ISSN 2358-2979

# PROPOSTA DE GERAÇÃO DE CENÁRIOS DE PERIGO DE INUNDAÇÃO ATRAVÉS DO USO DO "RATIONAL METHOD EQUATION"

Carlos Correia da Silva
Mestrando em Geografia | Universidade Estadual Paulista "Campus Rio Claro"
carlos.unesp87@gmail.com
Andréa Aparecida Zacharias
Doutora em Geografia | Universidade Estadual Paulista "Campus de Ourinhos"
andrea@ourinhos.unesp.com.br

**RESUMO**: O perigo de inundação é atualmente um dos eventos de gênese natural que mais tem atingido as populações e consequentemente, provocado danos gravíssimos de cunho econômico e social. Sendo assim, este trabalho procura promover a elaboração de uma proposta de aplicação do modelo hidrológico conhecido como "Rational Method Equation" na geração de mapeamentos que mostrem cenários de áreas em que existem possibilidade de sofrer inundações e realizar breve discussão de sua utilização nas cidades.
**PALAVRAS-CHAVE**: Rational Method Equation; Inundação; Perigo; cidades.

## 1. INTRODUÇÃO

O crescimento acelerado do processo de urbanização, decorrente do crescimento populacional do mundo pós-guerra, da industrialização do mundo periférico e principalmente do êxodo rural, são para Reis *et. al.* (2011), fatores que provocaram estímulos a ocupação de áreas inadequadas à moradia.

Essas áreas são caracteristicamente, locais de formação de favelas e outros tipos de autoconstruções que se assentam rapidamente em planícies de inundação de rios e córregos, em colinas com vertentes muito íngremes ou próximo a lugares de exposição radioativa.

As populações dessas áreas estão constantemente vivendo sobre um perigo eminente que pode facilmente provocar danos a seus bens materiais (que muitas vezes não são poucos), aos animais e muitas vezes a sua própria vida.

Nas últimas décadas, a busca pelo conhecimento sobre os mecanismos de formação, desenvolvimento e controle desses perigos têm se tornado centro de debate de diversas áreas do conhecimento aonde equipes multidisciplinares se tornaram necessária. Assim, passou a ser adotado um corpo técnico formado por geógrafos, sociólogos, engenheiros, médicos e ambientalistas entre outros.

ISSN 2358-2979

Atualmente, uma das formas de perigo que mais tem provocado danos, são os casos frequentes de inundações que, atingem populações de todo o mundo (sobretudo dos países pobres), conforme EM-DAT (2015) e que facilmente podem ser citados exemplos como: o histórico caso da Venezuela (1999), Índia (2013) e Brasil (2010, 2011, 2015).

Nesse sentido, esse trabalho propõe uma breve discussão e aplicação do modelo hidrológico "*Rational Method Equation*" como uma forma de auxilio nos estudos e análises de áreas suscetíveis ao perigo hidrológico.

Seguindo essa proposta, o perigo se torna um componente na análise socioambiental e possibilita integrar futuramente outros fatores como a vulnerabilidade e o risco. Assim, entenderemos perigo como sendo os fatores naturais ou não a que está exposta uma comunidade e que podem de certo modo promover algum tipo de dano.

Pensando por essa perspectiva, Almeida (2012) nos alerta que na análise do perigo é interessante que se faça alguns questionamentos como: como se dá a ocupação humana nas zonas de perigo? Como os indivíduos e as sociedades respondem aos perigos ambientais e que fatores influenciam nas escolhas de ajustamento (adaptação)? Como mitigar os riscos e os impactos dos perigos naturais?

Os questionamentos acima, permitem afirmar que embora os perigos ambientais possuam uma gênese natural, ele é um fator estritamente social, ou seja, não há "perigo" se não houver pessoas que possam sofrer os impactos, em outras palavras, uma inundação que é um evento natural, só se torna um perigo quando a probabilidade de provocar danos a alguém ultrapassa 0%.

Inundação, por sua vez, é um fenômeno natural, mas que decorre de um complexo mecanismo do ciclo hidrológico em que estão envolvidos a tríade clima-relevo-cobertura do solo e que permitem a ocorrência de um evento (por vezes, catastrófico) quando o equilíbrio é rompido, devido a uma "anomalia" que pode ser natural ou antrópica.

Em um cenário normal de vazão de uma bacia hidrográfica, o curso hídrico é o elemento que controla o fluxo de água e que pode se situar em três estágios consecutivos: a situação normal (nível de base), a enchente (cheia) e a inundação (podendo ser brusca ou gradual).

Desse modo, segundo o Min. das Cidades (2007) e Tominaga (2009), a situação normal é a condição constante de um curso hídrico, a cheia (também conhecida como enchente) é o aumento do nível da água na calha do curso hídrico até o limite máximo, já a inundação por sua vez, é o transbordamento das águas de forma a atingir as planícies de inundação.

