

## INFLUÊNCIA DA PROGRESSIVA OCUPAÇÃO URBANA NA OCORRÊNCIA DE ÁREAS INUNDÁVEIS

*INFLUENCE OF PROGRESSIVE URBAN OCCUPATION IN THE OCCURRENCE OF FLOOD AREAS*

**José Eduardo Alamy Filho<sup>1</sup>, Marcio Ricardo Salla<sup>2</sup>, Alan Reis<sup>3</sup>, Hélio Correia da Silva Jhuniór<sup>4</sup>**  
Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Civil, Avenida João Naves de Ávila, 2121,  
Câmpus Santa Mônica, CEP: 38400-902, Uberlândia, MG

<sup>1</sup>Doutor em Hidráulica e Saneamento. E-mail: zealamy@yahoo.com.br

<sup>2</sup>Doutor em Hidráulica e Saneamento. E-mail: marcio.salla@ufu.br

<sup>3</sup>Engenheiro Civil. E-mail: alanreis.ar@gmail.com

<sup>4</sup>Engenheiro Civil. E-mail: helioc91@hotmail.com.

### RESUMO

Quando a calha principal dos corpos de água não suporta as vazões excedentes, as inundações ribeirinhas avançam pelo leito maior dos córregos e rios, normalmente delimitado por cheias da ordem de 100 anos de recorrência. Se a ocupação urbana já está estabelecida nas adjacências, vias e edificações tornam-se fadadas a prejuízos potenciais. Isto justifica a importância da delimitação prévia de zonas inundáveis adjacentes aos córregos, como um instrumento de inquestionável utilidade no planejamento urbano. Neste contexto, este artigo trata de uma ferramenta computacional própria, que engloba métodos tradicionais para avaliação da influência da ocupação urbana progressiva na ocorrência de áreas inundáveis, além de definir um zoneamento para ocupação de áreas vulneráveis a enchentes. O estudo foi realizado na sub-bacia hidrográfica do Córrego Lageado, no município de Uberaba, MG, cujo potencial cenário de urbanização tem gerado preocupações no que diz respeito aos reflexos ambientais negativos que alterações no uso e ocupação do solo podem provocar. Em comparação com o uso do solo atual, os resultados indicam que a urbanização da bacia gera áreas inundáveis incrementais, com aumentos percentuais cujas variações são mais sensíveis para chuvas com tempos de recorrência menores.

**Palavras-chave:** Ocupação progressiva, áreas inundáveis, planejamento urbano, Córrego Lageado.

### ABSTRACT

River floods advance through the larger bed of streams and rivers, usually delimited by floods of 100 years recurrence. Roads and buildings become doomed to potential damage when urban occupation is already established. This justifies the importance of prior delimitation of flood zones adjacent to streams, as an instrument of unquestionable utility in urban planning. In this context, the paper brings a methodology which uses traditional methods to evaluate the influence of progressive occupation on the occurrence of flooded areas, besides defining a zone for occupation of floods areas vulnerable. This study was performed in the sub-basin of the Lageado stream, in Uberaba, MG city, in which potential urbanization scenario generates a natural concern regarding the negative environmental impacts that changes in land use and occupation can cause. Compared with current land use, the results indicate that the urbanization of the basin generates incremental flood areas, with percentage increases whose variations are more sensitive to rainfall with lower times of recurrence.

**Keywords:** Progressive occupation, flood areas, urban planning, Lageado stream.

### 1 – INTRODUÇÃO

O crescimento acelerado da população traz consigo o aumento na ocupação das áreas periféricas aos centros urbanos. O avanço da ocupação urbana sobre terrenos naturais resulta no aumento do nível de impermeabilização do solo e afeta diretamente a sua capacidade de infiltração. Como consequência, durante eventos de precipitação, parcelas de água que poderiam infiltrar-se passam a escoar superficialmente, seguem os declives topográficos, concentram-se preferencialmente nos talwegues e atingem, de maneira mais rápida, os canais naturais e artificiais.

A impermeabilização acentuada do solo acelera a passagem de ondas de cheia nos canais, caracterizada pela fase de crescimento das descargas volumétricas nas seções transversais dos corpos de água, até o instante em que se atinge a vazão de pico, a partir do qual inicia-se a fase de recessão, com redução gradual das vazões. Quando a calha

principal dos corpos de água não suporta as vazões excedentes, verifica-se o transbordamento lateral da água, com inundações ribeirinhas. Segundo Tucci (2007), a urbanização e o desmatamento tendem a aumentar a frequência de inundações nas cheias de pequeno e médio porte.

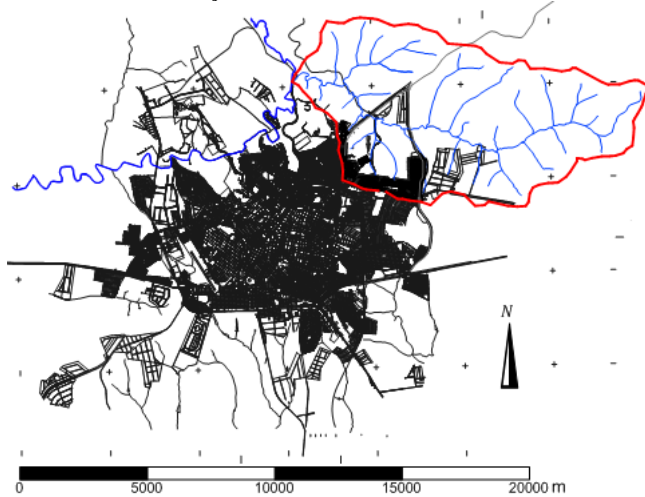
As inundações ribeirinhas avançam pelo leito maior dos córregos e rios, normalmente delimitado por cheias da ordem de 100 anos de recorrência. Quando a ocupação urbana já está estabelecida, suas vias e edificações tornam-se fadadas a prejuízos potenciais. Isto justifica a importância da delimitação prévia de zonas inundáveis adjacentes aos córregos, como um instrumento de utilidade no planejamento urbano.

É grande o número de ferramentas computacionais de modelagem hidráulica aplicada em rios e canais, tais como HEC-RAS (HEC, 2016), RIVER2D (RIVER2D, 2016), MODFLOW (MODFLOW, 2016), entre outros, cujos

resultados hidráulicos normalmente são exportados para uma plataforma SIG, permitindo a visualização de áreas inundáveis. A despeito disto, este tipo de simulação também pode ser implementado em planilha eletrônica, desde que se construa um algoritmo que ordene corretamente a solução de modelos matemáticos tradicionais. Este aspecto é vantajoso uma vez que reduz a dependência de pacotes computacionais comerciais.

Neste contexto, o município de Uberaba, Minas Gerais, tem apresentado tendência de expansão urbana direcionada para o setor nordeste da cidade, mais especificamente na bacia hidrográfica do Córrego Lageado, afluente da margem esquerda do Rio Uberaba. Na Figura 1 é ilustrada a localização dessa bacia em relação à malha urbana atual de Uberaba. Nota-se que fragmentos urbanos estão implantados na porção sudoeste desta bacia, ainda com ocupações incipientes ao sul e ao centro desta área. Além disto, seu exutório está localizado a montante de uma barragem de nível implantada no Rio Uberaba, a qual forma um pequeno represamento utilizado para captação superficial de água para abastecimento público.

