

# PROJETO DE PESQUISA APLICADA

APERFEIÇOAMENTO DE FERRAMENTAS ESTADUAIS DE GESTÃO  
DE RECURSOS HÍDRICOS NO ÂMBITO DO PROGESTÃO

## Relatório Institucional

*Modelo de previsão de cheias e determinação de áreas alagáveis na  
bacia hidrográfica do rio Paraíba do Meio no estado de Alagoas*

**Autor(es):** Fabiana Carnaúba Medeiros e Anne Caroline Negrão  
**Área temática:** Gestão de eventos críticos

---

## RESUMO

A Secretaria de Estado do Meio Ambiente e dos Recursos Hídricos de Alagoas (Semarh/AL), através da sua Sala de Alerta, está buscando alternativas para o desenvolvimento de um sistema de previsão hidrometeorológica eficaz, visando a previsão de vazões extremas na bacia hidrográfica do rio Paraíba do Meio. A região em estudo está localizada entre os estados de Pernambuco e Alagoas e apresenta um histórico de inundações recorrentes, em torno de 10 a 12 anos de tempo de retorno. O último evento significativo na região, ocorreu no mês de junho de 2010 e causou diversos transtornos para a população ribeirinha dos municípios da bacia do rio Paraíba do Meio e de outras bacias hidrográficas do estado, assim como, diversas mortes e destruição parcial e total de várias moradias ao longo do rio principal e de seus afluentes. Este trabalho de pesquisa pertence ao projeto “Aperfeiçoamento de Ferramentas Estaduais de Gestão de Recursos Hídricos no Âmbito do Progestão”, desenvolvido pela parceria da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) com o Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA), e teve como objetivo principal o desenvolvimento de um modelo de previsão de cheias e determinação de áreas alagáveis na bacia hidrográfica do rio Paraíba do Meio. Para isso, optou-se por utilizar a rede hidrometeorológica da ANA em escala horária, além de outras fontes de dados, e uma combinação dos modelos hidrológico HEC-HMS e hidrodinâmico HEC-RAS.

## ÍNDICE

### RESUMO

<b>INTRODUÇÃO</b> .....	4
<b>OBJETIVOS</b> .....	6
<b>1. REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	7
1.1. Eventos de inundação e modelagem hidráulico-hidrológica .....	7
1.2. Caracterização da bacia hidrográfica .....	9
<b>2. METODOLOGIA</b> .....	11
2.1. Levantamento de informações .....	11
2.2. Processamento dos dados .....	16
2.2.1. Dados fluviométricos .....	16
2.2.2. Dados pluviométricos .....	17
2.2.3. Hietogramas de projeto .....	17
2.3. Modelagem hidrológica .....	17
2.3.1. Extração de informações geoespaciais .....	18
2.3.2. Estruturação do modelo hidrológico .....	19
2.4. Modelagem hidrodinâmica .....	28
<b>3. RESULTADOS OBTIDOS E DISCUSSÃO</b> .....	31
3.1. Levantamento e processamento das informações .....	31
3.1.1. Ajuste de curva-chave .....	31
3.1.2. Consistência dos eventos extremos .....	36
3.1.3. Hietogramas de projeto .....	36
3.2. Modelagem hidrológica .....	37
3.3. Modelagem hidrodinâmica .....	49
<b>4. SUGESTÃO DE APERFEIÇOAMENTO</b> .....	58
<b>5. CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	60
<b>AGRADECIMENTOS</b> .....	61
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	61
APÊNDICE A – Expedição de campo na bacia do rio Paraíba do Meio .....	64
APÊNDICE B – Manual do Modelo Operacional .....	73

## INTRODUÇÃO

O estado de Alagoas apresenta um histórico de cheias e inundações em regiões ribeirinhas, que causaram ao longo dos últimos anos muitos prejuízos materiais e diversas mortes. De acordo com estudos feitos sobre as inundações no estado, pode-se observar que estes eventos extremos são recorrentes, tendo em média um período de 10 a 15 anos de tempo de retorno, e com o passar do tempo estão se tornando mais frequentes e destrutivos.

O último grande evento extremo de precipitação ocorrido na a região Nordeste do Brasil foi registrado no mês de junho de 2010. Uma anomalia climática, que apresentou um volume inesperado de chuvas, impactou diversos municípios da região. Durante a ocorrência deste evento, as bacias hidrográficas dos estados de Pernambuco e Alagoas tiveram os seus níveis históricos de precipitação e vazão superados devido à constante chuva que foi observada em suas cabeceiras, o que provocou uma elevação rápida da lâmina d'água dos rios e, conseqüentemente, apresentou o extravasamento dos seus leitos, levando a inundações de diversos municípios localizados ao longo das bacias hidrográficas dos rios Paraíba do Meio, Mundaú e Una/Jacuípe (OLIVEIRA et al., 2014).

Após esse evento extremo de 2010, a Sala de Alerta de Alagoas foi criada em uma parceria entre a Semarh-AL, através dos técnicos do até então Centro Estadual de Meteorologia (Diretoria de Meteorologia) e a ANA. Aos poucos, os produtos da Sala de Alerta e seus técnicos foram se aperfeiçoando, tendo melhorias principalmente na rede de monitoramento hidrometeorológico dos estados de Alagoas e Pernambuco, devido à instalação de estações telemétricas em locais estratégicos. Além disso, foram aprovados vários projetos de pesquisa em parceria com a ANA e com outras instituições, visando o aprimoramento dos produtos ligados ao tempo, clima e recursos hídricos no estado de Alagoas.

A Sala de Alerta da Semarh-AL é responsável pelo monitoramento do tempo e clima no estado de Alagoas, assim como pela disseminação de boletins informativos sobre eventos extremos no estado, especialmente para a Defesa Civil Estadual, que por sua vez, distribui para as Defesas Civis Municipais. Atualmente, a Sala de Alerta conta com seis técnicos contratados com recursos do programa Progestão (quatro bolsistas e dois contratados) para realizarem o monitoramento das principais bacias hidrográficas com histórico de inundações no estado de Alagoas.

Apesar de a Sala de Alerta já contar com plantões durante a quadra chuvosa, recepção de informações da rede hidrometeorológica em tempo real, realização de previsões meteorológicas e análises dos dados observacionais para a tomada de decisão, ainda não possui um sistema automatizado e confiável de previsão de vazão através de modelagem computacional de eventos extremos. Tal sistema pode auxiliar a equipe técnica do estado na identificação antecipada de eventos extremos e áreas com risco de inundações, possibilitando assim, o alerta em tempo hábil para a ação da Defesa Civil quando necessário.

Para os estados que iniciaram o 2º ciclo do Progestão, a ANA, em parceria com o Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA), vem desenvolvendo o projeto de pesquisa aplicada intitulado "Aperfeiçoamento de Ferramentas Estaduais de Gestão de Recursos Hídricos no Âmbito do Progestão", que tem como principal objetivo desenvolver ou aperfeiçoar ferramentas inovadoras que promovam a melhoria das atividades voltadas à gestão estadual dos recursos hídricos. Nesse projeto, o estado de Alagoas selecionou o tema "Gestão de eventos críticos" com o objetivo de desenvolver um modelo de previsão de cheias e determinação de áreas alagáveis na bacia hidrográfica do rio Paraíba do Meio. Essa ferramenta irá auxiliar na estruturação de um sistema de previsão e na melhoria da prevenção dos efeitos causados por eventos extremos de inundação na bacia.

A bacia hidrográfica do rio Paraíba do Meio, região em estudo neste trabalho, é historicamente uma das bacias hidrográficas mais problemáticas dentro do estado de Alagoas, pois apresenta ao longo das suas margens, municípios com diversas moradias vulneráveis a inundações. Com o desenvolvimento e operacionalização do sistema proposto, a equipe técnica da Semarh-AL poderá replicar a modelagem para outras bacias hidrográficas do estado que também tenham registros de inundações severas e emitir os alertas com a maior antecedência possível.

Para a realização das modelagens hidrológicas e hidráulicas foram propostos os softwares desenvolvidos pelo Centro de Engenharia Hidrológica (*Hydrologic Engineering Center - HEC*) do Corpo de Engenharia do Exército Norte Americano (USACE), que são gratuitos, fornecem resultados confiáveis, têm boa integração com outros sistemas, são simples de aplicar e são reconhecidos pelos profissionais da área. O HEC-HMS (*Hydrologic Modeling System*) será utilizado como modelo hidrológico e o HEC-RAS (*River Analysis System*) como modelo hidráulico (USACE, 2019).

Espera-se que este trabalho incentive a integração entre os gestores de recursos hídricos, as Defesas Civis Estadual e Municipais, e demais profissionais relacionados com a gestão de eventos críticos de previsão e vazão, para o aprimoramento do sistema de alerta, que facilitará a disseminação dos resultados e consequentemente a prevenção de mortes e destruição, causados por inundações e eventos severos de precipitação.

## OBJETIVOS

O objetivo finalístico desta pesquisa foi propor um modelo de previsão de cheias e determinação de áreas alagáveis na bacia hidrográfica do rio Paraíba do Meio, no estado de Alagoas. Para isso, buscou-se atingir os seguintes objetivos específicos, previstos no edital de lançamento do projeto:

- Estudo e consolidação de dados e informações existentes, incluindo chuvas, níveis d'água, vazões, geometria de calha fluvial, e previsões de chuvas disponíveis;
- Modelagem matemática chuva-vazão e propagação de vazão na calha de rios, com a utilização dos modelos: Modelo de Grandes Bacias – MGB-IPH, HEC-HMS e HEC-RAS, que permitam trabalhar com previsão de chuvas para entrada no modelo chuva-vazão e a realização de previsões probabilísticas;
- Montagem de um sistema para análise de dados, modelagem matemática e previsão de vazão, com a utilização de softwares gratuitos (não serão adquiridos softwares pagos para esta bolsa), com vistas à implantação pela Secretaria de Estado do Meio Ambiente e dos Recursos Hídricos - Semarh de um sistema de previsão e alerta precoce a inundações na bacia do rio Paraíba do Meio;
- Elaboração de mapas com manchas de inundação na bacia do rio Paraíba do Meio;
- Verificar a rede de monitoramento hidrometeorológico existente e, se necessário, sugerir aperfeiçoamentos para a aquisição de dados com vistas a atender o sistema de previsão.

## 1. REFERENCIAL TEÓRICO

### 1.1. Eventos de inundação e modelagem hidráulico-hidrológica

Desastres naturais ocorrem com grande frequência em todo o mundo. Segundo Tucci (2009), 50% das ocorrências são devido às cheias. O Brasil encontra-se entre os países do mundo mais atingidos por inundações e enchentes, tendo registrado 94 desastres cadastrados na *Emergency Disasters Data Base* (EM-DAT) no período de 1960 a 2008, com 5.720 mortes e mais de 15 milhões de pessoas afetadas, entre desabrigados e/ou desalojados (TOMINAGA *et al.*, 2009). No Atlas Brasileiro de Desastres Naturais, disponibilizados pelo Centro Nacional de Gerenciamento de Riscos e Desastres (BRASIL, 2012), são constatadas no período de 1991 a 2010, as ocorrências de 6.771 desastres naturais causados por inundação brusca e alagamento e 3.673 registros de inundação gradual (enchente) (OLIVEIRA *et al.*, 2014).

As cidades brasileiras apresentam rápido processo de expansão urbana dado às elevadas taxas de crescimento populacional e migração rural-urbana, quando comparadas com países desenvolvidos. MAKTAV (2005) indicou que o crescimento não controlado da população e a urbanização rápida, especialmente em países em desenvolvimento como o Brasil, têm grande impacto no meio ambiente. Considerando que muitas atividades de uso da terra podem resultar em mudanças irreversíveis, é necessário que as necessidades das futuras gerações sejam consideradas (ALVES *et al.*, 2009).

Segundo Rozalis *et al.* (2010), as cheias repentinas são consideradas um perigo natural grave e tiveram impactos significativos sobre o homem ao longo da história. Elas podem destruir infraestruturas, causar deslizamentos de terra, danos à agropecuária, e ferimentos ou mortes da população. As cheias repentinas geralmente são geradas por eventos extremos de precipitação, associados com tempestades convectivas e alta intensidade de chuva, que geram escoamentos superficiais de grandes volumes e velocidades.

De acordo com LOU (2010), um dos principais entraves na prevenção de mortes devido aos eventos extremos é o curto período existente para a remoção da população localizada nas áreas de risco. Nesse contexto, a modelação matemática surge como importante ferramenta de apoio à decisão, por sua capacidade de fornecer respostas sistêmicas para cenários diversos, em um exercício de predição e antecipação de efeitos resultantes de possíveis medidas de projeto.

As medidas de controle de inundação são de grande utilidade e podem evitar muitas perdas. Com isso, o zoneamento das áreas de risco de inundação torna-se um instrumento importante no controle de inundações e deve ser utilizado pelos gestores municipais, dentro do Planejamento Urbano e dessa forma gerenciando as enchentes e evitando perdas sociais, ambientais e econômicas. Estes elementos devem estar contidos no Plano Diretor da Cidade, pois a ordenação do processo do uso e ocupação do solo urbano é uma atividade de competência municipal (DA HORA, 2009).

Os modelos hidráulicos e hidrológicos são construídos a partir de abordagens físicas dos processos hidrológicos utilizando-se das equações da conservação da massa e da quantidade de movimento em sua forma completa ou simplificada (SANTOS, 2009). A modelagem de bacias hidrográficas deve ser uma ferramenta essencial para reaprender a viver com rios e mudanças fluviais, aceitando e compreendendo processos de várzea e o ambiente em que as sociedades escolhem viver. Além disso, os geomorfólogos fluviais devem abordar a mitigação do risco de inundação com uma melhor compreensão das inter-relações entre a mudança de uso da terra em planícies aluviais e os efeitos das mudanças climáticas nas inundações. Assim, é necessário compreender melhor os processos fluviais, incentivando a colaboração multidisciplinar entre geomorfólogos e hidrologistas, engenheiros hidráulicos, hidrogeólogos, ecologistas e outros profissionais e, portanto, desenvolver modelos de captação integrados baseados numa filosofia de "sistema aberto" para melhor combinar modelos físicos e as necessidades e preferências locais (SAMUELS, 2005).

Existem diversos softwares, comerciais e não comerciais, desenvolvidos com base em conceitos físicos ou empíricos visando a modelagem hidráulica-hidrológica. O *Hydrologic Engineering Center* (HEC) da *U.S. Army Corps of Engineers* (USACE) vem desenvolvendo e aperfeiçoando softwares voltados à engenharia hidrológica e planejamento desde 1964. Devido a sua disponibilização gratuita e bem documentada, esses softwares vêm sendo amplamente utilizados tanto no ambiente acadêmico como no empresarial.

Entre os modelos disponíveis, o *Hydrologic Modeling System* (HEC-HMS) busca representar todos os processos hidrológicos com base em equações físicas. O modelo hidrológico assume que a bacia hidrográfica é constituída por grupos de sub-bacias nas quais os processos hidrológicos são calculados considerando parâmetros que refletem as características e condições médias da região. Estes processos são, sequencialmente: precipitação; interceptação; infiltração; escoamento superficial na área de drenagem e; propagação da onda de cheia na rede hidrográfica. Para cada processo existem variadas metodologias de cálculo que podem ser selecionadas e configuradas dependendo da disponibilidade de informações.

Os resultados finais do processo de simulação são os hidrogramas de cheia nas seções de referência das sub-bacias e no exutório da bacia hidrográfica de estudo (U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS, 2010). Para o processamento de entradas geoespaciais utilizadas pelo HEC-HMS, tais como a rede de drenagem e a delimitação de sub-bacias, o *Geospatial Hydrologic Modeling Extension* (HEC-GeoHMS) permite o processamento de informações geográficas com base na extensão *Spatial Analyst* do ArcGIS-ESRI.

O *River Analysis System* (HEC-RAS) é um dos modelos hidráulicos mais populares para a delimitação das zonas inundáveis fluviais. Ele permite simular escoamento em superfície livre em regime permanente e não-permanente tanto na escala unidimensional (1D) como bidimensional (2D). Também é possível realizar simulações de transporte de sedimentos e qualidade d'água (U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS, 2008).



Para preparar as entradas tanto do HEC-HMS como do HEC-RAS, o *Data Storage System* (HEC-DSS) é um sistema de banco de dados que permite organizar e analisar de forma eficiente todos os dados utilizados pelos modelos através da sua interface gráfica HEC-DSSVue, baseada em Java.

Diversos autores estão utilizando um sistema de monitoramento de cheias com a integração dos modelos HEC-HMS e HEC-RAS. A exemplo de MULONGO (2012), que estudou as inundações da bacia hidrográfica do Campus da UFSC. Houve uma enchente em 1995 nesta região, trazendo grandes prejuízos para a população, onde casas foram inundadas e atividades universitárias e hospitalares foram interrompidas. Com isso houve uma necessidade de acompanhar as mudanças que ocorreram nos últimos anos, além da necessidade de estarem preparados para outros eventos. O HEC-HMS foi utilizado para determinar a vazão a partir de dados pluviométricos para vários períodos de retorno. O HEC-RAS para determinar o nível d'água. Uma das metas era poder definir um sistema de suporte a decisão que pudesse ser usado juntamente com a Defesa Civil. No final, o sistema construído se mostrou simples para o uso em ações preventivas (SANTOS, 2015). O Sistema de Alerta de Eventos Críticos (SACE) da CPRM pretende implementar os modelos HEC nas suas bacias hidrográfica, que atualmente são monitoradas com base em dados observacionais e modelos empíricos simples.

## 1.2. Caracterização da bacia hidrográfica

MEDEIROS (2017) escreveu que, os estados de Alagoas e Pernambuco apresentaram nas últimas décadas ciclos regulares de enchentes com várias mortes, destruição de parte de cidades, arrasando patrimônios públicos e privados. A primeira grande cheia que se tem registro em Alagoas é datada de 19 de maio de 1949, no município de São José da Laje, região da Zona da Mata Alagoana. Segundos relatos, choveu ininterruptamente durante quase 36 horas (G1 Notícias, 2013). De acordo com estudos sobre as inundações no estado, pode-se observar que estes eventos extremos são recorrentes, tendo tempo de retorno entre 10 a 12 anos, e com o passar do tempo estão se tornando mais frequentes e destrutivos.

Segundo NASCIMENTO e XAVIER (2010), a porção Leste do Nordeste Brasileiro, onde estão inseridos os estados de Alagoas e Pernambuco, é influenciada principalmente pelos sistemas meteorológicos Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) e Ondas de Leste, a caracterizar como uma região de grande variabilidade nos seus índices pluviométricos, de acordo com dados da Semarh-AL.

O último grande evento extremo de precipitação ocorrido na região Leste do Nordeste do Brasil foi registrado no mês de junho de 2010. Uma anomalia climática, que apresentou um volume inesperado de chuvas, impactou diversos municípios da região. Durante a ocorrência desse evento, as bacias hidrográficas dos estados de Pernambuco e Alagoas tiveram os seus níveis históricos de precipitação e vazão superados. A constante chuva observada nas cabeceiras, provocou a elevação rápida da lâmina d'água dos rios e, conseqüentemente, o extravasamento dos seus leitos, levando a inundação de diversos municípios localizados ao longo das bacias hidrográficas dos rios Paraíba do Meio, Mundaú e Una/Jacuípe.

Após esse evento extremo de 2010, a Sala de Alerta de Alagoas foi criada em uma parceria entre a Semarh-AL, através do até então Centro Estadual de Meteorologia (Diretoria de Meteorologia), e a ANA. Aos poucos, os produtos da Sala de Alerta e seus técnicos foram se aperfeiçoando, tendo apresentado melhorias principalmente na rede de monitoramento hidrometeorológico dos estados de Alagoas e Pernambuco, devido à instalação de estações telemétricas em locais estratégicos. Além disso, foram aprovados vários projetos de pesquisa em parceria com a ANA e com outras instituições, visando o aprimoramento dos produtos ligados ao tempo, clima e recursos hídricos no estado de Alagoas.

## 2. METODOLOGIA

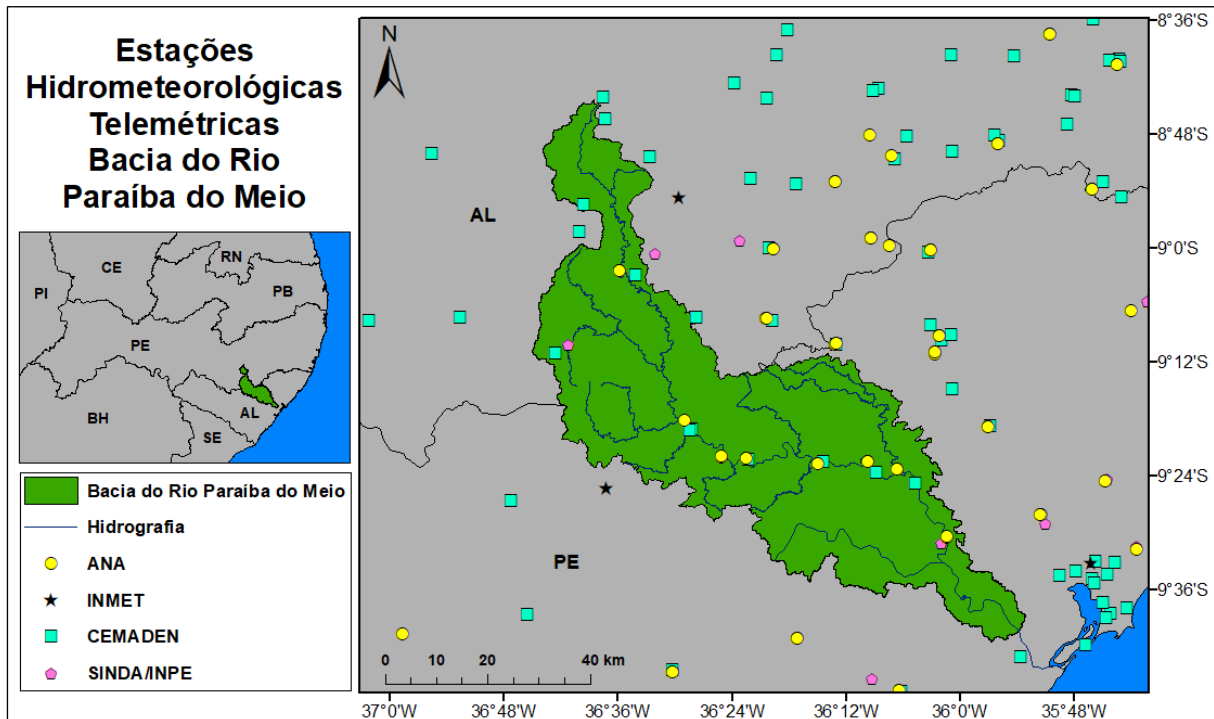
### 2.1. Levantamento de informações

Uma das principais fontes de informações utilizadas durante o projeto foi o próprio banco de dados da Semarh-AL. Outras fontes de informações também foram consultadas e os dados foram solicitados através de contatos com os órgãos responsáveis ou foram baixados, quando disponíveis, nas páginas *online*. A seguir as fontes consultadas:

- ANA: dados diários de precipitação e cota e, quando disponíveis, os dados de vazão, resumo de descarga, perfil longitudinal e curva de descarga, foram baixados através do Hidroweb;
- ANA: dados de precipitação, cota e vazão de estações telemétricas foram baixados através do Gestor PCD;
- CEMADEN: dados de precipitação horária e a cada 10 minutos das estações pluviométricas e dados horários de nível das estações hidrológicas foram baixados através do Mapa Interativo;
- INMET: dados meteorológicos horários extraídos do SIM/INMET foram recebidos via correios em CD, após solicitação através do contato com Cristina Costa ([cristina.costa@inmet.gov.br](mailto:cristina.costa@inmet.gov.br)). As variáveis são: temperatura do ar, umidade relativa do ar, temperatura do ponto de orvalho, temperatura máxima, temperatura mínima, temperatura máxima do ponto de orvalho, temperatura mínima do ponto de orvalho, umidade relativa máxima do ar, umidade relativa mínima do ar, pressão atmosférica, vento velocidade, direção do vento, radiação global, precipitação, vento, rajada máxima, pressão atmosférica máxima, pressão atmosférica mínima;
- INPE/SINDA: dados horários ou a cada 3 horas de PCDs, recebidos via ftp através do contato com Décio Freire dos Reis ([decio.reis@crn.inpe.br](mailto:decio.reis@crn.inpe.br)). As variáveis são: bateria; corrente do painel solar; pluviometria; temperatura interna; pressão interna; umidade interna; temperatura da água; condutividade; oxigênio dissolvido; pH; salinidade; direção da velocidade máxima do vento; direção do vento; pressão atmosférica; radiação solar; temperatura do ar; umidade do solo; umidade relativa; temperatura do solo; velocidade do vento; velocidade do vento máxima; temperatura do ar máxima; temperatura do ar mínima.
- APAC: dados hidrometeorológicos do estado de Pernambuco, recebido via e-mail. Contato: Josafá Gomes - Gerência de Meteorologia e Mudanças Climáticas ([gmmc@apac.pe.gov.br](mailto:gmmc@apac.pe.gov.br));
- Xavier *et al.* (2016): dados meteorológicos para todo o Brasil, disponibilizados *online* em formato grid (0,25 x 0,25°) e escala diária para o período de 1980 a 2017.

Na Figura 1 são apresentadas todas as estações hidrometeorológicas telemétricas em operação que foram levantadas.

Figura 1. Localização das estações hidrometeorológicas telemétricas em operação levantadas



Visando à estruturação de um Sistema de Alerta, optou-se por utilizar os dados das estações sob responsabilidade da ANA e do INMET, especialmente as estações telemétricas, devido a facilidade de acesso aos dados em tempo real. As estações das demais instituições foram utilizadas apenas como base no processo de consistência de dados. Na Figura 2 são apresentadas as estações telemétricas utilizadas e na Tabela 1 é apresentado o inventário com as principais informações sobre essas estações.

