

## VARIABILIDADE E CAUSAS NA GERAÇÃO DE VAZÃO EM BACIAS URBANAS: ESTUDO DE CASO DO RIACHO DO SAPO, MACEIÓ-AL

### VARIABILITY AND CAUSES TO FLOW GENERATION IN URBAN BASINS: CASE STUDY OF SAPO CREEK, MACEIÓ-AL

**Altair Maciel de Barros**

Mestre em Recursos Hídricos e Saneamento Universidade Federal de Alagoas. ([altairmaciel@gmail.com](mailto:altairmaciel@gmail.com))

**Marllus Gustavo Ferreira Passos das Neves**

Doutor em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Universidade Federal de Alagoas. ([marllus.neves@ctec.ufal.br](mailto:marllus.neves@ctec.ufal.br))

**Diogo Carlos Henrique**

Mestre em Recursos Hídricos e Saneamento, Universidade Federal de Alagoas. ([diogo.chenrique@hotmail.com](mailto:diogo.chenrique@hotmail.com))

#### Resumo

Este artigo mostra como a oscilação das características físicas e da distribuição do uso e ocupação do solo influencia na variabilidade da magnitude da alteração da geração de escoamento em áreas urbanas. Em uma bacia hidrográfica da cidade de Maceió-AL (2,1 km<sup>2</sup>), foram definidos dois cenários, a partir de imagens históricas (setembro de 2002 e novembro de 2010), e observados, detalhadamente, o uso e a ocupação do solo nas 18 sub-bacias nas quais a bacia foi dividida. Foram avaliadas, de forma distribuída, as mudanças da fração de área impermeável e do parâmetro *Curve Number* (CN) do método do *Soil Conservation Service* (SCS) e, depois, a partir de simulação hidrológica, do percentual do volume escoado e da vazão de pico. A partir dos resultados, foi possível concluir que o uso de um modelo concentrado de forma distribuída por sub-bacias, aliado a um conhecimento detalhado da mesma e de imagens históricas evidenciam as magnitudes da alteração das variáveis envolvidas e apontam características físicas e os prováveis causadores dessa mudança.

**Palavras-chave:** impermeabilização, simulação hidrológica, SWMM.

#### Abstract

This paper shows how the variability of the physical characteristics and the distribution of land use and occupation influence the variability of the magnitude of change in the generation of runoff in urban areas. In a urban catchment of Maceió-AL (2.1 km<sup>2</sup>), two scenarios were defined from historical images (September 2002 and November 2010), observed in detail the land use and land cover in 18 subcatchments in which the basin was divided, It was evaluated in a distributed way the impervious area fraction and the Curve Number (CN) parameter of the Soil Conservation Service (SCS) method and after, from hydrologic simulation, the percentage of runoff volume and peak discharge. From the results it was concluded that the use of a concentrated model distributed by subcatchments, combined with a detailed knowledge of the subcatchments and historical images, shows the magnitude of the change of the variables involved and indicated by physical characteristics and probable causing this variation.

**Keywords:** imperviousness, hydrological simulation, SWMM.

#### 1. INTRODUÇÃO E FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Problemas com alagamentos nas áreas urbanas ocorrem a algum tempo no Brasil e estão vinculados à dinâmica de ocupação do espaço urbano brasileiro. Dessa forma, entender a variabilidade espacial e as

causas do escoamento em áreas urbanas auxiliam na gestão da drenagem das mesmas. Associar a gênese do escoamento superficial às diversas características físicas e de ocupação do solo permite pensar instrumentos que, a partir de aspectos de urbanismo, de parcelamento, de taxas de ocupação, entre outros, possam estabelecer critérios de

controle, como áreas de lotes, declividades, percentual de permeabilidade, entre outros.

Pesquisas sobre os impactos da urbanização se intensificaram na década de 1960, devido ao processo de expansão ao qual estavam submetidas as áreas urbanas de cidades nos Estados Unidos e na Europa desde o período pós-guerra. Nas últimas três décadas, houve uma tendência de confirmar a teoria hidrológica convencional, segundo a qual o escoamento superficial aumenta como resultado da urbanização e é governado pela fração de área impermeabilizada. Jacobson (2011) fez um compêndio, a partir de uma extensa literatura, mostrando que numerosos fatores influenciam na geração de escoamento superficial e, ainda, que as vazões de pico em bacias urbanizadas são de 30% a 100% maiores que as vazões naturais.

Os métodos usados para identificar a presença e a magnitude dos impactos da urbanização diferem e incluem estudos sobre a evolução de tais efeitos ao longo do tempo, bacias similares com diferentes graus de urbanização, modelagem computacional para prever mudanças em bacias urbanas, bem como sínteses de resultados de outras pesquisas (JACOBSON, 2011). Nas últimas duas décadas, os estudos incluíram efeitos indiretos, como mudanças no tempo de deslocamento de hidrogramas, ou causas diversas, como o grau e a localização espacial da urbanização na área de interesse. Estima-se que o escoamento superficial direto pode não vir da bacia inteira, mas somente de uma porção dela (cerca de 5 a 10%, “drenagem parcial”), ou que pode existir um nível de urbanização abaixo do qual não há variações na resposta hidrológica. Neste último aspecto, há quem cite uma parcela de 20%, ou que o importante é saber quanto de área impermeável está diretamente conectada à rede de drenagem (JACOBSON, 2011).

O município de Maceió-AL está inserido nesse contexto e, como a maioria das capitais brasileiras, experimentou um processo rápido de urbanização associado a problemas nos sistemas de drenagem. A ocupação de grotas, a impermeabilização quase total dos lotes, loteamentos e também de equipamentos públicos, entre outros, marcam o padrão de urbanização adotado na cidade. No entanto, aparece o questionamento do quão significativo é o impacto na geração de escoamento desses empreendimentos, o que pode ser investigado por meio de imagens históricas sobre o uso e ocupação

do solo, disponíveis gratuitamente, e de visitas a campo.

Dessa forma, neste artigo, são investigadas as causas da variação na geração do escoamento superficial em uma bacia urbana da cidade de Maceió, por meio de dois cenários diferentes, construídos a partir de imagens históricas disponíveis no aplicativo *Google Earth*, com intervalo de oito anos e com modelagem chuva-vazão, por meio do programa computacional *Storm Water Management Model* (SWMM). Busca-se mostrar quais as tipologias de uso e ocupação do solo, implantadas entre os dois cenários, que alteram de forma evidente a geração de vazão.

## 2.METODOLOGIA

### 2.1 Descrição da área em estudo

A área de estudo é a bacia hidrográfica do riacho do Sapo, afluente do rio Reginaldo, conforme Figura 1. A bacia tem área de 2,1 km<sup>2</sup> e está localizada, em sua maior parte, na região plana e costeira do município, mas também em regiões planas e elevadas de tabuleiro e, ainda, em uma área de transição localizada entre as duas formações anteriores, com encostas íngremes com desnível total superior a 60 m (PEPLAU, 2013). O riacho do Sapo, canalizado, nasce na área conhecida como Grotta do Cigano. Seu percurso tem 4,4 km e drena áreas em quatro bairros (Jacintinho, Mangabeiras, Jatiúca e Poço).

