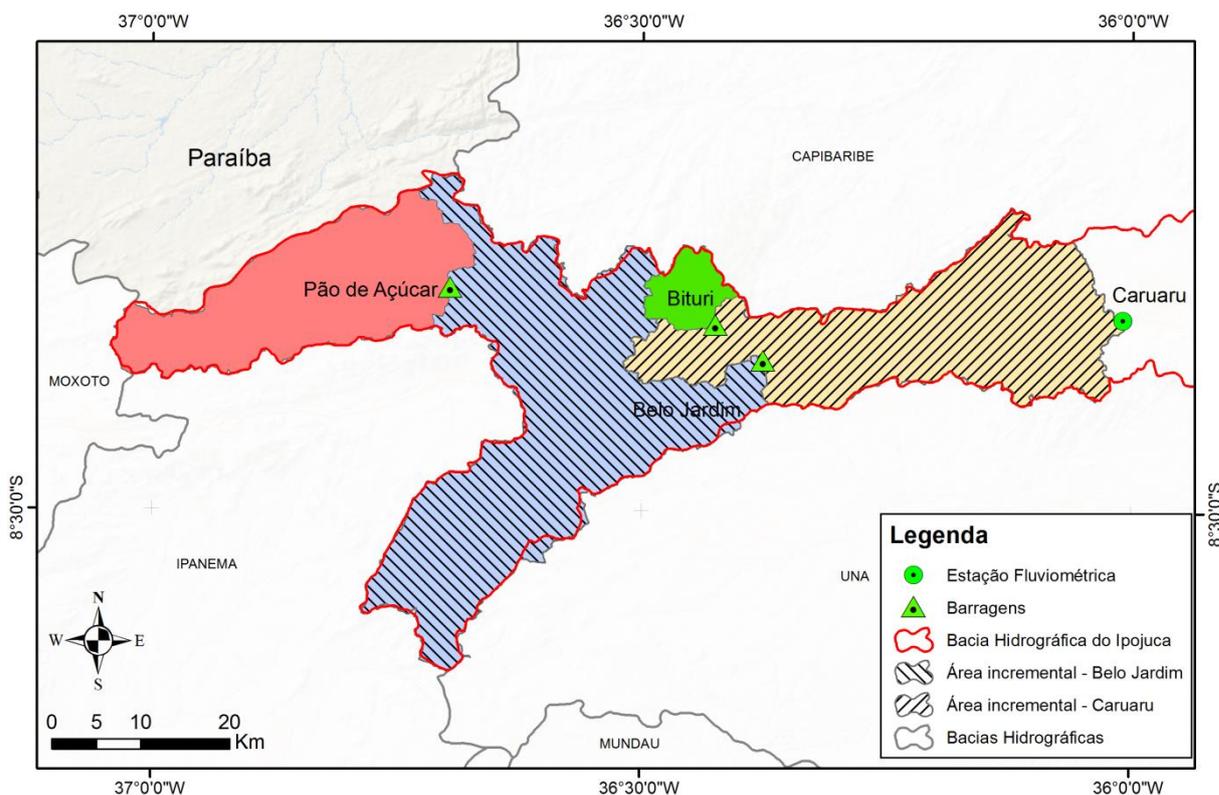
Z_{vert} – Cota da soleira do vertedouro

O volume vertido ser\u00e1 a vaz\u00e3o vertida multiplicada por 14400, que \u00e9 a quantidade em segundos que se tem em 4h. As cotas e \u00e1reas a cada passo de tempo foram calculadas de acordo com a equa\u00e7\u00e3o das curvas cota x volume e volume x \u00e1rea definidas para cada reservat\u00f3rio. Ap\u00f3s estes c\u00e1lculos obt\u00eam-se a vaz\u00e3o defluente m\u00e9dia di\u00e1ria para cada reservat\u00f3rio.

Com o objetivo de se obter a influ\u00eancia das barragens ao longo do rio Ipojuca e se comparar a vaz\u00e3o de chegada ao posto fluviom\u00e9trico de Caruaru, foi calculada a vaz\u00e3o defluente de cada uma das barragens e a essas foi adicionada uma vaz\u00e3o incremental calculada pelo modelo CAWM IV descontando a \u00e1rea da barragem a montante respons\u00e1vel pela contribui\u00e7\u00e3o em marcha da vaz\u00e3o. Desse modo, a vaz\u00e3o final calculada at\u00e9 o posto fluviom\u00e9trico de Caruaru d\u00e1-se pelo somat\u00f3rio das vaz\u00f5es defluentes das Barragens de Belo Jardim e Bitury adicionadas \u00e0 vaz\u00e3o incremental da sub-bacia at\u00e9 Caruaru. Vale ressaltar que a vaz\u00e3o defluente de Belo Jardim foi

calculada utilizando a vazão defluente da Barragem de Pão de Açúcar acrescentada da vazão incremental de Pão de Açúcar até o reservatório de Belo Jardim. A Figura 22 a seguir ilustra as áreas incrementais da afirmação anterior.

Figura 22 – Áreas incrementais na bacia do rio Capibaribe.



Fonte: O autor, 2019.

A partir da soma entre as vazões incrementais calculadas e as vazões defluentes de cada barragem, obteve-se as vazões de chegada na cidade de Caruaru, objetivo final da modelagem hidrológica e ponto de partida inicial para a modelagem hidrodinâmica na área urbana do município..

3.6 MODELAGEM HIDRODINAMICA BIDIMENSIONAL

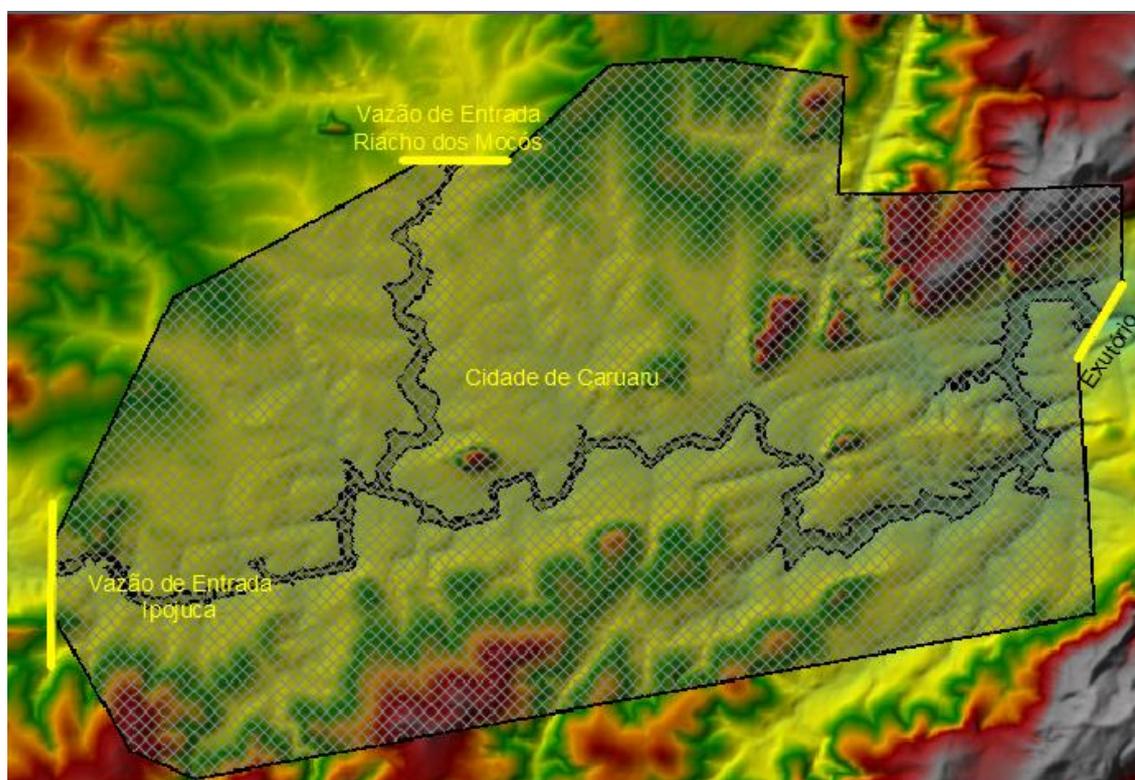
Em situações de eventos de chuvas intensas e possibilidade de ocorrência de vazões acima da média, as simulações hidrológicas se apresentam como uma ferramenta que permite transformar a informação de chuva em estimativa de vazão em um determinado ponto. (ALVES, 2017).

Foi realizada a modelagem Hidrodinâmica com o auxílio do modelo hidrológico computacional HEC-RAS 5.0.6 (The Hydrologic Engineering Center-River Analysis System) software desenvolvido pelo Centro de Engenharia Hidrológica dos Estados Unidos – HEC, e utilizado na determinação da mancha de inundação na Cidade de Caruaru.

Utilizou-se como insumo ortofotos na escala 1:1.000 com resolução espacial de 50 cm e Modelo Digital do Terreno, obtido de perfilamento a laser com precisão altimétrica de 10 cm referenciado aos marcos do IBGE.

Na etapa de definição das características geométricas do HEC-RAS 2D foi gerado sobre o terreno uma malha regular de células quadradas com 50 m de lado na maior parte da área. A discretização da malha bidimensional foi adotada com base nos arquivos de exemplos disponíveis no HEC-RAS 5.1.3. Apresenta-se na Figura 23 a malha utilizada no estudo com as definições de entrada e saída do fluxo de água.

Figura 23 – Malha de simulação bidimensional sobre o Modelo Digital do Terreno – MDT da cidade de Caruaru-PE.



Fonte: O autor, 2019.

