

EFEITO DO USO DA TERRA NO AMORTECIMENTO DE CHEIAS EM RESERVATÓRIOS DE RETENÇÃO: ESTUDO DE CASO DO LAGO AZUL, CIDADE DE RIO CLARO (SP-BRASIL)

Isabel Cristina MORAES¹; Fabiano Tomazini da CONCEIÇÃO¹; Cenira Maria LUPINACCI¹; Rodrigo Braga MORUZZI¹

(1) Departamento de Planejamento Territorial e Geoprocessamento da Universidade Estadual Paulista, IGCE/UNESP/Rio Claro. Av. 24A nº 1515 - Bela Vista - CEP: 13506-900, Rio Claro - SP – Brasil. Endereços eletrônicos: bel.moraes.geo@gmail.com; rmoruzzi@rc.unesp.br.

Introdução
Área de estudo
Materiais e métodos
 Mapeamento do uso da terra
 Modelagem hidrológica
Resultados
 Uso e ocupação da terra
 Comportamento hidrológico do reservatório de retenção Lago Azul
 Amortecimento das cheias na área de drenagem do reservatório Lago Azul
Considerações finais
Referências bibliográficas

RESUMO - Este artigo avaliou o efeito do uso da terra no comportamento do reservatório de retenção no que se refere ao seu papel de amortecimento de cheias em horizontes de tempo definido por cenários de ocupação urbana. Para tal, foi estudado o reservatório de retenção Lago Azul, situado na nascente do córrego da Servidão, área urbana de Rio Claro (SP-Brasil). A partir da classificação de fotos aéreas em Sistemas de Informação Geográfica - SIG, realizou-se mapeamento do uso da terra para os cenários de 1958, 1972 e 2006. As chuvas críticas foram determinadas a partir da equação que relaciona intensidade, duração e frequência de chuvas do município, utilizando tempos de retorno - TR de 5, 10, 20 e 50 anos e duração de 1 hora. O modelo do *Soil Conservation Service* – SCS (1986) foi utilizado para conversão chuva-vazão. Utilizou-se modelagem hidráulica e hidrológica para propagação dos hidrogramas visando avaliar os impactos da expansão urbana no comportamento hidrológico da área de drenagem do reservatório. Em 1972, ocorreram situações de inundação apenas para TR de 20 e 50 anos. Porém, no cenário de 2006, a capacidade de retenção do reservatório mostrou-se insuficiente, resultando em situações de inundação em todos os TR. Os hidrogramas resultantes demonstraram que o aumento de áreas impermeabilizadas provoca o incremento das vazões e antecipação dos picos de cheia, minimizando o impacto positivo do reservatório decorrente do amortecimento da onda de cheia. Os resultados apontam que a implantação de reservatórios para fins de amortecimento de cheia deve ser realizada como parte integrante de um conjunto de ações dentre as quais o planejamento do uso e ocupação da terra, dimensionamento e manutenção de estruturas de drenagem urbana, desobstrução de galerias pluviais e previsão e alerta de riscos.

Palavras-chave: drenagem urbana; simulação hidrológica; reservatório de amortecimento.

ABSTRACT - This article aimed to evaluate the effect of land use on the retention reservoir performance in terms of damping floods. To this end, it was studied the Lago Azul reservoir, located at the spring water of Servidão stream, urban area of Rio Claro city (SP-Brazil). From the aerial photos classification on Geographic Information Systems - GIS, it was performed the mapping of land use to the 1958, 1972 and 2006 scenarios. The several rains were determined from the equation that relates intensity, duration and frequency of the municipality rainfall, using return periods (RP) of 5, 10, 20 and 50 years and rain time of 1 hour. The model *Soil Conservation Service* - SCS (1986) was used for obtaining the excess rain. The hydraulic and hydrologic modeling was used for the hydrograph spread aiming to evaluate the impacts of urban expansion in the hydrological performance of the reservoir drainage area. In 1972, flood situations occurred just to RP 20 and 50. However, in 2006 scenario, the reservoir retention capacity was insufficient, resulting in flood situations to all RP. The hydrograms obtained showed that, despite the damping of floods by the reservoir, the growth of impermeable areas increased the flow rates and caused the anticipation of wavefloods peaks. The results show that the use of reservoir for damping floods purposes should be performed as part of a series of actions among them the planning of occupation and land use.

Keywords: urban drainage; hydrologic simulation; damping reservoir.

INTRODUÇÃO

O processo de urbanização da cidade de Rio Claro provocou transformações intensas na paisagem. Inicialmente, a ocupação urbana se desenvolveu próximo aos relevos suaves, setores de planície e ao longo dos corpos d'água. O crescimento acelerado da malha urbana representa uma das atividades mais

intensas do homem sobre o meio físico, desencadeando o aumento da utilização dos recursos naturais e alteração do ciclo hidrológico natural.

Este modelo de urbanização, que se inicia pela retirada da cobertura vegetal, envolve a ocupação das planícies de inundação

e impermeabilização das vertentes. Tais fatores corroboram na redução da rugosidade de superfície e no aumento da velocidade dos fluxos, efeitos que conduzem à situações de alagamento nas cidades. Ainda, o crescimento populacional e a ineficiência de instrumentos de planejamento, contribuem para que cidades médias, como Rio Claro, reproduzam problemáticas das grandes metrópoles, como cenários de inundações.

Grillo (1992) faz referência a diversas notícias sobre a ocorrência de inundações em Rio Claro, entre 1980 e 1991, constatando a inadequação de estruturas, como a baixa densidade de galerias pluviais e a falta de manutenção de bueiros (bocas de lobo), responsáveis pela redução da capacidade de vazão destes sistemas.

Tucci (2009) destaca a necessidade de compreensão do comportamento das drenagens urbanas, visando propor medidas de controle e minimização dos impactos das enchentes. Reservatórios de amortecimento são apontados como medida corretiva e de caráter estrutural para atenuação dos efeitos da urbanização, pois permitem a redistribuição temporal das vazões, com retardo e abatimento nos picos de cheia (Nascimento e Batista, 1998).

Estes reservatórios são bacias de retenção, com lâmina de água perene, que suportam quantidade significativa de água e podem atender diversas funções, como recreacionais e paisagísticas. Durante ou após as cheias, seu nível d'água se eleva temporariamente acima dos níveis normais e gradualmente perde volume mesmo em longos períodos pós-evento de chuva, controlado por dispositivos de saída tais como vertedores e orifícios.

Ainda, torna-se crescente os esforços para a previsão e alertas de cheias, associados a

Planos de Defesa Civil, como os trabalhos desenvolvidos pelo CEMADEN – Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais e CENAD – Centro Nacional de Gerenciamento de Riscos e Desastres, e estabelecimento de áreas de risco a inundação para zoneamento e Planos Diretores. Atualmente, Rio Claro apresenta 47 áreas de risco a inundação indetificados pela Defesa Civil Municipal.

Neste sentido, o presente artigo avalia o efeito do amortecimento das cheias do reservatório Lago Azul em diferentes situações de uso e ocupação da terra por meio da modelagem hidráulica e hidrológica. Sob a perspectiva da evolução da ocupação urbana nos cenários de 1958, 1972 e 2006, este trabalho analisou a transição do uso da terra com vista a compreender os impactos gerados pelo processo de expansão da cidade de Rio Claro e sua interferência em situações de inundação, com ênfase no papel de amortecimento do reservatório.

