

ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DE MODELOS HIDROLÓGICOS NA PERSPECTIVA DE SVATS DE MODELOS ATMOSFÉRICOS

Afonso Augusto M. de Araujo¹, Otto Corrêa Rotunno Filho², Luciano Nóbrega Rodrigues Xavier²
Isimar de Azevedo Santos³, Adilson Elias Xavier⁴

Resumo – O interesse pela componente hidrológica da modelagem climática tem crescido, com conseqüente evolução nos algoritmos incorporados aos modelos de circulação global da atmosfera (MCG) e modelos de mesoescala (MM). Nesta última década, um marcado esforço pela busca de uma parametrização, ao mesmo tempo mais realista e simples o bastante para que possa ser acoplada aos modelos atmosféricos, tem sido desenvolvido pela comunidade científica internacional. A análise de sensibilidade é uma ferramenta que pode ser utilizada a favor de uma modelagem mais eficiente, além de permitir concentrar os esforços experimentais nas variáveis mais importantes e que potencialmente possam ser medidas na escala da bacia. No sentido de melhor compreender o acoplamento de modelos hidrológicos e modelos atmosféricos, este trabalho revisa a literatura pertinente a modelagem de processos de superfície, incluindo a análise de sensibilidade de SVATS de modelos atmosféricos, e aplica o índice de sensibilidade proposto por Sooroshian e Gupta (1985) para dois modelos hidrológicos do tipo chuva-vazão diferentes. Um modelo concentrado e um modelo distribuído são analisados. Entre outros resultados, revela-se a importância da informação de umidade do solo em ambos os modelos. Finalmente, é feita uma breve discussão sobre os resultados obtidos na perspectiva de SVATS de modelos atmosféricos.

Abstract - The interest for the hydrological component of climatic modelling has grown together with the evolution of the algorithms coupled with atmospheric global circulation models (GCM) and mesoscale models (MM). In the last decade, a marked effort to establish a more realistic parametrization and at the same time simple enough to be coupled with atmospheric models has

¹ UFPR/TC/DHS; Centro Politécnico-Jardim das Américas, CxP: 19011, CEP: 81.531-990 - Curitiba-Pr. Cursando doutorado na COPPE/UFRJ; Programa de Engenharia Civil - Área de concentração em Ciências Atmosféricas em Engenharia; afonso@hidro.ufrj.br

² COPPE/UFRJ; Rec. Hídricos – Programa de Engenharia Civil; Laboratório de Hidrologia e de Estudos do Meio Ambiente, Bloco I, CT, Ilha do Fundão; CEP: 21945-970; Rio de Janeiro; RJ; Brasil; Tel.: (21) 562-7842; Fax.: (21) 562-7836; otto@hidro.com.ufrj.br, luciano@hidro.ufrj.br.

³ Departamento de Meteorologia – CCMN, CEP 21945-970. Rio de Janeiro, RJ. isimar@acd.ufrj.br.

⁴ COPPE/UFRJ. Programa de Eng. de Sistemas, CT, Ilha do Fundão; CEP: 21945-970; Rio de Janeiro; RJ; Brasil

been developed by the international scientific community. Sensitivity analysis is a tool that can guide our steps towards better models and help us focus our experimental tasks on the variables most important and potentially possible to be measured at a watershed scale. In the way of better understand the coupling of hydrological and atmospheric models, this work reviews the land-surface processes modelling including sensitivity analysis for the SVATS linked to atmospheric models and apply the sensitivity ratio (Sorooshian and Gupta, 1985) for two distinct rainfall-runoff models. A lumped and a distributed models are analysed. Among the results the importance of the soil moisture in both models is revealed. Finally we make a brief discussion about the result in the perspective of the SVATS of atmospheric models.

Palavras-Chave - modelos hidrológicos e atmosféricos, análise de sensibilidade índice de sensibilidade.

INTRODUÇÃO

O interesse pela modelagem dos processos que ocorrem na superfície do solo e oceano e sua influência nos processos atmosféricos tem crescido bastante, com uma forte ênfase na última década. Sua importância é cada vez mais evidente, seja na inclusão dessa modelagem para previsões mais realistas do clima, em escalas regionais ou na grande escala, através de modelos de circulação atmosférica global (Avisar, 1999; Xu *et al.*, 1994), na previsão numérica do tempo, utilizando modelos de mesoescala, na previsão de condições hidrológicas da superfície terrestre, que, por sua vez, podem influenciar fortemente a previsão climática e do tempo. Dooge (1992), em sua nota de abertura da Conferência de Chapman sobre aspectos hidrológicos da mudança climática, estabelece que a relação do homem com qualquer elemento do meio ambiente pode ser caracterizada por quatro fases iterativas: observação, conhecimento, previsão e controle. Preconiza ainda que, a exemplo do sucesso da revolução realizada por Nicolau Copérnico na astronomia e por Isaac Newton na mecânica (Kuhn, 1957), os geofísicos, assim como os engenheiros, podem beneficiar-se fortemente dos estudos das relações entre observação, previsão e controle. Assumindo esta visão, Dooge (1992) propõe que uma teoria completa da componente hidrológica relevante para a modelagem climática deveria cobrir desde fenômenos que ocorrem na escala de uma molécula de água até escalas da ordem da grade dos modelos de circulação global. Este desenvolvimento envolveria 15 ordens de grandeza no espaço e 18 ordens de grandeza na dimensão temporal.