Figura 1 – Localização da bacia hidrográfica do Córrego Lageado em relação à malha urbana de Uberaba



A posição estratégica desta bacia, somada a este potencial cenário de urbanização, gera uma preocupação natural no que diz respeito aos reflexos ambientais negativos que alterações no uso do solo podem provocar. Em tal contexto, este artigo apresenta uma estimativa da influência da ocupação progressiva na ocorrência de áreas inundáveis, com utilização da bacia hidrográfica do Córrego Lageado como área de estudo.

## 2 – MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção é feita uma descrição breve da bacia em estudo, incluindo os tipos de solo predominantes e os cenários de uso do solo que foram aplicados nas simulações. Na sequência são descritos os fundamentos dos modelos hidrológicos e hidráulicos utilizados, além dos critérios para zoneamento das áreas inundáveis.

### 2.1 Área de Estudo

O Córrego Lageado é um dos afluentes no médio curso do Rio Uberaba em sua margem esquerda, conforme ilustrado na Figura 1. Na bacia de 66,4 km<sup>2</sup> verifica-se o crescimento das áreas de pastos e agricultura, com conseqüente diminuição das matas ciliares. Além disto, a ocupação urbana é crescente nas áreas periféricas de Uberaba, especificamente ao sul do Córrego Lageado.

A identificação do uso e ocupação do solo foi feita por meio de classificação supervisionada de imagem de sensoriamento remoto. Com isso, as classes de uso do solo estão identificadas na Figura 2a. A distribuição espacial dos tipos de solo na sub-bacia do Córrego Lageado e regiões vizinhas são mostradas na Figura 2b. Nesta área de contribuição pode-se identificar o predomínio de latossolos, com características particulares que estabelecem subdivisões em três tipos mais específicos de solo.

As nascentes da margem direita do Córrego Lageado situam-se em região de Latossolo Vermelho Amarelo Álico ou Distrófico Epiálico textura média. De acordo com a classificação estabelecida pelo *Soil Conservation Service* (SCS) e adaptada por Sartori *et al.* (2005), este solo enquadra-se no tipo A, caracterizado pelo alto grau de resistência à erosão. Apesar dos teores consideráveis de argila, estes solos possuem elevadas macroporosidades no seu perfil, fator que propicia altas taxas de infiltração. A maior parte da bacia do Córrego Lageado é ocupada por Latossolo Vermelho Escuro Álico de textura média. Estes solos também se enquadram no tipo A. Nas adjacências do Córrego Lageado e dos seus principais tributários no baixo curso, ocorrem associações de Latossolo Roxo Distrófico ou Álico, de textura muito argilosa e com 70% de abrangência, com Cambissolo Tb A, com textura argilosa e 30% de abrangência. Esta combinação estabelece comportamentos hidrológicos entre as classes A e D, cujo esclarecimento sobre estas classes é feito no artigo.

### 2.2 Zonas Vulneráveis a Enchentes

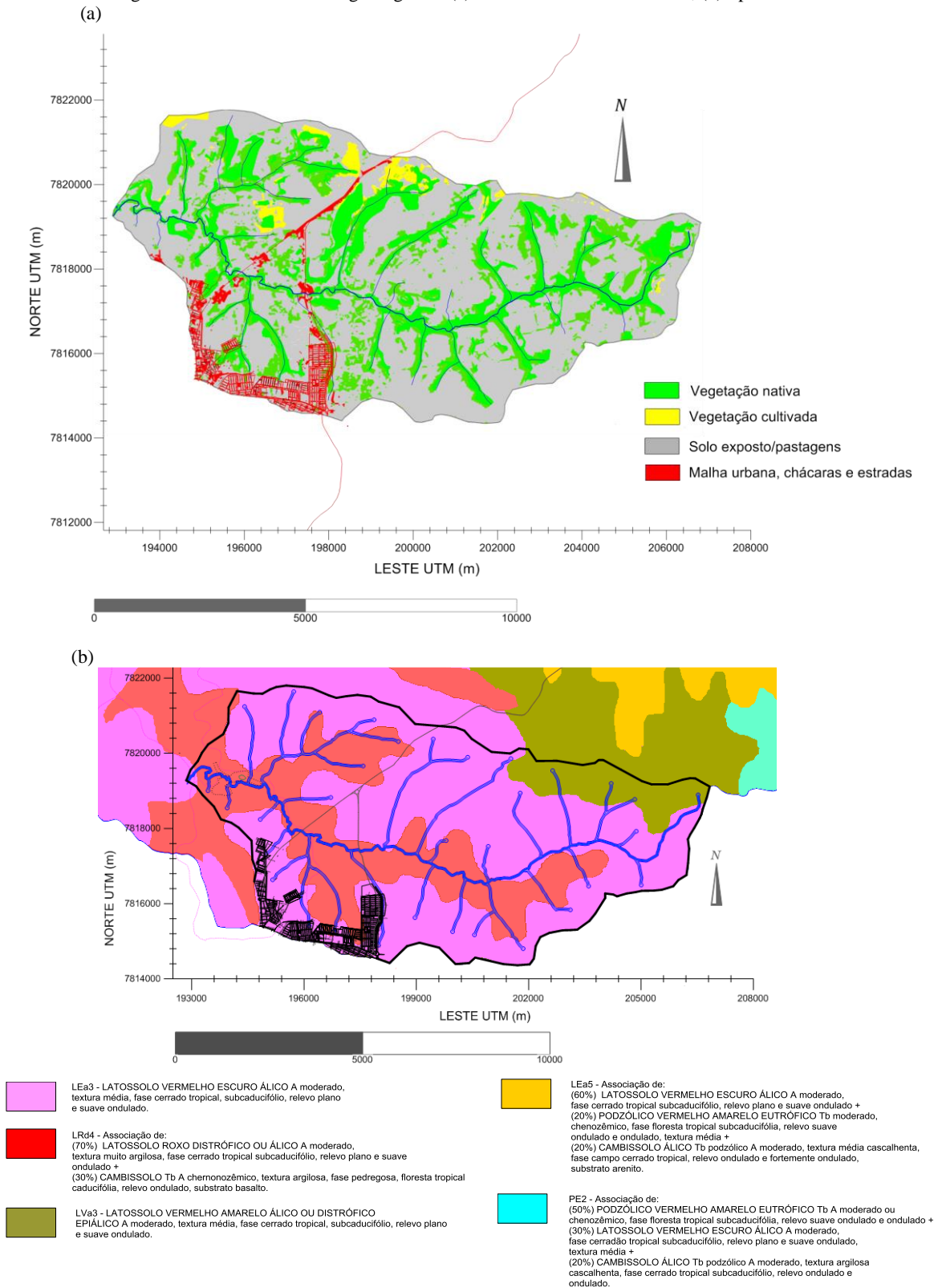
A estimativa de zonas vulneráveis a enchentes requer acoplamento entre modelo hidrológico, modelo hidráulico, modelo numérico de terreno e curvas-chave numéricas. Diante disto, tem-se a precipitação como variável primária e indutora de transbordamentos. Neste contexto, o critério utilizado nesta avaliação baseou-se na verificação de enchentes para chuvas com tempos de recorrência de 1, 5, 10, 20, 50, 100 e 200 anos, e com durações de 30, 60, 120, 720 e 1.440 minutos. O hietograma escolhido foi aquele que resultou na maior soma de áreas inundadas, com a consideração do instante de ocorrência da vazão de pico no exutório da bacia.

