



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS  
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA CIVIL**

**MOISÉS TORQUATO GONÇALVES**

**ESTUDO DE CHEIAS EM CENTROS URBANOS: CASO DE LAVRAS DA  
MANGABEIRA - CE NA BACIA DO RIO SALGADO**

Campina Grande – PB

2018

MOISÉS TORQUATO GONÇALVES

**ESTUDO DE CHEIAS EM CENTROS URBANOS: CASO DE LAVRAS DA  
MANGABEIRA - CE NA BACIA DO RIO SALGADO**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado à Universidade Federal de  
Campina Grande – UFCG, para  
encerramento do componente curricular e  
conclusão da graduação em Engenharia  
Civil.

Orientador: Prof. Dr. Ricardo de Aragão

Campina Grande - PB

2018

MOISÉS TORQUATO GONÇALVES

**ESTUDO DE CHEIAS EM CENTROS URBANOS: CASO DE LAVRAS DA  
MANGABEIRA NA BACIA DO RIO SALGADO NO INTERIOR CEARENSE**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado à Universidade Federal de  
Campina Grande – UFCG, para  
encerramento do componente curricular e  
conclusão da graduação em Engenharia  
Civil.

Orientador: Prof. Dr. Ricardo de Aragão

Aprovado em: \_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ de \_\_\_\_ .

**BANCA EXAMINADORA**

\_\_\_\_\_ Nota \_\_\_\_\_

Prof. Dr. Ricardo de Aragão – UFCG

(Presidente – Orientador)

\_\_\_\_\_ Nota \_\_\_\_\_

Professora. Dr<sup>a</sup>. Gledsneli Maria de Lima Lins – UFCG

(1º Examinador)

\_\_\_\_\_ Nota \_\_\_\_\_

Msc. Tereza Helena Costa Nunes

(2º Examinador)

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus pelo ar de vida que circunda a tudo e a todos, pela saúde, força e conhecimento.

A Universidade Federal de Campina Grande pela disponibilização do curso e toda a equipe que o forma, em especial ao professor Dr. Ricardo de Aragão que se fez presente e disponível. Obrigado pela dedicação, interesse pela área e pela simpatia que cultiva. Sua orientação foi mais que essencial para realização deste trabalho.

Aos meus familiares que, apesar de toda a distância sempre me incentivaram nas decisões e orientaram para ser não só um melhor profissional, mas uma melhor pessoa. Família foi, é e será a base de tudo.

Aos meus amigos envolvidos, em especial à Fernando Figueiredo, Eloi Ribeiro, Humberlânio Araújo e Igor Martins, que dividiram o teto, o fogão e a geladeira, além de compartilhar momentos de alegria, tristeza e desespero. A todos que se fizeram presentes ao longo da jornada que foi o curso e tiveram participação fundamental para a minha realização profissional e pessoal, a amizade que construímos será símbolo de união e perseverança, então deixo aqui o meu muito obrigado. Obrigado por todo apoio e suporte.

## RESUMO

Casos de inundações são muito comuns no Brasil, principalmente em cidades que se originaram nas proximidades de grandes rios. Decorrentes de enchentes em rios, as inundações acarretam prejuízos e perdas socioeconômicas quando as grandes cheias acontecem e a elaboração de medidas para controle deve considerar as bacias hidrográficas sobre as quais a urbanização se desenvolve. Na elaboração deste estudo buscou-se analisar as causas de inundações no município de Lavras da Mangabeira - Ceará, que está inserido na sub-bacia do rio Salgado, por meio do levantamento de dados e simulações no software IPHS1, seguindo a metodologia proposta por TUCCI (1998). O modelo hidrológico IPHS1 consegue simular o hidrograma observado e fornecer valores de vazões que, apesar das limitações de dados e recursos do software, permitem analisar a área em questão. Os resultados obtidos configuram a bacia com tendência mediana a enchentes, porém com uma grande área de contribuição, baixa declividade e alto tempo de concentração, o que favorecem a situação de transbordamento da calha do canal, causando inundações.

**Palavras-chave:** inundações urbanas; modelo hidrológico; rio Salgado; Lavras da Mangabeira – Ceará.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Inundações de áreas ribeirinhas. ....	15
Figura 2: Hidrogramas hipotéticos. ....	15
Figura 3: Localização política de Lavras da Mangabeira – Ceará. ....	17
Figura 4: Sub-bacia do Rio Salgado e seus principais afluentes. ....	18
Figura 5: Centro da cidade de Lavras da Mangabeira antes e depois do alagamento em 2008. .....	19
Figura 6: Praça da matriz da cidade de Lavras da Mangabeira antes e depois do alagamento em 2008. ....	20
Figura 7: Localização da sub-bacia do Salgado. ....	21
Figura 8: Interface com os módulos da bacia. ....	25
Figura 9: Janela para o cálculo do tempo de concentração por Kirpich no IPHS1. ....	27
Figura 10: Janela para o cálculo da propagação do escoamento por Muskingun-Curge Linear no IPHS1. ....	29
Figura 11: Determinação do ponto de inundação no Google Earth Pro. ....	31
Figura 12: Disposição de dados do SRTM no site da Embrapa – Brasil em relevo. ....	32
Figura 13: Área de contribuição para o ponto de inundação determinado. ....	33
Figura 14: Delimitação de sub-bacias (cinza) e talvegues (azul). ....	34
Figura 15: Delimitação de sub-bacias e talvegues, com destaque para o principal. ....	35
Figura 16: Análise dos tipos de solo no território da bacia para determinação das classes pelo método CN. ....	37
Figura 17: Identificação dos grupos de solo e suas respectivas sub bacias. ....	38
Figura 18: Janela de parâmetros para cálculo da propagação do escoamento pelo método Muskingum – Cunge Linear. ....	42
Figura 19: Ponderação da contribuição dos postos de chuva de cada município em sua respectiva sub-bacia. ....	44
Figura 20: Ponderação das contribuições dos postos de chuva de cada município em sua respectiva sub-bacia. ....	46
Figura 21: Hidrograma resultante para precipitações no ano de 1999 para a área de contribuição. ....	47
Figura 22: Hidrograma resultante para precipitações no ano de 2006 para a área de contribuição. ....	47

Figura 23: Hidrograma resultante para precipitações no ano de 2014 para a bacia de contribuição.....	47
Figura 24: Hidrograma resultante para precipitações no ano de 2004 para a bacia de contribuição.....	48
Figura 25: Hidrograma resultante para precipitações no ano de 2008 para a bacia de contribuição.....	48
Figura 26: Hidrograma resultante para precipitações no ano de 2011 para a bacia de contribuição.....	48

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Valores de CN para bacias urbanas e suburbanas .....	28
Tabela 2: Áreas dos grupos de solo e totais das sub-bacias. ....	39
Tabela 3: Áreas e CN's das sub-bacias. ....	40
Tabela 4: Valores de precipitações normais e observadas entre os anos de 1998 e 2017 para a bacia do rio Salgado. ....	43
Tabela 5: Resultado do cálculo de CN para a área de contribuição da seção em análise.....	45
Tabela 6: Diferença de vazões de pico para anos com precipitação acima do normal e anos com precipitação normal. ....	49



## SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO .....	11
2.	OBJETIVOS.....	12
2.1.	Objetivo geral .....	12
2.2.	Objetivos específicos .....	12
3.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	13
3.1.	Bacias e sub-bacias hidrográficas.....	13
3.2.	Enchentes e inundações urbanas .....	13
3.2.1.	Enchentes em áreas urbanas.....	14
3.2.2.	Enchentes em áreas ribeirinhas .....	14
3.3.	Caracterização computacional .....	16
4.	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	17
4.1.	Localização geográfica .....	21
4.2.	Clima.....	22
4.3.	Relevo .....	22
4.4.	Geomorfologia .....	23
5.	MATERIAIS E MÉTODOS .....	24
5.1.	Descrição do modelo hidrológico IPHS1 .....	24
5.1.1.	Módulo da bacia.....	25
5.1.2.	Precipitação .....	26
5.1.4.	Separação do escoamento – método SCS .....	27
5.1.5.	Caracterização de trechos de água .....	29
5.1.6.	Escoamento superficial – hidrograma triangular do SCS .....	30
6.	RESULTADOS .....	30
6.1.	Seção de análise e delimitação da área de contribuição .....	30
6.2.	Discretização da bacia de contribuição em sub-bacias .....	34

	10
6.3. Tempo de concentração das sub-bacias .....	35
6.4. Valores do Curva-Número (CN).....	36
6.5. Método de Propagação do Escoamento .....	41
6.6. Transformação chuva-vazão .....	42
6.7. Análise de declividade, utilização e cobertura do solo e simulação no modelo.....	44
7. CONCLUSÃO .....	50
8. SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS .....	51
9. REFERÊNCIAS .....	52
ANEXOS.....	55

## 1. INTRODUÇÃO

As enchentes são resultado do transbordamento de água dos rios que têm a sua capacidade e calha superadas devido às chuvas intensas. Embora os rios possuam ao longo de sua trajetória as chamadas planícies de inundação, que são áreas nos limites de suas margens para as quais extravasam a sua vazão durante alguns períodos de fortes chuvas, elas podem não ser suficientes para comportar a vazão, causando inundações.

Uma inundação é o resultado de uma enchente que ocupa a várzea e inunda, em função da topografia, as áreas próximas aos cursos de água, geralmente causando prejuízos consideráveis e irreparáveis para a população após a ocorrência.

Um conjunto de fatores pode ser relacionado à ocorrência de inundações e dentre estes fatores, um dos mais preocupantes é a falta de planejamento para ocupação de bacias hidrográficas, resultando na ocupação de áreas consideradas de risco de inundação (BORGES, 2013). Casos de inundações são muito comuns no Brasil, principalmente em algumas cidades que se originaram nas proximidades de grandes rios e o seu crescimento, nem sempre ordenado, ocorre geralmente, na região da planície de inundação o que acarreta prejuízos e perdas socioeconômicas quando as grandes cheias acontecem.

Considerando os fatos citados, a elaboração de métodos para controle de enchentes de uma cidade ou região deve considerar as bacias hidrográficas sobre as quais a urbanização se desenvolve. A associação de diversos meios e estudos interdisciplinares pode garantir um desenvolvimento sustentável e racional, possibilitando o crescimento e desenvolvimento urbano adequado, além de acarretar melhoria de vida para a população (BORGES, 2013).

O desenvolvimento deste trabalho é importante instrumento para contribuir junto aos estudos que vêm sendo realizados na Bacia Hidrográfica do Rio Salgado, com intuito de melhor compreendê-la e assim poder auxiliar no entendimento das medidas de controle das enchentes implantadas e previstas para a bacia.

Portanto, a realização deste estudo é desenvolvida por intermédio do levantamento de dados, materiais obtidos junto ao Comitê da sub-bacia hidrográfica do Rio Salgado (CBHS), à Companhia de Recursos Hídricos do Estado do Ceará (COGERH) e também material fornecido por técnicos e especialistas da área de atuação, bem como artigos, dissertações e teses vinculadas ao tema, para através do uso de ferramentas computacionais poder chegar ao resultado desejado.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. Objetivo geral**

Analisar as causas das inundações no município de Lavras da Mangabeira, Ceará, através do modelo hidrológico IPHS1 e sua metodologia.

### **2.2. Objetivos específicos**

- Estudar as características físico-geográficas da bacia a fim de conhecer seu comportamento hidrológico;
- Simular o comportamento das vazões em períodos de cheias com auxílio de métodos computacionais visando comparar com comportamento das vazões em períodos normais;
- Analisar os dados obtidos e relacionar com acontecimentos históricos.

### **3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

#### **3.1. Bacias e sub-bacias hidrográficas.**

Uma bacia hidrográfica é delimitada pelas regiões de relevo mais elevado, que formam os divisores de água, e pode ser definida como um conjunto de terras drenadas por um rio e seus afluentes, que terminam em um ponto único na região que se denomina exutório. O rio e seus afluentes são formados pelas águas das chuvas, essas que podem também infiltrar no solo criando lençóis freáticos. As águas escoam gravitacionalmente para a parte mais baixa do terreno, formando riachos que se juntam a outros riachos aumentando o volume e formando rios, esses vão acumulando água de outros tributários, formando rios maiores até desembocarem no oceano (TEODORO *et al.*, 2007).

As sub-bacias são áreas de drenagem dos tributários do curso d'água principal. Dessa forma, bacias podem ser desmembradas em um número qualquer de sub-bacias, dependendo do ponto de saída considerado ao longo do seu eixo-tronco ou canal coletor (SANTANA, 2003). Cada bacia hidrográfica interliga-se com outra de ordem hierárquica superior, constituindo, em relação à última sub-bacia. Porém, os termos bacias e sub-bacias hidrográficas são relativos.

#### **3.2. Enchentes e inundações urbanas**

No geral, as inundações e enchentes são comuns em bacias e sub-bacias. As inundações são eventos tão antigos quanto as cidades ou qualquer aglomerado urbano e ocorrem quando as águas dos rios, riachos, galerias pluviais saem do leito de escoamento, devido à falta de capacidade de transporte de um destes sistemas e ocupam áreas onde a população utiliza para a moradia, transporte (ruas, rodovias e passeios), recreação, comércio, indústria entre outros. (TUCCI *et al.*, 2003).