Não é difícil perceber que estas idéias preconizadas por Dooge estão presentes nos grandes programas de pesquisa desenvolvidos em conjunto pela comunidade científica mundial para desvendar as conexões entre a atmosfera e a componente terrestre do ciclo hidrológico. O experimento global sobre energia e o ciclo da água – GEWEX, iniciado pelo Centro de Pesquisa sobre o Clima Mundial - WCRC, está estruturado sobre três focos principais: componente radioativa, hidrometeorológica e a modelagem e previsão. Abrangendo a pequena escala, a escala continental e a global, tem como objetivo, observar e modelar o ciclo hidrológico e os fluxos de energia na atmosfera, na superfície do solo e na superfície dos oceanos. O projeto para a comparação dos esquemas de parametrizações de superfície - PILPS, integrante da componente de modelagem e previsão, tem por objetivo elaborar e validar novas parametrizações dos processos de superfície para os modelos climáticos.

Motivado pela ampliação dos estudos interdisciplinares do sistema terrestre, novas gerações de esquemas superfície-atmosfera vêm surgindo. Os esquemas envolvem parametrizações para modelos de circulação global, modelos hidrológicos, bioquímicos e ecológicos. Os últimos encontros realizados dentro do âmbito do GEWEX apontam três caminhos principais que devem ser perseguidos, no contexto de um processo de evolução dos esquemas de superfície. O primeiro ponto está relacionado à identificação de que processo biofísico deve ser incluído. Por exemplo, a inclusão do ciclo do carbono, deve permitir aos modelos atmosféricos o cálculo dos fluxos de CO₂ para a simulação da evolução da vegetação e das sinergias entre as variações climáticas e o estado da biosfera. O segundo ponto está relacionado à deficiência dos atuais esquemas em descrever a complexidade da variabilidade horizontal da superfície. Finalmente, os métodos de assimilação de dados, tanto para a análise do estado da superfície ou para a avaliação dos esquemas de superfície na grande escala, são o foco do terceiro ponto.

Neste trabalho aplicaremos técnicas de análise de sensibilidade a dois modelos hidrológicos diferentes, buscando compreender o comportamento dos parâmetros ligados às características da superfície, que estão presentes também nos SVATS de modelos atmosféricos. A expectativa que se cria é que com isso seja possível estabelecer uma nova perspectiva para o acoplamento de modelos hidrológicos e atmosféricos. Para isso, inicialmente apresenta-se uma revisão da modelagem dos processos de superfície, tendo-se uma idéia da modelagem da componente hidrológica dentro dos modelos atmosféricos, seguindo-se uma revisão das análises de sensibilidade de SVATS de modelos atmosféricos. Posteriormente, descreve-se a aplicação do índice de sensibilidade (Sorooshian e Gupta, 1985) aos modelos SMAP (Lopes, Braga e Conejo, 1981) e WATFLOOD (Kouwen, 1988; Tao e Kouwen, 1989), discutindo-se posteriormente que perspectivas os resultados encontrados podem gerar para aplicação desta metodologia aos SVATS de modelos atmosféricos.

MODELAGEM DOS PROCESSOS DE SUPERFÍCIE

Uma simulação realista do clima, seja em escala regional ou na grande escala, depende de uma adequada representação da topografia e dos processos que ocorrem na superfície da terra (processos de superfície). Em função disto, a partir do início da década de oitenta, surgiram diversas propostas de parametrização dos processos de superfície e das características da superfície, tendo-se como objetivo principal a incorporação em modelos de circulação global da atmosfera (MCG), na tentativa de melhor representar a contribuição da componente hidrológica para a circulação global. O modelo inicialmente incorporado nos MCG, conhecido como “Budykio bucket”, descrito por Manabe *et. al.* (1965) e Holloway e Manabe (1971), é baseado numa função simples de disponibilidade de umidade no solo, que não considera explicitamente a influência da vegetação. Para os hidrólogos este modelo é bastante familiar e semelhante à equação de balanço hídrico de longo período, onde a variação da umidade armazenada no solo ao longo do tempo é dada pela equação $dw/dt = P - E - Q$, onde P é a precipitação, Q é o escoamento superficial e E é a evaporação. A evaporação potencial é modificada por um fator que depende da quantidade de umidade disponível no solo. Quando a evaporação excede a precipitação, o nível de água no reservatório diminui. Quando, ao contrário, a precipitação é maior do que a evaporação o reservatório é preenchido, e ao transbordar ocorre o escoamento superficial. A capacidade de campo é considerada como sendo correspondente ao armazenamento de umidade em uma camada de solo de 15 cm. Carson (1982) fez uma revisão dos modelos propostos neste período. O modelo de Deardorf (1978), que introduziu a parametrização de camadas de solo e vegetação, o modelo de McCumber (1980) e o modelo de Yamada (1982). A partir da inclusão da parametrização de vegetação, os modelos de processos de superfície desenvolvidos para os MCG, passaram a descrever processos cada vez mais complexos, requerendo um número de parâmetros considerável.

