Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: www.ufpe.br/rbgf

Impacto do uso do solo pelo aumento da densidade populacional sobre o escoamento numa área urbana do Nordeste Brasileiro via geotecnologias e modelagem hidrológica

Ricardo de Aragão¹, Marcus Aurélio Soares Cruz², Ernesto Cleiton de Oliveira Correia³, Lucas Ferreira Melo Machado⁴, Eduardo Enéas de Figueiredo⁵

¹Professor da Unidade Acadêmica de Engenharia Civil (UAEC), Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Campus I, Campina Grande – PB, (autor correspondente); ricardoaragao@yahoo.com; ²Pesquisador-Embrapa Tabuleiros Costeiros - EMBRAPA, Avenida Beira Mar, 3250, Jardins, Aracaju, SE, CEP 49025-040, marcusascruz@gmail.com; ³Técnico-Petróleo Brasileiro S/A - PETROBRÁS, Carmópolis-SE, ernestococ@yahoo.com.br; ⁴ Professor do Departamento de Engenharia Civil da Unesc Faculdades Integradas de Cacoal- Cacoal-RO, lucas.civil@yahoo.com; ⁵Professor da UAEC/UFCG, eneasef@yahoo.com,

Artigo recebido em 15/12/2016 e aceito em 21/04/2017.

RESUMO

O aumento de áreas impermeabilizadas nas bacias urbanas pode ser responsável por alterações significativas no escoamento podendo impactar os sistemas de drenagem urbana por inundações cada vez maiores e mais frequentes. Para a quantificação do escoamento devido a uma dada chuva sobre uma bacia urbana, podem ser utilizados modelos chuva-vazão os quais necessitam, dentre outros dados, do percentual de impermeabilização da bacia. Para a determinação deste percentual faz-se necessário o uso de sistemas de informação geográfica (SIG). Estes oferecem recursos de aquisição, tratamento e processamento de dados com base em imagens aéreas e de sensores remotos. Utilizando-se geotecnologias modernas, foi estabelecida neste trabalho uma relação entre a taxa de impermeabilização e a densidade populacional, tomando-se como base imagens multiespectrais do satélite Quickbird, contemplando áreas da cidade de Aracaju e dados do censo demográfico do IBGE. Para tanto, efetuou-se a classificação da imagem e a partir desta, determinou-se a taxa de impermeabilização de áreas da cidade onde se sabe que o adensamento populacional tem crescido nos últimos anos. Tais taxas de impermeabilização foram empregadas no modelo chuva-vazão IPHS1 para simular a vazão de pico de acordo com a densidade populacional e o grau de impermeabilização. Como resultado, a taxa média de impermeabilidade encontrada foi de 75,8%, que é alta podendo quase duplicar a magnitude das cheias na região dependendo do período de retorno, fato constatado através das simulações hidrológicas com um aumento de 110% na vazão de pico para um aumento de 133,8% na densidade populacional em um bairro avaliado.

Palavras-chave: Enchentes, área impermeabilizada, densidade populacional, Aracaju

Land use and population density Impacts on runoff in a Brazilian northeast urban area via geotechnology and hydrologic modeling

ABSTRACT

Impervious area in urban watersheds is likely responsible for significant changes in the generated runoff, with the occurrence of more frequent floods and direct impact on urban drainage systems. To quantify the direct runoff due to rainfall on a given watershed, rainfall-runoff models have been used. However, they require specific data such as the percentage of impervious area of a watershed. Geographic information systems (GIS), which is based on aerial images and remote sensing data, is capable of identifying and quantifying the types of land uses and its percentage. In this work the relation between the population density and rate of area impermeabilized was established using multispectral images from Quickbird satellite covering the city of Aracaju and also the census data of the city. After the image classification the rate of impervious area for a given census sector was determined. Such rates was applied to the rainfall runoff model IPHS1 to simulate the peak discharge according to the percentage of impervious area of a watershed. As a result, it was found that the average rate of impervious area for a given region of the city was about 73.2%, which is considered high and certainly has been contributing to the frequent floods observed in the region. The simulation showed a increase of 110% in the peak discharge for increase of 133,8 % in the population density

Keywords: Floods, impervious area, population density, Aracaju

Introdução

O crescimento populacional nas grandes cidades do Brasil, impulsionado principalmente pelo desenvolvimento industrial do país a partir da

década de 1950, ocorreu dentro do processo de formação das grandes regiões metropolitanas com consequente ocupação desordenada do solo urbano, gerando impactos ambientais até o presente. A população urbana que era de 30% do

total na década de 1940 passou para mais de 84% nos dias atuais causando uma grande densidade populacional nem sempre ordenada (Brito, 2006; Tucci, 2007; CE, 2012; IBGE, 2012).

De acordo com o Estatuto das Cidades (BRASIL, 2001), a qualidade de vida da população deve ser uma das prioridades buscadas pela administração pública no desenvolvimento das novas fronteiras de expansão das áreas urbanas. Esta qualidade de vida, porém, é altamente dependente das variáveis relacionadas à ocupação do meio físico, principalmente a densidade populacional (Canholi, 2005; Augustin et al. 2014). Quando esta ocupação ocorre de forma desordenada, diversos impactos são causados, dentre eles a impermeabilização sistêmica que se reflete sobre o saneamento ambiental e sobre as águas urbanas, notadamente os sistemas de drenagem urbana.

A impermeabilização não planejada das áreas urbanas é responsável por alterações significativas na hidrologia local, visto que ocorre a redução em demasia na infiltração da água da chuva, o aumento exacerbado do pico de vazão de cheia, a antecipação no tempo desta vazão máxima até uma seção de destino e o aumento do volume escoado sobre a superfície, levando ao aumento na frequência de inundações. Desta forma, grandes impactos são causados sobre o meio ambiente elevando os custos para a sociedade (MCT/CGE, 2002; JHA et al., 2012; CE, 2012). Como exemplo tem-se o aumento da produção de sedimentos, que leva a redução na capacidade dos condutos e canais, e a queda na qualidade da água pluvial associada aos resíduos sólidos e contaminantes presente na superfície (Tucci, 2000; Bird et al., 2001; Philippi et al., 2005; Neves e Tucci, 2011).