Para levar em conta o efeito do uso do solo na bacia, os cenários simulados foram: situação atual, com 4,85% de área impermeável; uso provável em 10, 20 e 30 anos, com 9,96%, 17,05% e 26,38% de área impermeável; e situação de ocupação máxima, com 76% de área impermeável, excetuando-se as Áreas de Preservação Permanentes (APP) contíguas às nascentes e aos corpos de água. Os cenários

futuros de 10, 20 e 30 anos são hipotéticos, mas basearam-se em informações cedidas pelo corpo técnico da concessionária local de água, bem como em projetos de loteamentos com entrada na prefeitura da cidade. O cenário de ocupação máxima consiste na condição hipotética

extrema, cujo horizonte de ocorrência tem difícil previsibilidade, podendo sequer ser implantado. A despeito disto, a aplicação deste último cenário permite identificar aquela que seria a envoltória máxima de inundação.

Figura 2 – Sub-bacia do Córrego Lageado: (a) cenário atual de uso do solo; (b) tipos de solo



Visando à obtenção de mapas de vulnerabilidade que possam ser utilizados como instrumentos de planejamento urbano, as simulações utilizaram a combinação de várias situações críticas. Desta forma, a opção de mapear áreas potencialmente afetadas pelas enchentes foi a favor da segurança, com geração de envoltórias mais abrangentes. Dentre as situações desfavoráveis que foram aplicadas são citadas:

- Utilização da equação de chuvas intensas, que é obtida a partir de precipitações máximas verificadas em cada ano;
- Seleção do hietograma que resultou na maior soma de áreas inundadas, com consideração do instante de ocorrência da vazão de pico no exutório da bacia;
- Imposição do hietograma em todas as 48 sub-bacias concomitantemente, que faz com que a incidência da chuva tenha abrangência máxima. Com isto, naturalmente são geradas as maiores descargas que escoam para o Córrego Lageado;
- Uso de taxas de impermeabilização máximas, de 80% em áreas residenciais e de 25% em áreas de chácaras;
- Utilização da equação de Manning para o cálculo das profundidades, com desconsideração dos efeitos de amortecimento da onda de cheia na própria calha do córrego.

### 2.2.1 Modelo hidrológico

A transformação chuva-vazão consiste em um conjunto de procedimentos responsáveis pela estimativa das descargas que escoam para os cursos de água, decorrentes de eventos de precipitação. Neste estudo, as discretizações ocorreram no nível de sub-bacia, de forma a se preverem as vazões resultantes nos exutórios de 48 áreas que contribuem com as vazões do Córrego Lageado. Os procedimentos aqui apresentados são descritos para aplicação em uma única sub-bacia genérica. Apesar disto, sua generalidade permite a replicação para as demais áreas contribuintes.

É conveniente fixar as características das chuvas para as quais as simulações foram conduzidas, uma vez que a precipitação é o fenômeno gerador de enchentes. Neste sentido, parâmetros como a intensidade, duração e frequência são comumente utilizados para obtenção de chuvas de projeto e de verificação. Evidentemente que as circunstâncias de enchentes são mais graves para chuvas de elevado tempo de recorrência, as quais tendem a gerar grandes alturas pluviométricas e vazões que excedem a capacidade de transporte das calhas principais dos canais. A relação entre a intensidade, duração e frequência foi dada pela equação de chuva de Uberaba, Minas Gerais, desenvolvida a partir de registros históricos de precipitações diárias coletadas na estação do INMET-Uberaba, código de identificação 83577 (SALLA *et al.*, 2014; INMET, 2016).

Este estudo pressupôs distribuição uniforme da chuva no espaço, mas admitiu que as intensidades pudessem variar ao longo da duração da tormenta. Isto vai de encontro com as situações mais críticas, nas quais a precipitação incide sobre toda a bacia, com apresentação dos picos de altura pluviométrica. Para levar em conta

estas variações temporais, utilizaram-se os hietogramas adimensionais de Huff, com 50% de probabilidade de ocorrência. As curvas foram testadas para diferentes durações e tempos de recorrência, de forma que os mapas de abrangência de inundações foram gerados para os hietogramas que resultaram nas maiores áreas inundadas.

O método Santa Bárbara foi utilizado para transformar as distribuições temporais de chuva (hietogramas) em distribuições temporais de vazão (hidrogramas), nos exutórios das sub-bacias contribuintes ao córrego Lageado. Este método admite o cálculo do escoamento superficial pelos procedimentos do *Soil Conservation Service* (SCS). Além disto, o método Santa Bárbara tem a habilidade de considerar que há efeitos amortecedores na sub-bacia, os quais retardam transitoriamente a chegada da água nos canais. As equações que propiciam a transformação de chuva em vazão podem ser consultadas em SCS (1972 e 1973), Bosznay (1989), Araújo Neto *et al.* (2012) e Alamy Filho *et al.* (2016).

A solução pelo Método Santa Bárbara é obtida, para cada passo de tempo, por um procedimento iterativo que opera até que seja atingido o horizonte final de simulação. Esse horizonte fatalmente deverá superar a duração da chuva, haja vista que o hidrograma resultante apresenta fases de crescimento rápido e de recessão suave, quando o evento de precipitação cessa.

### 2.2.2 Modelo hidráulico

O Córrego Lageado recebe água de 48 sub-bacias. Destas, há 24 descargas pontuais verificadas nas confluências dos tributários das margens direita e esquerda com o próprio Córrego Lageado (ver Figura 3b). No restante, há mais 24 contribuições difusas para o curso de água ao longo de sua extensão. Na modelagem hidráulica de enchentes, o principal objetivo consiste na determinação das profundidades do escoamento, que verifica se os níveis de água no canal superam as cotas superiores da sua calha principal. Se isto ocorrer, o escoamento excede o leito menor e avança lateralmente sobre a planície de inundação, com conseqüente ocorrência de eventos de inundações ribeirinhas.

