

**V SimpGEO - SIMPÓSIO PARANAENSE DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA EM
GEOGRAFIA: Estado da Arte, tendências e desafios**

**REGIONALIZAÇÃO DE VAZÕES MÍNIMAS NA BACIA HIDROGRÁFICA
DO ALTÍSSIMO RIO NEGRO, REGIÃO SUL-BRASILEIRA, COM A
APLICAÇÃO DO MODELO SWAT**

Rodrigo Marcos de Souza / Irani dos Santos

Universidade Federal do Paraná – Programa de Pós-Graduação em Geografia

rmarcos@globocom.com / irani@ufpr.br

Regionalização hidrológica é transferência de informações de uma bacia com dados disponíveis para outra bacia sem dados disponíveis, sendo indispensável sua utilização para avaliar a disponibilidade hídrica de bacias não monitoradas. Vazão mínima é o fluxo de água que corre em um rio no período de seca. Este trabalho apresenta os resultados preliminares da regionalização de vazões mínimas com a aplicação do modelo SWAT na bacia hidrográfica do Altíssimo Rio Negro. A bacia (787,8 km²) está localizada na divisa dos estados de Santa Catarina e Paraná. A área é caracterizada pela Floresta Ombrófila Mista, pelo reflorestamento de pinus, e pelas atividades agro-pastoris. Foram simulados dados diários, entre 1994 e 2002, obtendo-se como resultado coeficiente de Nash-Sutcliffe de 0,66.

Palavras-chave: regionalização hidrológica, vazões mínimas, modelo SWAT

Hydrologic regionalization is to transfer information from one basin with available data to another basin without available data, their use is essential to assess the water resource in basins not monitored. Low streamflow is the flow of water flowing into a river in a drought. This paper presents the preliminary results of the regionalization of low streamflow through the application of SWAT model in Upper Negro River watershed. This watershed (787,8 km²) is located on the border between the states of Santa Catarina and Paraná. The region is characterized with the Subtropical Rain Forest, pine reforestation, and the agriculture-pastoral activities. Were simulated daily data between 1994 and 2002, obtaining as a result of Nash-Sutcliffe coefficient of 0,66.

Key words: hydrological regionalization, low streamflows, SWAT model.

Eixo temático: Paisagem e Análise Ambiental

INTRODUÇÃO

As vazões mínimas são utilizadas como referencial para a concessão de outorgas de direito de uso dos recursos hídricos, sendo alvo de preocupações de diversos órgãos governamentais e de pesquisadores no que concerne à disponibilidade hídrica. A estimativa da disponibilidade hídrica requer informações de monitoramento

nem sempre disponíveis nas escalas de espaço e tempo adequadas, sendo que no Brasil são raras as bacias com área de drenagem inferior a 100km² que possuem monitoramento (SANTOS, 2009).

Assim, geralmente as informações de disponibilidade hídrica são obtidas nos locais de interesse, utilizando-se técnicas de regionalização. Para Tucci (2002) a regionalização é a transferência de informações de um local para outro dentro de uma área com comportamento hidrológico semelhante. Tal informação pode ser na forma de variável, função ou parâmetro.

O SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*) é um modelo matemático de domínio público desenvolvido a partir de 1996 nos EUA pelo *Agricultural Research Service e pela Texas A&M University* e incorpora grande parte dos avanços obtidos em modelos anteriores. O modelo tem 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. É distribuído, ou seja, tem as suas variáveis e parâmetros dependendo do espaço e do tempo. A principal qualidade deste tipo de modelo é avaliada pela capacidade em representar melhor a variação espacial do sistema (TUCCI, 1998), sendo que o SWAT realiza a simulação de vazões considerando, além das séries temporais, diversos fatores espaciais, como relevo, hidrografia, uso do solo, tipo do solo.

OBJETIVO

O objetivo deste estudo é apresentar uma proposta de regionalização de vazões mínimas da bacia hidrográfica do Altíssimo Rio Negro - Região Sul-Brasileira, com a aplicação do modelo SWAT.

REFERENCIAL TEÓRICO

VAZÕES MÍNIMAS

Entende-se por vazão a quantidade de fluido que passa por uma seção em um determinado período de tempo. A vazão pode ser subdividida em vazões mínimas, vazões médias e vazões máximas.