Para a prevenção dos citados problemas faz-se necessário o monitoramento do uso e da ocupação do solo urbano, diagnosticando os potenciais impactos e simulando os cenários de uso e ocupação do solo bem como de medidas de controle possíveis de implementação. Os resultados obtidos com as simulações permitem melhorar o planejamento urbano minimizando os custos dos sistemas de controle da drenagem e os prejuízos futuros decorrentes das inundações (Menezes Filho e Tucci, 2012; JHA et al., 2012; França e Rezende, 2013).

A simulação de diferentes cenários de uso e ocupação do espaço urbano é geralmente efetuada através de modelos hidrológicos cujos resultados dão suporte à tomada de decisão na escolha das medidas de controle de inundações

mais adequadas para certa região (Cruz e Tucci, 2007; Cruz e Tucci, 2008; Souza et al., 2012). Para emprego destes, necessita-se, de informações como o grau de impermeabilização da área em estudo, o que pode ser obtido através de geotecnologias (Reis et al., 2011) tais como imagens de satélites de alta definição e os sistemas de informações geográficas (SIG), cuja principal contribuição consiste na automatização dos processos de monitoramento, aquisição e processamento de informações contidas nas imagens (Centeno et al., 2003; Esteves, 2006; Novo, 2010) com um mínimo de trabalho de campo em grandes áreas. Com a aplicação de SIG obtêm-se as áreas impermeáveis em uma dada região que, quando relacionadas à densidade habitacional originam curvas médias para macrobacias urbanas, contribuindo para a previsão de impactos devido ao adensamento populacional antes de sua ocorrência. Dessa forma o gestor urbano poderá ou não autorizar a implantação de aglomerados urbanos em uma determinada área (Fagundes, 2002; Philippi, 2005; Reis et al., 2011).

Os problemas de expansão e ocupação desordenada do espaço urbano, impermeabilização sistêmica e frequentes inundações também ocorrem em Aracaju, capital do Estado de Sergipe, devido ao crescimento acelerado da sua população bem como ao planejamento inadequado na ocupação do solo e gestão deficiente do sistema de drenagem urbana (World Bank, 2011; Reis et al., 2012). Nesta cidade, é possível notar o surgimento de novos empreendimentos com possível impacto nos sistemas de drenagem urbana e na área de mangue, principalmente sobre o aumento na frequência de cheias e inundações (Fonseca et al. 2011). É possível estimar a relação entre o grau de impermeabilização e a densidade populacional através da aplicação de geotecnologias e prever o impacto do aumento da densidade populacional sobre o incremento do escoamento superficial via modelagem hidrológica.

A contribuição principal deste trabalho é o estabelecimento da relação entre densidade populacional (IBGE, 2012) versus grau de impermeabilização via imagens do satélite de alta definição Quickbird (DIGITALGLOBE, 2012) de uma grande região na cidade de Aracaju-SE bem como o impacto do crescimento populacional sobre o escoamento simulado com o modelo IPHS1 (Viegas Filho et al., 2004; Pinheiro, 2013).

Material e métodos

A área de estudo - Aracaju é a capital do Estado de Sergipe, localiza-se nas coordenadas 10° 54' 36"S - 37° 04' 12"O, ocupa uma área de 180 km² (Figura 1), limita-se com os municípios de São Cristóvão, Nossa Senhora do Socorro e Santo Amaro das Brotas e Barra dos Coqueiros, sendo estas cidades parte da região metropolitana de Aracaju. A temperatura média anual em Aracaju é de 26° C, as chuvas se concentram entre os meses de março e agosto e a precipitação média anual é de 1590 mm (World Bank, 2011). A região apresenta solos indiscriminados de mangue com geomorfologia de planície flúviomarinha e planície marinha. A maior parte do território aracajuano encontra-se sobre uma planície. A cidade encontra-se inserida em duas bacias hidrográficas: a do rio Sergipe e a do rio Vaza-Barris (World Bank, 2011).

A atual dinâmica de ocupação das áreas disponíveis para expansão da cidade vem produzindo impactos cada vez maiores sobre os recursos hídricos da capital. Isto ocorre como consequência das alterações na taxa de ocupação do solo, aumento do volume de efluentes produzidos, além da ampliação dos problemas de mobilidade, entre outros, que comprometem a manutenção do ecossistema local, que a exemplo dos manguezais, passam a compor ilhas em pleno cenário urbano (World Bank, 2011).

A macrodrenagem da capital é composta por mais de 70 canais que afluem aos diversos corpos hídricos presentes na região, como os rios Poxim, Sergipe, Santa Maria, do Sal, lagoas, mangues e também no oceano (World Bank, 2011). Tanto o sistema de macrodrenagem como o de microdrenagem é mantido e gerenciado pela Prefeitura através da Empresa Municipal de Obras e Urbanização – (EMURB). Apesar de a literatura especializada preconizar o sistema de esgotamento sanitário do tipo separador absoluto, o sistema de drenagem de águas pluviais em Aracaju é do tipo misto (esgotos domésticos e de águas pluviais em conjunto), ou seja, as águas residuárias não recebem o devido tratamento antes do seu destino final que na maioria das vezes é o sistema de macrodrenagem e deste para os rios que circundam a cidade.

A cidade de Aracaju é dividida em macrozonas que correspondem às zonas definidas para se aplicar diferentes parâmetros de adensamento urbano (Figura 2) e são assim definidas (World Bank, 2011): Zonas de Adensamento Preferencial- ZAP (Área Central de Aracaju - com toda a infraestrutura possível); Zona de Adensamento Básico - ZAB (Zonas

Norte, Sul e Oeste - possui as principais facilidades, mas não em sua plenitude); Zona de Adensamento Restrito - ZAR (Zona de Expansão - ainda em processo de estruturação, com ausência de sistemas de drenagem urbana, esgotamento sanitário em algumas áreas).

Figura 1. A cidade de Aracaju, a divisão por bairros e área de estudo. Fonte: World Bank (2011).

Figura 2. Cidade de Aracaju com delimitação de suas macrozonas. Fonte: adaptado de Reis et al. (2012)

Devido ao alto valor dos imóveis localizados na ZAP e em algumas regiões da ZAB, nos últimos anos houve um direcionamento de ocupação do solo urbano na região da ZAR pelo seu baixo custo, que predominantemente é formada de dunas, mangues e lagoas naturais.