O modelo BATS – “Biosphere Atmosphere Transfer Scheme”, proposto inicialmente por Dickinson (1983, 1984), é composto por três camadas de solo superpostas, tendo uma superfície comum e profundidades diferentes (0.1m, 1m e 10m). Cada quadrado da grade é formado por seis componentes, cada um possuindo duas variáveis de estado (temperatura e umidade do solo). Estas variáveis de estado não são independentes, na medida que: (1). a temperatura da camada de solo mais profunda é constante e (2). se houver cobertura de neve, a temperatura será a mesma da camada superior do solo. Seguindo esta formulação, resultam 10 equações de conservação de energia, que devem ser resolvidas para as 10 variáveis independentes prognosticas de estado, em cada ponto de grade. O modelo SiB – “Simple Biosphere Atmosphere Transfer”, proposto por Sellers (1986) e Sellers *et al.* (1986), apesar de apresentar semelhanças com o modelo BATS e apesar do termo “simple”, é bastante mais complexo. Enquanto o modelo BATS possui algo em

torno de 20 parâmetros o SiB pode alcançar quase 50 para descrever as propriedades biológicas e físicas em cada célula da grade. A vegetação da região do dossel é representada por duas camadas que podem estar presentes ou não em qualquer ponto e tempo. A camada superior é composta por árvores e vegetação de menor porte, e a camada inferior é composta por gramíneas e outras espécies herbáceas. Cada tipo de vegetação possui características morfológicas, físicas e fisiológicas, que são consideradas homogêneas ao longo da grade dos MCG. Estes parâmetros são utilizados pelos submodelos do SiB, que descrevem a interceptação e o particionamento das componentes de radiação entre o visível, infravermelho próximo e o termal; a interceptação da chuva e a subsequente evaporação, infiltração, drenagem e armazenamento da chuva residual; o controle biológico da transpiração e a transferência aerodinâmica do fluxo de calor sensível, vapor d'água e momentum da superfície do solo e da vegetação para a atmosfera. As componentes mais importantes do modelo são a transferência radioativa, a resistência aerodinâmica e a resistência da superfície.

A complexidade envolvida nas parametrizações propostas nos modelos BATS e SiB expõe a impossibilidade real de se avaliar a grande quantidade destes parâmetros tanto na microescala quanto na escala global, colocando-se em questão a validade de se desenvolver um esquema que seja calibrado para reproduzir os processos observados na microescala e, de forma um tanto quanto subjetiva, aceitar a sua aplicação em escalas de maior ordem. Seguindo esta idéia, novas de formulações visando a simplificação dos esquemas superfície-atmosfera foram desenvolvidas. Pitman *et al.* (1991) desenvolveram um esquema simplificado denominado BEST - "Bare essentials of surface transfer". A estratégia utilizada foi a de utilizar apenas os elementos considerados essenciais para a representação da variabilidade espacial e temporal das interações superfície atmosfera. Este modelo foi implementado no MCG do "Australian Bureau Of Meteorology Research Centre" (Yang *et al.*, 1993). Outra linha de investigação explorou representações da superfície do solo que levam em conta a variação na escala de sub grade, associadas às não- heterogeneidades do terreno, solo e vegetação. Avissar e Pielke (1989) mostraram, através de simulações com modelos de mesoescala, que heterogeneidades na vegetação podem ter efeitos significativos na temperatura e na precipitação. Seguindo esta idéia Avissar (1990) propôs um modelo baseado nas diferentes feições da superfície. Famiglietti e Wood (1990) desenvolveram um modelo hidrológico da superfície, no qual a resposta do escoamento superficial é controlada pela variação da topografia e das propriedades do solo, seguindo o índice topográfico proposto por Beven e Kirkby (1979). Wood *et al.* (1992) propuseram um modelo que generaliza o esquema hidrológico da superfície como a variação da capacidade de infiltração dentro da grade do MCG. Este modelo, denominado "Variable infiltration capacity" (VIC), requer a estimativa de apenas três parâmetros. um parâmetro de infiltração, um parâmetro de evaporação e um coeficiente para a recessão do escoamento de base. Mais recentemente, Avissar (1998) propõe um esquema simplificado, que utiliza um número menor

de parâmetros, provenientes de dados de satélites, e que poderiam ser calibrados diretamente para fornecer os forçantes da atmosfera na grande escala.