### 2.2 Passos da metodologia

A metodologia teve os passos seguintes: (a) caracterização física dos tipos de solo da bacia, (b) definição do parâmetro CN das sub-bacias e (c) dos demais parâmetros do modelo SWMM, (d) avaliação da modificação no uso e cobertura do solo e seu efeito no CN e definição das chuvas de projeto, e (e) simulação hidrológica chuva-vazão e avaliação da mudança na geração do escoamento superficial.

Na caracterização física, utilizaram-se a base cartográfica oficial do município (MACEIÓ, 1999), na escala 1:2.000, e anotações e medições de campo. A partir da base citada, foram obtidas área de drenagem (A), largura característica (W) e declividade média (S), que também são parâmetros do modelo SWMM. Já por meio das anotações de campo, foram identificadas galerias de aporte ao

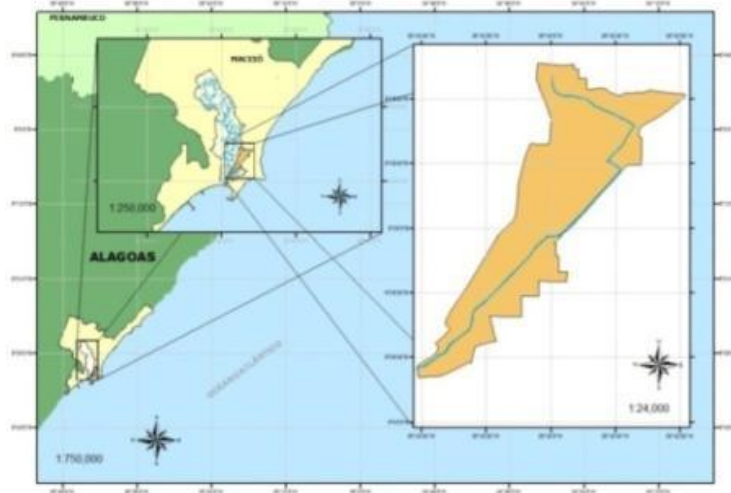
longo do canal (riacho do Sapo), para delimitar a bacia do riacho do Sapo e discretizá-la em 18 sub-bacias, conforme Figura 2.

Quanto à classificação dos grupos hidrológicos do solo presentes na bacia, foi utilizado o levantamento detalhado dos solos de Maceió (EMBRAPA, 2005). Em seguida, realizou-se o enquadramento dos solos segundo o método do *Soil Conservation Service* (SCS), através de seu manual

TR-55 (USDA, 1986). Desta forma, foi considerado que o solo com textura arenosa, encontrado na parte mais plana da bacia, pertence à classe hidrológica A, enquanto o solo de textura média/argilosa, encontrado próximo à cabeceira e áreas altas, pertence à classe hidrológica de solo C, conforme Figura 2.

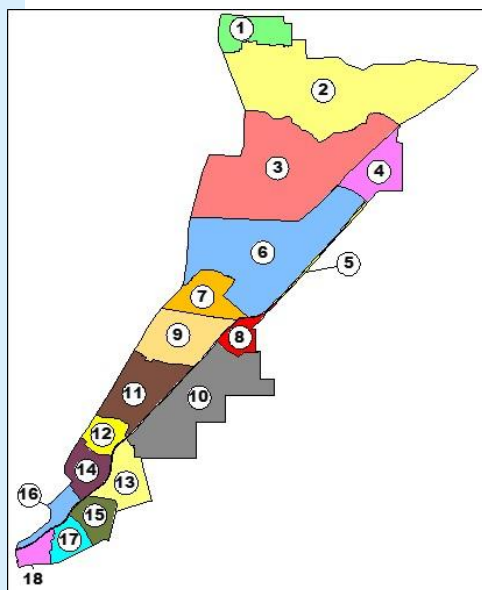
Os demais passos da metodologia são detalhados em seguida.

**Figura 1. Localização da bacia do riacho do Sapo no município e na bacia do rio Reginaldo**

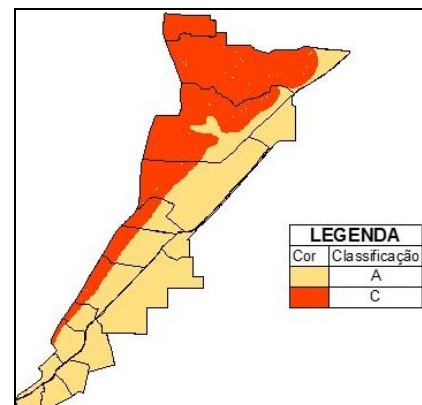


Fonte: PEPLAU, 2013.

**Figura 2. Discretização da bacia e classificação dos solos segundo grupos hidrológicos do SCS**



Sub-bacia	Área (ha)
1	6,3
2	41,6
3	39,2
4	7,2
5	0,6
6	32,1
7	7,0
8	3,3
9	10,7
10	22,3
11	10,8
12	3,7
13	6,7
14	5,1
15	4,3
16	2,8
17	3,7
18	2,5



Fonte: BARROS, 2013.

### 2.3. Caracterização do uso e cobertura do solo da bacia

Para esta etapa, foram utilizadas imagens históricas da bacia, obtidas por meio do satélite *Quickbird*, para dois cenários correspondentes às datas de setembro/2002 e novembro/2010, disponibilizadas pelo programa *Google Earth*. Utilizou-se também a ferramenta *Street View* do *Google Earth*, capaz de proporcionar uma visualização panorâmica (360° na horizontal e 290° na vertical) de grande parte da bacia por meio de fotografias capturadas no nível do solo, em novembro de 2011, pela Google Inc.. As imagens do satélite apresentam resolução em torno de 1 m, suficiente para visualizar e diferenciar as categorias de uso e cobertura do solo. Este fato, associado às visitas em toda a bacia possibilitaram a realização da classificação a partir da interpretação visual das imagens. Ao final do mapeamento, foi possível obter a área total correspondente a cada categoria de uso e cobertura do solo na bacia e em cada sub-bacia. Para os dois cenários diferentes (2002 e 2010), o uso do solo foi determinado, de modo a gerar parâmetros para o modelo SWMM.