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 talwegues dos cursos da água. Para Sant'ana et al (1989), em um hidrograma, as vazões mínimas correspondem aos trechos que apresentam uma

diminuição lenta do escoamento, regido pela contribuição subterrânea. Para Tucci (2002), as vazões mínimas ou de estiagem, são as vazões que, em uma determinada série histórica, apresentam os menores valores da referida série ou que não atendem às necessidades das demandas. Esta definição é subjetiva, pois a vazão de estiagem não se caracteriza a partir de um valor da série histórica e um rio, no período de cheias, pode não atender a demanda da área que abastece. Segundo Smakhtin (2001), o termo vazões mínimas pode ter significados diferentes, de acordo com o interesse do estudo. Na linha de estudo deste trabalho, o termo pode ser considerado como fluxos reais de um rio que ocorre nas épocas secas.

A origem das vazões mínimas, para Smakhtin (2001), são as descargas de águas subterrâneas, de lagos, pântanos ou do derretimento de geleiras. A magnitude anual das vazões mínimas, a variabilidade da vazão e a taxa de esgotamento na ausência de chuvas, a duração dos eventos de vazão mínima, a participação relativa das vazões mínimas no hidrograma das vazões, são algumas das características tratadas pela hidrologia no estudo das vazões mínimas.

As vazões de referência para outorga de direito de uso de recursos hídricos são definidas em tendo como base vazões mínimas. São exemplos de vazão de referência a $Q_{7,10}$ (vazão de 7 dias de duração e com 10 anos de tempo de retorno) e a Q_{95} da curva de permanência (parcela do tempo no qual uma vazão é igualada ou superada, neste caso, Q_{95} corresponde a 95% do tempo). Assim, o conhecimento da magnitude e da frequência das vazões mínimas é importante para o planejamento de recursos hídricos, manutenção da quantidade e da qualidade da água para irrigação, recreação e conservação da vida de animais (SMAKHTIN, 2001). Para Silveira e Silveira (2001) o conhecimento das vazões mínimas de uma bacia hidrográfica é elemento básico em estudos de disponibilidade hídrica e preservação ambiental por estar vinculado a períodos críticos de oferta de água.

REGIONALIZAÇÃO DE VAZÕES

Segundo Tucci (2002) um dos grandes desafios da hidrologia é o conhecimento adequado do comportamento dos processos hidrológicos. O entendimento geralmente é qualitativo, fato que nem sempre proporciona o adequado gerenciamento de recursos hídricos.

Assim, conhecer o comportamento hidrológico de uma bacia hidrográfica, frente à atual demanda crescente de recursos hídricos, é fator preponderante para

avaliação da disponibilidade hídrica. O monitoramento seria uma forma para o início de um estudo e o conseqüente conhecimento de uma bacia. FIOREZE Et Al (2008) afirma que para a determinação da correta disponibilidade hídrica, faz-se necessário um monitoramento contínuo e a realização de estudos complementares, como o acesso a série histórica de vazões.

Ocorre que no Brasil, segundo Santos (2009), existe o predomínio de monitoramento em bacias com área de drenagem superior a 100 km², existindo uma lacuna para bacias com áreas inferiores. Então, devido à ausência generalizada de monitoramento para pequenas bacias hidrográficas e a ocorrência de vazios na rede de monitoramento em médias e grandes bacias hidrográficas do Brasil, existe a necessidade da busca por alternativas que permitam o conhecimento do comportamento hidrológico em bacias sem dados.

A regionalização hidrológica é o método de transferência de uma informação hidrológica oriunda de uma bacia com comportamento hidrológico conhecido para outra bacia na qual não se dispõe de dados medidos. Para Diniz (2008), seu uso é complexo, nunca está finalizada ou totalmente confiável, entretanto, não significa que não pode ser usada. O referido autor cita que princípios e lógicas desenvolvidas por diversas disciplinas relacionadas com a hidrologia são utilizadas no processo de regionalização.