Villanueva et al. (2001), Vendrame et al. (2005), Lopes (2005) e Ohnuma Jr. (2005) apresentam modelos hidrológicos como metodologia adequada na avaliação da interferência da evolução urbana na ocorrência de cheias. Os autores evidenciam a modelagem como ferramenta norteadora para medidas preventivas no controle dos volumes de cheias e minimização dos impactos nos setores jusante associada ao amortecimento em reservatórios, viabilidade econômica e projeções para fins de Planos Diretores. Assim, espera-se contribuir com metodologia rápida e viável à elaboração de políticas públicas, com a inclusão da gestão dos recursos hídricos associada ao ordenamento do território e planejamento urbano.

ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo refere-se ao reservatório artificial Lago Azul, de 424 m², e sua respectiva bacia de drenagem, de 4,53 km², a qual apresenta declividade média de 1,11 %. A partir do represamento da nascente do córrego da Servidão, afluente do rio

Corumbataí, o Lago Azul foi criado, entre os anos de 1970-1971, e encontra-se alocado no sítio urbano da cidade de Rio Claro (SP-Brasil) – Figura 1. Este município situa-se entre as latitudes de 22° 05' e 22° 40' S e entre as longitudes de 47° 30' e 47° 55' W.

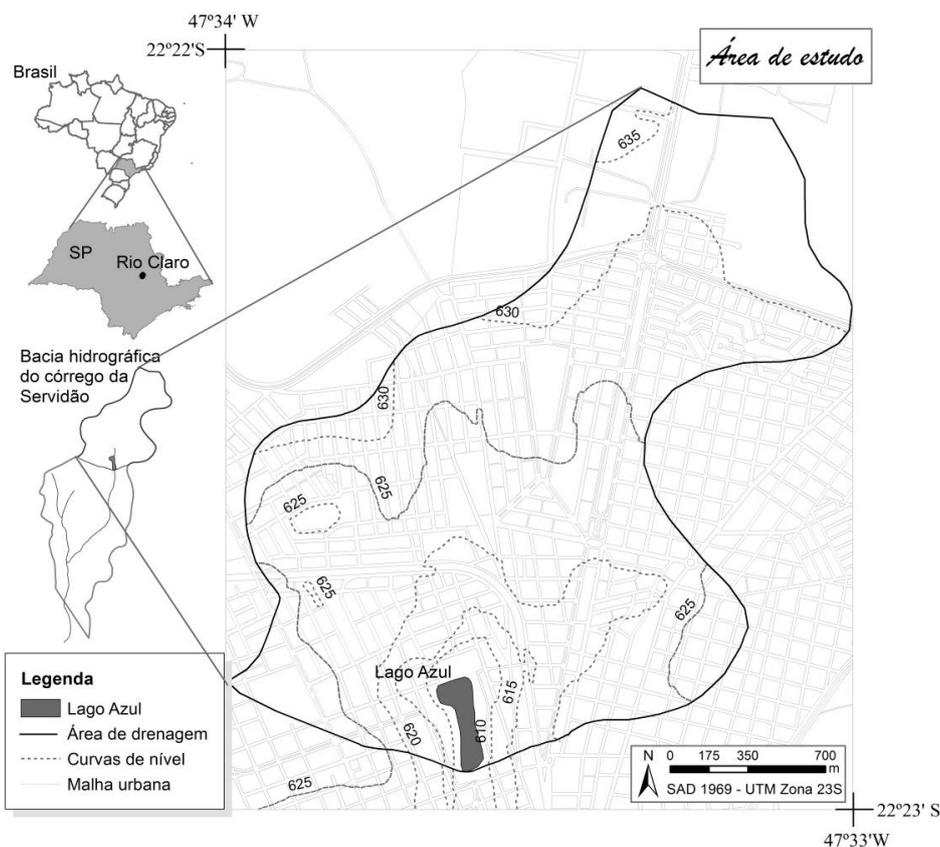


Figura 1. Localização da área de estudo.

Rio Claro caracteriza-se por clima do tipo Cwa, segundo a classificação de Köeppen (1948), tropical chuvoso e temperatura média mensal em quase todos os meses do ano superior a 18°C. A área é controlada por massas tropicais e equatoriais que predominam em mais de 50% do ano, com os ventos dominantes provenientes dos quadrantes S e SE. A distribuição anual de chuvas se dá por duas estações bem definidas: de abril a setembro - período seco com índices

pluviométricos médios de 30 a 90 mm por mês - e, de outubro a março - período úmido, com índices pluviométricos médios de 120 a 260 mm por mês, sendo a média anual entre o período de 1958 a 2006 de 1555 mm, conforme dados dos postos prefixo D4-012 e CEAPLA-D4-112M. Na Figura 2 são apresentados os resultados da distribuição temporal entre o período de 1958 a 2006 das precipitações médias mensais para o intervalo de confiança de 95%.

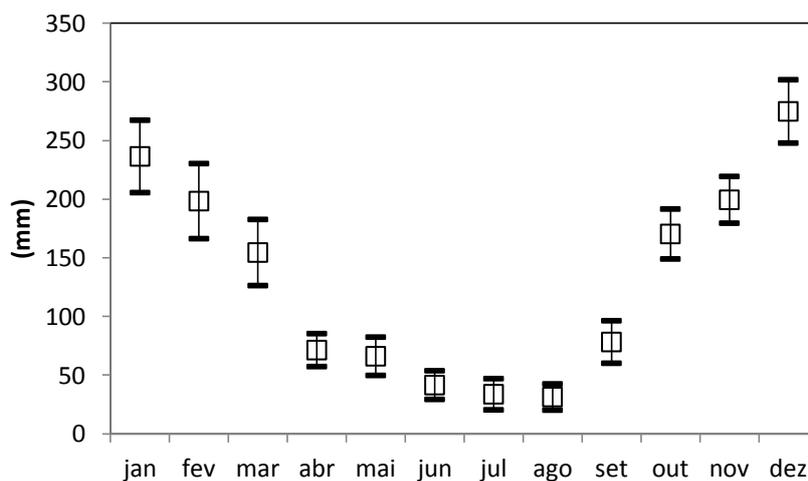


Figura 2. Distribuição temporal das precipitações médias mensais para intervalo de confiança de 95%. Dados referentes aos postos D4-012 e D4-112M.

Geologicamente, a bacia do córrego da Servidão é constituída pela formação Rio Claro. De idade Cenozóica, esta formação é composta de arenitos arcoseanos mal consolidados e mal classificados, arenitos conglomeráticos e argilitos dispostos em níveis topográficos entalhados por superfícies de erosão (IPT, 1981).

A precipitação elevada, combinada ao substrato geológico, atribui à bacia do córrego da Servidão solos bastante desenvolvidos, os Latossolos Vermelho-Amarelos, de textura média ao longo do perfil, sendo os teores de areia responsáveis pela sua alta friabilidade e pequena plasticidade (Oliveira e Prado, 1984).

Conforme a proposta do SCS (1986), os solos que compõe a bacia de drenagem do Lago Azul enquadra-se no grupo hidrológico de solos do tipo B. Estes solos caracterizam-se por teor de argila entre 10 e 20% e de 50 a 90% de areia. Possuem de baixo a moderado potencial de escoamento superficial quando completamente úmidos e não há impedimento para circulação da água nas camadas do solo. Não há pedras e nem camadas argilosas até 1,5 m, mas é quase sempre presente camada mais densificada que a camada superficial (SCS, 2007).

Estas características granulométricas resultam em boas condições de permeabilidade em função do predomínio de macroporos dos terrenos arenosos e baixa densidade de drenagem. Aliado a estes fatores, as condições de topografia suave favorecem elevadas taxas de infiltração da água das chuvas e reduzido potencial natural a enchentes.

