

ISSN: 2177-2738

ESTIMATIVA DA VARIABILIDADE ESPACIAL DE VAZÕES MÍNIMAS NA BACIA HIDROGRÁFICA DO ALTÍSSIMO RIO NEGRO, REGIÃO SUL-BRASILEIRA, COM APLICAÇÃO DO MODELO SWAT

ESTIMATED SPATIAL VARIABILITY OF LOW FLOW IN THE UPPER NEGRO RIVER WATERSHED, SOUTH BRAZIL REGION, WITH APPLICATION OF SWAT MODEL

Rodrigo Marcos de Souza¹
Irani dos Santos²

RESUMO

A vazão mínima pode ser definida como o fluxo de água de um rio presente em épocas mais secas. A sua estimativa no tempo e no espaço é uma tarefa difícil e geralmente apresenta erros significativos. Desta forma, o objetivo deste trabalho é avaliar a estimativa de vazões mínimas na bacia do Altíssimo Rio Negro - 788km² - por meio de modelagem distribuída, com a aplicação do modelo SWAT (*Soil & Water Assessment Tool*). Os resultados indicam que o modelo SWAT considera adequadamente os elementos que afetam diretamente o regime hidrológico das vazões mínimas. Também verificou-se que a maior variabilidade espacial das vazões q95 simuladas ocorre nas bacias com áreas de drenagem inferior à 100 km².

Palavras-chave: Vazões mínimas, variabilidade espacial, modelo SWAT.

Geógrafo e Mestre em Geografia pela UFPR. Doutorando do Programa de Pós Graduação em Geografia da Universidade Federal do Paraná (PPGEO - UFPR). Curitiba - Pr, Brasil. rmarcos@ufpr.br
 Geógrafo, Mestre em Ciências do Solo (UFPR) e Doutor em Geografia (UFSC). Professor adjunto do Departamento de Geografia da Universidade Federal do Paraná (UFPR). Curitiba - Pr, Brasil.

ABSTRACT

Low flow can be defined as the water flow of a river present in drought. Its estimate, in time and space, is a difficult task and usually presents significant errors. Thus, the goal of this study is to evaluate the estimate of low flows in the Upper Negro River Watershed - 788km² - through distributed modeling, with application of the SWAT model (Soil & Water Assessment Tool). The results indicate that the SWAT model considers adequately the elements that directly affect the hydrological regime of low flows. It was observed that the greater spatial variability of the simulated q95 flows occurs in basins with drainage areas less than 100 km².

www.geografia.ufpr.br/raega/

ISSN: 2177-2738

Key words: Low flows, spatial variability, SWAT model

1. INTRODUÇÃO

Atualmente os recursos hídricos encontram-se submetidos à demandas crescentes por múltiplos usos, sendo que sua disponibilidade adequada em quantidade e qualidade possui grande importância ambiental e econômica. Assim, o tema disponibilidade hídrica está no âmago de preocupações de pesquisadores, governantes e usuários de recursos hídricos. Devido à natureza dinâmica da hidrologia, uma discussão sobre disponibilidade hídrica obrigatoriamente envolve questões relacionadas a variabilidade de vazões no tempo e no espaço.

Tratando-se de disponibilidade hídrica, destacam-se com maior importância o estudo e entendimento das vazões mínimas. Apesar de ser um assunto tratado de forma recorrente na literatura científica, a abordagem do conceito de vazão mínima não se traduz em uma definição universal, mas sim apresenta uma diversidade de aproximações ao tema com algumas características em comum.

Dentre os trabalhos consultados, as definições de vazões mínimas seguem duas abordagens principais: com enfoque físico, centradas na origem das vazões mínimas e nos processos envolvidos; e com enfoque estatístico, centradas no comportamento de séries temporais.

No contexto das definições com enfoque físico, Sant'ana et al. (1989) descreve que as vazões mínimas correspondem aos trechos do hidrograma que apresentam uma diminuição lenta do escoamento, sendo este comportamento regido pela contribuição subterrânea. Para Silveira e Silveira

(2001), vazões mínimas são as vazões que ocorrem nos períodos de estiagem devido ao esgotamento de reservas do subsolo que afloram nas fontes e nos talvegues dos cursos da água. Também para Smakhtin (2001), as vazões mínimas são oriundas das descargas de águas subterrâneas, de lagos, pântanos ou do derretimento de geleiras.

Quanto ao enfoque estatístico, destaca-se Tucci (2002), que define as vazões mínimas ou de estiagem, como sendo as vazões que, em uma determinada série histórica, apresentam os menores valores da referida série ou que não atendem às necessidades das demandas.

