

AVALIAÇÃO DAS ALTERAÇÕES DO REGIME HIDROLÓGICO DO RIO CATU FRENTE À MUDANÇAS NO USO E OCUPAÇÃO DO SOLO

Erick de Lima Sebadelhe Valério¹, Andrea Sousa Fontes²

RESUMO – A ação antrópica de transformação da paisagem através da urbanização, uso e ocupação desordenada do solo, retirada da vegetação e impermeabilização de uma bacia, contribuem para o aumento nas quantidades de escoamento superficial e a consequente diminuição no volume de água que infiltra no solo. Ao longo do tempo, essa situação acaba comprometendo as condições naturais da bacia, levando a problemas de escassez. O presente trabalho tem por objetivo avaliar alterações no regime hidrológico do rio Catu, no estado da Bahia, devido às mudanças do uso e ocupação do solo, utilizando o modelo hidrológico SMAP para gerar e analisar séries de vazões médias mensais e o Método do Hidrograma Unitário Sintético do SCS alterando a *Curva Número* para análise de vazão de pico. Os resultados obtidos evidenciaram que os modelos hidrológicos utilizados representaram bem os fenômenos ocorridos na bacia em estudo, no sentido de avaliar as alterações no regime hidrológico provocadas pelo uso e ocupação do solo, demonstrando que a bacia do rio Catu pode apresentar situações de escassez hídrica no futuro devido ao crescimento dos processos de impermeabilização do solo.

ABSTRACT– The anthropic landscape transformation through urbanization, uncontrolled use and occupation of the soil, vegetation removal and waterproofing in the basin, contribute to the increasing amount of runoff and the consequent decrease in the amount of water that infiltrates in the soil. Over time, this situation affects the natural conditions of the basin, leading to problems of shortage. The present study aims to assess changes in the hydrological regime of the Catu River, in Bahia State, due to changes in land use using hydrologic model (SMAP) to generate and analyze a series of monthly average streamflow and Synthetic Unit Hydrograph Method (SCS) altering the Curve Number for the analysis of peak flow. The results showed that the hydrological models represent the phenomena occurring in the Catu River Basin, to evaluate changes in the hydrological regime caused by the soil use and occupation, showing that the Catu River Basin can present situations of water scarcity in future due to growth processes of waterproofing.

Palavras-Chave – Regime hidrológico, modelagem hidrológica, uso do solo.

INTRODUÇÃO

A água é um recurso que possui grande valor socioeconômico e ambiental, de fundamental importância para manutenção da vida e dos diversos ecossistemas do planeta. A energia solar impulsiona essa água que circula de maneira fechada e contínua entre a superfície terrestre e a atmosfera, descrevendo um ciclo, que ocorre em proporções globais, chamado de ciclo hidrológico.

1) Mestrando em Mestrando em Recursos Hídricos e Saneamento, PPGRHS/CTEC/UFAL, Maceió-Al, Email: ericksebadelhe@hotmail.com

2) Professora Adjunto do Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, CETEC/UFRB, E-mail: andreafontes@ufrb.edu.br

Segundo Tucci *et al.* (1993), o ciclo hidrológico é estudado com maior interesse na superfície terrestre, onde a bacia hidrográfica é tomada como unidade fundamental para análise. Pode-se definir bacia hidrográfica como uma área de captação natural de chuvas que converge os escoamentos para um único ponto de saída. Algumas características da bacia, como por exemplo, tipo de solo e a presença ou não de cobertura vegetal, influenciam no processo natural de escoamento na superfície.

Uma das atividades que interfere de forma bastante significativa sobre o escoamento é a ação antrópica de transformação da paisagem. A urbanização, o uso e ocupação desordenada do solo, a retirada da vegetação e a impermeabilização de uma bacia contribuem para o aumento nas quantidades de escoamento superficial em detrimento da diminuição no volume de água que infiltra no solo. Nessa situação, onde as quantidades de escoamento são muito maiores que as quantidades de infiltração, a bacia perde água dos deflúvios pluviais no período chuvoso e tem as vazões de calha reduzidas no período de estiagem, uma vez que o lençol freático foi pouco abastecido e não restitui água para os rios. Ao longo do tempo, essa situação acaba comprometendo as condições naturais da bacia e de seus recursos hídricos, levando a problemas de escassez durante os períodos secos e inundações durante os períodos chuvosos.

Em um cenário como esse, existe a necessidade da realização de estudos para avaliar o regime hidrológico da bacia, visando compreender o funcionamento do balanço hídrico e os impactos decorrentes das mudanças do uso da terra sobre a quantidade e a qualidade da água. Essa avaliação pode ser feita utilizando modelos hidrológicos que representam de forma simplificada os fenômenos hidrológicos que ocorrem em uma bacia, servindo de auxílio para o entendimento dos processos que envolvem esta realidade.

A modelagem hidrológica compreende as etapas de calibração dos parâmetros, verificação e simulação. Tucci (1998) definiu que parâmetros são valores que caracterizam o sistema, podendo variar com o espaço e o tempo. Segundo Bravo *et al.* (2007), a calibração pode ser entendida como o processo de busca dos valores ótimos dos parâmetros do modelo hidrológico, ou seja, é um processo de otimização no qual as variáveis de decisão são os parâmetros do modelo. Após a calibração, é realizada a etapa de verificação. Esta etapa consiste em realizar uma simulação para um determinado período que possua dados de vazões, comparando em seguida a série gerada pelo modelo hidrológico e a série observada. A etapa final é a simulação, onde o modelo irá gerar uma série de vazões para um cenário real ou fictício, a partir dos dados de entrada.

A simulação de cenários em bacias hidrográficas, utilizando modelos hidrológicos, é considerada a técnica mais flexível em recursos hídricos, sendo essa uma de suas principais vantagens, pois permite que as características do sistema sejam representadas por descrições matemáticas. Outro fator que ocasiona o aumento na utilização de modelagens hidrológicas é a falta

de dados fluviométricos consistentes e representativos. Este vem sendo um dos problemas enfrentados durante a análise e avaliação do regime hidrológico de bacias hidrográficas brasileiras, tornando-se assim, o uso de modelos de transformação de chuvas em vazões comum para um país que possui poucos dados fluviométricos quando comparados a sua extensão territorial, como no caso do Brasil.