Figura 2. Localização das estações utilizadas para a estruturação do Sistema de Alerta

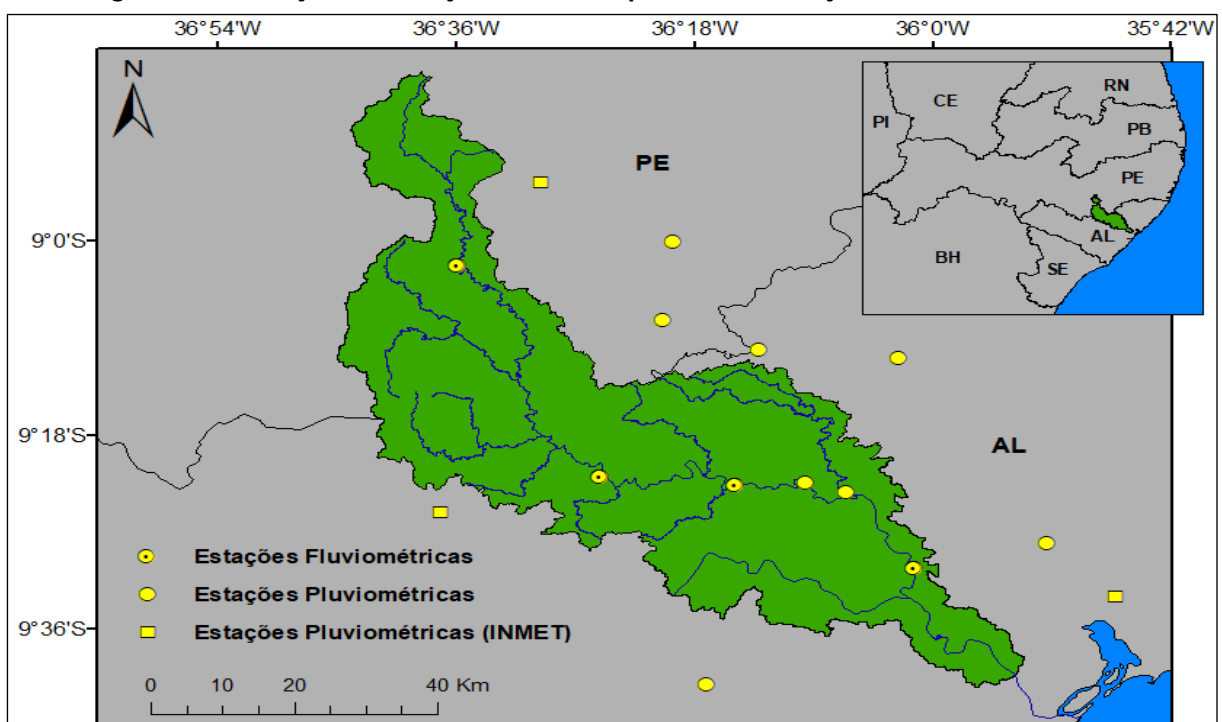


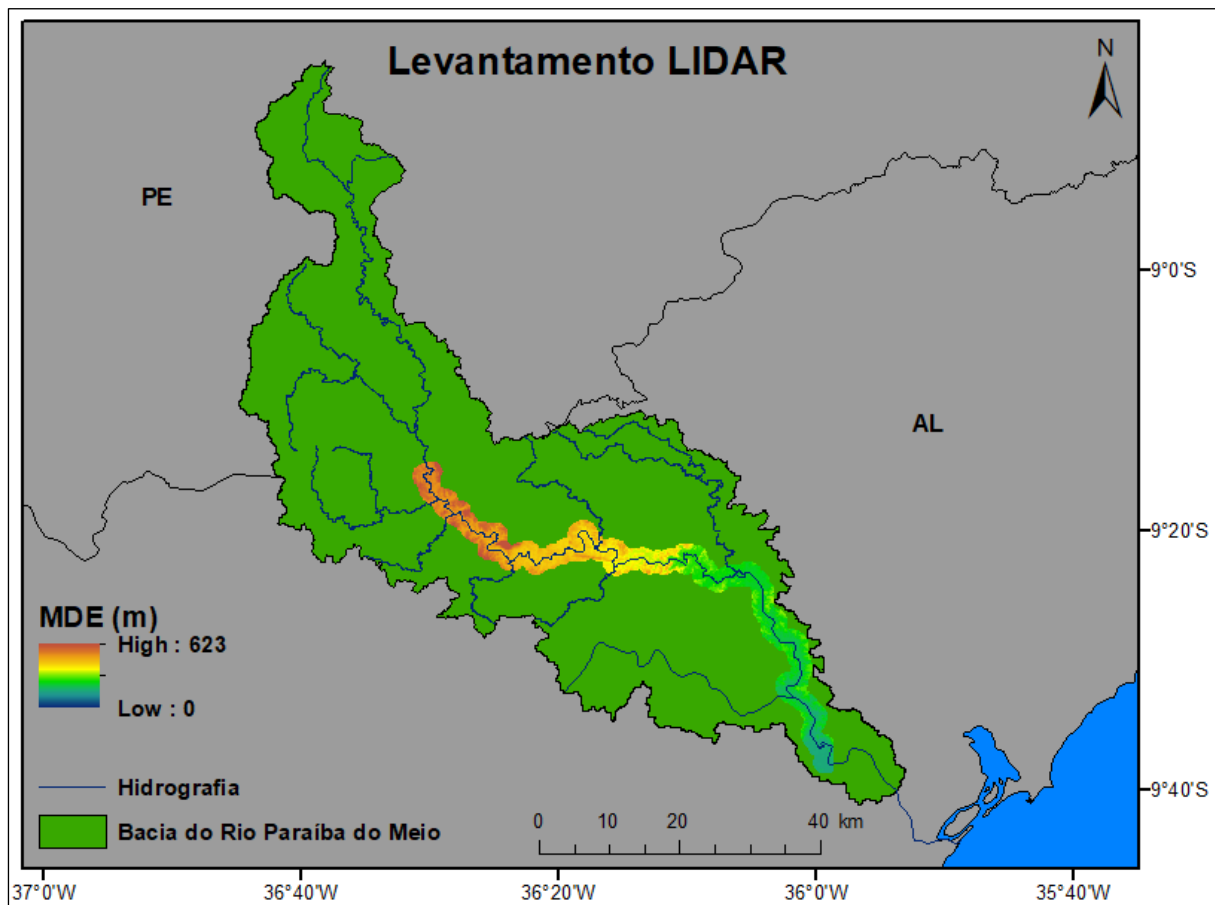
Tabela 1. Inventário das estações telemétricas utilizadas na estruturação do Sistema de Alerta

Código Pluviometria	Código Fluviometria	Nome	Rio	Responsável	Latitude	Longitude
935004/A303	-	MACEIO	-	INMET	-9.5512	-35.7702
936035/A327	-	PALMEIRA DOS ÍNDIOS	-	INMET	-9.4203	-36.6204
836040/A322	-	GARANHUNS	-	INMET	-8.9109	-36.4934
936120	39689000	CORRENTES II	RIO MUNDAÚ	ANA/CPRM	-9.1233	-36.3406
936114	39700000	SANTANA DO MUNDAÚ	RIO MUNDAÚ	ANA/CPRM	-9.1689	-36.2197
936117	39715000	PALMEIRINA	RIO INHUMAS	ANA/CPRM	-9.0019	-36.3264
936113	39740000	UNIÃO DOS PALMARES	RIO MUNDAÚ	ANA/CPRM	-9.1544	-36.0358
936127	39745000	USINA LAGINHA	RIO MUNDAÚ	ANA/CPRM	-9.1831	-36.0436
935012	39760000	MURICI - PONTE	RIO MUNDAÚ	ANA/CPRM	-9.3136	-35.9497
935056	39770000	FAZENDA BOA FORTUNA	RIO MUNDAÚ	ANA/CPRM	-9.4675	-35.8564
936119	39800000	BREJÃO	RIACHO SECO	ANA/CPRM	-9.0394	-36.5983
936121	39852000	VILA SÃO FRANCISCO	RIO PARAÍBA	ANA/CPRM	-9.3664	-36.4194
936123	39855000	PAULO JACINTO	RIO PARAÍBA	SEMARH-AL	-9.3686	-36.3747
936111	39860000	VIÇOSA	RIO PARAÍBA	ANA/CPRM	-9.3792	-36.2492
936122	39863000	CAJUEIRO	RIO PARAÍBA	SEMARH-AL	-9.3756	-36.1608
936124	39866000	CAPELA	RIO PARAIBINHA	SEMARH-AL	-9.3889	-36.1100
936110	39870000	ATALAIA	RIO PARAÍBA	ANA/CPRM	-9.5072	-36.0233
936125	39950000	FAZENDA SÃO PEDRO	RIO SÃO MIGUEL	ANA/CPRM	-9.6858	-36.2853

A Semarh-AL também disponibilizou um conjunto de imagens de aerofotogrametria a laser (sistema LIDAR) que cobrem o rio Paraíba do Meio e o rio Mundaú dentro do estado de Alagoas. O levantamento apresenta uma largura de faixa de 1,5 km, com escala de 1:2.000.

Na Figura 3 é apresentada a cobertura do Modelo Numérico de Superfície (MNS) sobre o rio Paraíba do Meio. O MNS também vem acompanhado de ortofotos de alta resolução (0,25 x 0,25 m) em formatos ECW e GeoTiff. O rastreamento das imagens foi realizado nos anos 2012 e 2013 e são divididas em duas partes: área urbana e rio principal. A partir dessas informações foram obtidos os Modelos Digitais de Elevação (MDE), com resolução de célula de 0,5 x 0,5 m, para serem utilizados na modelagem hidráulica dos municípios de interesse.

Figura 3. Área coberta pelo aerolevanteamento a laser sobre o rio Paraíba do Meio



O Modelo Digital de Elevação (MDE) utilizado no modelo hidrológico foi obtido através do projeto Topodata do INPE, no qual disponibiliza dados geomorfológicos locais provenientes do SRTM/USACE e que passaram por processos de aprimoramento (VALERIANO, 2008). Através do site do Topodata INPE (<http://www.dsr.inpe.br/topodata/>), foram baixados os arquivos de altitude (ZN) em GeoTiff 32 bits das folhas de prefixo: “09S36\_”; “09S375”; e “08S375”.

Essas folhas passaram pelo processo de mozaicagem e foram projetadas para o Datum WGS 1984 com sistema de coordenadas UTM 24S, gerando um MDE com 30 m de tamanho de célula, que cobre a bacia do rio Paraíba do Meio. Posteriormente, esse MDE foi recortado considerando o contorno da bacia.

O contorno da bacia, assim como a hidrografia, foi obtido através da Base Hidrográfica Ottocodificada da ANA (ANA, 2015), disponibilizada no Portal de Metadados Geoespaciais da ANA. Na Figura 4 é apresentado o MDE utilizado na modelagem hidrológica e o contorno da bacia considerado.

Também no Metadados da ANA foi obtido o mapa ottocodificado de CN, utilizado para representar as características do solo na modelagem hidrológica. Esse mapa foi baseado no mapa de cobertura e uso do solo do IBGE de resolução de 1 km e para o ano de 2014; no mapa pedológico do ano de 2017; e nas classes hidrológicas dos solos brasileiros de Sartori *et al.*

(2005). Na Figura 5 é apresentado o recorte da bacia do Paraíba do Meio do mapa de *Curve Number* utilizado, considerando 15 classes.

Figura 4. MDE utilizado na modelagem hidrológica da bacia do rio Paraíba do Meio

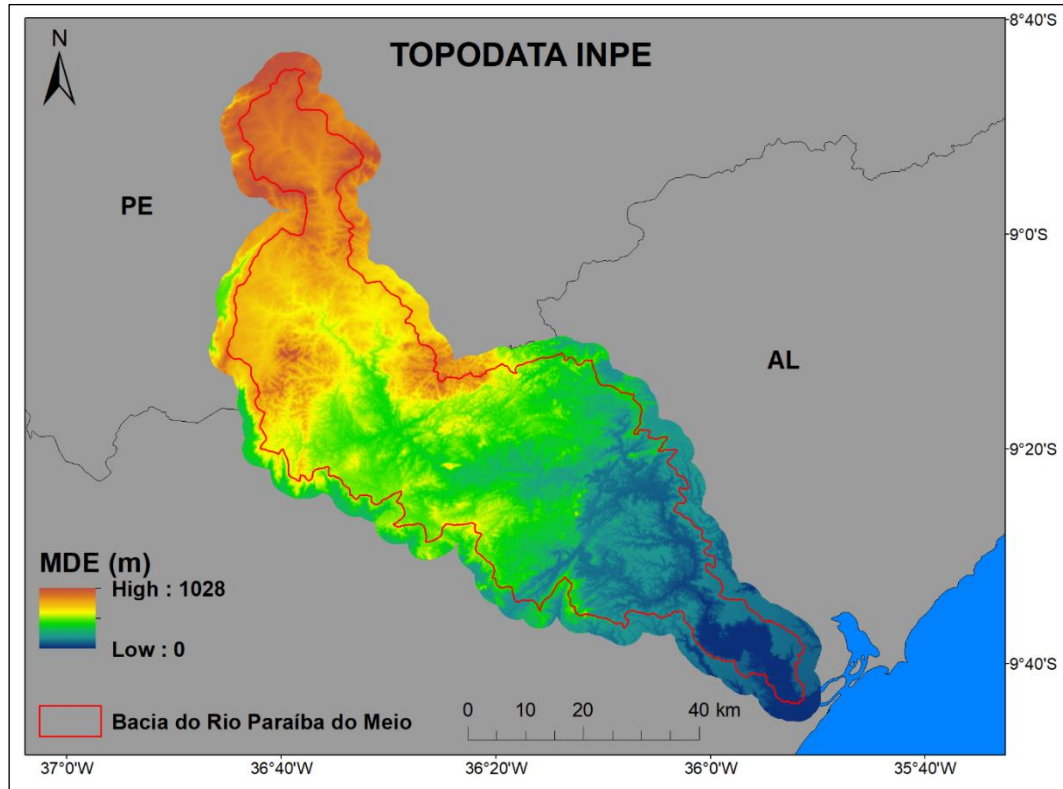
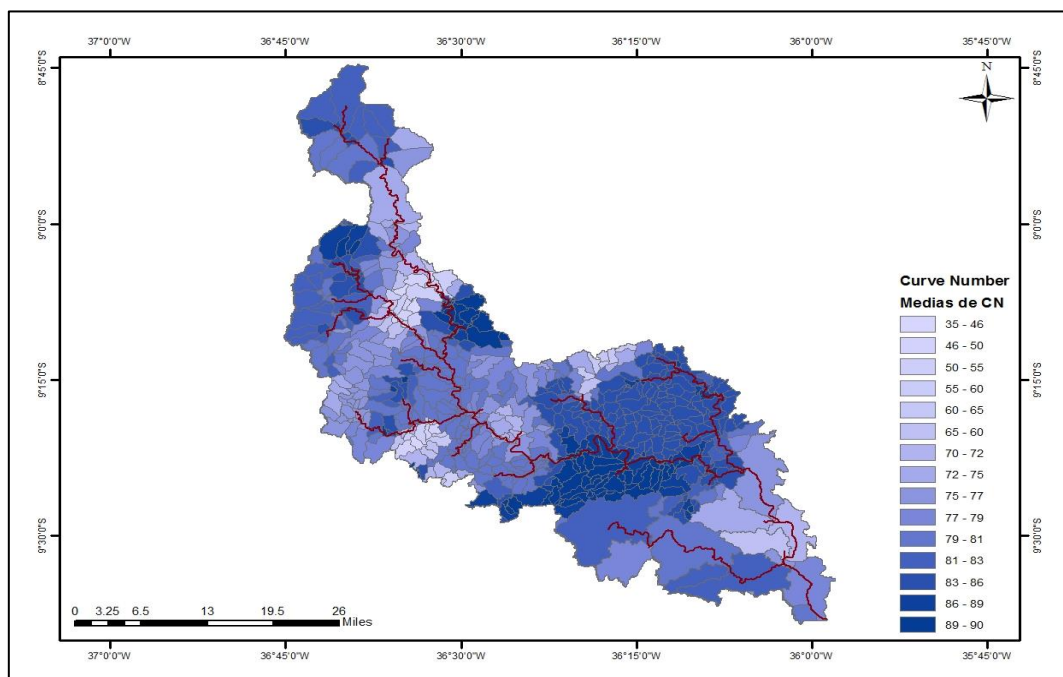


Figura 5. Mapa com coeficientes de Curve Number



Visando complementar as informações sobre a bacia hidrográfica e melhor compreender a problemática das inundações nos municípios ribeirinhos, uma Expedição de Campo foi realizada pela bacia do rio Paraíba do Meio. Esse trabalho inicial está descrito no Apêndice A

e foi apresentado em formato pôster durante o XXIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos (NEGRÃO *et al.*, 2019).

## 2.2. Processamento dos dados

### 2.2.1. Dados fluviométricos

Os dados das estações fluviométricas convencionais da ANA, obtidos através do Hidroweb, tais como: cota, vazão, perfil longitudinal, medição de descarga líquida, histórico da estação e curva de descarga, foram organizadas para cada estação em planilhas Excel. Para facilitar a análise visual, essas informações foram representadas em gráficos de cotagramas, hidrogramas, perfis longitudinais e relação cota-vazão (curvas-chave). Dessa forma, uma análise de consistência visual das séries histórica foi realizada, buscando-se erros bruscos e seguindo orientações de ANA (2012). Com isso, identificou-se inconsistências nas curvas de descargas, principalmente em Atalaia, confirmadas com a publicação de Carvalho *et al.* (2018).

Portanto, uma análise mais profunda das curvas de descargas foi necessária e novas curvas foram propostas. O ajuste das curvas propostas se baseou nas técnicas descritas por Jaccon e Cudo (1989) e levou em consideração características tanto das curvas brutas como das consistidas. Foram utilizadas medições de descarga realizadas até 2018, o que atualizou o ajuste da curva, uma vez que as curvas consistidas disponíveis no banco de dados consideravam medições até 2014 apenas. A extrapolação superior das curvas foi baseada nos métodos de extrapolação: Área x Velocidade; Stevens (Chézy); Stevens (Manning); Manning e Declividade-Conveyance, que consideram características geométricas e hidráulicas das seções (RANTZ *et al.* 1982), obtidas através do perfil longitudinal da estação.

Os dados de cota e vazão das estações telemétricas foram obtidos através do Gestor PCD. Com auxílio de programas, desenvolvidos para esse fim, obteve-se a média dos dados em intervalos horários, diários, mensais e anuais. Esses dados foram analisados visualmente através de cotagramas e hidrogramas e comparados com os dados das estações convencionais de mesma localização ou próximas. Observou-se que as vazões disponibilizadas pelo Gestor PCD, provavelmente, utilizam a curva de descarga bruta das estações convencionais. Como foram propostas novas curvas, as vazões precisaram ser recalculadas. Para isso, os dados de cota da estação telemétrica devem estar alinhados com os dados de cota da estação convencional correspondente, permitindo, assim, a utilização da mesma curva de descarga para o cálculo da vazão. Dessa forma, quando necessário, a diferença entre a cota medida na régua e a cota medida pelo sensor (*offset*) foi subtraída, ou somada, aos dados telemétricos.

Em seguida, foi realizada a consistência das cotas telemétricas para os eventos de interesse utilizando-se como referência os dados diários de cota convencional, alguns preenchimentos também foram realizados com interpolação linear. Com auxílio de uma macro, desenvolvida para esse fim, as vazões correspondentes às cotas telemétricas foram calculadas considerando as curvas-chave propostas. Finalmente, as vazões do evento de interesse foram formatadas para serem utilizadas como entrada do modelo hidrológico HEC-HMS e do modelo hidrodinâmico HEC-RAS.



### 2.2.2. Dados pluviométricos

Os dados telemétricos de chuva, obtidos através do Gestor PCD e do INMET, foram acumulados em intervalos horários, diários, mensais e anuais, com auxílio de programas, desenvolvidos para esse fim. Foi realizada uma análise visual da série de dados horários através de hietogramas plotados no Excel. Para identificar possíveis inconsistências, os dados de chuva também foram comparados com os dados de cota da mesma estação. Além disso, estações próximas também foram comparadas entre si. Para o evento de interesse, foram realizados preenchimentos, tendo-se como base as estações vizinhas. Quando as falhas eram significativas para algum determinado evento as estações foram desconsideradas na simulação.

### 2.2.3. Hietogramas de projeto

A elaboração de mapas de mancha de inundação normalmente toma como base as manchas relacionadas aos tempos de retorno de 2, 5, 10, 20, 25, 50 e 100 anos. Essas manchas são obtidas a partir de um modelo hidráulico, no qual os hidrogramas sintéticos para cada tempo de retorno são simulados. Existem duas formas de se obter esses hidrogramas sintéticos: uma delas é a partir dos dados de vazão e a outra a partir dos dados de precipitação e da transformação chuva-vazão realizada por um modelo hidrológico.

Por se tratar de uma análise estatística, é de suma importância a utilização de séries de dados longas e representativas. Devido à escassez de dados de vazão e à dificuldade em se obter uma série estacionária - uma vez que os dados de vazão estão mais sujeitos à mudança ao longo do tempo, como por exemplo construção de barragens e açudes - existe a preferência pela utilização de dados de precipitação.

A elaboração de um hietograma representativo de uma chuva de determinado tempo de retorno depende da curva intensidade, duração e frequência (curva IDF) de uma determinada região, conhecida como equação de chuvas intensas. Essa equação já foi determinada para o município de Atalaia pelo trabalho de Carvalho *et al.* (2018) e foi utilizada neste trabalho. Com base nessa equação (Equação 1) e utilizando o método dos blocos alternados, hietogramas para diferentes tempos de retorno foram construídos considerando uma chuva com intervalos horários e duração de 24h na qual:

$$I = \frac{619,712T_r^{0,2411}}{(t + 9,971)^{0,7243}} \quad (1)$$

$I$  é a intensidade da chuva em mm/h;  $T_r$  é o tempo de retorno em anos; e  $t$  é a duração da chuva em minutos.

## 2.3. Modelagem hidrológica

Para a modelagem hidrológica da bacia do rio Paraíba do Meio foi utilizado o software HEC-HMS, versão 4.3 (SCHARFFENBERG *et al.*, 2018). Diferentes métodos de cálculo disponibilizados pelo programa foram testados, buscando-se uma representação simplificada e parcimoniosa dos dados monitorados na bacia hidrográfica.

Inicialmente, as sub-bacias hidrográficas foram divididas considerando a localização das estações que possuíam medições de vazão, que são: Brejão, Vila São Francisco, Viçosa e Atalaia. Posteriormente, devido às dificuldades durante o processo de calibração, que serão discutidas nas próximas seções, a estação de Brejão foi desconsiderada da divisão de sub-bacias, restando apenas: Vila São Francisco, Viçosa e Atalaia.

Com o objetivo de gerar hidrogramas sintéticos para diferentes tempos de retorno para os demais municípios que também possuem problemas de inundação, uma outra versão foi desenvolvida para incluir as sub-bacias: Quebrangulo, Paulo Jacinto, Cajueiro e Capela. A seguir será detalhado o processo de estruturação de cada versão do modelo hidrológico.

### 2.3.1. Extração de informações geoespaciais

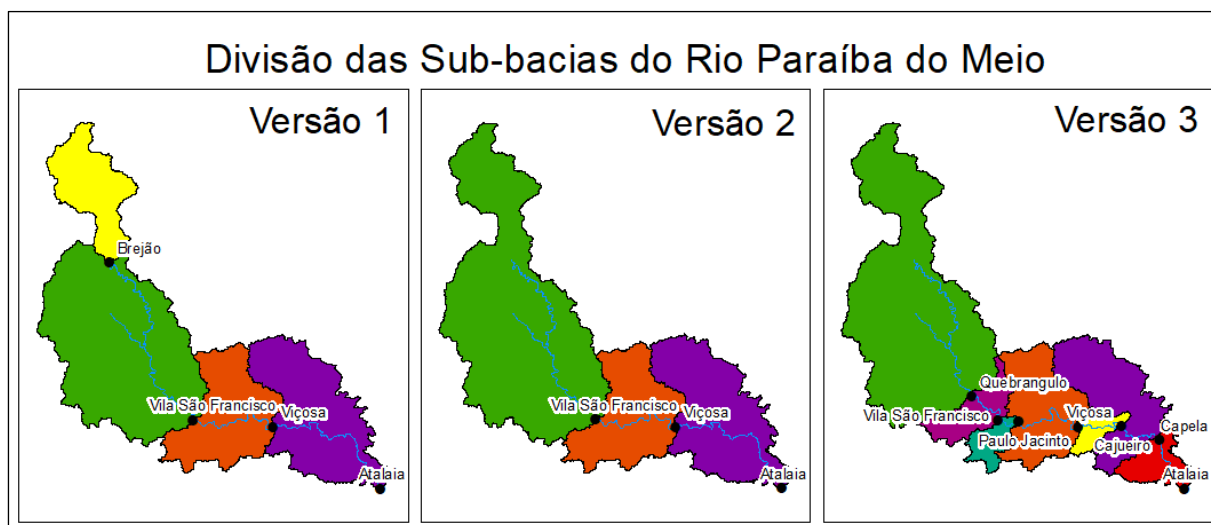
A extração de informações geoespaciais da bacia em estudo foi realizada com o auxílio do *plug-in* HEC-GeoHMS do ArcGIS (FLEMING et al., 2013). O HEC-GeoHMS foi escolhido por conveniência, porém as mesmas informações podem ser obtidas através de outros softwares. Os procedimentos no HEC-GeoHMS são intuitivos, basta seguir a ordem de cada processo e manuais disponíveis em diversas fontes (SCHARFFENBERG, 2016; FLEMING & BRAUER, 2016; FERREIRA, 2015). Porém, pode-se encontrar alguns “bugs”, relacionados à versão do ArcGIS utilizada ou ao tamanho do nome das pastas e dos arquivos do projeto, o que torna o processo exaustivo.

A partir do MDE de 30 m, obtido através do Topodata do INPE, foram extraídas as seguintes informações: direção de fluxo (*Flow Direction*), área de contribuição (*Flow Accumulation*) e drenagem (*Stream Definition*), considerando uma área de contribuição de 320 km<sup>2</sup>. A escolha de uma área extensa como limiar evitou a geração de muitas sub-bacias e facilitou os procedimentos seguintes, de união e divisão de sub-bacias.

Como exutório da bacia, utilizado para definir o domínio do projeto (*Add Project Points*), foi indicada a estação de Atalaia, por ser a estação mais a jusante do rio. Em seguida, foi realizado a união de todas as sub-bacias (*Basin Merge*) para posterior divisão (*Subbasin Divide*) considerando os pontos de interesse para cada versão do modelo, conforme apresentado na Figura 6 e descrito a seguir:

- Versão 1: Brejão, Vila São Francisco, Viçosa e Atalaia;
- Versão 2: Vila São Francisco, Viçosa e Atalaia;
- Versão 3: Quebrangulo, Vila São Francisco, Paulo Jacinto, Viçosa, Cajueiro, Capela e Atalaia.

Figura 6. Divisão das sub-bacias do rio Paraíba do Meio considerando as três versões do modelo HEC-HMS



Para todas as versões, foram extraídas diversas características das sub-bacias, tais como: comprimento e declividade do rio principal, declividade das sub-bacias, maior caminho percorrido pela água, localização do centroide das sub-bacias e sua elevação etc. Também, foram incluídas informações de *Curve Number* a partir do mapa ortocodificado de CN do Metadados da ANA. Todas estas informações foram exportadas para um arquivo padrão, que posteriormente foi importado pelo modelo HEC-HMS.

### 2.3.2. Estruturação do modelo hidrológico

As informações processadas no HEC-GeoHMS foram importadas para o HEC-HMS iniciando-se um novo projeto. A seguir as etapas de estruturação do modelo hidrológico serão descritas.