Contudo, a ZAR não possui a infraestrutura semelhante às da ZAP e ZAB e como consequência, diversos alagamentos têm sido registrados na ZAR nos últimos anos devido a impermeabilização sistêmica e avançada. Assim, através da ação da sociedade civil organizada e de alguns órgãos como o Ministério Público, foi vetada no ano de 2011 a construção de novas edificações na ZAR, caracterizada por condomínios verticais de até seis pavimentos e condomínios de casas e pequenos comércios para suprir a necessidade local.

Como principal consequência do veto do Ministério Público, a pressão imobiliária voltou-se para o bairro Jabotiana e para algumas áreas remanescentes ainda desocupadas dos bairros Grageru, Inácio Barbosa, Luzia, Ponto Novo, Atalaia e São Conrado (Figura 1), todos pertencentes a ZAB. Estes bairros possuem ocupação predominantemente multifamiliar, com presença de condomínios de edifícios de diversos pavimentos e de alguns prédios comerciais, gerando nestes um elevado adensamento populacional (não planejado), imensas áreas impermeáveis, como também engarrafamentos em horários de grande movimento. No caso do bairro Jabotiana, a sua área total é de 388 ha dos quais apenas 104 ha estão efetivamente ocupados, sendo o restante coberto por vegetação pouco densa. Ou seja, o que aconteceu na ZAR está ocorrendo de forma paulatina nos bairros acima citados justificando, assim, estudos para verificar o impacto do adensamento progressivo dessas áreas sobre a infraestrutura existente (sistemas de drenagem pluvial e de esgoto sanitário), como também sobre o principal sistema de drenagem da cidade, o Rio Poxim, na bacia do qual os bairros Jabotiana, Grageru, Inácio Barbosa, Luzia, Ponto Novo, Atalaia e São Conrado estão inseridos (ver Figura 1).

Geotecnologias Utilizadas - Foram utilizadas imagens multiespectrais do satélite Quickbird (DIGITALGLOBE, 2012), com resolução espacial de 0,6 m, base cartográfica digital em escala 1:2000, contendo as quadras do município de Aracaju, obtidas em 2010 e cedidas pela Secretaria Municipal de Planejamento da Prefeitura Municipal de Aracaju (SEPLAN), - ARACAJU (2015). Estas imagens contemplam a região relativa aos setores censitários cadastrados pelo IBGE (IBGE, 2012), relacionados aos bairros Grageru, Inácio Barbosa, Jabotiana, Luzia, Ponto Novo, São Conrado, Jardins, Atalaia, Aeroporto e

Zona de Expansão (Figura 1). Estes bairros possuem uma população de 133.175 habitantes (23% da população total de Aracaju) e cobrem uma área de 10.079,47 ha (56% da área total do município).

O levantamento das áreas impermeáveis existentes na imagem foi realizado com o auxílio do Sistema de Processamento de Informações Geográficas - SPRING 5.2 (Câmara et al., 1996) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE, 2012). Esta etapa consistiu na análise e classificação (extração das informações nas imagens para reconhecer objetos homogêneos) das quatro bandas espectrais que constituem as imagens de satélite estudadas, considerando os tipos de uso do solo e baseado na metodologia citada por Jensen (2011). Para tanto, o reconhecimento da assinatura espectral das classes foi efetuado de forma supervisionada, ou seja, alvos reconhecidamente relacionados a cada classe foram selecionados e indicados ao SPRING para que a partir dali a seleção tornasse automatizada. Na Tabela 1 é apresentada a resolução espectral da imagem utilizada.

Tabela 1. Resolução espectral da imagem estudada

Bandas espectrais	Resolução espectral
Azul (1)	450 – 520 nm
Verde (2)	520 – 600 nm
Vermelho (3)	630 – 690 nm
Infravermelho Próximo (4)	760 – 900 nm

Fonte: DIGITALGLOBE (2012).

De acordo com Jensen (2011) e Reis et al. (2011) na classificação de imagens de áreas urbanas, as classes são definidas como: a) água (incluindo qualquer tipo de corpo d'água como rios, lagos canais, etc); b) vegetação (incluindo praças, parques e qualquer área arborizada); c) área construída ou urbana (ruas, calçadas e edificações); d) solo descoberto ou exposto (pedreiras, encostas, topo de morros, ruas de chão batido, etc).

Para o presente estudo, as classes de uso do solo consideradas foram as mais adequadas para a realidade da cidade: 1) água; 2) vegetação; 3) solo exposto; 4) área comum (ruas pavimentadas e passeio); 5) área restrita (edificações, áreas de estacionamento, coberturas de concreto). Considerou-se, para a determinação da área impermeável, a soma das ocorrências referentes às classes 4 e 5 e para a área permeável as ocorrências relativas às classes 2 e 3. A classe 1 (água) mesmo sendo área impermeável em alguns

dos pontos observados, não foi considerada na totalização. Na Figura 3 é apresentada a localização dos bairros Grageru e Jardins e a delimitação dos setores censitários bem como o número de habitantes, obtidos a partir da sinopse do censo de 2010 (IBGE, 2010).

Foi considerada na etapa de classificação, a área da imagem de toda a região de estudo. Através do SPRING 5.2 foram coletadas amostras aleatórias contemplando as diferentes classes, sendo o maior número de amostras para as áreas com maior diversidade de elementos, a exemplo das classes “área comum” e “área restrita”. Após esta etapa a imagem foi recortada seguindo as coordenadas correspondentes aos setores utilizados pelo IBGE para o censo 2010 (IBGE, 2010).

Os setores passaram então a compor novas camadas de informações que possuem características em comum, também chamadas de planos de informação (PI) e estes foram utilizados na etapa de edição matricial, isto é, corrigir pixels no limiar de duas ou mais classes, atribuindo seus valores a partir de análise visual seguindo a metodologia de Jensen (2011).

Figura 3. Localização dos bairros Grageru e Jardins e a sua divisão em setores censitários. FONTE: IBGE (acessado em 09/10/2015)

O percentual de área impermeável (AI) foi determinado pela Equação 1, conhecendo-se o percentual da classe área comum e de área restrita com relação a área total de cada setor censitário:

$$AI = C_4 + C_5 \quad (1)$$

onde AI é o percentual de área impermeável; C4 é o percentual da classe “área comum” (ruas pavimentadas e passeio); C5 é o percentual da classe “área restrita” (edificações, estacionamentos, coberturas de concreto).