A vazão de entrada para a simulação foi feita por dois pontos na rede hídrica da bacia Urbana do município de Caruaru, a primeira entrada de vazão foi realizada na seção imediatamente a montante da área urbana do município, foi adicionado uma segunda entrada de vazão para representar o riacho dos mocós, maior riacho da área urbana e que apresenta influência significativa no processo de cheias do rio, uma vez que sua área de contribuição de aproximadamente 62 km² é da mesma ordem de grandeza da área de drenagem do reservatório Bitury que é de 69km². Para representar a vazão de entrada do mocó utilizou-se o mesmo hidrograma de entrada a montante da cidade multiplicado pelo fator de correção representado pela relação entre a área de drenagem do riacho e a área da bacia hidrográfica do posto fluviométrico de Caruaru. O passo de tempo utilizado para as simulações foi de 1 minuto, enquanto os resultados foram calculados para intervalos de 1 hora. O pós-processamento das simulações bidimensionais foi realizado na aplicação RAS Mapper, aperfeiçoada a partir do HEC-RAS 5.0.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Aqui são apresentados os principais resultados obtidos na modelagem hidrológica, na modelagem hidrodinâmica e nas simulações executadas para as barragens de Pão de Açúcar, Belo Jardim e Bitury.

4.1 MODELAGEM HIDROLÓGICA

A modelagem hidrológica na Bacia do rio Ipojuca foi efetuada em quatro sub-bacias, de acordo com a Figura 18 apresentada anteriormente. Os dados de entrada iniciais para cada sub-bacia correspondem à chuva média (calculada conforme seção 3.2.2), vazão medida no exutório da sub-bacia e valores de evaporação. A calibração do modelo foi realizada para a estação fluviométrica de Caruaru (39340000). O intervalo para a modelagem foi igual em todas as sub-bacias, de 1 de Março de 1973 a 31 de Agosto de 2018, período que se tem dados na estação fluviométrica de Caruaru e que foi utilizada para calibração e validação dos estudos.

Foi utilizado o evento ocorrido entre os dias 28/06/1975 a 17/08/1975 para calibração dos parâmetros na sub-bacia delimitada pelo posto fluviométrico de Caruaru. Os demais eventos são apresentados como validação do modelo.

Conforme explicado na seção 2.8, é necessária a introdução de alguns parâmetros no CAWM IV para o cálculo da vazão simulada. Primeiramente, deve-se determinar algumas características físicas das sub-bacias para o cálculo do parâmetro K (coeficiente utilizado na equação do escoamento na calha fluvial), sendo elas: declividade do rio principal (I , em m/m), área da sub-bacia de contribuição (A_b , em km²), comprimento total dos rios da sub-bacia (L_t , em metros), Largura equivalente dos rios (B_e , em metros), coeficiente de Manning (n), intervalo de tempo (Δt , em segundos) e a constante de conversão de unidades (c). Todos os valores obtidos podem ser observados na Tabela 15.

A equação do escoamento fluvial também requer uma constante ***b***, que neste estudo teve o valor constante de 5/3. Na quarta versão do CAWM, a capacidade de retenção de água no solo (***S***) pode ser definida através do cálculo do Curve Number (***CN***) médio, conforme a (21). Para a bacia do Rio Ipojuca, o valor de ***S*** encontrado foi de 82 mm. Os valores de ***CN*** para a bacia do Rio Ipojuca foram obtidos através do mapa de monitoramento de uso e ocupação do solo de Pernambuco em 2016, fornecido pelo IBGE e foi gerado um mapa de uso e ocupação do solo para a bacia do rio Ipojuca, apresentado a seguir na Figura 24. Para isso foi desenvolvido pela equipe do GEOLAB: Laboratório de Geoprocessamento do Campus Agreste da UFPE um ***plugin*** para o Software QGIS que permite o cálculo de ***CN*** e ***S*** para qualquer região do Brasil.

Determinados todos os parâmetros anteriores, restam a calibrar somente o ***K_s*** (parâmetro indicativo de permeabilidade do solo), ***K_L*** (coeficiente linear de perdas) e o parâmetro do fator multiplicador da taxa de evapotranspiração a extrair do solo (***α***).

A calibração do modelo se fez através da escolha de alguns entre os maiores eventos hidrológicos ocorridos na bacia. Deste modo, foram escolhidos 16 eventos a serem avaliados para calibração e validação, com base nos indicadores de desempenho do modelo. A otimização foi feita a partir da maximização da função objetivo apresentada na (28 da seção 3.4). Os valores finais dos parâmetros calibrados estão exibidos na Tabela 15.

Tabela 15 – Parâmetros físicos necessários para o cálculo do coeficiente K.

Parâmetros	Caruaru	Belo Jardim	Bitury	Pão de Açúcar
I (m/m)	0,00178	0,00232	0,02741	0,00323
Ab (km ²)	2020,5	1316,8	62,4	434,4
Lt (m)	2.478.382	1.787.838	119.111	771.864
Be (m)	3,0	2,5	2,5	2,5
n	0,03	0,03	0,03	0,03
Δt (s)	86400	86400	86400	86400
c	1000	1000	1000	1000
K	0,0205838	0,0343299	1,4125672	0,0784915

Fonte: O autor, 2019.

I = declividade do rio principal; Ab = Área da bacia; Lt = Comprimento total dos rios; Be = Largura equivalente;

n = coeficiente de rugosidade de Manning; Δt = intervalo de tempo; c = constante de compatibilização de unidades.

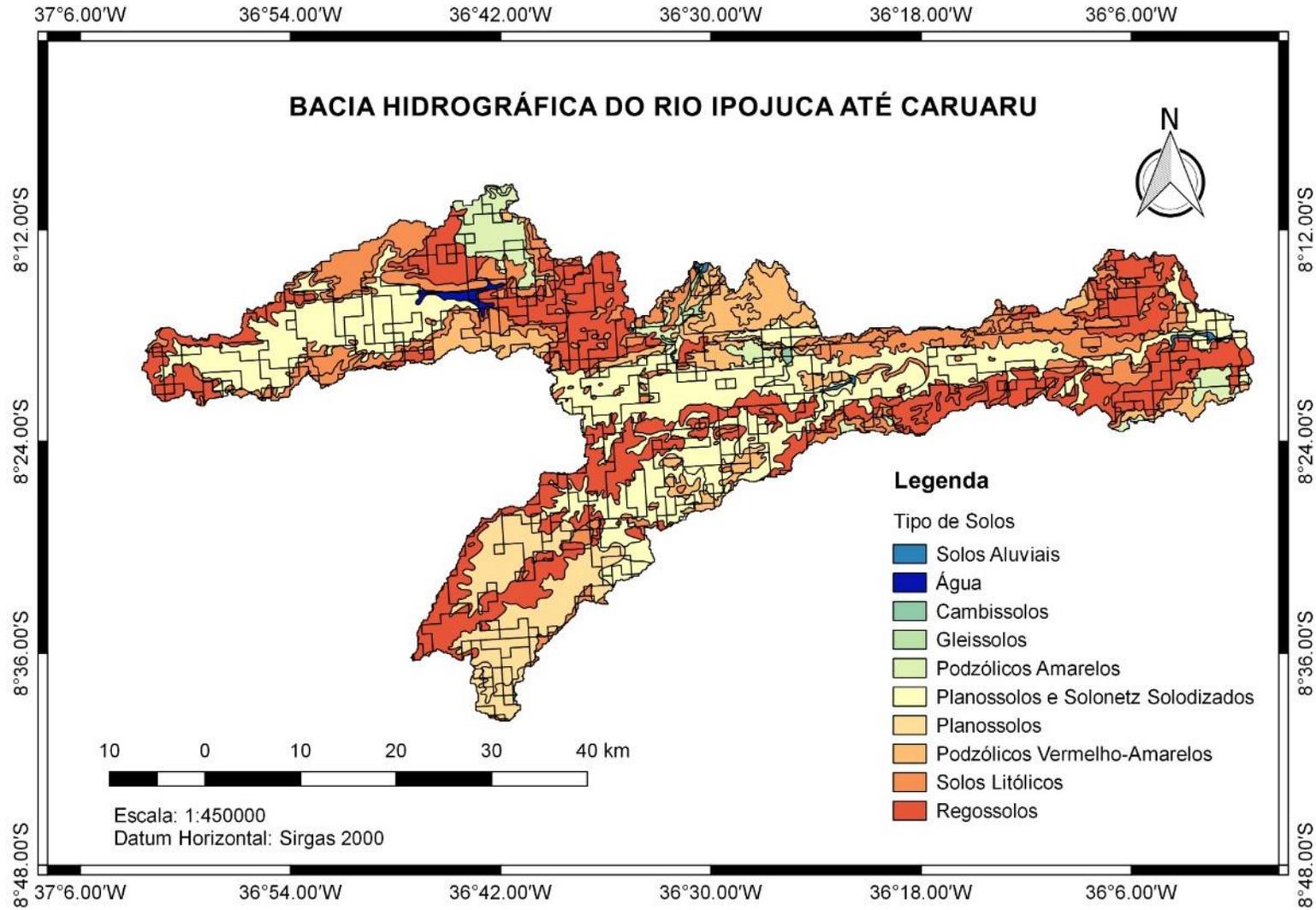
Tabela 16 – Parâmetros finais para cada sub-bacia

Parâmetros	Caruaru	Belo Jardim	Bitury	Pão de Açúcar
α	50,000000	50,000000	50,000000	50,000000
K _s	0,027296	0,027296	0,027296	0,027296
Be (m)	3,00	3,00	3,00	3,00
b	1,67	1,67	1,67	1,67
K _L	0,049867	0,049867	0,049867	0,049867
S (mm)	82	82	82	82

Fonte: O autor, 2019.

α = coeficiente de magnitude da evaporação; K_s = coeficiente de permeabilidade dos solos; Be = Largura equivalente;
b = constante; K_L = coeficiente de perdas; S = capacidade máxima de armazenamento no solo.

Figura 24 – Mapa de classificação do solo na Bacia do Rio Ipojuca até a Cidade de Caruaru



Fonte: Almeida Neto, 2019.