Sendo um fenômeno complexo, as características do escoamento de vazão mínima dependem da interação da topografia, da geologia, do clima e do uso da terra. Segundo Funkhouser et al (2008), em muitas situações, a área de contribuição é o fator predominante para explicar a variabilidade das vazões mínimas, com substancial influência das precipitações, do grupo hidrológico do solo, da cobertura vegetal, da declividade da bacia e do uso do solo. Na mesma linha de raciocínio, Smakhtin (2001) cita que os fatores naturais que influenciam o comportamento das vazões mínimas, seja para perda ou ganho, incluem a distribuição a as propriedades de infiltração dos solos, as características hidráulicas e extensão de aqüíferos, a taxa e a freqüência de recarga do aqüífero, a evapotranspiração da bacia, a distribuição da vegetação, a topografia e o clima.

Assumindo-se vazão mínima como o fluxo de um rio que ocorre em épocas mais secas, a mesma pode ser definida a partir da curva de permanência das vazões. A curva de permanência fornece a porcentagem de tempo que uma determinada vazão é igualada ou superada em um determinado período histórico. Conforme Silveira e Silveira (2001), a vazão com 95% de permanência (Q₉₅), pode ser um índice representativo de vazão mínima.

De acordo com Tucci (1998) a hidrologia aborda os fenômenos complexos do ciclo hidrológico, os quais dependem de uma série de fatores. No entanto, a medição de todas as variáveis que influenciam a dinâmica de uma bacia hidrográfica é uma tarefa árdua, sendo até mesmo impossível em

determinadas vezes, devido ao longo prazo exigido e aos custos de medições e monitoramento (MACHADO, 2002). Desta forma, a modelagem surge como alternativa para a obtenção de informações sobre a dinâmica e processos na escala da bacia hidrográfica.

Neste contexto, este trabalho tem como objetivo avaliar a estimativa de vazões mínimas na bacia hidrográfica do Altíssimo Rio Negro (788 km²), Região sul-brasileira, com a aplicação do modelo Swat (SOIL AND WATER ASSESSMENT TOOL.)

O SWAT é um modelo matemático de domínio público, desenvolvido a partir de 1996 nos EUA pelo *Agricultural Research Service* e pela *Texas A&M University*, tendo por objetivo prever o efeito das ações de uso e manejo do solo sobre os recursos hídricos, produção de sedimentos, produção de nutrientes e pesticidas, sendo aplicado em pequenas e grandes bacias. A modelagem é efetuada de forma distribuída por sub-bacias e pode-se simular períodos de tempo longos e contínuos, com discretização em sub-diários, diários, mensais e anuais. O equacionamento completo do modelo pode ser consultado em Neitsch *et al* (2002).

De acordo com Gassman *et al.* (2007), o modelo SWAT vem sendo utilizado de forma corrente após o seu desenvolvimento. Muitas aplicações foram realizadas por agências governamentais, principalmente na Europa e nos Estados Unidos, para avaliar mudanças climáticas, efeitos do uso do solo sobre os recursos hídricos e avaliação da capacidade do modelo para futuras aplicações.

No Brasil, Machado (2002) aplicou o modelo para simular o escoamento e a produção de sedimentos em uma microbacia hidrográfica do Ribeirão dos Marins, afluente do rio Piracicaba/SP. Baldissera (2005) aplicou o modelo para simular as vazões líquidas mensais na Bacia do Rio Cuiabá. Souza (2008) utilizou o SWAT como ferramenta para a gestão de recursos hídricos, com aplicação na bacia hidrográfica do Altíssimo Rio Negro. Santos et al (2010) avaliaram o impacto de diferentes cenários de usos do solo na vazão e na produção e transporte de sedimentos na bacia hidrográfica do Rio Apucaraninha. Em uma abordagem geográfica, Schultz *et al.* (2010)

propuseram uma aproximação entre a simulação hidrológica realizada pelo modelo e a teoria do geossistema. Algumas instituições públicas e privadas também fazem uso do modelo para predizer problemas relacionados à erosão e assoreamento, principalmente empresas de geração de energia elétrica, conforme Santos *et al.* (2005).

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Área de Estudo

A bacia do Altíssimo Rio Negro é aqui definida como a área de drenagem à montante da estação hidrossedimentométrica de Fragosos. A figura 1 mostra a localização da bacia, a hidrografia correspondente aos canais principais e as estações pluviométricas utilizadas no trabalho.

A bacia possui uma área de 788 km² e está localizada na divisa dos estados do Paraná e de Santa Catarina, entre as latitudes 25°55'73"S e 26°14'17"S; e entre as longitudes 48°56'34"W e 49°23'12"W.