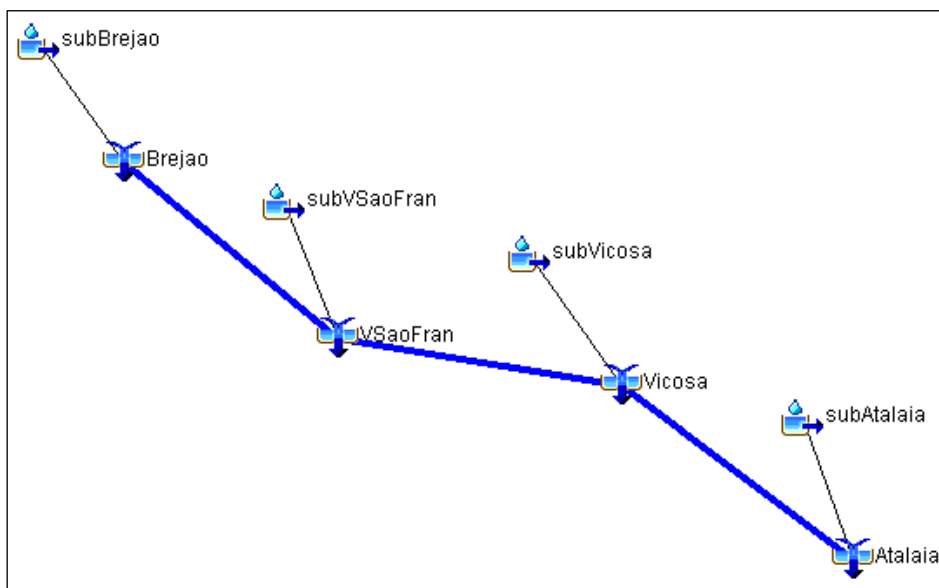
#### *Modelo de bacia*

Algumas edições nos nomes e descrições foram realizadas para facilitar a identificação dos elementos do modelo de bacia. Na Figura 7 é apresentada a configuração da bacia dentro do modelo da versão 1.

Em seguida, foram selecionados os métodos de cálculo e definidos os parâmetros necessários para cada método. Para o cálculo da perda de precipitação por infiltração (*Loss Method*), optou-se pelo método *SCS Curve Number*, que exige informações do valor *Curve Number* - já importado pelo HEC-GeoHMS - e porcentagem de área impermeabilizada, que foi considerada nula para todas as sub-bacias.

O método de transformação de chuva em vazão (*Transform Method*) inicialmente escolhido foi o *SCS Unit Hydrograph*, que exige a informação de um *Lag Time*, já importado pelo HEC-GeoHMS. O valor de *Lag Time* está relacionado com o tempo de concentração da bacia e foi calculado pelo GeoHMS considerando a declividade da bacia e o mapa de CN.

Figura 7. Versão 1 do modelo de bacia do HEC-HMS para a bacia do rio Paraíba do Meio



O método de propagação escolhido foi o *Muskingum-Cunge*. Os parâmetros comprimento e declividade média do rio (*Length e Slope*) foram importados do HEC-GeoHMS, os demais parâmetros foram estimados buscando-se valores próximos do esperado. Para o valor de *n* de Manning foram considerados valores de referências indicados por Porto (2006) e pelo manual do modelo, sendo escolhido o valor de  $0,035 \text{ m}^{-2/3}\text{s}$  para toda a bacia. O valor de *Index Flow* foi estimado como a vazão média do evento que se pretende simular. Inicialmente, optou-se por representar o canal de forma retangular. A largura do canal (*Width*) foi estimada através da média de medidas de larguras ao longo da calha do rio, realizadas pelo Google Earth (Tabela 2).

Tabela 2. Estimativas dos valores da largura (*Width*) do rio Paraíba do Meio

Local	Informação	Latitude	Longitude	Largura (m)
Brejão	-	-9,158825	-36,514965	45,0
Brejão	Entre Brejão e Quebrangulo	-9,067901	-36,571007	22,0
Quebrangulo	-	-9,319969	-36,473491	51,0
Quebrangulo	Cachoeira do Pinto	-9,213809	-36,523726	62,0
Quebrangulo	Entre Quebrangulo e Vila São Francisco	-9,344361	-36,440245	50,0
Vila São Francisco	-	-9,366236	-36,419780	78,0
<b>MÉDIA</b>	<b>Brejão – Vila São Francisco</b>	-	-	<b>51.33</b>
Paulo Jacinto	Ponte antes da entrada do município	-9,370964	-36,334839	50,0
Paulo Jacinto	Ponte estação da ANA	-9,371451	-36,374907	52,0
Viçosa	-	-9,374887	-36,225664	90,0
Viçosa	Ponte	-9,376794	-36,244463	98,0
Viçosa	Ponte saída Viçosa	-9,373446	-36,262870	148,0
Viçosa	Povoado Anel	-9,339487	-36,306227	66,0

Tabela 3. Estimativas dos valores da largura (*Width*) do rio Paraíba do Meio (cont.)

MÉDIA	Vila São Francisco – Viçosa	-	-	84,0
Cajueiro	Entre Viçosa e Cajueiro	-9,382500	-36,201078	97,0
Cajueiro	Ponte entre Viçosa e Cajueiro	-9,375003	-36,174916	73,0
Cajueiro	Estação da ANA - Usina Capricho	-9,375717	-36,157989	70,0
Cajueiro	Ponte	-9,396705	-36,149927	107,0
Capela	Entre Capela e Cajueiro	-9,398253	-36,117551	68,0
Capela	Área Rural	-9,398749	-36,083630	65,0
Capela	No município - Ponte	-9,411111	-36,074677	136,0
Atalaia	-	-9,507333	-36,022059	74,0
Atalaia	-	-9,502646	-36,023941	66,0
Atalaia	Entre Atalaia e Capela	-9,479564	-36,043610	70,0
MÉDIA	Viçosa – Atalaia	-	-	82,60

Na Tabela 4 são apresentados os parâmetros de sub-bacia e na Tabela 5 os parâmetros de trechos de propagação obrigatórios para os métodos selecionados. Uma parte desses parâmetros foi importada do HEC-GeoHMS e outra estimada e inserida manualmente. Os parâmetros apresentados foram os valores iniciais utilizados na primeira simulação, durante o processo de calibração eles foram ajustados buscando melhor representar os dados observados de vazão.

Tabela 4. Parâmetros gerados automaticamente pelo HEC-GeoHMS ou inseridos manualmente para as sub-bacias da Versão 1 do modelo

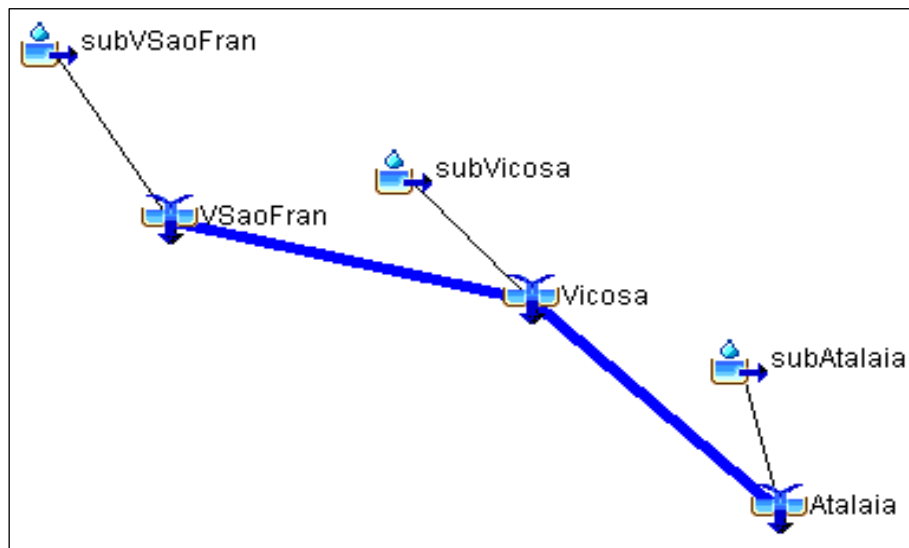
Sub-bacia	Área (km <sup>2</sup> )	Curve Number	Lag Time (min)
Brejão	319.786	78.874	623.03
Vila São Francisco	1171.762	77.241	648.60
Viçosa	465.291	83.908	358.80
Atalaia	628.124	81.972	499.22

Tabela 5. Parâmetros gerados automaticamente pelo HEC-GeoHMS e inseridos manualmente para os trechos de propagação da Versão 1 do modelo

Trecho	Length (m)	Slope (m/m)	Index Flow (m <sup>3</sup> /s)	Width (m)
Brejão – Vila São Francisco	73.183,88	0,0051	0,46	51,33
Vila São Francisco – Viçosa	32.904,28	0,0031	2,90	84,00
Viçosa – Atalaia	45.840,62	0,0034	9,00	82,60

Posteriormente, devido à dificuldade de calibração, o modelo de bacia foi simplificado com a retirada das sub-bacias de Brejão resultando na versão 2 do modelo de bacia cuja estrutura é apresentada na Figura 8. A Versão 2 foi utilizada como a versão operacional do sistema proposto.

Figura 8. Versão 2 do modelo de bacia do HEC-HMS para a bacia do rio Paraíba do Meio



Na Tabela 45 são apresentados os parâmetros de sub-bacia e na Tabela 56 os parâmetros de trechos de propagação inicialmente utilizados.

Tabela 6. Parâmetros gerados automaticamente pelo HEC-GeoHMS e inseridos manualmente para as sub-bacias da Versão 2 do modelo

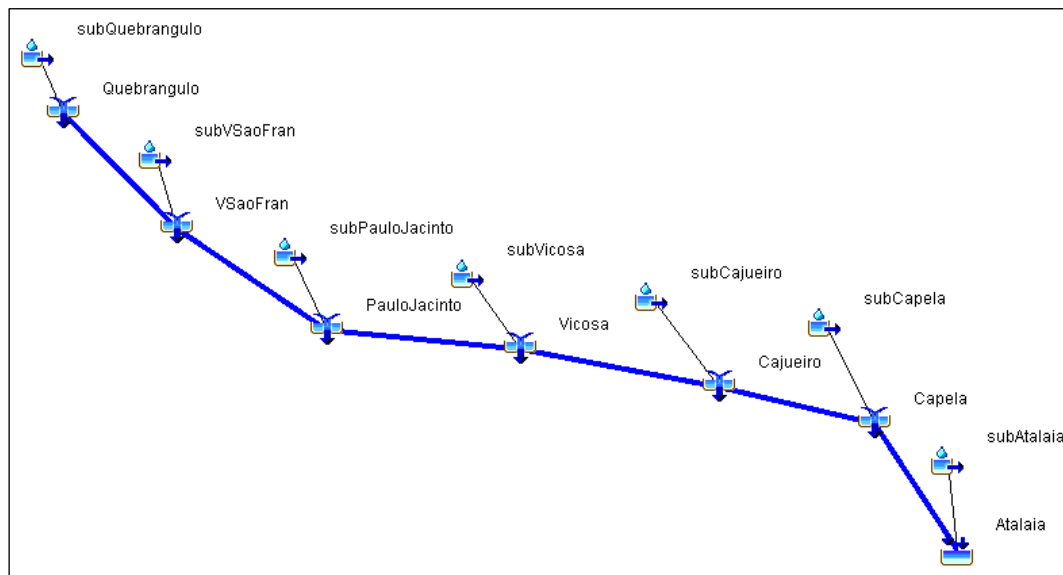
Sub-bacia	Área (km <sup>2</sup> )	Curve Number	Lag Time (min)
Vila São Francisco	1510	78	700
Viçosa	469	84	359
Atalaia	631	82	500

Tabela 7. Parâmetros gerados automaticamente pelo HEC-GeoHMS e inseridos manualmente para os trechos de propagação da Versão 2 do modelo

Trecho	Length (m)	Slope (m/m)	Index Flow (m <sup>3</sup> /s)	Width (m)
Vila São Francisco – Viçosa	32.903	0,00315	13	60
Viçosa – Atalaia	45.938	0,00346	24	80

Após o processo de calibração da Versão 2, a Versão 3 foi estruturada com a inclusão dos demais municípios com problemas de inundação, conforma apresentado na Figura 9. Os parâmetros da Versão 3 foram ajustados proporcionalmente aos parâmetros já calibrados da Versão 2 e serão apresentados na seção de resultados.

Figura 9. Versão 3 do modelo de bacia do HEC-HMS para a bacia do rio Paraíba do Meio



### Modelo Meteorológico

Visando a simplicidade, o Modelo Meteorológico foi configurado de modo que seja dependente apenas de dados de precipitação. O método do Inverso da Distância (*Inverse Distance*) foi selecionado para estimar a precipitação média para cada sub-bacia. Esse método faz uma média ponderada considerando a distância das estações pluviométricas em relação às sub-bacias. Para isso, além da localização das estações pluviométricas (Tabela 1), também foi necessário informar um ponto de referência para cada sub-bacia. Normalmente, utiliza-se o seu centroide (*Node*), informação também extraída pelo HEC-GeoHMS. Nas Tabela 8 e Tabela 9 são apresentados os centroides das sub-bacias das Versões 1 e 2 do modelo.

Tabela 8. Localização do centroide das sub-bacias da Versão 1

Sub-bacia	Latitude	Longitude
Brejão	-8.88290	-36.63660
Vila São Francisco	-9.21460	-36.57580
Viçosa	-9.35333	-36.35028
Atalaia	-9.35306	-36.16417

Tabela 9. Localização do centroide das sub-bacias da Versão 2

Sub-bacia	Latitude	Longitude
Vila São Francisco	-9.14361	-36.58806
Viçosa	-9.35333	-36.35028
Atalaia	-9.35306	-36.16417

A Versão 3 do modelo foi utilizada apenas para a estimativa de hidrogramas sintéticos para diferentes tempos de retorno. Nesse caso, a precipitação estimada a partir da curva IDF foi considerada homogênea para toda a bacia do Paraíba do Meio e foi associada para todas as sub-bacias através do método do Hietograma Específico (*Specified Hyetograph*).

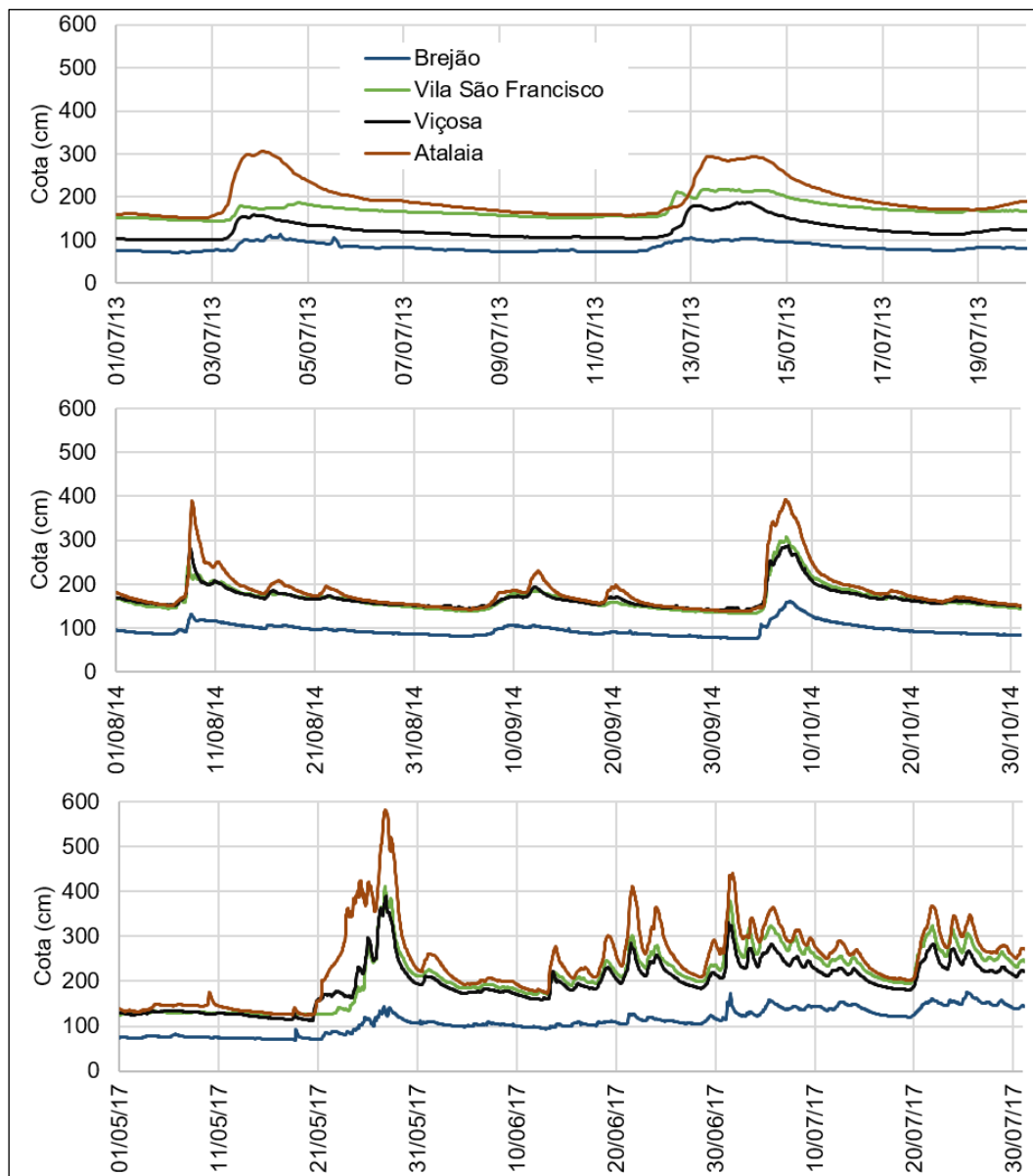
### *Seleção de eventos*

Existem duas formas de realizar simulações no HEC-HMS: uma delas é a simulação contínua, que considera um período extenso de dados que são simulados continuamente; e a outra é a simulação de eventos, que considera apenas o período de ocorrência do evento. Considerando as diversas falhas encontradas nas séries de dados, optou-se por realizar simulações por eventos específicos. Por isso, alguns eventos de precipitação e subida de hidrogramas foram selecionados para fazerem parte da calibração e validação do modelo. As datas de pico de vazão selecionadas são: 03/07/2013; 13/07/2013; 08/08/2014; 12/09/2014; 07/10/2014; 27/05/2017; 13/06/2017; 19/06/2017; 21/06/2017; 01/07/2017; 03/07/2017; 05/07/2017; 21/07/2017; 23/07/2017; 25/07/2017. Na Figura 10 são apresentados os cotogramas desses eventos.

Dentro do período de monitoramento telemétrico não houve nenhum evento extremo muito significativo. Os eventos mais importantes ocorreram em 2017, por isso, a calibração focou nesses eventos maiores, principalmente nos picos de 27/05/2017 e 01/07/2017. Os demais eventos serviram apenas para validar a calibração. Dessa forma, os dados de vazão e precipitação, após passarem pelo processo de consistência e preenchimento, foram inseridos manualmente como séries de dados no HEC-HMS.



Figura 10. Cotagramas dos períodos com eventos selecionados



### Simulação

Com todos os dados e parâmetros iniciais inseridos no HEC-HMS e conferidos, iniciou-se o processo de simulação (*Simulation Runs*), para analisar o comportamento do modelo hidrológico em cada sub-bacia e estação fluviométrica. As primeiras simulações foram realizadas com a Versão 1 do modelo e com os dados do evento de maio de 2017. Os resultados indicavam vazões simuladas muito acima das vazões observadas em todas as estações, mas principalmente para a estação de Brejão, que fica na cabeceira da bacia. Todos os dados foram reavaliados e as unidades conferidas, até ser descartada a possibilidade de erro no processamento e entrada dos dados observados.

Dessa forma, foi feita uma análise do balanço hídrico da bacia, comparando-se os volumes precipitados com os volumes escoados através dos pontos de monitoramento fluviométrico. Com essa análise, foi observado que o volume precipitado era de fato muito maior que o

volume escoado, sendo necessário investigar quais características da bacia poderiam estar retirando parte dessa chuva para poderem ser consideradas na modelagem.

### *Calibração*

O processo de calibração foi realizado bacia por bacia, de montante para jusante. Na Versão 1 a calibração teve início na sub-bacia de Brejão, seguindo por Vila São Francisco e Viçosa e, finalmente, Atalaia. Inicialmente, os ajustes foram manuais, nos quais foram testados diferentes parâmetros buscando melhorar o ajuste entre os hidrogramas simulados e observados. A calibração automática foi utilizada apenas para ajustes finos.

Como no processo de simulação foi observado excesso de volume de precipitação, principalmente em Brejão, um elemento de retirada de vazão (*Divergion*) foi utilizado para compensar o excesso de vazão simulada. Porém, foi observado que a estação de Brejão, mesmo com a utilização do *Divergion*, estava mais dificultando do que auxiliando a calibração do modelo. Dessa forma, a estação de Brejão foi desconsiderada do modelo do Paraíba do Meio, criando-se a Versão 2 do modelo, na qual a calibração teve início pela sub-bacia de Vila São Francisco.

Durante o processo de calibração, foi observado que o método *SCS Cuper Number*, utilizado como *Loss Method*, não estava representando bem eventos que iniciavam em condições de cotas mais elevadas, principalmente devido ao excesso de volume precipitado cujas perdas não estavam sendo consideradas. Dessa forma, optou-se por um método mais empírico e controlável, como o *Exponential Method*, obtendo-se, finalmente, resultados mais coerentes.

Entre os eventos selecionados, os três eventos mais significativos, em termos de magnitude das vazões, que são: 07/10/2014; 27/05/2017 e 01/07/2017, foram utilizados como referência durante a calibração. Ou seja, os parâmetros foram ajustados buscando as melhores simulações desses três eventos. Os demais eventos foram utilizados para a validação do modelo. Dessa forma, os parâmetros foram padronizados para todos os eventos simulados e uma análise comparativa dos hidrogramas e do coeficiente de Nash-Sutcliffe foi realizada.

Os parâmetros variáveis dependendo do evento simulado são: o *Initial Discharge*, do método *Recession (Baseflow Method)*, que é a vazão inicial do evento; e o *Initial Range*, do método *Exponential (Loss Method)*, que representa a quantidade de precipitação que é inicialmente infiltrada considerando a condição de umidade do solo, ou seja, quanto mais seco o solo antes do evento mais precipitação é infiltrada.

Visando a operacionalidade do modelo, algumas formas de definir esses parâmetros com base nas informações disponíveis durante o momento de previsão foram testadas. No caso do *Initial Discharge*, foi simplesmente atribuída a vazão observada do primeiro instante da simulação. No caso do *Initial Range*, para cada evento foram testados, por tentativa e erro, diferentes valores, buscando-se a melhor aproximação possível da vazão observada. Posteriormente, esses valores foram correlacionados com o acumulado de precipitação observada de 24 e 48 horas antes do início da simulação ou com o parâmetro *Initial Discharge*.

Quando essas correlações ficavam satisfatórias, uma equação foi ajustada e um novo valor para o *Initial Range* foi calculado com base nela.

#### *Simulação dos tempos de retorno*

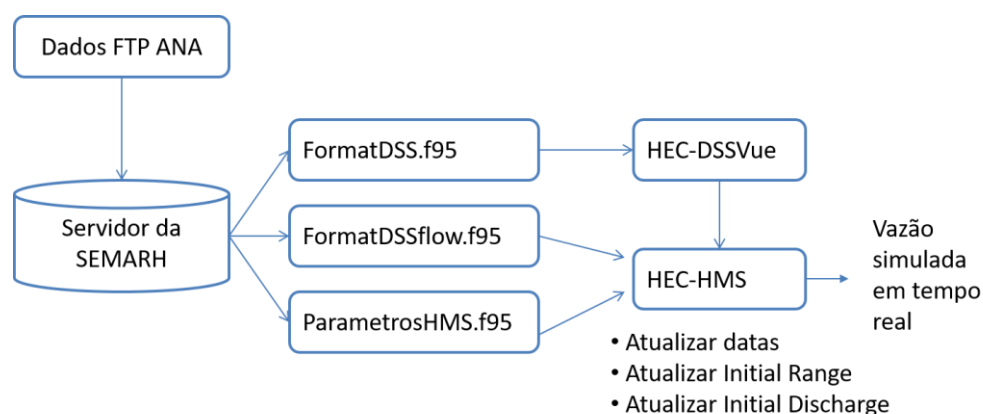
Com a Versão 2 do modelo já calibrado, os hietogramas sintéticos gerados para os diferentes tempos de retorno foram simulados gerando-se os hidrogramas sintéticos para os municípios de Viçosa e Atalaia. Devido à ausência de dados de vazão, o modelo hidrológico não pode ser calibrado para os municípios de Quebrangulo, Paulo Jacinto, Capela e Cajueiro. Entretanto, para poder estimar as vazões desses municípios, a Versão 3 do modelo hidrológico foi reestruturado incluindo elementos para cada um desses municípios (Figura 9). Os novos parâmetros foram subjetivamente determinados considerando uma proporção aos parâmetros já calibrados na Versão 2, obtendo-se resultados muito próximos do modelo simplificado para os eventos selecionados. Através dessa nova configuração, foi possível simular os hidrogramas sintéticos de cada tempo de retorno para cada município de interesse.

#### *Operacionalização do modelo hidrológico*

Após a calibração do modelo, a Versão 2 foi operacionalizada para uso da Sala de Alerta da Semarh-AL. Para isso, algumas ferramentas foram desenvolvidas para facilitar a rodada do modelo em tempo real, tais operações estão detalhadas no Manual de Operação do Modelo, disponível no Apêndice B.

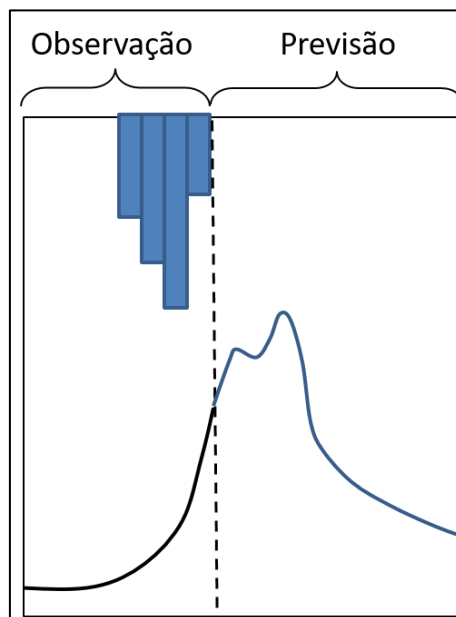
As ferramentas foram desenvolvidas em linguagem de programação *FORTRAN* e tiveram como base o banco de dados disponível em um Servidor da Semarh-AL, no qual disponibiliza em tempo real os dados das estações telemétricas sob responsabilidade da ANA (Figura 11).

Figura 11. Esquema do modelo hidrológico operacional



Como na época do desenvolvimento do sistema a Semarh-AL não tinha disponível em seu banco dados de previsão de precipitação, a princípio, as previsões são realizadas considerando chuva nula (Figura 12). Entretanto, quando a Semarh-AL começar a ter disponível tais informações, inclusive informações provenientes do radar, o sistema pode ser adaptado para utilizar esses dados como entrada.