## 2. MATERIAIS E MÉTODO

ISSN 2358-2979

A geração de cenários de perigo de inundação através da aplicação do modelo "*Rational Method Equation*" demandou previamente da elaboração e análise de uma série de elementos/dados naturais e sociais (quantitativos e qualitativos) que passaram a constituir os materiais desse trabalho.

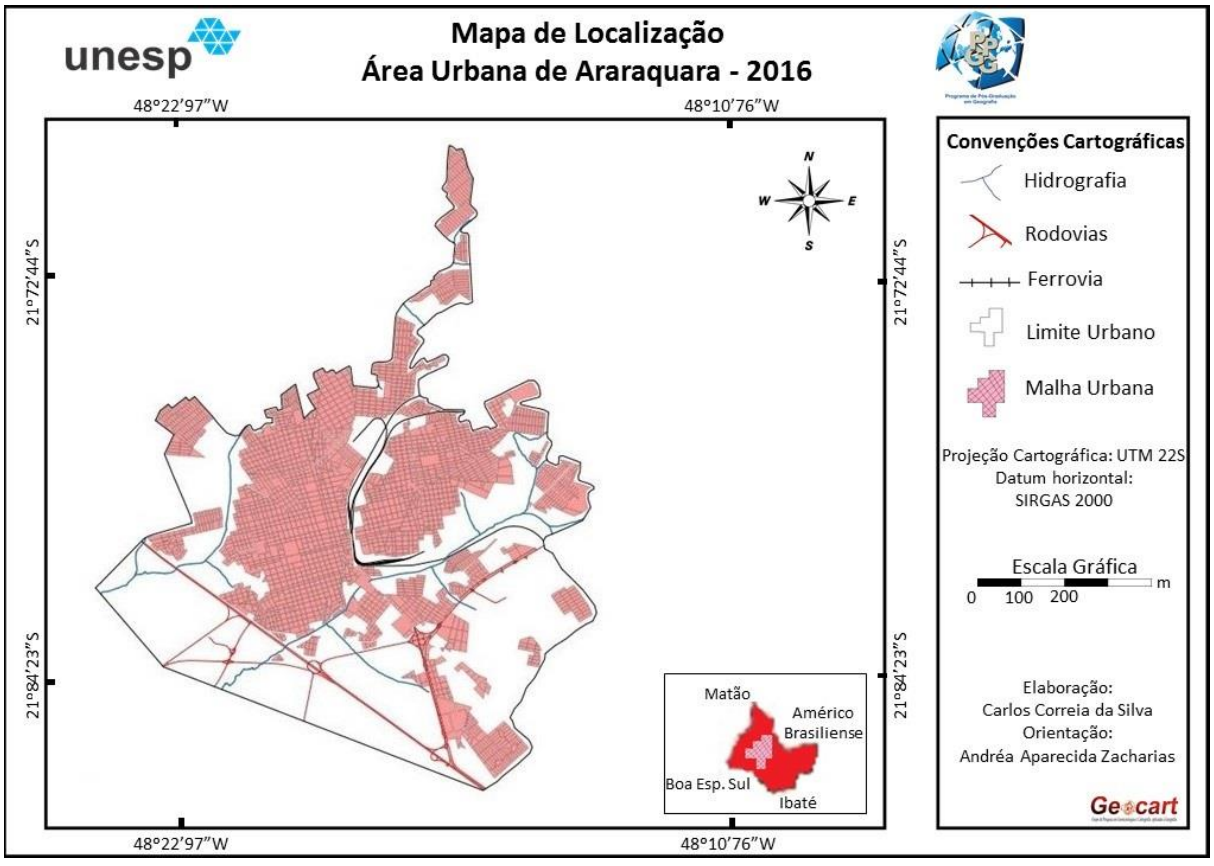
Os materiais desse trabalho foram então elencados nos seguintes itens: definição da escala de trabalho, índices de precipitação, identificação da cobertura do solo e amostragem do perfil topográfico e altimétrico.

a) *Definição da escala de trabalho*.

A escala de trabalho nesse caso diz respeito a área total que será considerada na análise dos fenômenos a que se pretende observar. Essa escala pode ser a região, bacia hidrográfica, município ou bairro.

Decidimos por escolher o município, mais propriamente a área urbana devido a concentração populacional e a possível presença do perigo de inundação, dada a formação de autoconstruções irregulares as margens de córregos e rios. A área de aplicação do modelo nesse caso, foi a área urbana de Araraquara-SP (figura 1).