Baena et al (2002), afirma que nos estudos de regionalização, devem-se considerar as características físicas e climáticas da bacia que mais influenciam a distribuição espacial da vazão e que sejam de fácil medição. Sousa (2009) defende o uso de sistemas computacionais em estudos de regionalização hidrológica, considerando que estes estudos envolvem procedimentos matemáticos e estatísticos aplicados as séries de vazões e características físicas e climáticas da bacia hidrográfica.

Para Sousa (2009) em um estudo de regionalização, deve-se definir uma região hidrologicamente homogênea, na qual as características físicas e climáticas têm variações mínimas e sua delimitação depende da metodologia de regionalização escolhida. Para uma mesma área, de acordo com a variável de interesse, pode-se então definir diferentes regiões hidrologicamente homogêneas, visto que os processos responsáveis no comportamento das vazões máximas são diferentes daqueles que atuam nas vazões mínimas.

Tucci (2002) cita que a regionalização hidrológica pode ser realizada para:

- Variáveis: quando uma variável como a precipitação média, vazão de enchente, vazão média, vazão mínima, entre outras, pode ser determinada numa região com base em relações estabelecidas através dos dados pontuais existentes;
- Funções: quando uma função hidrológica como a curva de intensidade, curva de permanência, curva de regularização, entre outras, pode ser determinada numa região com base em dados hidrológicos existentes.
- Parâmetros: os parâmetros de uma função ou de modelo matemático podem ser determinados pela sua relação com as características físicas das bacias. Tal procedimento pode ser realizado através do ajuste do modelo com base em dados observados de algumas bacias com dados e regionalizados os parâmetros com base nas características físicas que procuram representar.

MATERIAIS E MÉTODOS

ÁREA DE ESTUDO

Neste trabalho, definiu-se a área a montante da estação hidrossedimentológica de fragosos como sendo a bacia hidrográfica do Altíssimo Rio Negro. A referida bacia está localizada na divisa dos estados do Paraná e de Santa Catarina, entre as coordenadas, entre as latitudes $25^{\circ}55'73''\text{S}$ e $26^{\circ}14'17''\text{S}$; e entre as longitudes $48^{\circ}56'34''\text{W}$ e $49^{\circ}23'12''\text{W}$, conforme mostra a figura 1.