Devido à falta de dados de vazão, a modelagem hidrológica brasileira evoluiu voltada para a previsão de afluência de vazões e operação de reservatórios em tempo real, sendo utilizados vários modelos hidrológicos de previsão de vazão voltados para curto, médio e longo prazo. Como exemplos, podemos citar os modelos: *Soil Water Assessment Tool* – SWAT, utilizado por Blainski, Garbossa e Malutta (2010) para avaliar a distribuição da produção de sedimentos e vazão para diferentes cenários de uso do solo; o *Soil Moisture Accounting Procedure* – SMAP, aplicado para gerar dados de vazão a partir de dados de precipitação, conforme utilizado por Castanharo *et al.* (?); os modelos de previsão de vazões PREVIVAZ e PREVIVAZH, aplicado a planejamentos de curto prazo, sendo utilizado oficialmente pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico - ONS para as previsões visando a programação da operação (Guilhon, 2002).

O SMAP é um modelo hidrológico que apresenta sua principal vantagem relacionada à sua estrutura relativamente simples, baseada nas formulações do *Soil Conservation Service* - SCS, necessitando de um pequeno número de parâmetros para representação dos processos do balanço hídrico. Também possibilita, com a alteração dos parâmetros que representam as características de uso do solo, avaliar os impactos na vazão de eventuais mudanças.

O método Soil Conservation Service (SCS), foi desenvolvido em 1952 pelo Departamento da Agricultura dos Estados Unidos (*U.S. Department of Agriculture*, atual *Natural Resources Conservation Service* - NRCS), sendo concebido, sobretudo, para utilização em pequenas bacias, através de dados de bacias experimentais com vários tipos e uso do solo e técnicas de plantio (Tassi *et al.*, 2006). De acordo com Jabur e Rizzi (2011), é uma metodologia bastante utilizada para estimar o escoamento superficial, sendo aplicada tanto nos estudos das enchentes como também em avaliação, dimensionamento e planejamento de futuras obras de proteção contra inundações em bacias impermeabilizadas. O SMAP é utilizado pela empresa que opera as usinas de Itá, Passo Fundo e Machadinho no rio Uruguai, e o ONS, que calibrou o modelo para o trecho incremental entre a usina hidrelétrica de Marimbondó e a usina hidrelétrica de Água Vermelha, com excelentes resultados nos parâmetros obtidos, conforme atesta Guilhon (2002).

No presente trabalho, realizou-se uma avaliação das alterações no regime hidrológico do rio Catu, no estado da Bahia, devido às mudanças do uso e ocupação do solo, utilizando o modelo hidrológico SMAP para gerar e analisar séries de vazões médias mensais e o Método do Hidrograma Unitário Sintético do SCS alterando a *Curva Número* para a análise da vazão de pico.

METODOLOGIA

Levantamento das características físicas e dados hidrológicos

Primeiramente realizou-se o levantamento das características físicas (relevo, uso do solo, vegetação, área de drenagem, hidrografia) da bacia do Rio Pojuca, do qual o rio Catu é afluente. As informações referentes ao uso do solo na bacia foram obtidas a partir de Miranda (2005). Os dados de precipitação para a área de estudo foram obtidos no banco de dados disponibilizado pela Agência Nacional de Águas (ANA).

Tratamento dos dados hidrológicos e caracterização da precipitação da bacia

As séries históricas de precipitação e vazão foram analisadas visando identificar a existência de falhas e a consistência dos dados obtidos. Identificadas as falhas, estas foram preenchidas pelo método da Ponderação Regional (precipitação), apresentado em Tucci *et al.* (1993), que considera postos vizinhos de apoio que apresentem coeficiente de correlação significativo (maior que 70%) entre as séries de postos situados em regiões climatologicamente semelhantes. Já as falhas nas séries de vazões foram preenchidas pelo método da regressão linear, por ser comum em aplicações hidrológicas (Clarke, 1993), utilizando-se postos a montante do posto com falhas. A etapa posterior foi o cálculo da precipitação média, utilizando o método dos Polígonos de Thiessen.

Definição de cenários

Os cenários utilizados na simulação foram definidos da seguinte forma: Cenário 1 – Bacia de referência, correspondente à situação do uso do solo em que se encontra a bacia do rio Catu de acordo com a bibliografia pesquisada e que será utilizada como referência para análise do uso e ocupação do solo; Cenário 2 – Bacia totalmente reflorestada, correspondente a um cenário fictício no qual toda a área da bacia fosse completamente reflorestada, passando a apresentar sua vegetação natural; Cenário 3 – Bacia totalmente impermeabilizada, cenário fictício no qual fatores antropogênicos como o crescimento da urbanização, aliado a perda de solo devido a processos erosivos provenientes do seu mau uso na agricultura, poderia levar a bacia a uma situação em que a grande maioria das águas provenientes das precipitações escoaria ao invés de infiltrar.

Modelagem hidrológica (SMAP)

Esta etapa consiste na realização da *calibração* dos parâmetros utilizados pelo modelo SMAP, *verificação* e *simulação* das vazões para diferentes cenários de uso e ocupação do solo. Para aplicação do modelo foram levantadas as séries históricas de vazão disponíveis na área de estudo,

sendo o período e a escala temporal de análise definidos de acordo com disponibilidade destes dados.

Devido à escassez de dados na área de estudo, definiu-se a utilização do modelo a nível mensal. Como o objetivo principal do trabalho é verificar as alterações no regime hidrológico, causadas pelas mudanças no uso e ocupação do solo, utilizando principalmente valores de vazões mínimas e médias, a versão mensal é aplicada sem comprometer o objetivo e os resultados do estudo.