### 2.4. Definição do parâmetro CN das sub-bacias

O modelo SCS requer o parâmetro de infiltração *Curve Number* (CN), determinado por outros três condicionantes: o uso e cobertura do solo, o grupo hidrológico do solo e a condição de umidade antecedente do solo. Outros parâmetros do SWMM influenciam tanto na geração do escoamento quanto em sua propagação através da bacia, todavia, pretendeu-se entender como a alteração no mecanismo de infiltração impacta na gênese do processo de escoamento. Foi feita, então, a determinação do valor médio do CN para cada sub-bacia, sendo consideradas onze categorias de uso e cobertura do solo (BARROS, 2012), os grupos hidrológicos de solo e a condição média de umidade antecedente do solo. Como nem todas as categorias de uso do solo propostas pelo método do SCS são replicáveis de imediato na bacia, algumas categorias foram condensadas e outras foram suprimidas. Para as categorias condensadas, o valor do novo CN foi calculado segundo a média aritmética dos CN que as compõem. O CN de cada sub-bacia foi calculado através da média ponderada do CN de cada

categoria de uso e cobertura do solo associada ao grupo hidrológico do solo.

### 2.5. Definição dos demais parâmetros do modelo SWMM

O modelo SWMM simula a propagação da precipitação efetiva através do método do reservatório não linear, tendo como parâmetros: área de drenagem (A), largura característica (W), declividade média (S), percentual de impermeabilidade (AI), coeficiente de rugosidade de *Manning* para área permeável ( $n_i$ ) e para área impermeável ( $n_p$ ), profundidade do armazenamento em depressão para área permeável ( $d_p$ ) e para área impermeável ( $d_i$ ), e percentual da área impermeável sem armazenamento em depressão ( $AI_{s/a}$ ).

Em se tratando de calibração, alguns estudos citam os parâmetros W e AI como os mais sensíveis em áreas bem urbanizadas (GARCIA; PAIVA, 2006; BASTOS, 2007; COLLODEL, 2009, PEPLAU, 2013). Peplau (2013) calibrou o SWMM para a bacia em tela, com dados de monitoramento do ano de 2012. No entanto, este artigo utiliza parâmetros estimados com base nas características da bacia por dois motivos: (1) não há como calibrar parâmetros para o cenário de 2002, pois não havia monitoramento na época; (2) para que as condições de comparação sejam plausíveis, a metodologia utilizada para estimar os parâmetros em um cenário foi a mesma para o outro cenário, quando assim foi necessário.

Voltando à questão da estimação dos parâmetros, o parâmetro W foi obtido para cada sub-bacia, baseando-se no cálculo do retângulo equivalente (VILLELA; MATTOS, 1978). Levou-se em conta que W não sofreu alterações significativas entre os cenários, o que significa que a topografia foi considerada constante entre os dois cenários ou, ainda, que não afetou de forma significativa a declividade média, a área, o perímetro e outras condições físicas. Assim, a variabilidade estudada neste artigo observa as condições espaciais entre sub-bacias e não no interior delas.

O parâmetro percentual de impermeabilidade no SWMM representa a parcela de área impermeabilizada diretamente conectada (AIDC). É possível estimá-lo por uma aproximação conservadora, utilizando os coeficientes de *runoff* do método racional (C) como valor do percentual de impermeabilidade (GIRONÁS *et al.*, 2009). Garotti e Barbassa (2010), em estudo desenvolvido na cidade

de Ribeirão Preto – SP, mostraram, em um processo inverso a este, que a AIDC pode ser utilizada para estimar o coeficiente C de bacias hidrográficas, quando C é obtido detalhadamente observando superfícies específicas. Nada disso, entretanto, substitui medidas em campo e/ou através de fotografias que permitam sua identificação, caso sejam possíveis.

Dessa forma, o coeficiente C das áreas impermeáveis, para cada sub-bacia, foi determinado da seguinte forma: (a) caracterização do uso e cobertura do solo da bacia conforme descrito anteriormente; (b) adoção de um coeficiente C para cada categoria de uso e cobertura do solo, utilizando os valores médios fornecidos pela ASCE (1960); e (c) cálculo do percentual de impermeabilização através da média ponderada dos coeficientes C de todas as categorias de uso e cobertura do solo.

As categorias classificadas como permeáveis foram consideradas como apresentando coeficiente C nulo. Mesmo que a categoria “ruas de terra” não apresente cobertura pavimentada, foi considerado que o solo se apresenta bastante compactado, contribuindo, assim, para o escoamento em área impermeável.

Os coeficientes de rugosidade (para superfícies permeáveis e impermeáveis) no SWMM refletem a resistência que o escoamento superficial encontra ao se propagar através da superfície. Tais coeficientes são necessários, pois o SWMM utiliza a equação de *Manning* na propagação da precipitação efetiva. As etapas envolvidas na determinação do coeficiente de rugosidade médio de cada sub-bacia foram as seguintes: (a) caracterização do uso e cobertura do solo da bacia conforme descrito anteriormente; (b) adoção de um coeficiente de rugosidade para cada categoria de uso e cobertura do solo, utilizando valores médios fornecidos por Matos (1987 *apud* MARTINS, 2000); (c) classificação das categorias de uso e cobertura do solo em superfícies permeáveis e impermeáveis, considerando permeáveis somente as categorias “bosques ou zonas florestais”, “espaços abertos e relvados” e “pastagens ou terrenos em más condições”; (d) cálculo do coeficiente de rugosidade médio para a superfície permeável da sub-bacia, através da média ponderada dos valores de coeficiente de rugosidade de todas as categorias de uso e cobertura do solo classificadas como permeável; e (e) proceder de maneira análoga ao item anterior para o caso de áreas impermeáveis.

Quanto aos parâmetros profundidades de armazenamento do SWMM, estes foram estimados segundo as seguintes metodologias:

- Profundidade do armazenamento em depressão para superfície permeável: foram considerados os valores de profundidade de armazenamento de 5,1 mm para os solos do grupo hidrológico A do SCS, e 2,5 mm para os solos do grupo hidrológico C presentes na bacia do riacho do Sapo (HICKS, 1944 *apud* HUBER; DICKINSON, 1992). Quando necessário, foi calculada uma média ponderada para determinar a profundidade média do armazenamento em depressão para a sub-bacia;
- Profundidade do armazenamento em depressão para superfície impermeável: foi empregada uma equação (1) que relaciona a profundidade do armazenamento em superfícies impermeáveis e a declividade média da sub-bacia (KIDD, 1978 *apud* HUBER; DICKINSON, 1992):

$$d_{pi} = 0,0303 S^{-0,49} \quad (1)$$

onde  $d_{pi}$  (pol) é a profundidade do armazenamento em superfícies impermeáveis e S (%) é a declividade média da sub-bacia.

Para o parâmetro área impermeável sem armazenamento em depressão, foi empregado o percentual de 25%, conforme recomendado por Gironás *et al.* (2009), para casos em que não há informações suficientes.

## 2.6. Avaliação da modificação no uso e cobertura do solo e seu efeito no CN e definição das chuvas de projeto

Foi realizada uma análise detalhada, por sub-bacia, referente à modificação do uso e cobertura do solo e seu efeito no parâmetro CN, seguida de simulação hidrológica. A análise busca antever os efeitos (antes da simulação), tendo em vista o foco anteriormente citado nos processos de infiltração. A simulação, por sua vez, aglutina outros processos na superfície da bacia, na propagação da chuva efetiva.