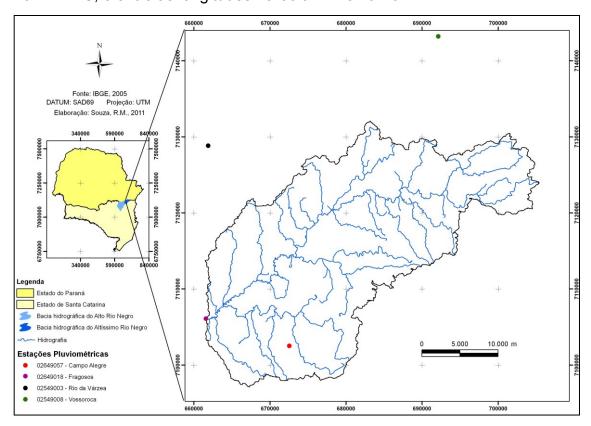


Figura 1 – Bacia hidrográfica do Altíssimo Rio Negro

O clima na área de estudo é classificado como subtropical úmido, Cfa, de acordo com a classificação de Koeppen. Para Mendonça e Oliveira (2007) uma das características que distingue este tipo de clima do restante do país é uma maior regularidade na distribuição anual das chuvas – entre 1.250 e 2.000mm – aliada as baixas temperaturas de inverno.

O uso do solo foi determinado baseado em uma imagem LandSat, sensor TM-5, com órbitas ponto 220/79, 220/78 e 221/78, de julho de 2007. Os usos do solo mapeados constam na tabela 1.

Tabela 1 – Uso e cobertura do solo da bacia hidrográfica

Uso	Cobertura (%)
Floresta Ombrófila Mista	38
Pastagens	28
Agricultura	24
Pinus	10
Corpos Hídricos	<1

Fonte: Labhidro/UFSC (2007) - Org. SOUZA, R.M.

A distribuição dos solos na bacia, na escala 1/250.000, considerando somente o primeiro nível categórico, consta na tabela 2.

Tabela 2 – Tipos de solo da bacia hidrográfica

Ocorrência (%)					
44					
22					
13					
11					
8					
2					

Fonte: EMBRAPA (1979) - Org. SOUZA, R.M.

2.2 Dados Climáticos e Hidrológicos

Foi utilizada a série de vazão diária do período de 01/01/1980 a 30/11/2010, da estação fluviométrica de Fragosos (65090000), localizada no município de Piên/Pr, com coordenadas 26°09'19"S e 49°23'03"W. Os dados

meteorológicos são oriundos da estação climatológica 02549041 (Pinhais), operada pelo Instituto Tecnológico SIMEPAR, localizada no município de Pinhais, região metropolitana de Curitiba, nas coordenadas geográficas 25° 25'S e 49° 08'W, com altitude de 930 m.

A evapotranspiração potencial foi calculada pelo método de Penman modificado (Santos, 2001) a partir dos dados climatológicos da estação Pinhais.

As séries de precipitação utilizadas, médias diárias do período de 01/01/1980 a 30/11/2010, são oriundas das estações pluviométricas com código ANA (Agência Nacional de Águas) 02549008 (Vossoroca), 02549003 (Rio da Várzea), 02649018 (Fragosos) e 02649057 (Campo Alegre) conforme a figura 1.

2.3 Procedimentos metodológicos da simulação de vazão com o modelo SWAT

A figura 2 representa sinteticamente os processos do modelo SWAT relacionados à geração de vazões.

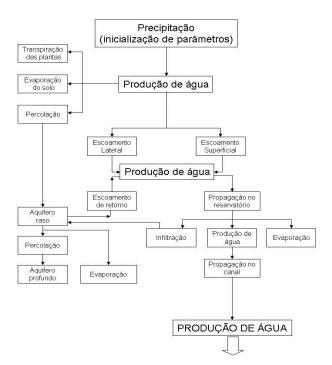


Figura 2 – Fluxograma do modelo SWAT; modificado de KING et al, 1996

Para a simulação, o modelo requer, além das informações mostradas anteriormente, o modelo digital do terreno, obtido a partir de cartas topográficas do IBGE, ano 1992, na escala 1/50.000 e um banco de dados com diversas informações a respeito das características físico-hídricas dos solos. Este banco foi organizado pelo Laboratório de Hidrogeomorfologia da Universidade Federal do Paraná (LHG/UFPR), com base em informações da EMBRAPA (1979).

Neste trabalho, foram simuladas e avaliadas as vazões mínimas de um período de aproximadamente 26 anos (01/01/1984 a 30/11/2010) em 47 subbacias (figura 3), com áreas variando entre aproximadamente 4km² e 44km², sendo que a sub-bacia 43 corresponde ao exutório da bacia do Altíssimo Rio Negro. Obteve as vazões Q95 de cada sub-bacia a partir da série de vazões simuladas. Na avaliação da estimativa, trabalhou-se com a vazão específica, q95 (L/s.km²) de cada sub-bacia.