A característica histórica da ocorrência de cheias e inundações no espaço urbano onde se inserem as cidades é assumida pelos habitantes locais como um fenômeno cíclico. Quando a frequência de inundações é baixa, a população tende a desprezar o risco, aumentando significativamente a ocupação e a densificação das áreas inundáveis (TUCCI, 2004).

### 3.2.1. Enchentes em áreas urbanas

Segundo Tucci *et al* (1995), as enchentes em áreas urbanas são consequência de dois processos, que ocorrem isoladamente ou de forma integrada:

- Enchentes em áreas ribeirinhas – as enchentes naturais que atingem a população que ocupa os leitos de rios por falta de planejamento do uso do solo;
- Enchentes devidas à urbanização – são as enchentes provocadas pela urbanização.

### 3.2.2. Enchentes em áreas ribeirinhas

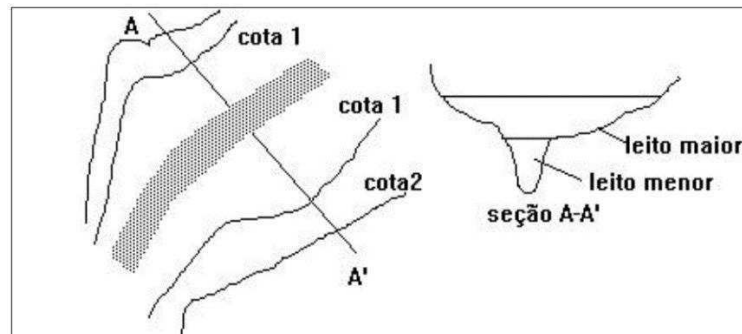
Essas enchentes ocorrem, principalmente, pelo processo natural no qual o curso de água ocupa o seu leito maior, chamado também de planície de inundação ou várzea, de acordo com os eventos chuvosos extremos em média com período de retorno superior a dois anos. Esse tipo de enchente, segundo Tucci *et al* (1995), normalmente ocorre em bacias grandes (< 1000 km<sup>2</sup>) e em decorrência do processo natural.

Segundo Junk (2013), planície de inundação ou várzea é toda a região de um curso d'água que fica inundada durante as cheias. São áreas muito propícias à agricultura devido à fertilidade do solo, o que atrai moradores e agricultores que tentam tirar proveito do solo fértil e não conhecem (ou conhecem e negligenciam) os possíveis impactos em que essa ocupação pode resultar.

Um dos exemplos mais clássicos era a várzea do Nilo, cujas regiões ribeirinhas alagam-se, depositando aí o húmus (JUNK, 2013), rico adubo natural que permitia o cultivo com alta fertilidade e a manutenção da civilização egípcia antiga. O depósito de húmus atraía a atenção de agricultores que ocupavam as regiões ribeirinhas afim de cultivar nas terras férteis. Após a construção da Represa de Assuã, em 1970, o nível do rio foi regulado, evitando as enchentes no Egito.

As principais causas dos impactos sobre os rios são: a ocupação inadequada do espaço urbano, resultante da não restrição para a ocupação das áreas de risco por não estarem devidamente identificadas no exercício da planificação; pela ocupação das áreas ribeirinhas (Figura 1) pertencentes aos poderes públicos pela população migrante de baixa renda (BORGES, 2013).

Figura 1: Inundações de áreas ribeirinhas.

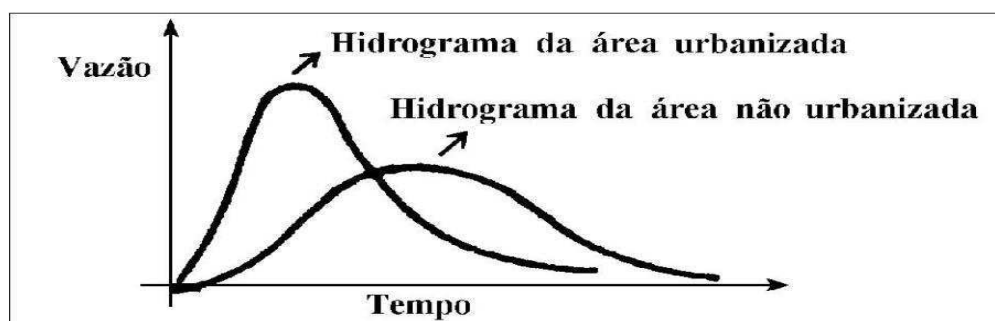


Fonte: adaptado de Tucci *et al.* (1995).

### 3.2.3. Enchentes em áreas ribeirinhas

Ainda segundo Tucci (1995), com o desenvolvimento urbano ocorre a impermeabilização do solo através de telhados, ruas, calçadas e pátios, entre outros. Dessa forma, a parcela da água que infiltrava passa a escoar pelos condutos, aumentando o escoamento superficial. O volume que escoava lentamente pela superfície do solo e ficava retido pelas plantas, com a urbanização, passa a escoar no canal, exigindo maior capacidade de escoamento das seções. O hidrograma típico de uma bacia natural e aquele resultante da urbanização são apresentados na Figura 2.

Figura 2: Hidrogramas hipotéticos.



Fonte: adaptado de Tucci *et al.* (1995).

Os principais resultados da urbanização são o aumento da vazão máxima, a antecipação do pico e o aumento do volume do escoamento superficial (TUCCI *et al* 1995).

Contudo, parâmetros como precipitação, clima, vazão, tempo e volume são muitos e variados, e os cálculos para a elaboração de hidrogramas para estudos hidrológicos geralmente necessitam de inúmeras interações. Para o auxílio deste estudo foram feitas caracterizações computacionais, tanto para a obtenção de dados e parâmetros como para a realização de cálculos e simulações.

### **3.3. Caracterização computacional**

A simulação do comportamento hidrológico de bacias hidrográficas consiste numa das principais ferramentas para o apoio na gestão dos recursos hídricos, devido a possibilidade de predição de impactos ambientais de alterações do uso do solo. Nesse contexto, o processamento de dados hidrológicos pode ser bastante trabalhoso, devido o grande número de dados, as diferentes fontes e os diferentes formatos de arquivo (VIEGAS, 2000).

Com o desenvolver da tecnologia, o surgimento de ferramentas para o auxílio de cálculos, caracterização e modelagem está cada vez mais presente. Uma das suas principais vantagens é estimar hidrogramas quando há falta de dados de vazão observados pela alteração das características da bacia (TUCCI e SILVEIRA, 1998). Um bom exemplo são os modelos hidrológicos.

Tucci (1998) define modelo hidrológico como uma ferramenta utilizada para representar os processos que ocorrem na bacia hidrográfica e prever as consequências das diferentes ocorrências em relação aos valores observados. Eles permitem melhor compreensão dos fenômenos hidrológicos em uma bacia hidrográfica, bem como podem prever o comportamento da bacia sob condições diversas.

O modelo hidrológico precipitação-vazão intitulado IPHS1 (TUCCI et al. 1981; TUCCI *et al.* 1998) utiliza a precipitação incidente na bacia para estimar a vazão e necessita de informações históricas do local ou de outras bacias com características semelhantes para estimar os parâmetros que geralmente compõe a estrutura do modelo.



#### 4. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

Lavras da Mangabeira é um município localizado no estado do Ceará, na microrregião que leva o seu nome e região metropolitana do Cariri (vide Figura 3). Possui área de 947,957 km<sup>2</sup> e população de 31 096 habitantes (IBGE, 2010). Como muitas cidades desta localidade, sofre de tempos em tempos com as cheias que, embora raras devido ao clima semiárido predominante, acarretam várias perdas materiais e impactos socioeconômicos.

Figura 3: Localização política de Lavras da Mangabeira – Ceará.



Fonte: Google Mapas (2018).

A cidade está inserida na denominada micro-bacia IV da Sub-Bacia do rio Salgado, esta que integra a Bacia do rio Jaguaribe, localizada ao Sul do Estado do Ceará. A Sub-Bacia do rio Salgado, apresentada na Figura 4, possui área de drenagem de 12.865 km<sup>2</sup>, correspondente a 8,25% do território cearense, sendo o seu principal rio o Salgado.

A complexidade da sub-bacia se dá pelo contraste de biomas, onde de um lado a caatinga cinza se sobressai e do outro, no vale do cariri, a chapada com abundância de água e floresta pluvionebular precisa ser preservada. Apesar do contraste, o ecossistema predominante é a Caatinga, caracterizada pela vegetação escassa que perde sua folhagem durante os períodos de estiagem.



Sabe-se que desde a fundação lavrense, em 20 de agosto de 1816, são relatadas situações em que, durante enchentes, ocorrem inundações e destruição de casas, plantios, lavouras entre outros danos socioeconômicos. Os eventos mais antigos que se tem registro datam de 1947 e posteriormente da década de 80, já os mais recentes são do ano 2008, onde a tecnologia já estava acessível, portanto há maiores registros, como mostra a Figura 5.

Figura 5: Centro da cidade de Lavras da Mangabeira antes e depois do alagamento em 2008.



Fonte: Google (2018).

As inundações se tornaram um tormento para a população que habita áreas principalmente de regiões mais afastadas de grandes centros urbanos, característica intrínseca à Lavras, que possui aproximadamente 42% da população residindo em zonas rurais (IBGE, 2010).

O último evento desse tipo que teve notoriedade ocorreu em 2008, no qual o município entrou em estado de calamidade pública devido às catástrofes registradas. Segundo o portal de notícias da Globo G1, em março de 2008, comunidades rurais permaneceram isoladas num total de 5,8 mil habitantes em três distritos, e o centro da cidade com mais de 200 casas alagadas (Figura 6). De acordo com o jornal Diário do Nordeste, também em 2008, dez casas vieram a ruir e presos encarcerados na delegacia municipal necessitaram de transferência devido à inundação.

Figura 6: Praça da matriz da cidade de Lavras da Mangabeira antes e depois do alagamento em 2008.



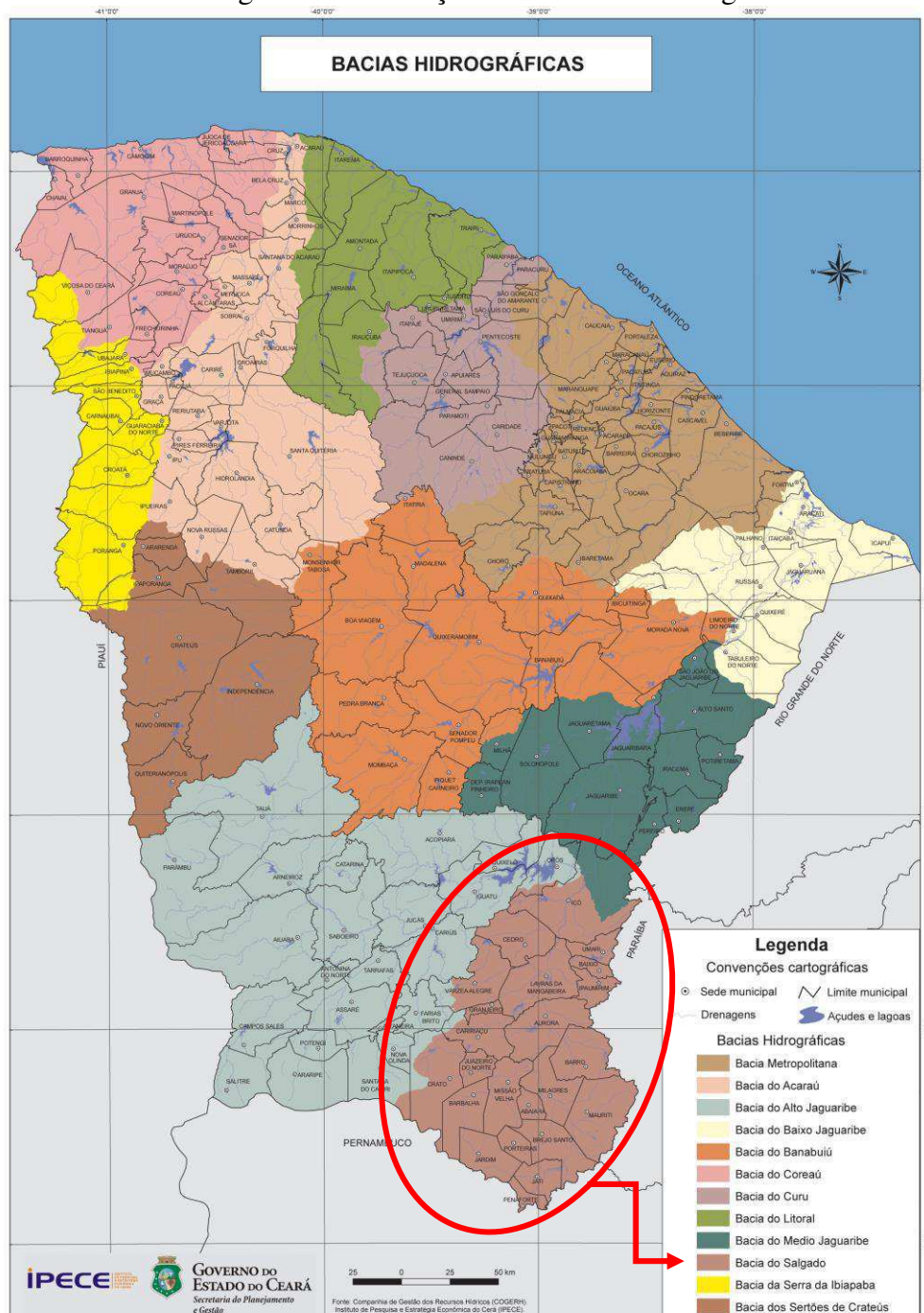
Fonte: Google (2018).