Calibração

Na versão mensal, o SMAP utiliza dois reservatórios matemáticos, reservatório do solo (Rsolo) e reservatório subterrâneo (Rsub), nos quais as variáveis de estado são atualizadas a cada mês. A atualização desses reservatórios se dá mediante a realização de um balanço hídrico. O reservatório do solo (Rsolo) é obtido somando o valor desse reservatório no mês anterior com a precipitação e subtraindo os valores do escoamento superficial (Es), da evapotranspiração real (Er) e da recarga subterrânea (Rec). Já o reservatório subterrâneo é resultado do valor desse reservatório no mês anterior, subtraído do escoamento básico (Eb) e da recarga subterrânea (Rec) (Lopes, 1999). As Equações 1 e 2 apresentam a formulação do balanço hídrico utilizado pelo modelo para esses reservatórios.

$$Rsolo(i) + 1 = Rsolo(i) + P - Es - Er - Rec \quad (1)$$

$$Rsub(i) + 1 = Rsub(i) - Eb - Rec \quad (2)$$

A mudança do solo proporciona alterações nesse balanço hídrico utilizado pelo modelo. Na medida em que a vegetação natural cresce ou decresce, a evapotranspiração real e a recarga subterrânea aumentam ou diminuem, causando impactos sobre os escoamentos básicos e superficiais, aumentando ou diminuindo os valores dos reservatórios do solo e subterrâneo. Para detalhes da representação do balanço hídrico pelo modelo consultar Lopes (1999).

A calibração foi realizada manualmente, através do método de tentativa e erro, em repetidas execuções do modelo e análise dos resultados. Foram calibrados os seguintes parâmetros: Sat - capacidade de saturação do solo (mm); Pes - parâmetro de escoamento superficial (ad.); Crec - parâmetro de recarga subterrânea (%) e; K - constante de recessão (mês⁻¹). Esses quatro parâmetros estão diretamente relacionados com a geração de vazão. A capacidade de saturação e o parâmetro de recarga subterrânea influenciam diretamente a geração de escoamento superficial. Uma vez que o solo esteja saturado, ou seja, todos os espaços vazios presentes no solo estejam preenchidos, a capacidade de infiltração é reduzida, fazendo com que a quantidade excedente de água que não consegue infiltrar escoar sobre a superfície, proporcionando o deflúvio superficial. Quanto menor for a capacidade de saturação, menor o volume de água necessário para gerar escoamento. Essa

situação em que a infiltração é prejudicada também afeta a recarga subterrânea, reduzindo o abastecimento dos reservatórios subterrâneos.

Para inicialização das variáveis de estado utilizadas pelo modelo é efetuada por duas variáveis: Tuin, que representa o teor de umidade inicial do solo (Ad), e Ebin, vazão básica inicial (m³/s). O ajuste dessas variáveis foi feito manualmente, observando a aderência do hidrograma no instante inicial e se existe tendências crescentes ou decrescentes da vazão básica ao longo do período.

A cada tentativa analisou-se o ajuste de vazões mínimas, a forma do hidrograma calculado, o ajuste dos picos de cheias em termos de valor máximo, volume, forma e tempo de ocorrência.

Segundo Tucci (1998), o estabelecimento da função objetivo é uma das partes fundamentais para “otimização” de um modelo hidrológico. No caso da simulação hidrológica, a função objetivo busca medir as discrepâncias entre os hidrogramas das vazões observadas (Qo) e calculadas (Qc) para que essa possa ser minimizada. Dessa forma, serão testadas as seguintes funções objetivo, estabelecidas por Tucci (1998):

$$F1 = \sum_{i=1}^N (Qo - Qc)^2 \quad (3)$$

$$F2 = \sum_{i=1}^N |Qo - Qc| \quad (4)$$

$$F3 = \sum_{i=1}^N \left(\frac{1}{Qo} - \frac{1}{Qc} \right)^2 \quad (5)$$

$$F4 = \sum_{i=1}^N \left(\frac{Qc - Qo}{Qo} \right)^2 \quad (6)$$

Sendo: Qo as vazões observadas e Qc as vazões calculadas.

A Equação 3 é chamada de função quadrática. Essa função atribui um maior peso as vazões maiores. A Equação 4 apresenta a função módulo, que também fornece maior peso as maiores vazões. Já a função inversa, apresentada na Equação 5, atribui maior importância às vazões menores. A função relativa, representada na Equação 6, procura retirar o peso excessivo dado aos valores absolutos, enfatizando melhor ajustes relativos.

Verificação

Terminada a calibração, a próxima etapa é a verificação dos parâmetros encontrados, visando garantir que estes representem bem os fenômenos hidrológicos que ocorrem na bacia em estudo. Para esse fim, realizou-se uma simulação para um período mínimo de 5 anos que apresentavam dados observados de vazões. Após esta simulação, realizou-se a correlação e uma comparação entre

as vazões médias observadas e calculadas, além da construção de um hidrograma comparativo entre as duas séries para verificar se os parâmetros escolhidos representam adequadamente a bacia.

Simulação de Cenários

Para a simulação é necessário definir o número de meses que se deseja simular (para o caso da versão mensal do SMAP), área de drenagem da bacia, total médio de evaporação, coeficiente de Thiessen dos postos de chuva e a série histórica mensal de chuva. Utilizando os parâmetros obtidos na calibração foram geradas séries históricas variando o parâmetro Sat, representando alterações no uso do solo, como por exemplo: Área da bacia totalmente florestada e área totalmente impermeabilizada, e o parâmetro Crec.

Após a simulação, foi realizada a etapa de análise dos resultados obtidos e comparação entre as séries geradas.

Construção das Curvas de Permanência

De posse das séries sintéticas de vazões mensais geradas pelo SMAP, foram construídas curvas de permanência para os cenários escolhidos, visando determinar as vazões médias ($Q_{\text{média}}$), Q_{90} , Q_{50} e Q_5 mensais, além das vazões mínimas. De acordo com Cruz e Tucci (2008), a curva de permanência ou curva de duração de vazões faz uma relação entre a vazão com a porcentagem do tempo em que ela é igualada ou superada sobre todo o período histórico utilizado para sua construção. Neste trabalho, a curva de permanência é obtida organizando os valores de vazão em ordem decrescente e atribuindo a cada um desses uma frequência de excedência $m/n+1$ (fórmula de Weibull), onde m é a ordem do valor da vazão e n é o número de valores da série.

Obtenção das Vazões de Pico (Aplicação do SCS)

As vazões de pico foram calculadas pelo método SCS, conforme metodologia descrita por Collischonn e Tassi (2008). Considerou-se os três cenários diferentes do uso do solo, alterando o parâmetro representativo dessa característica.