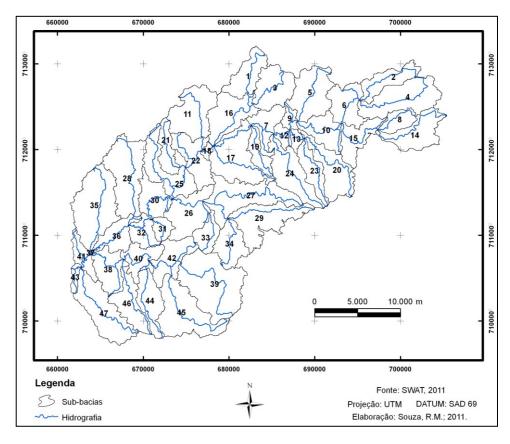


Figura 3 – Divisão da bacia hidrográfica

Simulações hidrológicas por meio de modelos são realizadas em duas etapas, uma de calibração e outra de validação. O período simulado inicialmente é chamado de período de calibração, onde a simulação é realizada para ajuste do modelo, sem utilizar toda a série de dados. Posteriormente, é realizada a validação, onde com os valores dos parâmetros oriundos da calibração, simula-se o restante da série. A validação é necessária para verificar se o modelo está representando adequadamente os processos físicos da bacia. Espera-se que no período de validação o modelo apresente desempenho próximo ao do período de calibração.

A calibração dos parâmetros foi realizada manualmente, com auxílio do software SWAT-CUP (Software de calibração automática) para o período de 01/01/1984 a 31/12/1997 e validação entre 01/01/1998 a 30/11/2010, considerando o período de aquecimento de 01/01/1980 a 31/12/1983. O aquecimento é necessário para considerar condições de umidade antecedente não medidas.

A simulação foi efetuada em intervalo de tempo diário, com os valores dos parâmetros sendo atribuídos a todas as sub-bacias. Os parâmetros foram escolhidos baseados na literatura e na técnica de tentativa e erro, sendo calibrados através da opção de substituir valor ou multiplicação. Substituir valor significa que o valor atribuído ao parâmetro torna-se o mesmo para toda a bacia. A multiplicação mantém a proporção, visto que cada sub-bacia, HRU ou tipo de solo, apresentam um valor inicial próprio para determinados parâmetros. A tabela 3 mostra os parâmetros e os valores utilizados na simulação.

Além da inspeção visual do hidrograma simulado x observado, os resultados foram avaliados por meio de análise estatística. Utilizou-se o coeficiente de Nash - Sutcliffe (1970) (*COE*), tradicionalmente empregado para avaliar ajustes de modelos hidrológicos, porém, dando maior peso às vazões máximas. Desta forma, adotou-se o log de *COE*, o qual valoriza ajustes de vazões mínimas. Ambos os coeficientes variam de -∞ a 1, sendo que 1 representa o ajuste ideal e valores acima de 0,70 podem ser considerados satisfatórios. O coeficiente e o log do coeficiente são definidos por:

$$COE = 1 - \frac{\sum (Qsim - Qobs)^2}{\sum (Qobs - \overline{Qobs})^2}$$
(01)

ISSN: 2177-2738

$$COE_{\log} = 1 - \frac{\sum (Log \ Qsim - Log \ Qobs)^2}{\sum (Log \ Qobs - \overline{LOg \ Qobs})^2}$$
(02)

onde Qsim é a vazão simulada, Qobs é a vazão observada e \overline{Qobs} é a média da vazão observada.

Tabela 3 – Parâmetros utilizados

N°	Parâmetro Descrição						
01	Alpha Bf (1)	Constante de recessão do escoamento	0,57				
02	Canmx (1)	Interceptação máxima da vegetação	42,00				
03	Cn2 (2)	Curva Número	0,31				
04	Esco (1)	Coeficiente de compensação da evaporação no solo	0,21				
05	Gw_Delay (1)	Tempo de recarga do aqüífero	90				
06	Gw_Revap (1)	Coeficiente que controla o fluxo de água da zona saturada para a não saturada	0,10				
07	Sol_Awc (2)	Capacidade de água disponível no horizonte do solo	1,18				
80	Sol_K (2)	Condutividade hidráulica saturada	2,62				
09	Slope (2)	Declividade	2,50				
10	Slsubbsn (2)	Comprimento da vertente	0,57				

Fonte: SWAT, 2011, Org: SOUZA, R.M.

Operação realizada: (1) substituição, (2) multiplicação.

Vc*: valor calibrado.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A tabela 4 compara os valores das vazões observadas e simuladas dos períodos de calibração e simulação. Todos os períodos apresentaram COE de 0,76.

As figuras 4 e 5 mostram os hidrogramas das vazões observadas e simuladas dos períodos de calibração e validação.