Para elaboração da chuva de projeto, foi utilizada a curva IDF de Maceió (PFAFSTETTER, 1982) com os tempos de retorno (TR) de 5, 10 e 25 anos, visto que os dois primeiros são empregados em projetos de microdrenagem, e o terceiro

representa um TR intermediário entre projetos de micro e macrodrenagem (pouco observado na bacia). A duração da chuva foi estabelecida em 85 min, adotada a partir da estimativa do tempo de concentração para a bacia do riacho do Sapo (VIDAL, 2012), e a distribuição temporal da chuva de projeto foi obtida utilizando o método dos blocos alternados (BUREAU OF RECLAMATION, 1997).

### 2.7. Simulação hidrológica chuva-vazão e avaliação da mudança na geração do escoamento superficial

Nesta etapa do trabalho, foram gerados os hidrogramas para cada sub-bacia, para os dois cenários de urbanização, através de simulação hidrológica no SWMM. Todo processo chuva-vazão foi simulado isoladamente para cada uma delas, sendo o processo de infiltração baseado no CN do método do SCS. Criaram-se três hietogramas de projeto, elaborados com TR e duração já citados, e discretização temporal de 5 minutos. Com 18 sub-bacias e três hietogramas de projeto, foram obtidos 54 hidrogramas para cada cenário estudado e, em seguida, realizaram-se as análises detalhadas da modificação na geração de vazão, vinculando-as à análise anterior de mudança no uso do solo e no parâmetro CN.

Por fim, observou-se o efeito dos dois cenários de ocupação, nas 18 sub-bacias, e para três TRs na vazão de pico dos hidrogramas e na porcentagem de volume escoado (em relação ao precipitado). Primeiramente, evidenciou-se a relação entre a fração de área impermeável e o CN; depois, a relação entre CN e a vazão de pico e CN e o percentual de volume escoado. Por último, procedeu-se à análise de algumas sub-bacias, a qual justifica os resultados.

## 3.RESULTADOS, ANÁLISE E DISCUSSÃO

### 3.1. Modificação no uso e cobertura do solo

Conforme Figura 3, é possível observar semelhanças entre os cenários no tocante à predominância nas categorias responsáveis por uma grande impermeabilização da superfície. Em números, no ano de 2002, a superfície impermeabilizada correspondeu a 69% da área total da bacia, enquanto que, em 2010, essa porcentagem subiu para 77%, um aumento médio de 1% ao ano

em toda bacia do riacho do Sapo, ou, ainda, 21 ha/ano.

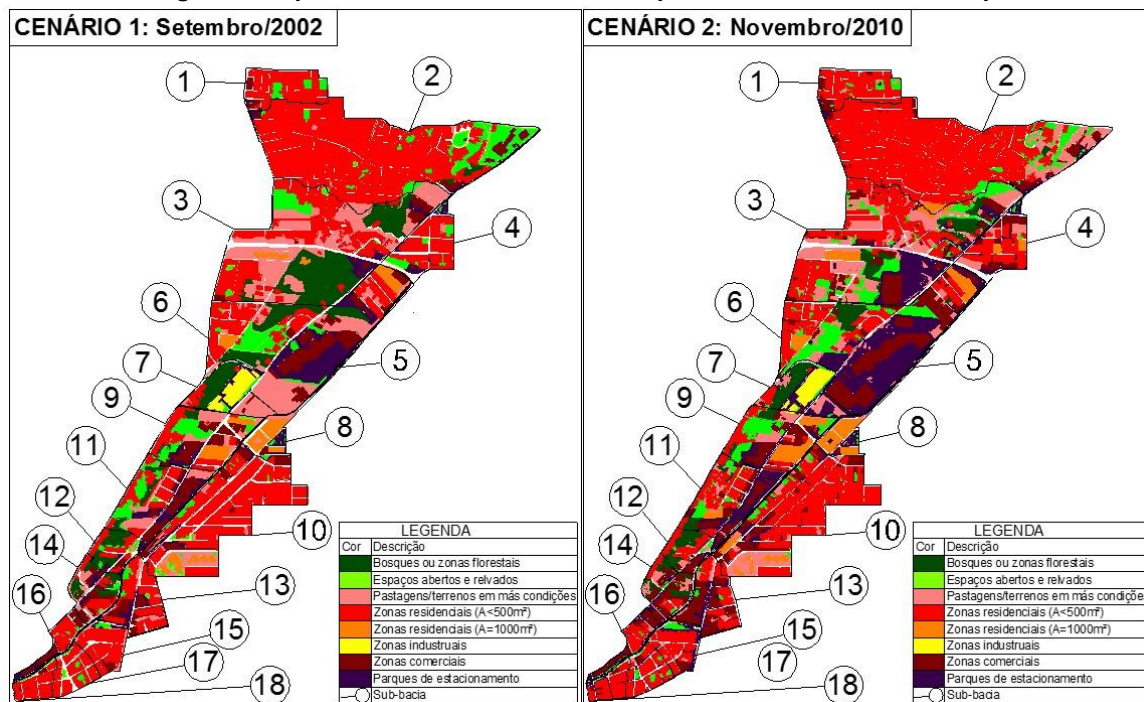
Conforme Figura 4, observa-se que, nos dois cenários, a parcela mais representativa corresponde à zona residencial com lotes inferiores a 500 m<sup>2</sup>, que ocupava 39% da área total da bacia em 2002 e 35% em 2010. Este tipo de ocupação está bem distribuído por toda a bacia, conforme Figura 3, com presença maior na região próxima ao exutório da bacia devido, principalmente, à topografia plana que propicia a ocupação, e na cabeceira da bacia, com ocupação característica de grotas. Nesta região, conhecida como Grota do Cigano (sub-bacias 1 e 2), a ocupação por residências com lotes inferiores a 500 m<sup>2</sup> representa cerca de 15% da área total da bacia, praticamente inalterada entre os dois cenários.

Pode-se ver também na Figura 4 que os aumentos mais acentuados ocorreram nas categorias de zonas comerciais e parques de estacionamento, e que quase duplicaram os seus percentuais. Isto ocorreu em conexão com a grande diminuição das categorias que não representam, *a priori*, impermeabilização e, em alguns casos, com redução do percentual de menos da metade. No período, houve construção e ampliação de grandes estabelecimentos comerciais que substituíram superfícies antes permeáveis por coberturas impermeáveis.

No âmbito das sub-bacias, observa-se que estes fatos ocorreram de forma mais acentuada em duas delas, 3 e 6. Na sub-bacia 3, houve um aumento de 16% na parcela correspondente às áreas impermeáveis, principalmente nas parcelas de zonas comerciais e de parques de estacionamento, enquanto que as superfícies permeáveis foram reduzidas a apenas 1/3 de sua parcela inicial. Como exemplo, a construção de um empreendimento comercial com área total de 4,50 ha retirou uma cobertura vegetal densa que havia em 2002.