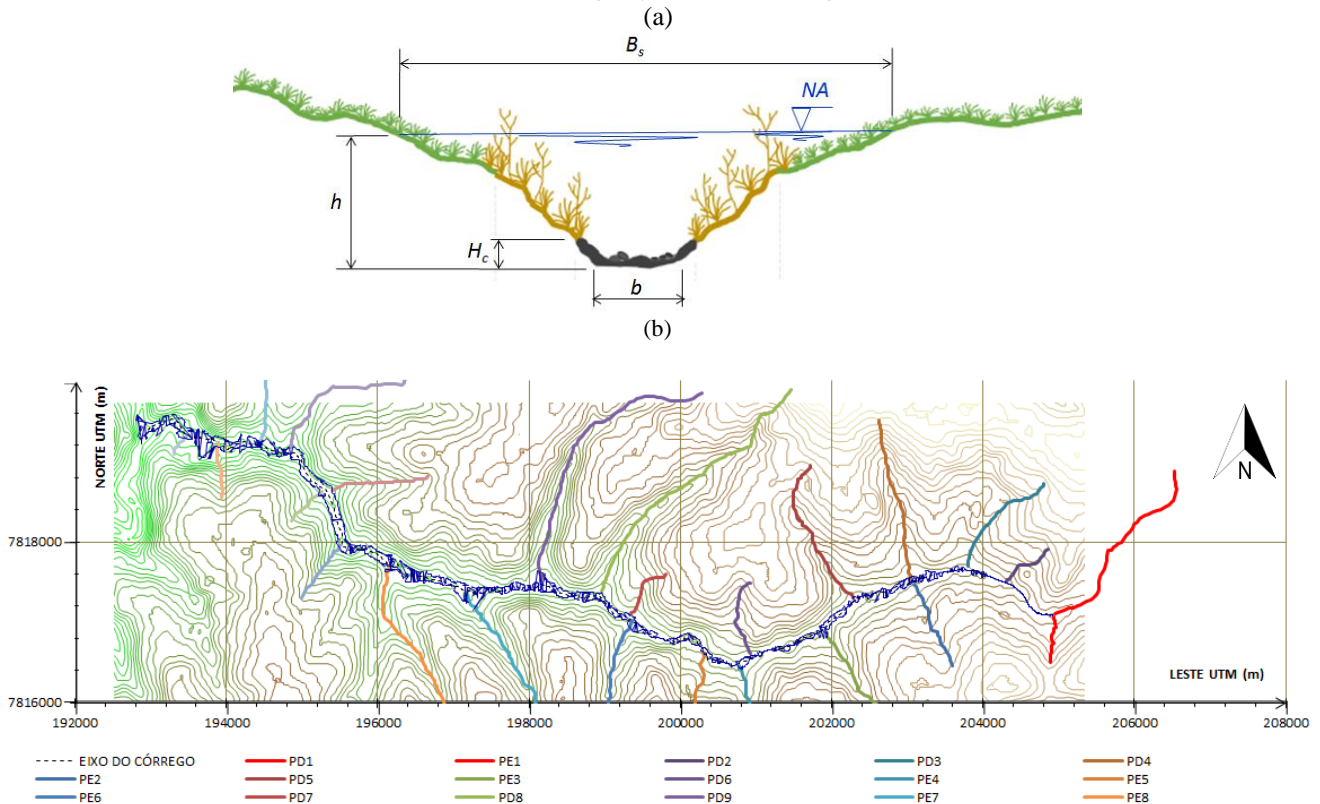
A passagem de ondas de cheia em canais é um evento transitório, haja vista que as vazões escoadas apresentam fase de crescimento até que seja atingido um valor máximo. Após a ocorrência desta descarga crítica e com o final dos eventos de chuva, as vazões retrocedem de forma suave, com verificação da depleção dos hidrogramas. A despeito desse fenômeno ser essencialmente transiente, a estimativa de manchas de inundação a partir de abordagens de regime permanente, como a clássica equação de Manning, tende a fornecer resultados que vão a favor da segurança.

Tucci (2007) descreve que, para o mapeamento definitivo de zonas propícias a inundações, é conveniente o uso de um modelo de escoamento permanente, com o cálculo da linha da água a partir da vazão máxima observada em um posto fluviométrico. Nestes casos, não são considerados os efeitos de amortecimento oferecidos

pelo canal, de forma que as profundidades calculadas tendem a ser ligeiramente maiores do que aquelas computadas por equações de regime transiente. Para maior proteção da população, é compreensível que a previsão de zonas inundáveis deva assumir concepções mais pessimistas, com delimitação de áreas maiores do que

aquelas verificadas em eventos comuns de chuva. Por isto, as relações entre variáveis hidráulicas e geométricas do Córrego Lageado foram estimadas pela equação de Manning.

Figura 3 – (a) Características geométricas de uma seção transversal típica do Córrego Lageado; (b) Trecho do Córrego Lageado discretizado em 2.000 seções para fins de simulação hidráulica



Em canais naturais, como é o caso do Córrego Lageado, a calha principal e a planície inundável lateral possuem características distintas. Enquanto a primeira é mais profunda e estreita, revestida por material pedregoso; a segunda tende a ser espreada e coberta por vegetação. Assim como mostrado na Figura 3a, quando a superfície livre do escoamento ( $NA$ ) excede a altura da calha principal ( $H_c$ ), o transbordamento provoca inundações laterais e a submersão do leito maior do canal, com ocorrências de zonas de escoamento com características diferentes.

Ainda na Figura 3a, como as áreas adjacentes ao leito são mais espreadas do que os taludes da calha principal, a largura superficial ( $B_s$ ) do escoamento tende a ser ampliada em relação à largura de base ( $b$ ). Ademais, o aumento da largura superficial é bastante sensível a pequenas elevações da superfície livre. Por isto, quanto mais plano for o terreno contíguo ao leito menor do canal, maior é o potencial de alastramento das inundações. Para a quantificação da profundidade e conseqüentemente da posição da superfície livre da água, é preciso obter um coeficiente de rugosidade equivalente (ou resultante) para cada seção analisada. Tal parâmetro também apresenta grande sensibilidade a variações de profundidade.

Para efeito de simulação de enchentes, o Córrego Lageado foi discretizado em 2.000 seções (ver Figura 3b), desde a confluência das contribuições pontuais PD1 e PE1 até sua foz no Rio Uberaba. Ao longo do alto, médio e baixo curso, o córrego recebe seus tributários e contribuições difusas, cujas descargas devem ser atribuídas nas seções específicas. Este trecho, que tem extensão total de 14,34 km, foi discretizado com seções espaçadas de 7,17 m.

Visitas de campo resultaram em um banco de dados sobre as seções transversais do Córrego Lageado, sobre os revestimentos de calha e da planície de inundação, sobre as dimensões das seções transversais e sobre os coeficientes de rugosidade de Manning. Estes dados, incluindo a batimetria do canal, foram coletados em oito seções específicas, entre o alto e baixo curso do córrego. A partir de procedimentos de interpolação espacial, estas características foram transferidas para as 2.000 seções discretas do canal.

### 2.2.3 Modelo Numérico do Terreno

O Modelo Numérico do Terreno (MNT) consiste em um banco de dados essencial para a estimativa das áreas

ribeirinhas vulneráveis a inundações. Assim, quando o nível de água extravasa o leito menor do canal, o MNT é utilizado para se prever o alcance lateral da inundação. Portanto, a comunicação entre o modelo hidráulico, que calcula a cota da superfície livre, com o modelo de terreno é um procedimento intrínseco desta metodologia.