Tabela 4 – Vazões observadas e simuladas

		Período de calibração (01/01/1984 a 31/12/1997)						
Observado	Simulado	Diferença %						
19,95	21,10	6						
6,94	7,29	5						
8,81	9,25	5						
	19,95 6,94 8,81	19,95 21,10 6,94 7,29						

Período de validação (01/01/1998 a 30/11/2010) Observado Simulado Diferença % 20,58 Q média (m³/s) 18,97 8 6,43 Q95 (m³/s) 5,23 19 8,16 q95 (L/s.km²) 6,64 19

Período de simulação (01/01/1984 a 30/11/2010) Observado Simulado Diferença % 20,25 Q média (m³/s) 20,08 1 6,65 Q95 (m³/s) 6,05 9 8,44 q95 (L/s.km²) 7,68 9

Fonte: ANA, 2010 e SWAT, 2011

Org.: SOUZA, R.M.

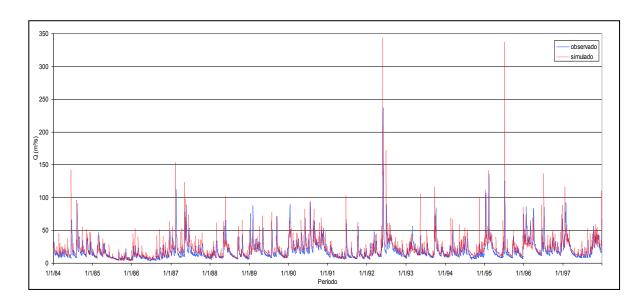
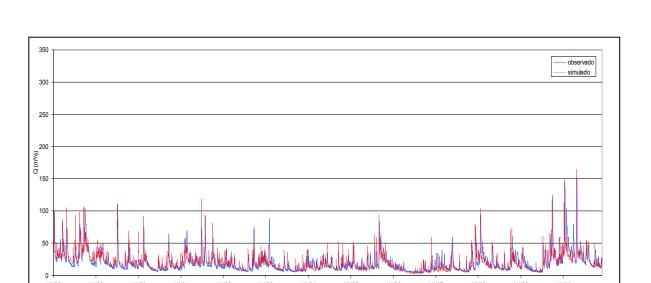


Figura 4 – Hidrograma das vazões observadas e simuladas do período de calibração, 01/01/1984 A 31/12/1997



ISSN: 2177-2738

Figura 5 – Hidrograma das vazões observadas e simuladas do período de validação, 01/01/1998 a 30/11/2010

As figuras mostram que as recessões e as vazões baixas foram representadas de forma satisfatória, ou seja, o modelo representou adequadamente o comportamento hidrológico da bacia.

A figura 6 espacializa as informações da q₉₅ simulada, mostrando a sua variabilidade espacial.

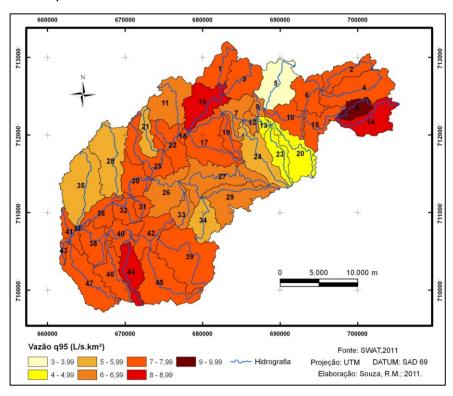


Figura 6 – Vazão q95 simulada em cada sub-bacia

Verifica-se na figura 6 que a maior variabilidade espacial das vazões q₉₅ está nas bacias de cabeceira, com todo o intervalo das vazões q₉₅ simuladas presente nestas bacias. A menor q₉₅ simulada foi verificada na bacia 05 (3,74 L/s.km²) e a maior foi verificada na bacia 08 (9,25 L/s.km²). De uma forma geral, a vazão simulada está no intervalo de 7,00 a 7,99 L/s.km².

A figura 7 apresenta a variabilidade das vazões q₉₅ conforme a área de contribuição das sub-bacias. A linha indica o valor simulado da bacia do altíssimo Rio Negro como um todo, representada pela bacia 43.

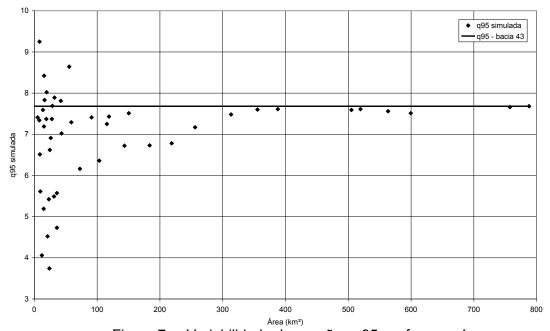


Figura 7 – Variabilidade das vazões q95 conforme a área

Nota-se que quanto menor a área de drenagem, principalmente quando inferior a 100 km², maior é a variabilidade das vazões q₉₅ simuladas. Verifica-se também que com o aumento da área de drenagem, existe uma tendência do aumento e de valores semelhantes da q₉₅ simulada.