RESULTADOS

Levantamento das Características Físicas e Climáticas

O rio Catu está localizado na Bacia Atlântico Sul, Trecho Leste (5), Sub-bacia do Rio Vazabarris, Itapicuru e outros (50), na Região de Planejamento e Gestão das Águas (RPGA) do Recôncavo Norte (XI) (INEMA, 2011). O rio apresenta cerca de 49 km de extensão e uma área de drenagem de aproximadamente 440 km², compondo uma sub-bacia do rio Pojuca. Esta sub-bacia abrange parcialmente 5 municípios: Aramari, Alagoinhas, Araças, Catu e Pojuca.

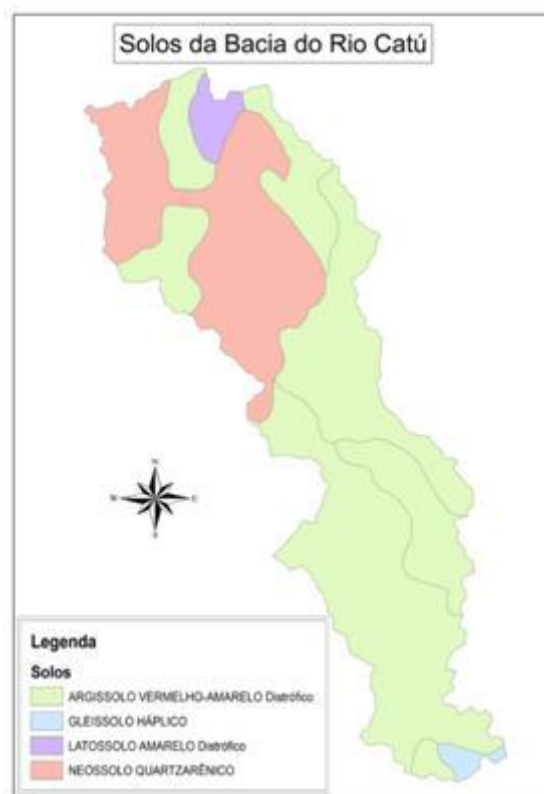


Figura 1 - Solos da Bacia do Rio Catu

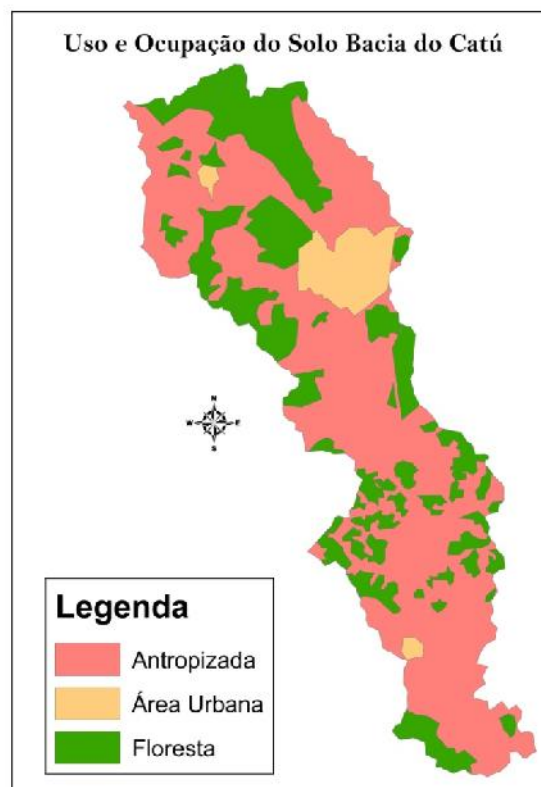


Figura 2 - Uso e Ocupação do Solo - Bacia do Rio Catu

Os tipos e usos do solo foram identificados através de Miranda (2005). Verificou-se que a bacia do rio Catu é composta por 68% de Argissolo, 29% de Neossolo, 2% de Latossolo e 1% de

Gleissolo (Figura 1). Quanto ao uso do solo, a bacia apresenta cerca de 64% de sua área utilizada para agricultura e pecuária (área antropizada), 30% de vegetação natural ou área de reflorestamento (floresta) e 6% de área urbana (Figura 2).

Para estimativa da evaporação utilizou-se as normais climatológicas do INPE para o município de Alagoinhas-BA, que está localizado na bacia do rio Catu. A evaporação na região é de aproximadamente 982 mm/ano. Os dados de evaporação são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Evaporação (mm) na Cidade de Alagoinhas, Bahia

jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez	ANO
101,7	86,3	89,5	69,2	60,3	57,4	61,7	67,8	74,4	97,3	103,5	112,4	981,5

Fonte: INPE, 1990

Nos municípios da bacia do Pojuca foram encontrados 43 postos de precipitação com dados disponíveis, sendo que desses 43, apenas 3 localizavam-se na sub-bacia do rio Catu. Já postos de vazão foram encontrados apenas 6 no rio Pojuca e nenhum no rio Catu. Devido a essa falta de dados de vazão, decidiu-se fazer a calibração do SMAP para a bacia do rio Pojuca, que possui dados de precipitação e vazão, para depois fazer a simulação e gerar dados de vazão para a sub-bacia do rio Catu.

Para escolher os postos que seriam utilizados para a calibração, realizou-se primeiramente uma análise nas séries históricas com o objetivo de verificar o período no qual os dados foram obtidos e a existência de falhas. Através desta avaliação, foram escolhidos apenas 9 postos de precipitação e 6 postos de vazão. Identificou-se, através da confecção de um diagrama de dados, que o melhor período para trabalhar era de 1964 à 1984, sendo que o período de 1964 à 1979 seria utilizado para calibração e de 1980 à 1984 para verificação.

Modelagem Hidrológica

Após variar os parâmetros pelo método de tentativa e erro, encontrou-se os seguintes valores: $\text{sat}=900$, $\text{pes}=7$, $\text{cres}=1$, $k=2$, $\text{Tuin}=10$ e $\text{Ebin}=70$. A soma dos erros foi igual a 1,69 calculada pela função inversa ($F3$), que atribui maior importância a vazões menores, ajustando-se melhor ao caso do rio Pojuca, uma vez que o grande problema verificado na calibração foi a existência de eventos isolados onde as vazões observadas apresentavam valores bastante grandes, ocasionando em uma discrepância maior entre a vazão calculada. Para estes valores, a correlação foi de 85%, indicando assim que o modelo estava calibrado para bacia.