A taxa média de impermeabilidade (C) para cada bairro em estudo foi determinada a partir da média ponderada do percentual de área impermeável de cada setor censitário pela respectiva área do setor. A determinação da taxa média de impermeabilidade obtida a partir da Equação 2, foi utilizada primeiramente para a determinação da taxa para cada bairro e ao final para toda a região de estudo, ou seja, todos os setores considerados. Desse modo, tem-se:

$$C = \frac{\sum AI_i \cdot A_i}{\sum A_i} \times 100 \quad (2)$$

onde C é a taxa média de impermeabilidade (%); AI_i é o percentual de área impermeável i; A_i é a área do setor i;

Neste trabalho foram analisados o grau de impermeabilização e a densidade populacional nos bairros Grageru, Inácio Barbosa, Jabotiana, Luzia, Ponto Novo e São Conrado, Atalaia, Aeroporto e Zona de expansão. Destes foi visto que a aceleração da impermeabilização hoje acontece com maior intensidade no bairro Jabotiana e na Zona de Expansão.

A densidade populacional (Dh) para cada setor censitário foi obtida considerando o número de habitantes para cada setor e a área de cada setor censitário da região de estudo. A relação entre (Dh) e (AI) por setor censitário foi determinada via regressão não linear utilizando o software Labfit (Silva et al., 2004) e posteriormente foram traçadas curvas de tendência para os dados obtidos e determinados os parâmetros de ajuste em função do valor do coeficiente de determinação (R²).

O Modelo Empregado e Modelagem hidrológica

Foi escolhido para esta pesquisa o modelo IPHS1 (Viegas Filho et al., 2004) que transforma dados de chuva em vazão. O modelo é composto dos módulos bacia e rio, sendo a bacia

discretizada em várias sub-bacias e o rio representado por trechos retilíneos de canal. Faz-se necessário o hietograma da chuva de projeto sobre a bacia, as características da sub-bacia (área, perímetro, declividade) e do canal (comprimento do trecho, profundidade, rugosidade, largura), característica do solo, do seu uso e de sua ocupação. A partir destes dados é calculado o tempo de concentração pela equação de Kirpich (Tucci, 1993). A chuva excedente sobre a bacia é obtida com base no método SCS-CN (McCuen, 1998), também conhecido como curva-número (CN) que associa um valor de CN para cada tipo de solo, umidade e uso e este é tanto maior quanto mais impermeável for a superfície. O escoamento superficial resultante da chuva excedente é convertido em um hidrograma sintético triangular, sendo propagado para o canal adjacente a jusante via método de Muskingum Cunge Linear (Viegas Filho et al., 2003). Desta forma, tem-se como resultado de saída do modelo os hidrogramas de cada sub-bacia e o hidrograma nos trechos de canais até o exutório da bacia. Neste modelo as principais variáveis são o relevo (elevações), área da bacia, extensão dos trechos, uso do solo (representado pelos valores da curva número CN) e o tempo de concentração.

O os resultados fornecidos pela relação $AI \times Dh$ aqui desenvolvida para a região do bairro Jabotiana serviram de entrada para a simulação hidrológica via modelo IPHS1, considerando diferentes valores de Dh e suas áreas impermeáveis AI , e de três períodos de retorno para a chuva (10, 50, 100 anos). Neste bairro, parte da área é de aglomerado urbano com zonas residenciais, lotes $< 500 \text{ m}^2$ e impermeabilização de 70,81% ($CN = 61$) e parte é de cobertura nativa e o solo é do tipo arenoso ($CN = 45$). Esta situação (Tabela 2) foi considerada cenário atual (Cen1) com valor médio $CN = 54$.

No segundo cenário (Cen2) considerou-se um aumento na densidade populacional semelhante ao que aconteceu no bairro Jardim e Grageru com $Dh = 100 \text{ hab/ha}$ o que gerou uma taxa de impermeabilização de 81,20% elevando o valor de CN médio para 61. Por ultimo toda região assumiu valor $CN = 92$. A atualização dos valores de CN foi efetuada com base em Tucci (1993), Equação 3.

$$CN_m = pCN_p + iCN_i \quad (3)$$

onde CN_m =número da curva para ocupação mista; CN_p =número da curva da parcela permeável da bacia; CN_i =número da curva da parte impermeável da bacia. Admite-se $CN_i=95$;

p =fração permeável da bacia; i =fração impermeável da bacia e $i=1-p$.

Tabela 2. Cenários para avaliação do escoamento no bairro Jabotiana com a evolução na urbanização

Cenário	Taxa de impermeabilização	CN	Tempo retorno (anos)
Cen1 Atual ($Dh=68 \text{ hab/ha}$)	70,81%	54	10, 50, 100
Cen2 Urbana ($Dh=100 \text{ hab/ha}$)	81,20%	89	10, 50, 100
Cen3 Densa ($Dh=159 \text{ hab/ha}$)	88,62%	92	10, 50, 100

Figura 4. Discretização do bairro Jabotiana em sub-bacias e trechos de canais

A região foi dividida em 14 sub-bacias e 15 trechos de canais (Figura 4), cujas características estão listadas na Tabela 3. Os dados de precipitação são gerados para os períodos de retorno 10, 50 e 100 anos, via curva IDF desenvolvida por Aragão et al (2013) para o posto Aracaju. Os tempos de concentração foram estimados pela equação de Kirpich e corrigido via metodologia sugerida por Tucci et al. (1993).

Também foi verificado através da modelagem os impactos provocados na região pelo evento de chuva que ocorreu no dia 24/05/2011, cujo total precipitado foi 185 mm, calculado como sendo a chuva secular, sendo

maio o mês mais chuvoso do período. Considerando que não se tem dados de vazão observados para os trechos em questão, como também que somente para a chuva secular aqui simulada tem-se informações sobre áreas inundadas, a análise efetuada foi apenas qualitativa e contemplou as vazões geradas com base nos dados de IDF de Aracaju (Aragão et al., 2013), T=100 anos, para os trechos em estudo, reconhecidamente mais sujeitos a inundações comparando com os resultados da chuva secular.