Na ocupação das margens do córrego da Servidão surgiu a cidade de Rio Claro em 1827, com 800 habitantes. Na década de 1950, a população já era de 48.000 pessoas. A partir de 1970, o aumento da população evidencia o crescimento das áreas urbanas. Enquanto em 1970 a população era de 70.000 habitantes, em 1985 passou a 121.000 pessoas, 167.000 em 2000, e 190.000 em 2006 (Troppmair, 2008).

A partir da década de 70, Garcia et al. (1983) identificaram tendência à estagnação da

expansão urbana no sentido SE devido a limitação da linha férrea pelo Horto (Floresta Edmundo Navarro de Andrade). Em contrapartida, os autores identificaram aceleração do crescimento urbano em eixo longitudinal, com maior tendência à expansão na zona norte, especificamente no setor NW da cidade.

Em 2010, com uma população de 188.066 habitantes e densidade demográfica de 377, 51 hab./km² (SEADE, 2010), a cidade de Rio Claro apresenta, segundo o mapeamento de uso da terra elaborado, uma malha urbana em que 79% da área é ocupada para fins urbano-residenciais e 21% para fins industriais.

O estabelecimento do aglomerado urbano em tabuleiro de xadrez, com ruas em ângulo reto e quase paralelas aos pontos cardeais (Troppmair, 2008), definiram um padrão de arruamento típico do sistema de colonização português. Em muitos trechos da bacia, o sistema de quadras e o arruamento seguem a direção do declive, potencializando a velocidade dos fluxos pluviais. Assim, apesar do baixo potencial natural às enchentes, a configuração e expansão da malha urbana de Rio Claro indicam o impacto da ocupação antrópica no comportamento hidrológico da drenagem e em situações de inundação.

Aliado a este fator, sobre o surgimento do Lago Azul - nascente do córrego da Servidão represada em 1970, Almeida (2002, p.92) evidencia que “as águas vindas das ruas dos bairros situados a montante dessa área traziam muitos sedimentos (terra, lixo, entulho) e acabaram assoreando o lago (...) o córrego da Servidão foi canalizado e segue debaixo da Avenida Visconde de Rio Claro”. A autora destaca que mesmo depois da canalização houve ocorrência de inundações, infiltrações, erosão e contaminação das águas por esgoto em diferentes pontos do lago e do córrego. Na década de 80 foram realizadas obras de recuperação e desassoreamento do reservatório, com arborização e instalação de equipamentos de lazer, estabelecendo-se nesta área o Parque Municipal.

MATERIAIS E MÉTODOS

Mapeamento do uso da terra

Para a elaboração de material cartográfico e da caracterização de evolução da expansão urbana foi utilizado o software Sistema de Processamento de Informações Geográficas (SIG Spring 4.3.3). Através deste, foram gerados mapas temáticos de uso da terra a partir da análise de fotografias aéreas pancromáticas obtidas na escala nominal de 1:25.000, para os cenários de 1958 e 1972, e fotografias aéreas em meio digital para o cenário de 2006 em escala de 1:30.000.

As fotografias aéreas foram transpostas para o meio digital e submetidas a procedimentos de pré-processamento, para posterior georreferenciamento e redução das distorções radiométricas e geométricas. Nesta etapa obteve-se a equalização dos níveis de cinza das imagens, visando minimizar sua variação em função das características da área imageada, do momento da aquisição da cena e do próprio processo de geração das imagens em laboratório especializado. Como a área de estudo abrange número variado de fotos, foram necessários procedimentos de "mosaicagem" do SPRING, por meio da importação das ortofotos (imagens) em formato *geotif*, geradas anteriormente no *ENVI* v.4.1. (Rossetti, 2007).

Para a segmentação e classificação da imagem foi aplicado o método de *crescimento de regiões* pela técnica de agrupamento de dados. Neste procedimento, regiões adjacentes são agrupadas segundo um critério de similaridade espectral, estabelecido pelo algoritmo utilizado.

Os parâmetros que definem o nível de detalhe segundo as classes de interesse foram: (a) limiar de similaridade = valor mínimo em que duas classes são consideradas similares e agrupadas em uma única região (valor da distância Euclidiana dada pela diferença entre os vetores de médias de duas regiões vizinhas); (b) limiar de área = valor de área mínima (em pixels) para que uma região seja individualizada; (c) suavização de arcos = permite a suavização das bordas das regiões a serem geradas (Espindola, 2005, p.18).

As áreas segmentadas foram diferenciadas em função da variação de cobertura vegetal (área rural) e alvos

intraurbanos. Os parâmetros 'similaridade' e 'área (em pixels)' para as áreas rurais foram, respectivamente de: 25-30 para o cenário de 1958; 12-28, para o cenário de 1972; e 12-15 para 2006. Para todos os cenários, as áreas urbanas foram segmentadas com parâmetros de similaridade 12 e de área 15. Para as áreas rurais optou-se pela classificação por regiões de forma não-supervisionada, através do classificador *Isoseg*. Este classificador é um algoritmo de agrupamento de dados não-supervisionado que se utiliza de atributos estatísticos das regiões: a matriz de covariância e o vetor de média, para estimar o valor central de cada classe (Moraes, 2011).

Neste procedimento é definido o limiar de aceitação em função da distância de *Mahalanobis*, no qual o algoritmo detecta um maior número de classes quanto maior o valor do limiar. Para a detecção das classes ordenam-se as regiões de forma decrescente em área e inicia-se o procedimento para agrupá-las em classes que são associadas a todas as regiões cuja distância de *Mahalanobis* for inferior a distância definida pelo limiar de aceitação. Neste estudo, para a implementação da classificação não-supervisionada optou-se pelo limiar de aceitação de 95%. A primeira classe teve como parâmetros estatísticos as regiões de maior área, e assim, o algoritmo repete a associação de classes em regiões menores (ordem decrescente) até que todas as regiões sejam detectadas.

Para a classificação das áreas urbanas, devido às feições de maior detalhe e a variação do nível de cinza, que é maior em função do tamanho reduzido dos alvos, optou-se pela classificação manual. O mapeamento por procedimentos convencionais de análise e interpretação de imagens foi realizado a partir da ferramenta de *edição vetorial* de dados, que permitiu associar polígonos (regiões) a classes de uso. Os elementos cor, tamanho, forma, textura e localização foram utilizados para o reconhecimento dos padrões de elementos de fotointerpretação. Este processo permitiu a identificação de classes de uso da terra e sua representação em mapas de pixels classificados.

Modelagem hidrológica

A equação de chuvas intensas para o município de Rio Claro proposta por Moruzzi e Oliveira (2009) foi empregada para geração das tormentas de projeto, conforme Equação 1.

$$I = \frac{560,9.T^{0,141}}{(7,4 + d)^{0,65}} \quad (1)$$

Onde,

I = intensidade da chuva (mm/h); T = período de retorno (anos); d = duração da chuva (minutos).

Os hietogramas de projeto foram obtidos para chuvas de 1 hora de duração, a qual representa a mesma ordem de grandeza do tempo de concentração da bacia hidrográfica estudada segundo Moruzzi e Oliveira (2009). Conforme recomendado por Tucci (1998) e Canholi (2005), foram definidos 6 intervalos de 600s, a partir da altura da lâmina desagregada, correspondentes a intervalos de 1/10 da duração total da chuva. O Método dos Blocos Alternados para rearranjo da tormenta de projeto, considerando o posicionamento do pico no centro de massa da tormenta (Moruzzi et al., 2009).