Perante a complexidade de fatores que influenciam as vazões mínimas, optou-se por realizar uma correlação entre a q₉₅ simulada e elementos considerados pelo modelo SWAT na simulação. A tabela 5 mostra a matriz de correlação obtida.

Tabela 5 – Matriz de correlação

	q95	RL	СХ	LB	NX	GM	PVA	FOM	PAST	AGRL	PINUS	Ad (km²)	P.M.A (mm)
q95	1												
RL	0,42	1,00											
СХ	-0,40	-0,47	1,00										
LB	-0,01	-0,21	0,36	1,00									
NX	0,15	-0,37	-0,25	-0,30	1,00								
GM	0,34	-0,17	0,07	0,24	-0,16	1,00							
PVA	-0,27	-0,18	-0,41	-0,12	-0,25	0,04	1,00						
FOM	-0,26	-0,18	0,13	0,31	0,07	0,05	-0,10	1,00					
PAST	0,69	0,51	-0,32	0,24	-0,19	0,18	-0,13	-0,22	1,00				
AGRL	0,16	-0,14	-0,41	-0,38	0,36	-0,14	0,38	-0,22	-0,36	1,00			
PINUS	-0,57	-0,21	0,55	-0,13	-0,19	-0,08	-0,13	-0,36	-0,45	-0,36	1,00		
Ad (km²)	0,28	-0,08	0,07	-0,03	-0,09	0,55	0,00	0,09	0,04	-0,09	-0,03	1,00	
P.M.A (mm)	-0,03	-0,45	0,02	-0,35	0,59	0,02	-0,04	0,01	-0,49	0,38	0,12	0,32	1

Fonte: SWAT, 2011 - Org.: SOUZA, R.M.

RL: Neossolo – CX: Cambissolo – LB: Latossolo – NX: Nitossolo – GM: Gleissolo – PVA: Argissolo FOM: Floresta Ombrófila Mista – PAST: Pastagens – AGRL: Agricultura – Ad: área de drenagem P.M.A: precipitação média anual

A matriz de correlação mostra que o uso do solo do tipo pastagem apresenta a maior correlação com a vazão q₉₅ simulada, assim quanto maior a proporção de pastagem na sub-bacia, maior a q₉₅ simulada. A figura 8 mostra a relação entre a q₉₅ simulada e a proporção de cobertura do solo por pastagens nas sub-bacias.

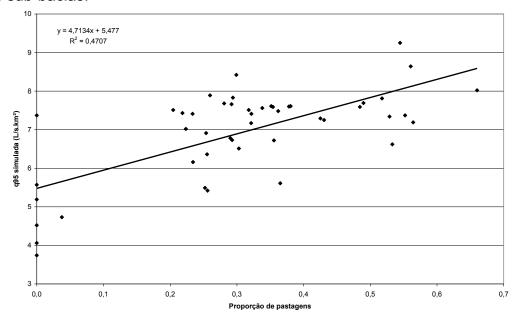


Figura 8 – Relação entre q95 simulada e pastagens

Embora a pastagem seja o elemento com maior correlação com a vazão q95 simulada, esse elemento não é suficiente para explicar o comportamento das vazões mínimas, conforme mostra o coeficiente de determinação (R^2) da figura 9. Denota-se que características isoladas são incapazes de explicar a variabilidade espacial das vazões mínimas simuladas pelo modelo SWAT.

Buscando o entendimento e a identificação de elementos que afetam significativamente o comportamento das vazões mínimas, optou-se por realizar regressões múltiplas utilizando os elementos mostrados na tabela 5. Os coeficientes obtidos na regressão foram aplicados para obtenção da q95 prevista, a qual é comparada com a q95 simulada pelo modelo SWAT. A figura 9 mostra a regressão entre as vazões q95 simuladas e a porcentagem de ocorrência dos diferentes tipos de solo nas sub-bacias.

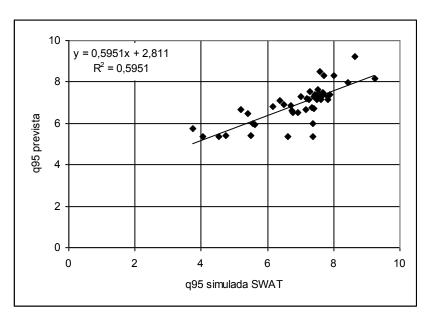


Figura 9 – Modelo de regressão com tipos de solo

Entre os processos responsáveis pela geração das vazões mínimas Smakthin (2001) cita as descargas de águas subterrâneas. As descargas são oriundas de aqüíferos, os quais podem ser confinados em rochas ou em meio poroso (rocha porosa ou solos). O resultado na figura 9 mostra que 60% do

comportamento das vazões mínimas simuladas pode ser atribuído a distribuição espacial dos solos nas sub-bacias.