Na Tabela 15 observa-se que os valores de **K** para as sub-bacias de Pão de Açúcar e principalmente Bitury extrapolam a faixa de valores recomendada, por conta da declividade acentuada. Nesses casos foi utilizado o valor de **K** calculado para a sub-bacia até Caruaru.

Por falta de postos fluviométricos próximos aos exutórios das três sub-bacias formadas pelas áreas de drenagem das barragens estudadas, impossibilitando a calibração dos parâmetros das mesmas, algumas considerações tiveram que ser aplicadas. Foram utilizados nas sub-bacias de Pão de Açúcar, Belo Jardim e Bitury os parâmetros obtidos para a região drenada até o posto de Caruaru e realizada a modelagem hidrológica alterando apenas a área da bacia e a chuva média correspondente a essas áreas. Para validação dos resultados foi comparada a vazão calculada na modelagem CAWM IV com a vazão observada no posto de Caruaru ponderada em função da relação entre as áreas das sub-bacias e a área da sub-bacia de Caruaru.

Da Figura 25 à Figura 27, são apresentados os gráficos das simulações realizadas para a sub-bacia de Caruaru. Já na Tabela 17 são apresentados os indicadores de desempenho do modelo.

Tabela 17 – Indicadores de desempenho para os intervalos estudados

PERÍODO	CARUARU						
	ENS	NASH RAIZ	NASH LOG	R ²	RMSE	Pbias(%)	RSR
25/03/74 a 04/05/74	0,68	0,73	0,93	0,31	482,26	35,47	0,08
28/06/75 a 17/08/75	0,96	0,98	0,98	0,94	19,80	0,63	0,01
17/06/77 a 16/08/77	0,54	0,48	0,84	0,51	401,50	45,89	0,11
02/02/78 a 21/08/78	0,56	0,63	0,46	0,52	44,06	15,73	0,11
26/02/81 a 06/06/81	0,22	0,72	0,84	0,40	517,21	-21,36	0,19
01/04/84 a 11/05/84	0,65	0,84	0,83	0,48	114,81	-11,30	0,09
26/01/85 a 03/10/85	0,65	0,69	0,72	0,73	123,48	29,81	0,09
31/01/88 a 07/10/88	0,37	0,73	0,64	0,83	8,12	-64,73	0,16
06/03/89 a 11/11/89	0,59	0,66	0,20	0,54	16,25	4,35	0,10
03/04/97 a 22/06/97	-0,02	0,39	0,28	0,46	23,85	-107,06	0,25
16/07/00 a 04/09/00	0,42	0,52	0,82	0,42	221,49	2,55	0,14
18/12/03 a 27/03/04	0,43	0,66	0,47	0,48	1000,81	-19,19	0,14
16/03/08 a 04/06/08	-73,75	0,31	0,50	0,10	3654,87	-388,35	18,69
31/03/09 a 17/10/09	-15,21	0,44	0,66	0,23	2182,47	-319,30	4,05
05/04/10 a 10/01/11	-6,95	0,57	0,64	0,58	1167,63	-217,69	1,99
15/05/17 a 15/07/17	0,37	0,46	0,26	0,73	34,69	-122,59	0,16
01/03/73 a 30/04/93	0,42	0,62	0,48	0,45	30,09	-2,56	0,15
01/03/73 a 31/08/18	-2,83	0,48	0,51	0,16	158,72	-70,11	0,96

Fonte: O autor, 2019.

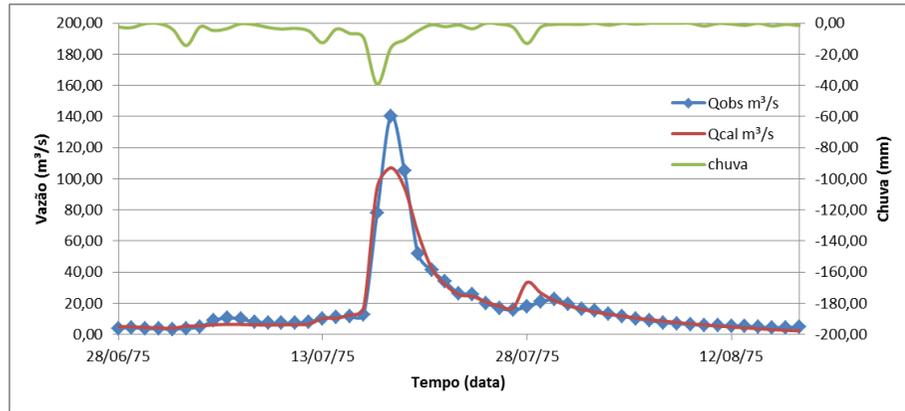
Ao se analisar todo o período simulado, foi percebido que as simulações realizadas até o ano de 1989 tiveram resposta hidrológica de razoável a boa quando analisados o Coeficiente de Nash e suas derivações. Quanto ao indicador *Pbias*, que representa os desvios de volume, os resultados foram inferiores, pois dos 9 eventos, em 4 deles *Pbias* superou os 25% aceitáveis. O indicador RSR foi satisfatório para os 9 eventos. Os 6 eventos seguintes de forma geral não apresentaram resultados satisfatórios. Primeiro porque o regime fluvial passou a ser modificado pelas três barragens em conjunto. Segundo, para esses eventos foi constatado que os dados das estações pluviométricas apresentavam grandes períodos vazios em várias das estações ao mesmo tempo, levando a uma chuva média tendenciosa.

Foi avaliado ainda o desempenho do modelo para simulação de longo termo, considerando os períodos entre 1973 e 1993 e de 1973 a 2018. No primeiro caso, os valores obtidos para os diversos indicadores de desempenho atendem de forma geral aos valores de referência encontrados na literatura. Isso não ocorre no caso do 2º período, o que é explicável, tanto pelo efeito das barragens quanto da redução da quantidade de dados de precipitação disponível.

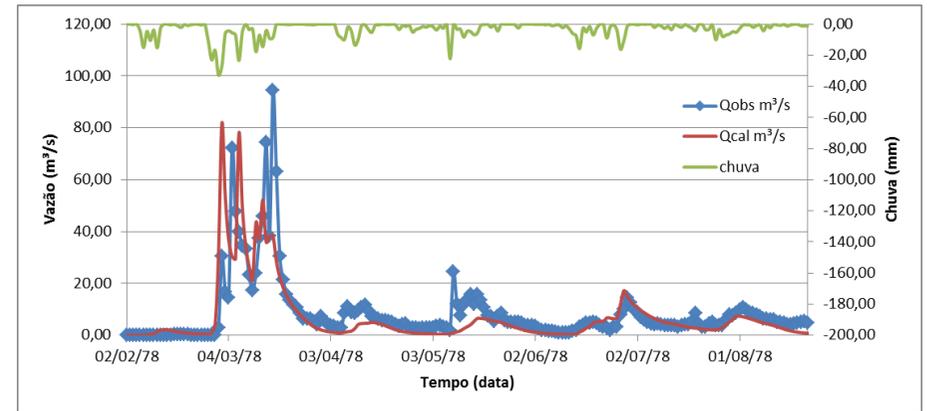
De modo geral o CAWM IV conseguiu representar satisfatoriamente tanto as vazões mais altas quanto as mais baixas nesta sub-bacia, considerando o período com séries de precipitações sem ou com poucas falhas e os períodos anteriores à operação do conjunto de barragens.

Figura 25 – Vazões calculadas e observadas para o posto de Caruaru (parte 1)