A simulação da cheia de projeto está associada a um tempo de retorno (TR), ou seja, a probabilidade de ocorrência do evento. Assim, foram utilizados valores de TR de 5, 10, 20 e 50 anos, correspondentes a probabilidades anuais de 0,20, 0,10, 0,05 e 0,02, respectivamente.

O *Soil Conservation Service* - SCS, atualmente NRCS - *National Resource Conservation Service*, do *United States Department of Agriculture* dos EUA, sugeriu em 1972 um modelo empírico para desagregar a precipitação total em precipitação excedente, com base no potencial de absorção de umidade do solo. Por meio da análise de mais de três mil tipos de solo, coberturas de vegetação e plantações, foi estabelecida uma relação empírica que relaciona a capacidade de armazenamento das precipitações na bacia ao número de deflúvio, denominado Curva Número - CN (Canholi, 2005).

A estimativa do valor de CN baseia-se em características do tipo de solo, uso da terra e umidade do solo. Sob as mesmas condições de precipitação, baixos valores de CN indicam que

a superfície tem um alto potencial de retenção de água, enquanto valores de CN mais altos indicam potencial de retenção mais baixo (Schafer et al., 2011). O algoritmo para desagregação da chuva acumulada é dado pela Equação 2. A determinação da capacidade de armazenamento no solo (S) foi realizada por meio da Equação 3.

$$P_{ef} = \frac{(P - 0,2.S)^2}{(P + 0,8.S)} \quad (2)$$

Onde,

P_{ef} = precipitação efetiva acumulada (mm); P = precipitação total acumulada (mm); S = potencial máximo de armazenamento do solo para perda inicial correspondente a 20% da capacidade de armazenamento (mm).

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (3)$$

Onde,

CN varia entre 0, para condutividade hidráulica infinita, e 100, para uma bacia totalmente impermeável.

Conforme a metodologia proposta pelo SCS (2004), pode-se obter o hidrograma total propagado a partir da convolução dos elementos discretizados da precipitação excedente por meio do uso da Equação 4.

$$q = \frac{0,208 \times A}{t_a} \quad (4)$$

Onde,

q = vazão máxima unitária ($m^3/s.mm$), para $P_{ef} = 1$ mm; A = área drenada da bacia (Km^2); t_a = tempo de ascensão (horas).

O valor do CN para a área heterogênea é obtido por meio da ponderação dos valores associados às áreas homogêneas, sendo a área o fator ponderador. O valor de CN utilizado para a modelagem corresponde a condições moderadas de umidade, onde os solos correspondem à umidade de capacidade de campo.

O modelo hidrológico de reservatório Puls, concebido a partir da equação da continuidade resolvida por elementos finitos, foi empregado para propagação da onda de cheia no reservatório, conforme Equação 5. Os

dispositivos de saída foram vertedor e orifício, os quais não estão implementados, mas constituem ações virtuais necessárias a modelagem. O vertedor constitui o dispositivo virtual de extravasão, sendo assim, o registro de suas vazões indica níveis de água próximos a cota máxima de cheia admitida (Tabela 1). A curva cota-vazão foi construída a partir da cubagem do reservatório, cujos dados apresentam-se na Tabela 2. As rotinas foram implementadas por meio do software livre IPHS1, desenvolvido pelo IPH/UFRGS (2003).

$$\frac{2V_{t+1}}{\Delta t} + Q_{t+1} = I_t + I_{t+1} - Q_t + \frac{2V_t}{\Delta t} \quad (5)$$

Tabela 1. Parâmetros dos dispositivos de saída, compostos por orifício circular e vertedor de parede delgada.

Vertedor		Orifício	
Coefficiente da equação prática de descarga, valor de "vena contracta" implícito - C	1,84	Coefficiente de descarga - Cd	0,61
Largura (m) - B	2,0	Área (m ²) - A	1,0
Cota de crista (m)	0,5	Altura do eixo (m) - h	0,25

Tabela 2. Relação cota-vazão do reservatório.

Cota do reservatório	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8
Volume.1000 (m ³)	3,2	6,4	9,6	12,8	16	19,2	22,4	25,6	28,8	32	35,2	38,4	41,6	44,8	48	51,2	54,4	57,6

RESULTADOS

Uso e ocupação da terra

Os cenários de análise, apresentados na Figura 3, demonstram a evolução da

ocupação urbana no entorno do reservatório Lago Azul.



Figura 3. Recorte da nascente do Córrego da Servidão em 1958, e reservatório Lago Azul em 1972 e 2006, respectivamente (Moraes et al., 2012).

Em 1958, a nascente do Córrego da Servidão ainda não havia sido

impermeabilizada ou mesmo ocupada por quaisquer elementos urbanos como arruamento

e loteamentos. Constituíam-se por terrenos em posição topográfica de baixa vertente, com tendência a encharcamento, contudo sem lâmina de água expressiva. No cenário de 1972 nota-se a configuração do Lago Azul e a malha urbana estabelecida. No cenário de 2006, considerado como situação de uso e ocupação atual, verificou-se a presença de elementos da cobertura vegetal arbórea, porém, suas áreas são pouco expressivas principalmente por estarem inseridos em praças e jardins no perímetro urbano. Neste cenário a impermeabilização domina os espaços no entorno do Lago Azul (Figura 3).

Até a década de 60, a área que constituía a nascente do Córrego da Servidão, tinha a

presença de cobertura vegetal nativa de várzea. A partir de 1972, teve início o processo de urbanização da área, com a retirada da cobertura vegetal e implantação de edificações que compuseram o Centro Cultural Roberto Palmari. Houve ainda a implantação de gramíneas e herbáceas/arbustivas ornamentais visando fins de recreação e lazer (Rossetti, 2007).

Com base na área de drenagem do reservatório Lago Azul, foram gerados mapas temáticos por meio do detalhamento das classes de uso e ocupação da terra para cada um dos cenários de análise, conforme a Figura 4. A porcentagem de área ocupada por cada classe de uso é dada pela Figura 5.