Figura 12. Esquema da previsão realizada pelo modelo hidrológico operacional



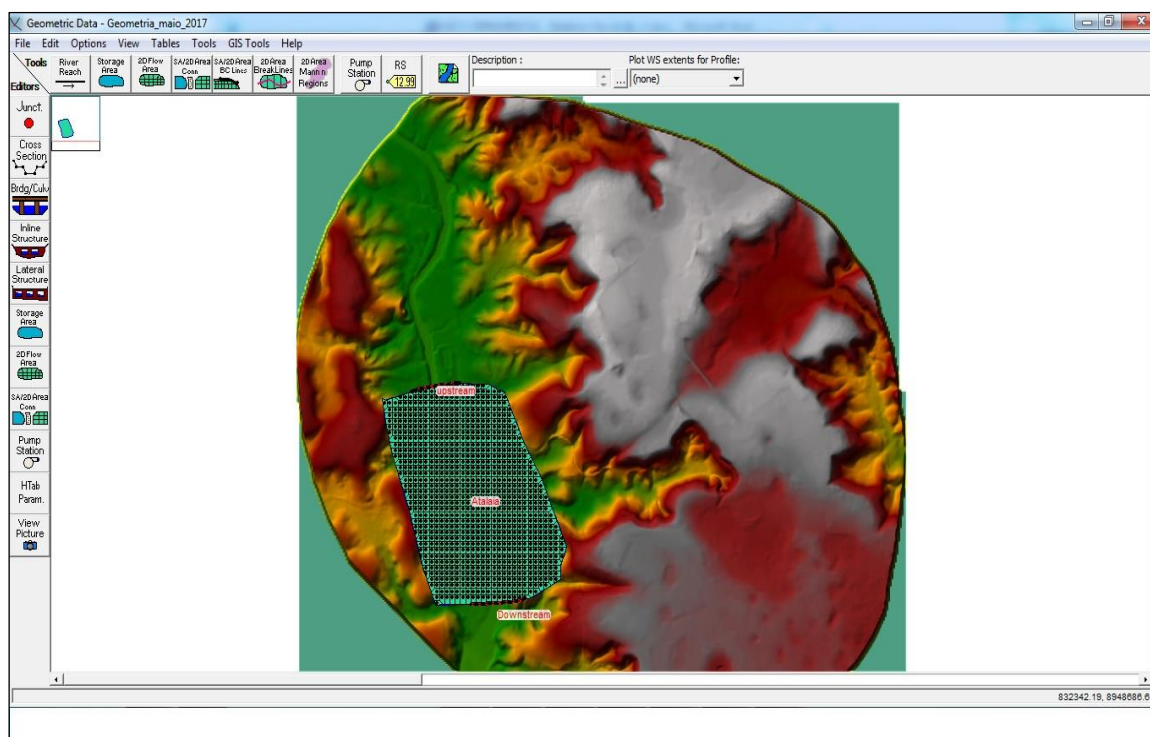
#### 2.4. Modelagem hidrodinâmica

O software utilizado na modelagem hidrodinâmica foi o HEC-RAS, versão 5.0.1. Para realizar as simulações, o MDT de 0,5 m de resolução, obtido por aerolevantamento a laser, foi recortado considerando a área urbana dos municípios de Atalaia, Viçosa, Quebrangulo, Paulo Jacinto, Cajueiro e Capela. As imagens de alta resolução (0,25 x 0,25 m) no formato Geotiff também foram utilizadas para identificar a localização do leito do rio e as partes habitadas.

Inicialmente, as simulações realizadas por Medeiros (2017) foram revisadas e adaptadas, utilizando-se a versão 1D do modelo com auxílio da extensão HEC-GeoRAS do ArcGis. Entretanto, observou-se que a versão 2D é mais robusta e poderia gerar resultados mais interessantes. Na versão 2D do HEC-RAS, a geometria é executada diretamente no software, sem a necessidade de outras extensões.

Dessa forma, os MDE foram importados através do *RAS Mapper*, que também permite realizar o mosaico de imagens quando necessário. Na construção da geometria, foi delimitado um polígono indicando o domínio da simulação e foram indicadas as localizações das condições de contorno de montante e de jusante. Inicialmente, foi considerado o Coeficiente de Manning padrão do modelo, que é de 0,06. Tamanhos de células computacionais de 3, 10 e 50 m foram testados para avaliar o comportamento do modelo. Esse procedimento foi realizado para os municípios de Quebrangulo, Paulo Jacinto, Viçosa, Cajueiro, Capela e Atalaia. Como exemplo, na Figura 13 é apresentado o domínio de Atalaia.

**Figura 13. Domínio de simulação do modelo hidrodinâmico HEC-RAS 2D para o município de Atalaia/AL**



Os primeiros testes foram realizados no município de Atalaia, por possuir dados horários de vazão observada, localização de alguns pontos de inundação dos eventos de 2010 e 2017 e estar entre os municípios de maior interesse para o mapeamento de área de risco. O modelo foi configurado para escoamento não permanente (*Unsteady Flow*) e considerou hidrogramas observados como condição de contorno a montante (*Flow Hydrograph*) e a profundidade normal como condição de jusante (*Normal Depth*). Os parâmetros de declividade de linha de energia (*EG Slope* e *Friction Slope*), necessários para ambas as condições de contorno, foram aproximados para as declividade do terreno, obtidas a partir do MDT. A condição inicial considerou que o rio estava inicialmente vazio e manteve a mesma vazão da primeira hora do hidrograma durante 96 horas, tempo suficiente para encher o rio e aquecer o modelo, conforme foi observado nos testes. Foram simulados os eventos de maio de 2017, na escala horária, e de junho de 2010, na escala diária. Os parâmetros utilizados estão resumidos na Tabela 10.

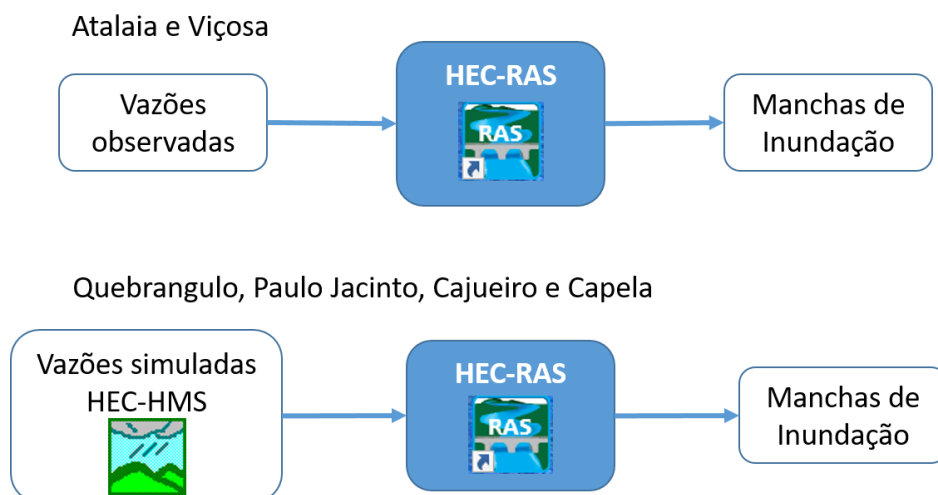
**Tabela 10. Parâmetros iniciais do modelo HEC-RAS para o município de Atalaia**

Parâmetro	Valor
<i>Slope</i>	0,0005
<i>Friction Slope</i>	0,005
<i>Computation Point Spacing</i>	3, 10 e 50
<i>Manning's n</i>	0,06; 0,05; 0,04 e 0,03
<i>Initial conditions time (hrs)</i>	96
Datas dos hidrogramas	11 de maio a 11 de junho de 2017 01 de junho a 30 de junho de 2010

Entre os municípios de interesse, apenas Viçosa e Atalaia possuíam dados horários de vazão observada que puderam ser utilizados na calibração do modelo hidrodinâmico. Para os demais municípios, as vazões foram obtidas pelo modelo hidrológico HEC-HMS, após a sua calibração. Entretanto, vale lembrar que a calibração do modelo hidrológico apresenta incertezas, devido ao curto período de monitoramento telemétrico da bacia e à ausência de dados de medição de vazão para confrontar com as simulações.

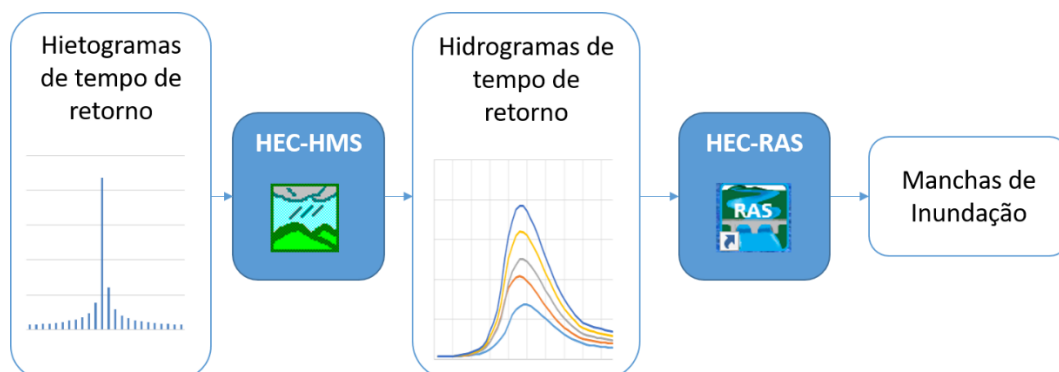
Dessa forma, essas incertezas inviabilizam a calibração do modelo hidrodinâmico para os municípios que não possuem monitoramento de vazão. Nesse sentido, adotou-se para esses municípios o mesmo valor de  $n$  de Manning calibrado para o município de Atalaia, valendo-se da ressalva de que os resultados gerados são apenas aproximações, devendo os mesmos serem reavaliados quando existir a disponibilidade de dados de vazão. Um esquema do processo de simulação hidráulica é apresentado na Figura 14.

Figura 14. Esquema de simulação hidráulica



Após o processo de calibração, os hidrogramas sintéticos de tempos de retorno gerados pelo HEC-HMS foram simulados no HEC-RAS para todos os municípios. As manchas de inundação geradas foram extraídas e processadas em SIG para compor o mapa de inundação considerando o tempo de retorno de cada município (Figura 15).

Figura 15. Esquema da simulação para diferentes tempos de retorno



### 3. RESULTADOS OBTIDOS E DISCUSSÃO

#### 3.1. Levantamento e processamento das informações

##### 3.1.1. Ajuste de curva-chave

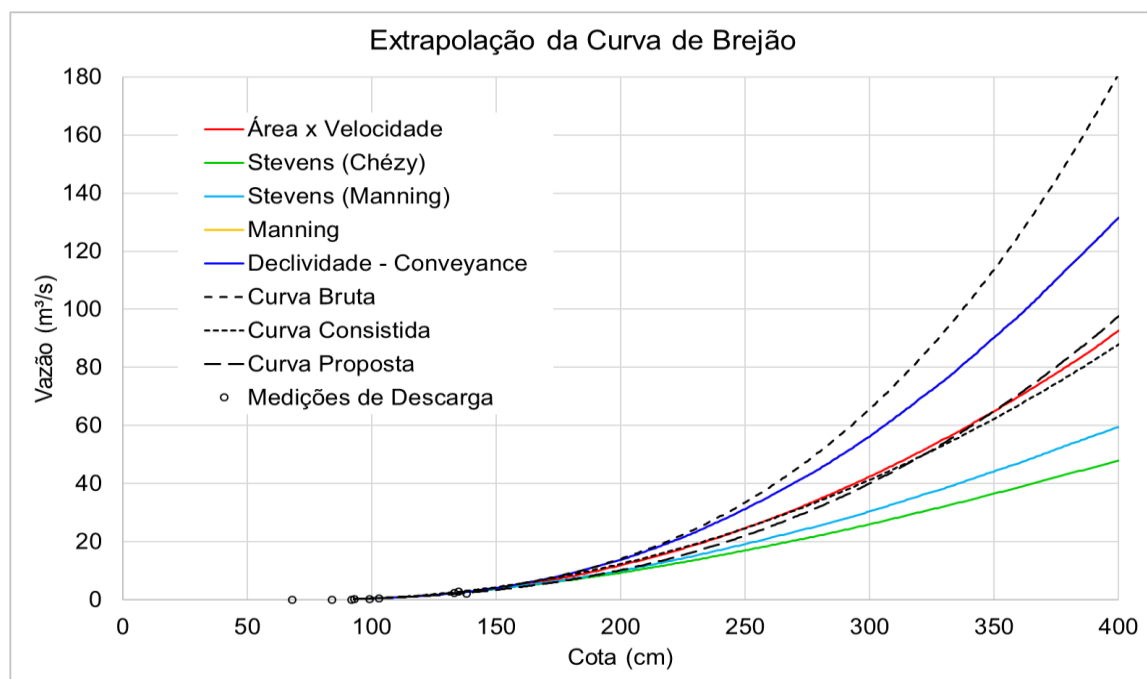
A seguir serão apresentadas as curvas-chave propostas para as estações fluviométricas com medição de vazão que estão sendo utilizadas na modelagem hidrológica.

Na Tabela 11 são apresentados os parâmetros das equações das curvas-chave bruta e consistida, disponibilizadas pelo Hidroweb, e da curva-chave proposta para a estação de Brejão (39800000). Na Figura 16 essas curvas são comparadas com diferentes métodos de extrapolação superior, que levaram em conta o perfil longitudinal da estação.

Tabela 11. Equações das curvas-chave bruta consistida e proposta para a estação de Brejão

Curva	Validade	Início da Validade	Fim da Validade	Cota Máxima	Cota Mínima	Tramo	Coef. a	Coef. H0	Coef. n
Bruta	1	27/06/2005	31/12/2016	400	50	01/01	4.0669	0.49	3.023
Consistida	1	01/10/2004	31/12/2014	400	50	01/01	7.7050	0.74	2.060
Proposta	1	01/10/2004	31/12/2018	400	55	01/01	3.9000	0.55	2.600

Figura 16. Comparação dos métodos de extrapolação para a estação de Brejão



A curva bruta exagera levemente a vazão na extrapolação superior. Já a curva consistida, acompanha o método de extrapolação Área x Velocidade. Porém, avaliando-se o hidrograma da estação, foi possível observar que a extrapolação inferior da curva consistida aparenta problemas. O valor de  $H_0$  de 74 cm, adotado na equação da curva, ficou muito alto, fazendo com que diversos valores de cota expressem vazão nula. Apesar das medições de descarga realizadas em 2018 indicarem vazão nula, ou praticamente nula, para cotas abaixo de 84 cm,

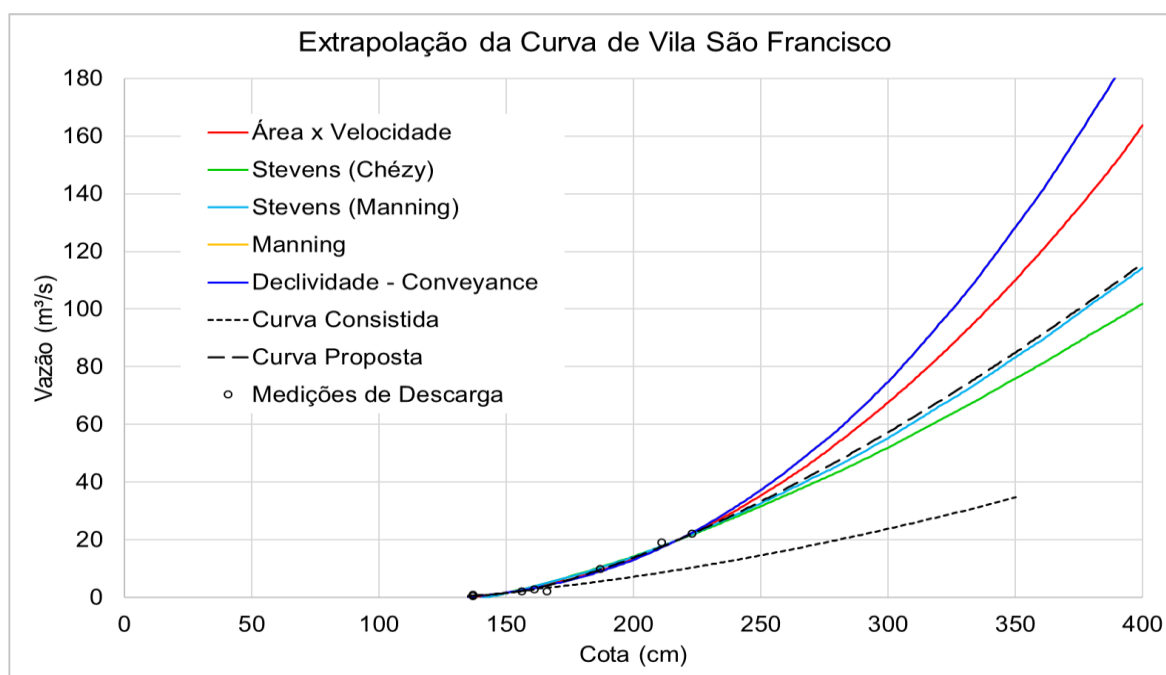
existe grande incerteza nas medições de vazões baixas. Dessa forma, está sendo proposta uma nova curva que também acompanha o método de extrapolação Área x Velocidade, porém reduz o número de vazões nulas considerando  $H_0$  com valor de 55 cm.

Na Tabela 12 são apresentados os parâmetros das equações das curvas-chave consistida e proposta para a estação de Vila São Francisco (39852000). A curva bruta estava indisponível no momento da consulta. Na Figura 17 essas curvas são comparadas com diferentes métodos de extrapolação superior.

Tabela 12. Equações das curvas-chave consistida e proposta para a estação de Vila São Francisco

Curva	Validade	Início da Validade	Fim da Validade	Cota Máxima	Cota Mínima	Tramo	Coef. a	Coef. H0	Coef. n
Consistida	1	01/01/2011	31/12/2014	162	110	01/02	15.3643	1.1	2.500
				350	162	02/02	8.5411	1.1	1.600
Proposta	1	01/01/2011	31/12/2018	157	100	01/02	6.2000	0.81	3.680
				420	157	02/02	29.0000	1.4	1.450

Figura 17. Comparação dos métodos de extrapolação para a estação de Vila São Francisco



A curva de descarga consistida foi ajustada considerando apenas três medições, realizadas até 2014. Após 2014 foram realizadas mais seis medições de descarga, indicando valores de vazão menores do que o esperado pela curva consistida. Por isso, está sendo proposta uma nova curva cujo ajuste acompanha também essas novas medições de vazão e a extrapolação de Stevens (Manning).

Na

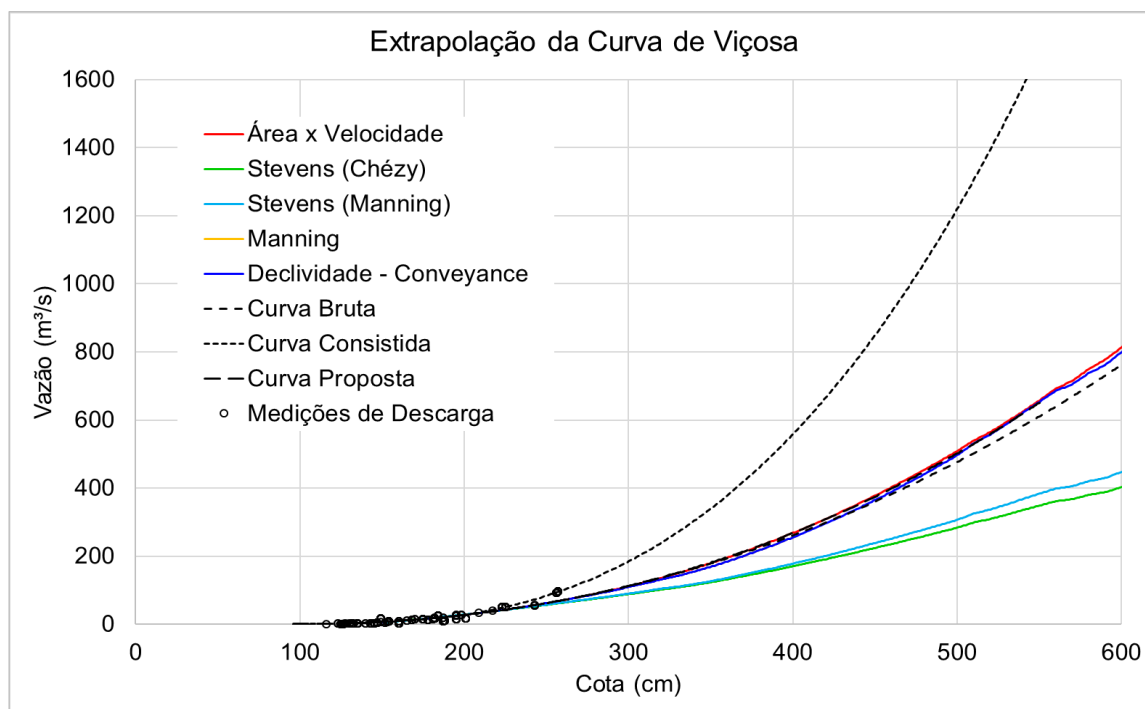


Tabela 13 são apresentados os parâmetros das equações das curvas-chave consistida e proposta para a estação de Viçosa (39860000). A curva bruta estava indisponível. Na Figura 18 essas curvas são comparadas com diferentes métodos de extrapolação superior.

Tabela 13. Equações das curvas-chave consistida e proposta para a estação de Viçosa

Curva	Validade	Início da Validade	Fim da Validade	Cota Máxima	Cota Mínima	Tramo	Coef. a	Coef. H0	Coef. n
<b>Bruta</b>	1	01/09/2004	25/08/2011	500	65	01/01	24.4000	0.95	2.125
	1	01/01/1989	18/08/1989	450	130	01/01	30.2672	1.04	2.686
<b>Consistida</b>	2	19/08/1989	08/10/1991	254	140	01/02	29.7261	1.15	3.362
				450	254	02/02	30.2672	1.04	2.686
	3	09/10/1991	22/06/1994	209	100	01/02	29.0256	1.02	2.556
				450	209	02/02	30.2672	1.04	2.686
<b>Proposta</b>	4	23/06/1994	31/12/2014	202	60	01/02	21.6460	0.89	2.299
				450	202	02/02	30.2672	1.04	2.686
	1	01/01/1989	18/08/1989	202	104	01/02	30.2672	1.04	2.686
				650	202	02/02	18.6000	0.81	2.300
	2	19/08/1989	08/10/1991	304	115	01/02	23.9000	1.15	2.500
				400	304	02/02	18.6000	0.81	2.300
	3	09/10/1991	28/05/1995	200	102	01/02	29.0256	1.02	2.556
				650	200	02/02	18.6000	0.81	2.300
4	29/05/1995	31/12/2018	193	50	01/02	6.2600	0.50	3.770	
			550	193	02/02	18.6000	0.81	2.300	

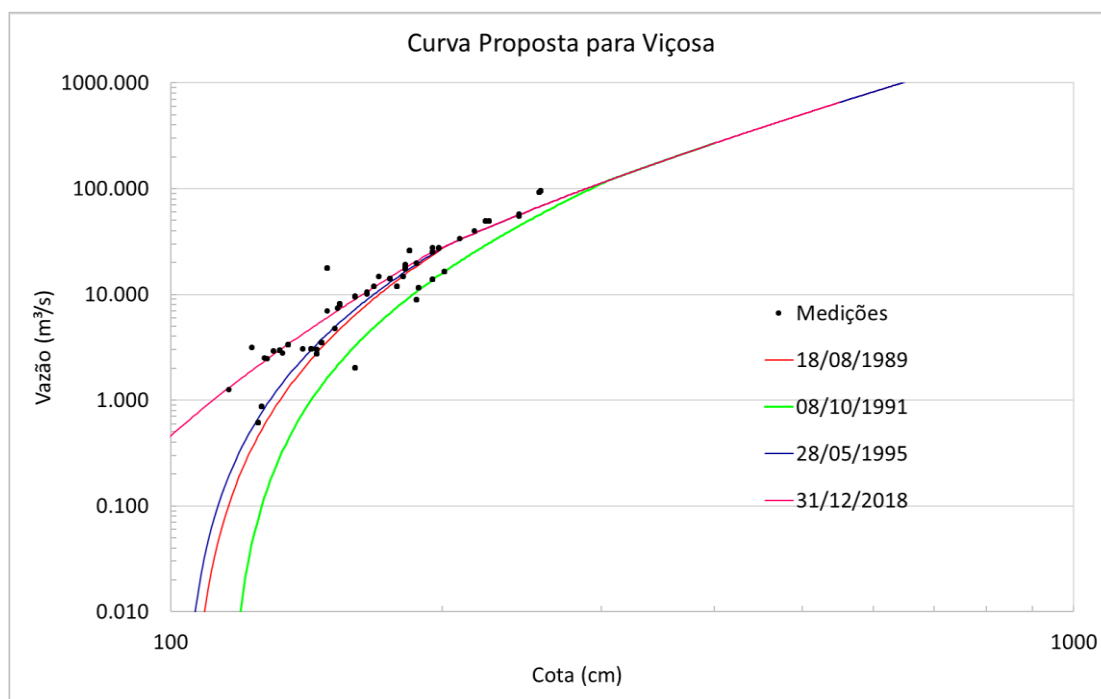
Figura 18. Comparação dos métodos de extrapolação para a estação de Viçosa



A curva de descarga consistida está exagerando os valores das vazões em cotas altas, buscando acompanhar medições de descarga que foram realizadas em 1989. Porém, os métodos de extrapolação e as medições mais recentes indicam vazões mais baixas. Por isso,

a curva proposta procurou manter as divisões de validades e algumas equações do tramo inferior da curva consistida, porém buscou seguir a extrapolação superior da curva bruta e, conseqüentemente, os métodos Área x Velocidade e Declividade-Conveyance. Na Figura 19 é apresentado um gráfico em escala logarítmica no qual é possível observar mais detalhes do tramo inferior das curvas propostas para cada período de validade.

Figura 19. Comparação dos métodos de extrapolação para a estação de Viçosa



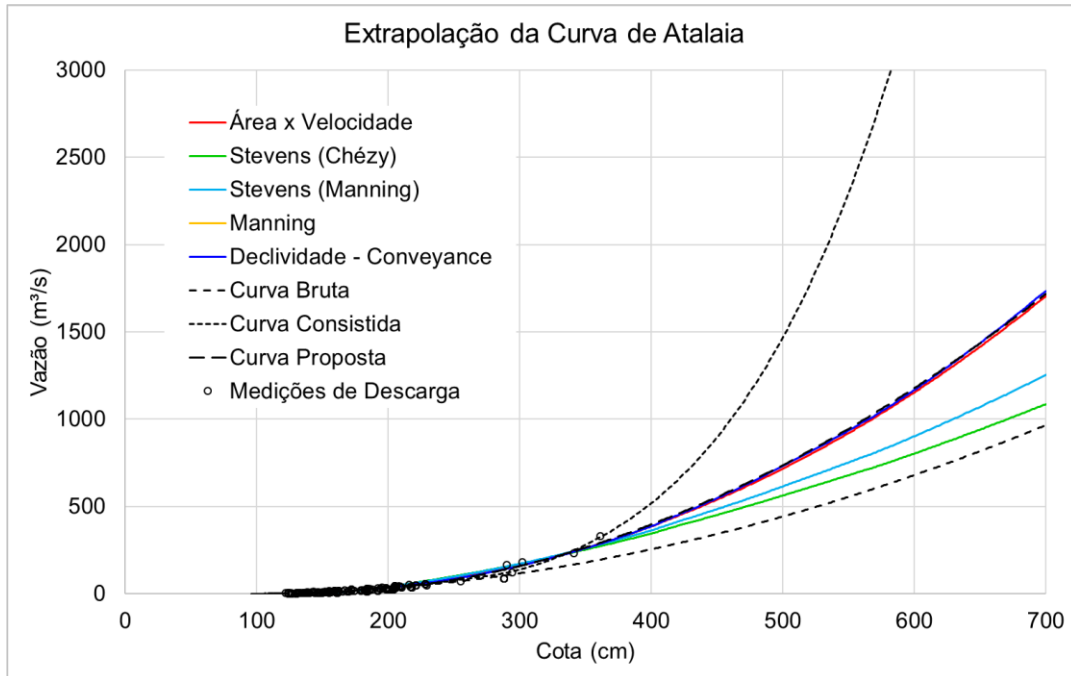
Na Tabela 14 são apresentados os parâmetros das equações das curvas-chave bruta, consistida e proposta para a estação de Atalaia (39870000) e na Figura 20 essas curvas são comparadas com diferentes métodos de extrapolação superior.