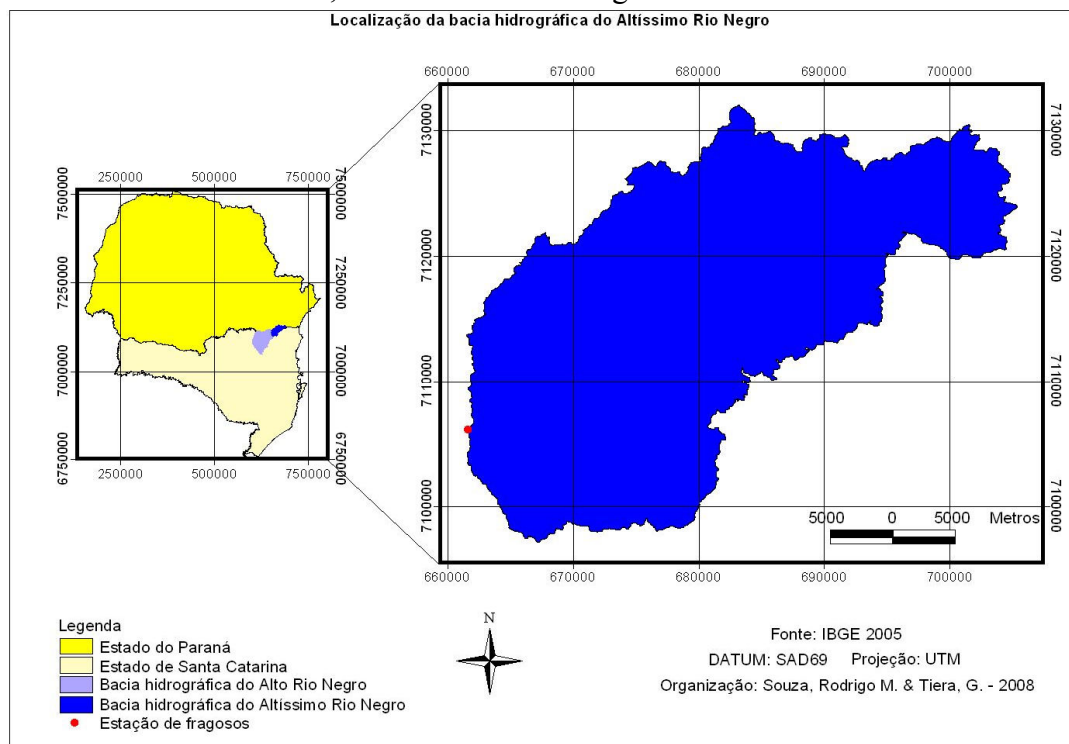


Figura 1 – Localização da bacia hidrográfica do Altíssimo Rio Negro

O clima na área de estudo é classificado como subtropical úmido. Segundo Mendonça E Oliveira (2007) uma das características que distinguem os climas da região sul-brasileira do restante do país é uma maior regularidade na distribuição anual das chuvas – entre 1.250 e 2.000mm – juntamente com as baixas temperaturas de inverno. Essas características resultam da associação entre a posição geográfica, relevo e atuação dos sistemas atmosféricos intertropicais e polares.

O uso do solo foi determinado com base em uma imagem do satélite LandSat, sensor TM-5, com órbitas /ponto 220/79, 220/78 e 221/78, com data de julho de 2007. As bandas utilizadas para a classificação automática, realizada pelo LABHIDRO/UFSC, foram a 1, 2, 3, 4, 5 e 7. A Floresta Ombrófila Mista ainda recobre 38% da área. As pastagens ou campos recobrem 28%, a agricultura, seja com cultivo ou solo exposto, recobre 24%, o reflorestamento de Pinus tem uma área de 9%, sendo que os corpos hídricos ocupam menos de 1% da área.

Com relação aos solos da bacia em estudo, o mapa foi elaborado com base em Marangon (2008), considerando somente o primeiro nível categórico. Os solos da área de estudo estão distribuídos da seguinte forma: em 44% da área encontra-se o solo do tipo Cambissolo, em 22% Nitossolo, em 13% Argissolo vermelho-amarelo, em 11% Neossolo litólico, em 8% Gleissolo e em 2% Latossolo.

MODELO SWAT

O modelo SOIL AND WATER ASSESSMENT TOOL – SWAT é um modelo matemático de domínio público, desenvolvido em 1996 nos EUA pelo *Agricultural Research Service* e pela *Texas A&M University*. A versão utilizada neste trabalho é a 2.1.4, a qual é uma interface para o Software ArcGis 9.2.

O SWAT, em seu desenvolvimento, foi incorporando várias características contidas em modelos anteriores. O modelo tem 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 pode ser efetuada em intervalos de tempo diários, mensais e anuais.

Conforme Santos *et al.* (2005), as características principais do SWAT são:

- é um modelo que possui base física, com equações que descrevem a relação entre as variáveis do sistema. Requer como *inputs* informações sobre clima, solos, relevo, vegetação e uso e manejo do solo. Através destas informações, o SWAT modela os

processos físicos associados com o movimento da água, movimento de sedimentos, crescimento da vegetação, ciclagem de nutrientes, qualidade da água, etc.

- é distribuído, onde a bacia hidrográfica pode ser subdividida em sub-bacias de modo a refletir as diferenças de tipo de solo, cobertura vegetal, topografia e uso do solo;
- para as funções mais básicas, o modelo utiliza informações de fácil acesso, disponíveis em agências governamentais;
- permite simular longos períodos de forma contínua, o que permite perceber impactos ambientais que só são visíveis quando avaliados por um longo período de tempo;
- é computacionalmente eficiente.

A figura 2 representa sinteticamente os processos representados pelo modelo SWAT. Como este trabalho é direcionado a modelagem da vazão, os demais componentes do modelo não são apresentados.