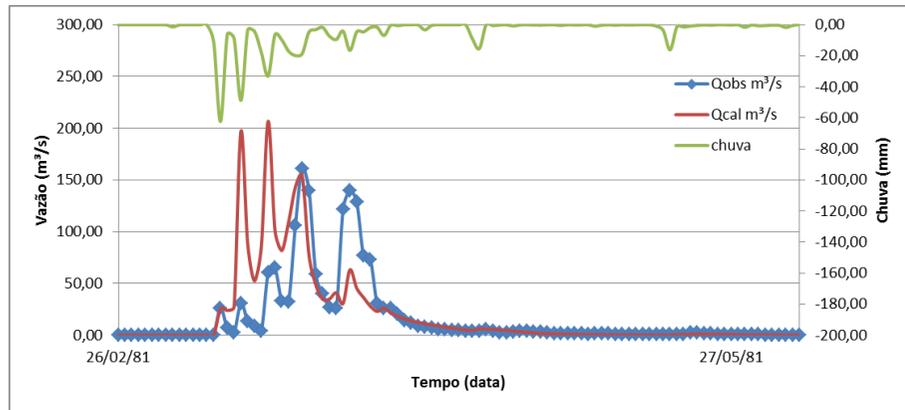
Período: 28/06/1975 a 17/08/1975



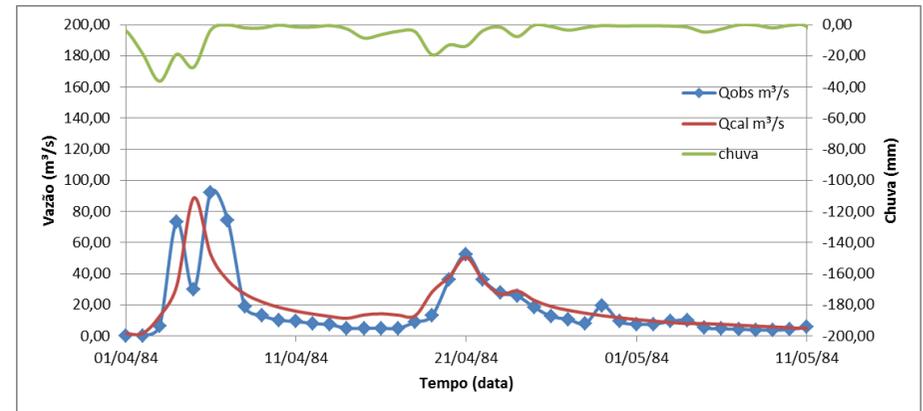
Período: 02/02/1978 a 21/08/1978



Período: 26/02/1981 a 06/06/1981



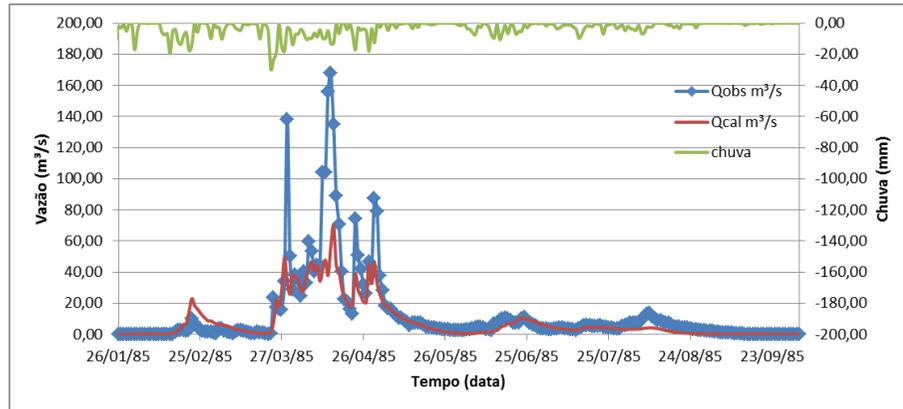
Período: 01/04/1984 a 11/05/1984



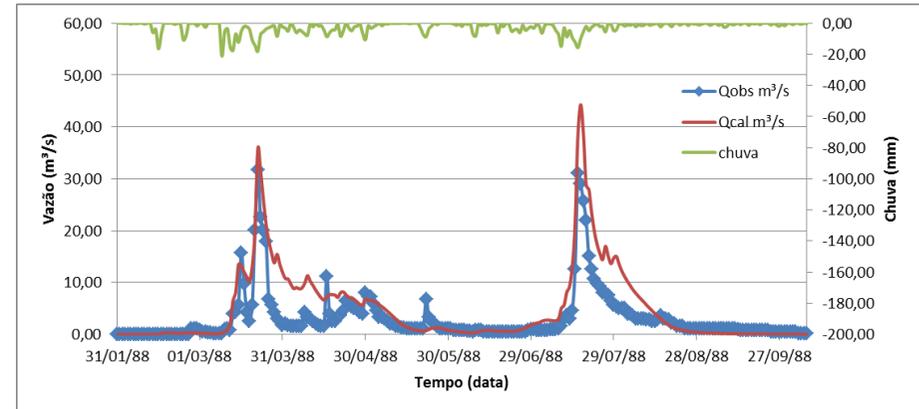
Fonte: O autor, 2019.

Figura 26 – Vazões calculadas e observadas para o posto de Caruaru (parte 2)

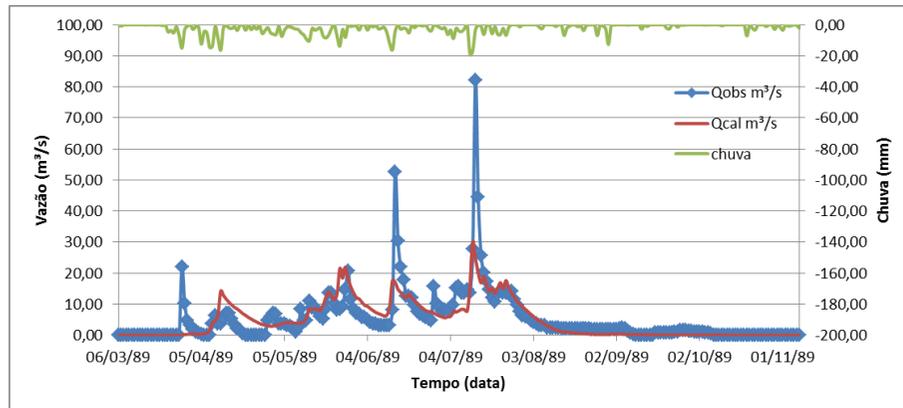
Período: 26/01/1985 a 03/10/1985



Período: 31/01/1988 a 07/10/1988



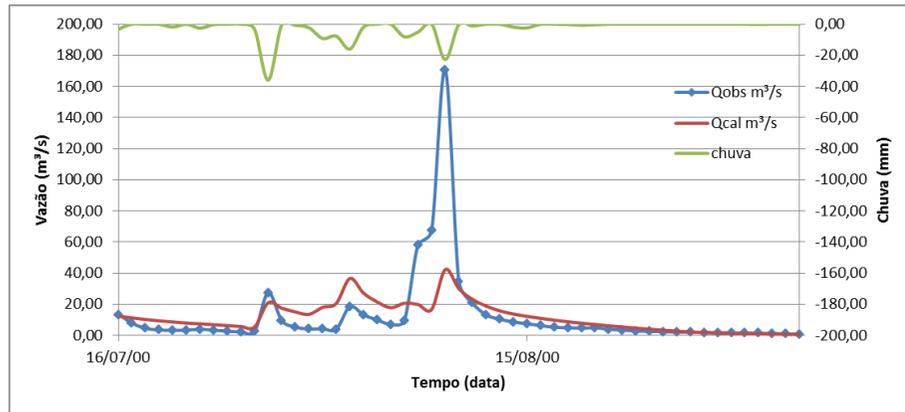
Período: 06/03/1989 a 11/11/1989



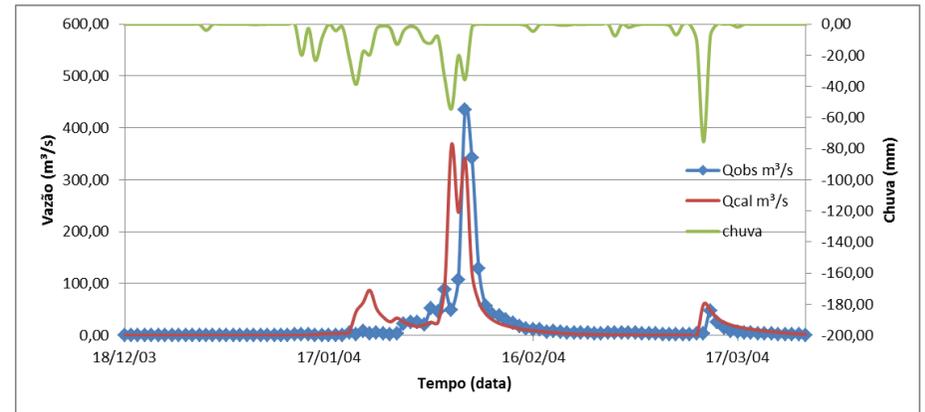
Fonte: O autor, 2019

Figura 27 – Vazões calculadas e observadas para o posto de Caruaru (parte 3)

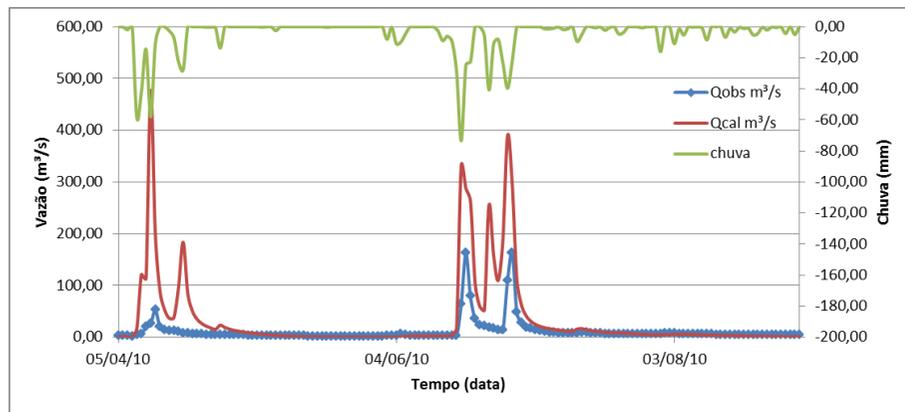
Período: 16/07/2000 a 04/09/2000



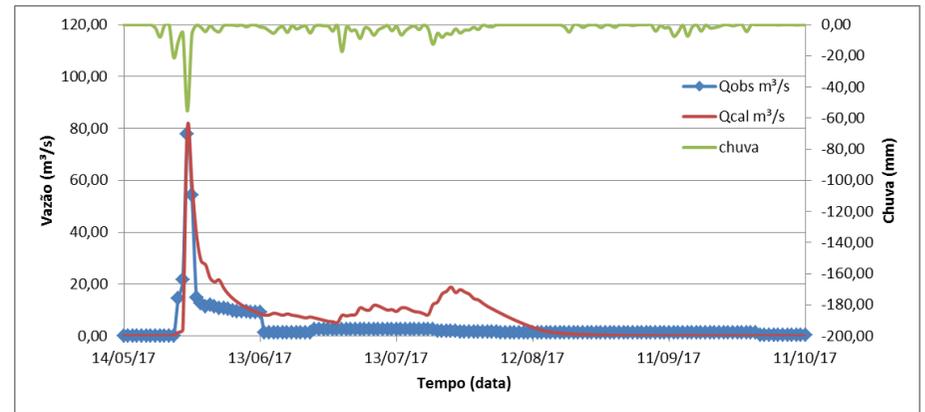
Período: 18/12/2003 a 27/03/2004



Período: 05/04/2010 a 10/01/2011



Período: 15/05/2017 a 15/08/2017



Fonte: O autor, 2019.

4.2 OPERAÇÃO DE RESERVATÓRIOS

Para realizar a simulação de operação dos reservatórios, foram impostas algumas condições iniciais. Primeiramente foi estipulado que o volume inicial de operação das barragens seria em geral de 5% do volume total de acumulação (aumentado para 50% quando a simulação se inicia em período longo de estiagem, para evitar secamento logo no início). O período de estudo analisado foi o mesmo realizado no modelo hidrológico, de 01 de março 1973 a 31 de agosto de 2018. A vazão regularizada deveria garantir um volume mínimo de operação da barragem em 4% de sua capacidade.