Em função das fortes chuvas ocorridas entre dezembro de 2007 e março de 2008, a região se mostrou muito vulnerável quanto à ocorrência de eventos chuvosos que geram inundação, fato este observado em outros municípios com suas sedes na Bacia do Rio Salgado. O município já mostrou ao longo de sua história que será sempre uma região em potencial para sofrer com os efeitos das inundações urbanas. Mais imagens de enchentes e inundações ao longo dos anos em anexo.

#### 4.1. Localização geográfica

A sub-bacia do rio Salgado, apresentada na Figura 7, posiciona-se na porção meridional do Estado, limita-se a oeste com a sub-bacia do Alto Jaguaribe, ao sul com o Estado de Pernambuco, ao leste com o Estado da Paraíba e a nordeste com a sub-bacia do Médio Jaguaribe.

Figura 7: Localização da sub-bacia do Salgado.



Fonte: Adaptado de Caderno regional da sub-bacia do Salgado (2009).

## 4.2. Clima

De modo geral, o clima da Bacia do rio Salgado é caracterizado pela ocorrência de dois períodos definidos: um mais longo, seco, seguido por um pluvial curto e irregular, que nem sempre acontece. As temperaturas são elevadas, possuindo média para o mês mais frio acima de 18°C, devido às baixas latitudes (RIBEIRO, 2017).

O período chuvoso de maior significância na região do Cariri, onde está localizada a sub-bacia do rio Salgado, inicia-se em dezembro, podendo estender-se até julho dependendo das condições oceânicas e atmosféricas atuantes. É influenciado pelos sistemas e fenômenos climáticos mencionados anteriormente no tocante aos índices de precipitação.

As bacias hidrográficas do Estado do Ceará apresentam certas características comuns intimamente ligadas à pluviosidade; junto aos relevos das serras e dos seus sopés são mais favorecidas pelas precipitações mais elevadas e melhor distribuídas, tendo os cursos d'água sua drenagem assegurada durante quase todo o ano; ao contrário, junto aos relevos aplainados dos sertões os rios secam no fim da estação chuvosa (RIBEIRO, 2017).

## 4.3. Relevo

Inserida na região delimitada pela sub-bacia do rio Salgado está a Bacia Sedimentar do Araripe, sobre a qual se localiza a Chapada do Araripe, que possui níveis altimétricos entre 800 m e 900 m e tem arenitos Cretáceos da Formação Exu como mantenedor do relevo. Além disso, sua drenagem é de caráter intermitente e rica em recursos subterrâneos (COGERH, 2009).

Ao longo da borda norte-oriental desta chapada desenvolve-se a região do Cariri cearense, que se apresenta como um brejo de encosta e de vales espraiados, decorrentes de uma ramificação generalizada da drenagem (FUNCEME, 2009). Excluindo a área da chapada e do seu entorno imediato, grande parte da sub-bacia tem uma superfície de aplainamento com topografia plana e moderadamente dissecada em rochas cristalinas com níveis altimétricos entre 200 e 400 m, apresentando regime fluvial intermitente e esporádico, com baixo potencial de águas subterrâneas.

Há um contraste nítido no que diz respeito ao relevo entre dois macrocompartimentos: a Cimeira da Chapada do Araripe (800 – 900 m) e a Depressão Sertaneja (350 – 450 m). Na Depressão Sertaneja emergem, topograficamente, níveis serranos dos maciços cristalinos e as cristas residuais, e expandem-se as planícies fluviais.

Nas vertentes da chapada, o rio Salgado possui declividades muito acentuadas, que vão se tornando mais suaves à medida que se aproxima da Depressão Sertaneja onde as declividades do talvegue variam de 0,1% a 8%, sendo a média 0,18%.

Devido às variações geológicas, existe uma grande variedade de solos nesta sub-bacia. Na região da Chapada do Araripe, parte sul da bacia, há predomínio de solos mais profundos com domínio de Latossolos derivados de arenito da Formação Exu. No sopé da chapada, entorno de municípios como Crato, Juazeiro e Barbalha, predominam solos profundos, avermelhados, com média fertilidade natural e boas condições para o uso agrícola. Neste ambiente ocorrem, predominantemente, solos Argissolos Vermelhos. A limitação para fins agrícolas decorre do relevo movimentado em algumas áreas. Na Depressão Sertaneja, localizada mais ao norte da sub-bacia, onde predominam rochas cristalinas ácidas, devido às condições climáticas, ocorrem solos rasos a pouco profundos, com diversas restrições para uso agrícola (FUNCEME, 2009).

Os solos predominantes na sub-bacia são os Neossolos Flúvicos, Litossolos, Luvissolos, Argissolos, Planossolos, Nossolos Litólicos e Vertissolos.

#### **4.4. Geomorfologia**

O território cearense possui sua compartimentação topográfica proveniente de eventos que se verificaram no Período Pleistocênico, os quais causaram maior caracterização para análise dos fatos geomorfológicos. Esta compartimentação com relevos desenvolvidos em terrenos do embasamento cristalino, ou em áreas de capeamentos sedimentares, decorre de um jogo de influências em que participam a estrutura geológica ao lado dos fatores paleoclimáticos e eustáticos, além da dinâmica morfogenética atual (SOUZA *et al.*, 1979).

De acordo com Souza *et al.* (1979), o relevo cearense engloba compartimentos bastante diferenciados, que se justificam por mecanismos genéticos complexos. Porém, há prevalência das superfícies rebaixadas do sertão recobertas por caatingas, que compreendendo extensas depressões periféricas de bordos de bacias sedimentares em contato com rochas do escudo cristalino, se estendem no sentido dos fundos dos vales ou se dirigem para o litoral através de declives suavemente inclinados. Estas depressões que atestam os efeitos pronunciados dos processos erosivos a que estiveram submetidas no Pleistoceno, são constantemente interrompidas pelo surgimento de formas residuais elevadas que constituem os relevos serranos.

Assim, o atual estado do relevo cearense é resultado da dinâmica topográfica, da complexidade das estruturas geofísicas e da diversidade de lineamentos e das ações conjuntas dos processos de remoção da superfície por processo erosivo perante a tectônica e mudanças climáticas.

## **5. MATERIAIS E MÉTODOS**

A análise da área de estudo, em sua complexidade, trouxe consigo a necessidade de utilização de um método de cálculo e determinação de parâmetros sofisticados, levando em consideração os avanços tecnológicos da atualidade. A obtenção dos parâmetros necessários se deu através de uma série de ferramentas descritas a seguir.

### **5.1. Descrição do modelo hidrológico IPHS1**

Escolhido para este trabalho pela sua praticidade, simplicidade e objetividade no tratamento de dados, o modelo IPHS1 permite a simulação das sub-bacias e foi desenvolvido por Tucci *et al.* (1998) na versão DOS, no Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. O IPHS1 consiste em um sistema computacional modulado, composto de vários modelos existentes em literatura e possibilita a obtenção de hidrogramas de projeto através da combinação desses modelos, compondo assim um modelo próprio do usuário. Viegas *et al.* (2001) apresentou a versão Windows com base na Metodologia de Modelagem Orientada a Objetos, aplicada a Sistemas de Recursos Hídricos por Viegas (2000).

O sistema está modulado segundo operações hidrológicas, oferecendo as seguintes opções: a) transformação chuva-vazão; b) escoamento em rios; c) propagação em reservatórios; d) entrada, somas ou derivação de hidrogramas. As características físicas da bacia e os dados históricos são fornecidos para cada uma destas opções e, de acordo com a numeração sequencial informada pelo usuário, o modelo compõe o resultado. Cada número identifica o hidrograma resultante no final da bacia ou trecho.

O modelo está dividido em dois módulos: a) módulo da bacia; b) módulo do rio. Cada módulo é formado por sub-módulos que realizam operações hidrológicas específicas. Por sua

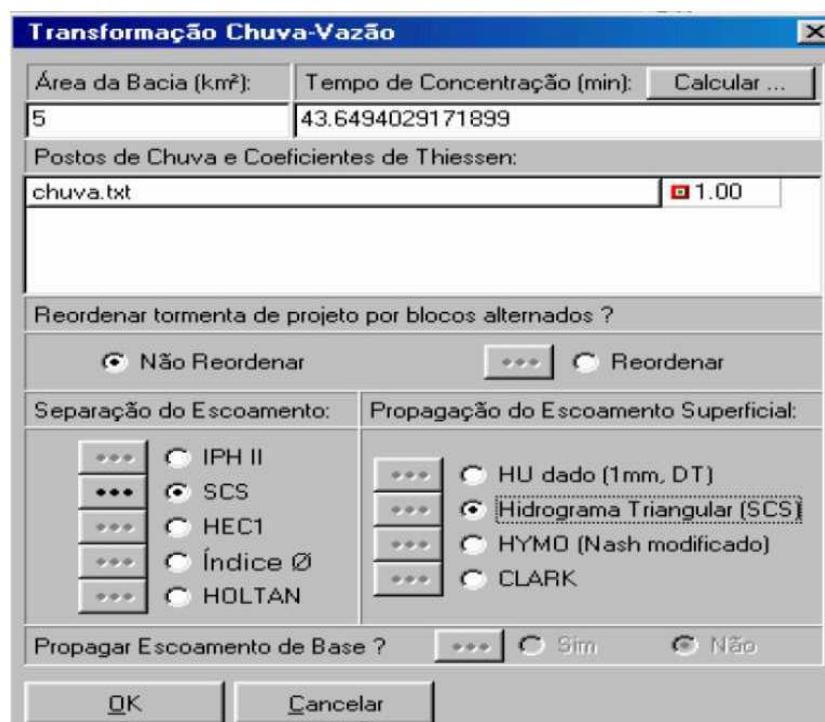


vez, cada sub-módulo apresenta como opções diferentes algoritmos de cálculo. Devido às informações reunidas e as características da situação, optou-se por utilizar o módulo da bacia.

### 5.1.1. Módulo da bacia

No módulo da bacia faz-se a divisão do sistema (bacia) em sub-bacias, de acordo com suas características físicas e climáticas, disponibilidade de dados e locais de interesse. Em seguida, a transformação da chuva em vazão para cada sub-bacia é feita escolhendo-se os algoritmos de cálculo para a realização das operações hidrológicas dispostas na Figura 8.

Figura 8: Interface com os módulos da bacia.



Fonte: Viegas *et al.* (2004)

O módulo da bacia tem a seguinte configuração (VIEGAS *et al.*, 2004):

- Separação de Escoamento: separa a parcela de chuva efetiva para a determinação do escoamento direto. Aplicando-se o método de relações funcionais ou da curva número (Correção de Superfície Curva, adiante apresentado com a sigla SCS).

- Propagação do Escoamento superficial: é a transformação da chuva efetiva no hidrograma de escoamento direto. Adotou-se o hidrograma unitário triangular do SCS.

### 5.1.2. Precipitação

O algoritmo de precipitação tem a finalidade de calcular o hietograma de cada sub-bacia em duas possibilidades: a) hietograma de projeto; b) hietograma observado. Optou-se pela opção b (hietograma observado), fornecendo os números dos postos correspondentes e seu coeficiente de Thiessen (método para cálculo de áreas de domínio de um posto pluviométrico). Com posse dessa informação, o modelo calcula a precipitação média ponderada em cada intervalo para cada sub-bacia.

Para coleta dos dados de precipitação recorreu-se ao banco de dados da Agência Nacional de Águas (ANA), onde se pôde obter dados históricos de precipitações datados do ano de 1998 a 2017 para a área em estudo.