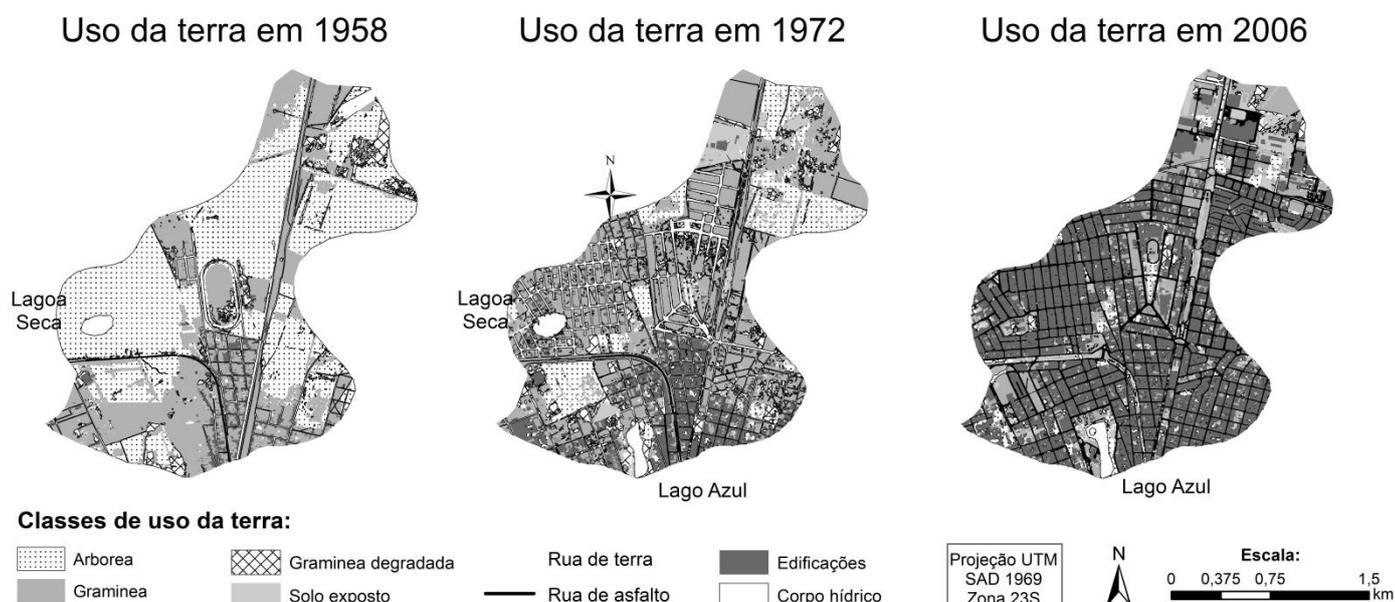


Figura 4. Mapeamento do uso da terra para os cenários de 1958, 1972 e 2006.

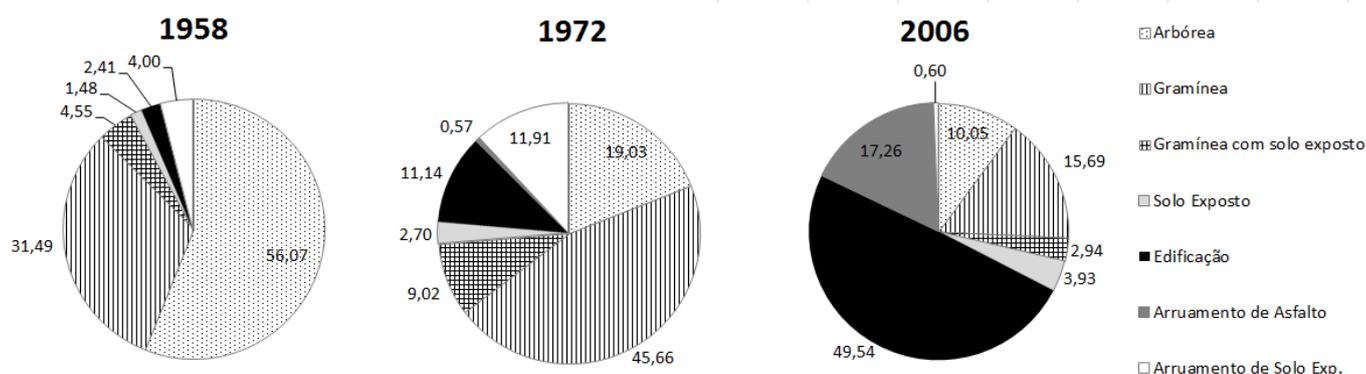


Figura 5. Proporção das classes de uso da terra para os cenários de 1958, 1972 e 2006.

Por meio da análise dos cenários é possível verificar a transição gradativa de áreas

de maior extensão e densidade vegetal em 1958 (55,4% de arborea e 31,5% de

gramínea/herbácea) substituída em 1972 por gramíneas e herbáceas (45,66%), arruamentos de solo exposto (11,9%) e edificações (11,1%); já em 2006, constata-se a supressão das áreas de cobertura vegetal por áreas para fins residenciais (49,5 %), associadas ao aumento da impermeabilização devido à alta porcentagem de arruamento de asfalto (17,26%).

No que se refere ao cenário atual (2006), as áreas verdes de praças, jardins e quintais compõem as classes de uso do tipo arbórea e gramínea, no entanto, estes locais possuem superfícies impermeabilizadas comumente recoberto por calçamento, o que

reduz drasticamente as taxas de infiltração com proporcional aumento do deflúvio.

As classes de uso e ocupação da terra foram adaptadas às classes de CN descritas no modelo do SCS (1986), e os valores de CN, os quais contemplam o tipo e a condição da cobertura de superfície e o grupo hidrológico de solo, calculados para situação de moderada umidade antecedente no solo, ou seja, CN média – umidade de capacidade de campo - Tabela 3. Para o cálculo do valor da CN da área de drenagem do Lago Azul, realizou-se a média ponderada dos valores de CN para a área (em porcentagem) de cada classe de uso da terra (Tabela 4).

Tabela 3. Valores de CN para diferentes uso e ocupação do solo (SCS, 2004)*.

Classes de uso da terra	Descrição do tipo de ocupação e condição hidrológica (SCS, 2007)	Grupo hidrológico de solo B
Gramínea com solo exposto	Condições ruins (gramado <50%)	79
Gramínea	Condições normais (gramados de 50% a 75%)	69
Arbórea	Condições excelentes (gramados >75%)	61
Edificação	Zonas residências com lotes <500m ² (em média 65% impermeável)	85
Arruamento de asfalto	Pavimentadas com guias e drenagem	98
Arruamento com solo exposto	Pavimentos com valas abertas / Paralelepípedos	85
Solo exposto	Terra	82

*Adaptado de SCS (2007).

Tabela 4. Área ocupada pelas classes de uso da terra (km²) para os cenários de 1958, 1972 e 2006.

Classe de uso	Cenários		
	1958	1972	2006
Arbórea	2,51	0,81	0,43
Gramínea	1,42	2,07	0,71
Gramínea c/ solo exposto	0,21	0,41	0,13
Solo Exposto	0,07	0,12	0,18
Edificação	0,11	0,50	2,24
Arruamento de Asfalto	0	0,03	0,78
Arruamento Solo Exp.	0,18	0,54	0,03
Lago	0,03	0,05	0,02
Total	4,53	4,53	4,53

Assim, para a área de drenagem do Lago Azul foram obtidos CN de 58,3 para o cenário de 1958, 65,5 em 1972 e 79,0 em 2006. O software IPHS1 foi utilizado para a implementação da modelagem hidráulico-hidrológica.

Comportamento hidrológico do reservatório de retenção lago azul

As simulações apresentadas nas Figuras 6 e 7 foram realizadas considerando períodos

de recorrência (TR) de 5, 10, 20 e 50 anos, para os cenários de 1972 e 2006.

No cenário de 1972, a vazão descarregada pelo orifício atingiu vazões que variaram de 0,50 a 2,16 m³/s, para os períodos de retorno (TR) de 5 a 50 anos, respectivamente. O início da vazão de saída foi identificada entre o intervalo de tempo de 30 a 60 minutos após o início do evento chuvoso. Com os picos de precipitação definidos entre 30 e 40 minutos, as simulações permitiram

identificar picos de cheia do reservatório entre 70 e 80 minutos. Constatou-se que o nível máximo da água (2 m de altura para início da

soleira livre) não foi atingido em chuvas com TR de 5 e 10, sendo o orifício o único dispositivo de descarga acionado.