Tabela 14. Equações das curvas-chave bruta consistida e proposta para a estação de Atalaia

Curva	Validade	Início da Validade	Fim da Validade	Cota Máxima	Cota Mínima	Tramo	Coef. a	Coef. H0	Coef. n
<b>Bruta</b>	1	01/01/2014	31/12/2016	800	97	01/01	29.7500	0.97	1.937
				160	110	01/03	24.2929	1.05	1.600
	1	01/10/1977	17/08/1989	290	160	02/03	19.9336	0.86	2.500
				700	290	03/03	0.4428	-0.23	4.900
<b>Consistida</b>	2	18/08/1989	20/06/1994	160	120	01/03	17.2463	1.09	1.400
				291	160	02/03	16.3728	0.87	2.800
				700	291	03/03	0.4428	-0.23	4.900
	3	21/06/1994	31/12/2014	187	90	01/03	31.6573	0.93	2.250
				291	187	02/03	26.4014	0.85	2.100
				700	291	03/03	0.4428	-0.23	4.900
<b>Proposta</b>	1	01/10/1977	17/08/1989	207	101	01/02	29.0000	1.01	1.920
				700	207	02/02	59.5120	1.34	1.940
	2	18/08/1989	20/06/1994	190	101	01/02	25.0000	1.01	2.150
				500	190	02/02	59.5120	1.34	1.940

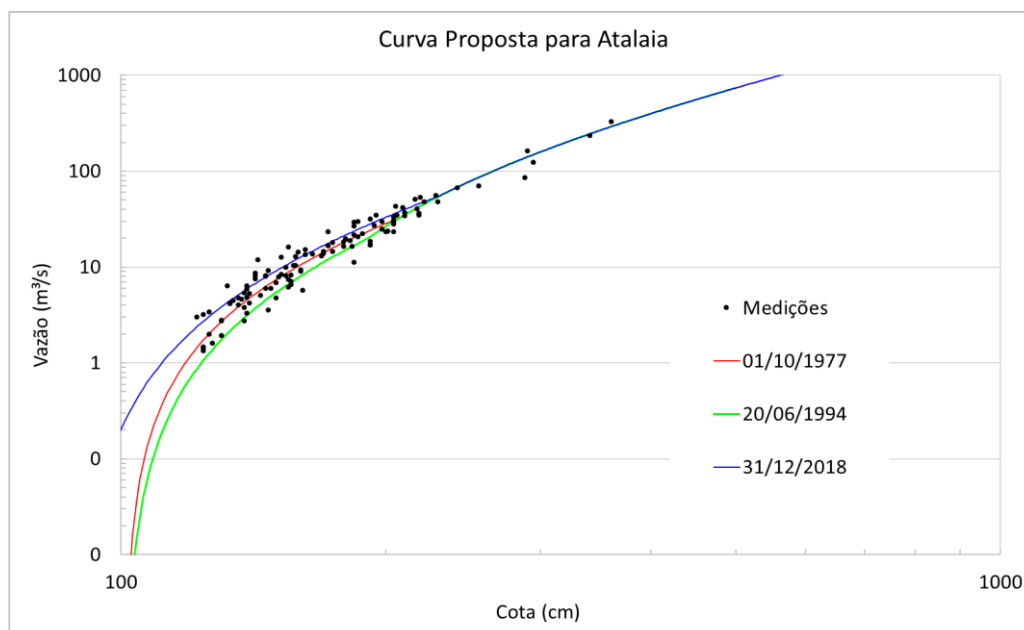
3	21/06/1994	31/12/2018	231	90	01/02	27.0000	0.9	2.130
			700	231	02/02	59.5120	1.34	1.940

Figura 20. Comparação dos métodos de extrapolação para a estação de Atalaia



A curva de descarga consistida atribui valores de vazão extremamente altos na extrapolação superior da curva. Já a curva bruta, tende a subestimar o valor da vazão para cotas altas. Por isso, a curva proposta procurou manter a divisão de validades da curva consistida e buscou acompanhar os métodos de extrapolação Área x Velocidade e Declividade-Conveyance. Na Figura 21 é apresentado um gráfico em escala logarítmica, no qual é possível observar mais detalhes do tramo inferior das curvas propostas para cada período de validade.

Figura 21. Curva-chave proposta para a estação hidrológica de Atalaia

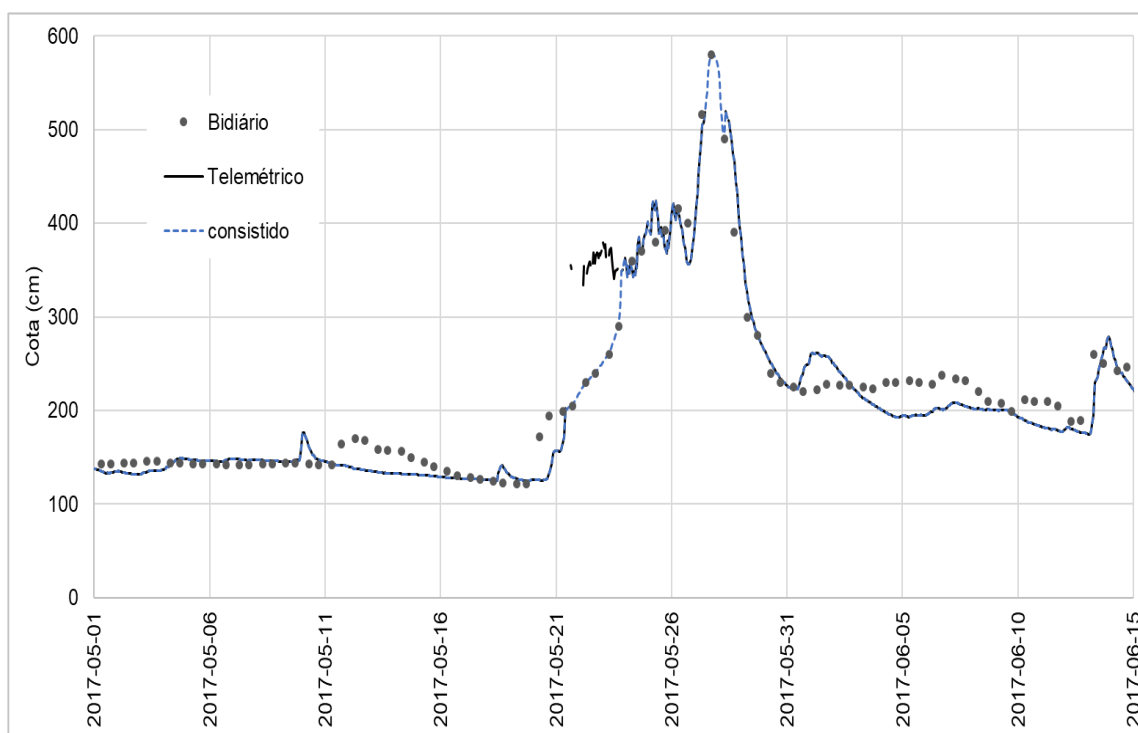


A importância da análise da curva de descarga é devido à grande incerteza sobre os dados de vazão. As poucas medições de descargas são valiosas e devem ser criteriosamente analisadas, juntamente com demais informações da estação fluviométrica, durante o ajuste da curva de descarga. Isso porque as séries de vazão, utilizadas na calibração do modelo hidrológico, são obtidos através da transformação da série de cota em vazão a partir da curva de descarga.

### 3.1.2. Consistência dos eventos extremos

Na Figura 22 é apresentada a consistência do cotograma do evento extremo de maio de 2017 registrado pela estação de Atalaia. Após a consistência, as cotas foram transformadas em vazão utilizando a curva de descarga proposta e foram utilizadas tanto na modelagem hidrológica como na modelagem hidrodinâmica.

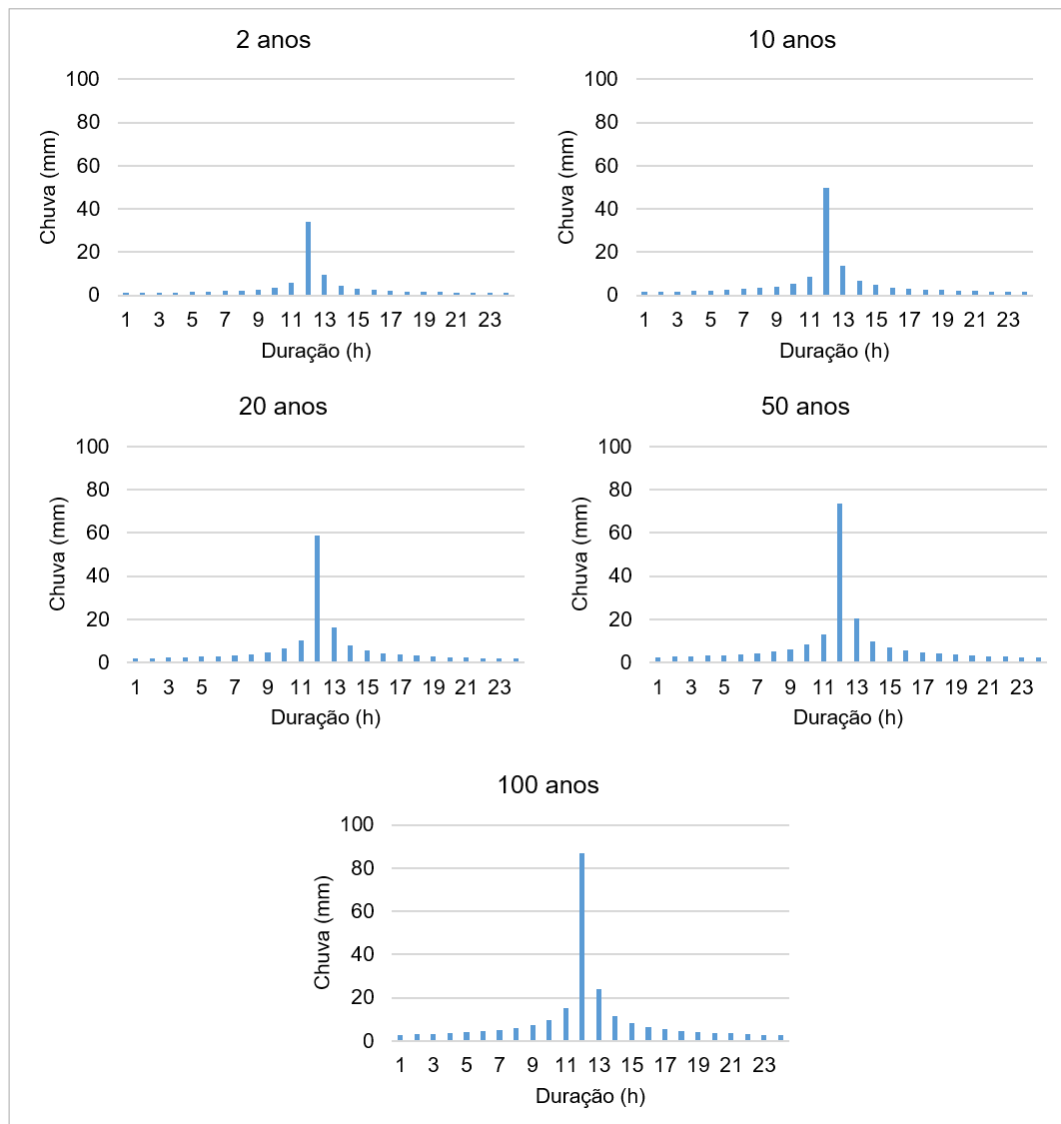
Figura 22. Consistência do evento de maio de 2017 registrado pela estação de Atalaia



### 3.1.3. Hietogramas de projeto

Os hietogramas gerados para diferentes tempos de retorno a partir da curva IDF do município de Atalaia são apresentados na Figura 23.

Figura 23. Hietogramas gerados a partir da curva IDF de Atalaia



### 3.2. Modelagem hidrológica

Durante o processo de simulação do evento de maio de 2017, observou-se que as vazões calculadas pela Versão 1 do modelo estavam extremamente elevadas, incoerentes com os dados observados. A vazão simulada para Brejão foi cerca de 100 vezes maior que a vazão observada na estação; para Vila São Francisco e Viçosa as vazões ficaram em torno de 10 vezes maiores; já para Atalaia três vezes maiores. Devido a essas inconsistências, foi realizada uma análise do balanço hídrico de Brejão e identificado que apenas 4% em média do volume precipitado é escoado através da estação de monitoramento.

Para contornar o excesso de vazão simulada em Brejão, foi utilizada o elemento *Divergion* no HEC-HMS. Esse elemento retira uma parte da vazão gerada pelo excesso de precipitação considerando uma curva que relaciona a vazão de escoamento com a vazão retirada (*Inflow-Divergion Function*). Após diversos testes, foi considerada que essa relação é representada

por uma reta conforme a Tabela 15. Logo, cerca de 97% da vazão excedente da precipitação é retirada linearmente da simulação.

Tabela 15. **Relação entre a vazão excedente e a vazão retirada considerada para a sub-bacia de Brejão**

<i>Inflow</i> (m <sup>3</sup> /s)	<i>Divergion</i> (m <sup>3</sup> /s)
0	0
3000	2900

Com isso, foi possível ajustar os parâmetros para Brejão. Na Tabela 16 são apresentados os parâmetros ajustados, e aproximar a vazão simulada da vazão observada, ainda assim os resultados não foram satisfatórios, obtendo-se valores de Nash-Sutcliffe negativos. Na Figura 24 é apresentada a comparação entre os hidrogramas simulados e observados.

Tabela 16. **Parâmetros ajustados para Brejão**

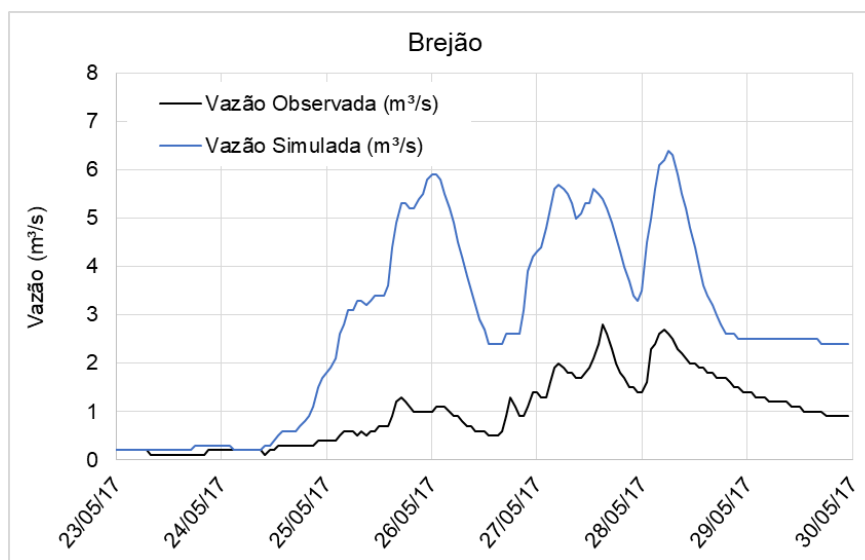
<b>Método</b>	<b>Parâmetro</b>	<b>Valor ajustado</b>
<i>Loss: SCS Curve Number</i>	<i>Curve Number</i>	77
	<i>Impervious</i>	5
<i>Transform: SCS UH</i>	<i>Graph Type</i>	PRF 200
	<i>Lag Time (min)</i>	220
<i>Baseflow: Recession</i>	<i>Recession Constant</i>	0.95
	<i>Ratio</i>	0.4

Fazendo-se uma análise mais profunda sobre o balanço hídrico de Brejão e das características hidrológicas da região, foi levantada a hipótese de um possível efeito de recarga de aquífero. Segundo Wilton Rocha, geólogo da Semarh-AL, a estação de Brejão está localizada no Domínio Hidrogeológico Fissural (Complexo Belém de São Francisco), caracterizado como aquífero heterogêneo e anisotrópico onde o armazenamento de água subterrânea está relacionado com existência de um sistema de fraturas e/ou falhas, no qual alimentação e recarga podem ocorrer a partir da infiltração de águas provenientes da rede de drenagem regional.

Logo, apesar de ainda não ser confirmada a existência de conexão direta entre as águas superficiais com o aquífero, essa recarga realmente pode ocorrer. Além disso, também foi observada a ausência de estações pluviométricas na região semiárida, fazendo com que a pluviosidade da cabeceira da bacia seja superestimada.

Outra característica marcante, que também pode estar interferindo no balanço hídrico de Brejão, é o armazenamento de água em diversos e pequenos açudes, comuns no semiárido.

Figura 24. Resultado da simulação no HEC-HMS para a sub-bacia de Brejão com a inclusão de um elemento *Divergion*



Essas complexas características observadas na região de Brejão não são bem representadas pela forma simplificada adotada para o modelo hidrológico, uma vez também que não se tem informações concretas que possam ser consideradas no modelo. Também foi verificado que a vazão de Brejão pouco interfere na vazão de Vila São Francisco, devido à sua baixa magnitude. Dessa forma, optou-se por desconsiderar a estação de Brejão no modelo, uma vez que ela estava mais dificultando do que auxiliando a calibração.

Durante a calibração de Vila São Francisco, foi observado que o método *SCS Curve Number* perdia seu sentido físico, devido ao excesso de precipitação que não estava sendo descontado por outros processos do balanço hídrico. Dessa forma, optou-se por utilizar o método exponencial (*Exponential Method*), que é exclusivamente empírico, mas apresenta boa resposta para a simulação de eventos específicos.

Tal método permite considerar um incremento de infiltração inicial através do parâmetro *Initial Range*, para representar a umidade do solo antes do evento. Assim, espera-se que quando o solo está mais seco, boa parte da precipitação inicial é infiltrada. Na Tabela 17 são apresentados alguns dos parâmetros ajustados para Vila São Francisco.

Tabela 17. Parâmetros ajustados para Vila São Francisco

Método	Parâmetro	Valor ajustado
<i>Loss: Exponential</i>	<i>Initial Coef</i>	0,91
	<i>Coef Ratio</i>	1
	<i>Exponent</i>	1
	<i>Impervious</i>	0
<i>Transform: SCS UH</i>	<i>Graph Type</i>	PRF 484
	<i>Lag Time (min)</i>	520
<i>Baseflow: Recession</i>	<i>Recession Constant</i>	0,85
	<i>Ratio</i>	0,1

No método *Recession do Baseflow*, o parâmetro *Initial Discharge* foi relacionado com a primeira vazão observada da simulação, sendo variável para cada evento. No método *Exponential do Loss Method*, o parâmetro *Initial Range* depende da condição da bacia antes do evento, sendo também variável para cada evento.

Buscando padronizar a determinação desse parâmetro, a precipitação registrada pela estação de Vila São Francisco e acumulada para 24 e 48 horas antes do início da simulação de cada evento foi correlacionada com o *Initial Range* melhor ajustado para cada evento (Tabela 18).

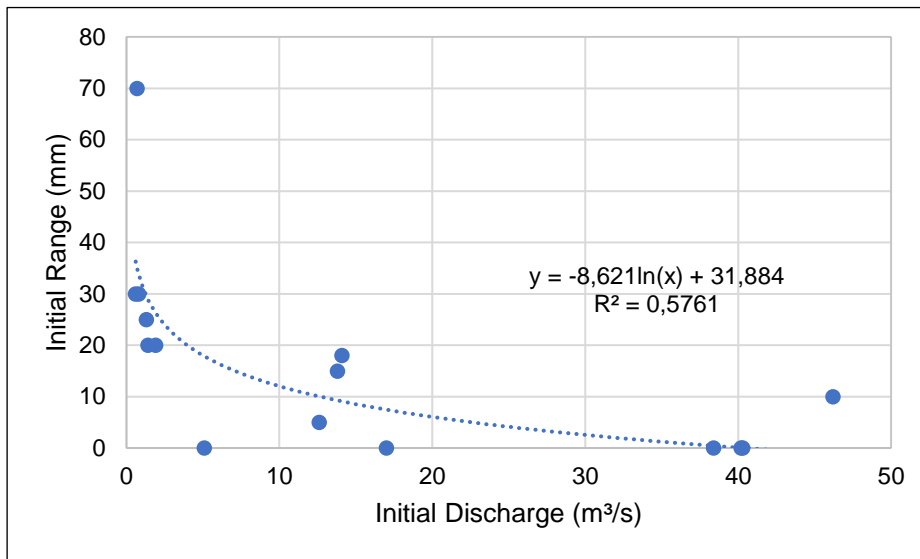
Tabela 18. **Chuva da estação de Vila São Francisco acumulada 24 e 48 horas para cada evento e seus respectivos parâmetros variáveis**

Evento	Simulação		Chuva acumulada (mm)		<i>Initial Discharge</i> (m <sup>3</sup> /s)	<i>Initial Range</i> (mm)	<i>Initial Range</i> Calculado (mm)
	Início	Fim	48h antes	24h antes			
13jul03	02/07/2013 00	06/07/2013 12	0.4	0.4	1.4	20	29
13jul13	11/07/2013 00	15/07/2013 23	7.4	4.2	1.9	20	26
14aug08	06/08/2014 12	09/08/2014 12	4.8	4.2	1.3	25	30
14oct07	03/10/2014 00	09/10/2014 23	0.0	0.0	0.6	30	36
14sep09	06/09/2014 00	14/09/2014 23	6.2	6.2	0.8	30	34
17jul01	28/06/2017 00	02/07/2017 12	2.8	1.0	14.1	18	9
17jul03	02/07/2017 10	03/07/2017 23	46.8	1.8	40.3	0	0
17jul05	04/07/2017 00	06/07/2017 23	17.2	13.4	40.2	0	0
17jul21	19/07/2017 00	22/07/2017 23	3.8	2.2	12.6	5	10
17jul23	23/07/2017 00	24/07/2017 12	29.8	1.4	38.4	0	0
17jul25	24/07/2017 12	26/07/2017 12	19.2	6.6	46.2	10	0
17jun13	12/06/2017 00	14/06/2017 23	0.2	0.0	5.1	0	18
17jun19	17/06/2017 00	20/06/2017 23	13.6	7.8	13.8	15	9
17jun21	20/06/2017 12	22/06/2017 11	18.8	0.8	17	0	7
17may27	24/05/2017 00	29/05/2017 23	32.4	11.6	0.7	70	35

Entretanto, inesperadamente, pouca correlação foi encontrada entre esses valores (Figura 25). Como segunda opção, o *Initial Range* foi correlacionado com o parâmetro também



variável *Initial Discharge* do método *Recession*, obtendo-se melhores correlações (



).

**Figura 25. Correlação entre o parâmetro *Initial Range* com a chuva acumulada de 24 e 48 horas antes do evento para Vila São Francisco**

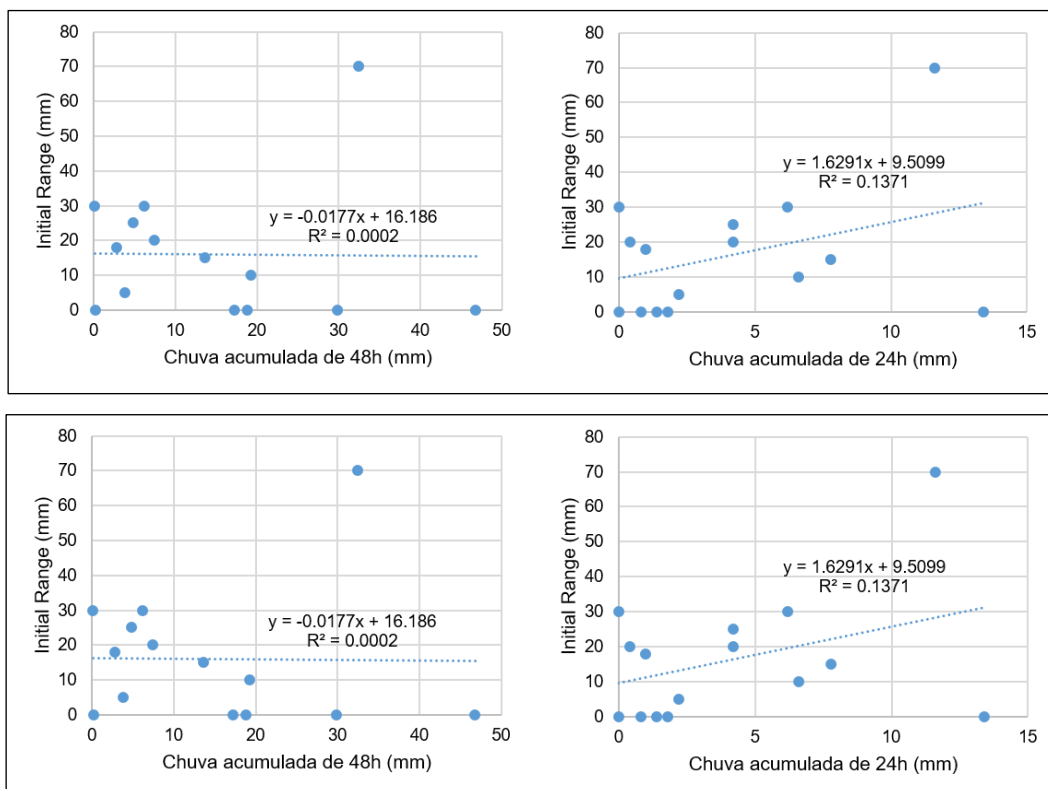
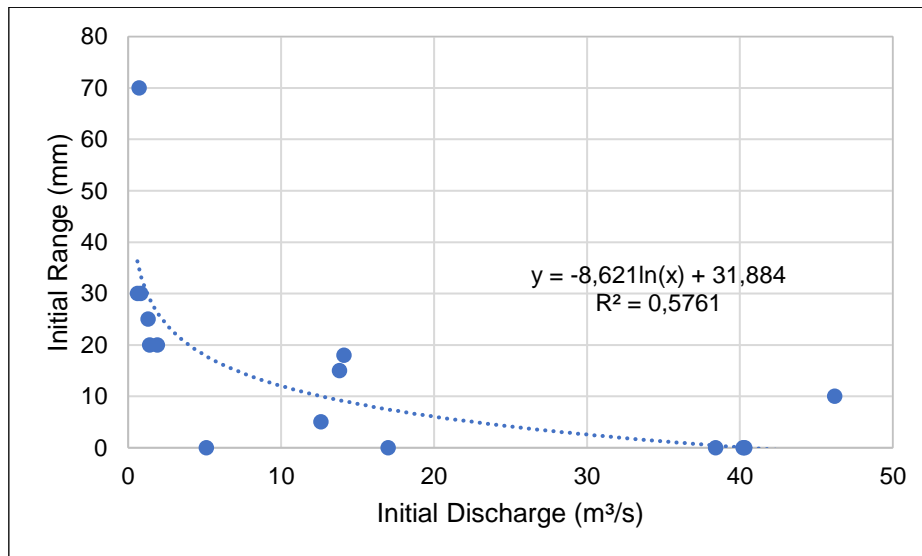
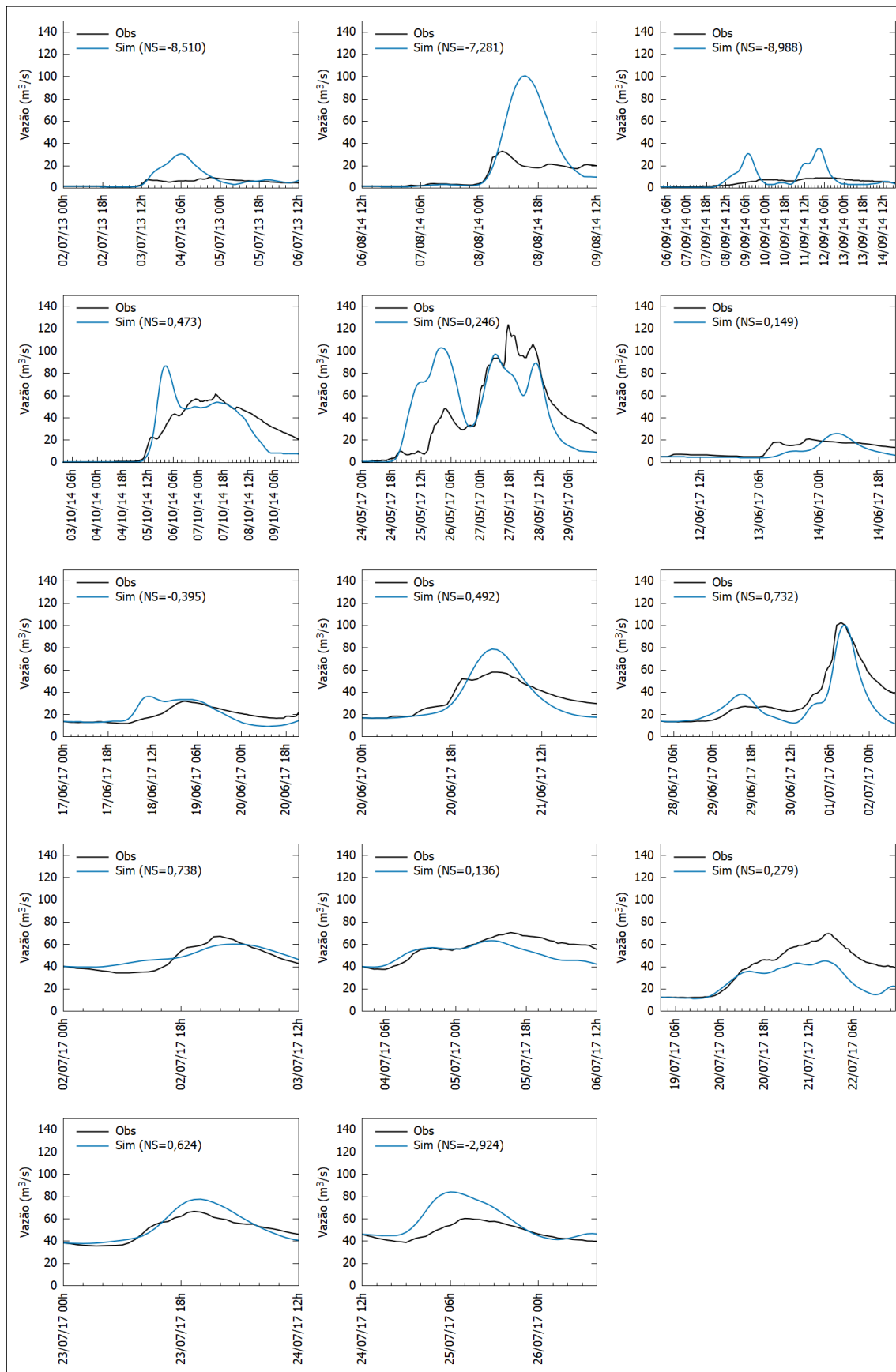