**Figura 01**: Localização da Área de Análise (2016)



ISSN 2358-2979

**Fonte**: o autor

Araraquara é município localizado próximo a região central do estado de São Paulo, e distante a 270 km da capital. Faz limite municipal com as cidades de Américo Brasiliense, Matão, Boa Esperança do Sul e Ibaté.

Atualmente sua população está em torno de 200 mil habitantes, sua economia é um misto de agricultura, agropecuária e indústria mecânica e alimentícia. Em 2015 a cidade ficou entre os 10 melhores IDH do estado de São Paulo, porém não está livre de problemas habitacionais, emprego e perigos de âmbito natural.

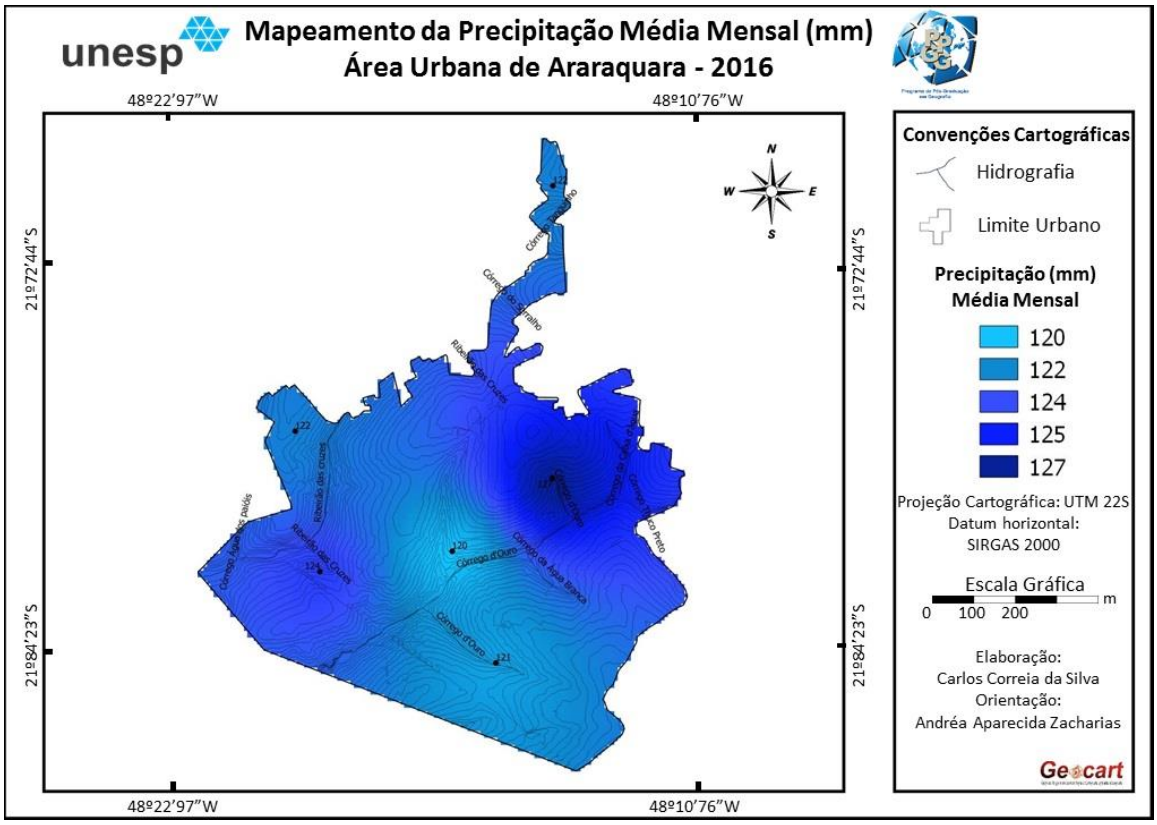
b) *Índices de Precipitação*.

Os índices de precipitação foram obtidos através do Cepagri/Unicamp e mostram a classificação climática de acordo com Köppen. Entre outras características, possibilitaram observar as temperaturas mínimas, máximas, precipitações mínimas e máximas mensal e anual para a cidade de Araraquara.

Os dados foram interpolados através do SIG (Sistema de Informações Geográficas) Quantum GIS versão 2.8.1, possibilitando gerar um mapeamento com as precipitações médias anuais por região da cidade (figura 2).

**Figura 02**: Precipitação Média Anual da Área Urbana de Araraquara (2016)

ISSN 2358-2979




**Fonte**: o autor

O mapa permite observar que Araraquara possui uma média de 124 mm de precipitação mensal com uma distribuição caracteristicamente homogênea, com exceção do setor nordeste que possui valores um pouco superiores, marcando frequentemente um índice de 127 mm de precipitação.