Como não há conhecimento da operação real dos reservatórios (além do que as simulações foram iniciadas antes da existência dos mesmos) foi avaliada a vazão regularizável em cada um e daí estabelecido que essa vazão seja extraída continuamente. O cálculo foi feito a partir da ferramenta de otimização Solver, presente no Excel, considerando calcular a máxima vazão que pode ser extraída no período contínuo sem que o reservatório atinja volumes inferiores ao mínimo estabelecido.

A Tabela 18 a seguir apresenta as vazões regularizadas para cada um dos reservatórios com 100% de garantia e compara os resultados com os do Plano Hidroambiental da Bacia do Rio Ipojuca (PERNAMBUCO, 2010b).

Tabela 18 – Vazões regularizadas pelos reservatórios

Reservatório	Vazões Regularizadas calculadas (L/s)	Vazões Regularizadas (m ³ /s) segundo o Plano Hidroambiental Ipojuca
Pão de Açúcar	190	274
Belo Jardim	185	137
Bitury	36	27

Fonte: O autor, 2019.

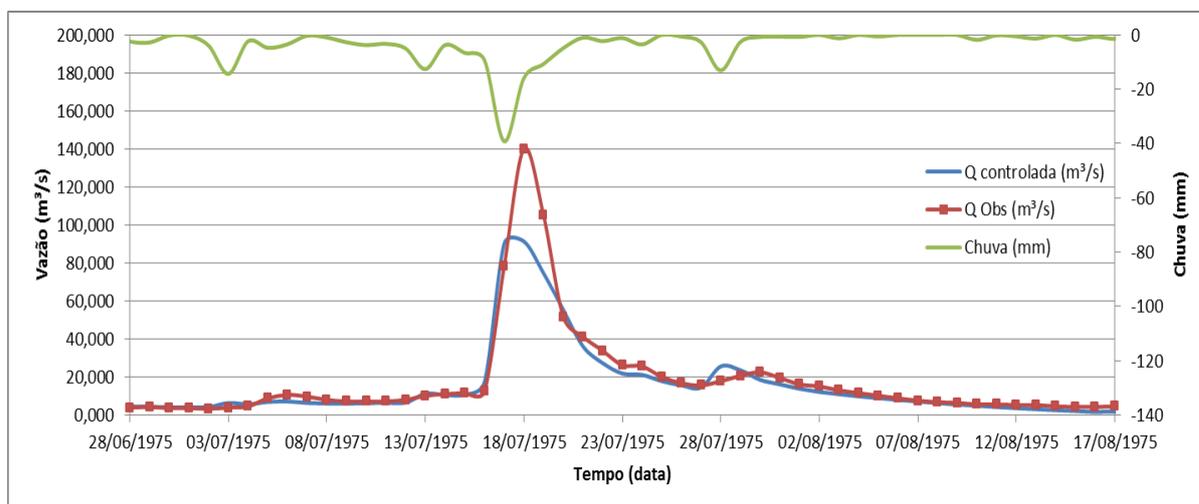
As vazões de entrada em cada reservatório são decorrentes da defluência por vertimento das barragens a montante, quando existem, acrescida da vazão incremental até o ponto de controle (barragem ou o exutório, no trecho final até

Caruaru). As vazões incrementais, bem como a afluência ao primeiro reservatório, Pão de Açúcar, foram simuladas com os parâmetros calibrados para o CAWM IV no posto Caruaru, considerando, entretanto, as precipitações em cada área de contribuição.

Ao final da operação de reservatório um novo hidrograma foi gerado com a influência das barragens, com dois objetivos: a) avaliar o impacto que as barragens exerceriam no controle das enchentes se já existissem à época dos eventos; b) buscar reproduzir os eventos ocorridos durante sua operação.

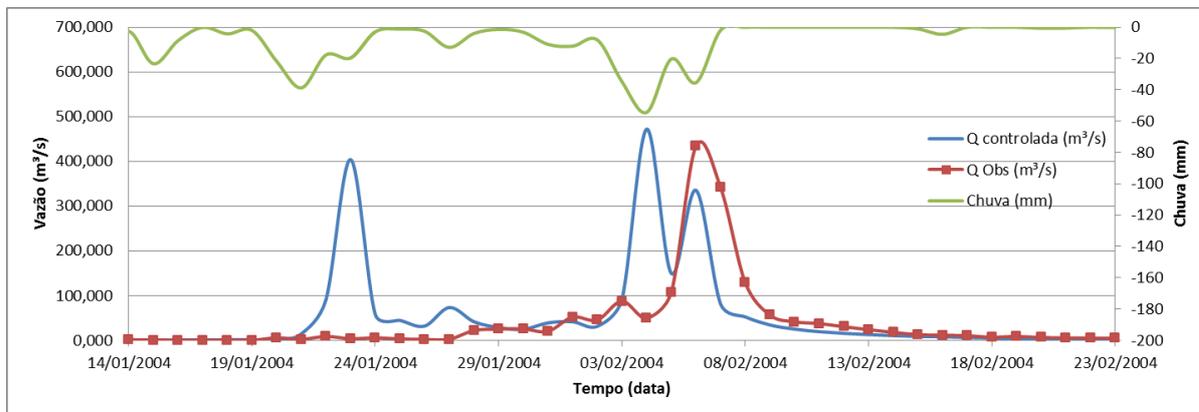
A Figura 28 mostra os hidrogramas observado e calculado, caso as barragens existissem, para o evento de 1975, com redução da ordem de 40% na vazão de pico. No caso da Figura 29 e Figura 30, como no período as barragens já existiam, os hidrogramas deveriam se ajustar. Como isso não aconteceu, deduz-se que a deficiência nos dados de precipitação foi de fato a principal causa dos maus resultados obtidos nas simulações para os seis eventos mais recentes.

Figura 28 – Vazões calculadas e observadas para o posto de Caruaru, caso as barragens existissem em 1975.



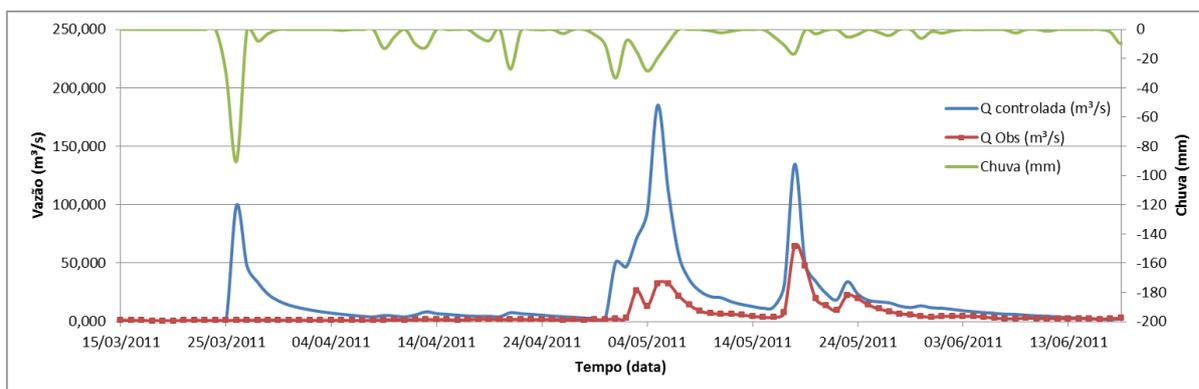
Fonte: O autor, 2019.

Figura 29 – Vazões calculadas e observadas para o posto de Caruaru em evento de 2004



Fonte: O autor, 2019.

Figura 30 – Vazões calculadas e observadas para o posto de Caruaru em evento de 2011



Fonte: O autor, 2019.

4.3 MODELAGEM HIDRODINÂMICA BIDIMENSIONAL DA ÁREA URBANA DE CARUARU

A simulação hidrodinâmica bidimensional foi realizada com o hidrograma de entrada do evento ocorrido no ano de 2004 que apresentou a maior vazão histórica no posto fluviométrico de Caruaru sendo possível validação da simulação ao se comparar a mancha de inundação gerada pelo modelo com os registros fotográficos da época. Na Figura 31 é apresentada a mancha de inundação do evento simulado no período de 26 de janeiro de 2004 a 25 de fevereiro de 2004.

Foram realizadas diversas simulações aplicando-se um fator de redução no hidrograma de entrada do modelo hidrodinâmico no intuito de encontrar-se a vazão máxima suportada pela calha do rio Ipojuca, na área urbana do município, de forma que não ocorresse extrapolação da mesma. Foi encontrada uma vazão máxima de aproximadamente 130 m³/s. um valor relativamente baixo, levando-se em conta que além do riacho do Mocó a cidade de Caruaru recebe vazões de outros riachos urbanos que não foram computados e que a cidade já sofreu a ocorrência de eventos na ordem de 400m³/s. É apresentado a seguir da Figura 32 à Figura 34 a comparação entre a mancha de inundação do evento ocorrido no ano de 2004 e o limite gerado pela vazão máxima suporta pela calha em três localizações da cidade próximos a pontes ou passagens molhadas.