ANÁLISE DE SENSIBILIDADE NOS SVATS

As técnicas mais comumente utilizadas para análise de sensibilidade tem sido a de perturbar um único parâmetro de cada vez, dentro de uma faixa de variação fisicamente válida em torno do valor padrão do parâmetro perturbado, mantendo os demais fixos. Esta técnica tem a desvantagem de não levar em conta a interação entre as variáveis presentes. Estes efeitos, em função do fenômeno em foco podem ter contribuições importantes. Wilson *et al.* (1987) utilizou esta técnica para avaliar quatro cenários climáticos típicos. Para cada cenário identificado, foi analisada a variação, uma por vez, do comprimento de rugosidade, do índice de área foliar, das classes de textura do solo e da profundidade da camada superior do solo, ao longo de uma simulação de dez dias. Os resultados apontaram uma sensibilidade considerável para a textura do solo e baixa sensibilidade ao albedo da superfície. Verificou-se ainda que a sensibilidade dos fluxos à textura do solo foi comparável à sensibilidade das características do tipo de vegetação. Pitman (1993) analisou a sensibilidade do modelo BATS para determinadas faixas de valores dos parâmetros, avaliados individualmente, mais acoplando o esquema de superfície a um modelo de coluna simplificado, capaz de produzir respostas entre a superfície e a atmosfera. Este estudo revelou que o modelo BATS é mais sensível aos parâmetros que descrevem a disponibilidade de umidade, de energia, e a eficiência do acoplamento entre a superfície e a atmosfera. O autor percebeu, em particular, que a falta de informação a respeito da distribuição das raízes, pode representar problemas para muito dos modelos de superfície mais avançados. Gao *et al.* (1996) realizaram uma análise de sensibilidade, rodando o modelo BATS, na forma não-acoplada, para avaliar as incertezas associadas aos processos de sinergia no sistema solo-atmosfera de uma forma controlada. A técnica utilizada foi a de construir conjuntos de curvas ajustadas, que ilustram a sensibilidade das respostas do modelo à variação de vários parâmetros de entrada, para diferentes forçantes atmosféricas prescritas. Segundo os autores, a metodologia se mostrou capaz de prover “insights” com relação ao comportamento e parametrização do modelo BATS. Algumas das principais conclusões foram: (1). o fluxo de energia dominante desloca-se do fluxo de calor sensível no solo em regiões áridas ou semi-áridas para o fluxo de evaporação nas regiões de floresta úmida; (2). em estudos não-acoplados, a ausência dos mecanismos de sinergia mais importantes podem levar a resultados pouco consistentes em condições climáticas extremas; (3). as funções do modelo que determinam os fluxos de calor, do solo e da atmosfera, limitados pelo controle atmosférico e pela umidade do solo, podem ter que ser refinadas para que se possa obter uma modelagem mais real dos fluxos de energia da superfície do

solo. (4). alguns componentes do modelo podem ser simplificados. (5) os erros presentes nas estimativas dos estados iniciais podem persistir por diversos anos, o que indica que se deve ter um certo cuidado com o processo de calibração do BATS, quando se utilizam dados observacionais incompletos e períodos curtos de simulação.

Outras técnicas como o método estatístico fatorial (MEF) e o teste de sensibilidade de amplitude de Fourier (FSAT) são capazes de avaliar simultaneamente a sensibilidade média da resposta do modelo à variação em um conjunto de parâmetros. No entanto, em geral estas técnicas resultam num elevado número possível de combinações de simulação, sendo necessário uma escolha criteriosa das variáveis que serão perturbadas e os domínios de variação destas variações. Henderson-Sellers (1992) utilizou um MEF de dois níveis (dois valores para cada parâmetro) para ordenar 23 parâmetros do modelo BATS (Dickinson, 1983 e Dickinson *et al.*, 1984; 1986). Das 8.388.608 ($=2^{23}$) combinações possíveis para se perturbar os parâmetros, foram selecionadas apenas 32 para cada regime climático. Collins e Avissar (1994) utilizaram o teste de sensibilidade da amplitude de Fourier, e realizaram 13.152 rodadas, perturbando um conjunto de 10 parâmetros e 5 condições atmosféricas.

ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DE MODELOS HIDROLÓGICOS

A modelagem da fase terrestre do ciclo hidrológico, ou seja, a modelagem hidrológica, incluindo-se as componentes de escoamento superficial, escoamento sub superficial e escoamento subterrâneo permanecem como um grande desafio para os hidrólogos. Um grande esforço em traduzir o comportamento da natureza em modelos matemáticos, acoplado com trabalhos experimentais têm sido realizado nas últimas três décadas. A análise de sensibilidade tem sido concomitantemente utilizada como uma ferramenta para guiar os passos na direção de uma modelagem mais eficiente, na medida que se torna possível identificar as variáveis mais importantes e que apresentem potencial para serem medidas na escala da bacia. Segundo Sorooshian e Gupta (1985), a identificação de um modelo chuva-vazão conceitual para uma determinada bacia envolve duas etapas. A primeira, envolvendo a identificação da estrutura do modelo, inclui a definição das fronteiras do sistema a ser modelado, especificação das entradas e saídas a serem consideradas, integrando todas as variáveis envolvidas. O segundo estágio está relacionado à identificação dos parâmetros, ou seja, à calibração do modelo. Na análise de sensibilidade, é interessante conhecer para que parâmetro ou combinação de parâmetros a saída do modelo é insensível. A região de insensibilidade é denominada de região de indiferença, que pode ser caracterizada a partir de uma superfície hiperbólica no espaço de parâmetros. A região de não identificação é descrita pelo tamanho e orientação do elipsóide.