O setor com o maior índice de precipitação é concidentemente o local de nascente do córrego d'ouro, o principal córrego da cidade e o que historicamente mais sofre problemas de inundação devido a sua maior parte estar completamente dentro da área urbana.

c) *Identificação da Cobertura do Solo*.

A identificação da cobertura do solo foi realizada através da observação de imagens de satélites da série Overview e Quickbird obtidas no aplicativo "Google Earth" da empresa Google Inc. na escala de 1:10000 (2013).

Foram realizadas três visitas a campo nos dias 15/01/2015, 02/07/2015 e 23/09/2015 para reconhecimento das possíveis áreas de inundação. Além de utilização de fotografias aéreas e fotos comuns (arquivo pessoal).

ISSN 2358-2979

As vantagens de utilização das imagens de satélite do Google Earth são a facilidade de obtenção dos dados e principalmente da alta resolução espectral, que possibilita uma ótima observação da cobertura do solo.

A visita a campo serve para confirmação dos dados em loco através do contato direto com a área do perigo e com a população residente. Além disso, possibilita a obtenção dos registros fotográficos, croquis, etc.

d) *Amostragem do Perfil Topográfico e Altimétrico*.

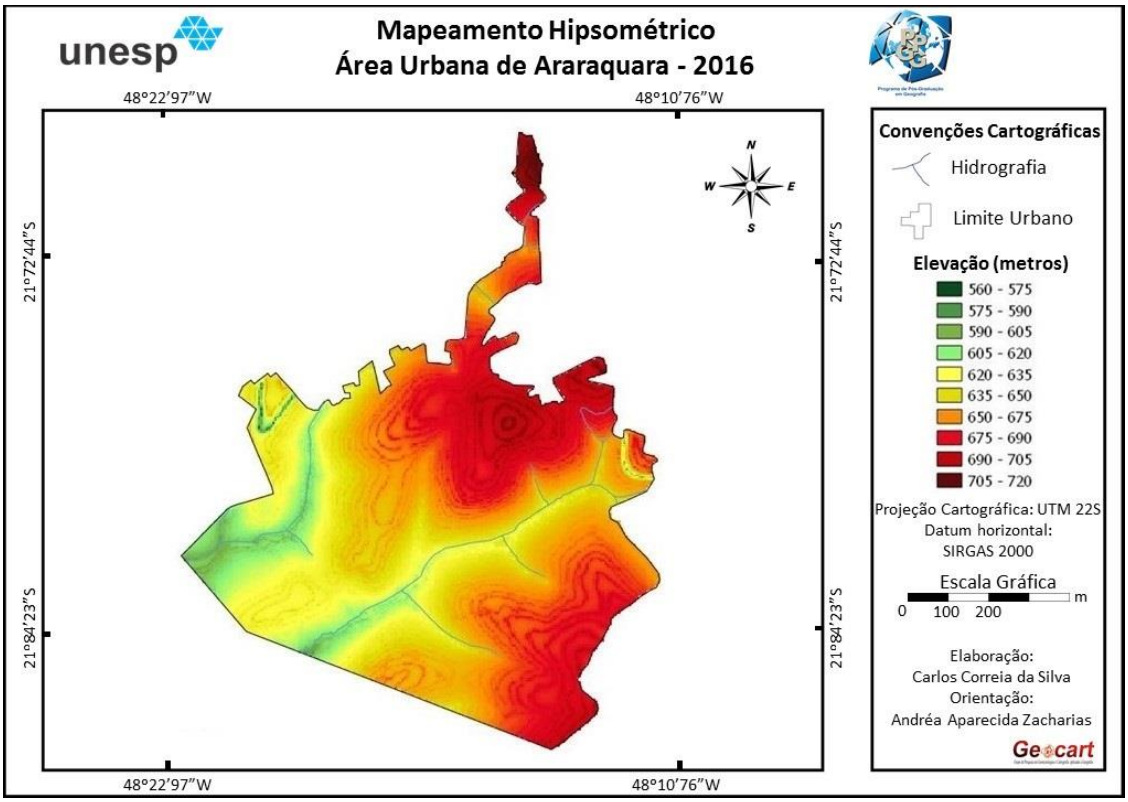
A amostragem dos perfis topográficos e altimétrico permitem observar as “paisagens” e características geomorfológicas do sítio urbano, afim de constatar os desníveis do terreno, as áreas que são facilmente inundáveis e o sentido em que ocorre o escoamento superficial devido a inclinação das vertentes.

As vertentes podem ser levemente ou fortemente inclinadas, entretanto, essa situação não se reduz a condições naturais de erosão, pois, com o processo de urbanização as vertentes passaram a ser moldadas conforme a necessidade/interesse da especulação imobiliária.

Os perfis topográficos e altimétrico também foram gerados em Quantum GIS 2.8.1 através da interpolação das curvas de nível com suas respectivas cotas altimétrica e sintetizados em um mapeamento hipsométrico (figura 3).