Resultados e discussão

Modelagem da relação AI x Dh - A partir da classificação supervisionada através do SPRING (Câmara et al., 1996) foram levantadas as áreas impermeáveis de 195 setores censitários dos bairros estudados. Como resultado, têm-se os percentuais de área impermeáveis para cada setor censitário dos bairros em consideração. Como existe uma crescente pressão sobre o bairro Jabotiana e este é o atual foco das construtoras, os resultados para este bairro estão na Tabela 4. Para todos os setores censitários e em toda a região de estudo a densidade habitacional (Dh) variou entre 25 hab/ha, para o setor 19 no bairro Jabotiana (Tabela 4), em fase de implantação de empreendimentos imobiliários, e 389 hab/ha para o setor 02 no bairro São Conrado, em função de ocupação desordenada com características de zonas invadidas.

Considerando a análise anterior, o percentual de área impermeável (AI) apresentou variação entre 19,9% no setor 06, região de expansão do bairro São Conrado, e 97,4% no setor 04, também pertencente ao bairro São Conrado, porém, esta é uma região de ocupação desordenada com características de zona invadida, sem elementos que definam a delimitação de lotes; passeios e ruas bastante estreitas e ausência de elementos urbanísticos como praças ou canteiros centrais. Para o Jabotiana, o percentual foi de 73,13% de área impermeável.

Por outro lado, entre os setores censitários da região da Zona de Expansão, dos bairros Atalaia, Aeroporto, bairros Jardins e Grageru, o menor percentual de área impermeável (AI) foi de 3,1 %, determinada para o setor censitário de ordem 106 (setor 280030805000739), localizados na Zona de Expansão, e o maior percentual de área impermeável (AI) foi de 90,5% no setor censitário de ordem 155 (setor 280030805000626) no bairro Grageru, onde está presente um conjunto

de edifícios habitacionais. Vale salientar que assim como para o bairro Jabotiana, nos outros bairros estudados a predominância de ocupação é de edificações multifamiliares, com presença de condomínios de edifícios de diversos pavimentos e de alguns prédios comerciais.

Os valores encontrados para a taxa média de impermeabilização (Eq. 2) para os bairros estudados foram os seguintes: 90,1% (São Conrado), 80,3% (Inácio Barbosa), 70,4% (Luzia), 89,2% (Ponto Novo), 81,9% (Grageru), 68% (Jabotiana), 62,8% (Jardins), 57,4% (Atalaia), 42,7% (Aeroporto) e 28,2% (Zona de Expansão). Deve-se notar que os percentuais podem ser maiores dependendo de como os dados são considerados. Por exemplo, para o bairro Jabotiana a taxa média de impermeabilidade (C) aumenta de 68,0% para 79,7% quando os dados do setor 18 (Figura 5), onde existe uma extensa área desocupada na forma de mata ciliar, que não foi considerada nos cálculos, e do setor 19, que está em fase de ocupação são suprimindo. Para o bairro Luzia, C aumenta de 70,4% para 86,8%, subtraindo-se a área referente ao setor 33 (área de vegetação) e considerando-a habitada.

Para os bairros Atalaia, Aeroporto, Jardins e Zona de Expansão, que tiveram ocupação iniciada em época semelhante, a taxa média de impermeabilização foi de 42,7% e o coeficiente de variação foi de 28,2% mostrando uma média dispersão na ocupação e heterogeneidade no tipo de ocupação do solo nestas regiões, apesar de todas serem predominantemente residenciais.

Por outro lado, a média dos valores de C (taxa média de impermeabilização) dos bairros Jabotiana, São Conrado, Inácio Barbosa, Luzia, Ponto Novo, Grageru foi de 68,8%. Se as áreas remanescentes de vegetação ou que possuem corpo hídrico existente nos setores 06, 18, 19 e 33 tornarem-se impermeáveis o valor médio de C passaria a 83,6%. Na atual situação de pressão imobiliária este valor é facilmente atingível (Garotti e Barbassa, 2010). Ou seja, atualmente, para uma chuva ocorrendo sobre a região estudada, aproximadamente 85% se transforma em volume escoado sobre a superfície, o que se traduz em risco de enchentes nos citados setores caso os sistemas de drenagem não funcionem a contento fato que ocorre com muita frequência.

De forma geral, apesar dos dados atuais mostrarem um decaimento gradual no valor de C entre a área mais e menos impermeabilizada (São Conrado e Zona de Expansão, respectivamente) este cenário poderá mudar (chegar próximo da igualdade) de forma muito rápida visto que a Zona

de Expansão possui uma imensa área disponível para ocupação, muito embora o próprio plano diretor vigente aponte esta área como de adensamento restrito (ZAR), fato que não está sendo respeitado atualmente. Isto tem afetado bairros como Jardins, Grageru e Ponto Novo onde o alto nível de impermeabilização levou a inundações frequentes em épocas de chuvas intensas. Ou seja, existe uma relação entre o crescimento na urbanização e a impermeabilização. Assim, procurou-se determinar a relação entre o percentual de área impermeável (AI) e a densidade populacional (Dh) nos setores censitários, como forma de possibilitar estimativas rápidas e eficientes de AI a partir de dados censitários. Desta forma, para a região dos bairros Jabotiana, São Conrado, Inácio Barbosa, Luzia, Ponto Novo, Grageru a equação de ajuste encontra-se listada na Tabela 5 que foi determinada com o software Labfit (Silva et al., 2004).

Tabela 3. Características das sub-bacias

Unidade	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A11	A12	A13	A14
Área (ha)	3	10	90	22	12	78	14	24	17	25	21	11	25	37
Declividade (%)	2,1	0,86	0,61	0,16	0,43	0,69	0,41	0,38	0,59	0,17	7,62	2,54	11,62	1,31
Comprimento (m)	250	400	1260	660	500	1160	520	650	490	1030	690	370	420	840
Desnível (m)	5,26	3,45	7,67	1,08	2,15	7,95	2,12	2,44	2,88	1,71	52,58	9,41	48,8	11,03

Tabela 4. Dados de percentual de área impermeável e densidade populacional por setor censitário para o bairro Jabotiana, Aracaju-SE.