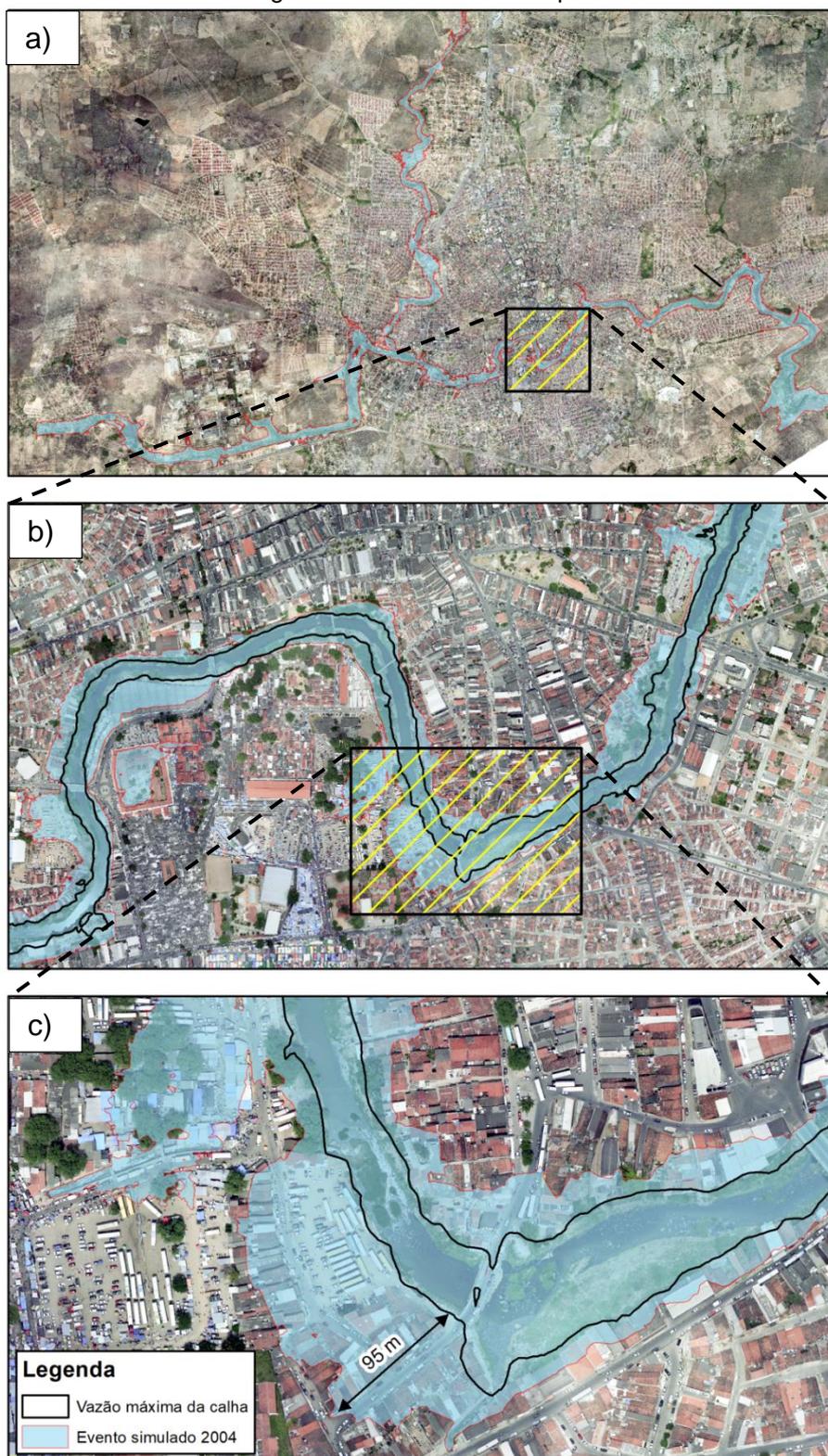
Uma situação diferente ocorreu no período chuvoso de 2017. Analisando o hidrograma do evento ocorrido no posto fluviométrico a montante da cidade registra-se uma vazão de pico de 78 m³/s, vazão essa bem abaixo da mínima necessária para causar inundação na cidade. No entanto, as chuvas intensas na área urbana do município, levaram ao transbordamento da rede de riachos que compõem a drenagem urbana e foram os responsáveis majoritários no processo de inundação. É apresentado no Anexo A imagens da ocorrência do evento de 2017 e algumas de suas consequências.

Figura 31 – Resultados da simulação hidrodinâmica bidimensional para o evento de 2004.



Fonte: O autor, 2019.

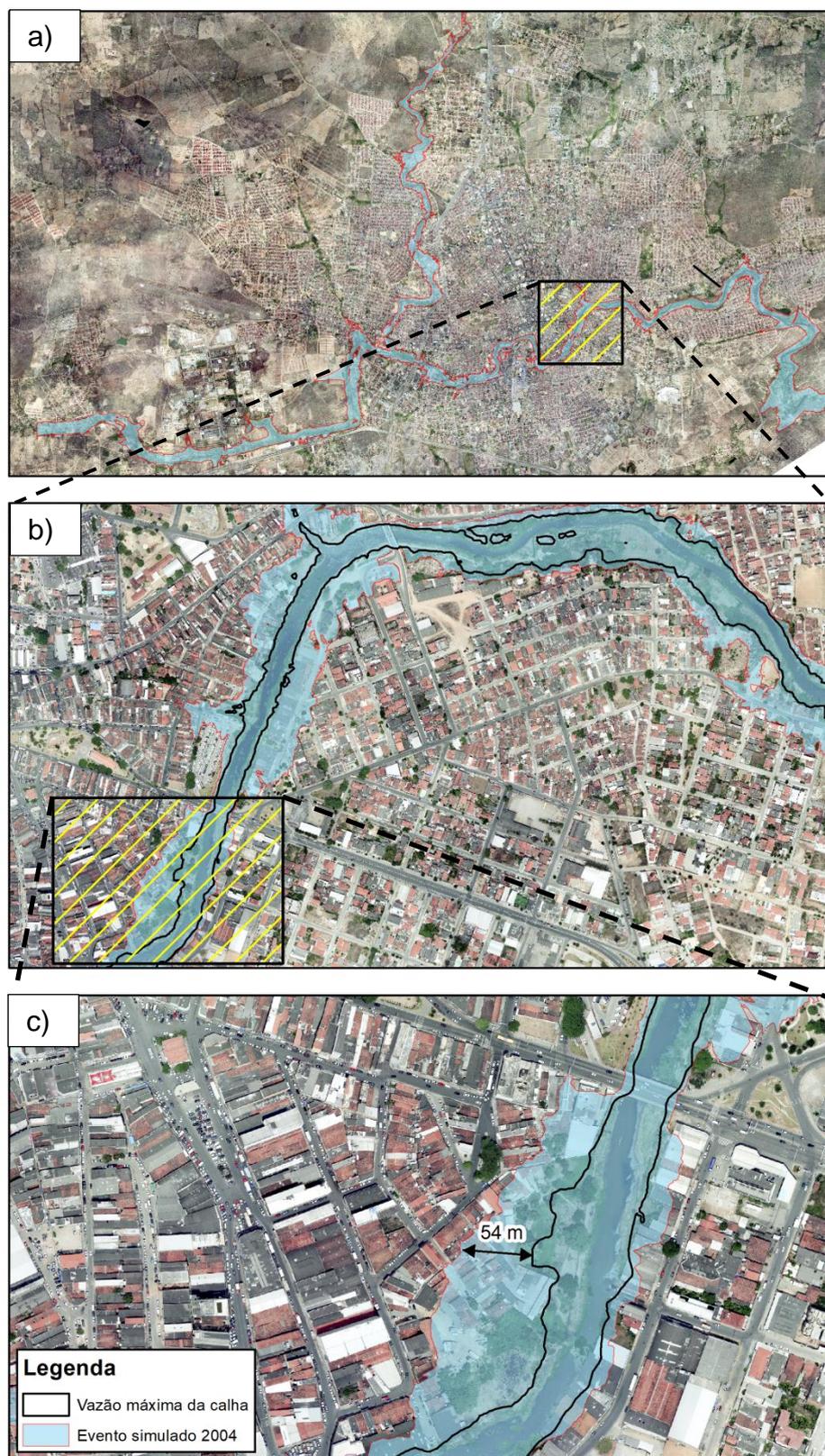
Figura 32 – Simulação cheia de 2004 com delimitação da vazão máxima suportada. Localidade 01 – Passagem Molhada Rua dos Sapateiros



Fonte: O Autor, 2019.

- a) imagem aérea na escala 1:30.000.
- b) imagem aérea na escala 1:3.000.
- c) imagem aérea na escala 1:1.000.