**Figura 03**: Mapeamento Hipsométrico da Área Urbana de Araraquara (2016)

ISSN 2358-2979




**Fonte**: o autor

A altimetria de Araraquara varia entre 560 e 720 metros de altura, mostrando uma maior altitude no topo de duas colinas, uma a sudeste com altura de 690 a 705 metros e no Centro-Norte com altitude de 705 a 720 metros. O resto da área urbana possui baixas altitudes, com uma variação de 620 a 675 metros.

As áreas próximas a cursos hídricos possuem uma variação de altura entre 560 e 620 metros. Uma característica da área urbana de Araraquara é a leve inclinação das vertentes nas regiões com ocupação residencial.

O método desse trabalho busca o uso de uma análise sistêmica, visto que o perigo de inundação é um fenômeno social com gênese natural e que demanda a compreensão de diversas variáveis como hidrografia, relevo, solo, cobertura do solo, clima e sociedade. Para isso foi necessário a aplicação de um modelo hidrológico para calcular as taxas de vazão.

O modelo hidrológico utilizado nesse trabalho é conhecido como "*Rational Method Equation*". Segundo Thompson (2006), Cleveland (2011) e Dhakal et. al. (2012), esse modelo consiste em um método simplificado para determinar os picos de vazão de uma bacia de drenagem, tendo como principio, as variáveis: intensidade de precipitação ("i"), área da bacia de drenagem ("A") e o coeficiente racional de precipitação (runoff coefficient – "C"), expresso pela equação:

$$Q = c.i.A$$

ISSN 2358-2979

Thompson (2006) afirma que a intensidade da precipitação é uma característica específica de uma localidade, podendo desse modo, proporcionar variantes como o tempo de duração da precipitação, sua intensidade e o tempo de retorno de eventos extremos. Essas três variáveis podem ser representadas em um gráfico conhecido como "*intensity-duration-frequency curves*" ou simplesmente curvas IDF.

O coeficiente runoff (C) é uma dimensão generalizada que associa a taxa de infiltração da água com o tipo de cobertura do solo, sendo que a intensidade do coeficiente estará diretamente relacionado com a precipitação. Os valores do coeficiente podem ser tabulados conforme o quadro 1 abaixo.

**Quadro 01:** Valores para o coeficiente racional de precipitação

| Cobertura do Solo | Coeficiente de Escoamento (c) |
|---|---|
| Gramados | 0,05 – 0,35 |
| Florestas | 0,05 – 0,25 |
| Terra Cultivada | 0,08 – 0,41 |
| Campo | 0,10 – 0,50 |
| Parques, Cemitérios | 0,10 – 0,25 |
| Solos sem Cobertura | 0,10 – 0,30 |
| Pastagens | 0,12 – 0,62 |
| Área Residencial | 0,30 – 0,75 |
| Área Comercial | 0,50 – 0,95 |
| Área Industrial | 0,50 – 0,90 |
| Ruas com Asfalto | 0,70 – 0,95 |
| Ruas de Tijolo | 0,70 – 0,85 |
| Telhados | 0,75 – 0,95 |
| Ruas com Concreto | 0,70 – 0,95 |

**Fonte**: adaptado de Thompson (2006)

No momento de execução dos cálculos é interessante observar com atenção as unidades de medida para que o resultado não fique errado, pois, a intensidade de precipitação pode ser expressa em (mm/hora, mm/dia, mm/ano, polegadas/hora, polegadas/dia, polegadas/ano), já a área da drenagem pode ser medida em (campos de futebol, acre, milha quadrada, metros quadrados, quilômetro quadrado, e hectare), enquanto que o pico de vazão pode ser medido em (galão/min., galão/dia, $m^3/s$, $m^3/dia$, $ft^3/s$, $ft^3/dia$, e $ac\text{-}ft^3/ano$).

## 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A aplicação do modelo foi executada bairro-a-bairro para diminuir a margem de erro dos cálculos, além disso, foram considerados também o volume de água acumulado (vazão acumulada) ao longo do curso hídrico, assim, teremos por exemplo a seguinte sequência, Parque Pinheiros (A), Parque São Paulo (B), Jardim América (C) e Vila Xavier (D), então as vazões serão:

ISSN 2358-2979

A = A, B = B + A, C = C + B, D = D + C, e assim por diante. Não iremos mostrar os cálculos para todos os bairros para não se tornar repetitivo, mas os resultados serão mostrados no quadro 2.

Neste caso foi utilizado a intensidade de precipitação de 20 mm, 50 mm e 100 mm/hora, obedecendo a média de precipitação normal ao tipo climático do município segundo a classificação de Köppen.