Ordem	Código do setor censitário	População (hab.)	Dh (hab/ha)	Área(ha)	Area Imp. (%)
17	280030805000267	1152	94	12,26	85,0%
18	280030805000268	786	41	19,17	39,5%
19	280030805000270	297	25	11,88	33,4%
20	280030805000271	565	142	3,98	96,3%
21	280030805000272	868	108	8,04	81,5%
22	280030805000273	606	73	8,30	63,9%
23	280030805000274	205	90	2,28	90,7%
24	280030805000275	835	84	9,94	82,8%
25	280030805000543	636	205	3,10	71,0%
26	280030805000690	756	70	10,80	54,7%
27	280030805000729	902	72	12,53	91,9%
28	280030805000730	881	83	10,61	86,9%
Total		8489		112,89

Figura 5. O uso e ocupação do solo dos setores censitários 18 e 19 do Bairro Jabotiana, Aracaju-SE.

A curva gerada a partir da regressão está apresentada na Figura 6 que levou a um coeficiente de correlação baixo, de 0,5, em consequência da grande heterogeneidade nos dados conforme se observa na Figura 6. Embora a correlação seja baixa, quando se compara as estimativas de AI com os valores observados o coeficiente de determinação é de 0,74. Observa-se ainda que a partir de 100 hab/ha e taxa de AI é da

ordem de 80 a 95%, sendo predominantemente de unidades habitacionais. Campana e Tucci (2001) também obtiveram resultados semelhantes nas áreas por eles estudadas.

Outras correlações foram testadas assim como suas respectivas curvas e estes resultados estão listados na Tabela 5 onde se observa uma variação no coeficiente de correlação entre 0,21 e 0,84, com destaque para Jabotiana ($R = 0,65$),

Aeroporto ($R = 0,72$) e Jardins ($R = 0,84$). Nas Figuras 7 e 8 encontram-se os resultados para os bairros Jabotiana e Atalaia. A análise dos dados por bairro nos leva a notar que seguem uma mesma tendência (Figuras 7 e 8), com exceção dos bairros Zona de Expansão e Grageru. Considerando os dados de todos os bairros (Figura 9) obtêm-se uma grande dispersão denotando grande heterogeneidade no modo de ocupação das áreas investigadas.

Os bairros em análise fazem parte da bacia de contribuição do rio Poxim, ou seja, um grande percentual do volume de águas pluviais gerado nestes bairros escoará para este rio. Neste sentido, os bairros Jabotiana, São Conrado e Inácio Barbosa, por estarem nas menores cotas, apresentam grande sensibilidade a chuvas intensas e sofrem frequentemente com enchentes em dias chuvosos, chamando, portanto, a atenção para os riscos do adensamento descontrolado nessas regiões elevar ainda mais a frequência nas inundações.

Considerando os dados fornecidos por Word Bank. (2011), que realizaram um levantamento batimétrico do rio Poxim e identificaram diversos pontos em que o rio está bastante assoreado, principalmente na região do presente estudo, o risco de inundações por volume escoado superficialmente devido as áreas impermeabilizada é bastante alto e requer atenção. Atrelado a este fato está a consideração de que, apesar dos diversos apelos por parte do gestor público no sentido de não jogar lixo nos córregos e canais de drenagem, quantidades consideráveis são encontradas nas margens destes corpos de água, que, fatalmente são conduzidos para o rio Poxim já assoreado e bastante poluído em alguns trechos.

Em face do exposto, foi possível observar que existe uma clara tendência para o aumento da impermeabilização com o aumento da densidade populacional de forma que, apesar de as relações apresentadas nas Figuras 6 a 9 possuírem uma dispersão, estas poderão servir como uma orientação inicial no que tange ao adensamento em uma dada área e o reflexo deste adensamento nos sistemas de drenagem urbana via aumento da área impermeável, devendo, porém, considerar para cada bairro uma tendência em particular. Os resultados também mostram que, de forma geral existe uma grande impermeabilização nas áreas estudadas, o que é preocupante visto que a tendência é aumentar cada vez mais o grau de impermeabilização devido ao fato da pressão imobiliária nos bairros citados e também das

condições nem sempre desejáveis dos sistemas de drenagem urbana ali encontrados.

Modelagem do escoamento

Os impactos que o progressivo adensamento poderá causar sobre a o escoamento superficial e por sua vez sobre o sistemas de drenagem urbana foram avaliados via modelo IPHS1 considerando os cenários da Tabela 2, cujos resultados (m^3/s) da simulação estão listados na Tabela 6. Nesta, Q IDF ($Tr=100$ anos) diz respeito as vazões calculadas com base na informação da IDF (Aragão et al., 2013) e Q Ch.Real dizem respeito as vazões calculadas com a chuva do dia 24/05/2011.

Nota-se que os valores de vazão gerados com dados de IDF foram sempre mais altos que os seus respectivos gerados com a chuva natural. De certa forma isto pode ser esperado tendo em vista o fato que os dados de IDF são obtidos a partir de estatísticas considerando um período de retorno que pode ou não vir a ser alcançado. Além disso, a entrada destes dados no modelo é via blocos alternados (Tucci et al., 1993) que tende a posicionar a intensidade máxima no centro do hietograma levando a picos de vazão. Por outro lado, os dados de chuva real tem uma intensidade bem diferente, que variou ao longo do período de análise e teve seu maior valor no início do dia e no começo da tarde, fato este que levou a atenuação do pico de vazão (Tabela 6).

Observa-se nesta tabela que o aumento na densidade populacional leva a um aumento no nível de impermeabilização que, consequentemente, leva a maiores valores da vazão na seção mais a jusante do rio Poxim.

Por exemplo, se comparado a vazão gerada para a condição de grande adensamento com a condição atual de Dh para o período de retorno de 100 anos nota-se um aumento de 60% em média para as vazões a partir dos dados da IDF e de 110% em média para as vazões calculadas a partir da chuva observada. Além disso, para o cenário C3 (mais denso), o volume no exutório da bacia em análise foi de $630000 m^3$, ao passo que para a condição atual o volume no exutório da bacia calculado pelo modelo foi de $100000 m^3$, o que ilustra o que o adensamento e a consequente impermeabilização poderão causar. Ou seja, se houver adensamento sem que haja

adequação no sistema de drenagem, certamente ocorrerão inundações. Assim, o gestor municipal poderá, com a curva aqui gerada, prever o impacto de liberação na implantação de condomínios nesta área antes que a construção seja autorizada. Além disso, os sistemas de drenagem urbana poderão ser projetados tomando como referência as vazões fornecidas pelo modelo, o que levariam a um dimensionamento mais realista. Os resultados também mostram que, apesar da simplicidade, o IPHS1 foi uma ferramenta bastante promissora no que diz respeito a transformação de chuva em vazão e a propagação desta nos canais.