### 5.1.3. Tempo de concentração por kirpich

O programa IPHS1 permite que o cálculo do tempo de concentração seja realizado mediante a Equação de Kirpich, conforme consta na Figura 9, sendo

$$t_c = 57 \left( \frac{L^3}{\Delta H} \right)^{0,385} \quad (\text{Eq. 1})$$

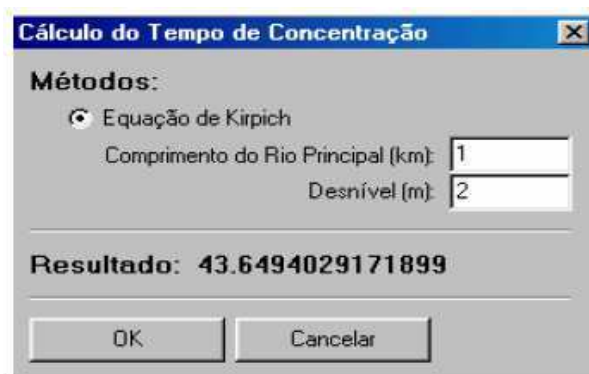
onde,

$t_c$ : tempo de concentração, em minutos;

$L$ : comprimento do talvegue principal, em km;

$\Delta H$ : desnível do talvegue principal, em metros.

Figura 9: Janela para o cálculo do tempo de concentração por Kirpich no IPHS1.



Fonte: Tucci (2004).

#### 5.1.4. Separação do escoamento – método SCS

Proposto pelo *Soil Conservation Service (SCS)*, o método permite estimar o volume de escoamento superficial a partir de dados de precipitação da bacia e de parâmetros como o coeficiente Curva Número (CN), que é obtido para diferentes condições de superfície, tipos e uso de solo, tempo de concentração, área de contribuição e declividades. O método foi utilizado por recomendação de Tucci (2004), pois se adapta para cálculos em zonas escassas de informação.

O parâmetro CN para a metodologia pôde ser obtido através da média ponderada por área, a partir dos valores da Tabela 1, de acordo com o uso do solo, superfície, tipos e condições de ocupação, sendo este último índice dividido nos seguintes grupos:

- GRUPO A – Solos arenosos com baixo teor de argila total, inferior a uns 8%, não havendo rocha nem camadas argilosas, e nem mesmo densificadas até a profundidade de 1,5m. O teor de húmus é muito baixo, não atingindo 1%;
- GRUPO B – Solos arenosos menos profundos que os do Grupo A e com menos teor de argila total, porém ainda inferior a 15%. No caso de terras roxas, esse limite pode subir a 20% graças à maior porosidade. Os dois teores de húmus podem subir, respectivamente, a 1,2% e 1,5%. Não pode haver pedras e nem camadas argilosas até 1,5m, mas é, quase sempre, presente cada camada mais densificada que a camada superficial;
- GRUPO C – Solos barrentos com teor total de argila de 20 a 30%, mas sem camadas argilosas impermeáveis ou contendo pedras até profundidades de 1,2m. No caso de terras roxas, esses dois limites máximos podem ser de 40% e

1,5m. Nota-se a cerca de 60 cm de profundidade, camada mais densificada que no Grupo B, mas ainda longe das condições de impermeabilidade.

- GRUPO D – Solos argilosos (30 – 40% de argila total) e ainda com camada densificada a uns 50 cm de profundidade. Ou solos arenosos como B, mas com camada argilosa quase impermeável, ou horizonte de seixos rolados.

Tabela 1: Valores de CN para bacias urbanas e suburbanas

Utilização ou cobertura do solo	Grupo de solos			
	A	B	C	D
Zonas cultivadas: sem conservação do solo	72	81	88	91
com conservação do solo	62	71	78	81
Pastagens ou terrenos em más condições	68	79	86	89
Baldios em boas condições	39	61	74	80
Prado em boas condições	30	58	71	78
Bosques ou zonas com cobertura ruim	45	66	77	83
Floresta: cobertura boa	25	55	70	77
Espaços abertos, relvados, parques, campos de golfe, cemitérios, boas condições				
Com relva em mais de 75% da área	39	61	74	80
Com relva de 50% a 75% da área	49	69	79	84
Zonas comerciais e de escritórios	89	92	94	95
Zonas industriais	81	88	91	93
Zonas residenciais				
Lotes de (m <sup>2</sup> )	% média impermeável			
<500	65	77	85	90
1000	38	61	75	83
1300	30	57	72	81
2000	25	54	70	80
4000	20	51	68	79
Parques de estacionamento, telhados, viadutos, etc.	98	98	98	98
Arruamentos e estradas				
Asfaltadas e com drenagem de águas pluviais	98	98	98	98
Paralelepípedos	76	85	89	91
Terra	72	82	87	89

Fonte: Tucci (2004).

### 5.1.5. Caracterização de trechos de água

Para caracterizar os corpos d'água principais da bacia e das sub-bacias, optou-se por utilizar o método de Muskingum-Cunge Linear pela simplicidade dos dados exigidos e sua obtenção. De acordo com software IPHS1, os dados necessários são:

- Comprimento do trecho de propagação (m);
- Cota de fundo de montante (m);
- Cota de fundo de jusante (m);
- Altura do canal (m);
- Largura do canal (m);
- Rugosidade dos sub-trechos;
- Vazão de Referência (m<sup>3</sup>/s);
- Número de Sub-Trechos;
- Intervalo de Tempo de Cálculo (s).

Os dados foram obtidos através do software Google Earth e inseridos para cada sub-bacia do projeto. Na Figura 10 pode-se observar a disposição dos dados na janela do software IPHS1.

Figura 10: Janela para o cálculo da propagação do escoamento por Muskingum-Cunge Linear no IPHS1.

Muskingum - Cunge Linear	
Comprimento do Trecho de Propagação (m):	350
Cota de Fundo de Montante (m)	12
Cota de Fundo de Jusante (m)	6
Altura do Canal (m)	5
Largura do Canal (m):	70
Rugosidade dos Sub-Trechos:	0.03
Vazão de Referência (m <sup>3</sup> /s):	<input checked="" type="checkbox"/> Auto 0
Número de Sub-Trechos:	<input checked="" type="checkbox"/> Auto 0
Intervalo de Tempo de Cálculo (seg):	<input checked="" type="checkbox"/> Auto 0

Ok Cancelar

Fonte: Tucci (2004).

#### 5.1.6. Escoamento superficial – hidrograma triangular do SCS

O escoamento superficial pode ser determinado no IPHS1 a partir do tempo de concentração, através do método do Hidrograma Unitário Triangular. Este método considera que o escoamento unitário é função da precipitação antecedente, da impermeabilização do solo, da cobertura vegetal, do uso da terra e das práticas de manejo de solo, agrupando todos estes fatores em um só coeficiente, que transforma a precipitação total em precipitação efetiva. Estes coeficientes foram expressos em função das curvas-número (CN).

Por conseguinte, fez-se necessário o estudo e caracterização da bacia para obter os parâmetros necessários ao cálculo. Alguns dos parâmetros não foram obtidos diretamente no IPHS1, mas seguiram sua metodologia, pois através do uso de outros softwares o preenchimento de dados e o próprio cálculo em si se tornaram mais fáceis, além de permitir ao autor clara visão do tratamento dos dados.

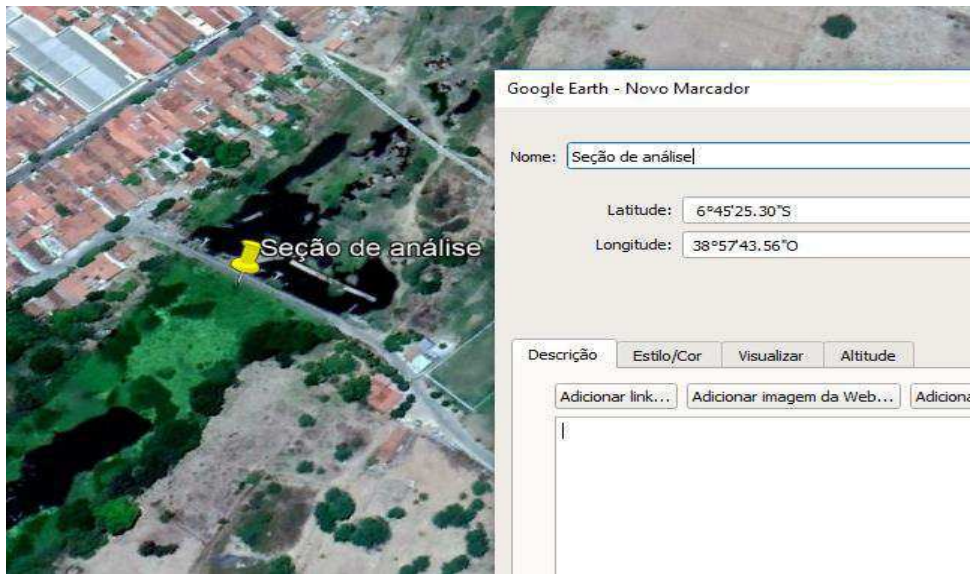
## 6. RESULTADOS

### 6.1. Seção de análise e delimitação da área de contribuição

Como descrito na revisão bibliográfica deste trabalho, os parâmetros como lâminas de precipitação, tempo de concentração, valor de CN e áreas são necessários para a simulação do evento de cheia no software IPHS1. Para a obtenção dos parâmetros necessários, fez-se inicialmente a delimitação da bacia hidrográfica até o ponto de inundação, de modo a saber a área de contribuição, declividade e tipo de solo.

Com o auxílio do software Google Earth Pro, determinou-se a seção de análise, conforme consta na Figura 11, sendo o ponto onde ocorrem as primeiras inundações a barragem localizada no centro do município, construída com a finalidade de permitir o tráfego de veículos através do rio Salgado. As coordenadas do ponto são 6°45'25.30''S de latitude e 38°57'43.56''O de longitude.

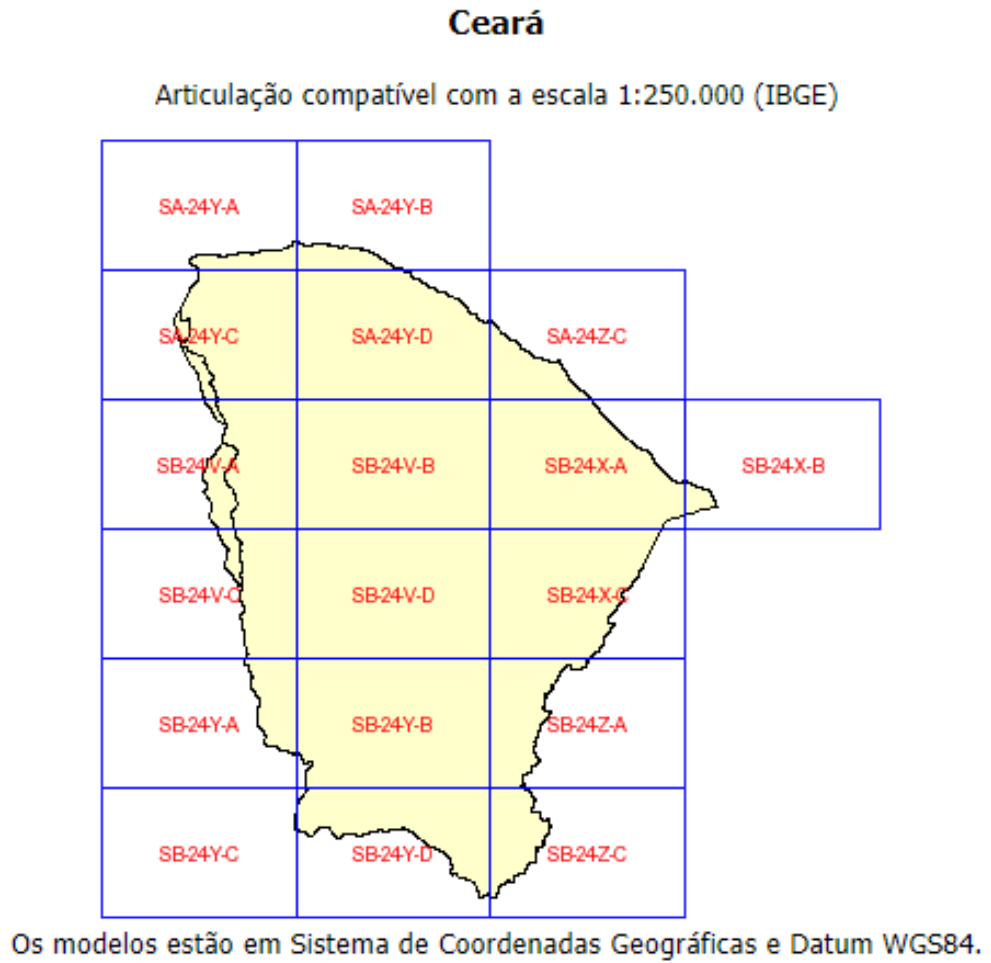
Figura 11: Determinação do ponto de inundação no Google Earth Pro.



Fonte: Google (2018).

Para a delimitação da bacia foi utilizada a base de dados numéricos de relevo e da topografia do Brasil, obtidos via dados do SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*), com uma escala de 90m x 90m por pixel (MIRANDA, 2005) e apresentados na Figura 12. Os dados utilizados foram obtidos em formato GEOTIFF (16 bits), em coordenadas geográficas e Datum WGS84, resultando no mosaico feito a partir dos quadrantes SB-24Y-B, SB-24-Z-A, SB-24-Y-D e SB-24-Z-C.

Figura 12: Disposição de dados do SRTM no site da Embrapa – Brasil em relevo.