A verificação foi realizada simulando a vazão para a bacia do rio Pojuca, utilizando o intervalo de tempo de 1980 à 1984 e comparando os resultados obtidos com a vazão observada no posto fluviométrico 50755000, para o mesmo período. A Figura 3 apresenta um hidrograma obtido com as séries de vazões observadas e calculadas.

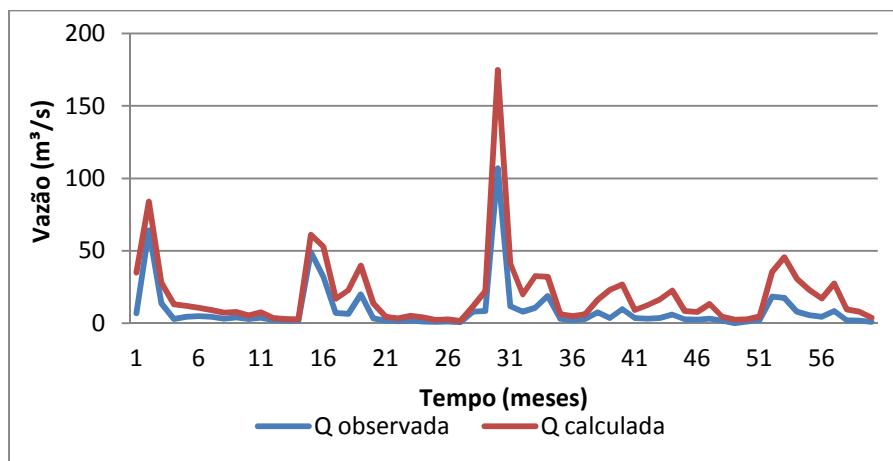


Figura 3 - Hidrogramas de Vazões Observadas e Calculadas

Pode-se perceber que, com os parâmetros escolhidos, a simulação representa bem o cenário de referência da bacia, uma vez que os hidrogramas estão apresentando uma correspondência satisfatória principalmente na produção de pico. A correlação obtida entre as séries observadas e calculadas foi de 76% indicando uma boa resposta do modelo para os parâmetros escolhidos. Outro indicador utilizado para a verificação foi a comparação das vazões médias. A vazão média observada no período foi de 9,1 m³/s, enquanto que a vazão calculada foi de 10,6 m³/s. Desta forma, os parâmetros escolhidos na calibração fazem com que o modelo represente bem o cenário hidrológico na bacia do rio Pojuca, sendo usado para a simulação de cenários na bacia do rio Catu.

Com as etapas de calibração e verificação terminadas, o próximo passo foi simular para a bacia do rio Catu, com o objetivo de gerar uma série sintética de vazões. Na simulação, utilizou-se apenas a série histórica do posto pluviométrico 1238005, localizado no município de Alagoinhas. Para esse posto não foi possível utilizar o mesmo período da calibração, pois, uma vez que a correlação dessa estação pluviométrica com as estações vizinhas era abaixo de 70%, o preenchimento das falhas não apresentaria um nível de confiança aceitável. Dessa forma, optou-se por utilizar o período de 1968 a 1978 para simulação, pois a série histórica não apresentava falhas durante esse intervalo de tempo, sendo o melhor período disponível para se trabalhar.

Para o cenário de uma bacia totalmente reflorestada, o parâmetro de saturação do solo (Sat) foi alterado, sendo atribuído a ele seu valor máximo que é 5000, ou seja, considerando que seria necessário um volume maior de água para saturar o solo e gerar escoamento. Esse cenário fictício corresponde a uma bacia em que toda sua área apresentaria vegetação natural e que, portanto, a quantidade de água de chuva necessária para saturar o solo e gerar escoamento seria bem maior. O coeficiente de recarga (Crec) também foi alterado. Considerando que 70% da área da bacia apresenta solo com pouca capacidade de infiltração, atribuiu-se o valor de 21 ao parâmetro Crec, que corresponde a 30% de seu valor máximo, ou seja, considerando que 30% da água da chuva conseguiria infiltrar e recarregar o aquífero.

Para uma bacia totalmente impermeabilizada, o parâmetro de saturação do solo assumiu seu menor valor, que é 400. Isso indica que o solo possui baixa capacidade de saturação e, portanto, necessita de pouca água para gerar escoamento. O parâmetro de recarga do aquífero também foi reduzido e passou a ser 0, ou seja, a água não consegue infiltrar, impedindo assim a recarga do aquífero. A Figura 4 apresenta os hidrogramas obtidos na simulação dos 3 cenários.