Neste estudo gerou-se um MNT adjacente ao Córrego Lageado. A base do MNT foi o modelo digital de elevação da bacia do Córrego Lageado, obtido a partir do programa TOPODATA e dos dados SRTM (shuttle radar topographic mission) do USGS (Serviço Geográfico Norte-Americano). O referido modelo digital de elevação foi refinado, via krigagem, para a região adjacente ao córrego. Esta interpolação gerou um MNT mais localizado, no qual as coordenadas e as cotas altimétricas foram determinadas em uma malha de 1.020 por 1.020 nós uniformemente espaçados nas direções Leste e Norte. Isto resultou em espaçamentos entre nós de 12,60 m, na direção Leste, e 7,36 m, na direção Norte.

#### 2.2.4 Curvas-chave numéricas

Outro aspecto desta metodologia consiste no cômputo de curvas-chave numéricas, que representam as relações entre a profundidade  $h$  do escoamento e a posição da seção transversal  $L$  com o coeficiente de rugosidade de Manning equivalente, a área molhada, o perímetro molhado e a largura superficial em diferentes seções transversais do Córrego Lageado. Assim, uma vez estimadas as vazões que são veiculadas para o canal por fontes pontuais e difusas (via modelo hidrológico), as mesmas são acumuladas nas seções no sentido de montante para jusante. Isto permite configurar perfis de vazão e profundidade, a qual é calculada pela equação de Manning. Esses perfis permitem prever, de maneira preliminar, as seções nas quais há transbordamento. Isto é feito por meio da comparação das profundidades da água com a altura da calha principal do córrego. Uma vez que são conhecidas as vazões e as posições da seção transversal, o uso das curvas-chave numéricas agiliza os cálculos automatizados de profundidade e, por consequência, das áreas susceptíveis a inundações.

#### 2.3 Zoneamento de Áreas Inundáveis

O zoneamento é definido como um conjunto de regras para ocupação das áreas de risco de inundação, que visa minimizar de futuras perdas materiais e humanas em decorrência das grandes cheias. Trata-se de um instrumento disciplinador da ocupação de áreas vulneráveis a enchentes (TUCCI, 2007).

O mapeamento de áreas sujeitas a inundações, que considera os riscos de ocorrência das cheias, consiste na etapa que precede o zoneamento. Nesta condição, é preciso delimitar zonas de risco com tempo de recorrência de até 100 anos. Apesar disso, Tucci (2007) comenta que, em locais onde já foram registrados eventos com tempo de retorno superiores a 100 anos, deve-se optar pelo maior valor já verificado. No presente trabalho, a enchente de 100 anos de recorrência foi escolhida para se estabelecer a

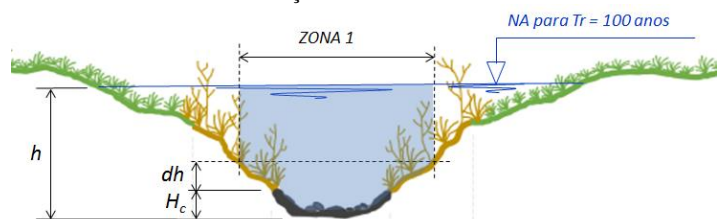
envoltória das várzeas potencialmente inundáveis do Córrego Lageado.

Para efeitos de zoneamento, de acordo com recomendações de Tucci (2007), a várzea inundável pode ser dividida em 3 regiões:

- Zona 1: zona de passagem de cheias;
- Zona 2: zona de amortecimento de cheias;
- Zona 3: zona de baixo risco.

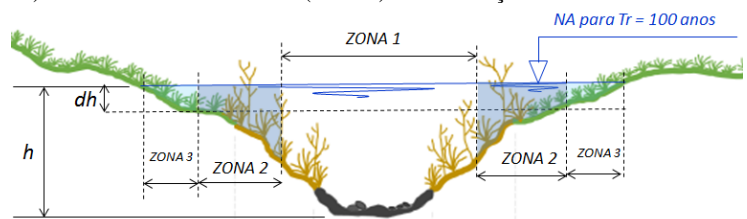
A Zona 1 possui funcionamento hidráulico no que se refere à efetiva veiculação da enchente no sentido montante-jusante. Nela, as velocidades de escoamento são maiores. Todavia, sua obstrução por aterros, edificações e obras de grande porte pode acarretar no represamento de setores a montante. Por isto não se deve admitir obras que obstruam o escoamento dentro desta zona. O esquema da Zona 1, na qual a fixação normalmente ocorre com a imposição de um incremento de altura ( $dh$ ) acima do leito menor da seção, é mostrado na Figura 4. Para isto, de acordo com Tucci (2007), nos Estados Unidos costuma-se utilizar acréscimo de 1 pé (30,48 cm).

Figura 4 – Esquema da zona de passagem de cheias (Zona 1) em uma seção transversal



Com o avanço lateral da água além da Zona 1, atingem-se setores de baixa velocidade (Zona 2), destinados fundamentalmente ao amortecimento de cheias por meio do armazenamento transitório nas várzeas. Dentro da Zona 2 recomenda-se restrição de ocupação, haja vista que a permanência da inundação pode perdurar por horas ou dias, até que ocorra recessão da enchente e recolhimento do curso de água para seu leito menor. O restante da superfície inundável, nas proximidades dos limites da envoltória, tende a apresentar pequena lâmina de água. Trata-se da Zona 3, a mais periférica de todas e que apresenta baixo risco de ser afetada. Estes setores são mostrados, esquematicamente, na Figura 5. Nos casos de se admitirem edificações na Zona 3, a população residente deve estar esclarecida quanto às possibilidades de inundações esporádicas. Não obstante, este inconveniente pode ser evitado por meio da proibição de ocupações residenciais, comerciais ou industriais na Zona 3.

Figura 5 – Esquema das zonas de amortecimento de cheias (Zona 2) e das zonas de baixo risco (Zona 3) em uma seção transversal



### 3 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção são delimitadas as envoltórias de inundação adjacentes ao Córrego Lageado, decorrentes do alastramento de áreas impermeáveis sobre a bacia. Os resultados embasaram uma proposta de zoneamento das áreas ribeirinhas susceptíveis a inundações.

#### 3.1 Zonas Vulneráveis a Enchentes

As estimativas de zonas inundáveis consideraram os três cenários de urbanização descritos na seção 2.2. Desta forma, na Tabela 1 estão listadas as áreas da envoltória de inundação, obtidas para diversos tempos de recorrência, para a urbanização atual, urbanização com horizonte de 30

anos e urbanização máxima com lotes residenciais. Os resultados indicam que os cenários de maior ocupação urbana condicionam aumentos consideráveis no total de áreas inundadas. Estes acréscimos são mais sensíveis para chuvas com períodos de recorrência menores. Por exemplo, considerando eventos com risco superiores a 90%, o cenário de 30 anos ocasionou um aumento de 60,25% de área inundável em relação ao cenário atual. No cenário extremo e, para a mesma chuva, este acréscimo percentual subiu para 185,72%. Em contrapartida, para chuvas com 1% de probabilidade de ocorrência anual, o cenário de 30 anos gerou um aumento percentual de 13,69%, ao passo que, no cenário extremo, este aumento foi de 85,42%.