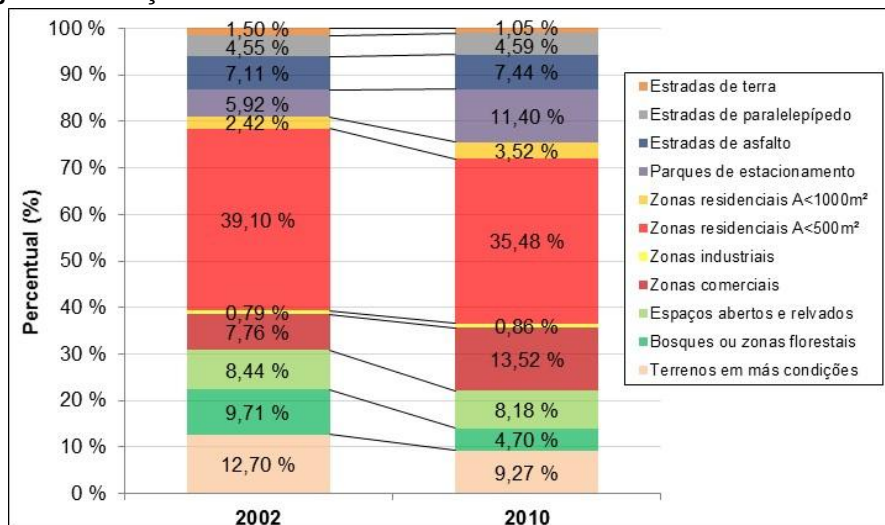
A sub-bacia 6 apresentou uma alteração ainda maior, com aumento em seu percentual de superfícies impermeáveis atingindo 19% entre 2002 e 2010, o maior observado entre as sub-bacias. Nesse período, houve: (a) ampliação de um *shopping center* que, em 2002, apresentava uma área de 7,60 ha e, em 2010, passou a ocupar uma área total de 11,40 ha, recobrando com pavimento asfáltico e telhados um terreno com cobertura vegetal; e (b) construção de outro estabelecimento comercial com 1,60 ha, com padrão de ocupação semelhante ao *shopping center*.

Figura 3. Mapas do uso e cobertura do solo para a bacia do riacho do Sapo



Fonte: os Autores.

Figura 4. Alteração no uso e cobertura do solo na bacia entre os anos de 2002 e 2010



Fonte: os Autores.

Conforme Figura 5, além das sub-bacias 3 e 6, as sub-bacias 7, 8 e 11 também apresentaram aumentos notáveis no percentual de áreas impermeáveis. No caso das sub-bacias 7 e 8, que possuem áreas pequenas, a construção de estacionamentos sobre áreas permeáveis provocou mudanças em seus percentuais de área impermeável de 13% e 10%, respectivamente. Já na sub-bacia 11, o percentual foi menor, totalizando um aumento de 10%. As demais sub-bacias apresentaram variações

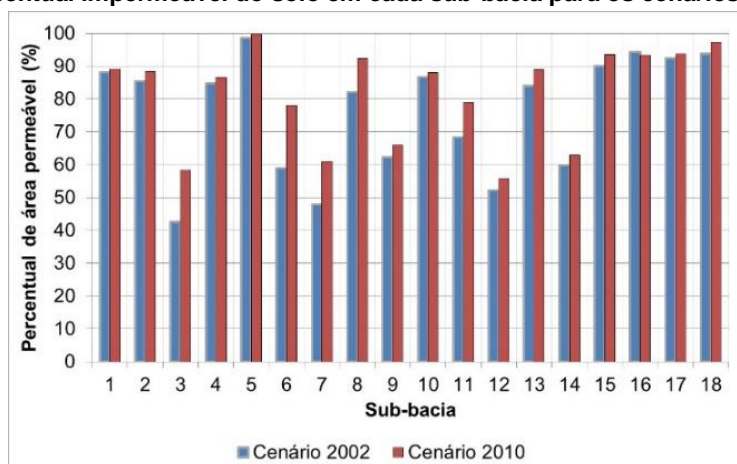
percentuais de impermeabilização do solo inferiores a 5%, entre 2002 e 2010, pois a maioria já apresentava um alto grau de impermeabilização em 2002.

É importante citar ainda o caso da sub-bacia 5. Ela apresenta o maior percentual de impermeabilização de toda bacia, pois abrange uma pequena área (<1 ha) que drena apenas o volume de água gerado num trecho de uma avenida asfaltada. Outra observação diz respeito a uma estreita faixa

localizada na região central da bacia que segue desde a metade da sub-bacia 3 até o final da sub-bacia 14. Esta região concentra uma extensa área com categorias permeáveis, principalmente no cenário de 2002, pois está localizada na escarpa de transição da planície costeira para o tabuleiro, no município de Maceió, apresentando terreno

acidentado com altas declividades, o que dificulta, em parte, a ocupação urbana. As sub-bacias ao longo desta faixa (3, 6, 7, 9, 11, 12, 14) apresentam um parcelamento do solo com cobertura permeável e impermeável mais equiparado, sendo também as sub-bacias com o menor percentual de área impermeável da bacia.

Figura 5. Percentual impermeável do solo em cada sub-bacia para os cenários de 2002 e 2010



Fonte: os Autores.

### 3.2. Modificação do fator Curve Number na bacia

Conforme Figura 6, as 18 sub-bacias revelam valores elevados de CN nos dois cenários, e a variação dos valores de CN refletem a variação da fração da área impermeável. Mesmo que algumas sub-bacias tenham sofrido aumento significativo em suas parcelas urbanizadas (fato denotado pelo aumento da mediana), outras sub-bacias que já exibiam pequeno percentual de urbanização em 2002 apresentaram pouco acréscimo, principalmente as localizadas na região de transição entre a planície costeira e o tabuleiro, contribuindo, assim, para a “manutenção” do valor do primeiro quartil. O valor extremo de 97,34, em 2002, refere-se ao CN da sub-bacia 5. A variação do valor de CN pode ser vista na Figura 7, na qual se verifica que as sub-bacias que apresentaram maior alteração no valor do CN foram as mesmas que sofreram maior alteração no percentual de área impermeável (3, 6, 7, 8 e 11).