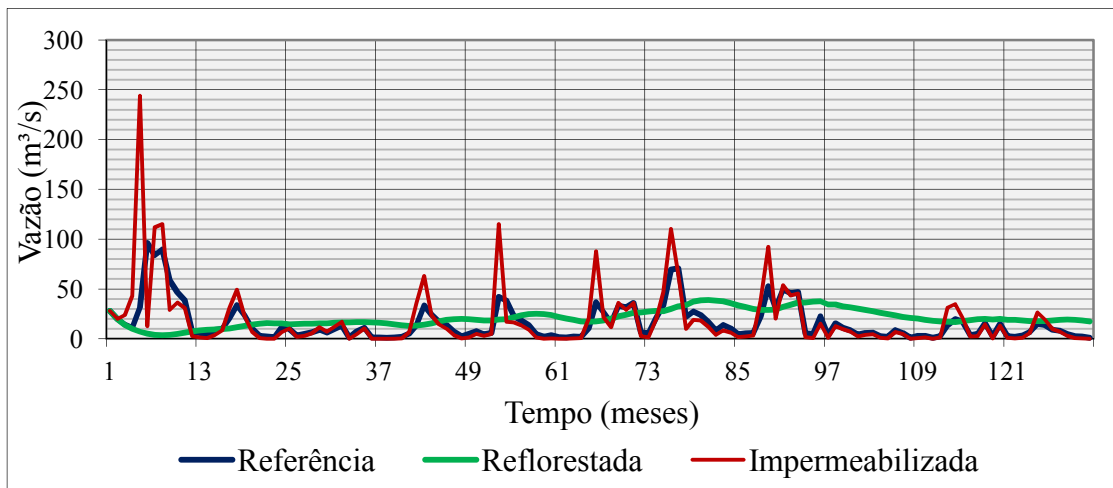


Figura 4 - Hidrograma Comparativo Entre Os 3 Cenários

É possível perceber a elevação acentuada dos picos ocasionada pela impermeabilização do solo, simulada no cenário 3. Quando comparado às demais situações, a bacia perde a capacidade de reter a água das precipitações, diminuindo o processo de infiltração e recarga dos reservatórios subterrâneos, aumentando o escoamento de superfície, o que conduz a região a um regime hidrológico desequilibrado, onde existe a alternância de períodos de secas e cheias. Em contrapartida, em uma bacia que se encontra totalmente florestada, o regime hidrológico torna-se mais equilibrado, não apresentando grandes alternâncias entre estações de estiagens e enchentes. Já uma bacia como a de referência, que possui grande parte de sua área alterada pela ação do homem, existe constantemente a ocorrência de picos de cheias e períodos de seca, onde as vazões mínimas chegam próximas a zero.

Curvas de permanência

A Figura 5 apresenta as curvas de permanência em escala logarítmica, obtidas através da simulação para os 3 cenários. A análise destas curvas apontou uma grande diminuição da Q90, que passou de 1,83, no cenário de referência, para 0,12 m³/s. A Q50 também diminuiu, caindo de 8,66 para 6,98 m³/s. A Q5 aumentou de 52,75 para 87,85 m³/s e a $Q_{média}$ aumentou para 18,13 m³/s. A Tabela 2 apresenta os resultados obtidos na simulação dos 3 cenários.

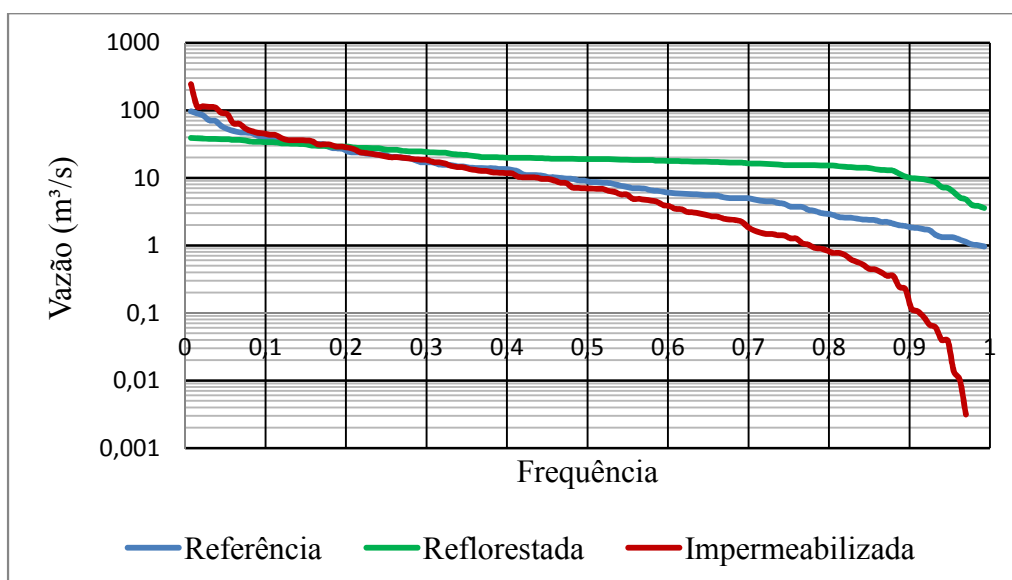


Figura 5 - Curva de Permanência Logarítmica Comparativa Entre Os 3 Cenários

Tabela 2 - Comparação Entre os Diferentes Cenários

Vazão (m³/s)			
	Referência	Reflorestada	Impermeabilizada
Q5%	52,75	37,41	87,85
Q50%	8,66	18,97	6,98
Q90%	1,83	9,92	0,12
Q_{média}	16,18	20,72	18,13
Q_{mín}	0,96	3,57	0,00
Q_{máx}	96,11	39,00	244,10

Através da análise dos dados pode-se perceber que com o aumento da área florestada da bacia a Q_{90} também aumenta. Isso significa que, no período de estiagem, o rio possuirá uma maior potencialidade hídrica para atender as demandas existentes. É possível observar também que a vazão máxima foi bastante reduzida, pois, no período chuvoso, o escoamento superficial é bastante reduzido devido à presença de vegetação, proporcionando uma diminuição na vazão máxima e na ocorrência de cheias. Uma vez que grande parte da água proveniente das precipitações está sendo interceptada pela vegetação e infiltrando no solo, os reservatórios subterrâneos que irão abastecer o rio durante épocas de estiagem estão sendo carregados, evitando uma situação de desequilíbrio que possa causar impactos econômicos, sociais e ambientais.

Em contrapartida, quando a área florestada é devastada e dá lugar a área impermeável, a vazão com 90% de permanência diminui bastante e a vazão mínima chega à zero. Nesse cenário, em épocas de seca, a potencialidade hídrica do rio é comprometida, chegando a não registrar vazões significativas. A diminuição verificada nas vazões média e na Q_{90} denotam uma situação emergencial, onde os recursos hídricos existentes podem entrar em colapso conduzindo a bacia a uma situação de escassez, onde as diversas demandas existentes não serão supridas, provocando prejuízos de ordem econômica, social e ambiental.

Apesar das limitações do SMAP, esse modelo hidrológico consegue representar os fenômenos ocorridos em uma bacia hidrográfica.

Aplicação do SCS

O método SCS foi aplicado para obter as vazões de pico para os 3 cenários utilizados no SMAP. Para os cálculos foi considerada a precipitação máxima diária registrada no período de janeiro de 1968 à dezembro de 1978, na estação pluviométrica de número 1238005. Este valor foi 104 mm, registrado no dia 6 de dezembro de 1975. Considerou-se o tempo de duração da chuva como sendo igual ao tempo de concentração. O desnível máximo foi calculado através de diferenças de cotas, utilizando o ArcGIS. Verificou-se que o exutório encontrava-se na cota 60 e o ponto mais remoto da bacia na cota 350, resultando em um desnível máximo de 290 m. A declividade foi calculada fazendo a relação entre a extensão do rio e o desnível máximo, obtendo uma declividade de aproximadamente 0,47%.