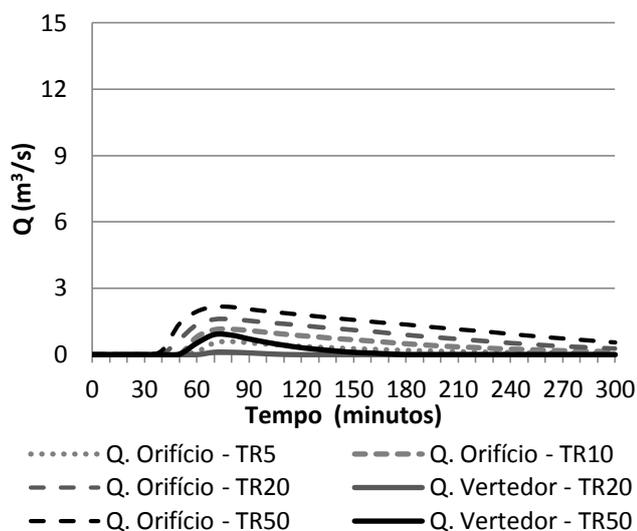


Figura 6. Hidrograma de saída do reservatório em 1972.

Ainda no cenário de 1972, verificou-se a ocorrência de pico de vazão de $1,55 \text{ m}^3/\text{s}$ no orifício para TR de 20 sendo nesse caso detectado descarregamento via vertedor de $0,11 \text{ m}^3/\text{s}$ com início em 60 e pico em 70 minutos. A vazão em situação de TR de 50 anos foi de aproximadamente $2,2 \text{ m}^3/\text{s}$, com vazão máxima em torno de $0,90 \text{ m}^3/\text{s}$, iniciando em 50 minutos e pico de vazão máxima entre 70 e 80 minutos.

No cenário de 2006, a vazão do orifício atingiu volumes que variam de $2,5$ a $3,75 \text{ m}^3/\text{s}$, entre os TR de 5 a 50 anos, respectivamente. A variação do volume das cheias entre todos os TR foi pequena, amplitude de $1,25 \text{ m}^3/\text{s}$, inferior quando comparada ao cenário de 1972, amplitude de $1,66 \text{ m}^3/\text{s}$. Este comportamento evidencia o aumento das áreas impermeabilizadas no cenário recente, denotando menor variação no incremento do volume de água entre as situações simuladas. Considerando os picos de precipitação entre 30 e 40 minutos, os picos de cheia do reservatório se deram em 70 minutos.

O menor grau de impermeabilização no setor do Lago Azul no cenário de 1972 em comparação ao cenário de 2006 evidencia vazões de pico inferiores a $3 \text{ m}^3/\text{s}$ em todos os TR, e vazão de extravasamento pelo vertedor apenas para TR de 20 e 50 anos.

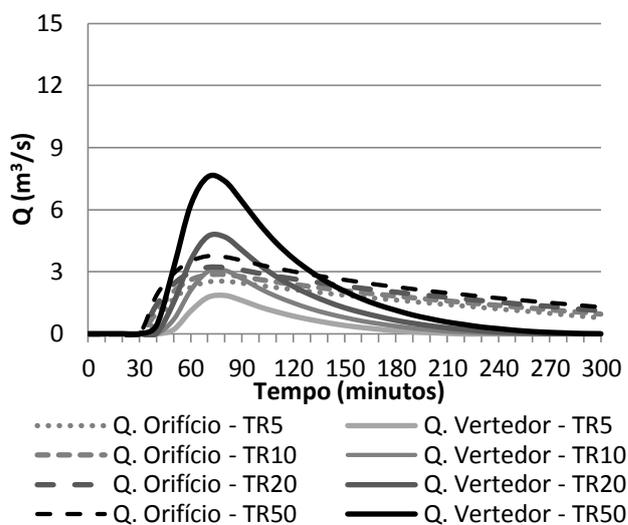


Figura 7. Hidrograma de saída do reservatório em 2006.

O aumento de áreas impermeabilizadas devido à expansão da malha urbana do entorno do reservatório é evidenciado pelo comportamento hidrológico do ano de 2006. Neste cenário, em todos os períodos de retorno simulados foram obtidos situações de extravasamento, dada pela vazão do vertedor. Para o TR de 5 anos, a vazão de pico foi de $1,85 \text{ m}^3/\text{s}$ em 80 minutos, no TR de 10 anos, houve o incremento da cheia com pico de $3,06 \text{ m}^3/\text{s}$ entre 70 e 80 minutos. Para os TR de 20 e 50 anos, verificou-se a antecipação do pico de extravasamento para 70 minutos, com vazão de $4,71$ e $7,6 \text{ m}^3/\text{s}$, respectivamente (Figura 7).

Um modelo hidrológico para o cenário de 2006, em situação crítica de umidade antecedente do solo, foi simulado considerando o comportamento hidrológico do reservatório em condições de saturação do solo (Figura 8), e o valor de CN obtido foi de 89,9.

Para o cenário de 2006, tanto em situação moderada (CN média - umidade da capacidade de campo) quanto em situação crítica (CN - condição de solo saturado), todos os TR apresentaram situação de extravasamento dada pela vazão do vertedor. E em situação moderada o orifício não atinge vazão superior a $3,75 \text{ m}^3/\text{s}$, em situação crítica esses valores atingem aproximadamente $5 \text{ m}^3/\text{s}$.

O aumento das áreas de maior deficiência de infiltração e o incremento do escoamento superficial direto, dado pelo maior valor de CN em situação crítica, resulta no agravamento de cenários de extravasamento. A vazão de saída do vertedouro obteve acréscimo de volume de água significativo e representa a variação da intensidade da chuva. Em situação moderada os picos de vazão do vertedor entre

os TR de 5 a 50 anos permaneceram na faixa de 1,85 a 7,6 m³/s, em 70 minutos após o início das chuvas. E em situação crítica os picos se estabeleceram em 60 minutos, entre 7,71 e 15,05 m³/s. A distribuição da onda de cheia em intervalos de tempo superiores a 3 horas evidencia o retardamento da vazão nos setores a jusante.

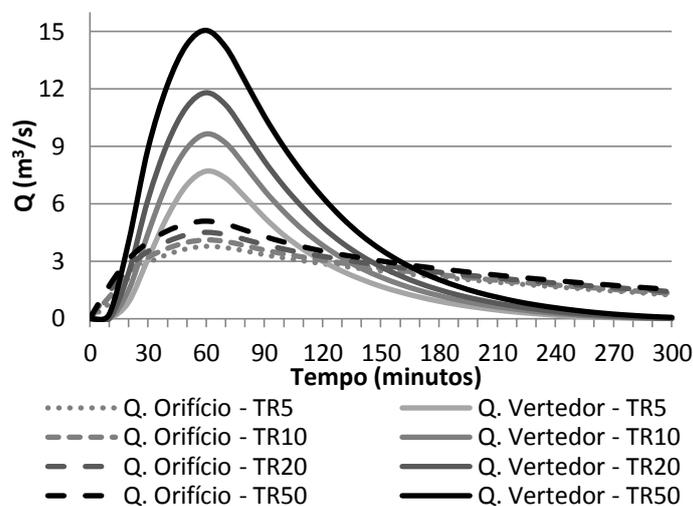
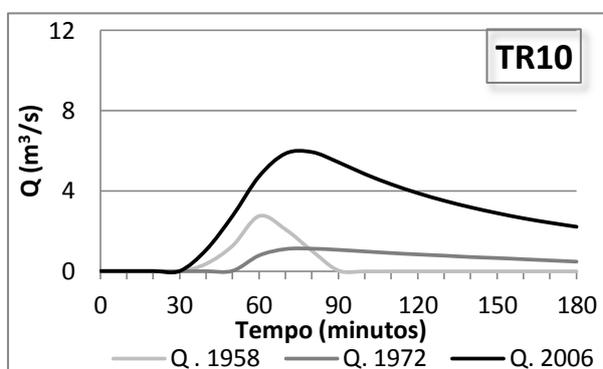
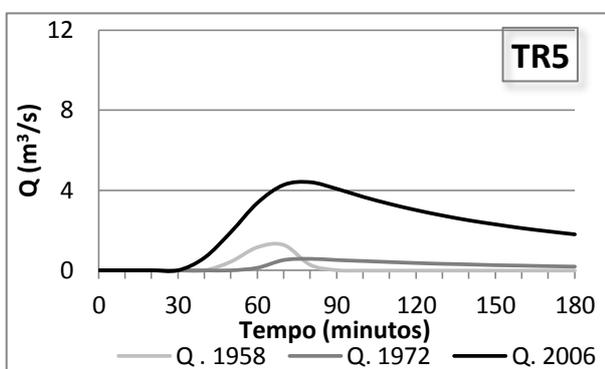


Figura 8. Hidrograma do reservatório em 2006 em situação crítica – condição de solo saturado.