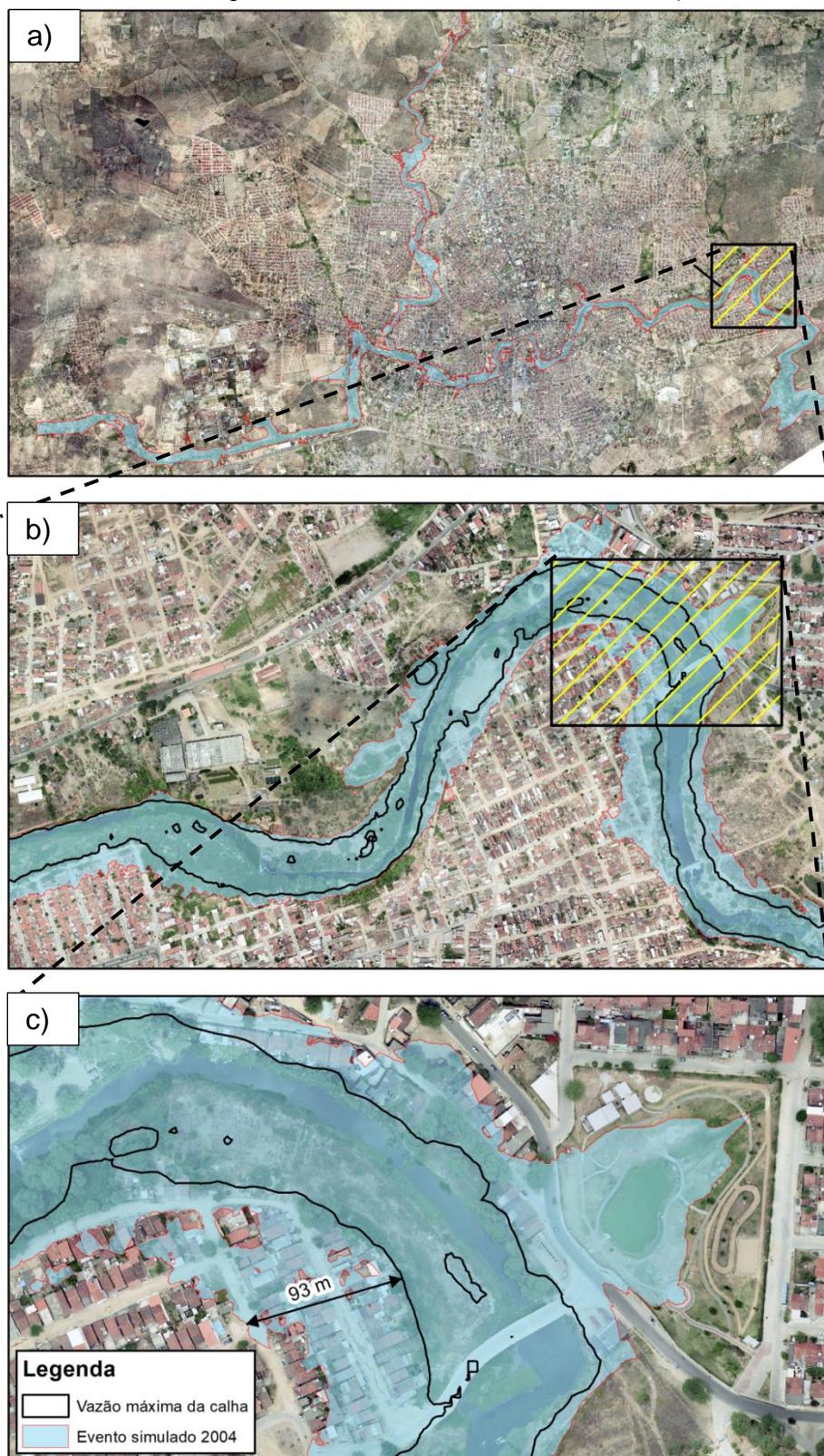
Figura 33 – Simulação cheia de 2004 com delimitação da vazão máxima suportada. Localidade 02 – Ponte Nova



Fonte: O autor, 2019.

- a) imagem aérea na escala 1:30.000.
- b) imagem aérea na escala 1:3.000.
- c) imagem aérea na escala 1:1.000.

Figura 34 – Simulação cheia de 2004 com delimitação da vazão máxima suportada. (localidade 03 – Passagem molhada José Liberato as Rendeiras)



Fonte: O autor, 2019.

- a) imagem aérea na escala 1:30.000.
- b) imagem aérea na escala 1:3.000.
- c) imagem aérea na escala 1:1.000.

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O principal objetivo da pesquisa foi identificar a vazão que escoava no rio Ipojuca a partir da qual ocorrem inundações na área urbana em Caruaru. Ao final do trabalho chegou-se a um limiar de $130\text{m}^3/\text{s}$. Trata-se de um valor baixo, tendo em vista que eventos como o ocorrido em 2004, o maior registrado na estação fluviométrica em Caruaru, atingiu um pico de $434\text{m}^3/\text{s}$, já com as barragens em operação. Além disso, a rede de canais da zona urbana tem potencial de amplificar as inundações de forma significativa, como ocorreu em 2017, quando a vazão máxima registrada no posto fluviométrico foi inferior a $80\text{m}^3/\text{s}$ e mesmo assim as inundações aconteceram em diversas partes da cidade. Isso atesta, portanto, o grau de vulnerabilidade da zona urbana de Caruaru face à ocorrência de inundações.

O modelo hidrológico CAWM IV apresentou bom desempenho para o período anterior à construção das barragens. Os reservatórios, como é esperado, alteram as condições do escoamento fluvial, algo que o modelo hidrológico sozinho não consegue identificar. O acoplamento com modelo de operação de barragens deveria promover simulações mais adequadas no período posterior à construção das barragens. Isso não foi conseguido, tendo em vista a grande quantidade de falhas nos postos pluviométricos nos períodos mais recentes. Para períodos anteriores à construção foi possível avaliar o impacto na redução da magnitude das cheias se as barragens existissem à época.

Para a modelagem bidimensional, um fator importante para a boa representação do modelo é a resolução do MDT. O modelo utilizou dados do terreno com resolução equivalente à escala 1:5000 na simulação hidrológica para a porção da bacia hidrografia do rio Ipojuca e dados na escala de 1:1000 na modelagem hidrodinâmica para chegar na melhor escala de precisão na representação do terreno.

Como recomendação para trabalhos futuros, é essencial que seja feita a simulação do escoamento nas bacias dos demais riachos urbanos, complementando a vazão de chegada à cidade através do rio Ipojuca.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA CONDEPE/FIDEM. **Série Bacias Hidrográficas de Pernambuco I**. Rio Ipojuca. Recife, 2005. 64p.

_____. **Bacias Hidrográficas de Pernambuco**: estudo regional de ações estruturadoras na unidade de planejamento hídrico do rio Ipojuca. Recife, 2011. 60p.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Atlas de Vulnerabilidade a inundações**. Brasília: ANA, 2014. 1 Atlas.

_____. **Atlas de Vulnerabilidade a inundações**: Pernambuco. Brasília: ANA, 2014. 1 Mapa.

ALMEIDA NETO, J. B. de. **Determinação do potencial de acumulação de água nos solos do estado de Pernambuco**. 2019. 79 f. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Civil) – Centro Acadêmico do Agreste, Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru, 2019.

ALVES, F. H. B. **Sistema avançado de previsão de enchentes**: análises e melhorias aos modelos de previsão de chuva, hidrológico e hidrodinâmico. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil com ênfase em Recursos Hídricos) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2017.

ALVES, F.H.B.; CIRILO, J. A.; ASFORA, M. C.; MELO, C. R. **Comparativo das precipitações dos eventos extremos de 2010 e 2017 ocorridos na Bacia do rio Una em Pernambuco e estimativa dos efeitos de barragem de contenção de cheias**. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 22., 2017, Florianópolis. **Anais [...]**. Florianópolis: ABRH, 2017. p. 1-10.

ANDRADE, M. A.; MELLO, C. R.; BESKOW, S. **Simulação hidrológica em uma bacia hidrográfica representativa dos latossolos na região alto Rio Grande, MG**. Campina Grande, PB: UAEA/UFCG, 2012.

CABRAL, S. L.; SOUZA FILHO, F. A.; CAMPOS, J. N. B.; SILVEIRA, C. S.; LEMOS, W. E. D. Determinação do volume de espera do reservatório Castanhão-CE utilizando series sazonais de vazões. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 20., 2013, Bento Gonçalves. **Anais [...]**. Bento Gonçalves: ABRH, 2013. p. 1-8.

CAMARA, G; DAVIS, C. **Fundamentos de geoprocessamento**, 2006. Disponível em: <http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/introd/cap1-introducao.pdf>. Acesso em: 17 jul. 2019.

CEXCHUV - RELATÓRIO FINAL DA COMISSÃO EXTERNA DAS CHUVAS EM ALAGOAS E PERNAMBUCO. 2017. Disponível em: https://www.camara.leg.br/proposicoesWeb/prop_mostrarintegra?codteor=1579140. Acesso em: 07. jul. 2019.

CIRILO, J.A. Notas de Aula da Disciplina Recursos Hídricos. 2018. Disponíveis em: https://mega.nz/#F!h8ymarS!-ZCLlqLATO3_V97LM7qAXQ. Acesso em 17 jul. 2019.

CIRILO, J. A.; Alves, F.H.B.; SILVA, L. A. C.; Campos, J. H. A. L. Suporte de Informações Georreferenciadas de Alta Resolução para Implantação de Infraestrutura e Planejamento Territorial. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v.7, p.755 - 763, 2014.

CIRILO, J. A.; DANTAS, C. E. O.; RIBEIRO NETO, A.; SILVA, E. R.; MONTENEGRO, S. M. G. L. Controle e Previsão de Cheias no Estado de Pernambuco, Brasil: Estrutura Geral do Sistema de Suporte à Decisão. *In*: IWRA WORLD WATER CONGRESS, 14., 2011a, Porto de Galinhas, Pernambuco, Brasil. **Anais** [...] Ipojuca: IWRA, 2011. p. 1-12.

CIRILO, J. A.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; ASFORA, M. C.; TORRES FILHO, C. O. Controle e Previsão de Cheias no Estado de Pernambuco, Brasil: Aspectos Hidrológicos e Ações de Reconstrução. *In*: IWRA WORLD WATER CONGRESS, 14., 2011b, Porto de Galinhas, Pernambuco, Brasil. **Anais** [...]. Ipojuca: IWRA, 2011b. p. 1-14.

DANTAS, C. E. O.; CIRILO, J. A.; RIBEIRO NETO, A.; SILVA, E. R. Caracterização da Formação de Cheias na Bacia do Rio Una em Pernambuco: Análise Estatística Regional. **RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 19, n. 4, p. 239–248, 2014.

DEMERS. M. N. "GIS." Britannica Academic. Encyclopædia Britannica. 2016. Disponível em: <http://academic-ebritannica.dez87.periodicos.capes.gov.br/levels/collegiate/article/396653>. Acesso em: 01 fev. 2017.

DIÁRIO DE PERNAMBUCO. Ilha do Retiro em 19 de julho de 1975. Disponível em: <http://blogs.diariodepernambuco.com.br/esportes/2015/07/21/arruda-aflitos-e-ilha-do-retiro-inundados-na-cheia-de-1975-no-susto-de-tapacura/>. Acesso em: 7 jul. 2019.

EDIJATNO; NASCIMENTO, N. O.; YANG. X.; MICHEL. Z. M. C. GR3J: A daily watershed model with three free parameters. **Hydrological Sciences Journal**, v. 44, n. 2, p. 263–277, 1999.