Interessante observar que as sub-bacias 4, 13 e 18 tiveram percentuais pequenos de alteração na impermeabilização do solo, inferiores a 5%, mas apresentaram acréscimos no valor do CN da mesma ordem da sub-bacia 11, que sofreu aumento de 10% na impermeabilização. As sub-bacias 4, 13 e 18 abrangem uma região de solo arenoso, enquanto

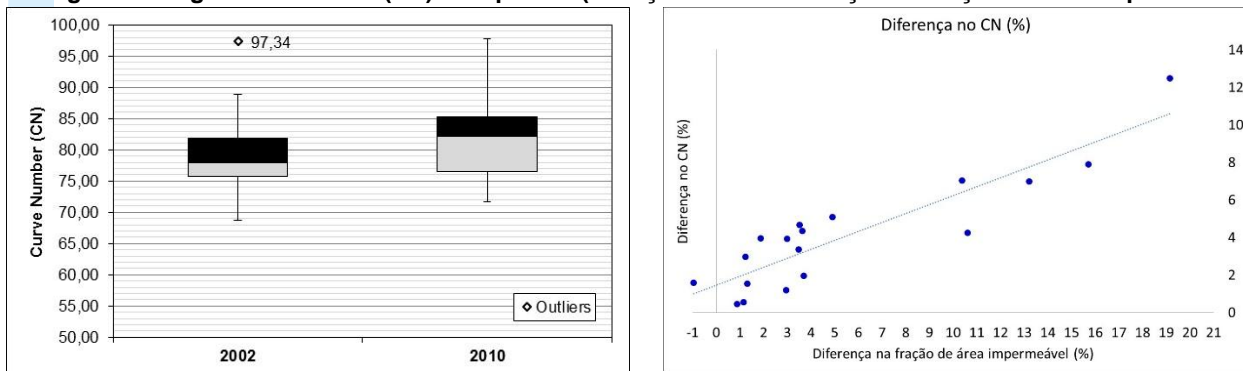
que na sub-bacia 11 a impermeabilização ocorreu sobre solos argilosos, ou seja, a impermeabilização da superfície em regiões com solo arenoso provocou modificações mais notáveis no valor CN do que em regiões com solo argiloso. Sob a ótica da gestão da drenagem urbana, pode ser possível adotar restrições menores de ocupação em áreas que naturalmente são mais impermeáveis.

### 3.3. Geração de vazão nas sub-bacias

Conforme Figura 8, tanto a variação do percentual de volume escoado quanto a vazão de pico possuem uma relação estreita com a variação do CN. A análise por sub-bacias pode ser feita observando a Figura 9, na qual há somente um TR porque o comportamento foi similar. Nela, percebe-se o valor elevado apresentado pela sub-bacia 5, próximo a 98% nos dois cenários, por se tratar de uma faixa com asfalto, como já mencionado. Observam-se mais diferenças entre os cenários nos percentuais de volume escoado do que nas vazões de pico, pelo fato de as sub-bacias 3, 7, 9, 12 e 14, no ano de 2002, terem apresentado um baixo percentual de volume escoado. Estas são sub-bacias localizadas em regiões de encosta, com menor ocupação e maior parcela de permeabilidade do solo.

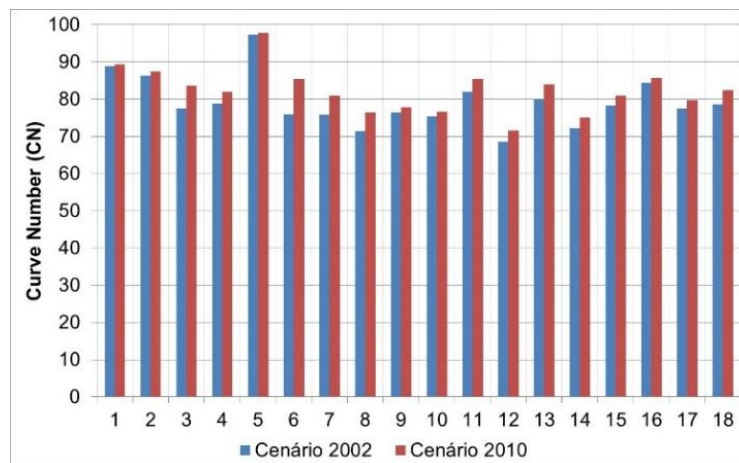


Figura 6. Diagramas de caixa (CN) e dispersão (variação do CN x variação da fração de área impermeável)



Fonte: os Autores.

Figura 7. CN da bacia do riacho do Sapó e de suas sub-bacias para os anos de 2002 e 2010



Fonte: os Autores

Espera-se que quanto maior o CN, maior o percentual de volume escoado. Todavia, exceção ocorreu para as sub-bacias 8 e 9. A primeira sub-bacia apresenta um CN inferior à segunda, mas seu percentual de volume escoado é maior, pois o parâmetro percentual de impermeabilidade da sub-bacia 8 é cerca de 9% superior ao da sub-bacia 9, no cenário 2002, e 14% no cenário 2010. O mesmo foi observado entre as sub-bacias 9 e 10: a sub-bacia 10 apresenta um CN inferior nos dois cenários, mas seu percentual de impermeabilidade é 16% maior no cenário 2002, e 15% no cenário 2010, ocasionando, assim, uma perda por armazenamento inferior e, consequentemente, um maior volume escoado.

Desta forma, é possível notar que, apesar do CN remeter ao processo de infiltração, tal fenômeno não está exclusivamente associado a tal parâmetro. É interessante notar, ainda, que as sub-bacias que apresentaram maior aumento no percentual do volume escoado foram as mesmas que sofreram os

maiores acréscimos nos percentuais de impermeabilização – sub-bacias 6, 3, 7 e 8, com aumentos percentuais de 19,5%, 16,5%, 12,2% e 9,0%, respectivamente. De fato, o aumento no percentual de superfícies impermeáveis teve reflexo direto no aumento do parâmetro CN, ocasionando redução na infiltração e aumento na geração do volume escoado superficialmente. Diante disto, nota-se que o CN e o percentual de impermeabilidade, que pode ser interpretado como a parcela da área impermeabilizada diretamente conectada (AIDC), são os fatores relacionados ao uso e cobertura do solo e que apresentam grande influência na determinação do percentual de volume escoado.

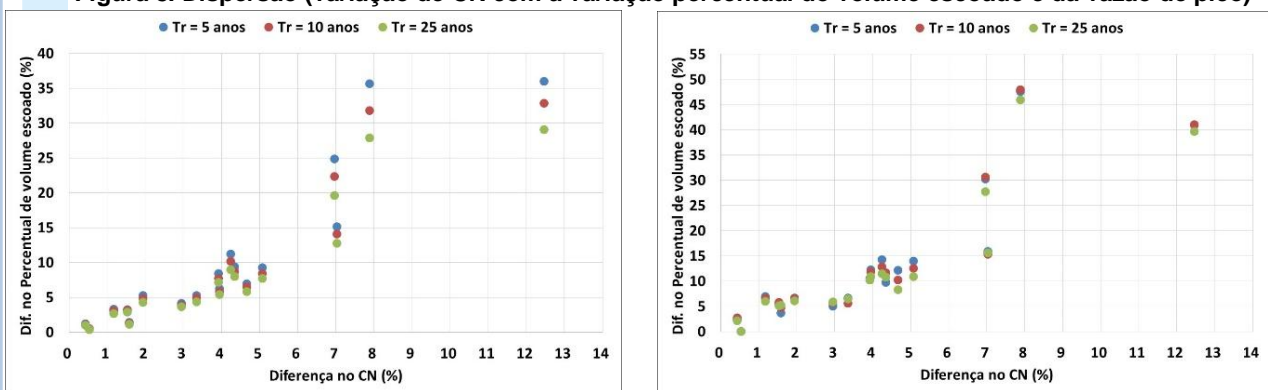
Em ambos os cenários, as sub-bacias 2, 3 e 6 apresentaram picos de vazão muito superiores às demais, conforme Figura 9. Elas possuem as maiores áreas de toda a bacia e apresentam largura característica elevada, configurando captação de altos volumes de precipitação e transferência rápida