As metodologias de análise de sensibilidade permitem a quantificação dessas noções geométricas em índices computáveis que, por sua vez, descrevem várias propriedades da região de interesse. Talvez a propriedade mais importante seja o grau para o qual a não identificação está relacionada aos efeitos de compensação de variações simultâneas de dois ou mais parâmetros de saída do modelo. A matriz de reestruturação representa matematicamente a região de interesse, permitindo a derivação de índices de sensibilidade. Sorooshian e Gupta (1985) introduziram o índice de sensibilidade, que é uma medida atribuída a cada parâmetro do modelo. O índice de sensibilidade é obtido a partir do quociente entre a sensibilidade do parâmetro do modelo e o parâmetro de sensibilidade condicional, que representa, para cada parâmetro i do modelo, em certa região de interesse, quanto o parâmetro pode variar, enquanto permanecer dentro da região de indiferença, e os demais parâmetros forem mantidos fixos. Desta forma, o parâmetro de sensibilidade condicional não leva em conta os efeitos de compensação da variação simultânea de dois ou mais parâmetros na saída do modelo. O caso no qual o maior e o menor eixo do elipsóide, que descrevem a região de indiferença, são orientados ao longo da direção dos eixos dos parâmetros, significa que a matriz de reestruturação é uma matriz diagonal. O máximo que cada parâmetro i do modelo pode variar (permitindo-se que outros parâmetros variem livremente), enquanto permanece na região de indiferença, será dado pelo seu respectivo parâmetro de sensibilidade condicional. Geralmente o elipsóide estará orientado de outra forma, indicando interdependência e efeitos de compensação entre os parâmetros. Esse resultado significa que a matriz de reestruturação não é uma matriz diagonal. Neste caso, se todos os parâmetros são livres para variar simultaneamente, o parâmetro i do modelo será capaz de mover-se numa distância máxima dada pelo índice de sensibilidade do parâmetro, como derivado por Sorooshian e Gupta (1985).

A parte de aplicação que será apresentada neste trabalho envolve a aplicação da metodologia de análise de sensibilidade proposta por Sorooshian e Gupta (1985) a dois modelos hidrológicos de concepções diferentes. Uma versão simplificada do SMAP (Lopes, Braga e Conejo, 1981), modelo concentrado e que requer dados de entrada diários, foi aplicado ao rio Fartura, cuja bacia está localizada no estado de São Paulo. O outro modelo utilizado, WATFLOOD (Kouwen, 1988; Tao e Kouwen, 1989), é um modelo hidrológico distribuído, que requer dados de entrada baseados em eventos, foi aplicado na bacia do rio Big Otter, localizada no sul de Ontario, Canada. O estudo baseou-se em cenários hipotéticos produzidos pelos modelos, ou seja, assumiu-se que os modelos refletem de forma acurada o comportamento da natureza, e que o conjunto ótimo de parâmetros para a bacia em estudo é conhecido. As vazões de saída na estação de medição são produzidas a partir de chuvas observadas. Para isto, os resultados de sensibilidade são obtidos para o conjunto de parâmetros escolhidos. Outra possibilidade seria a de realizar a análise de sensibilidade para um

conjunto de parâmetros obtidos através de um processo de otimização, correndo-se o risco, no entanto, que erros nas variáveis de entrada e no modelo possam causar resultados espúrios. Na sequência apresentamos uma descrição da metodologia.

Metodologia - Índice de sensibilidade

Seguindo Sorooshian e Gupta (1985), a matriz positiva definida ou positiva semidefinida, denomina matriz de reestruturação do modelo $\nabla_{\theta}^2 SI$, pode ter um elemento genérico definido pelos parâmetros ij aproximados por:

$$\nabla_{\theta}^2 SI_{ij} = 2 \sum_{i=1}^{nt} \left(\frac{\partial q_{MOD}(\theta)}{\partial \theta_i} \times \frac{\partial q_{MOD}(\theta)}{\partial \theta_j} \right) \quad ij = 1, \dots, N \quad (1)$$

onde: $\nabla_{\theta}^2 SI$ é a matriz de reestruturação, nt número de intervalos de tempo, N número de parâmetros a serem otimizados, θ conjunto de parâmetros do modelo, q_{MOD} é a vazão produzida pelo modelo e finalmente $\frac{\partial q_{MOD}(\theta)}{\partial \theta_i}$ é a derivada parcial de q_{MOD} em relação a θ_i , que pode ser calculada utilizando uma expressão analítica para q_{MOD} ou pode ser determinada numericamente pela perturbação de cada parâmetro separadamente.

A matriz de reestruturação é simétrica e pode ser tanto positiva definida ou positiva semidefinida. A matriz é positiva definida se todos os seus autovalores forem positivos. Se todos os seus autovalores forem negativos, então a matriz é positiva semidefinida. De outra forma, se a matriz possuir autovalores positivos e negativos, então a matriz é dita indefinida. A necessidade de que a matriz de reestruturação seja positiva definida ou semidefinida deve-se à forma com que os contornos da função objetivo aparecem no espaço. Tendo como base esta matriz, é possível definir-se determinados índices, tais como índices para análises bidimensionais e a razão de sensibilidade proposta por Sorooshian e Gupta (1985). Entre os índices para análise bidimensional destaca-se o índice de concentricidade X_{ij} , que é determinado para o par de parâmetros i e j . O índice de concentricidade indica o quanto os níveis do contorno de uma função f estão próximos da forma circular. A faixa de valores para este índice está entre 0 e 1, onde o valor 1 representa o círculo. A expressão para o índice de concentricidade é:

$$X_{ij} = \left[\frac{\lambda_{\min}^{ij}}{\lambda_{\max}^{ij}} \right]^{1/2} \quad (2)$$

onde $\lambda_{\min}^{ij}$ e $\lambda_{\max}^{ij}$ são respectivamente o menor e o maior autovalores de uma submatriz da matriz de reestruturação, construída pela intersecção das linhas e colunas relacionadas aos dois parâmetros. É desejável que a superfície de resposta para um par de parâmetros tenha níveis de contorno concêntricos, devido à conexão existente entre um problema de mínimo e a resolução de um sistema de equações lineares. Esta conexão pode ser mostrada através de uma expansão em série de Taylor em segunda ordem da função objetivo a ser minimizada. Seja $f(\mathbf{x})$ a função a ser minimizada, sua aproximação é dada por:

$$f(\mathbf{x}) \approx f(\mathbf{x}_0) + \nabla f(\mathbf{x}_0)(\mathbf{x} - \mathbf{x}_0) + 1/2(\mathbf{x} - \mathbf{x}_0)^T H(\mathbf{x}_0)(\mathbf{x} - \mathbf{x}_0). \quad (3)$$

No ponto de mínimo é requerido que o gradiente seja zero:

$$\nabla f(\mathbf{x}) \approx \nabla f(\mathbf{x}_0) + H(\mathbf{x}_0)(\mathbf{x} - \mathbf{x}_0) = 0 \quad (4)$$

A equação (4) tem a forma de um sistema linear de equações onde o vetor de incógnitas é $\mathbf{x}$. Um sistema linear de equações pode ser apresentado como:

$$\mathbf{A}\mathbf{x} = \mathbf{b}. \quad (5)$$

Se pequenas perturbações forem provocadas na matriz $\mathbf{A}$ ou no vetor $\mathbf{b}$, é possível verificar-se as perturbações que aparecem na solução do sistema. Adicionalmente, o número condição da matriz $\mathbf{A}$ pode ser definido através da teoria de perturbação, assumindo a seguinte forma:

$$COND(\mathbf{A}) = \|\mathbf{A}\| \|\mathbf{A}^{-1}\|, \quad (6)$$

onde $COND(\mathbf{A})$ é o número condição da matriz $\mathbf{A}$, $\|\mathbf{A}\|$ é a matriz norma de $\mathbf{A}$ e $\|\mathbf{A}^{-1}\|$ é a matriz norma de $\mathbf{A}^{-1}$. Pela definição de matriz norma, que é dependente na norma do vetor, pode-se escrever:

$$\|\mathbf{A}\| = \max_{\|\mathbf{x}\|=1} \|\mathbf{A}\mathbf{x}\|, \quad (7)$$

onde $\mathbf{x}$ é um vetor. Se supuser que a matriz $\mathbf{A}$ possui n autovetores diferentes $\mathbf{u}_i$, $i = 1, \dots, n$, então é possível representar qualquer vetor $\mathbf{x}$ como uma combinação linear dos $\mathbf{u}_i$'s, uma vez que eles formam um sistema ortogonal que pode ser tomado como base. Portanto:

$$x = \sum_{i=1}^n \alpha_i u_i, \quad (8)$$

onde $\sum_{i=1}^n \alpha_i^2 = 1$ e $\|x\| = 1$. Então:

$$\|A\| = \max_{\sum_{i=1}^n \alpha_i^2 = 1} \left\| \sum_{i=1}^n A \alpha_i u_i \right\| = \max_{\sum_{i=1}^n \alpha_i^2 = 1} \left\| \sum_{i=1}^n \alpha_i \lambda_i u_i \right\|, \quad (9)$$

onde λ_i são os autovalores associados aos autovetores da matriz A . se a norma euclidiana é utilizada e o conhecimento da relação seguinte é validada para um vetor y

$$\|A\|_2^2 = \lambda_{\max}^2(A), \quad (10)$$

onde o valor $p=2$ indica a norma euclidiana, é possível escrever:

$$\|A\| = \max_{\sum_{i=1}^n \alpha_i^2 = 1} \left(\sum_{i=1}^n \alpha_i \lambda_i u_i \right) \left(\sum_{j=1}^n \alpha_j \lambda_j u_j \right) = \max_{\sum_{i=1}^n \alpha_i^2 = 1} \alpha_i^2 \lambda_i^2. \quad (11)$$

Uma vez que o máximo ocorre quando o coeficiente α_i associado com o maior autovalor da matriz A é igual a 1 e os demais são iguais a zero, a seguinte expressão é verdadeira:

$$\|A\|_2^2 = \lambda_{\max}^2(A) \quad \text{e} \quad (12)$$

$$\|A\| = \lambda_{\max}(A) \quad (13)$$

Para a determinação de $\|A^{-1}\|$, utiliza-se a declaração: se $\{\lambda_i, i=1, \dots, n\}$ são os autovalores da matriz A os autovalores da matriz A^{-1} será $\{1/\lambda_i, i=1, \dots, n\}$. Portanto,

$$\lambda_{\max}(A^{-1}) = \frac{1}{\lambda_{\min}(A)} \quad \text{e} \quad (14)$$