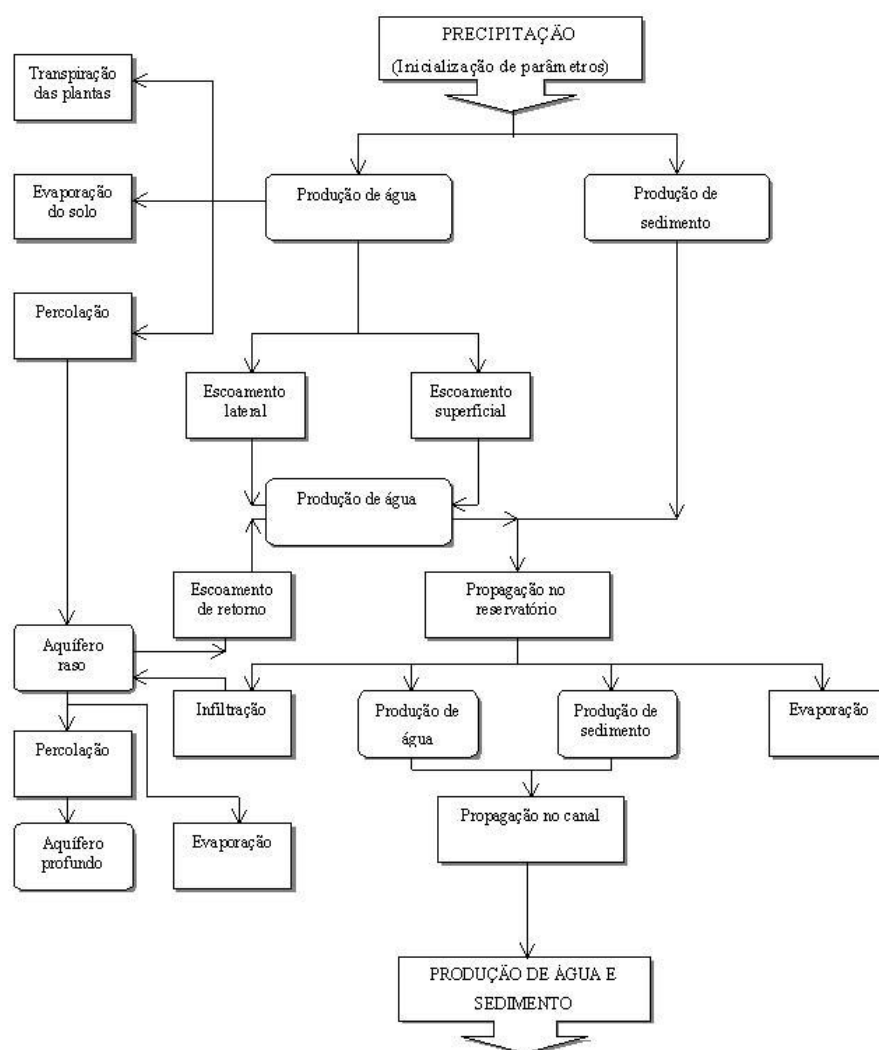


Figura 2 – Fig. 2 – Fluxograma do modelo SWAT (fonte: modificado de KING *et al*, 1996)

De acordo com Gassman *et al.* (2007), o modelo SWAT vem sendo utilizado de forma corrente após o seu desenvolvimento. Muitas aplicações foram exercidas 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. Baldissera (2005) aplicou o modelo para simular as vazões líquidas mensais na Bacia do Rio Cuiabá. Algumas instituições públicas e privadas também fazem uso do modelo para prever problemas relacionados à erosão e assoreamento, principalmente as empresas de geração de energia elétrica, conforme Santos *et al.* (2005)

Dados de entrada do modelo

Para a simulação, o modelo requer informações espaciais, como o modelo digital do terreno, hidrografia, mapa de solos, mapa de uso do solo e de séries temporais de precipitação, vazão líquida, descarga sólida, temperatura mínima e máxima, radiação solar, umidade relativa e velocidade do vento.

O modelo digital do terreno e a hidrografia foram obtidos através da extração das curvas de nível e da hidrografia pela digitalização de cartas topográficas do IBGE, ano 1992, na escala 1/50.000.

Com relação aos solos, o modelo requer também um banco de dados com diversas informações, como o número de camadas do solo, o seu grupo hidrológico e informações por camada de solo, como capacidade de água disponível, albedo, condutividade hidráulica saturada, porosidade, entre outras informações.