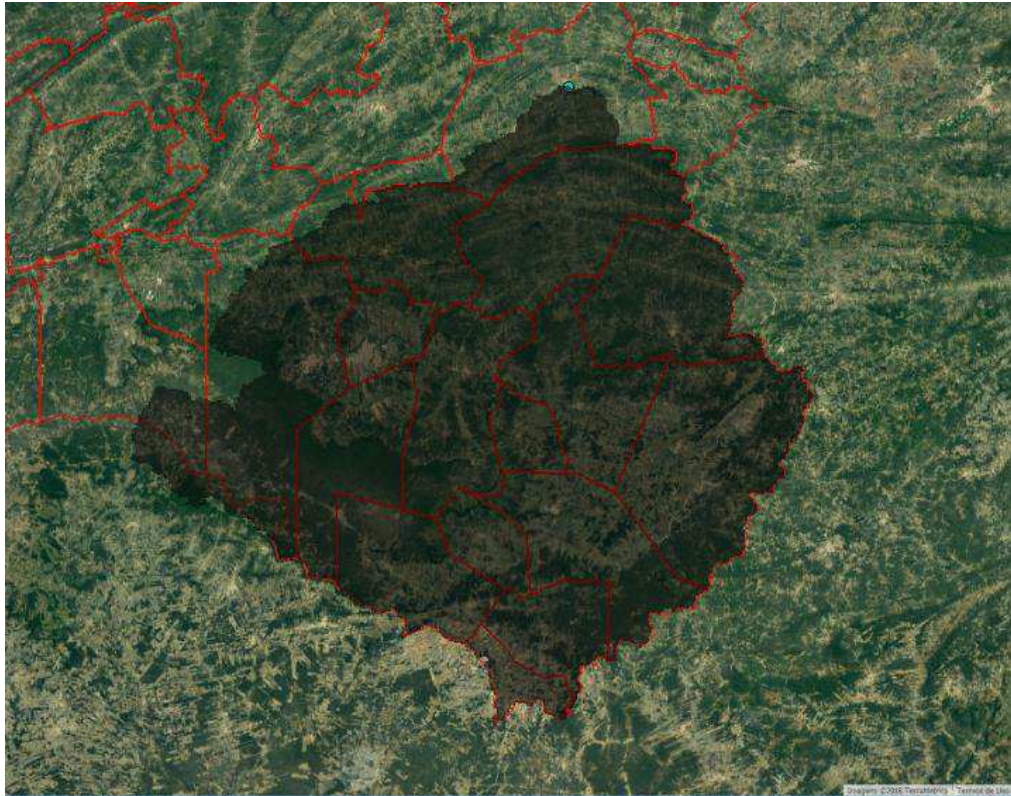


Fonte: Embrapa (2018).

Com o auxílio da ferramenta QGIS foi delimitada a bacia a partir do ponto de inundação, tendo como resultado a área de contribuição (Figura 13) e podendo ser observada a vegetação e ocupação do solo da área.



Figura 13: Área de contribuição para o ponto de inundação determinado.



Fonte: Própria (2018).

Foram obtidos os valores de área de contribuição de 9.307,58 km<sup>2</sup>, altitude da seção de análise de 237 m, ponto mais alto da bacia com altitude de 968 m e distância do ponto de inundação ao ponto mais extremo da bacia de 124 km, podendo-se determinar, de acordo com os dados, que a declividade máxima é de 5,9 m/km.

Considerando a área e o maior comprimento, pôde-se determinar o índice de conformação ou fator de forma, sendo ele

$$K_f = \frac{A}{L^2} = \frac{9307,58km^2}{(124km)^2} = 0,61$$

O resultado acima classifica a bacia com tendência mediana a enchentes.

Outro dado importante é o índice de compacidade, que é a relação entre os perímetros da bacia e de um círculo de área igual a da bacia.

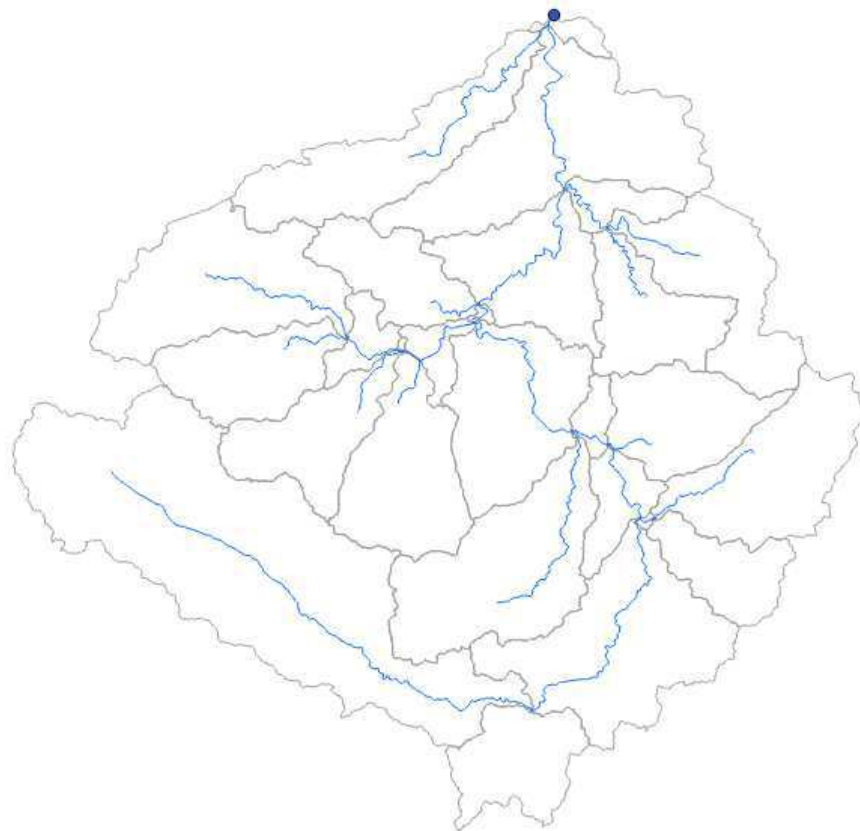
$$K_c = 0,28 \times \frac{P}{\sqrt{A}} = 0,28 \times \frac{464km}{\sqrt{9307,58km^2}} = 1,35$$

O que também caracteriza a bacia com tendência mediana a grandes enchentes.

## 6.2. Discretização da bacia de contribuição em sub-bacias

Devido as grandes dimensões da bacia, fez-se necessária a divisão em sub-bacias de forma a facilitar os cálculos e tornar o estudo da área mais preciso. Neste processo, as divisões foram determinadas com o auxílio da ferramenta ArcHydro, de acordo com a topografia do terreno e sua rede de drenagem, delimitando áreas de contribuição para os talwegues principais (Figura 14).

Figura 14: Delimitação de sub-bacias (cinza) e talwegues (azul).

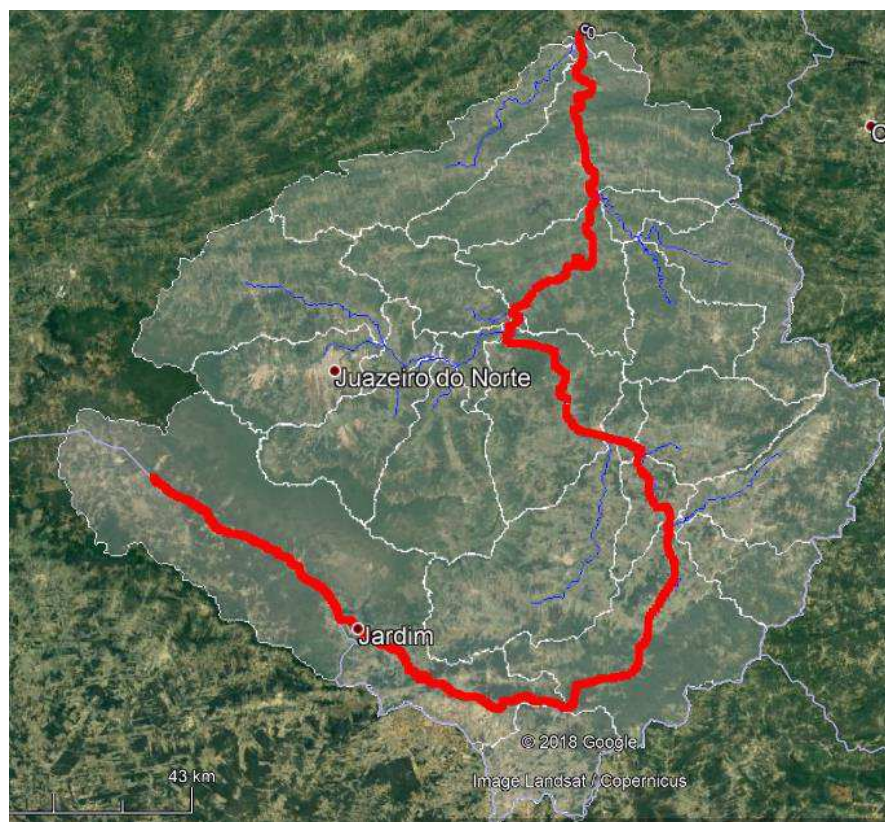


Fonte: Adaptado de QGIS (2018).

### 6.3. Tempo de concentração das sub-bacias

O tempo de concentração das sub-bacias foi obtido com o auxílio do software QGIS e do software Google Earth. Após a delimitação, a bacia foi subdividida em várias sub-bacias para um estudo mais específico de cada área. Foram, também, destacados os talwegues que formam os riachos e rios até a seção de análise determinada, conforme apresentado na Figura 15.

Figura 15: Delimitação de sub-bacias e talwegues, com destaque para o principal.



Fonte: Adaptado de Google Earth (2018).

Com a delimitação dos talwegues pronta, fez-se a análise do talvegue principal. Para a determinação da declividade foram utilizadas duas metodologias:

- Declividade simples ( $S_s$ ): obtida pela divisão do desnível máximo ( $\Delta h$ ) pelo comprimento do talvegue principal ( $L$ ):

$$S_s = \frac{\Delta H}{L} = \frac{620}{265,65} = 2,33 \text{ m/km}$$

- Declividade equivalente constante ( $S_e$ ): declividade uniforme cujo tempo de translação da água é o mesmo do perfil longitudinal irregular natural, calculada através da equação:

$$S_e = \left( \frac{L}{\sum_{j=1}^n \frac{l_j}{\sqrt{S_j}}} \right)^2$$

$$= \left( \frac{87,7 + 48,6 + 14,8 + 7,49 + 31,3 + 5,53 + 35,1 + 33,9 + 1,23}{\frac{87,7}{\sqrt{4,82}} + \frac{48,6}{\sqrt{1,67}} + \frac{14,8}{\sqrt{0,68}} + \frac{7,49}{\sqrt{1,07}} + \frac{31,3}{\sqrt{0,83}} + \frac{5,53}{\sqrt{1,08}} + \frac{35,1}{\sqrt{0,71}} + \frac{33,9}{\sqrt{1,09}} + \frac{1,23}{\sqrt{3,25}}} \right)^2$$

$$= \left( \frac{265,65}{217,2} \right)^2 = 1,50 \text{ m/km}$$

De modo semelhante, para o cálculo do tempo de concentração foram utilizadas duas metodologias:

- A equação empírica de Kirpich, sendo:

$$tc = 57 \times \left( \frac{L^3}{\Delta H} \right)^{0,385} = 57 \times \left( \frac{265,65^3}{620} \right)^{0,385}$$

$$tc = 3026,09 \text{ minutos} = 50,4 \text{ horas}$$

- A equação elaborada pelo *US Corp of Engeneering*, sendo:

$$tc = 60 \times 0,191 \times \left( \frac{L^{0,76}}{\left( \frac{\Delta H}{1000 \times L} \right)^{0,19}} \right) = 60 \times 0,191 \times \left( \frac{265,65^{0,76}}{\left( \frac{620}{1000 \times 265,65} \right)^{0,19}} \right)$$