Tabela 5. Relações entre percentual de área impermeável (AI) e densidade populacional (Dh - hab/ha) para as áreas em estudo e os seus respectivos coeficientes de correlação

Bairro	Equação	A	B	Coeficiente de Correlação
Jabotiana, São Conrado, Inácio Barbosa, Luzia, Ponto Novo, Grageru	$AI=A*(1-EXP(B*Dh))$	89,35	-0,0242	0,50
Jabotiana	$AI=A*(1-EXP(B*Dh))$	91,44	-0,0219	0,65
Atalaia, Aeroporto, Jardins, Grageru, Zona de Expansão	$AI=A*Dh+B$	0,0789	39,97	0,21
Atalaia	$AI=A*(1-EXP(B*Dh))$	61,54	-0,104	0,46
Aeroporto	$AI=A*(1-EXP(B*Dh))$	56,60	-0,033	0,72
Jardins	$AI=A*(1-EXP(B*Dh))$	74,55	-0,360	0,84
Grageru	$AI=A*COSH(B*Dh)$	76,09	0,0062	0,46
Zona de Expansão	$AI=A*COSH(B*Dh)$	26,53	0,0046	0,51

Figura 6. Relação percentual de área impermeável vs densidade populacional nos setores censitários dos bairros Jabotiana, São Conrado, Inácio Barbosa, Luzia, Ponto Novo, Grageru e a curva de tendência gerada com a equação desenvolvida

Figura 8. Relação entre percentual de área impermeável vs densidade populacional nos setores censitários para o bairro Atalaia e a curva de tendência gerada com a equação desenvolvida

Figura 7. Relação percentual de área impermeável vs densidade populacional nos setores censitários dos bairros Jabotiana e a curva de tendência gerada com a equação desenvolvida

Figura 9. Relação entre percentual de área impermeável vs densidade populacional nos setores censitários dos bairros Atalaia, Aeroporto, Jardins, Grageru, Zona de Expansão e a curva de tendência gerada com a equação desenvolvida

Tabela 6. Vazões calculadas para T=100 anos considerando diferentes cenários nos diferentes trechos de canal do rio Poxim que drena o bairro Jabotiana-Aracaju-SE

Trecho	ATUAL - Dh=68 hab/ha		CEN2 - Dh=100 hab/ha		CEN3 - Dh=159 hab/ha	
	Q IDF	Q Ch. Real	Q IDF	Q Ch. Real	Q IDF	Q Ch. Real
T9	9,60	2,88	17,21	6,80	17,38	6,79
T10	10,30	3,79	15,60	7,70	15,71	7,70
T11	10,55	4,11	16,08	8,30	16,37	8,30
T12	10,40	4,15	15,75	8,30	15,67	8,32
T13	8,70	3,75	14,60	7,53	14,50	7,53
T14	8,15	3,21	12,20	7,30	13,70	7,28
T15	9,00	3,40	14,70	6,90	15,00	6,92

Conclusões

- As regiões em análise já se encontram com um considerável percentual de área impermeável, ficando em média de 70 a 80%;

- As curvas mostram que não foi seguido um padrão de distribuição de população dentro das áreas estudadas e a consequência foi diferentes tendências para as curvas e equações geradas;

-O emprego das curvas aqui geradas servirá de orientação ao gestor público quanto a ocupação racional do espaço urbano de forma a reduzir os impactos nos sistemas de drenagem.

- A aplicação da modelagem chuva x vazão mostrou um aumento de mais de 60% em média das vazões escoadas quando a densidade habitacional (Dh) sai de 68 hab/ha para Dh=159 hab/ha;

- Os aumentos de vazão certamente levarão inundações nos bairros analisados visto que não estão preparados para receber tamanho incremento em volume escoado;

- A modelagem hidrológica via IPHS1 mostrou ser esta uma ferramenta promissora e bastante útil para previsão de vazão e para suporte a decisão no que tange a utilização do espaço urbano.

Agradecimentos

Os pesquisadores agradecem a Prefeitura Municipal de Aracaju, UFS, EMBRAPA, UFCG, ANA, DESO, SEMAR-SE, INMET.

Referências

ARACAJU, 2015. Prefeitura Municipal de Aracaju. Sergipe. On-line. Disponível: <http://www.aracaju.se.gov.br>. Acesso em: 20 de junho de 2015.

Aragão, R., Santana, G.R., Costa, C.E.F.F., Cruz, M.A.S., Figueiredo, E.E., Srinivasan, V.S., 2013. Chuvas intensas para o estado de Sergipe com base em dados desagregados de chuva diária. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 17, 243-252.

Augustin, S., Rodrigues, I.N., Leonardelli, P.P., 2014. A influência da densidade populacional no desenvolvimento sustentável. In: Cunha, Belinda Pereira da; Augustin, Sérgio. (Org.). *Revista de direito brasileiro*. 1ed. EDUCS, Caxias do Sul, pp. 89-104.

BRASIL, 2001, Lei Nº 10.257, de 10 de julho de 2001.

Bird, S.L; Alberty, S.W.; Exum, L.R., 2001. Generating high quality impervious cover data. *Journal of Quality Assurance* 8, 91-103.

Brito, F.O., 2006. Deslocamento da população brasileira para as metrópoles. *Estudos Avançados* 20, 221-236.

Câmara, G., Souza, R.C.M., Freitas, U.M., GARRIDO, J., 1996. SPRING - Integrating remote sensing and GIS by object-oriented data modelling. *Computers & Graphics* 20, 395-403.

Campana, N., Tucci, C.E.M., 2001. Predicting floods from urban development scenarios: Case study of the Dilúvio basin, Porto Alegre, Brazil. In: *Urban Water*, Oxford, pp. 113-124.

Canholi, A.P., 2005. *Drenagem urbana e controle de enchentes*, 2 ed. Editora Oficina de Textos, São Paulo.

Centeno, J.A.S., Antunes, A.F.B., Trevisan, S., Correa, F., 2003. Mapeamento de áreas permeáveis usando uma metodologia orientada a regiões e imagens de alta resolução. *Revista Brasileira de Cartografia* 1, 48-56.