Amortecimento das cheias na área de drenagem do reservatório lago azul

A fim de avaliar o efeito do amortecimento do reservatório Lago Azul foram realizadas simulações hidrológicas sob os diferentes cenários investigados.

Considerando os diferentes TR propostos, foram obtidos hidrogramas em situação de preocupação urbana (1958), no cenário em que se estabeleceu o reservatório (1972) e na situação de ocupação recente (2006), conforme a Figura 9.



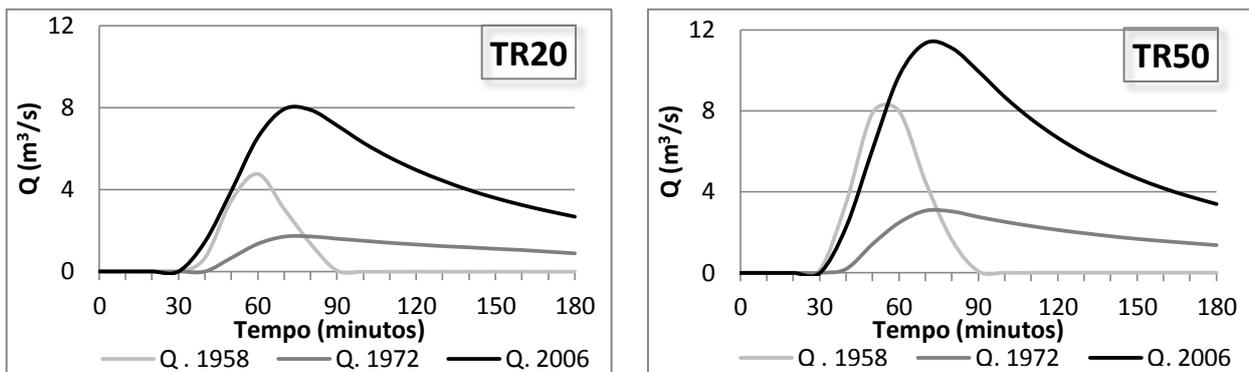


Figura 9. Hidrogramas da área de drenagem do reservatório Lago Azul, para os TR de 5, 10, 20 e 50 anos.

Em 1958, para os TR de 5, 10, 20 e 50 anos, foram obtidas vazões máximas de 1,26 m³/s – pico em 70 minutos, 2,76 m³/s – pico em 60 minutos, 4,75 m³/s – pico em 60 e 7,98 m³/s com pico entre 50 e 60 minutos, respectivamente. Neste cenário, anterior ao reservatório e caracterizado como cenário de referência, verifica-se que o incremento da vazão está diretamente relacionado à intensidade das precipitações. O tempo de base do hidrograma de cheia permaneceu entre 30 e 90, sendo que o aumento do TR de 5 para 50 anos provocou a antecipação dos picos de cheia, de 70 para 50 minutos.

No cenário de 1972, a vazão máxima se estabelece no intervalo de 70 minutos para todos os tempos de recorrência simulados, com vazões de pico variando entre 0,5 e 3,0 m³/s. No TR de 5 anos o escoamento é iniciado em 60 minutos, e reduzido em 10 minutos sucessivamente na medida do incremento de TR. O arrefecimento da onda de cheia pela ação do reservatório incorre em tempos de base superiores a 3 horas.

Em 2006, para os valores de TR de 5 e de 10 anos, o pico de vazão máxima ocorreu em

cerca de 80 minutos após o início do escoamento superficial direto, com valores de 4,38 e 5,94 m³/s, respectivamente. Para os valores de TR de 20 e de 50 anos, o pico foi antecipado para 70 minutos, com vazões máximas de 7,9 e 11,35 m³/s, respectivamente.

Embora haja uma contribuição do reservatório para o amortecimento de cheia no cenário de 2006, verifica-se que o incremento das áreas impermeabilizadas de 1972 para 2006 provocou aumento das vazões máximas em cerca de 8 vezes para o TR de 5 anos, 5 vezes para os TR de 10 e 20 anos, e 4 vezes para o TR de 50 anos. Os volumes significativos de água e as situações de extravasamento do vertedor em todos os TR indicam o impacto da expansão da malha urbana no entorno do Lago Azul e a incapacidade do reservatório em atenuar plenamente o efeito decorrente da impermeabilização da bacia hidrográfica, retomando o cenário de referência (1958). A partir de 2006, o hidrograma propagado pelo reservatório apresenta em todos os riscos avaliados hidrogramas superiores a 1958.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os hidrogramas obtidos indicam que no cenário de 1972 o reservatório tem papel importante no amortecimento das cheias, entretanto o efeito de atenuação do reservatório diminui na medida em que a impermeabilização da superfície avança com o processo de urbanização. Tal fato é evidenciado no cenário de 2006, quando o efeito de atenuação das cheias pelo reservatório de retenção é

insuficiente para amortecer o incremento da vazão excedente.

Dessa forma, o uso da terra e a atual configuração do espaço urbano apresentam-se como agentes cruciais nos processos de inundações registrados nos últimos anos no Lago Azul. Assim, observaram-se impactos expressivos nos setores a jusante do Lago Azul, como inundações no bairro Inocoop, no pontilhão da Rodovia Washington Luiz, nas

redondezas da Rodoviária e na Vila Stecca, e na confluência do córrego do Wenzel com o córrego da Servidão.

Como exemplo dos impactos mencionados, pode-se citar os eventos de chuva ocorridos em 9 de julho de 2011 e 18 de novembro 2013, com registros de 93 mm e 112 mm, distribuídos em pouco mais de 1 hora. Nessas ocasiões, as inundações resultaram em danos e comprometimento das estruturas urbanas. No Parque Municipal “Lago Azul”, o Centro Cultural “Roberto Palmari” foi alagado. Na Avenida Visconde de Rio Claro, setor canalizado do córrego da Servidão, o asfalto cedeu ou foi destruído e levado pela enxurrada. Em função da recorrência das inundações nestas localidades, o Conselho Regional de Corretores de Imóveis – CRECI estima desvalorização imobiliária de aproximadamente 30% (Obra24horas, 2014).

Assim, a implantação de reservatórios para fins de amortecimento de cheia é indicada como parte integrante de um conjunto de ações,

dentre as quais o planejamento do uso e ocupação da terra. Embora o primeiro Plano Diretor do município de Rio Claro tenha sido elaborado em agosto de 1992, posterior ao estabelecimento da malha urbana na bacia do córrego da Servidão, os dados discutidos nesse trabalho apontam para a necessidade de um plano de drenagem urbana, o qual pode incluir obras de drenagem, manutenção dos equipamentos urbanos, desobstrução de galerias pluviais e áreas assoreadas, entre outras medidas.