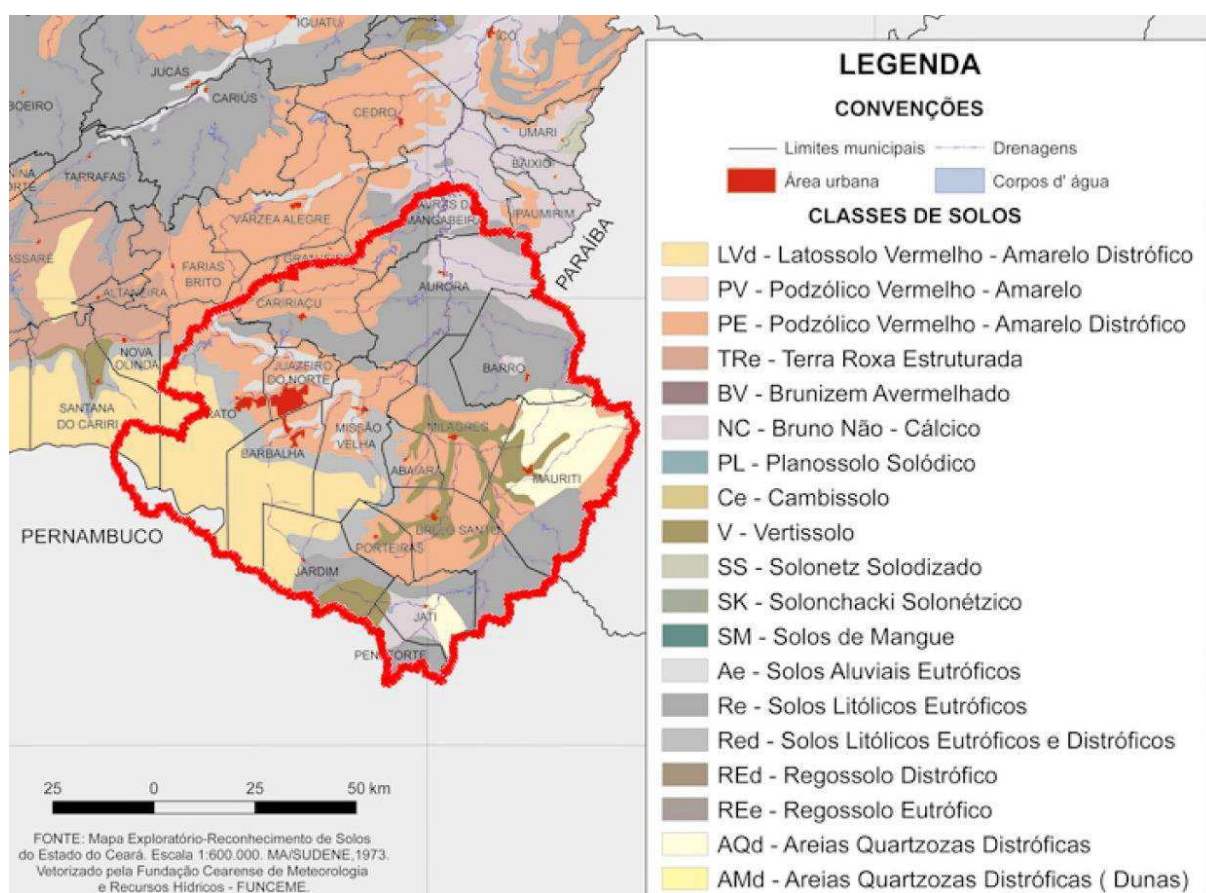
$$tc = 2521,88 \text{ minutos} = 42,03 \text{ horas}$$

#### 6.4. Valores do Curva-Número (CN)

O valor de CN da bacia foi determinado seguindo a orientação de Tucci (2004), fazendo-se a média ponderada dos coeficientes de acordo com a área que elas ocupam.

Inicialmente, foram obtidas as classes de solo do estado do Ceará, através do portal do IPECE – Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará, conforme consta na Figura 16, onde foi possível identificar as classes inseridas na área de contribuição (destacada em vermelho) anteriormente determinada.

Figura 16: Análise dos tipos de solo no território da bacia para determinação das classes pelo método CN.



Fonte: Adaptado de IPECE (2018).

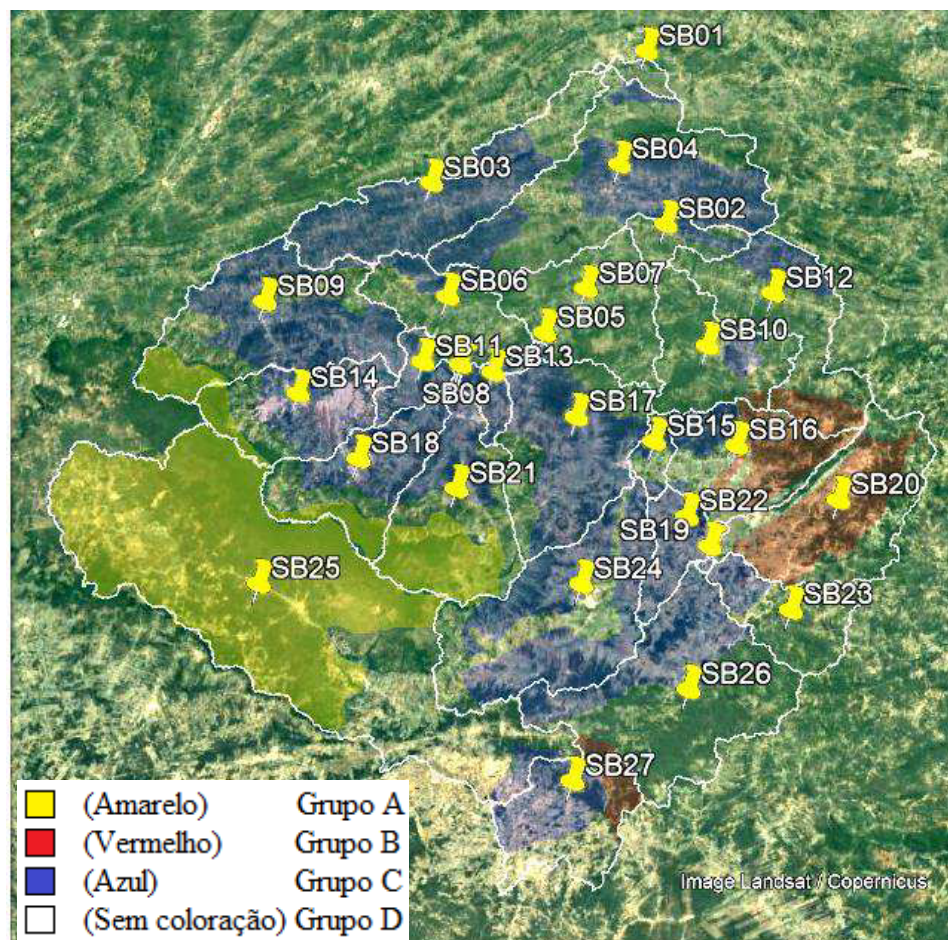
De posse dessas informações, foi possível relacionar as classes de solo com seu grupo hidrológico como propôs Santori *et. al.* (2005). De acordo com as delimitações da bacia de contribuição apresentadas anteriormente, as classes de solo nela presentes e seus respectivos grupos hidrológicos são:

- LVd – Latossolo Vermelho – Amarelo Distrófico → Grupo A;
- Podzólico Vermelho – Amarelo Distrófico → Grupo C;

- Vertissolo → Grupo D;
- Solos Aluviais Eutróficos → Grupo C;
- Solos Litróficos Eutróficos → Grupo D;
- Solos Litróficos Eutróficos e Distróficos → Grupo D;
- Areias Quartzozas Distróficas → Grupo B;
- Bruno Não - Calcário → Grupo D.

Sequencialmente, foram identificados as áreas e os grupos de solos das sub-bacias. As áreas foram destacadas com uma cor aplicada em 25% de opacidade para posterior análise do uso, de acordo com o grupo de solo. A ferramenta utilizada foi o Google Earth Pro e o resultado pode ser observado na Figura 17 abaixo.

Figura 17: Identificação dos grupos de solo e suas respectivas sub bacias.



Fonte: Adaptado de Google Earth (2018).

As áreas dos grupos foram apresentadas na Tabela 2, onde pode-se observar a predominância de solo do Grupo D. Mesmo sendo um grupo predominante, os demais caracterizam uma área considerável, optando-se pela utilização da transparência nas cores para facilitar a análise do solo de acordo com o grupo indicado, obtendo-se assim mais precisão nos valores de CN. Valores em branco na tabela indicam que não há área do respectivo grupo na sub-bacia em questão.

Tabela 2: Áreas dos grupos de solo e totais das sub-bacias.

Sub-bacia	Área total (km <sup>2</sup> )	Grupo A	Grupo B	Grupo C	Grupo D
<b>SB01</b>	35,04				35,04
<b>SB02</b>	95,46			27,50	67,96
<b>SB03</b>	474,91			374,00	100,91
<b>SB04</b>	749,02			401,70	347,32
<b>SB05</b>	7,62			7,62	
<b>SB06</b>	253,52			49,40	204,12
<b>SB07</b>	372,83			3,70	369,13
<b>SB08</b>	2,79			2,79	
<b>SB09</b>	588,72	64,80		357,00	166,92
<b>SB10</b>	297,92		7,74	26,90	263,28
<b>SB11</b>	86,11			86,11	
<b>SB12</b>	397,46		60,90	76,00	260,56
<b>SB13</b>	70,77			70,77	
<b>SB14</b>	311,91	45,70		204,00	62,21
<b>SB15</b>	53,47			26,80	26,67
<b>SB16</b>	319,47		152,00	55,70	111,77
<b>SB17</b>	478,24			332,00	146,24
<b>SB18</b>	312,14	54,50		175,00	82,64
<b>SB19</b>	4,15			4,15	
<b>SB20</b>	464,37		247,00		217,37
<b>SB21</b>	417,18	168,00		118,00	131,18
<b>SB22</b>	130,38			130,38	
<b>SB23</b>	209,60			45,30	164,30
<b>SB24</b>	602,11			407,00	195,11
<b>SB25</b>	1655,19	1171,00		31,20	452,99

<b>SB26</b>	647,53		20,40	228,00	399,13
<b>SB27</b>	269,67		35,30	138,00	96,37
<b>Total</b>	9307,58	1504,00	523,34	3379,02	3901,22
<b>% do total</b>	100%	16,2%	5,6%	36,3%	41,9%

Fonte: Própria (2018).

Após a análise minuciosa das áreas em seus grupos de solo e seu respectivo uso, foi possível elaborar uma tabela para a ponderação do CN. O resultado obtido na Tabela 3 mostra o valor de CN característico para cada sub-bacia e o CN característico de toda bacia de contribuição.

Tabela 3: Áreas e CN's das sub-bacias.

Sub-bacia	Área (km <sup>2</sup> )	CN	Sub-bacia	Área (km <sup>2</sup> )	CN
<b>SB01</b>	35,04	83	<b>SB16</b>	319,47	74
<b>SB02</b>	95,46	82	<b>SB17</b>	478,24	77
<b>SB03</b>	474,91	79	<b>SB18</b>	312,14	69
<b>SB04</b>	749,02	80	<b>SB19</b>	4,15	83
<b>SB05</b>	7,62	72	<b>SB20</b>	464,37	72
<b>SB06</b>	253,52	81	<b>SB21</b>	417,18	63
<b>SB07</b>	372,83	80	<b>SB22</b>	130,38	74
<b>SB08</b>	2,79	73	<b>SB23</b>	209,60	78
<b>SB09</b>	588,72	71	<b>SB24</b>	602,11	77
<b>SB10</b>	297,92	80	<b>SB25</b>	1655,19	50
<b>SB11</b>	86,11	83	<b>SB26</b>	647,53	80
<b>SB12</b>	397,46	78	<b>SB27</b>	269,67	78
<b>SB13</b>	70,77	72			
<b>Área total =</b>	9307,58		<b>CN da bacia =</b>		71

Fonte: Própria (2018).



### 6.5. Método de Propagação do Escoamento

Para a representação dos rios e afluentes, o IPHS1 pede algumas informações que, através de um método de cálculo, possam representar um canal para a propagação do escoamento. O método escolhido foi o de Muskingum-Curge Linear pela simplicidade dos dados exigidos.

Foram inseridos os dados a seguir, para cada sub-bacia, no programa:

- Comprimento do trecho de propagação (em metros): equivalente ao comprimento do talvegue principal;
- Cota de fundo de montante (em metros), a cota de fundo de jusante (em metros): obtidas em função da declividade da sub-bacia e da profundidade do trecho em questão;
- Largura do canal (em metros): obtida através do resultado da média de trechos medidos com a ferramenta Google Earth;
- Rugosidade dos sub-trechos: utilizado o valor de 0,125 recomendado por Manning para margens espriadas com muita vegetação em condição regular (TUCCI *et al.*, 1998).

Os valores de “Vazão de referência”, “Número de Sub-Trechos” e “Intervalo de Tempo de Cálculo” foram obtidos automaticamente pelo IPHS1. A Figura 18 mostra a janela do programa em questão preenchida.

Figura 18: Janela de parâmetros para cálculo da propagação do escoamento pelo método Muskingum – Cunge Linear.

Parâmetro	Valor
Comprimento do Trecho de Propagação (m):	350
Cota de Fundo de Montante (m)	12
Cota de Fundo de Jusante (m)	6
Altura do Canal (m)	5
Largura do Canal (m):	70
Rugosidade dos Sub-Trechos:	0.03
Vazão de Referência (m³/s):	<input checked="" type="checkbox"/> Auto 0
Número de Sub-Trechos:	<input checked="" type="checkbox"/> Auto 0
Intervalo de Tempo de Cálculo (seg):	<input checked="" type="checkbox"/> Auto 0

Fonte: Viegas *et al.* (2004).