As séries de precipitação utilizadas são oriundas das estações pluviométricas com código ANA (Agência Nacional de Águas) 02549003, 02649057, 02649006, 02649018 e 02549008. Foi utilizada a série de vazão da estação de Fragosos (65090000). As séries de temperatura, radiação solar, umidade relativa e velocidade do vento utilizadas são provenientes da estação climatológica do INMET (Instituto Nacional de Meteorologia) Rio Negrinho/SC, código 1511.

A calibração do modelo foi realizada para dados diários, no período de 1994 a 2002, utilizando para análise dos resultados, além da inspeção visual dos hidrogramas, o coeficiente de NASH - SUTCLIFFE (1970). O coeficiente varia de $-\infty$ a 1, sendo que 1

representa o ajuste ideal e ajuste, sendo que valores acima de 0,70 podem ser considerados satisfatórios. O coeficiente é definido por:

$$NASH = 1 - \frac{\sum (Q_{sim} - Q_{obs})^2}{\sum (Q_{obs} - \overline{Q_{obs}})^2} \quad (1)$$

onde Q_{sim} é a vazão simulada, Q_{obs} é a vazão observada e $\overline{Q_{obs}}$ é a média da vazão observada.

RESULTADOS E CONCLUSÕES

Conforme mostra a figura 3, a bacia hidrográfica do Altíssimo Rio Negro foi dividida em 47 sub-bacias, sendo eliminadas sub-bacias de cabeceira com pequenas áreas de drenagem, procurando-se desta forma manter uma resolução espacial similar em termos de unidade de simulação.

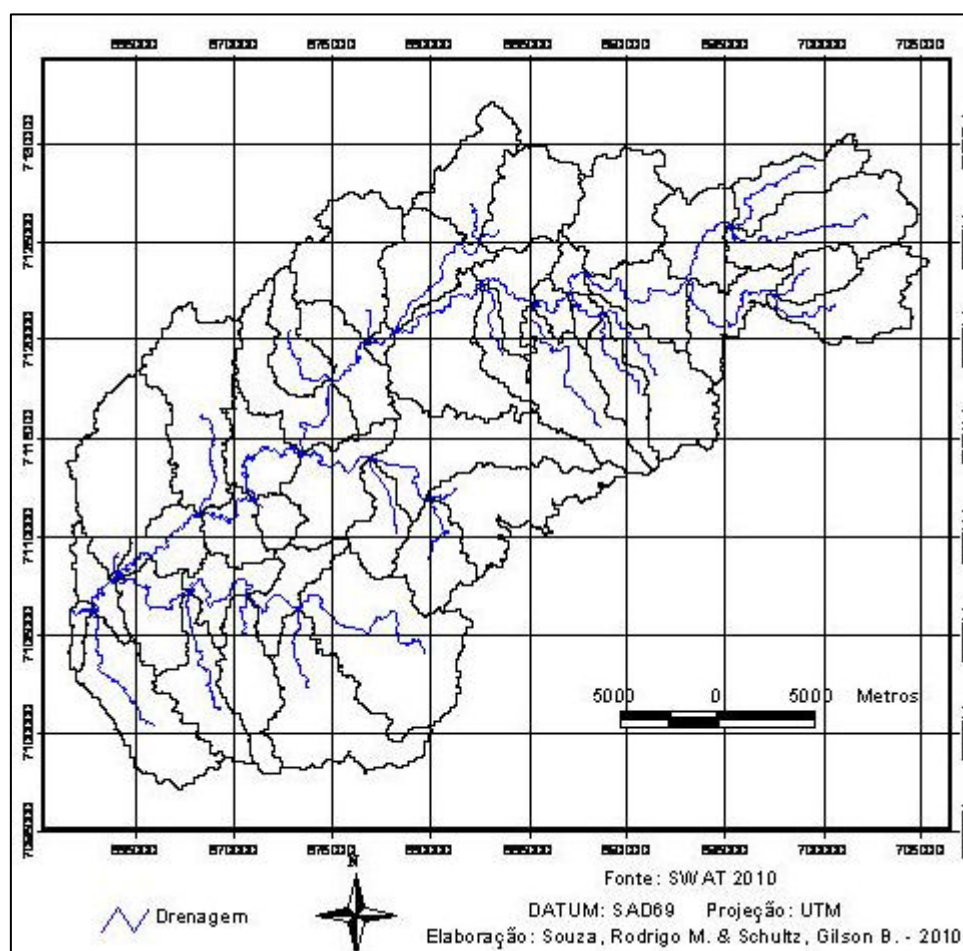


Figura 3 – divisão da bacia do Altíssimo Rio Negro.