EMPÓRIO PERNAMBUCANO. A estrada dos Remédios na cheia de 1975. 2019. Disponível em: <https://www.emporiopernambucano.com/single-post/2017/01/14/Tapacur%C3%A1-estourou-40-anos-do-boato-que-provocou-caos-no-Recife>. Acesso em: 07. jul. 2019.

FAN, F. M., Pontes, P. R. M. & Paiva, R. C. D. Avaliação de um método de propagação de cheias em rios com aproximação inercial das equações de Saint-Venant. **RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 19, pp. 137-147. 2014.

FARIAS. C. C. Fundamentos de Geoprocessamento, 2010. Disponível em: <https://www.infoescola.com/cartografia/geoprocessamento/>. Acesso em 06. jul. 2019.

FEITOZA, M. A. B. **Modelagem aplicada ao planejamento dos recursos hídricos: aprimoramento de modelo conceitual chuva-vazão concentrado**. 2018. Monografia de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil Campus Agreste, Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru, 2018.

FERRAZ, G. F. **Simulação hidrológica e hidrodinâmica do impacto de enchentes na bacia do rio Sirinhaém e avaliação de sistema de controle proposto**. 2019. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 124f. 2019

GOMES, M. M. de A. **Abordagem integrada de modelagem hidrológica e operação de barragens para avaliação da eficiência do controle de cheias na Bacia do Rio Capibaribe**. 2019. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 155f. 2019

INMET. Normal Climatológica do Brasil 1981-2010 Evaporação Total (Evaporímetro de Piché). 2010. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/normaisClimatologicas>. Acesso em: 15 jun. 2019.

LIMA, L. S. **Implementação de um modelo hidrológico distribuído na plataforma de modelagem dinâmica ego**. 2011. Dissertação (Mestrado em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais) – Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011.

LONGLEY, P. A.; Goodchild, M. F.; Maguire, D. J., Rhind, D. W. **Sistemas e Ciência da Informação Geográfica**. 3. ed. São Paulo: Bookman, 2009, 540p.

MENDES, C. A. B.; CIRILO, J. A. **Geoprocessamento em recursos hídricos: princípios, integração e aplicação**. 2. ed. Porto Alegre: Revista Ampliada., 2013.

MORIASI, D. N.; ARNOLD, J. G.; VAN LIEW, M. W.; BINGNER, R. L.; HARMEL, R. D.; VEITH, T. L. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. **American Society of Agricultural and Biological Engineers**, 2007. v. 50, n. 3, p. 885–900.

NASH, J. E.; SUTCLIFFE, J. V. River flow forecasting through conceptual models Part I-A discussion of principles. **Journal of Hydrology**, v. 10, n. 10, p. 282–290, 1970.

PAIVA, R. C. D. **Modelagem hidrológica e hidrodinâmica de grandes bacias. estudo de caso: Bacia do rio Solimões**. 2009. Dissertação de Mestrado. Porto Alegre: IPH-UFRGS, 182 p. 2009.

PATIL, S. D., and M. Stieglitz. Modeling daily streamflow at ungauged catchments: What information is necessary?, **Hydrol. Processes**, v. 28, n. 3, p. 1159–1169, 2014.

PAZ, Adriano Rolim. **Simulação hidrológica de rios com grandes planícies de inundação**. 2010. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

PERNAMBUCO. Secretaria Infraestrutura e Recursos Hídricos (SIRH). Agência Pernambucana de Águas e Clima (APAC). **Chuvas e Enchentes Ocorridas em Junho de 2010**. Recife: 2010. 7p. Nota Técnica.

_____. **Plano hidroambiental da Bacia Hidrográfica do Rio Ipojuca**. (Tomo I - Diagnóstico Hidroambiental - Volume 01/03). Recife: 2010, 339p.

PERRIN, C.; MICHEL, C.; ANDRÉASSIAN, V. Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation. *Journal of Hydrology*, v. 279, n. 1-4, p.275-289, 2003.

PORTO, R. L. L.; Roberto, A. N.; Schardong, A.; Mélo Júnior, A.V. **Sistema de suporte a decisão para análise de sistemas de recursos hídricos**. Métodos numéricos em recursos hídricos. Porto Alegre: ABRH, 2003. cap.2, p.93-240.

PUSHPALATHA, R.; PERRIN, C.; LE MOINE, N.; ANDRÉASSIAN, V. A review of efficiency criteria suitable for evaluating low-flow simulations. **Journal of Hydrology**, v. 420–421, p. 171–182, 2012.

RIBEIRO, D. C. M. **Modelo de previsão de vazão aplicado ao nordeste brasileiro utilizando a informação climática para auxiliar a operação de hidrossistemas**. 2011. Dissertação (Mestrado) - Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental – Universidade Federal do Ceará. Fortaleza. 187 p. 2011.

RIBEIRO NETO, A.; SCOTT, C. A.; LIMA, E. A.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; CIRILO, J. A. Infrastructure sufficiency in meeting water demand under climate-induced socio-hydrological transition in the urbanizing Capibaribe River basin-Brazil. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 18, n. 9, p. 3449–3459, 2014.

ROBERTO, A. N. **Modelos de rede de fluxo para alocação de água entre múltiplos usos em uma bacia hidrográfica**. 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica e Ambiental) - Universidade de São Paulo, São Paulo, USP, 2002.

ROSA, R. **Introdução ao geoprocessamento**. Universidade Federal de Uberlândia. Instituto de Geografia. Laboratório de Geoprocessamento. Uberlândia. 2013. 142p.

SANTOS, J. B. **Modelagem hidrológica HEC-HMS bacia hidrográfica do rio Ribeirão Lavapés**. 2017. Tese (Doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônomicas, Botucatu, 78p. 2017.

SANTOS, K. A. **Modelagem do acompanhamento e controle de cheias em bacias hidrográficas de grande variação de altitude**. 2013. Dissertação (Mestrado) –

Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 127f. 2013.

SCHAEFLI, Bettina; GUPTA, Hoshin V.. Do Nash values have value? **Hydrological Processes**, v. 21, n. 15, p.2075-2080, 2007.

SECRETARIA DE INFRAESTRUTURA E RECURSOS HÍDRICOS (SIRH). **Controle de Cheias**: 2011. Disponível em: http://www.sirh.srh.pe.gov.br/site/index.php?option=com_content&view=article&id=327:barragens-de-contencao-de-cheias. Acesso em: 29 jun. 2019.

SILVA, MIRNA K. A. DA; ROSA, ROBERTO. **Metodologia para simulação de vazão em bacias hidrográficas**: o caso da subbacia hidrográfica Fazenda Letreiro – MG. Caderno de Geografia, v.27, n.48, 2017.

SILVA, P. O. **Modelagem hidrológica do rio Tejipió por ocasião de chuvas intensas levando em conta o efeito de marés**. 2019. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 107p. 2019.

SUNKAR, M.; TONBUL, S. Hydrographic analysis of Iluh River (Batman) in relation to flood and torrent events. **Procedia Social and Behavioral Sciences**. The 2nd International Geography Symposium GEOMED 2010, v.19, p.537-546, 2011. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com>. Acesso em: 18 jul. 2019.

TRAORE, V. B.; SAMBOU, S.; TAMBA, S.; FALL, S.; DIAW, A. T.; CISSE, M. T. Calibrating the Rainfall-Runoff Model GR4J and GR2M on the Koulountou River Basin, a Tributary of the Gambia River. **American Journal of Environmental Protection**, v. 3, n. 1, 20, p. 36-44, 2014.

TUCCI, C.E.M. **Modelos hidrológicos**. Porto Alegre: ABRH/Ed.; UFRGS, 1998. 668P.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia**: ciência e aplicação. 4 ed. Porto Alegre: UFRGS Editora, 2012

_____. Histórico do desenvolvimento dos modelos hidrológicos. 2010a. Disponível em: <http://rhama.com.br/blog/index.php/sem-categoria/historico-do-desenvolvimento-dos-modelos-hidrologicos/>. Acesso em: 23 jan. 2019.

_____. **Modelos Hidrológicos**. 2 ed. Porto Alegre: UFRGS Editora; ABRH., 2005.

USACE. **HEC-ResSim Reservoir System Simulation**: User's Manual. Version 3.1. United States Army Corps of Engineers – USACE. Hydrologic Engineering Center – HEC. Davis, California, EUA, 2013. 556p.

VAN LIEW, M. W; VEITH, T.L.; ARNOLD, J.G. Suitability of SWAT for the Conservation Effects Assessment Project: Comparison on USDA Agricultural Research Service Watersheds. **Journal Of Hydrologic Engineering**, v. 12, n. 2, p.173-189, 2007.

WURBS, R. Reservoir-System Simulation and Optimization Models, **Journal of Water Resources Planning and Management**, ASCE, v.119, n.4, p.455-472, 1993.

YARRAKULA, K.; DEB, D.; SAMANTA, B. Hydrodynamic modeling of Subernarekha River and its floodplain using remote sensing and GIS techniques. **Journal of Scientific & Industrial Research**, v.69, p.529-536, 2010. Disponível em: <http://nopr.niscair.res.in/handle/123456789/9856>. Acesso em: 18 jul. 2019.

ZAPPA, M. **Multiple-response verification of a distributed hydrological model at different spatial scales**. Zurich: Swiss Federal Institute of Technology, 2002. 167p. P.hD. Thesis.

ANEXO A – Inundação Caruaru 2017

Figura 1 – Inundação na cidade de Caruaru em 29/05/2017.



Fonte: G1.globo.com, 2017.

Figura 2 – Passagens molhadas tomadas pelas águas em 29/05/2017.



Fonte: Mário Flávio/ G1 Caruaru, 2017.

Figura 3 – Áreas inundadas pelo transbordamento do Riacho do Mocó em 30/05/2017.



Infográfico elaborado em: 05/06/2017

Fonte: G1.globo.com, 2017.

Figura 4 – Inundação na cidade de Caruaru em 29/05/2017.



Fonte: TV Asa Branca, 2017.