Assim, para servir como exemplo, usemos os cálculos para o Parque Pinheiros (um bairro localizado na região leste da cidade, próximo a nascente do Córrego Caixa d'Água).

Para a utilização do modelo "Rational Method Equation" teremos os seguintes dados;

Área do Bairro = 12.000 m²

Área Urbanizada = 8.000 m² (Pq. Pinheiros) + 5.000 m² (Jd. Paulistano)

Área com Campo = 4.000 m²

Intensidade de Precipitação = 20, 50 e 100 mm/h

Coeficiente = 0,7 (área urbanizada) e 0,5 (área com campo)

Desse modo, aplicando-se o modelo para precipitações diferentes (20, 50 e 100 mm/hora) temos o seguinte;

*- 20 mm/hora*

I. Área Urbanizada

$$Q = c.i.A \rightarrow Q = 0{,}7.20.9000 \rightarrow Q = 0{,}050137741\ m^3/s$$

II. Área com Campo

$$Q = c.i.A \rightarrow Q = 0{,}5.20.4000 \rightarrow Q = 0{,}011019284\ m^3/s$$

Somando I e II, temos

$$0{,}050137741 + 0{,}011019284 \rightarrow Q = 0{,}061157025\ m^3/s$$

Portanto,

$$\boxed{Q = 220\ m^3/h}$$

*- 50 mm/hora*

ISSN 2358-2979

I. Área Urbanizada

$$Q = c.i.A \rightarrow Q = 0,7.50.9000 \rightarrow Q = 0,12534435\ m^3/s$$

II. Área com Campo

$$Q = c.i.A \rightarrow Q = 0,5.50.4000 \rightarrow Q = 0,027548209\ m^3/s$$

Somando I e II, temos

$$0,12534435 + 0,027548209 \rightarrow Q = 0,152892559\ m^3/s$$

Portanto,

$$\boxed{Q = 550\ m^3/h}$$

*- 100 mm/hora*

I. Área Urbanizada

$$Q = c.i.A \rightarrow Q = 0,7.100.9000 \rightarrow Q = 0,25068871\ m^3/s$$

II. Área com Campo

$$Q = c.i.A \rightarrow Q = 0,5.100.4000 \rightarrow Q = 0,0055096419\ m^3/s$$

Somando I e II, temos

$$Q = 0,25068871 + 0,0055096419 \rightarrow Q = 0,305785129\ m^3/s$$

Portanto,

$$\boxed{Q = 1101\ m^3/h}$$

ISSN 2358-2979

Após a realização dos cálculos, podemos observar a síntese dos resultados no quadro 2 abaixo, aonde estão os seguintes bairros: Pq. Pinheiros, Pq. São Paulo, Jd. América, Vl. Xavier, Jd. Yolanda Ópice, Jd. Ieda, Vl. Melhado, Jd. Santa Lúcia, Jd. Santa Angelina, Centro, Jd. das Laranjeiras, Jd. Marivan/Roberto Selmidei I, II, III e IV.

**Quadro 02:** Taxa de Vazão dos Bairros em estudo

| Bairro | 20 mm/h | 50 mm/h | 100 mm/h |
|---|---|---|---|
| Pq. Pinheiros | 220 m³/h | 550 m³/h | 1.101 m³/h |
| Pq. São Paulo | 593 m³/h | 1.483 m³/h | 2.965 m³/h |
| Jd. América | 1.032 m³/h | 2.578 m³/h | 5.157 m³/h |
| Vl. Xavier | 1.032 m³/h | 3.907 m³/h | 7.815 m³/h |
| Jd. Yolanda Ópice | 1.783 m³/h | 6.600 m³/h | 8.916 m³/h |
| Jd. Ieda | 298 m³/h | 744 m³/h | 1.488 m³/h |
| Vl. Melhado | 2.430 m³/h | 6.074 m³/h | 12.148 m³/h |
| Jd. Santa Lúcia | 2.967 m³/h | 7.418 m³/h | 14.836 m³/h |
| Jd. Santa Angelina | 1.712 m³/h | 4.279 m³/h | 8.558 m³/h |
| Centro | 754 m³/h | 1.884 m³/h | 3.768 m³/h |
| Jd. das Laranjeiras | 2.723 m³/h | 6.808 m³/h | 7.726 m³/h |
| Jd. Marivan/Roberto Selmidei I, II e III | 249 m³/h | 625 m³/h | 1.249 m³/h |
| Roberto Selmidei IV | 384 m³/h | 952 m³/h | 1.904 m³/h |

**Fonte**: o autor

Após a realização dos cálculos, esses dados foram interpolados através do Sistema de Informações Geográficas “Quantum GIS 2.8.1” e assim pode ser gerado uma simulação da inundação da cidade de Araraquara para as intensidades de precipitações de 20, 50 e 100 mm/hora.