Figura 26. Correlação entre os parâmetros variáveis *Initial Range* e *Initial Discharge* para Vila São Francisco



Dessa forma, foi determinado que o *Initial Range* ( $y$ ) deve ser estimado através de uma equação logarítmica ( $y = -8,621 \ln(x) + 31,884$ ) dependente do *Initial Discharge* ( $x$ ). Porém, é importante destacar que tal relação apenas é válida durante a subida do hidrograma e deve ser atualizada conforme a ocorrência de novos eventos. Na Figura 27 é apresentada a comparação entre os hidrogramas simulados e observados para Vila São Francisco com os respectivos valores de Nash-Sutcliffe.

Figura 27. **Hidrogramas observados (obs) e simulados (sim) para Vila São Francisco com os respectivos valores de Nash-Sutcliffe (NS)**



Finalizada a calibração de Vila São Francisco, deu-se início à calibração de Viçosa. Na Tabela 19 são apresentados alguns dos parâmetros ajustados para Viçosa.

**Tabela 19. Parâmetros ajustados para Viçosa**

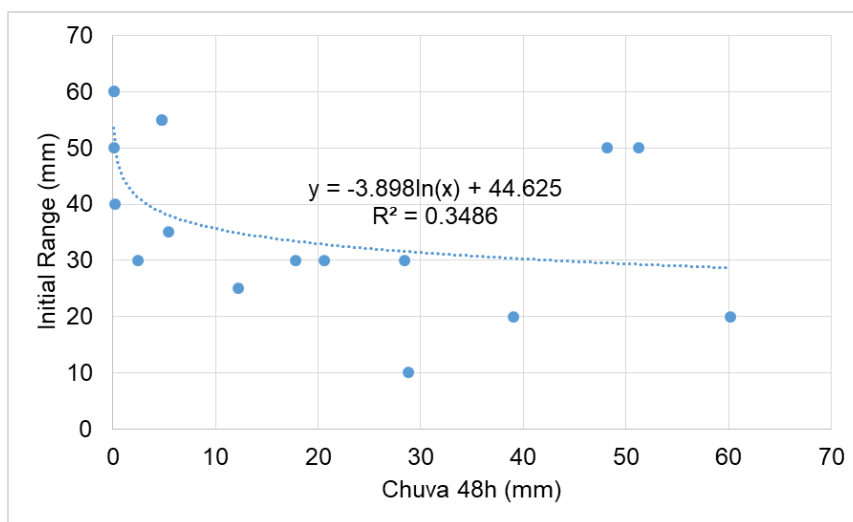
Método	Parâmetro	Valor ajustado
<i>Loss: Exponential</i>	<i>Initial Coef</i>	0,79
	<i>Coef Ratio</i>	1
	<i>Exponent</i>	1
	<i>Impervious</i>	0
<i>Transform: SCS UH</i>	<i>Graph Type</i>	PRF 484
	<i>Lag Time (min)</i>	350
<i>Baseflow: Recession</i>	<i>Recession Constant</i>	0,9
	<i>Ratio</i>	0,2

Para Viçosa, o parâmetro variável *Initial Discharge* do método *Recession (Baseflow)* foi relacionado com a diferença entre a vazão observada em Viçosa e a vazão observada em Vila São Francisco no primeiro instante da simulação. Já o parâmetro *Initial Range* do método *Exponential (Loss Method)* apresentou melhor correlação com a chuva registrada pela estação de Viçosa e acumulada para 48 horas antes do evento (Tabela 20 e Figura 28).

**Tabela 20. Chuva da estação de Viçosa acumulada 24 e 48 horas para cada evento e seus respectivos parâmetros variáveis**

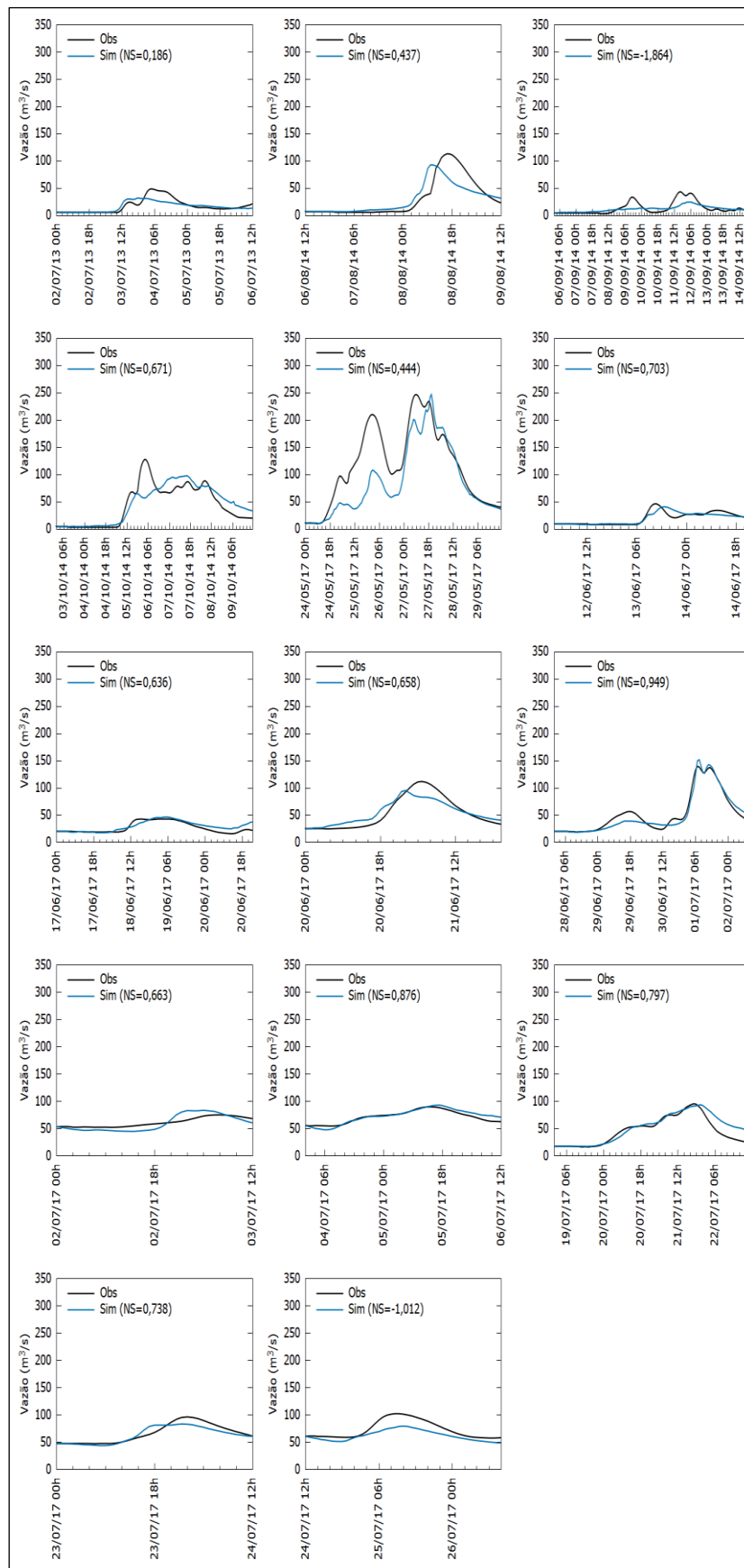
Evento	Simulação		Chuva acumulada (mm) 48h antes	<i>Initial Discharge</i> (m <sup>3</sup> /s)	<i>Initial Range</i> (mm)	<i>Initial Range</i> Calculado (mm)
	Início	Fim				
13-Jul-03	02/07/2013 00	06/07/2013 12	0.2	4.9	40	51
13-Jul-13	11/07/2013 00	15/07/2013 23	48.2	5.9	50	30
14-Aug-08	06/08/2014 12	09/08/2014 12	0.1	5.6	50	60
14-Oct-07	03/10/2014 00	09/10/2014 23	0.1	3.5	60	60
14-Sep-09	06/09/2014 00	14/09/2014 23	12.2	4.4	25	35
17-Jul-01	28/06/2017 00	02/07/2017 12	4.8	6.4	55	39
17-Jul-03	02/07/2017 10	03/07/2017 23	60.2	13.3	20	29
17-Jul-05	04/07/2017 00	06/07/2017 23	17.8	15.8	30	33
17-Jul-21	19/07/2017 00	22/07/2017 23	5.4	5.2	35	38
17-Jul-23	23/07/2017 00	24/07/2017 12	39	9.5	20	30
17-Jul-25	24/07/2017 12	26/07/2017 12	28.8	14.6	10	32
17-Jun-13	12/06/2017 00	14/06/2017 23	2.4	4.2	30	41
17-Jun-19	17/06/2017 00	20/06/2017 23	28.4	6.7	30	32
17-Jun-21	20/06/2017 12	22/06/2017 11	20.6	8.1	30	33
17-May-27	24/05/2017 00	29/05/2017 23	51.2	9.9	50	29

Figura 28. Correlação entre o parâmetro *Initial Range* com a chuva acumulada de 24 e 48 horas antes do evento para Viçosa



Dessa forma, foi determinado que o *Initial Range* ( $y$ ) deve ser estimado através de uma equação logarítmica ( $y = -3,898 \ln(x) + 44,625$ ) dependente da chuva registrada em Viçosa e acumulada 48 horas antes da simulação ( $x$ ). Porém, é importante destacar que tal relação deve ser atualizada conforme a ocorrência de novos eventos. Na **Erro! Fonte de referência não encontrada.** é apresentada a comparação entre os hidrogramas simulados e observados de Viçosa após a calibração com os respectivos valores de Nash-Sutcliffe.

**Figura 29. Hidrogramas observados (obs) e simulados (sim) para Viçosa com os respectivos valores de Nash-Sutcliffe (NS)**



A última sub-bacia calibrada foi Atalaia e na Tabela 21 são apresentados alguns dos parâmetros ajustados. No caso de Atalaia, o parâmetro variável *Initial Discharge* do método *Recession (Baseflow)* foi relacionado com a diferença entre a vazão observada em Atalaia e a vazão observada em Viçosa no primeiro instante da simulação.

Na Tabela 22 são apresentados os parâmetros considerados. Não foram encontradas boas correlações com o *Initial Range*, nem da chuva acumulada de 48 horas e nem do *Initial Discharge*, não sendo possível ajustar uma equação representativa. Dessa forma, optou-se por padronizar esse parâmetro com o valor 40 para todos os eventos, uma vez que para a maioria dos eventos o melhor ajuste está próximo desse valor. Entretanto, é importante destacar que tal parâmetro deve ser revisado conforme a ocorrência de novos eventos.

Na

é apresentada a comparação entre os hidrogramas simulados e observados de Atalaia após a calibração com os respectivos valores de Nash-Sutcliffe.

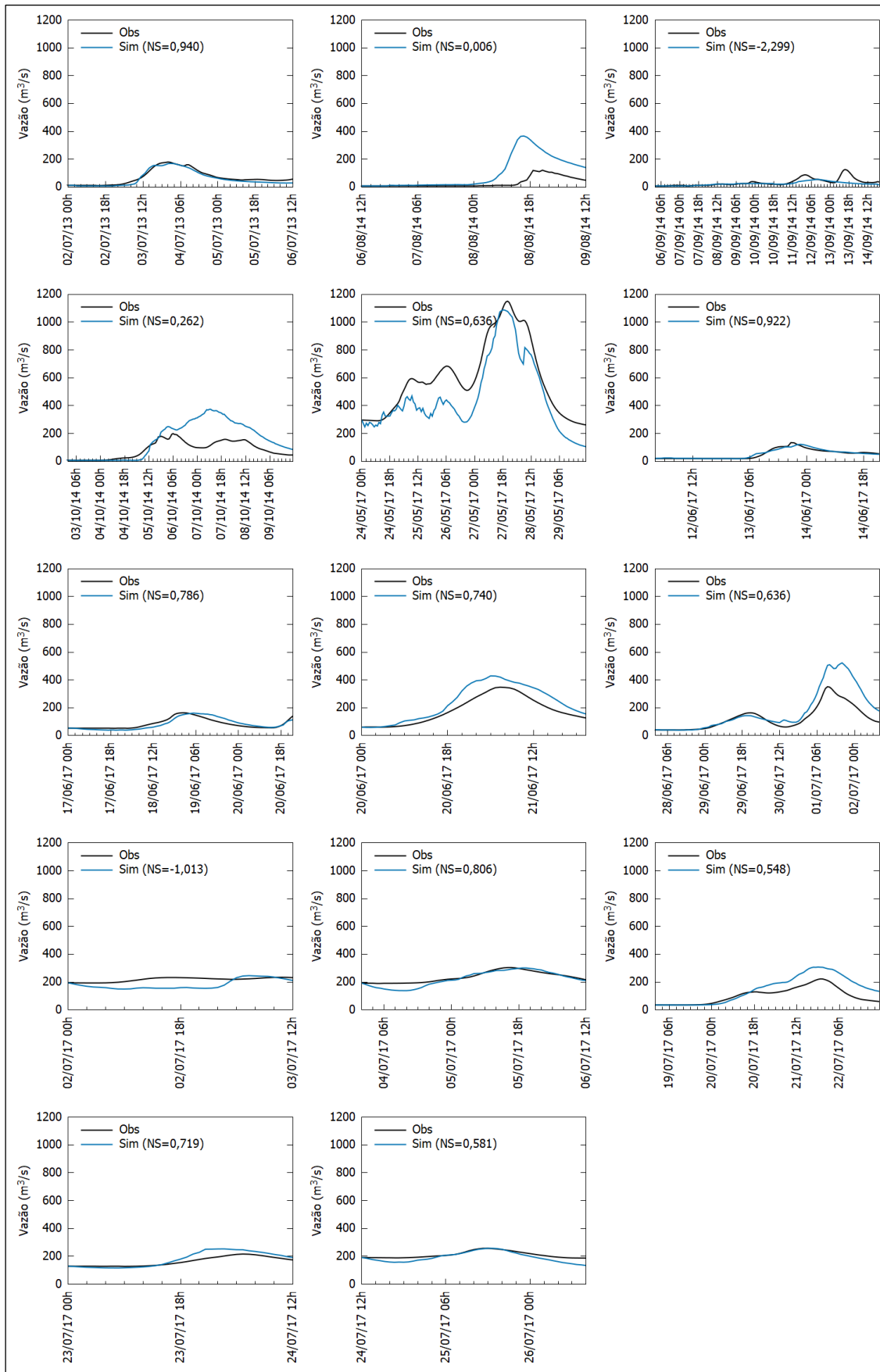
Tabela 21. Parâmetros ajustados para Atalaia

Método	Parâmetro	Valor ajustado
<i>Loss: Exponential</i>	<i>Initial Coef</i>	0,7
	<i>Coef Ratio</i>	1,03
	<i>Exponent</i>	1
	<i>Impervious</i>	0
<i>Transform: SCS UH</i>	<i>Graph Type</i>	PRF 484
	<i>Lag Time (min)</i>	600
<i>Baseflow: Recession</i>	<i>Recession Constant</i>	0,95
	<i>Ratio</i>	0,2

Tabela 22. Chuva da estação de Atalaia acumulada 24 e 48 horas para cada evento e seus respectivos parâmetros variáveis

Evento	Simulação		Chuva acumulada (mm) 48h antes	<i>Initial Discharge</i> (m³/s)	<i>Initial Range</i> (mm)
	Início	Fim			
13-Jul-03	02/07/2013 00	06/07/2013 12	0.1	4.4	35
13-Jul-13	11/07/2013 00	15/07/2013 23	4.8	4.1	55
14-Aug-08	06/08/2014 12	09/08/2014 12	0.1	2.6	0
14-Oct-07	03/10/2014 00	09/10/2014 23	0.1	1.5	50
14-Sep-09	06/09/2014 00	14/09/2014 23	10.6	2.4	41
17-Jul-01	28/06/2017 00	02/07/2017 12	4.4	22.2	40
17-Jul-05	04/07/2017 00	06/07/2017 23	23.6	136.2	40
17-Jul-21	19/07/2017 00	22/07/2017 23	9	17.9	35
17-Jul-23	23/07/2017 00	24/07/2017 12	26.4	81.1	12
17-Jul-25	24/07/2017 12	26/07/2017 12	34.6	130.4	40
17-Jun-13	12/06/2017 00	14/06/2017 23	14.8	11.8	36
17-Jun-19	17/06/2017 00	20/06/2017 23	19.2	33.8	47
17-Jun-21	20/06/2017 12	22/06/2017 11	17	35.3	0
17-May-27	24/05/2017 00	29/05/2017 23	43.2	286.3	50

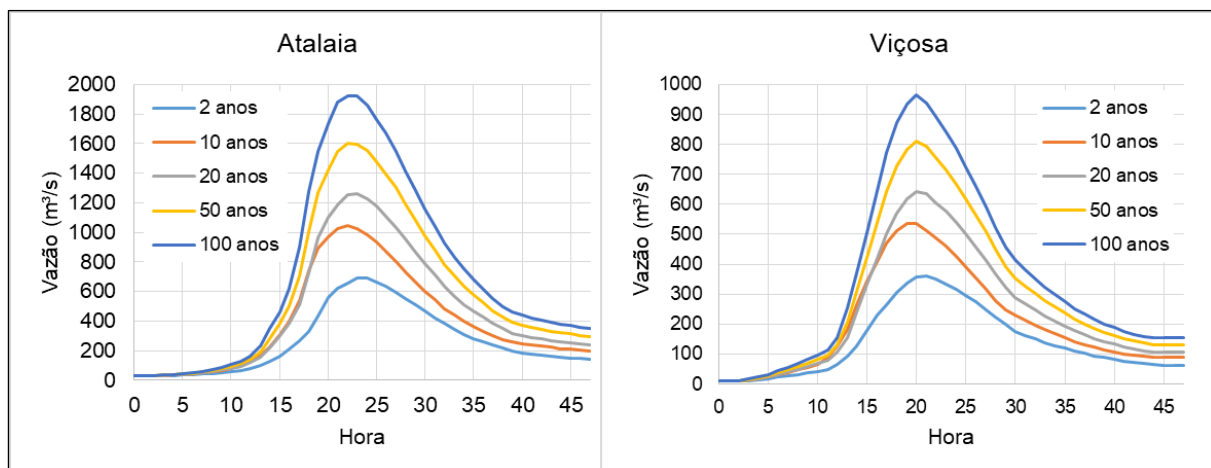
**Figura 30. Hidrogramas observados (obs) e simulados (sim) para Atalaia com os respectivos valores de Nash-Sutcliffe (NS)**





A partir do modelo na sua Versão 2 já calibrada, os hietogramas sintéticos foram simulados, gerando-se os hidrogramas sintéticos para cada tempo de retorno para os municípios de Viçosa e Atalaia, conforme apresentados na Figura 31.

Figura 31. Hidrogramas sintéticos para os diferentes tempos de retorno para Atalaia e Viçosa



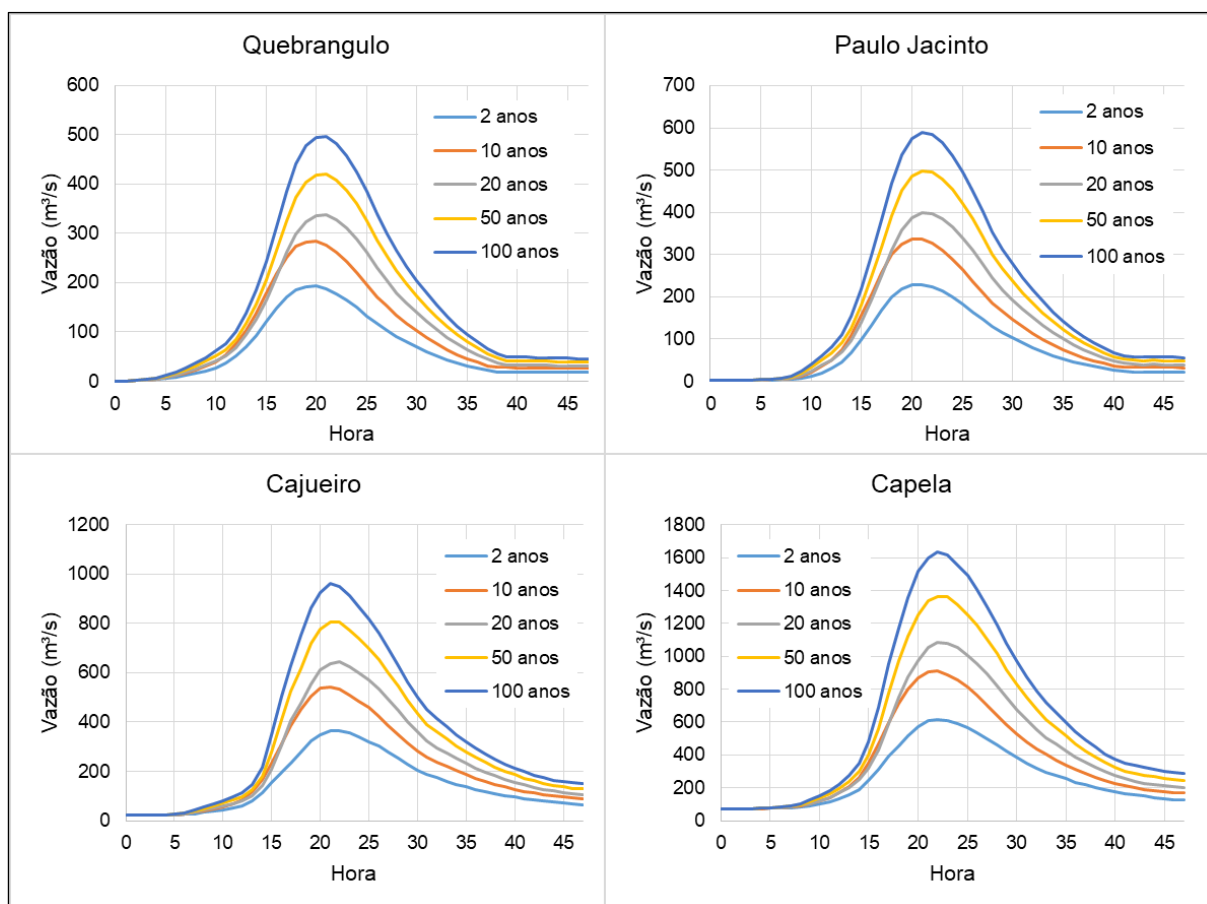
Para se obter os hidrogramas sintéticos dos demais municípios com problemas de inundação, os parâmetros da Versão 3 do modelo foram ajustados subjetivamente conforme os valores apresentados na Tabela 23. Com essa versão, também foi possível gerar os hidrogramas sintéticos para: Quebrangulo, Paulo Jacinto, Cajueiro e Capela (Figura 32).

Tabela 23. Parâmetros ajustados para a Versão 3 do modelo

Método	Parâmetro	Quebran- gulo	Vila São Francisco	Paulo Jacinto	Viçosa	Cajueiro	Capela	Atalaia
-	Área	1345	166	88	416	76	416	139
Loss: Exponential	Initial Coef	0,91	0,91	0,91	0,79	0,79	0,7	0,7
	Coef Ratio	1	1	1	1	1	1,03	1,03
	Exponent	1	1	1	1	1	1	1
	Impervious	0	0	0	0	0	0	0
Transform: SCS UH	Graph Type	PRF 484	PRF 484	PRF 484	PRF 484	PRF 484	PRF 484	PRF 484
	Lag Time (min)	520	520	350	350	600	600	600
Baseflow: Recession	Recession Constant	0,78	0,78	0,78	0,9	0,9	0,95	0,95
	Ratio	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2

Os hidrogramas sintéticos foram utilizados como entradas no modelo hidráulico HEC-RAS para gerar as manchas de inundações de cada município para os diferentes tempos de retorno.