para jusante. Verifica-se uma situação semelhante, mas um pouco inferior, nas sub-bacias 9, 10 e 11. Um fator comum a todas elas, com exceção da sub-bacia 10, é a declividade alta, pois se localizam na região de transição entre a planície costeira e o tabuleiro. A sub-bacia 10 tem o dobro da área das sub-bacias 9 e 11, mas sua vazão foi atenuada pela declividade pequena (cerca de 12 vezes inferior à sub-bacia 9, e 14 vezes inferior à sub-bacia 11).

Quanto à diferença percentual entre as vazões de pico, conforme a Figura 9 e a Figura 10, as sub-bacias 3, 6, 7 e 8 apresentaram as maiores

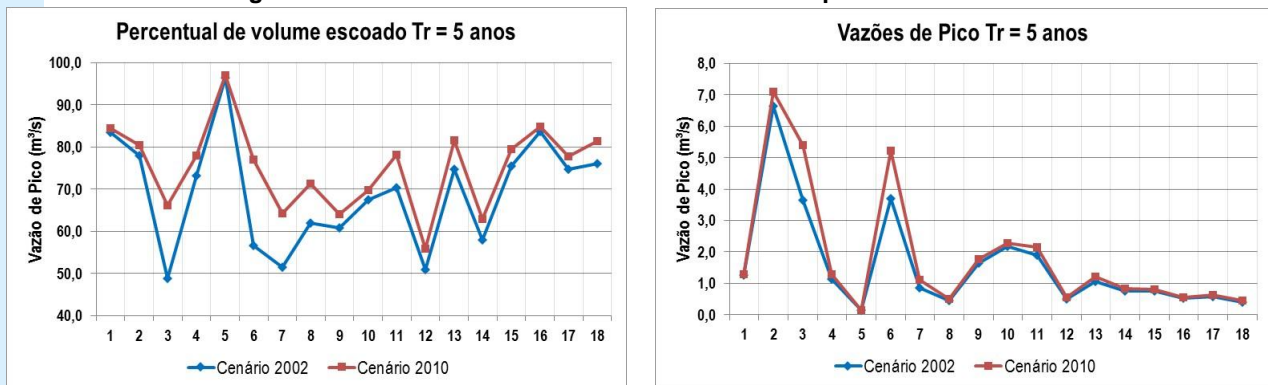
alterações. Elas foram as mesmas que sofreram os maiores aumentos percentuais de impermeabilização do solo. Entretanto, comparando os resultados obtidos, nota-se que, apesar da sub-bacia 6 ter apresentado percentual de impermeabilização superior à sub-bacia 3, os impactos na geração de escoamento foram maiores nesta do que na primeira. Isto se justifica pelo fato de esta sub-bacia apresentar maior declividade (cerca de 70% maior) e largura característica, tendendo a escoar mais rapidamente o volume gerado para jusante.

**Figura 8. Dispersão (variação de CN com a variação percentual do volume escoado e da vazão de pico)**



Fonte: os Autores.

**Figura 9. Percentual do volume escoado e vazão de pico nas sub-bacias**

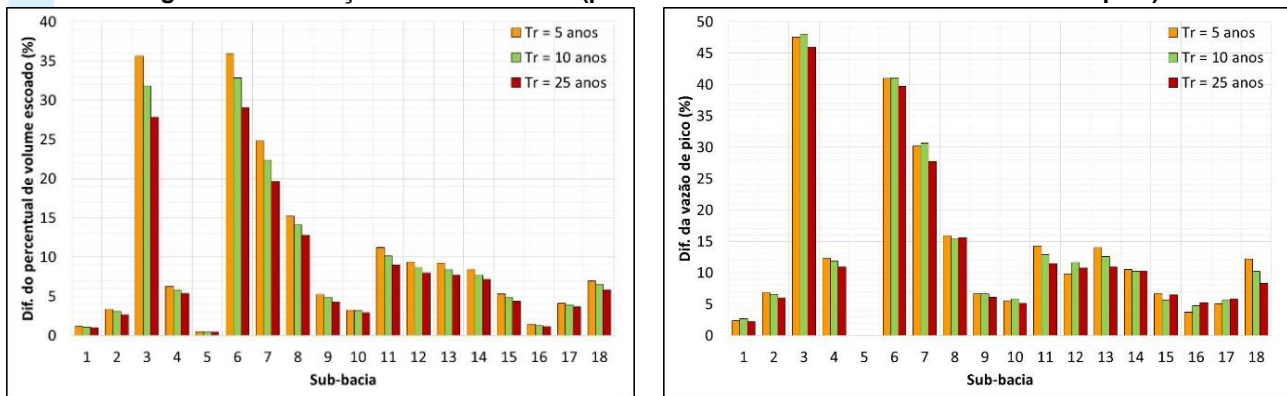


Fonte: os Autores.

No caso das sub-bacias 7 e 8, estas apresentaram percentuais de impermeabilização bem próximos (13% e 10%, respectivamente), mas, na sub-bacia 7, ocorreram aumentos percentuais nas vazões de pico de cerca de duas vezes maiores aos aumentos verificados na sub-bacia 8, conforme Figura 10, o que se justifica pelo fato de a sub-bacia 7 apresentar uma declividade média de 15,4%, 8 vezes superior à sub-bacia 8 (1,8%). Para as sub-bacias que não apresentam topografia acidentada,

sub-bacias 4, 8, 10, 13, 15, 16, 17 e 18, o CN foi determinante para o aumento percentual da vazão de pico, ou seja, a impermeabilização do solo é uma das causas do acréscimo na vazão de pico. Interessante observar que as sub-bacias 3, 6 e 7 localizam-se na região de maior expansão de empreendimentos comerciais, onde há a avenida principal. Estes empreendimentos costumam impermeabilizar bastante suas áreas, sobretudo no estacionamento com asfalto.

Figura 10. Diferença entre os cenários (percentuais do volume escoado e vazões de pico)



Fonte: os Autores.