A calibração ocorreu de forma manual, com os valores dos parâmetros sendo atribuídos a todas as sub-bacias. A tabela 1 apresenta os parâmetros utilizados e os valores atribuídos na calibração do modelo para as duas bacias em estudo

Parâmetro	Descrição	Valor Calibrado
Alpha Bf (1)	Constante de recessão do escoamento de base	0,85
Canmx (1)	Interceptação máxima da vegetação (mm H ₂ O)	9,85
CN2 (2)	Curva número na condição de solo úmido	0,1
Esco (1)	Coefficiente de compensação da evaporação do solo	0,01
Gw Delay (1)	Tempo de recarga do aquífero (dias)	60
Gwqmn (1)	Profundidade de água subterrânea necessária para que ocorra o retorno de fluxo (mm H ₂ O)	1000
Gw Revap (1)	Coefficiente que controla o fluxo de água da zona saturada para a não saturada	0,15
Sol AWC (2)	Controla a quantidade de água disponível nas camadas de solo (mm H ₂ O/mm solo)	4
Sol K (2)	Condutividade hidráulica saturada (mm/hr)	2
Slope (2)	Declividade média de cada Hru (m/m)	10

Tabela 1 – parâmetros e seus valores utilizados na calibração

O coeficiente de Nash-Sutcliffe obtido foi de valor de 0,66. A vazão média observada no período de 1994 a 2002 foi de 22,83 m³/s, enquanto a vazão média simulada foi de 24,15 m³/s. A figura 4 compara as séries de vazões observadas e simuladas.

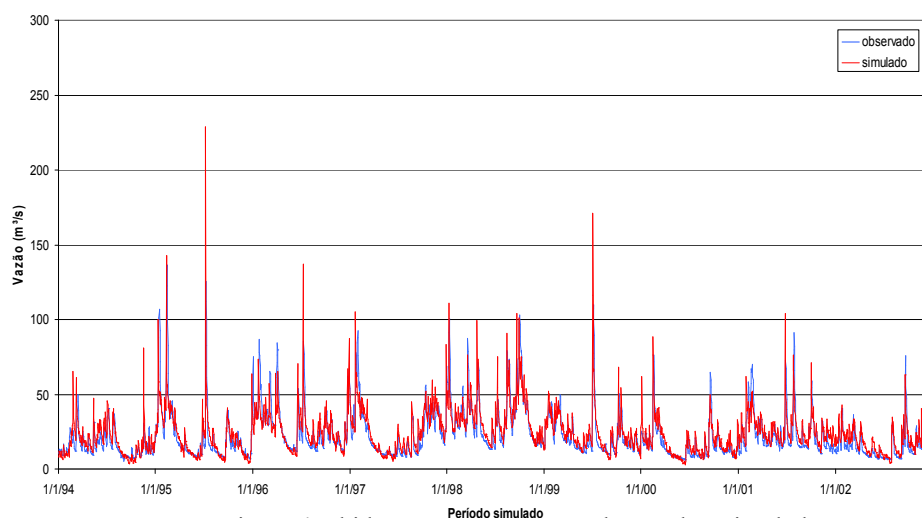


Figura 4 – hidrograma das vazões observada e simuladas

Analisando o hidrograma, nota-se que o modelo representou o comportamento da vazão de forma satisfatória, com maiores dificuldades na representação de picos e recessões.

A pesquisa está em fase de desenvolvimento. Os resultados alcançados até o momento indicam que o modelo apresentou potencial para representar o balanço hídrico da bacia. Porém, como o objetivo principal da pesquisa é a regionalização de vazões mínimas da bacia hidrográfica do altíssimo Rio Negro, as recessões oriundas da simulação necessitam estar bem representadas para uma avaliação do potencial do modelo para o objetivo proposto.