**Figura 32. Hidrogramas sintéticos para os diferentes tempos de retorno para Quebrangulo, Paulo Jacinto, Cajueiro e Capela**



### 3.3. Modelagem hidrodinâmica

A mancha máxima de inundação do evento de 2010 obtida para Atalaia através das simulações com HEC-RAS 2D, é apresentada na Figura 33. Os parâmetros utilizados são apresentados na Tabela 24. Pode-se verificar que a mancha se aproximou satisfatoriamente dos pontos marcados de inundação levantados para o evento de 2010 (pontos em vermelho).

**Tabela 24. Parâmetros ajustados para o município de Atalaia**

Parâmetro	Valor
<i>Slope</i>	0,0005
<i>Friction Slope</i>	0,005
<i>Computation Point Spacing</i>	10
<i>Manning's n</i>	0,06
<i>Initial conditions time (hrs)</i>	96

Já na Figura 34 é apresentada a mancha máxima de inundação do evento de 2017 obtida para Atalaia. Entretanto, para a mancha ser representativa o valor de coeficiente de Manning foi reduzido para 0,04. Tal mancha foi avaliada e considerada representativa para o evento pelo Coordenador de Defesa Civil Massilon Mendes, responsável pelo município de Atalaia. Com isso, foi considerado que os parâmetros ajustados podem ser representativos para o

município de Atalaia. Além disso, devido à ausência de informações dos demais municípios, o mesmo valor de 0,04 de Coeficiente de Manning foi mantido para os demais municípios, alterando-se apenas as inclinações das linhas de energia conforme apresentado na Tabela 25.

Tabela 25. **Parâmetros de inclinação da linha de energia**

<b>Município</b>	<b>EG Slope</b>	<b>Friction Slope</b>
Atalaia	0,0005	0,005
Viçosa	0,004	0,01
Quebrangulo	0,002	0,0005
Paulo Jacinto	0,01	0,005
Cajueiro	0,002	0,01
Capela	0,006	0,005

Figura 33. **Contorno da mancha máxima de inundação do evento de 2010 obtida para Atalaia através das simulações com HEC-RAS e pontos de inundação levantados.**

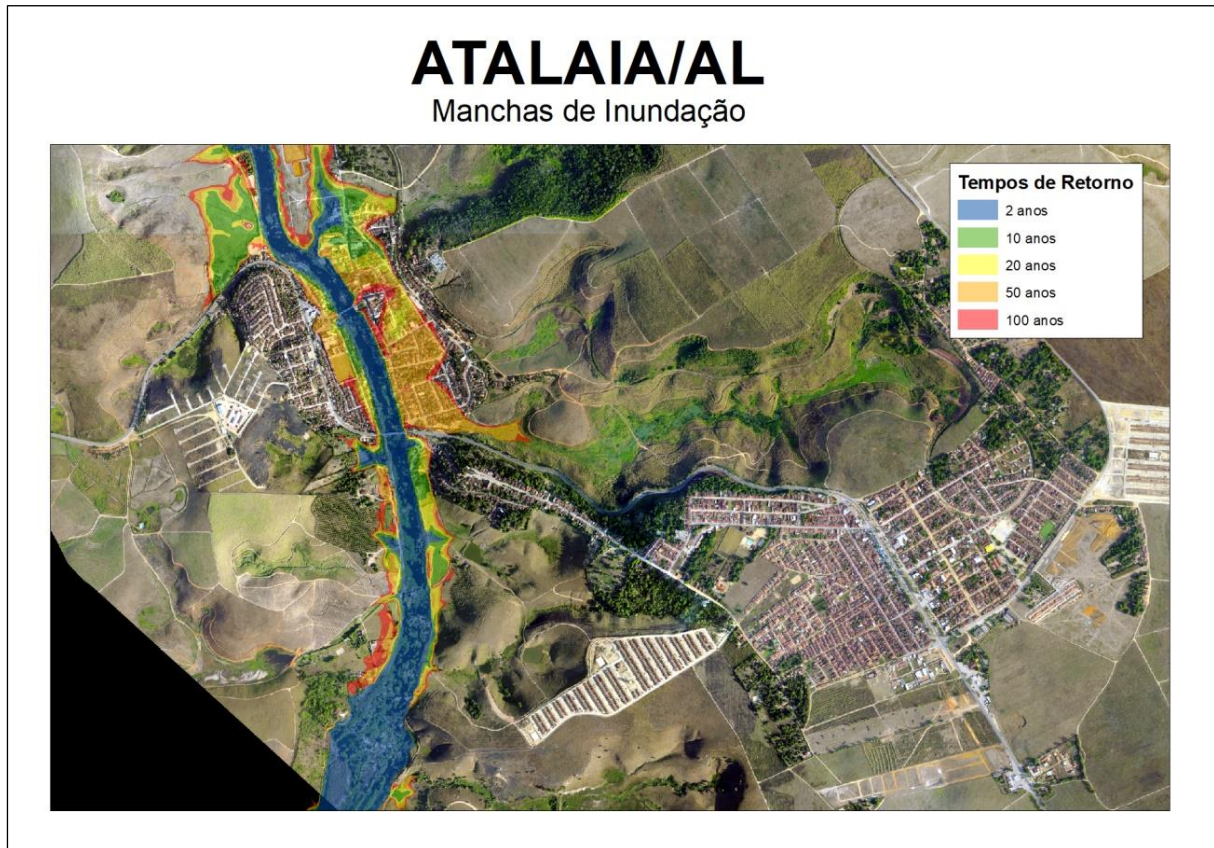


Figura 34. Contorno da mancha máxima de inundação do evento de 2017 obtida para Atalaia através das simulações com HEC-RAS



Foram gerados para todos os municípios os tempos de retorno para 2, 10, 20, 50 e 100 anos. Em Atalaia, os resultados foram bastante satisfatórios, visto que, foram utilizados dados horários observados de vazão gerados com dados de cotas, pela curva-chave proposta. Os resultados apresentaram uma coerência, de acordo com o aumento dos anos do tempo de retorno, conforme a Figura 35.

Figura 35. Manchas de inundações para diferentes tempos de retorno para o município de Atalaia

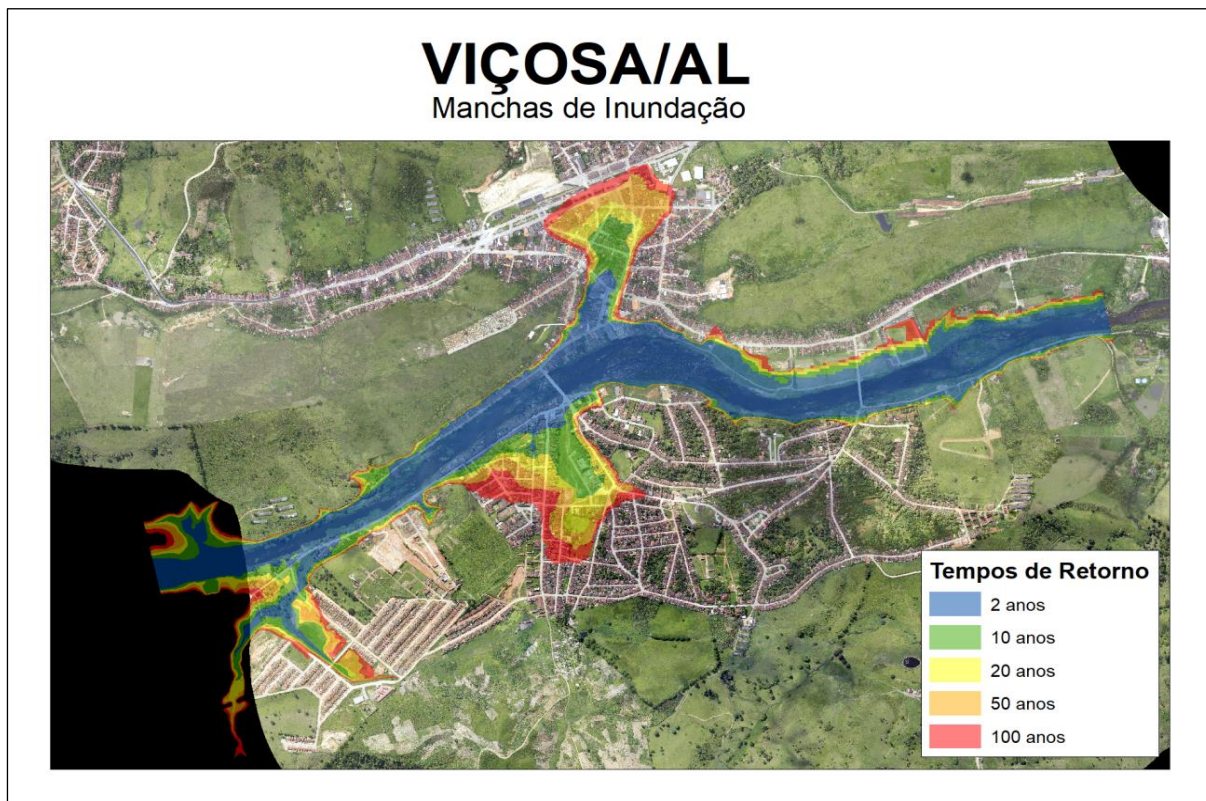


Os resultados simulados para o tempo de retorno de 100 anos apresentaram áreas inundáveis semelhantes aos gerados na grande cheia de 2010, com vazões máximas geradas de 1.861 m<sup>3</sup>/s para este município de estudo.

Nota-se que, as áreas monitoradas ao longo das margens habitáveis do município apresentaram um maior comprometimento em seu curso direito, devido à declividade mais acentuada. Os tempos de retorno de 20, 50 e 100 anos apresentaram dados preocupantes, com o aumento das áreas inundáveis em Atalaia.

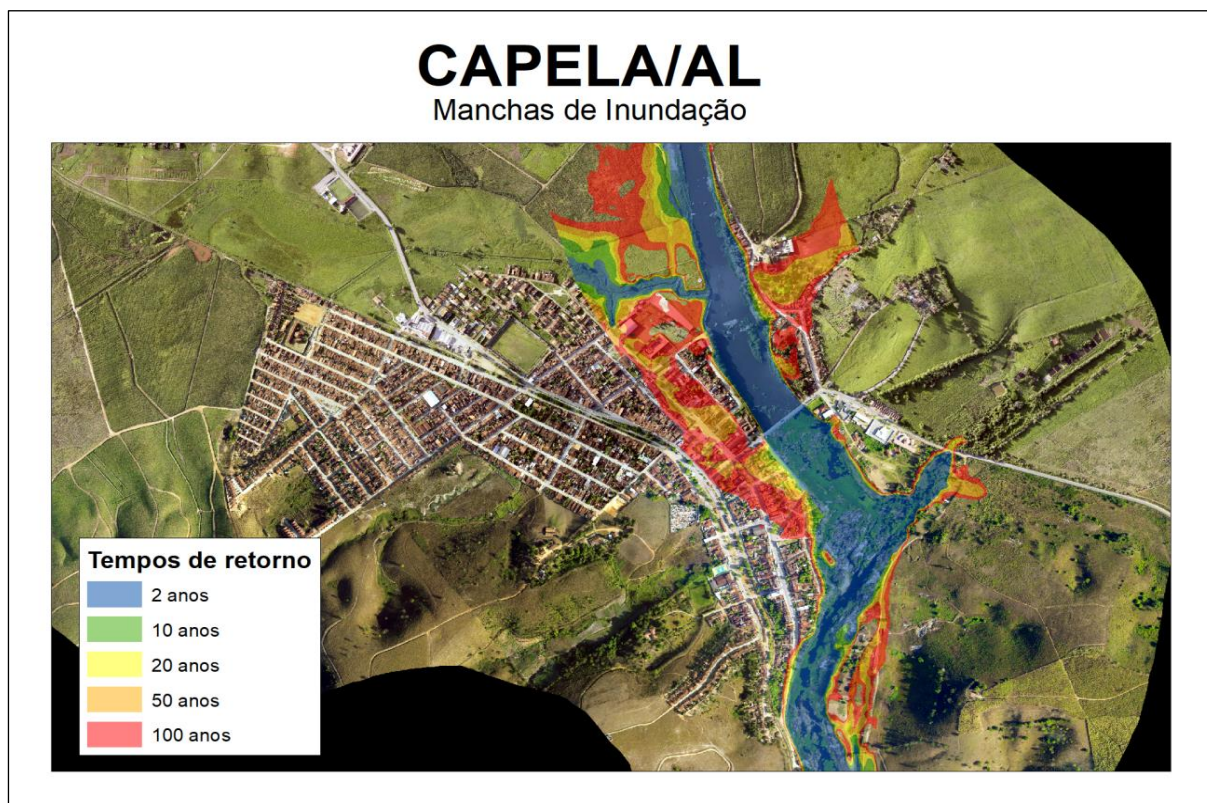
Vale ressaltar que, toda a região de estudo pode apresentar eventos adversos de precipitação em qualquer ano, causados pela influência de fenômenos climático globais como o El Niño e La Niña e regionais, como é o caso dos Vórtices Ciclônicos de altos níveis e Ondas de Leste (evento causador da cheia de 2010), reforçando a necessidade de monitoramento constante para a região.

Figura 36. Manchas de inundações para diferentes tempos de retorno para o município de Viçosa



Para o município de Viçosa a maior vazão apresentada no tempo de retorno de 100 anos foi de 938,7 m<sup>3</sup>/s. Para o período de 2 anos, a maior vazão calculada foi de 360,3 m<sup>3</sup>/s. Observa-se na Figura 36 que o município apresenta uma grande área inundável, em ambas as margens do município. Não foram apresentadas áreas inundáveis significativas para o período de tempo de retorno de 2 anos. Para os períodos a partir de 10 anos, as áreas atingidas já apresentaram polígonos consideráveis de inundação, tendo um grande aumento, se comparada a variação da área dos tempos de retorno de 10 para 100 anos.

Figura 37. Manchas de inundações para diferentes tempos de retorno para o município de Capela

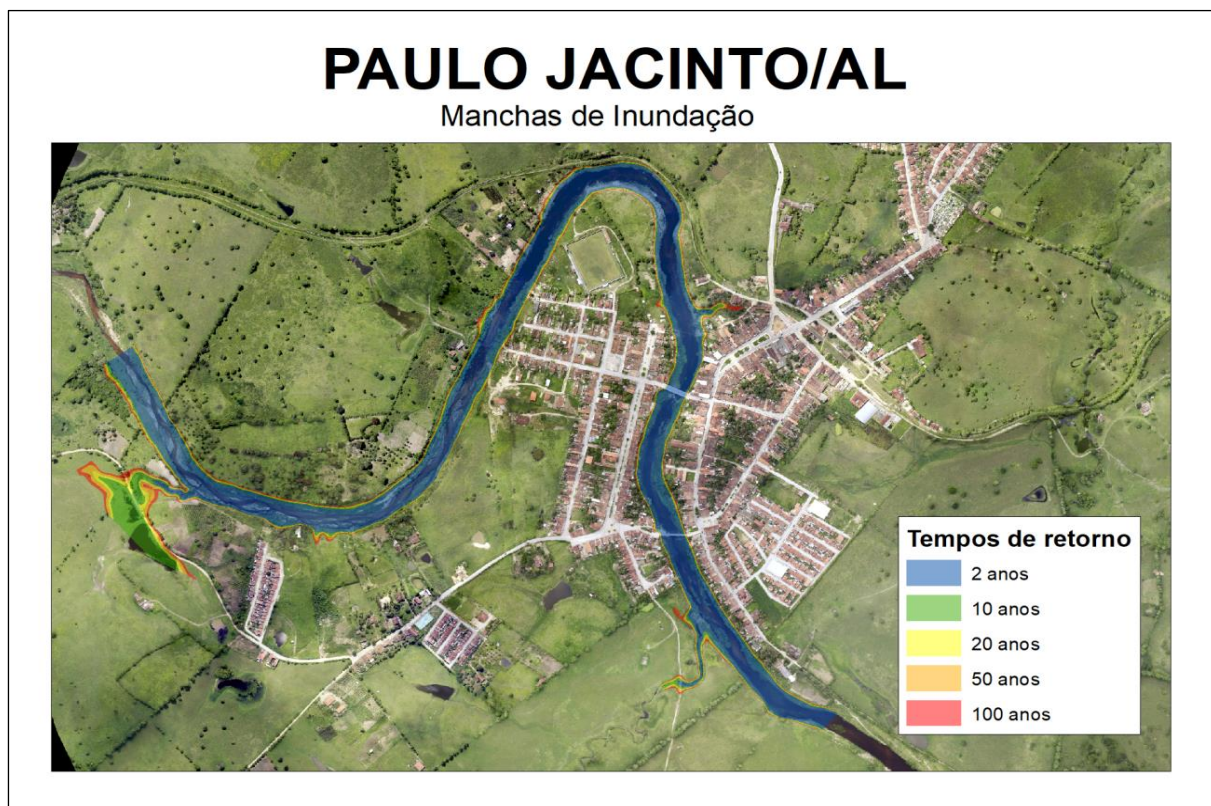


Para o município de Capela, devido à falta de dados de vazão medidos e da curva-chave, foram utilizadas as vazões geradas pelo modelo HEC-HMS. Foram calculados os hidrogramas dos tempos de retorno de acordo com os hietogramas, determinados pela curva IDF do posto de Atalaia, devido a presença de dados de vazão neste município. O mesmo processo foi utilizado para os municípios de Paulo Jacinto, Cajueiro e Quebrangulo, que serão explicados posteriormente.

Em Capela, os resultados apresentados foram satisfatórios, apresentando uma certa coerência, semelhante aos dados calculados para o município de Atalaia. Porém, observou-se que os dados calculados para o tempo de retorno de 2 anos provavelmente apresentaram dados superestimados, visto que as áreas inundáveis indicaram uma extensa região, ao contrário do que foi observado no tempo de retorno de 2 anos de Atalaia (Figura 37).

Estas suposições só poderão ser confirmadas futuramente, quando forem utilizados dados de vazões medidas para a calibração e validação dos resultados. Em Capela, os dados calculados de tempo de retorno para 20, 50 e 100 anos apresentaram resultados aceitáveis para a necessidade atual.

Figura 38. Manchas de inundações para diferentes tempos de retorno para o município de Paulo Jacinto



Para o município de Paulo Jacinto, foi utilizado o mesmo processo de Capela, devido à falta de dados observados de vazão. Neste caso, as vazões calculadas para os tempos de retorno de 2 a 100 anos não apresentaram resultados satisfatórios, visto que, em nenhum caso, houve transbordamento da calha do rio principal, diferentemente de relatos apresentados pelos moradores em viagem de campo realizada pela equipe de pesquisa deste trabalho.

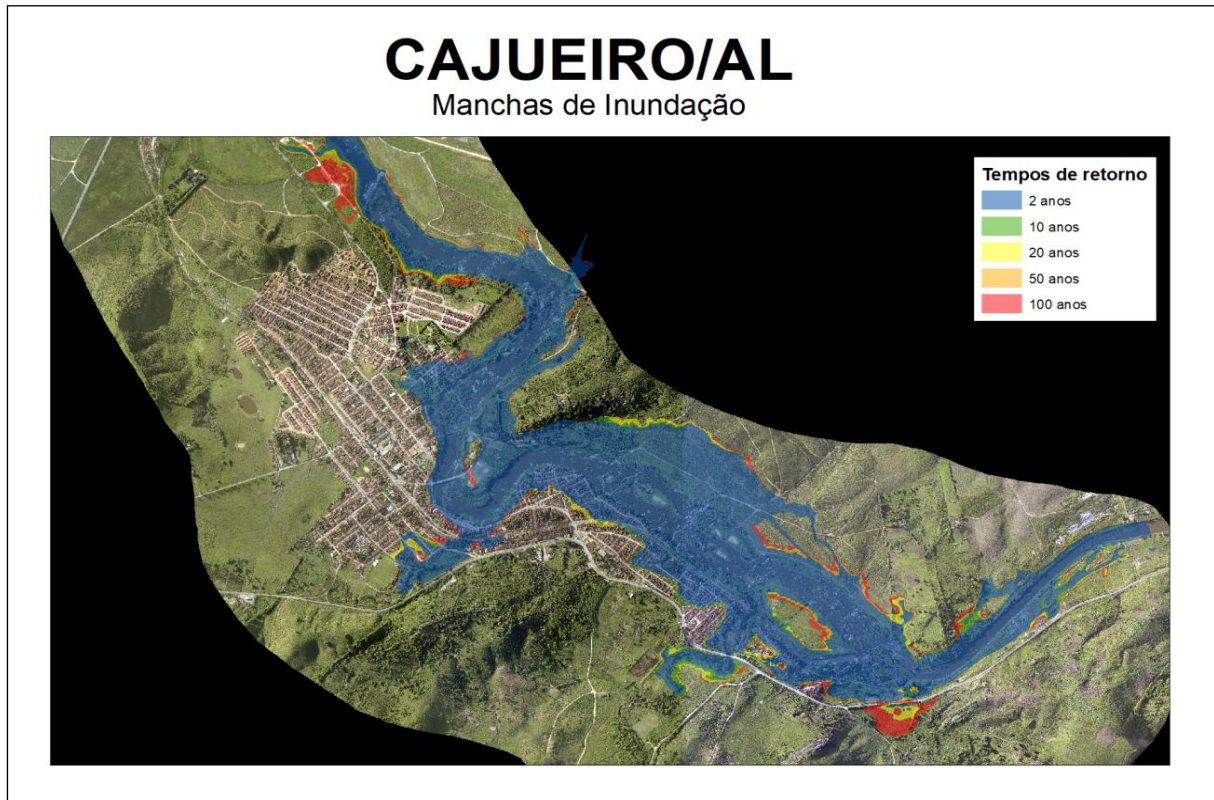
Os moradores relataram que, na grande cheia de 2010, houve diversas áreas inundáveis no município, que causaram grandes estragos materiais em várias residências, o que deveria ter ocorrido nos tempos de retorno de pelo menos 50 e 100 anos.

Para os dados apresentados, não haveria riscos de inundações em nenhum tempo de retorno calculado, ficando os dados subestimados, e inadequados para o sistema de alerta do município (Figura 38).

Mais uma vez, reforça-se a necessidade da medição de vazão no município para o ano de 2020, visando a construção da curva-chave, e conseqüentemente a geração de melhores resultados para o município de estudo.



Figura 39. Manchas de inundações para diferentes tempos de retorno para o município de Cajueiro

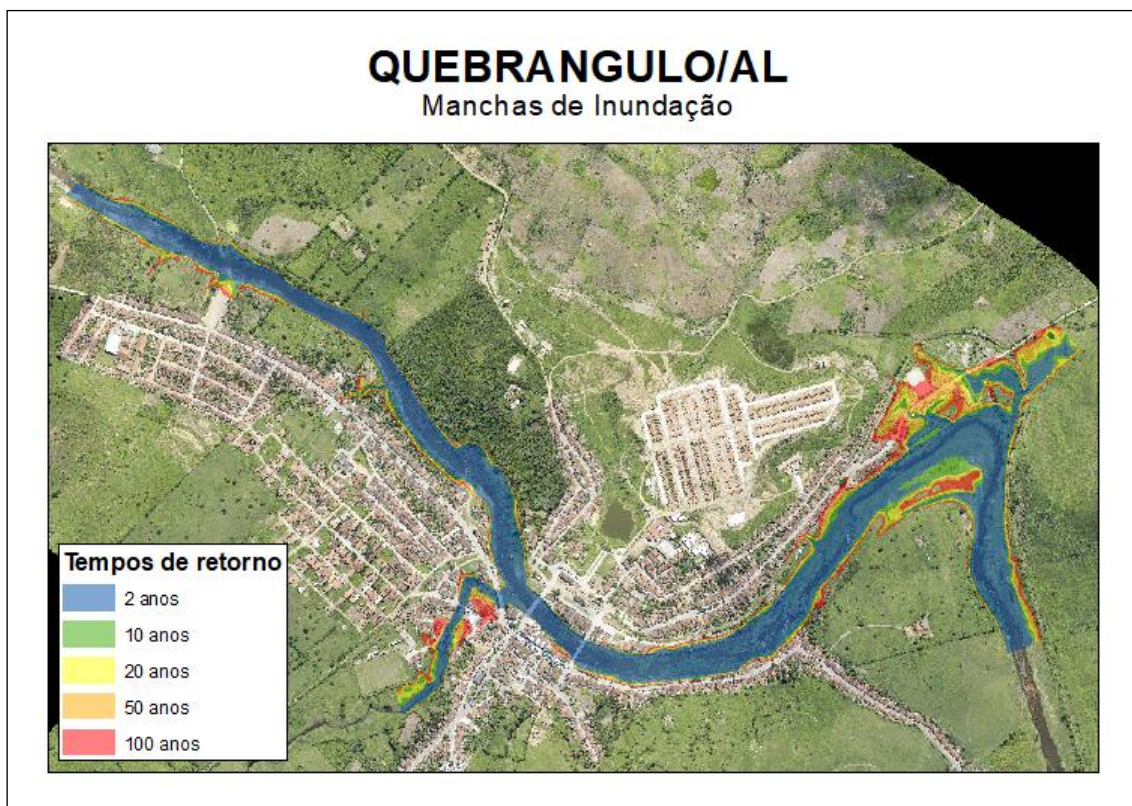


O município de Cajueiro também não apresenta dados observados horários, devido à falta de medição de vazão e curva-chave. Para os cálculos dos Tempos de Retorno, foram realizados os dados gerados pelo modelo hidrológico HEC-HMS, realizando o mesmo procedimento que os outros municípios de estudo que não apresentaram dados de vazão.

Os resultados calculados para este município não foram satisfatórios, visto que o modelo HEC-RAS superestimou os índices de áreas inundáveis a partir do tempo de retorno de 02 anos. A variação dos resultados gerados para os tempos de retorno de 2 a 100 anos foi mínima, confirmando que o modelo não apresenta resultados confiáveis para a utilização de dados não medidos para este município.

Vale ressaltar também que, grande parte das áreas inundáveis apresentadas para Cajueiro foram em regiões onde atualmente não apresentam moradias, não sendo áreas consideradas de riscos eminentes devidos ao aumento do leito principal do rio Paraíba do Meio. A Figura 39 apresenta os resultados para os tempos de retorno de 2, 10, 20, 50 e 100 anos.

Figura 40. Manchas de inundações para diferentes tempos de retorno para o município de Quebrangulo



O estudo realizado no município de Quebrangulo foi desenvolvido da mesma maneira que os demais municípios que não apresentam dados horários medidos de vazão. Vale ressaltar que, este município não apresenta estação hidrológica instalada. A estação mais próxima fica a jusante do município no povoado de Vila São Francisco. Na grande cheia de 2010, a ponte onde estava instalada a estação foi arrastada com a força da inundação, e com isso, no ano de 2011 um novo equipamento foi instalado no povoado citado.

É importante comentar que o município de Quebrangulo é a primeira cidade localizada no estado de Alagoas que apresenta riscos de inundação do estado de Alagoas, com sérios problemas históricos, inclusive com várias mortes. É necessário futuramente a reinstalação de uma estação hidrológica neste município, o que já está sendo discutido com a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA).