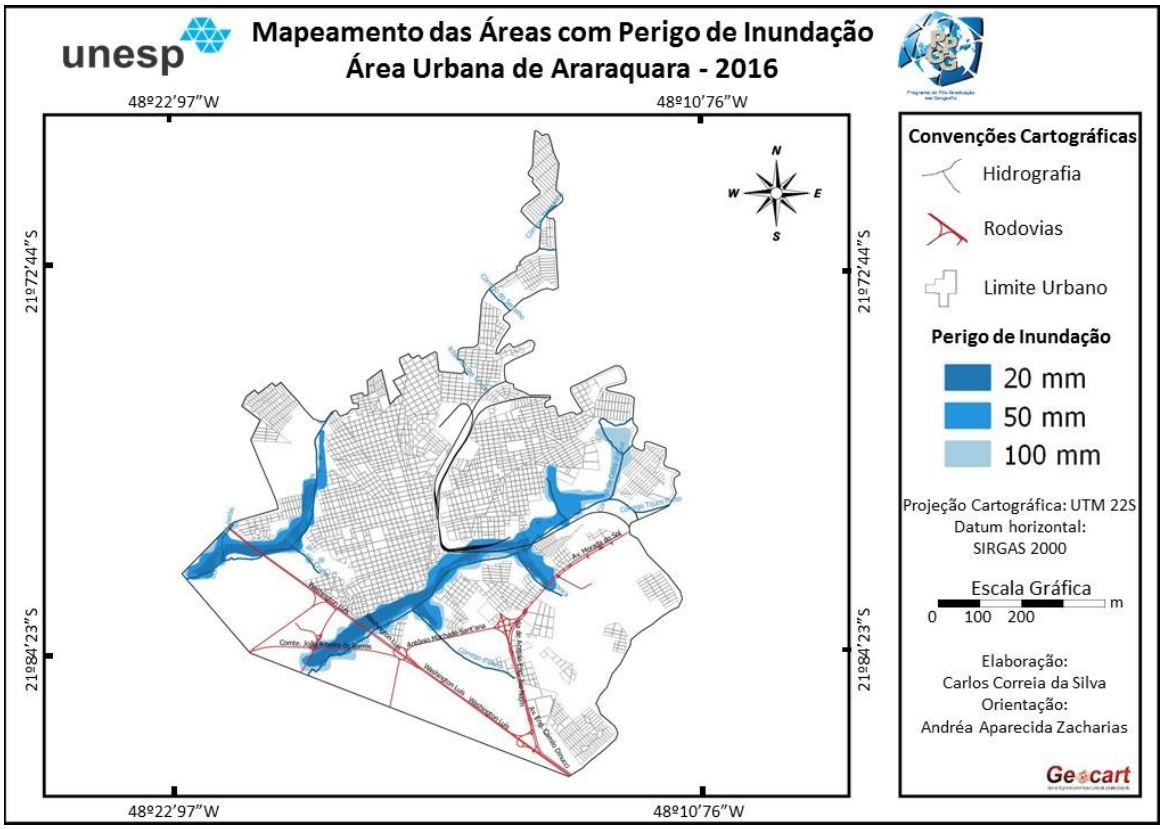
O mapa de inundação permite observar os locais que são adequados ou não a ocupação humana e o tipo de uso que pode haver em cada local, para que assim, possa direcionar o ordenamento da área urbana.

Entretanto, a utilização do modelo hidrológico e do método de interpolação não permite a geração da simulação completa de uma só vez, desse modo, deve ser realizada por etapas, ou seja, deve ser gerado o de 20 mm, em seguida o de 50 mm e por fim o de 100 mm.

Outro problema é na comparação da simulação, visto que ocorrem de forma isolada e para que possa ser sobreposta, é necessário a criação de arquivos em formato shapefile. Após a realização dessas etapas, chega-se ao resultado final que é a própria geração do mapa com os três níveis de inundações (figura 4).

ISSN 2358-2979

**Figura 04**: Mapeamento das Área de Perigo de Inundação (2016)




**Fonte**: o autor

Os resultados obtidos, expressos na figura 4, revela que o perigo de inundação em Araraquara se concentra em torno dos dois principais córregos da cidade. O córrego d'Ouro (sentido nordeste-sudoeste) e o córrego Ribeirão das Cruzes (sentido noroeste-sudoeste).

Para as precipitações de 20 mm/hora apresentam um perigo de inundação muito baixo, pois embora ocorra na área urbana, praticamente não há a presença de residências no local. No córrego d'Ouro, a inundação pode atingir apenas uma avenida próximo ao Terminal Rodoviário de Araraquara.