A figura 10 mostra a regressão entre as vazões q₉₅ simuladas e a porcentagem de ocorrência dos diferentes usos do solo nas sub-bacias.

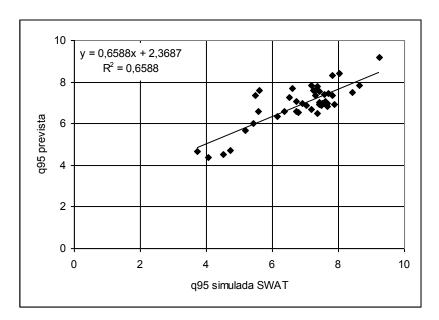


Figura 10 – Modelo de regressão com usos do solo

Segundo Tucci e Clarke (2001), alterações na superfície de uma bacia hidrográfica causam impactos significativos sobre o escoamento, afetando o comportamento das enchentes, as vazões médias e as vazões mínimas. Conforme mostra a figura 10, nota-se que existe uma boa relação entre as vazões mínimas simuladas e as previstas pela regressão com usos do solo, com R^2 de 0,66. Pode-se atribuir este resultado a variabilidade de usos das sub-bacias. Como estes usos não estão concentrados, as sub-bacias apresentam uma boa cobertura vegetal, refletindo no bom desempenho da regressão.

A figura 11 apresenta o resultado da regressão múltipla com todos os elementos da tabela 5.

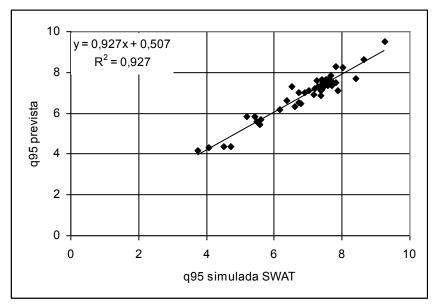


Figura 11 – Modelos de regressão com diversos elementos

A figura 11 mostra a boa relação entre os elementos utilizados nesta regressão e as vazões q₉₅ simuladas, com R^2 de 0,93. Este resultado é condizente com a teoria das vazões mínimas, mostrando que os vários elementos citados na literatura de forma recorrente realmente podem ser utilizados para sua estimativa na bacia estudada.

4. CONCLUSÕES

O objetivo geral deste trabalho foi avaliar a estimativa de vazões mínimas efetuada com a aplicação do modelo SWAT na bacia hidrográfica do Altíssimo Rio Negro.

A simulação de vazão com o modelo SWAT apresentou ajuste satisfatório, principalmente no que diz respeito a vazões mínimas, com COE_{log} de 0,76. Pode-se concluir que o modelo representou de forma satisfatória o comportamento hidrológico da bacia hidrográfica do Altíssimo Rio Negro. Este resultado é significativo, mostrando que o SWAT pode representar a física de bacias hidrográficas de forma coerente.

A avaliação da estimativa de vazões mínimas foi realizada com auxílio de métodos estatísticos de correlação e regressão. Conforme resultados obtidos, notou-se que ao estimar esta faixa de vazões, o modelo SWAT

considera as variáveis adequadamente na sua estrutura. Estes resultados também comprovaram a teoria sobre as vazões mínimas, mostrando que os vários elementos citados de forma recorrente realmente podem ser utilizados para sua estimativa.

Constatou-se que a variação espacial dos resultados simulados pelo modelo guarda relação com as características físicas das sub-bacias, as quais compõem os bancos de dados do modelo e são variáveis de entrada, ou seja, a complexidade estrutural do modelo SWAT garante a representatividade física da modelagem distribuída.

No que concerne a variabilidade espacial das vazões mínimas, nota-se que ocorre uma acentuada variabilidade em bacias com área inferior à 100 km², Pode-se atribuir este resultado ao fato de que quanto menor o tamanho da bacia, mais evidentes ficam os processos hidrológicos. Em bacias maiores, estes processos acabam sendo amenizados pela área, podendo a resposta hidrológica ser considerada como uma média das respostas das bacias menores, ocultando a variabilidade espacial dos processos hidrológicos.

REFERÊNCIAS

BALDISSERA, G. C. Aplicabilidade do modelo de simulação hidrológica SWAT (soil and water assessment tool), para a bacia hidrográfica do rio Cuiabá/MT. 2005. Dissertação (Mestrado em física e meio ambiente) - Instituto de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal do Mato Grosso, Cuiabá/MT.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. In: **REUNIÃO TÉCNICA DE LEVANTAMENTO DE SOLOS**, Rio de Janeiro, vol. 10, 1979.