Os dados apresentados para este município também não foram satisfatórios, visto que, mais uma vez, o modelo hidrodinâmico HEC-RAS subestimou os resultados apresentados para os maiores tempos de retorno. De acordo com a comparação apresentada com as marcas de cheia do ano de 2010, as áreas inundáveis ficaram abaixo do esperado. Em algumas regiões, o modelo apresentou resultados favoráveis, pois soube captar por exemplo o aumento da altura de água em um braço do rio (um de seus afluentes), em uma região próxima à Igreja do município. Os resultados apresentados para o município de Quebrangulo podem ser visualizados na Figura 40.

#### 4. SUGESTÃO DE APERFEIÇOAMENTO

De acordo com o que foi analisado durante o desenvolvimento do projeto com relação a rede de monitoramento hidrometeorológico instalada na Bacia Hidrográfica do rio Paraíba, serão sugeridas algumas ações, visando o aprimoramento do sistema de monitoramento proposto. Uma das primeiras observações é a reinstalação de uma estação hidrometeorológica em Quebrangulo/AL.

O município apresentava uma estação instalada e monitorada até a grande cheia de 2010, onde o equipamento foi arrastado e as seções destruídas com a força da inundação. Posteriormente, em 2011, foi instalada uma estação hidrometeorológica no povoado de Vila São Francisco, a aproximadamente 7 km a jusante do local da estação de Quebrangulo.

Esta estação é de grande importância para o monitoramento dos municípios abaixo deste ponto, como Viçosa e Atalaia, mas ineficiente para o monitoramento em Quebrangulo. Este município apresenta um histórico de cheias e inundações ao longo do tempo, inclusive com várias mortes registradas, sendo a primeira cidade do estado de Alagoas a fazer parte da região hidrográfica do rio Paraíba do Meio, e essencial para compor o Sistema de Monitoramento de Cheias da região de estudo.

Outra estação hidrometeorológica que requer atenção é a instalada no município de Brejão. Recentemente, foi desenvolvido um projeto para a construção da barragem Brejão a montante da estação, que ainda não foi executado, e futuramente poderá dificultar a análise e utilização dos dados hidrometeorológicos para o sistema de alerta.

Uma ação bastante importante que foi discutida com exaustão entre as bolsistas e os técnicos da Sala de Alerta da Semarh é a necessidade de medições de vazão nos municípios que não possuem curva-chave, como é o caso de Cajueiro, Capela e Paulo Jacinto. Deverão ser feitas campanhas de medições em períodos secos e chuvosos, para os cálculos de vazões, necessárias como dados de entrada nos modelos hidrológico e hidráulico trabalhados neste estudo.

Atualmente, de acordo com o que foi discutido neste relatório, os resultados apresentados não foram considerados satisfatórios para os municípios que não apresentaram dados de vazão. O grande entrave dos técnicos da Semarh é a equipe pequena de campo (3 técnicos) que dá todo o suporte para as manutenções preventivas e corretivas de toda a rede de monitoramento de Alagoas, ficando assim, com dificuldades para o desenvolvimento desta necessidade (medições de vazões) em período curto de tempo.

Porém, os técnicos entenderam a gravidade da carência destes dados, e tentarão sanar o problema, com a maior brevidade possível. Vale ressaltar que, para a utilização destes dados, faz-se necessário várias medições. A ideia é utilizar os anos de 2020 e 2021 para as medições, e posteriormente a estas datas, iniciar a utilização das curvas-chave desenvolvidas com os dados obtidos.

Outro ponto importante que é necessário se comentar neste relatório é com relação aos dados horários em tempo real disponibilizados pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA). Atualmente, foi desenvolvido pela bolsista Anne Negrão, um programa/código que é responsável pelo acesso aos dados via FTP diretamente do Servidor da Semarh que, por sua vez é onde são armazenados todos os dados disponibilizados pela ANA.

Porém, foi transmitido ao analista de sistemas da Sala de Alerta, Brunno Castro, que brevemente a ANA deixará de disponibilizar estes dados da maneira que é feita atualmente para todo o Brasil. Será necessário um entendimento por parte da ANA/Semarh-AL para ver a melhor maneira de disponibilizar estes dados. É possível que seja necessário executar outro tipo de programação para a utilização destes dados pelo programa HEC-HMS, ficando esta função não mais de responsabilidade das bolsistas do projeto atual.

Atualmente, a equipe que trabalha na Sala de Alerta da Semarh, consta de um meteorologista responsável pelo Banco de Dados; 2 meteorologistas responsáveis pelo monitoramento do tempo (um deles também responsável pelas viagens de campo); um meteorologista responsável pela previsão climática; um Analista de Sistemas (responsável também pelas viagens de campo) e um Meteorologista (Coordenador geral da Sala de Alerta e que também participa das viagens a campo). Nenhum dos técnicos citados tem experiência em modelagem hidrológica e hidrodinâmica, sendo necessário incluir na equipe técnica da Sala de Alerta um pesquisador com experiência nesta área, para dar continuidade aos trabalhos desenvolvidos nesta pesquisa.

A Sala de Alerta atualmente conta com uma excelente infraestrutura, tendo 2 salas disponibilizadas para a sua equipe (uma sala para os técnicos e uma sala de reunião). Porém, a equipe está crescendo, e será necessária futuramente a disponibilização de mais uma sala para poder abrigar os novos técnicos que serão responsáveis pelo monitoramento hidráulico e hidrológico do estado de Alagoas, visto que, para o Sistema de Monitoramento de Cheias ser eficaz, é essencial que sejam contratados mais técnicos para o desenvolvimento dos trabalhos propostos.

Com relação às viagens de campo da equipe da Sala de Alerta, a Semarh disponibiliza as diárias e combustível para estas funções. Porém, foi observado pela bolsista local, que, mesmo existindo uma programação mensal e anual das manutenções, em alguns momentos, faltou cota de combustível, e as diárias não foram liberadas em tempo, dificultando o trabalho desenvolvido pelos técnicos, principalmente no que diz respeito às manutenções corretivas. As caminhonetes disponibilizadas pela ANA também não ficam inteiramente à disposição da Sala de Alerta, sendo utilizadas também para outros fins.

Vale ressaltar que a Sala de Alerta possui um apoio irrestrito por parte dos gestores da Semarh, porém, sugere-se que seja feito um planejamento de disponibilização de cotas de diárias, combustível e utilização de automóvel, e material de consumo exclusivamente para a manutenção preventiva e corretiva da rede de monitoramento da Secretaria, visando assim o bom aproveitamento dos resultados gerados neste projeto.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O curto período de monitoramento telemétrico na bacia do rio Paraíba do Meio, que apresenta dados horários a partir do ano de 2011 para alguns municípios estudados, cobrindo apenas um período de seca da região, dificultou a calibração do modelo hidrológico, uma vez que não se tem eventos representativos para serem utilizados como base. O único evento significativo que foi registrado pela telemetria foi o evento de maio de 2017, sendo utilizado como referência na calibração. Vale considerar que o evento de 2017, apesar de ser o mais extremo registrado, ainda não é o mais representativo para inundação.

Pela bacia estar localizada na transição do semiárido para uma região litorânea mais úmida, características mais complexas da sua hidrologia parecem interferir na modelagem, sendo necessário considerar efeitos como: o armazenamento de água e vários pequenos açudes, comuns no semiárido; a distribuição dos pluviômetros apenas em locais mais úmidos, não representando o semiárido, e conseqüentemente superestimando a chuva; e, até mesmo, deslocamento de água através de aquífero. Além disso, a baixa frequência de medição de vazão, sendo realizadas apenas durante cotas baixas do rio, gera grande incerteza nas vazões extremas, uma vez que a curva-chave pode não ser representativa.

As diversas incertezas envolvidas na modelagem hidrológica dificultam a utilização dos hidrogramas simulados para a calibração do modelo hidráulico. Dessa forma, municípios que não possuem monitoramento fluviométrico com medição de vazão podem ter o modelo hidráulico prejudicado. Espera-se que, a partir do desenvolvimento deste trabalho com as suas sugestões de aperfeiçoamento, sejam encontradas as melhores alternativas para o desenvolvimento do Sistema de Monitoramento de Cheias para os próximos anos, onde, de acordo com a alimentação do sistema proposto com mais dados disponíveis, haja uma melhoria no desenvolvimento dos resultados ao longo dos próximos 5 anos.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao IPEA e à ANA, que através do projeto “Aperfeiçoamento de Ferramentas Estaduais de Gestão de Recursos Hídricos no Âmbito do Progestão” fomentam o desenvolvimento desse trabalho. Os autores também agradecem os gestores e técnicos da Sala de Alerta da Semarh-AL por disponibilizarem prontamente todas as informações necessária para o desenvolvimento do projeto e estarem abertos para esclarecimentos de dúvidas.

## REFERÊNCIAS

ALVES, C.D.; PEREIRA, M.N.; FLORENZANO, T.G.; SOUZA, I.M. Análise orientada a objeto no mapeamento de áreas urbanas com imagens LANDSAT, V.15, n.01, p.120-141. Curitiba/PR, Brasil. jan-mar, 2009, Boletim de Ciências Geodésia.

ANA. Orientações para Consistência de Dados Fluviométricos. Superintendência de Gestão da Rede Hidrometeorológica. 2012.

ANA. Base Hidrográfica Ottocodificada. 2ª edição. 2015.

CARVALHO, W. M.; FRAGOSO JÚNIOR, C. R. Efeito da Mudança da Curva-Chave: Detecção de Graves Inconsistências de Estimativas de Vazões no Posto Fluviométrico de Atalaia/AL. XIV Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste. Maceió, AL, 2018.

CARVALHO, W. M.; GOMES, Y. R. M.; LOPES, L. L. F.; FRAGOSO JÚNIOR, C. R. Estimativa de Precipitação Máxima Diária Anual e Equação de Chuvas Intensas para o Município de Atalaia/AL a partir da Distribuição GEV. XII Encontro Nacional de Águas Urbanas. Maceió, AL, 2018.

DA HORA, H.S. *Mapeamento e avaliação do risco a inundação do Rio Cachoeira em trecho da área urbana do município de Itabuna/BA*. 101p. 2009. Dissertação de mestrado – Universidade Estadual de Santa Cruz, Ilhéus, BA, Brasil, 2009.

FLEMING, M.J.; DOAN, J.H. HEC-GeoHMS: Geospatial Hydrologic Modeling Extension. Version 10.1. U.S. Army Corps of Engineers. Hydrologic Engineering Center. Davis, 2013.

JACCON, G.; CUDO, K.J. Curva-chave: Análise e Traçado. DNAEE, Brasília, 1989.

LOU, R.F. *Modelagem Hidrológica Chuva - Vazão e Hidrodinâmica aplicada na Bacia Experimental do Rio Paraibinha/RJ*. 2010. 190p. Dissertação de Mestrado - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro-RJ, Brasil. 2010.

MAKTAV, D. Remote Sensing of Urban Areas. *International Journal of Remote Sensing*, Local v.26, No.4, February, 2005.

MEDEIROS, F.C. (2017). *Estudos das Características Físicas do Solo na Parametrização de Modelos Hidrológicos visando a prevenção de Desastres Naturais na Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Meio no Estado de Alagoas, Brasil*. 2017. Tese de Doutorado - Universidade de Évora - Portugal. 262p. 2017.

MULONGO, H. *Estudo de inundação na bacia do campus da UFSC*. 2012.171 p. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, Brasil, 2012.

NASCIMENTO.P.T.S.; XAVIER, R.A. Análise pluviométrica do Estado de Alagoas. In: Simpósio Alagoano de Gestão Ambiental. 2010, Arapiraca, Alagoas, Brasil.

NEGRAO, A.C.; MEDEIROS, F.C.; OLIVEIRA, J.G.; PINHO, V.N. (2019). Expedição de Campo pela Bacia do Rio Paraíba do Meio/AL. XXIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Foz do Iguaçu, PR, novembro de 2019.

NEGRÃO, A.C.; PRADO, M.C.R.; RODRIGUEZ, D.A.; CARRIELLO, F.; CARAM, R.O.; TOMASELLA, J. (2016). “Expedição pela Bacia do Rio Paraíba do Sul” in III Simpósio Sobre Sistemas Sustentáveis, Porto Alegre, RS.

OLIVEIRA, D.L.; SOUZA, V.C.B.; FRAGOSO JR., C.R. (2014). “Análise Hidrológica da Cheia Excepcional Ocorrida em Junho de 2010 nas Bacias dos Rios Mundaú e Paraíba do Meio em Alagoas e Pernambuco”. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*. Volume 19 n.3 pp. 279-293.

PORTO, R.M. *Hidráulica Básica*. EESC-USP, 2006.

RANTZ, S.E. *et al.* 1982. *Measurement and Computation of Streamflow - Volume 2. Computation and Discharge*. USGS Water Supply Paper 2175.

ROZALIS, S.; MORIN, E.; YAIR, Y.; PRICE, C. Flash flood prediction using an uncalibrated hydrological model and radar rainfall data in a Mediterranean watershed under changing hydrological conditions. *Journal of Hydrology*, n. 394, p. 245–255, 2010.

SARTORI, A. *Avaliação da classificação hidrológica do solo para a determinação do excesso de chuva do método do serviço de conservação do solo dos Estados Unidos*. 2004. 189p. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, Brasil, 2004.

SANTOS, L.L. MODELOS HIDRÁULICOS-HIDROLÓGICOS: Conceitos e Aplicações. RBGF- Revista Brasileira de Geografia Física, Recife, PE, Brasil, Vol.2, n.03. 01-19p. set-dez, 2009.

SANTOS, P.M.P. *Cheias e Inundações: Avaliação, Impactos e Instrumento para a Gestão do Risco*. 2015. 282p. Tese de Doutorado – Instituto de Geografia e Ordenamento do Território, Universidade de Lisboa, Lisboa.

SAMUELS, W. B. ICWater: Incident Comlobal Terrestrial Network for River Discharge G. A. Artan, S. Pervez, C. Bandaragoda and K. Asante, “A Wide-Area Flood ahadur, D. E. R. D. Macuacua, G. A. Artan, R. W. Lietmand Tool for Protecting Drinking Water. In: Proceedings ESRI International User Conference, 2005, San Diego, Anais. San Diego, 2005.

SCHARFFENBERG, B.; BARTLES, M.; BRAUER, T.; FLEMING, M.; KARLOVITS, G. Hydrologic Modeling System HEC-HMS User’s Manual. Version 4.3. U.S. Army Corps of Engineers. Hydrologic Engineering Center. Davis, 2018.

TOMINAGA, L.K.; SANTORO, J., AMARAL, R. Desastres naturais: conhecer para prevenir. Instituto Geológico. 2009. 196p. Disponível em:  
<<http://www.igeologico.sp.gov.br/downloads/livros/DesastresNaturais.pdf>>.

TUCCI, C. E. M. Hidrologia: Ciência e Aplicação. 4° ed. Rio Grande do Sul, UFRGS. 2009. 944p.

U. S. ARMY CORPS OF ENGINEERS (2008) - “HEC-RAS. Hydrologic Modeling System – User’s Manual (version 2.1.2)”, Hydrologic Engineering Center, Davis.

U. S. ARMY CORPS OF ENGINEERS - “HEC-HMS. River Analysis System. – User’s Manual (version 3.5)”. Hydrologic Engineering Center, Davis. 2010.

VALERIANO, M. M. TOPODATA: Guia para Utilização de Dados Geomorfológicos Locais. INPE-15318-RPQ/818. 2008.

XAVIER, A.C., SCANLON, B.R. and KING, C.W. Conjunto de dados de variáveis meteorológicas diárias no Brasil (1980-2013). CLIMA Policy Brief, Centro Clima/COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 4 p. 2016.



## APÊNDICE A – Expedição de Campo Bacia do Rio Paraíba do Meio

A caracterização de bacias hidrográfica - estudo inicial comumente empregado em projetos na área de recursos hídricos - além da análise de dados, mapas e imagens em escritório, pode ser ricamente complementada com expedições de campo, percorrendo pontos da bacia que sejam importantes de acordo com o foco do estudo (Negrão *et al.*, 2016).

No caso do mapeamento de áreas de risco a inundações, a visita aos municípios, para o reconhecimento das áreas atingidas e contato com a população ribeirinha e gestores municipais, pode trazer informações-chave sobre os eventos já ocorridos no local, assim como sobre a susceptibilidade da população. Dessa forma, uma expedição de campo foi realizada pela bacia do rio Paraíba do Meio com foco no reconhecimento dos problemas de inundação que assolam os municípios ribeirinhos.

A Expedição de Campo foi realizada nos dias 18 e 19 de setembro de 2018. No primeiro dia, o grupo foi composto pelos técnicos da Semarh-AL, José Gino de Oliveira e Vinicius Pinho, pelo Coordenador Geral do Projeto, Antenor Lopes de Jesus Filho, e pelas bolsistas do projeto, Anne Caroline Negrão e Fabiana Carnaúba. No segundo dia, o Coordenador Regional de Defesa Civil responsável pelo Vale do rio Paraíba, Massilon Mendes, integrou o grupo, substituindo Vinicius Pinho.

A seleção dos municípios visitados durante a expedição de campo considerou a frequência e a severidade das inundações, a disponibilidade de monitoramento fluviométrico e o interesse da Semarh-AL pelo mapeamento de áreas de inundação. Esses municípios foram: Quebrangulo, Vila São Francisco, Paulo Jacinto, Viçosa, Cajueiro, Capela e Atalaia.

O planejamento das rotas foi realizado previamente com o auxílio do *Google My Maps*, onde foram verificados os melhores percursos e estimados os tempos necessários para visitar os locais de interesse. Também foram agendadas reuniões com gestores municipais, para que os mesmos pudessem indicar os pontos críticos e as marcas de inundação na cidade, além de relatar suas experiências com os eventos ocorridos.

Complementarmente, para auxiliar a identificação de pontos de interesse durante a expedição, uma base de dados contendo informações sobre a bacia foi organizada. Entre as informações utilizadas citam-se: bases cartográficas de hidrografia, limites da bacia hidrográfica e rodovias; localização das estações de monitoramento hidrometeorológico; imagens do satélite Landsat do dia 8 de novembro de 2017 compostas com bandas RGB654, que facilitam a identificação da cobertura do solo; e as rotas planejadas.

Os seguintes equipamentos foram utilizados durante a expedição: GPS de mão *Garmin* modelo *eTrex* acoplado a um computador notebook; conversor de bateria de carro, para manter carregado o computador durante a viagem; e caderno de campo. Os registros fotográficos foram feitos com os celulares dos participantes. O software *Global Mapper 11* foi utilizado para acessar o banco de dados e traçar em tempo real o percurso percorrido, fazendo anotações sobre pontos de interesse. Também foram registrados, durante caminhadas fora

do carro, pontos com o GPS em locais aonde as inundações chegaram. Boa parte dos deslocamentos a pé pelas áreas de risco foi acompanhada por um gestor municipal ou um representante, que indicava as áreas críticas e as marcas de cheias. Também foram obtidas informações com os moradores locais.

Após a expedição, os pontos coletados com o GPS e as rotas percorridas foram extraídos e organizados, juntamente com as anotações realizadas durante a viagem, com auxílio do *Google Earth Pro*.

O primeiro município visitado foi Quebrangulo, um dos mais afetados pela cheia de 2010. Na Figura 41 são apresentados os pontos marcados. O Ponto A é a Secretária Municipal de Agricultura e Meio Ambiente, que durante o evento de 2010 ficou coberta de água até o teto. O Ponto B fica próximo à confluência do rio Quebrangulinho com o rio Paraíba do Meio, onde normalmente inicia-se a inundação. Próximo desse ponto, durante o evento de 2010, a água chegou a atingir a grade branca do sobrado amarelo da

Figura 42. Durante as inundações, devido ao represamento do rio Quebrangulinho, a água começa escoar pela rua a partir do Ponto C. Próximo à Igreja Matriz, no Ponto D, segundo relatos de uma moradora da região, a água subiu cerca de 80 cm na sua casa durante o evento de 2010 (Figura 43), o Ponto E é o limite que a linha da água chegou naquela rua. O Ponto F está localizado sobre a ponte atual, de onde é possível observar os restos da antiga ponte, destruída pela inundação de 2010, e as marcas da cheia cobrindo as janelas das casas localizadas sob a margem do rio. Também no Ponto F fica localizada a PCD do CEMADEN.

Figura 41. Pontos coletados no município de Quebrangulo/AL



**Figura 42. À esquerda, indicação do nível que a água chegou durante o evento de 2010 (Ponto B); e à direita, o local onde se inicia a inundação devido ao represamento do rio Quebrangulinho (Ponto C)**



**Figura 43. Indicação da casa onde o nível d'água atingiu 80 cm durante a inundação de 2010 (Ponto D)**



De modo geral, observou-se que muitas casas e o próprio comércio de Quebrangulo encontram-se nas margens do rio. Diversas casas foram levadas durante a cheia de 2010, porém, várias estão sendo reconstruídas nas mesmas áreas de risco (

---

Figura 44). No povoado Vila de São Francisco, pertencente a Quebrangulo/AL, apenas foi visitada a estação de monitoramento da ANA.

Figura 44. Casas destruídas pela enchente de 2010 e novas construções nas margens do rio Paraíba do Meio em Quebrangulo/AL



No município de Paulo Jacinto/AL (Figura 45), o Ponto H indica onde normalmente se inicia a inundação. Já no Ponto I, ficam localizadas as primeiras casas atingidas durante a cheia de 2010 (Figura 46). No Ponto J foi possível observar que o leito do rio é mais arenoso, onde, inclusive, é feita extração de areia com carroça. O Ponto K é a ponte da cidade, reconstruída após a cheia de 2010, e onde fica instalada a PCD.

Figura 45. Pontos coletados no município de Paulo Jacinto/AL



Figura 46. À esquerda, local onde normalmente começa a inundação em Paulo Jacinto/AL (Ponto H); e à direita, as primeiras casas atingidas pela inundação de 2010 (Ponto I)



Na Erro! Autoreferência de indicador não válida. é indicado, nos pilares dessa ponte, o nível que a água chegou durante a cheia de 2017. Também na Erro! Autoreferência de indicador não válida., é possível observar as moradias construídas bem próximas ao rio com algumas marcas de inundação ainda presentes.

Figura 47. À esquerda, a ponte da cidade (Ponto K) onde está localizada a PCD e é indicado o nível que a água chegou durante a cheia de 2017; à direita, moradias construídas próximas do leito do rio (Ponto L)



Em Viçosa/AL (Figura 48), segundo moradores locais, o Ponto M foi onde a linha d'água chegou durante a inundação de 2010 e o Ponto N é o fim dessa rua em frente ao rio. Os moradores relataram que aquela rua foi seriamente atingida pela inundação e houve dificuldade na retirada dos moradores, pois o seu acesso é apenas por escadas estreitas.

Figura 48. Pontos coletados no município de Viçosa/AL



O Ponto O é a parte mais baixa da cidade, cujas casas também foram atingidas (**Erro! Autoreferência de indicador não válida.**). As casas localizadas na rua do Ponto P foram inundadas até metade das janelas. No Ponto Q fica a principal ponte da cidade, onde está instalado um sensor de nível. Durante a cheia de 2010, o nível da água chegou ao limite dessa ponte. O Ponto R também apresenta problemas de inundação.

Figura 49. À esquerda, vista para o rio a partir do ponto mais baixo da cidade (Ponto O); e à direita, ponte principal de Viçosa/AL, onde está instalado o sensor de nível



Já no segundo dia de viagem, em Cajueiro/AL, os moradores da região do Ponto B ( No Ponto A, uma moradora indica até onde o nível d'água chegou na cheia de 2010 (**Erro! Autoreferência de indicador não válida.**). A vista sobre a ponte do Ponto C, permitiu observar



as diversas casas construídas muito próximas do leito do rio e sujeitas a inundações (Figura 52).

Figura 51. À esquerda, moradias em área de risco a inundação em Cajueiro/AL; e à direita, moradora indicando onde a água chegou durante a cheia de 2010 (Ponto A)

), que estavam lavando roupa e utensílios domésticos no rio, mostraram-se cientes dos riscos de inundação a que estão sujeitos e relataram que aguardam a oportunidade de serem realocados para moradias populares fora da área de risco.

Figura 50. Pontos coletados no município de Cajueiro/AL



No Ponto A, uma moradora indica até onde o nível d'água chegou na cheia de 2010 (**Erro! Autoreferência de indicador não válida.**). A vista sobre a ponte do Ponto C, permitiu observar as diversas casas construídas muito próximas do leito do rio e sujeitas a inundações (No Ponto D, segundo relatos dos moradores, a água chegou até a porta da igreja, atingindo tanto moradias como o próprio comércio de Cajueiro (**Erro! Autoreferência de indicador não válida.**). Próximo desse local, um morador nos convidou para entrar em sua casa, por onde era possível ver pela janela o rio bem próximo. Ele relatou que perdeu tudo na cheia de 2010 e que precisou reconstruir parte de sua casa. Esse morador também nos entregou um CD com vídeos e imagens dessa cheia, no qual foi possível comprovar que boa parte da cidade foi destruída nesse evento.

Figura 52).

Figura 51. À esquerda, moradias em área de risco a inundação em Cajueiro/AL; e à direita, moradora indicando onde a água chegou durante a cheia de 2010 (Ponto A)



No Ponto D, segundo relatos dos moradores, a água chegou até a porta da igreja, atingindo tanto moradias como o próprio comércio de Cajueiro (**Erro! Autoreferência de indicador não válida.**). Próximo desse local, um morador nos convidou para entrar em sua casa, por onde era possível ver pela janela o rio bem próximo. Ele relatou que perdeu tudo na cheia de 2010 e que precisou reconstruir parte de sua casa. Esse morador também nos entregou um CD com vídeos e imagens dessa cheia, no qual foi possível comprovar que boa parte da cidade foi destruída nesse evento.

Figura 52. À esquerda, vista da ponte onde foi possível observar diversas casas próximas ao leito do rio (Ponto C); e à direita, indicação do nível d'água na porta da igreja na enchente de 2010 e as casas e comércio de Cajueiro/AL que foram atingidos (Ponto D)



Em Capela/AL, normalmente, a inundação inicia-se no Ponto E (Figura 53). Nesse ponto, quando o nível do rio está muito alto, a água escoar para a rua através de uma abertura na parede do canal (Figura 54). O Ponto F foi até onde o nível d'água chegou e o Ponto G foi o local de onde os primeiros moradores foram retirados durante a cheia de 2010. O Ponto H é outra área que também tem problemas com inundação, sendo que, na cheia de 2017, o calçamento foi arrancado (Figura 54).

Figura 53. Pontos coletados no município de Capela/AL



Figura 54. À esquerda, abertura na parede do canal do rio por onde normalmente a água começa a transbordar (Ponto E); e à direita, calçada arrancada pela cheia de 2017 (Ponto H)



A expedição de campo permitiu o contato com os gestores municipais e moradores locais, possibilitando a aquisição de novas informações, que irão auxiliar a demarcação das áreas susceptíveis à inundação. Os pontos coletados podem ajudar na calibração de modelos hidrodinâmicos e assim melhor delimitar as áreas de risco.

O contato com a população deixa evidente o drama vivido por essas famílias e a necessidade do monitoramento em tempo real, do estabelecimento de áreas de risco e, principalmente, da melhoria da gestão urbana. A gestão municipal deve buscar o deslocamento da

comunidade para áreas de menor risco. Porém, para a ação ser efetiva, deve-se considerar o complexo inter-relacionamento social da comunidade e do comércio local.

## **APÊNDICE B – Manual do Modelo Operacional**

(Anexo ao Relatório)