No setor do córrego Ribeirão das Cruzes, a inundação pode ocorrer em uma área de pastagem entre o Jd. Santa Angelina e o Pq. das Laranjeiras, além de um trecho da Rodovia Washington Luís (SP-310) no quilômetro 364.

Para precipitações de 50 mm/hora apresentam um aumento do perigo de inundação, passando o grau de perigo de muito baixo para médio, principalmente no córrego d'Ouro, aonde, além dos locais já citados acima, pode ocorrer inundação em seus afluentes atingindo algumas

ISSN 2358-2979

residências em bairros periféricos. No córrego Ribeirão das Cruzes, a situação não muda muito, devido a presença de muita vegetação, vertentes muito inclinadas e distância de residências.

Quanto as precipitações de 100 mm/hora podem apresentar um perigo de inundação com um grau de médio a alto de perigo em algumas áreas do meio urbano, como no Pq. Pinheiros, Vl. Xavier, Jd. Santa Lúcia e Vl. Melhado (todos no córrego d'Ouro) e o Pq. Das Laranjeiras (córrego Ribeirão das Cruzes), além da Rodovia Cmte. João Ribeiro de Barros (SP-255) na altura do condomínio Residencial "Campos Ville".

Desse modo, considerando a precipitação média mensal, a situação exposta acima através do mapeamento de perigo de inundação e a discussão realizada, podemos considerar a área urbana de Araraquara como possuindo um perigo de inundação com um grau médio, com exceção dos meses de dezembro, janeiro e fevereiro em que o grau de perigo pode oscilar entre médio e alto por causa da ação de sistemas meteorológicos sazonais como a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS).

## 4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os modelos hidrológicos são um grande auxilio na simulação de eventos de inundação, pois, estes permitem integrar diversas variáveis, tanto naturais quanto sociais como, por exemplo, intensidade de precipitação, permeabilidade do solo e taxa média de vazão de um curso hídrico ou de uma bacia hidrográfica.

Neste sentido, o *Rational Method Equation* se mostra promissor por ser um modelo hidrológico simples e ao mesmo tempo eficiente na análise de vazão de microbacias hidrográficas, porém, não está ausente de equívocos como qualquer modelo matemático.

Como foi visto, para gerar o mapa de perigo de inundação para a área urbana de Araraquara, foi preciso sobrepor algumas camadas porque o modelo não permite integrar mais de uma intensidade de precipitação ao mesmo tempo, desse modo, é preciso sobrepor camadas de intensidades diferentes.

Por fim, foi constatado que o modelo hidrológico *Rational Method Equation* obteve resultados dentro do esperado, no entanto, deve ser aplicado para áreas pequenas. Se a área for grande, deverá ser alterado as intensidades de precipitação ou o tempo de duração, e mesmo assim, existe possibilidades de ocorrer erros significativos.

ISSN 2358-2979

**REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

ALMEIDA, Lutiane Queiroz de. **Riscos ambientais e vulnerabilidade nas cidades brasileiras**: conceitos, metodologias e aplicações. 1. ed. São Paulo: Cultura Acadêmica, 2012.

CLEVELAND, T. G.; THOMPSON, D. B.; FANG, X. **Use of the Rational and Modified Rational Method for Hydraulic Design**. 2011. 158 f. (Monograph). Texas Tech University, Lubbock (Texas), 2011.

DHAKAL, N.; FANG, X.; CLEVELAND, T. G.; THOMPSON, D. B.; ASQUITH, W. H.; MARZEN, L. J. **Estimation of Volumetric Runoff Coefficients for Texas Watersheds Using Land-Use and Rainfall-Runoff Data**. in: Journal of Irrigation and Drainage Engineering/American Society of Civil Engineers (ASCE). Vol. 138, N. 1, janeiro de 2012.

EM-DAT Emergency Database. OFDA/CRED. **The official of US Foreign Disaster Assistance/Centre for Research on the Epidemiology of Disasters** – Université Catholique de Louvain, Brussels, Belgium.

MINISTÉRIO DAS CIDADES/INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS (IPT). **Mapeamento de riscos em encostas e margens de rios**. Brasília: Ministério das Cidades, 2007.

REIS, J. B. C.; CORDEIRO, T. L.; LOPES, E. S. S. **Utilização do sistema de monitoramento e alerta de Desastres Naturais aplicado a situações de escorregamentos – o caso de Angra dos Reis**. in: XIV Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada – XIV SBGFA. Dourados/MS, 2011.

THOMPSON, D. B. **The Rational Method**. in: Engineering Hidrology. Setembro, 2006.

TOMINAGA, L. K.; SANTORO, J.; AMARAL, R. **Desastres Naturais: conhecer para prevenir**. São Paulo: Instituto Geológico, 2009.