CE. Comissão Europeia., 2012. Orientações sobre as melhores práticas para limitar, atenuar ou

- compensar a impermeabilização dos solos. Bélgica: Ambiente.
- Cruz, M.A.S. Tucci, C.E.M., 2008. Avaliação dos Cenários de Planejamento da Drenagem Urbana. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos* 13, 59-71.
- Cruz, M.A.S.; Tucci, C.E.M., 2007. Otimização das obras de controle de cheias em uma bacia urbana. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos* 12, 63-80.
- DIGITALGLOBE., 2015. Digital Globe: an imagery and information company. Disponível: <http://www.digitalglobe.com>. Acesso em: 12 de outubro de 2015.
- Esteves, R.L., 2006. Quantificação das superfícies impermeáveis em áreas urbanas por meio de sensoriamento remoto. Dissertação (Mestrado). Brasília, UNB.
- Fagundes, L., 2002. Elaboração de índice ambiental urbano através da análise de densidade populacional e superfície impermeável em bacias hidrográficas. Dissertação (Mestrado). Faculdade de arquitetura e urbanismo. Porto Alegre, UFRGS..
- França, S.L.A.; Resende, V.L.F., 2015. Políticas públicas e a oferta habitacional na Zona de Expansão Urbana de Aracaju. Disponível em: <http://www.academia.edu/2140060/Politicasp_publicas_ea_oferta_habitacional_na_Zona_de_Expansão_Urbana_de_Aracaju>. Acesso em 15 de outubro de 2015.
- Fonseca, V. et al., 2011. Mapeamento socioambiental como ferramenta para análise das relações espaciais: Os bairros de Aracaju. *Revista Geonordeste*, ano XXII, n.1. 147-179
- Garotti, L.M., Barbassa, A.P., 2010. Estimativa de área impermeabilizada diretamente conectada e sua utilização como coeficiente de escoamento superficial. *Engenharia Sanitária Ambiental* 15, 19-28.
- IBGE. Instituto Brasileiro de geografia e Estatística - Sinopse do censo demográfico 2010. Estimativas/Contagem da População, 2010. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/censo2010/default_sinopse.shtm>. Acesso em 20 de maio de 2016.
- INPE. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Divisão de Processamento de Imagem – DPI. 2012. Disponível em: <http://www.dpi.inpe.br/spring>. Acesso em 25 de junho de 2012.
- Jensen, J R., 2011. Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres, 1 Ed. Parêntese. São José dos Campos.
- JHA, A.K., Bloch, R., Lamond J., 2012. Cidades e Inundações – Um guia para a Gestão Integrada do Risco de Inundação Urbana para o Século XXI. 1. ed. GFDRR, São Paulo.
- McCuen, R.H., 1998. Hydrologic analysis and design. 2.ed. Prentice Hall. New Jersey.
- MCT/CGE. Ministério de Ciência e Tecnologia/Centro de Estudos e Gestão Estratégica, 2002. Brasília Disponível: <http://www.ana.gov.br>. Acesso: 30 set. 2015.
- Menezes Filho, F.C.M., Tucci, C.E.M. Alteração na relação entre densidade habitacional x área impermeável: Porto Alegre - RS., 2012. *REGA. Revista de Gestão de Águas da América Latina* 9, 49-55.
- Novo, E.M.L.M., 2010. Sensoriamento remoto: princípios e aplicações. 4. ed. rev. Ed. Blucher. São Paulo.
- Neves, M.G.F.P., Tucci, C.E.M., 2011. Composição de resíduos de varrição e resíduos carreados pela rede de drenagem, em uma bacia hidrográfica urbana. *Revista de Engenharia Sanitária Ambiental* 16, 331-336.
- Pinheiro, R.C.S., 2013. Revitalização urbana e turismo: o caso do Centro Histórico de Aracaju, Monografia (Trabalho de conclusão de curso) – DCS. Universidade Federal de Sergipe, Sergipe.
- Pereira, F.L. et al. 2005. Política de drenagem urbana no Brasil. São Paulo: Escola Politécnica da USP.
- Philippi, A., 2005. Saneamento, saúde e ambiente: fundamentos para um desenvolvimento sustentável. 1 ed, Editora Manole, Barueri.
- Reis, J.T., Filho, W.P., Silveira, A.L.L., 2011. Estimativa entre densidade habitacional e áreas impermeáveis na região urbana da sub-bacia hidrográfica do arroio Cadena em Santa Maria, RS. *Ciência e Natura* 33, 145-160.
- Reis, V., Gois, D., Barbosa, E., Souza, H.T., Souza, R.M., 2012. Fitoindicação como método comparador de avaliação de mudanças ambientais em remanescentes florestas e áreas urbanas de Sergipe. *Sociedade & Natureza* 24, 535-544.
- Silva, T.C. et al., 2008. Diagnóstico e hierarquização de problemas de drenagem urbana da zona costeira sul do estado da Paraíba. *Revista de Engenharia Sanitária e Ambiental* 13, 144-152.
- Silva, W.P., Silva, C.M.D.P.S., Cavalcanti, C.G.B., 2004. Lab-fit ajuste de curvas: Um

- software em português para tratamento de dados experimentais. *Revista Brasileira de Ensino de Física* 26, 419-427.
- Souza, C.F., Cruz, M.A., Tucci, C.E.M., 2012. Desenvolvimento urbano de baixo impacto: planejamento e tecnologias verdes para a sustentabilidade das águas urbanas. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos* 17, 9-18.
- Tucci, C.E.M., 1993. (Org.). *Hidrologia, Ciência e Aplicação*; Editora da UFRGS; ABRH.
- Tucci, C.E.M., 2000. Coeficiente de Escoamento e vazão máxima de bacias urbanas. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos* 5, 61-68.
- Tucci, C.E.M., 2007. *Inundações urbanas*. 1 ed. ABRH/RHAMA. Coleção ABRH, Porto Alegre.
- Viegas Filho, J.S.; Tucci, C.E.M.; Villanueva, A.; Conceição, A.R. IPHS1, 2003. - Sistema de Transformação Precipitação Vazão - versão Windows 2.08.
- World Bank Integrated Urban Water Management Project. 2011. Estratégias para gestão integrada de águas urbanas Aracaju. Versão consolidada 1.0. Aracaju.