Tabela 1 – Áreas das envoltórias de inundação para diferentes tempos de recorrência

Tr (anos)	Urbanização atual			Urbanização de 30 anos			Urbanização máxima com lotes residenciais			Hietograma
	Risco anual (%)	Área inundada (km <sup>2</sup> )	Duração da chuva mais crítica (min)	Risco anual (%)	Área inundada (km <sup>2</sup> )	Duração da chuva mais crítica (min)	Risco anual (%)	Área inundada (km <sup>2</sup> )	Duração da chuva mais crítica (min)	
1	> 90	1,61	30	> 90	2,58	30	> 90%	4,60	30	Huff 4º quartil
5	20	2,04	120	20	2,80	30	20%	5,05	30	
10	10	2,29	120	10	2,97	30	10%	5,26	30	
20	5	2,53	120	5	3,12	30	5%	5,49	30	
50	2	2,85	120	2	3,36	60	2%	5,78	30	
100	1	3,11	120	1	3,57	60	1%	6,00	30	
200	0,5	3,36	120	0,5	3,82	60	0,5%	6,23	30	

As áreas susceptíveis a inundações, para o cenário de ocupação atual, urbanização para horizonte de 30 anos e urbanização máxima com lotes residenciais, são ilustradas na Figura 6. Neste contexto, as envoltórias, simuladas para tempos de recorrência de 100 anos (risco anual de 1%), foram utilizadas para delimitar o leito maior do Córrego Lageado. De uma forma geral, os resultados apresentados na Tabela 1 e na Figura 6 confirmam o crescimento das áreas susceptíveis a inundações ribeirinhas com o aumento do tempo de recorrência das chuvas e com a aplicação de eventuais cenários futuros de ocupação, os quais trazem acréscimos nas áreas impermeabilizadas.

#### 3.1.1 Comparações entre os cenários

Nesta seção são resumidos os resultados para as envoltórias de inundação simuladas sob diversas condições de chuva e de ocupação da bacia do Córrego Lageado. Assim, os valores numéricos das áreas de envoltória são sintetizados na Figura 7a. Percebe-se que incrementos do uso urbano do solo provoca aumento evidente nas áreas potencialmente inundáveis. Nas condições de urbanização progressiva, até o cenário futuro de 30 anos, estas áreas sofrem incrementos aproximadamente lineares, para cheias de 1 ano de recorrência. Para períodos de retorno maiores, os incrementos são mais destacados entre os cenários ocupacionais de 20 e 30 anos, com pequenas variações entre os cenários atual e de 10 anos. Porém, em todos os casos, o cenário de ocupação máxima resultou em

envoltórias de magnitude destacada. Estes comportamentos indicam que a amplitude das envoltórias de inundação é deveras sensível à taxa de impermeabilização da bacia. Isto pode ser confirmado pela Figura 7b, diagrama pelo qual se nota que índices de impermeabilização superiores a 46% podem dobrar a envoltória de inundação, para chuvas com períodos de retorno inferiores a 50 anos. Por outro lado, taxas de impermeabilização mais modestas, verificadas nos cenários de 10 e 20 anos, provocam incrementos relativos menores, porém não desprezíveis, em relação à situação inicial.

Em suma, apesar do acréscimo de impermeabilização ampliar as envoltórias, seu grau de influência decresce com o aumento do tempo de recorrência da chuva. Nota-se que o efeito da impermeabilização é mais decisivo para chuvas de menor período de retorno (Figura 8).

Para fins de delimitação da fronteira máxima da várzea inundável, este estudo utilizou as envoltórias de 100 anos de recorrência (Figura 9). Neste sentido, a localização destas áreas serve como um instrumento auxiliar para o zoneamento de uso e ocupação do solo na bacia do Córrego Lageado.

Na Figura 9, a envoltória mais abrangente estabelece a máxima área inundável de várzea, verificada para cheias de 100 anos de recorrência (1% de risco anual) e para o cenário de máxima urbanização (taxa de impermeabilização total de 76%). Essa região foi utilizada como fronteira para o zoneamento de áreas inundáveis.

Figura 6 – Áreas susceptíveis a inundações: (a) cenário de ocupação atual; (b) horizonte de ocupação de 30 anos; (c) cenário de urbanização máxima

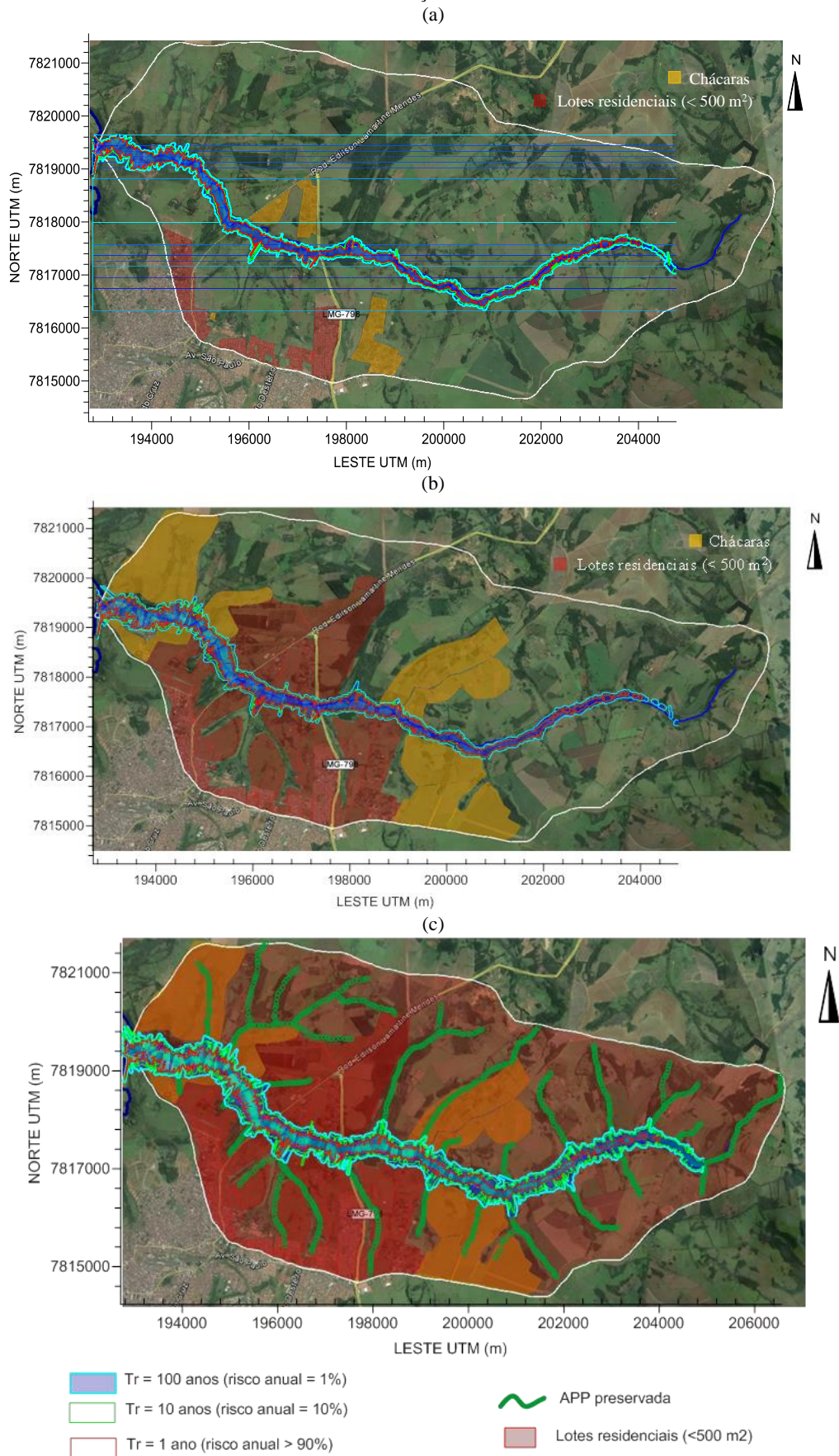




Figura 7 – (a) áreas das envoltórias de inundação para diferentes cenários de urbanização e diferentes tempos de recorrência; (b) acréscimos relativos de área para as envoltórias de inundação e sua relação com o grau de impermeabilização da bacia e o tempo de recorrência da precipitação