$$\|A^{-1}\| = \frac{1}{\lambda_{\min}(A)} \quad (15)$$

Baseado em desenvolvimento anterior, outra forma de escrever o número condição é:

$$COND(A) = \frac{\lambda_{\max}(A)}{\lambda_{\min}(A)}, \quad (16)$$

e o índice de concentricidade é dado por:

$$X_{ij} = \sqrt{\frac{1}{COND(A)}}. \quad (17)$$

O índice de sensibilidade, proposto por Sorooshian e Gupta (1985), que está relacionado com o índice de concentricidade, pode fornecer informações valiosas a respeito de problemas em processos de otimização. A expressão é:

$$\eta_i = \left(\frac{S_{ij}}{S_{ij} - g_i^T \times G_i^{-1} \times g_i} \right)^{1/2}, \quad (18)$$

onde S_{ij} é o elemento da diagonal da matriz de reestruturação correspondente ao parâmetro θ_i ; g_i é o vetor equivalente a i -ésima coluna da matriz de reestruturação, com o i -ésimo elemento eliminado; G_i é a submatriz da matriz de reestruturação, eliminando-se a i -ésima linha e coluna. A grande vantagem do índice de sensibilidade sobre o índice de concentricidade é que ele nos permite estudar a interação dos parâmetros no espaço multidimensional, conforme ressaltado por Sorooshian e Gupta (1985). Por exemplo, quando $\eta_i = 1$ não existe nenhuma compensação para os efeitos dos parâmetros θ_i na saída do modelo. Maiores η_i indicam maior pobreza na identificação do parâmetro θ_i em relação aos outros parâmetros do modelo.

O Modelo SMAP

Para o presente trabalho, no qual foi utilizada uma versão simplificada do modelo SMAP, foram analisados 5 parâmetros, que serão brevemente descritos, de acordo com a nomenclatura presente na figura 1. KSUP é o coeficiente que controla o escoamento superficial; KPER é o coeficiente de permeabilidade entre a zona do solo não saturada e a saturada; KSUB é o coeficiente que controla o escoamento subterrâneo; ABSI é a abstração inicial, ou seja, as perdas que incluem o volume de chuva que ocorre antes do início do escoamento superficial; CPER é um coeficiente que varia entre 0 e 1.

Os demais termos presentes na figura 1, referem-se a: NSAT é o nível de saturação do solo; NSOL é o nível de água no reservatório de solo superior; NSUP é o nível de água no reservatório subterrâneo; NSUB é o nível de água no reservatório de superfície; NPER é a capacidade de campo, que é dada por $NPER = CPER \times NSAT$; QSUB é o escoamento subterrâneo; QSUP é o escoamento superficial; PREC é a precipitação; EVPT é a evaporação potencial; EVPR é a evapotranspiração potencial e QPER é o escoamento que percola da zona não saturada do solo para a zona saturada.

A análise foi realizada a partir de dados de chuva e evaporação observados para o rio Fartura e dados de vazão gerados pelo modelo de forma a estabelecer um cenário potencialmente perfeito. O comprimento do registro de entrada compreende 5 anos com intervalo de tempo de um dia. Os valores adotados para os parâmetros analisados são: $KSUP=0.5$; $KPER = 0.05$; $KSUB = 0.99985$; $ABSI = 0.70$ E $CPER = 0.25$.

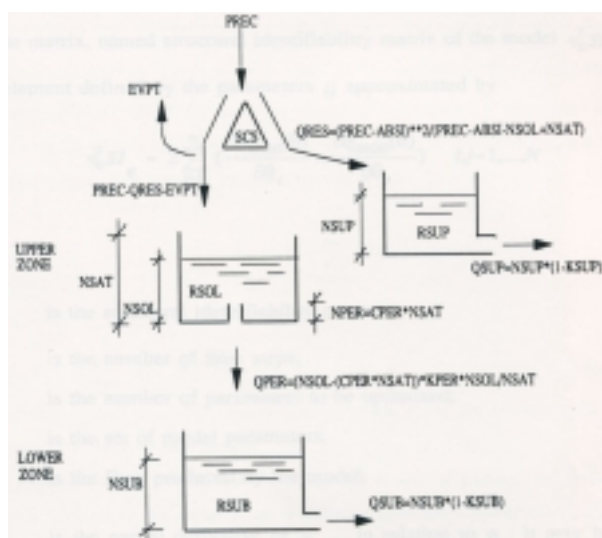


Figura 1 - Representação esquemática do modelo SMAP.

Os resultados obtidos para o índice de concentricidade e a índice de sensibilidade determinada para o conjunto dos 5 parâmetros considerados no modelo SMAP são apresentados nas tabelas 1 e 2.

Tabela 1 - Índice de concentricidade para cada par de parâmetros e índice de sensibilidade para cada parâmetro.