Como o modelo gera resultado para cada sub-bacia, após as recessões estarem devidamente calibrada, serão realizadas medições em campo em determinadas sub-bacias para validar a regionalização efetuada pelo SWAT.

REFERÊNCIAS

BAENA, L. G. N., SILVA, D. D., PRUSKI, F.F. e CALIJURI, M. L. **Regionalização de Vazões com base em Modelo Digital de Elevação para a Bacia do Rio Paraíba do Sul**. Revista de Engenharia Agrícola da UNESP. Vol. 24, nº 3 p. 612-624, Jaboticabal/SP.2004. Disponível em <http://www.scielo.br/pdf/eagri/v24n3/a13v24n3.pdf>.

BALDISSERA, G. C. **Aplicabilidade do modelo de simulação hidrológica SWAT (Soil and Water Assessment Tool), para a Bacia Hidrográfica do Rio Cuiabá/MT**. Cuiabá, 2005. Dissertação (mestrado em Física e Meio Ambiente). Universidade Federal do Mato Grosso.

DINIZ, L. S., **Regionalização de Parâmetros de Modelo Chuva-Vazão Usando Redes Neurais**. Tese de Doutorado em Engenharia, Instituto de Pesquisas Hidráulicas – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre/Rs, 2008.

FIGUEIREDO, A., OLIVEIRA, L., FRANCO, A., **Avaliação do desempenho de equações de regionalização de vazões na bacia hidrográfica do Ribeirão Santa Bárbara, Goiás, Brasil**. Ambiente & Água - An Interdisciplinary Journal of Applied Science, vol. 3 nº 2, pag. 62 – 76, 2008. Disponível em: <http://www.ambi-agua.net/seer/index.php/ambi-agua/article/view/132/206>. Acesso em: 22 de fevereiro de 2010.

GASSMAN, P. W., REYES, M. R., GREEN, C.H. e ARNOLD J.G. **The soil and water assessment tool: historical development, applications, and future research directions**. Disponível em <http://www.card.iastate.edu/publications/DBS/PDFFiles/07wp443.pdf>, acesso realizado em 01/12/2008

KING, K. W.; ARNOLD J. G.; WILLIAMS, J. R.; SCRINIVASAN R. . ***Soil and Water Assessment Tool–SWAT***. USDA, Agricultural Research Service. 450p. 1996

MACHADO, R. E. **Simulação de escoamento e de produção de sedimentos em uma bacia hidrográfica utilizando técnicas de modelagem e geoprocessamento**. Piracicaba, 2002. 152 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Escola Superior de Agronomia “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo

MARANGON F. H. S. **Relatório final do bolsista Fernando Helmuth Syring Marangon vinculado ao projeto monitoramento e modelagem hidrossedimentológica da bacia hidrográfica do Alto Rio Negro, região sul-brasileira** (MCT/FINEP/CT-HIDRO bacias representativas – 01.06.0367.00 Ref. 3498/05), 2008.

MENDONÇA F. e 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, vol. 10, pag. 282-290, 1970.
SANT’ANA, R. F., FIOR, M.T.B, e 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. *et al.* **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**. Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (LACTEC). Curitiba –PR, 2005, 91 p.

SANTOS, I. **Monitoramento e modelagem de processos hidrogeomorfológicos: mecanismos de geração de escoamento e conectividade hidrológica**. Florianópolis, 2009. 167p. Tese de doutorado – Centro de Filosofia e Ciências Humanas, Universidade Federal de Santa Catarina.

SILVEIRA, A. L. L. e SILVEIRA, G. L. Vazões mínimas. In: PAIVA, J. B. D e PAIVA, E. M. C. D. **Hidrologia Aplicada à Gestão de Pequenas Bacias Hidrográficas**. Porto Alegre, ABRH, 2001

SMAKHTIN, V.U. **Low Flow Hydrology: a review**. Journal of Hydrology, vol. 240, pg. 147-186, 2001.

SOUSA, H. T. **Sistema Computacional para a regionalização de Vazões**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa/MG. 2009. 86 p.

TUCCI, C. E. M. **Modelos Hidrológicos**. Porto Alegre. ABRH, 1998

TUCCI, C. E. M. **Regionalização De Vazões** – Ed. Universidade / UFRGS, 2002.