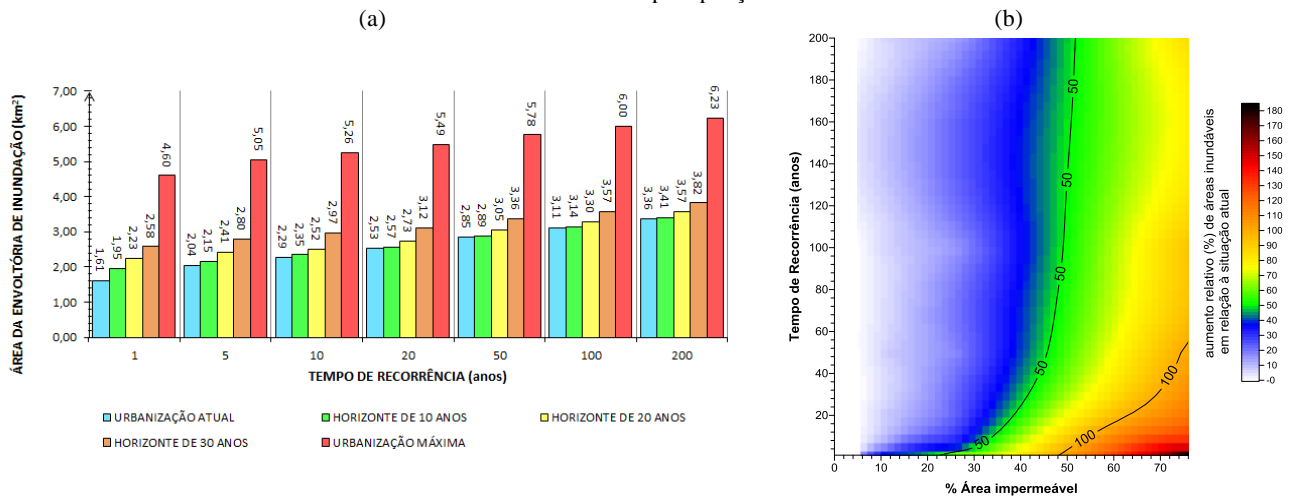


Figura 8 – Relações entre o tempo de recorrência da chuva e os acréscimos relativos de área para as envoltórias de inundação

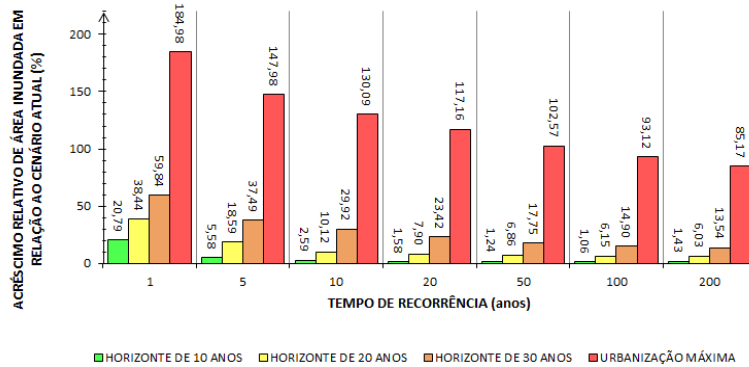
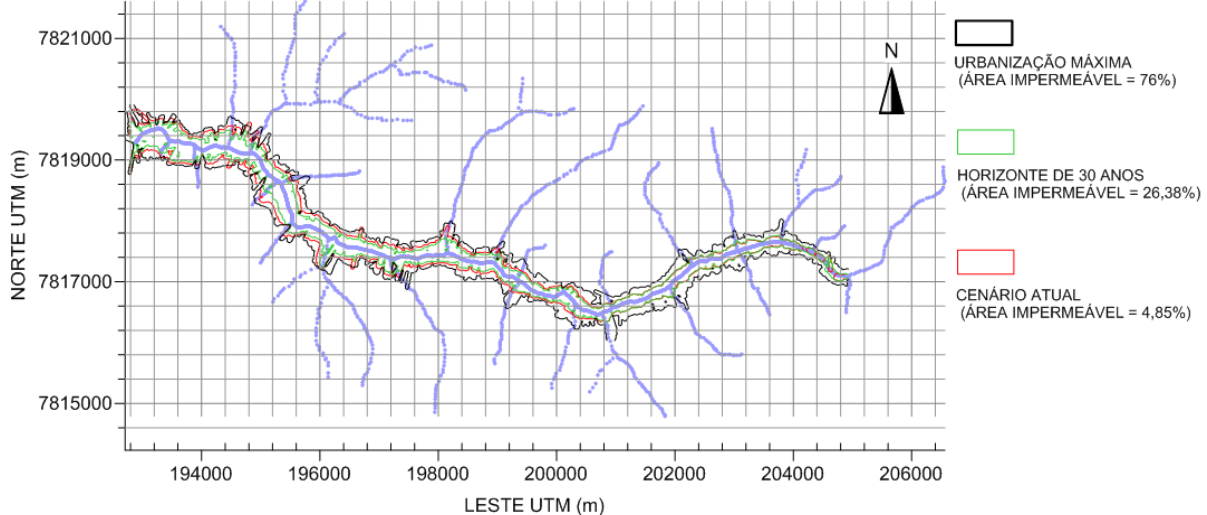


Figura 9 – Envoltórias para períodos de recorrência de 100 anos para diferentes cenários de urbanização