### 6.6. Transformação chuva-vazão

A simulação do evento no software IPHS1 exige a inserção de dados onde no programa intitula-se “Postos de Chuva”. Os dados inseridos nesse campo são referentes às informações obtidas a partir do histórico diário de chuvas registrado pela Agência Nacional de Águas (ANA). Foram analisadas as chuvas entre os anos de 1998 a 2017 por possuírem dados mais recentes e maiores registros dos eventos durante o período.

Dentre o período estipulado, foram analisados através do banco de dados da FUNCEME os anos que tiveram precipitações observadas próximo ao valor da precipitação “normal” para o ano, sendo a média normal climatológica adotada considerando dados do período de 1970 a 1998 no calendário de chuvas (FUNCEME, 2018), e com valores acima de 30% da precipitação normal anual da bacia do rio Salgado, este último coincidindo com os anos nos quais houve as inundações mais recentes no município de Lavras da Mangabeira.

Na Tabela 4, destacaram-se os anos de 1999, 2006 e 2014 com suas chuvas mais próximas a normal (em azul) e os anos de 2004, 2008 e 2011 com chuvas consideravelmente acima da normal (em verde).

Tabela 4: Valores de precipitações normais e observadas entre os anos de 1998 e 2017 para a bacia do rio Salgado.

Ano	Precipitação normal (mm)	Precipitação observada (mm)	Desvio (%)
1998	879,4	565,6	-35,7
<b>1999</b>	<b>879,4</b>	<b>915,7</b>	<b>4,1</b>
2000	879,4	971,8	10,5
2001	879,4	690,1	21,5
2002	879,4	811,8	-7,7
2003	879,4	755,0	-14,2
<b>2004</b>	<b>879,4</b>	<b>1160,6</b>	<b>32,0</b>
2005	879,4	671,4	-23,7
<b>2006</b>	<b>879,4</b>	<b>929,4</b>	<b>5,7</b>
2007	879,4	684,8	-22,1
<b>2008</b>	<b>879,4</b>	<b>1261,9</b>	<b>43,5</b>
2009	879,4	1031,6	17,3
2010	879,4	775,8	-11,8
<b>2011</b>	<b>879,4</b>	<b>1186,5</b>	<b>34,9</b>
2012	879,4	511,2	-41,9
2013	879,4	747,2	-15,0
<b>2014</b>	<b>879,4</b>	<b>833,9</b>	<b>-5,2</b>
2015	883,3	568,9	-38,4
2016	876,4	653,5	-25,4
2017	876,4	728,7	-16,9

Fonte: Adaptado de FUNCEME (2018).

Uma vez definidos os anos para análise, foi realizado o levantamento de dados de chuva diária para cada ano e para cada município, através do banco de dados da ANA, de forma a ponderar as contribuições de cada posto de chuva para a sub-bacia pertencente.

Desse modo, foi calculada a contribuição de cada município em sua sub-bacia respectiva e inseridos os valores no software IPHS1 como coeficientes de Thiessen, conforme mostra a Figura 19.

Figura 19: Ponderação da contribuição dos postos de chuva de cada município em sua respectiva sub-bacia.

SB05		
	Total	Municípios
		Missão Velha
Área	7.62	7.62
% na SB	1.00	1.00

SB06				
	Total	Municípios		
		Caririçu	Aurora	Missão Velha
Área	253.52	180.42	29.20	43.90
% na SB	1.00	0.71	0.12	0.17

SB07			
	Total	Municípios	
		Aurora	Barro
Área	478.24	334.34	49.30
% na SB	1.00	0.70	0.10
		Milagres	
			94.60
			0.20

SB08		
	Total	Municípios
		Missão Velha
Área	2.79	2.79
% na SB	1.00	1.00

Fonte: Própria (2018).

Os dados dos postos de chuva foram as precipitações acumuladas durante o ano e foram selecionadas as opções de tormenta acumulada e reordenar tormenta de projeto por blocos alternados.

Após feito um diagnóstico geral do projeto com todas as devidas informações inseridas, foi feita a simulação para a bacia de contribuição em questão.

### 6.7. Análise de declividade, utilização e cobertura do solo e simulação no modelo

Inicialmente, pela análise do talvegue principal da área de contribuição obteve-se declividades baixas, sendo 2,33 m/km pelo método da declividade simples e 1,5 m/km pelo método da declividade equivalente constante. Tais valores quando analisados para bacias rurais representam maior duração para que a precipitação efetiva percorra todo o percurso do talvegue até chegar ao exutório, o que é confirmado pelos valores obtidos para o tempo de concentração.

Os resultados dos dois métodos utilizados para calcular o tempo de concentração, sendo eles 50,4 horas para o método de Kirpich e 42,03 horas para o método de *US Corp of*

*Engeneering*, mostraram o grande tempo necessário para que toda a área da bacia contribua para o escoamento superficial na seção em análise. Os fatores que influenciaram tais resultados foram a forma da bacia e sua declividade média, aliados com o comprimento e a declividade do curso principal e afluentes.

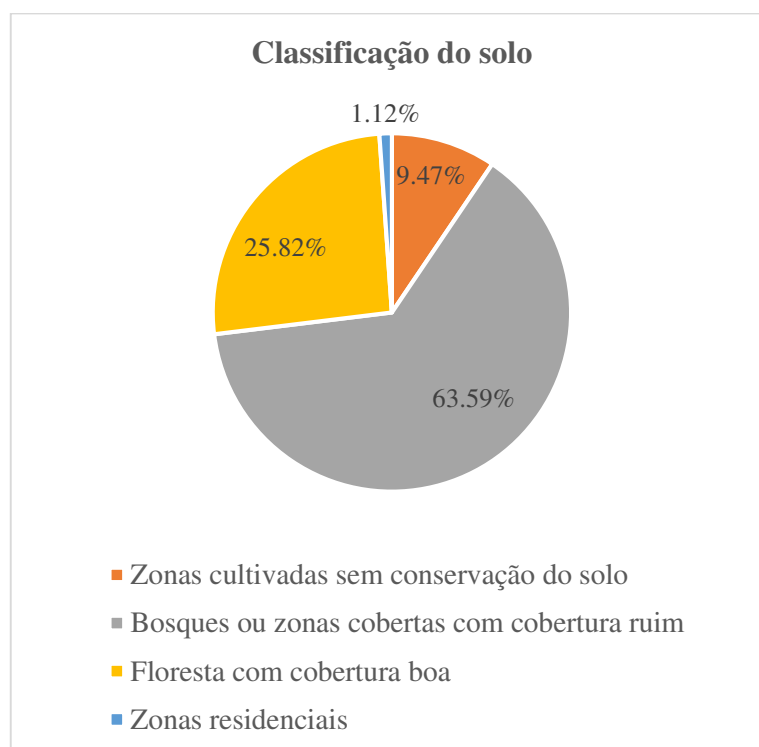
Do mesmo modo, os resultados do cálculo de CN, que representa características físicas do uso do solo, reforçam os resultados anteriores de declividade e tempo de concentração. A Tabela 5 mostra o resultado do cálculo para o CN da área de contribuição e a Figura 20 mostra, em porcentagem, as principais características do solo.

Tabela 5: Resultado do cálculo de CN para a área de contribuição da seção em análise.

CLASSIFICAÇÃO	Área (km <sup>2</sup> )					%	CN
	Grupo A	Grupo B	Grupo C	Grupo D	Total		
Zonas cultivadas sem conservação do solo	87.17	56.67	479.85	257.48	881.16	9.47%	87
Bosques ou zonas cobertas com cobertura ruim	619.45	324.10	2198.34	2776.77	5918.64	63.59%	75
Floresta com cobertura boa	797.39	142.58	601.48	861.89	2403.34	25.82%	57
Zonas residenciais	0.00	0.00	99.35	5.09	104.44	1.12%	90
					9307.58	100.00%	71

Fonte: Própria (2018).

Figura 20: Ponderação das contribuições dos postos de chuva de cada município em sua respectiva sub-bacia.



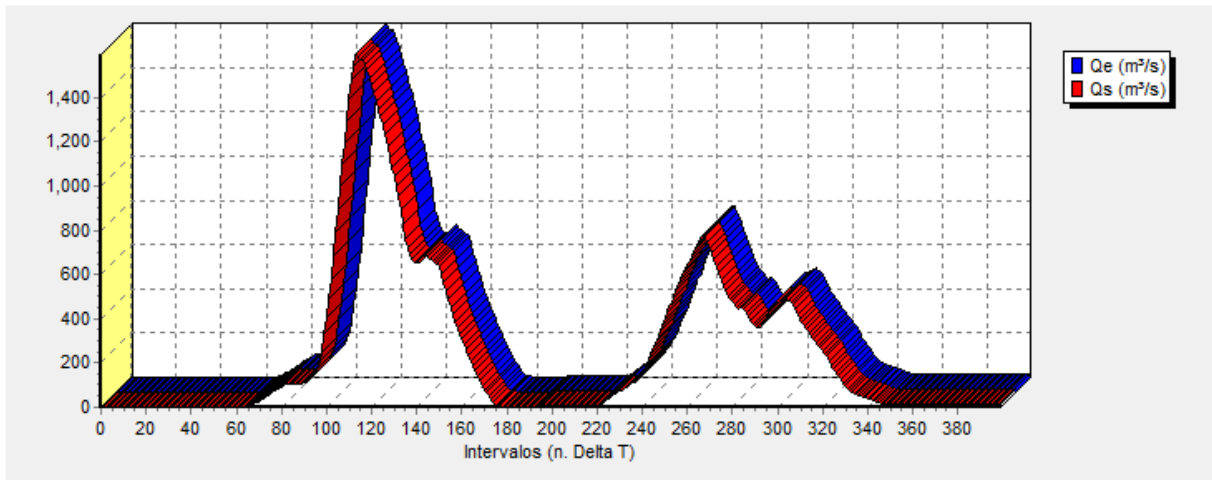
Fonte: Própria (2018).

Na área de contribuição, o valor obtido do CN, representando a característica de absorção do solo, é de 71, demonstrando que ao longo do tempo, com intensos eventos de precipitação, a bacia pode sofrer problemas relacionados com inundações urbanas resultantes de elevadas vazões e pico. Quanto maior o CN, menor a capacidade de permeabilização do solo, proporcionando maior altura na seção em análise e, portanto, inundação.

Seguindo com a metodologia, após disponibilizar os dados obtidos e calculados anteriormente no software IPHS1 foi possível realizar a simulação para cada ano em estudo. Cada simulação permitiu analisar o hidrograma resultante de cada ponto de controle, além da tabela de precipitação efetiva para cada sub-bacia.

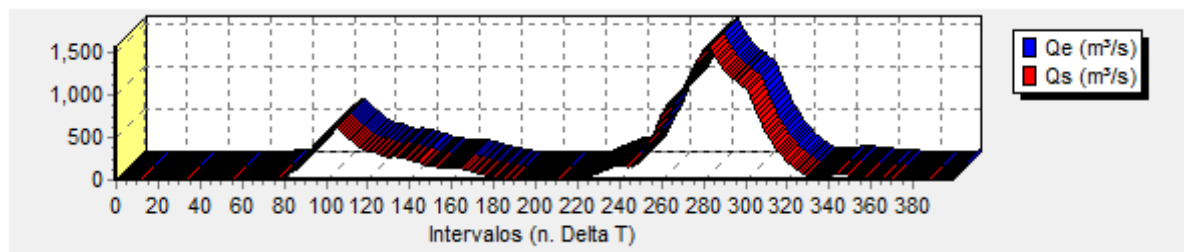
Com o objetivo de comparar os anos onde houve precipitação acima do normal com os anos onde houve precipitação normal, foram obtidos os gráficos do hidrograma resultante para o ponto de controle que representa a seção em análise por este trabalho, e os resultados estão representados das Figuras 21 a 26.

Figura 21: Hidrograma resultante para precipitações no ano de 1999 para a área de contribuição.



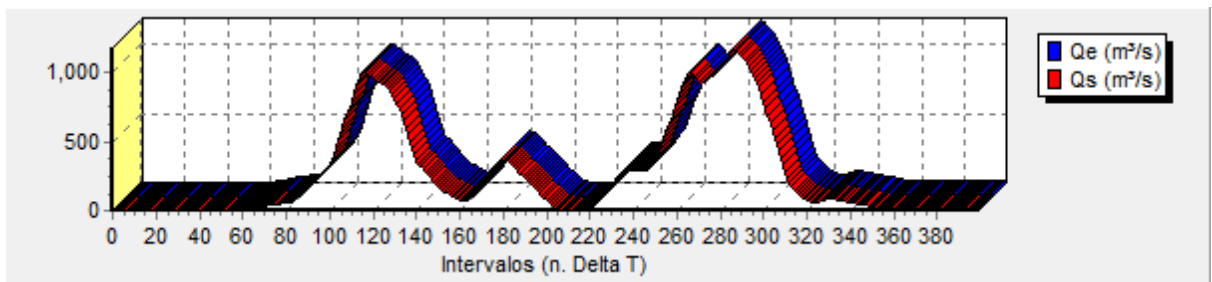
Fonte: Adaptado do modelo IPHS1 (2018).