#### 4. CONCLUSÃO

Este estudo ocorreu na bacia urbana do riacho do Sapo (Maceió-AL), uma bacia pequena e com impermeabilização do solo bem consolidada. Percebeu-se que aplicar um modelo concentrado de forma distribuída por sub-bacias, associado a uma classificação detalhada do uso e ocupação do solo, feita neste trabalho de forma manual a partir de imagens de satélite disponíveis no *Google Earth* e de visitas a campo, permite identificar não somente o que já se esperava, a saber, que o aumento da impermeabilização altera significativamente parâmetros hidrológicos de algoritmos de infiltração e, por conseguinte, a vazão de pico e o percentual de volume escoado, mas, também, que a topografia, através da declividade, e a opção pelo tipo de uso do solo implantando ao longo de alguns anos podem influenciar nos dois aspectos observados.

Nesse sentido, a divisão da bacia em 18 sub-bacias foi essencial para evidenciar a variabilidade e as causas conjuntas. Interessante foi a possibilidade de observar que as áreas nas quais a impermeabilização provocou mais variação no CN, na vazão de pico e no percentual de volume escoado, foram aquelas que se transformaram em locais com grandes empreendimentos comerciais com padrão de ocupação do solo semelhantes, com áreas da ordem de grandeza de 10 ha. Atualmente, há legislação em vigor em cidades brasileiras que limitam o escoamento superficial, tendo como base o tamanho do lote ou do loteamento e o tipo de ocupação. Não obstante, ainda se discute qual o tamanho razoável. Baseando-se nos resultados aqui expostos, é possível afirmar que empreendimentos comerciais podem ser bons alvos na busca por critérios mais realistas.

Contudo, não devem ser esquecidas as ocupações em áreas proibidas, em grotas, em encostas, situações típicas das cidades brasileiras. No caso da bacia do Sapo, as sub-bacias 1 e 2, com esse tipo de ocupação, não apresentaram grande alteração nas variáveis estudadas, mas as mesmas já estavam bem ocupadas no ano de 2002, possuindo frações de área impermeável altas. Pode-se questionar, então, se seria melhor prever a situação de pré-urbanização; a resposta vai depender da viabilidade de se tentar controlar o escoamento a este ponto. Peplau e Neves (2014), por exemplo, mostram que no caso dessa bacia não é necessário restringir tanto a vazão a ser lançada no sistema de drenagem.

Por fim, o artigo mostra que a impermeabilização não é a única responsável pelo aumento da geração de vazão em uma bacia urbana com ocupação bem consolidada e curso d'água principal canalizado. Ocupação em áreas de maior declividade, com alguns tipos de padrões de ocupação, bem como ocupação de áreas com solos mais permeáveis contribuem bastante com o aumento das variáveis analisadas. Nota-se que o aumento na parcela impermeável do solo é o que tem mais efeito na mudança da vazão de pico. Entretanto, destaca-se que os parâmetros físicos "largura característica" e "declividade média" podem amplificar os efeitos da impermeabilização no processo de propagação do escoamento na superfície da bacia.

#### 5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Finep e ao CNPq (Redes Maplu-2 e Hidroeco), ao PPGRHS-Ctec-Ufal, à Prefeitura Municipal de Maceió, à Fapeal (Programa

Primeiros Projetos) e aos alunos dos cursos de Engenharia Civil e Engenharia Ambiental e Sanitária da Ufal por auxiliarem nos trabalhos de campo.

## 6. REFERÊNCIAS

ASCE (American Society of Civil Engineers). **Design Manual for Storm Drainage**. New York-NY, 1960.

BARROS, A.M. **Efeito da mudança do uso do solo no escoamento na bacia do riacho do Sapo**. 2012. Trabalho de Conclusão de Curso. (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2012.

BASTOS, A.P.B. **Análise dos parâmetros do modelo SWMM para avaliação do escoamento em duas bacias periurbanas em Santa Maria-RS**. 2007. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2007.

BUREAU OF RECLAMATION. **Engineering manuals: design of small dams**. Washington D. C: U.S. Gort, 1997.

COLLODEL, M.G. **Aplicação do modelo hidrológico SWMM na avaliação de diferentes níveis de detalhamento da bacia hidrográfica submetida ao processo de transformação chuva-vazão**. 2009. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, SP, 2009.

EMBRAPA (Empresa Brasileira de Pesquisas Agropecuárias). **Diagnóstico Ambiental do Município de Maceió**. Anexo I-f. Levantamento Semidetalhado de Solos, 2005.

GARCIA, J.I.B; PAIVA, E.M.C. Monitoramento hidrológico e modelagem da drenagem urbana da Bacia do Arroio Cancela – RS. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 11, n. 4, p. 99-108, out./dez. 2006.

GAROTTI, L.M.; BARBASSA, A.P. Estimativa de área impermeabilizada diretamente conectada e sua utilização como coeficiente de escoamento superficial. **Revista Engenharia Sanitária e Ambiental**, v.15, n.1, p. 19-28, jan./mar. 2010.

GIRONÁS, J.; ROESNER, L.A.; DAVIS, J. **Storm water management model: applications manual**. U.S. Environmental Protection Agency. Department of Civil and Environmental Engineering. Colorado State University, Fort Collins, Colorado, 2009.

HUBER, W.C.; DICKINSON, R.E. **Storm water management model, version 4: user's manual**. Athens, Georgia: U. S. Environmental Protection Agency, 1992.

JACOBSON, C.R. Identification and quantification of the hydrological impacts of imperviousness in urban catchments: a review. **Journal of Environmental Management**, v. 92, n. 6, p. 1438-1448, jun. 2011.

MACEIÓ. **Base Cartográfica Numérica**. Secretaria Municipal de Controle do Convívio Urbano SMCCU, Coordenadoria de Geoprocessamento. Maceió, 1999.

MARTINS, F.J.P. **Dimensionamento hidrológico e hidráulico de passagens inferiores rodoviárias para águas pluviais**. 2000. 310 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra, Coimbra, Pt, 2000.

PEPLAU, G.J.R. **Análise de critérios para a determinação da vazão de restrição ao escoamento superficial urbano**. Estudo de caso: bacia hidrográfica do riacho do Sapo, Maceió-AL. 2013. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento) – Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2013.

\_\_\_\_\_; NEVES, M.G.F.P. Análise de critérios para a determinação da vazão de restrição ao escoamento superficial urbano. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 19, n. 4, p. 97-106, out./dez. 2014.

PFAFSTETTER, O. **Chuvas intensas no Brasil: relação entre a precipitação, duração e frequência de chuvas registradas com pluviógrafos em 98 postos meteorológicos**. Rio de Janeiro: Departamento Nacional de Obras de Saneamento, 1982.

USDA (United States Department of Agriculture). **Urban hydrology for small watersheds**. Technical Release, n.55. Washington D. C., 1986.

VIDAL, D.H.F. **Modelagem hidrodinâmica como suporte a avaliação e proposição de alternativas compensatórias para mitigação dos problemas de cheias urbanas na bacia do riacho Reginaldo em Maceió-AL**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE/UFRJ), Rio de Janeiro, 2012.

VILLELA, S.M.; MATTOS, A. **Hidrologia aplicada**. 1. ed. São Paulo: Editora McGraw-Hill do Brasil, 1978.