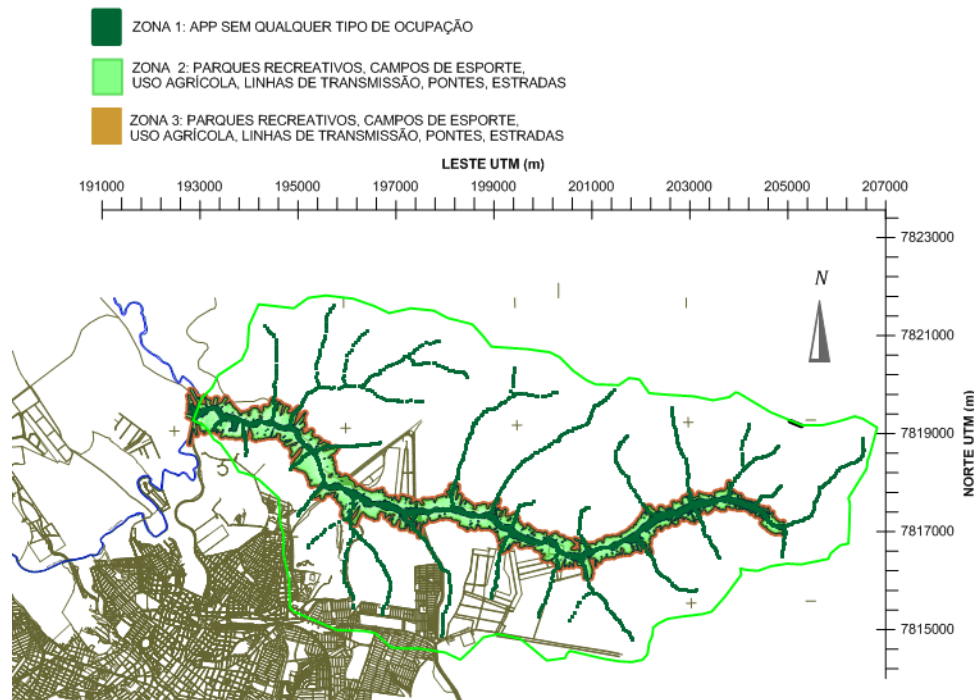


### 3.2 Zoneamento de Áreas Inundáveis

Nesta avaliação, com o objetivo de maior segurança para a população residente na bacia, optou-se pela fusão das restrições das Zonas 2 e 3 (definidas na seção 2.3), com eliminação da possibilidade de construção de edificações nas várzeas. Outras medidas de segurança também foram adotadas no zoneamento aqui proposto. Uma delas é a adoção da envoltória mais abrangente, com utilização da

chuva de 100 anos de recorrência e o cenário de ocupação extrema da bacia. Além disto, para a delimitação da fronteira entre as Zonas 1 e 2, utilizou-se um incremento de altura de 1,5 m, superior ao valor de 0,3045 m, citado por Tucci (2007), que comumente é adotado como regra prática. Enfim, o zoneamento de áreas inundáveis adjacentes ao curso do Córrego Lageado é apresentado na Figura 10.

Figura 10 – Zoneamento de áreas inundáveis adjacentes ao Córrego Lageado. O mapa apresenta as atuais condições de ocupação da bacia e de seus arredores.



## CONCLUSÕES

A aplicação da metodologia, na bacia do Córrego Lageado, apresentou resultados que confirmam o crescimento das áreas susceptíveis a inundações ribeirinhas com o aumento do tempo de recorrência das chuvas e com a aplicação de eventuais cenários futuros de ocupação urbana, os quais trazem acréscimos nas áreas impermeabilizadas. De uma forma geral, ao se comparar um determinado cenário de uso do solo com o cenário atual, nota-se que os incrementos percentuais de áreas inundáveis são sensíveis ao tempo de recorrência da precipitação. Neste contexto, chuvas com maior risco de ocorrência acarretam acréscimos percentuais mais evidentes para áreas marginais susceptíveis a inundações. A metodologia apresentada é simples, traz resultados de fácil entendimento e com potencial para ser utilizada, pelos órgãos gestores, como instrumento disciplinador da ocupação de áreas vulneráveis a enchentes.

## REFERÊNCIAS

- ALAMY FILHO, J. E.; MANNA, I. B. C. B.; MELO, N. A.; CAIXETA, A. C. M. Eficiência hidrológica de telhados verdes para a escala de loteamentos residenciais. **Sociedade & Natureza**, v. 28, n. 2, p. 257-272, maio/agosto, 2016. <http://dx.doi.org/10.1590/1982-451320160206>.
- ARAÚJO, NETO, J. R.; PALÁCIO, H. A. Q.; ANDRADE, E. M.; SANTOS, J. C. N.; PINHEIRO, E. A. R. Otimização do número de curva (CN-SCS) para diferentes manejos na região semiárida, Ceará, Brasil. **Brazilian Journal of Irrigation and Drainage**, v. 1, n. 1, p. 264-279, 2012. Disponível em: <http://revistas.fca.unesp.br/index.php/irriga/article/view/452/0>. Acesso em: 10 abr. 2016.
- BOSZNYAY, M. Generalization of SCS curve number method. **Journal of Irrigation Drainage Engineering**, v. 115, n. 1, p. 139-144, 1989. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(1989\)115:1\(139\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(1989)115:1(139)).
- HEC: **Hydrologic Engineering Center**. Disponível em: <http://www.hec.usace.army.mil/software/hecras/>. Acesso em: 02 mar. 2016.
- INMET: **Instituto Nacional de Meteorologia**, 2016. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/>. Acesso em: 01 jul. 2016.
- MODFLOW: U. S. **Geological Survey**, 2016. Disponível em: <https://water.usgs.gov/ogw/modflow/>. Acesso em: 02 mar. 2016.
- PMU. **Prefeitura Municipal de Uberaba**; Secretaria Municipal de Meio Ambiente. Diagnóstico ambiental da APA – Rio Uberaba. Uberaba, MG, 2004.
- RIVER2D: **University of Alberta**. Disponível em: <http://www.river2d.ualberta.ca/>. Acesso em: 02 mar. 2016.
- SALLA, M. R.; FERREIRA, A. M.; PEREIRA, C. E.; SCHMIDT, M. A. R. Self-cleaning ability of the middle and lower courses of the Uberaba river, UPGRH-GD8. **Journal of Urban and Environmental Engineering**, v. 8, n. 1, p. 118-133, 2014. <https://doi.org/10.4090/juee.2013.v8n1>.
- SARTORI, A., LOMBARDI NETO, F., GENOVEZ, A. M. Classificação hidrológica de solos brasileiros para estimativa de chuva excedente com o método do serviço de conservação do solo dos Estados Unidos, Parte 1: Classificação. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 10, n. 4, p. 5-18, 2005. Disponível em: [http://132.248.9.34/hevila/Revistabrasileiraderecursos\\_hidricos/2005/vol10/no4/1.pdf](http://132.248.9.34/hevila/Revistabrasileiraderecursos_hidricos/2005/vol10/no4/1.pdf). Acesso em: 05 abr. 2016.
- SCS – SOIL CONSERVATION SERVICE. **SCS National Engineering Handbook**, Sec. 4, Hydrology, USDA, USA, 1972. Disponível em:

<<https://directives.sc.egov.usda.gov/OpenNonWebContent.aspx?content=18393.wba>>. Acesso em: 08 mar. 2016.

SCS. SOIL CONSERVATION SERVICE. **A method for estimating volume and rate of runoff in small watersheds.**

U.S. Department of Agriculture, 1973. Disponível em: <<https://www.wcc.nrcs.usda.gov/ftpref/wntsc/H&H/TRsTPs/TP149.pdf>>. Acesso em: 16 jun. 2016.

TUCCI, C. E. M. **Inundações urbanas.** Editora da Associação Brasileira de Recursos Hídricos, Porto Alegre, 2007.