Figura 22: Hidrograma resultante para precipitações no ano de 2006 para a área de contribuição.



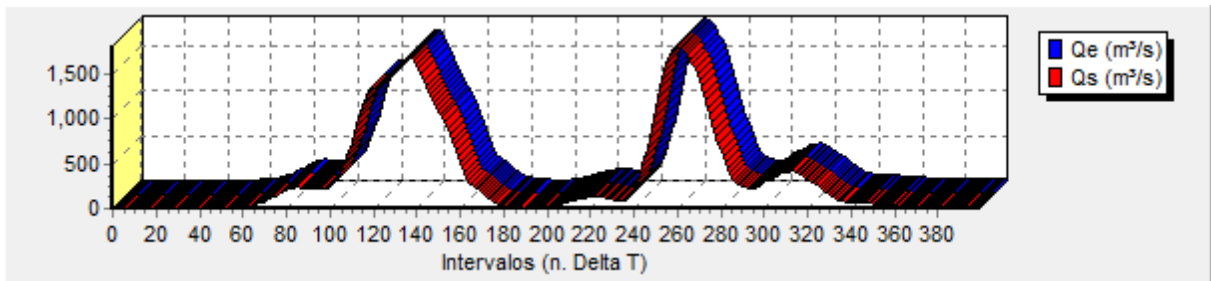
Fonte: Adaptado do modelo IPHS1 (2018).

Figura 23: Hidrograma resultante para precipitações no ano de 2014 para a bacia de contribuição.



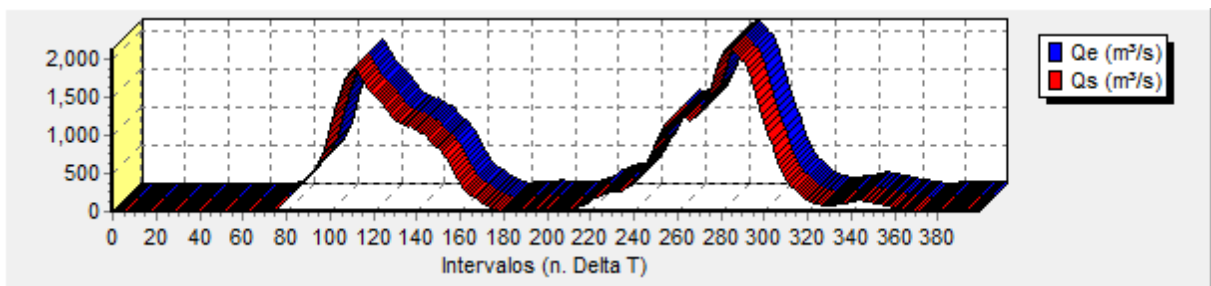
Fonte: Adaptado do modelo IPHS1 (2018).

Figura 24: Hidrograma resultante para precipitações no ano de 2004 para a bacia de contribuição..



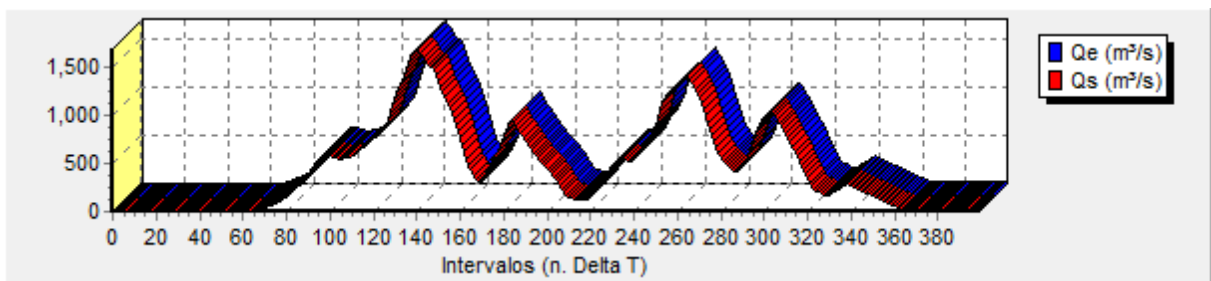
Fonte: Adaptado do modelo IPHS1 (2018).

Figura 25: Hidrograma resultante para precipitações no ano de 2008 para a bacia de contribuição.



Fonte: Adaptado do modelo IPHS1 (2018).

Figura 26: Hidrograma resultante para precipitações no ano de 2011 para a bacia de contribuição.



Fonte: Adaptado do modelo IPHS1 (2018).



De acordo com os dados apresentados pelo software IPHS1 para a seção em análise, pôde-se fazer uma média das vazões de pico para os anos com precipitação normal e para os anos com precipitação acima do normal e, com a diferença entre as médias, pôde-se calcular a vazão excedente nos anos de cheia para o município de Lavras da Mangabeira.

Tabela 6: Diferença de vazões de pico para anos com precipitação acima do normal e anos com precipitação normal.

	Ano	Vazão de pico (m <sup>3</sup> /s)	Vazão média (m <sup>3</sup> /s)
Anos com precipitação maior que 30% acima do normal	2004	1808,00	1880,15
	2008	2144,60	
	2011	1687,86	
Anos com precipitação normal	1999	1592,63	1447,91
	2006	1570,82	
	2014	1180,27	
		$\Delta Q_p =$	432,25

Fonte: Própria (2018).

## 7. CONCLUSÃO

A utilização de técnicas de geoprocessamento, que permitem representar informações físicas de bacias hidrográficas e simulações computacionais de eventos hidrológicos, se mostra bastante prática, eficiente e viável. A análise através do software IPHS1 levou a conclusão que os fatores fisiográficos mais importantes para a análise são a área, a forma, a permeabilidade, a capacidade de infiltração e a topografia da bacia.

A influência da área é clara, pois sua extensão está relacionada à maior quantidade de água que ela pode captar. A permeabilidade do solo influi diretamente na capacidade de infiltração, ou seja, quanto mais permeável for o solo, menor a quantidade que escoar na sua superfície.

Outros fatores importantes são as obras hidráulicas construídas na bacia, especialmente a montante da seção em análise, como barragens que, acumulando a água em um reservatório reduz as vazões máximas do escoamento superficial e retarda a sua propagação. A falta de informações sobre os reservatórios e demais obras afetaram significativamente os resultados deste estudo, fazendo com que as vazões resultantes na seção em análise fossem bem superiores quando comparadas a valores reais.

Assim como a falta de informações acerca das obras hidráulicas, a falta de informações sobre os canais de propagação como profundidade dos rios e afluentes, além da carência de estudo criterioso sobre suas características influenciaram no resultado deste estudo, devido as aproximações na representação dos canais para a utilização do software IPHS1.

Após estudar as características físico-geográficas da área de contribuição para a seção em análise e comparar o comportamento das vazões em períodos de precipitação normal e precipitações acima do normal, pôde-se concluir que a vazão escoada na seção do canal no município de Lavras da Mangabeira possui contribuição de uma área muito extensa que, com eventos de chuva como os analisados vai exceder sua capacidade e transbordar para as intermediações do município. Tal evento é característica intrínseca da bacia hidrográfica ao qual a cidade está inserida, visto que a influência da urbanização na área de contribuição foi de pouco mais de 1%.

Por fim, através de maiores estudos em trabalhos futuros, pode-se caracterizar melhor a região, permitindo maior detalhamento e precisão nos cálculos e simulações com maior

proximidade à realidade. Tais estudos poderão resultar em uma solução para as inundações não só no município de Lavras da Mangabeira, como nas cidades circunvizinhas, evitando danos sociais, danos econômicos e transtornos para a população local.

## **8. SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS**

Como sugestão para trabalhos futuros pode-se citar estudos que abordem a caracterização dos reservatórios, com foco na curva cota-área-volume, de forma a se obter a área coberta pelos reservatórios de acordo com sua capacidade e retenção das águas. De mesmo modo, pode-se citar como trabalho estudos que abordem a caracterização dos canais de propagação, especificando dados como largura, profundidade e rugosidade, devido a extensão da sub-bacia do rio Salgado e seus afluentes.

Através desta linha de pesquisa e os estudos sugeridos, pode-se realizar simulações para outros cenários, investigando demasiadas condições de ocorrência de inundações ao longo da sub-bacia do rio Salgado que possam fornecer valores mais representativos e próximos a realidade.

## 9. REFERÊNCIAS

BORGES, M. A. E. S. T. Bacia da Trindade: Análise dos riscos hidrológicos para a cidade da praia. **Dissertação apresentada à Universidade de Cabo Verde para a obtenção do grau mestre**. Praia – Cabo Verde, 2013.

Ceará. Assembleia Legislativa. **Caderno regional da sub-bacia do Salgado**. Conselhos de Altos Estudos e Assuntos Estratégicos. INESP. Fortaleza, Ceará. 2009.

COGERH. **Cartilha: Vamos conhecer o Salgado**. Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos do Estado. 2007.

FUNCEME – Fundação Cearense de Meteorologia, **Compartimentação Geoambiental do Estado do Ceará**. 2009.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Cidades**. 2010.

JUNK, W. J. *The Central Amazon Floodplain: Ecology of a Pulsing System*. [S.l.]: **Springer Science & Business Media**. ISBN, 2013.

MIRANDA, E. E. de; (Coord.). **Brasil em Relevo**. Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2005. Disponível em: <<http://www.relevobr.cnpm.embrapa.br>>. Acesso em: 24 Mai. 2018.

RIBEIRO, S. C. Caracterização geoambiental da sub-bacia do rio Salgado na mesorregião sul cearense – Parte I – Clima e Arcabouço Geológico. **GEOCONEXÕES**. 2017.

SANTANA, D.P. **Manejo Integrado de Bacias Hidrográficas**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2003. 63p. (Embrapa Milho e Sorgo. Documentos, 30).

SANTORI, A. LOMBARDI NETO, F. GENOVEZ, A. M. Classificação Hidrológica de Solos Brasileiros para a Estimativa da Chuva Excedente com o Método do Serviço de Conservação do Solo dos Estados Unidos Parte 1: Classificação. **RBRH – Revista Brasileira de recursos Hídricos**. Volume 10, n. 4, p. 5-18. 2005.

SOUZA, M.J.N.; LIMA, F.A.M. e PAIVA, J.B. Compartimentação geomorfológica do estado do Ceará. **Ciência Agrônômica**, 9 (1-2): 77-86. Fortaleza/CE, dezembro/1979.

TEODORO, V. L. I.; TEIXEIRA, D.; COSTA, D. J. L.; FULLER, B. B.O conceito de bacia hidrográfica e a importância da caracterização morfométrica para o entendimento da dinâmica do ambiente local. **Revista Unitária**, n. 20. 2007.

TUCCI, C. E. M.; BERTONI, J. C. Inundações Urbanas na América do Sul. **Associação Brasileira de Recursos Hídricos**. Porto Alegre, 2003.

TUCCI, C. E. M.; ORDONEZ, J. S; SIMÕES, L. M. Modelo Matemático Precipitação-Vazão IPH II alguns resultados. **IV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**. ABRH, *Anais*. Fortaleza, Ceará. 1981.

TUCCI, C. E. M.; PORTO, R. L.; BARROS, M. T (orgs.). Drenagem Urbana. Porto Alegre: **Editora da Universidade – UFRGS**, 1995.

TUCCI, C. E. M.; SILVEIRA, A. L. L. Estimativa dos parâmetros do modelo IPH II para algumas bacias urbanas brasileiras. **RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. Volume 3 n. 4, p. 103-120, 1998.

TUCCI, Carlos Eduardo Morelli; Manual de Fundamentos do IPHS1. **Modelagem Hidrológica e Hidráulica**. IPH – Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Versão, v. 2.11. Porto Alegre, 2004.

VIEGAS FILHO, C. E. M, TUCCI, VILLANUEVA, A., D, G. ALASIA P., TASSI, T., & R. C.F. DAMÉ. **Manual do Usuário IPHS1 para Windows**, v. 2.11 – Versão PDF. IPH/UFRGS, Porto Alegre RS, 46 p. 2004.

VIEGAS, J. S. F. **O Paradigma da Modelagem Orientada a Objetos Aplicado a Sistemas de Apoio à Decisão em Sistemas de Recursos Hídricos**. 2000. v.01 294 p. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental)-Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.

VIEGAS, J. S. F.; TUCCI, C. E. M.; VILLANUEVA, Adolfo. **IPHS1 para Windows** ® -**Manual do Usuário versão Beta 1.34**. Porto Alegre. IPH-UFRGS e ALM / FEA / IMF-UFPel, 2001. 35p.

ANEXOS

ANEXO A – Escombros de casas após grande enchente em Lavras da Mangabeira – Ceará em 1947.





ANEXO B – Fotografias do centro da cidade de Lavras da Mangabeira – Ceará durante enchente em 1974.



ANEXO C – Fotografias do centro da cidade de Lavras da Mangabeira – Ceará durante enchente em 1980.



ANEXO D – Fotografias do centro e parque de eventos da cidade de Lavras da Mangabeira – Ceará durante enchente em 2008.