Nesta etapa, o ponto mais importante foi o cálculo do parâmetro CN (*Curva-Número*). Utilizando o ArcGIS, realizou-se uma sobreposição dos mapas de tipo e uso do solo para verificar em que tipo de solo estavam localizadas as zonas florestadas e urbanizadas, e as áreas destinadas a agricultura e pecuária (área antropizada). O Quadro 1 apresenta os resultados obtidos.

Quadro 1 – Tipo do solo *versus* Uso e Ocupação do Solo – Bacia de Referência

	Gleissolo	Latossolo	Argissolo	Neossolo
Antropizada	1,11%	0,30%	46,41%	15,47%
Floresta	0,00%	2,17%	18,03%	10,14%
Área Urbana	0,00%	0,00%	3,17%	3,21%

Analisando o quadro pode-se perceber que 1,11% da área total da bacia encontra-se antropizada e localizada sobre Gleissolo, 0,30% em Latossolo, 46,41% sobre Argissolo e 15,47% sobre Neossolo. Quanto a área com vegetação natural ou de reflorestamento, 2,17% localiza-se em Latossolo, 18,03% em Argissolo e 10,14% em Neossolo. A área urbana corresponde a 6,38% da área total da bacia, sendo que 3,17% sobre Argissolo e 3,21% em Neossolo. Devido às características dos solos, o Neossolo foi classificado como do tipo A, o Latossolo do tipo B e o Argissolo e o Gleissolo como tipo C.

Após a classificação dos solos, definiu-se, utilizando a Tabela 1, valores de CN para cada uma das áreas demonstradas no Quadro 1. Esses valores são apresentados no Quadro 2.

Quadro 1 – Definição do Parâmetro CN

	Gleissolo	Latossolo	Argissolo	Neossolo
Tipo de solo	C	B	C	A
Antropizada	82	74	82	62
Floresta	74	63	74	41
Área Urbana	90	85	90	77

Fazendo uma média ponderada, obteve-se o valor de 72,96 para o parâmetro CN na situação de referência da bacia. Definido o coeficiente, calculou-se a precipitação efetiva e a vazão de pico utilizando o SCS.

Para calcular a precipitação efetiva e a vazão de pico para um cenário de bacia totalmente reflorestada transferiu-se a porcentagem das áreas urbanizadas e antropizadas para a área de floresta, mantendo o tipo de solo. Para o cenário de uma bacia impermeabilizada, transferiu-se a porcentagem das áreas florestadas e antropizadas para a urbana. A Figura 6 apresenta o hidrograma comparativo entre os três cenários.

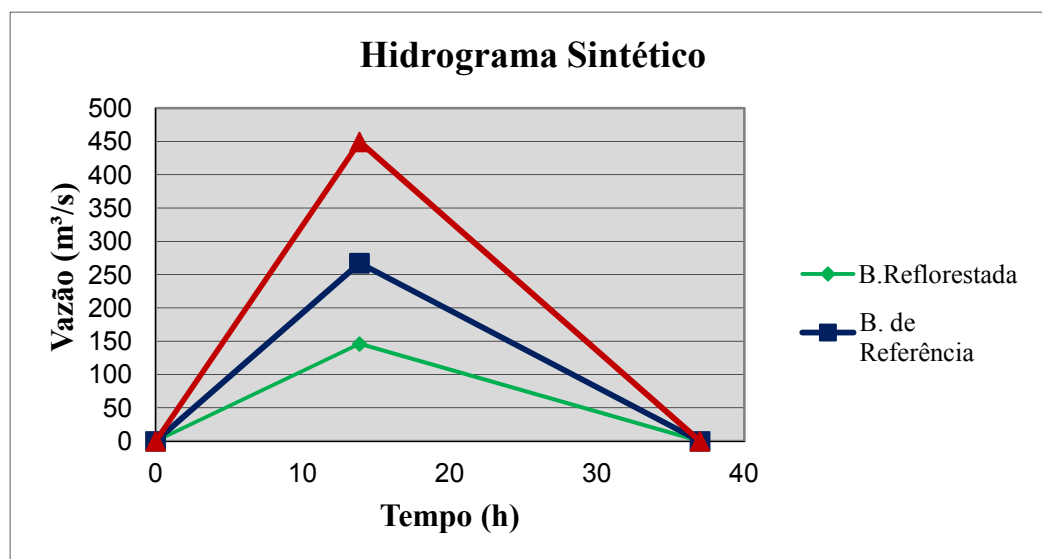


Figura 6 - Hidrograma Comparativo Entre Os 3 Cenários

O aumento da área impermeabilizada na bacia conduz a um aumento substancial na precipitação efetiva e, portanto, na vazão de pico. Neste cenário, a bacia está bastante vulnerável a ocorrência de inundações no período chuvoso.

Avaliando os resultados obtidos na aplicação do SCS, fica evidente que o aumento de áreas urbanizadas reflete diretamente nas vazões máximas, causando elevação dos picos dos hidrogramas, conforme atestado por Jabur & Rizzi (2011). Esse aumento é consequência do processo de impermeabilização, que provoca a diminuição da infiltração, reduzindo a capacidade natural que a bacia hidrográfica possui de reter a água das precipitações.

COMPARAÇÃO DE RESULTADOS DO SMAP E SCS

A Tabela 3 apresenta os valores das vazões máximas obtidas através da aplicação do SMAP e do SCS.

Tabela 3 – Vazões Máximas (m³/s) – SMAP x SCS

	Referência	Reflorestada	Impermeabilizada
SMAP	96,11	39,00	244,10
SCS	267,31	146,07	449,55

O modelo hidrológico SMAP, por utilizar parâmetros separados que consideram a saturação do solo, recarga subterrânea, escoamento superficial e tempo de recessão, consegue representar melhor a geração do escoamento na bacia, quando comparado ao método da Curva Número do SCS, que utiliza apenas o parâmetro CN para representar fatores como umidade antecedente, tipo e ocupação do solo.