FUNKHOUSER, J. E.; ENG, K.; MOIX, M. W. Low-flow characteristics and regionalization of low-flow characteristics for selected streams in Arkansas: **U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2008-5065.** Reston, Virginia. 170 p. 2008

GASSMAN, P.W; REYES, M.R; GREEN, C.H; ARNOLD, J.G. The soil and water assessment tool: historical development, applications, and future research directions. Iowa State University, .Center for agricultural and rural development. Working paper 07-WP 443, 2007. Disponível em http://www.card.iastate.edu/publications/DBS/PDFFiles/07wp443.pdf. Acesso em 01/12/2008.

KING, K. W.; ARNOLD J. G.; WILLIAMS, J. R.; SRINIVASAN R. **Soil and water assessment tool –SWAT**. Texas, Agricultural Research Service, 1996.

MACHADO, R. E. Simulação de escoamento e de produção de sedimentos em uma bacia hidrográfica utilizando técnicas de modelagem e geoprocessamento. 2002. Tese (Doutorado em Agronomia). Escola Superior de Agronomia "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba/SP.

MENDONÇA F.; DANNI-OLIVEIRA, I. M. **Climatologia**: noções básicas e climas do Brasil. São Paulo. Oficina de textos, 2007.

NASH J.E., SUTCLIFFE J.E. River flow forecasting through conceptual models. Part I - A discussion of principles. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 10, p. 282-290, 1970.

NEITSCH, S.L.; ARNOLD, J.G; KINIRY, J.R.; WILLIAMS, J.R; KING, K.W. **Soil and water assessment tool**: Theoretical documentation, vs. 2000. Texas Texas Water Resources Institute, College Station, 2002.

SANT'ANA, R. F.; FIOR, M.T.B; KAVISKI, E. Aproveitamento hidrelétrico de pequeno porte: regionalização de vazões de estiagem, de curvas de permanência e de vazões máximas de pequenas bacias hidrográficas do Estado do Paraná, vol. I a IV. Curitiba, CEHPAR, 1989.

SANTOS, I. Modelagem geobiohidrológica como ferramenta no planejamento ambiental: estudo da bacia hidrográfica do rio pequeno, São José dos Pinhais – Pr. 2001. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba/Pr.

SANTOS, I, ANDRIOLO, M.V., GIBERTONI, R.C., PEREIRA FILHO, D.L.B., KAVISKI, E., MÜLLER, I.I., ROHN, M.C., NISHIDA, E., SILVA, R.C. Desenvolvimento de modelo de avaliação da qualidade de água e transporte de sedimentos para pequenas e médias centrais elétricas: modelagem da erosão e transporte de sedimentos. Curitiba/PR. Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (LACTEC), 2005.

SANTOS, I. ANDRIOLO, M.V., GIBERTONI, R.C. KOBIYAMA, M. Use of the SWAT model to evaluate the impact of different land use scenarios on discharge and sediment transport in the Apucaraninha River watershed, southern Brazil. In: BANASIK, K.; HOROWITZ, A. J.; OWENS, P. N.; STONE,

ISSN: 2177-2738

M.;WALLING, D. E.. (Org.). **Sediment Dynamics for a Changing Future**. 1^a ed. Wallingford: IAHS Press no 337, vol. 1, 2010, Cap. 42, p. 322-328.

SCHULTZ, G.B., SOUZA, R.M., SANTOS, I. **Modelagem hidrológica distribuída e de base física: uma abordagem geossistêmica**. SIMPÓSIO NACIONAL DE GEOMORFOLOGIA, VIII, 2010. Recife/PE. Pg 01 – 15.

SILVEIRA, A. L. L.; SILVEIRA, G. L.. Vazões mínimas. In: PAIVA, J. B. D.; PAIVA, E. M. C. D. (Organizadores). **Hidrologia aplicada à gestão de pequenas bacias hidrográficas.** Porto Alegre, ABRH, 2001. Cap.5, p. 125-164.

SMAKHTIN, Vladimir U. Low flow hydrology: a review. **Journal of Hydrology**, Amsterdam v. 240, p. 147-186, 2001.

SOUZA, R.M. O modelo SWAT como ferramenta de gestão de recursos hídricos: aplicação na bacia do Altíssimo Rio Negro. 2008. Monografia (Bacharelado em geografia). Setor de Ciências da Terra, Depto. Geografia, Universidade Federal do Paraná.

TUCCI, C. E. M.. **Modelos Hidrológicos**. Porto Alegre: Editora da Universidade/UFRGS – RS, 1998.

TUCCI, C. E. M.; CLARKE, R.T. Regionalização hidrológica. In: PAIVA, J. B. D; PAIVA, E. M. C. D. **Hidrologia aplicada à gestão de pequenas bacias hidrográficas.** Porto Alegre, ABRH, 2001. Cap. 7, p. 169-222.

TUCCI, C. E. M.. **Regionalização de Vazões**. Porto Alegre: Editora da Universidade/UFRGS – RS, 2002.

Recebido em 06/06/2012.

Aceito em 24/04/2013.