A implementação de medidas estruturais devem ser avaliadas em conjunto com o planejamento da ocupação do espaço e políticas amplas de ordenamento da expansão urbana. Especificamente, como a área estudada apresenta restritos setores ainda não impermeabilizados, considera-se importante a regulamentação da densidade de ocupação, visando aumentar ou manter as áreas de infiltração existentes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ALMEIDA, R.D. de (Coord). **Atlas Municipal Escolar de Rio Claro - SP**: geográfico, histórico e ambiental. Rio Claro: Cruzeiro Editora e Artes Gráficas, 2002. 113 p.
2. CANHOLI, A. P. **Drenagem urbana e controle de enchentes**. São Paulo: Oficina de Textos, 2005, 302 p.
3. CEAPLA. Centro de Análise e Planejamento Ambiental. **Banco de dados**: estação meteorológica de Rio Claro – SP. Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, 2010.
4. ESPINDOLA, G. M. **Emprego da estatística espacial na avaliação da Segmentação de imagens de sensoriamento remoto**. 30f. Trabalho de curso (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - INPE, São José dos Campos, 2005.
5. GARCIA, G.J.; GARCIA, L.B.R.; GERARDI, L.H.O. A expansão urbana de Rio Claro - SP: uma aproximação quantitativa. **Geografia**, Rio Claro, SP, v.8, n.15-16, p.175-180, 1983.
6. GRILO, R.C. **A precipitação pluvial e o escoamento superficial na cidade de Rio Claro (SP)**. 1992. 92 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UNESP, Rio Claro - SP, 1992.
7. IPT – INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Mapa Geomorfológico do Estado de São Paulo**. Escala de 1:1.000.000. IPT, vol. 02, São Paulo, 1981, série monografias, 5, 180p.
8. KOPPEN, W. **Climatologia**, México: Fondo de Cultura Econômica, 1948, 478p.
9. LOPES, W.A.B. **Análise comparativa de impactos hidrológicos causadas pelo adensamento urbano nas bacias hidrográficas do Rio Pararangaba e do Ribeirão Vidoca em São José dos Campos (SP)**. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto). 2005. INPE - Instituto de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos (SP), 2005.
10. MORAES, I.C. **Análise da dinâmica do uso da terra e sua interferência em inundações na cidade de Rio Claro (SP)**. 2011. 114 f. Dissertação (Mestrado em Geologia Regional) - Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UNESP, Rio Claro-SP, 2011.
11. MORAES, I.C.; CONCEIÇÃO, F.T.; CUNHA, C.M.L.; MORUZZI, R.B. Interferência do uso da terra nas inundações da área urbana do córrego da Servidão, Rio Claro (SP). **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 13, n. 1. 2012.
12. MORUZZI, R.B.; OLIVEIRA, S.C. de. Relação entre intensidade, duração e frequência de chuvas em Rio Claro, SP: métodos e aplicação. **Revista Teoria e Prática na Engenharia Civil**, v. 9, n. 13. 2009.
13. MORUZZI, R.B.; CUNHA, C.M.L.; CONCEIÇÃO, F.T.; PEREIRA, L.H. Efeito da ocupação urbana e de obras de drenagem sobre o hidrograma de uma bacia urbanizada: o caso da bacia do Córrego da Servidão em Rio Claro, SP. **Revista de Engenharia e Tecnologia**, v. 1, n. 1. 2009.
14. NASCIMENTO, N.O.; BAPTISTA, M.B. Contribuição para um Enfoque Ampliado do Uso de Bacias de Detenção em Meio Urbano. In: BRAGA, B.; TUCCI, C. E. M.; TOZZI, M. **Drenagem Urbana Gerenciamento, Simulação e Controle**. ABRH. Porto Alegre: Universidade-UFRGS, 1998. p. 189-203.
15. OBRA24HORAS. **Desvalorização de imóveis chega a 30% com inundações em Rio Claro (SP)**, 2014. Notícia em 19 de fev. 2014. {Online}. Disponível em: <<http://www.obra24horas.com.br/noticias/desvalorizacao-de-imoveis-chega-a-30-com-inundacoes-em-rio-claro-sp-5649>>. Acesso em: 16 nov. 2015.
16. OHNUMA JÚNIOR, A.A. **Cenários de reuso de água pluvial e controle da drenagem visando a recuperação ambiental da micro-bacia do alto Tijuco Preto**. 2005. Dissertação (Mestrado em Ciências da Engenharia Ambiental).

- Escola de Engenharia de São Carlos, USP, São Carlos (SP), 2005.
17. OLIVEIRA, H.B.; PRADO, H. **Levantamento Pedológico Semidetalhado do Estado de São Paulo:** quadrícula de São Carlos. II Memorial Descritivo. Instituto Agrônomo de Campinas, 138 p. 1984.
 18. ROSSETTI, L.A.F.G. **Geotecnologias aplicadas à caracterização e mapeamento das alterações da cobertura vegetal intra-urbana e da expansão urbana da cidade de Rio Claro (SP).** 2007. 115 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UNESP, Rio Claro-SP, 2007.
 19. SCHAFER, A.G.; NOGUEIRA, R.E.; SLUTER, C.R. Desenvolvimento de um banco de dados geográfico para a estimativa do potencial de retenção em áreas de drenagem. XV Simpósio brasileiro de sensoriamento remoto. **Anais...** - SBSR, Curitiba, PR, Brasil, 30 de abril a 05 de maio de 2011, INPE p.8709.
 20. SCS - Soil Conservation Service. **Urban Hydrology for Small Watersheds (TR-55).** U.S. Department of Agriculture, Washington, DC. June, 1986.
 21. SCS - Soil Conservation Service. National Engineering Handbook, Chapter 9. **Hydrologic Soil-Cover Complexes.** U.S. Department of Agriculture, Washington, DC. July, 2004.
 22. SCS - Soil Conservation Service. National Engineering Handbook, Chapter 7. **Hydrologic Soil Groups.** U.S. Department of Agriculture, Washington, DC. May, 2007.
 23. SEADE. Fundação Sistema Estadual de Análise de Dados. 2010. 2010. Disponível em: <<http://produtos.seade.gov.br/projpop/index.php>>. Acesso em: 20 fev. 2012.
 24. TROPPEMAIR, H. **Rio Claro: ontem e hoje.** Secretaria Municipal de Educação (2008). p.105.
 25. TUCCI, C. E. M. **Modelos hidrológicos.** Porto Alegre: Ed. Universidade /UFRGS/ Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 1998, 668 p.
 26. TUCCI, C.E.M. Controle de enchentes. In: TUCCI, C. E. M. (org.) **Hidrologia: Ciência e aplicação;** 4ª ed. Porto Alegre: ed. UFRGS/ ABRH, 2009. p.621-652.
 27. VENDRAME, I.F.; LOPES, W.A.B. Análise do crescimento urbano e seus efeitos na mudança da dinâmica de escoamento superficial da bacia do Pararangaba. Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 12. **Anais ...** Goiânia, 16-21 abril, 2005, INPE, p.2555-2562.
 28. VILLANUEVA, A. O. N., R. TASSI, and D. G. ALLASIA. 2001. Manejo integrado de bacias urbanas e planos diretores de drenagem urbana: Porto Alegre e Caxias do Sul - RS - Brasil. **Anais...** Seminario Internacional Sobre Manejo Integral de Cuencas Hidrográficas, Rosario - Sta. Fe - Argentina.

*Manuscrito recebido em: 29 de Julho de 2015
Revisado e Aceito em: 11 de Dezembro de 2015*