Apesar da grande diferença observada entre as vazões máximas calculadas pelos dois métodos utilizados, ambos conseguiram representar bem os fenômenos ocorridos na bacia, no sentido de avaliar a influência que as mudanças do uso e ocupação do solo exercem sob o regime hidrológico da região.

Análise das fontes de incertezas

Diversas dificuldades foram encontradas no decorrer do trabalho, como por exemplo, mapas desatualizados, postos desativados e dados hidrológicos inconsistentes. Aliados a esses fatores está à simplicidade com que os modelos utilizados representam os complexos fenômenos hidrológicos que ocorrem em uma bacia hidrográfica e a formulação utilizada para encontrar o tempo de concentração que não considera o parâmetro de uso e ocupação do solo.

Com todas essas fontes de incertezas, a análise do regime hidrológico, em termos quantitativos, fica prejudicada. Por esse motivo, adotou-se a nomenclatura Bacia de Referência para tratar do cenário que, teoricamente, representaria a situação atual da bacia do rio Catu.

CONCLUSÕES

A bacia hidrográfica do rio Catu possui cerca de 440 km², sendo que aproximadamente 70% de sua área encontra-se modificada pelas atividades humanas. O crescimento da população que reside na área de influência da bacia, associada ao desenvolvimento econômico, aumentam a demanda por água, impactando diretamente nos recursos hídricos da região. Dessa forma, existe a necessidade de se avaliar as alterações no regime hidrológico causadas por esse desenvolvimento.

O modelo hidrológico SMAP, após a calibração para a bacia do rio Pojuca, conseguiu representar bem a situação de referência da bacia do rio Catu, sendo uma ferramenta bastante útil

para simular e gerar série de vazões para uma bacia hidrográfica que não possui dados fluviométricos, podendo ainda ser usado para simular a existência de diferentes outros cenários.

Com a análise dos resultados obtidos pelos dois métodos utilizados, conclui-se que a bacia do rio Catu pode estar entrando em uma situação de desequilíbrio hidrológico, evidenciado pelo baixo valor encontrado na Q_{90} (1,83 m³/s) e pela vazão mínima de 0,96 m³/s, para a bacia de referência. Com o crescimento das atividades de agricultura, pecuária e da urbanização, a tendência é que a bacia perca cada vez mais água, podendo chegar a uma situação de escassez hídrica no futuro, conforme demonstrado no resultado do SMAP para a bacia impermeabilizada, onde a Q_{90} foi de 0,12 m³/s e a vazão mínima igual a zero. Em um cenário como esse, as demandas existentes poderiam não ser supridas, provocando danos socioeconômicos e ambientais.

BIBLIOGRAFIA

BLAINSKI, E.; GARBOSSA, L. H. P.; MALUTTA, S. (2010). *Aplicação do modelo hidrológico SWAT (Soil and Water Assessment Tool) para a simulação da perda de solo e da disponibilidade hídrica em uma bacia hidrográfica não instrumentada*. In: X Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, Fortaleza – CE.

BRAVO, J. M. *et al.* (2007). *Avaliação visual e numérica da calibração do modelo hidrológico IPH II com fins educacionais*. In: XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, São Paulo-SP.

CASTANHARO, G. *et al.* (?). *Previsão de vazões na bacia do rio Iguaçu baseada no modelo SMAP e com incorporação de informações de precipitação*. Disponível em: <http://www.ons.org.br/download/previsao_vazoes/artigos_sessao/AT_Sess%C3%A3o07.pdf> Acesso em: 21 Fev. 2012.

CLARKE, R. T. (1993). *Hidrologia Estatística*. In: Hidrologia: Ciência e Aplicação. Porto Alegre: Editora da Universidade Federal do Rio Grande do Sul: Associação Brasileira de Recursos Hídricos: Editora da Universidade de São Paulo. Capítulo 17. p. 659-702.

COLLISCHONN, W.; TASSI, R. (2008). *Introduzindo Hidrologia*. Apostila IPH/UFRGS. Disponível em: <http://galileu.iph.ufrgs.br/collischonn/apostila_hidrologia/apostila.html> Acesso em: 23 Mai. 2011.

CRUZ, J. C.; TUCCI, C. E. M. (2008). *Estimativa da disponibilidade hídrica através da curva de permanência*. RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v.13, n.1, p.111-124, Jan/Mar.

GUILHON, L. G. F. (2002). *Modelo heurístico de previsão de vazões naturais médias semanais aplicado à usina de Foz do Areia*. Tese (Mestrado em Planejamento Energético). COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro-RJ.

INSTITUTO DE MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS – INEMA (2011). Mapa temático: RPGA XI - Recôncavo Norte. Disponível em: <http://www.inema.ba.gov.br/servicos/dados-geoespaciais/mapas-tematicos?dl_page=2> Acesso em: 21 Fev. 2012.

Instituto nacional de pesquisas espaciais – INPE (1990). *Normais climatológicas do Brasil*.

JABUR, A. S.; RIZZI, N. E. (2011). *Estimativas da vazão máxima e capacidade de saturação hídrica da bacia hidrográfica do Alto do rio Ligeiro em Pato Branco, PR*. Floresta, Curitiba-PR, v. 41, n. 4, p. 833 - 846, out./dez.

LOPES, J. E. G. (1999). *Manual do Usuário do SMAP* – v.99.

MIRANDA, E. E. (Coord.). (2005). *Brasil em Relevo*. Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite. Disponível em: <<http://www.relevobr.cnpm.embrapa.br>>. Acesso em: 08 Nov. 2011.

TASSI, R. *et al.* (2006). *Determinação do parâmetro CN para sub-bacias urbanas do arroio Dilúvio - Porto Alegre/RS*. In: I Simpósio de Recursos Hídricos do Sul-Sudeste, Curitiba-PR.

TUCCI, C. E. M. *et al.* (1993). *Hidrologia: Ciência Aplicação*. vol 4. 1ª 17d. Editora da UFRGS/ABRH/EDUSP, Porto Alegre – RS. 943p.

TUCCI, C. E. M. (1998). *Modelos hidrológicos*. Ed. Universidade /UFRGS/Associação Brasileira de Recursos Hídricos, Porto Alegre – RS. 668p.