	KSUP	KPER	KSUB	ABSI	CPER	Parâmetro	η_i
KSUP		0.1010	0.002	0.0693	0.6353	KSUP	1.14
KPER			0.0014	0.0028	0.0177	KPER	5.00
KSUB				0.0000	0.0001	KSUB	1.19
ABSI					0.0323	ABSI	3.40
CPER						CPER	6.38

A tabela 1 mostra que os índices de concentricidade em geral são baixos. Os valores baixos revelam altas excentricidades para a elipse que representa a superfície de resposta para o modelo. Estas altas excentricidades estão associadas a valores elevados para o número condição. Estes fatos indicam possíveis problemas quando o processo de otimização é realizado, como mostraremos posteriormente neste trabalho. O par de parâmetros (KSUP, CPER) foi uma exceção, sugerindo um equilíbrio em respeito ao efeito do processo de otimização. Os resultados do processo de otimização conduzidos para este par de parâmetros confirmam os bons resultados para o índice de concentricidade. Os valores mais baixos de índice de concentricidade estão associados com os pares (KSUP, KSUB), (KPER, KSUB), (ABSI, KSUB) e (CPER, KSUB). É significativo que o parâmetro KSUB é um elemento presente em todos os pares citados. Pode-se inferir deste fato que existe um efeito dominante do KSUB em relação aos demais parâmetros, confirmando a experiência prática da calibração manual realizada para o modelo SMAP. Usualmente este é o primeiro parâmetro a ser ajustado manualmente. Para visualizar uma superfície de resposta do modelo para um par de parâmetros, selecionamos o par (KPER, CPER), onde cada um dos parâmetros apresentou um índice de sensibilidade elevado. De acordo com Sorooshian e Gupta (1985), estes parâmetros podem ser candidatos para um novo processo de parametrização. A figura 2 mostra as superfícies de resposta para dois cenários diferentes. O cenário 1, mostrado na figura 2a é composto dos seguintes valores: KSUP = 0.5, KPER=0.05, KSUB= 0.99985, ABSI=0.70, CPER=0.25. O cenário 2 aparece na figura 2b com os seguintes valores: KSUP = 0.5, KPER=0.05, KSUB= 0.99985, ABSI=0.70, CPER=0.50. Existe um paralelismo entre as curvas para a resposta do modelo, o que indica um certo grau de interação. Podemos notar também que existe mais de uma direção de orientação para as curvas da função objetivo, mostrando portanto a complexidade que pode estar envolvida num conjunto de parâmetros. Com relação ao índice de sensibilidade, os valores próximos de 1.0, assumidos pelos parâmetros KSUP e KSUB, que correspondem aos coeficientes de recessão para os reservatórios de superfície e subterrâneo, indicam que eles são essenciais no modelo, uma vez que seus efeitos não podem ser compensados por outros parâmetros. Se examinarmos os modelos chuva-vazão em geral, notamos a presença de parâmetros associados com a recessão dos reservatórios que constituem o modelo. Os hidrólogos conhecem de forma intuitiva a importância destes tipos de parâmetros. Numa posição intermediária está o parâmetro ABSI, que está conectado à retenção de água na superfície do solo. CPER é o parâmetro que apresenta o maior valor para o índice de sensibilidade, que pode indicar um parâmetro que pode ter seu efeito mais facilmente compensado ou eventualmente ser deixado constante. O parâmetro KPER, segundo valor mais alto do índice de sensibilidade, é possivelmente afetado pelo comportamento do parâmetro CPER. Ambos os parâmetros estão presentes na equação de percolação do modelo SMAP [$QPER = (NSOL - CPER * NSAT) * KPER * NSOL / NSAT$]. Sorooshian e Gupta (1985), utilizando o modelo SIXPAR,

observaram de forma semelhante altos valores para o índice de sensibilidade para os parâmetros Z e X, ambos integrante da equação de percolação do modelo $[QPER = \beta[1 + Z(L_t)^X]U_t]$. Baseado nisto eles desenvolveram uma técnica de reparametrização, específica o modelo SIXPAR, e aplicaram na variável Z, visando uma melhoria do processo de otimização.

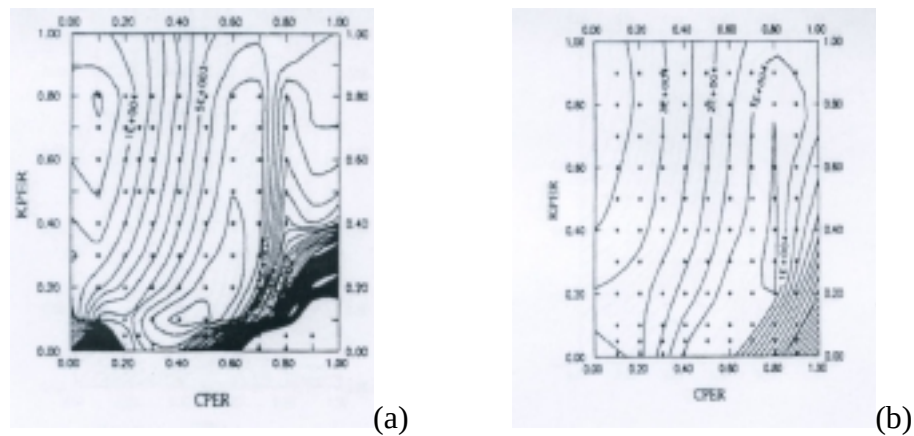


Figura 2 - Superfícies de resposta dos parâmetros KPER x CPER. (a) cenário 1, (b) cenário 2.

Modelo WATFLOOD

O modelo chuva-vazão distribuído WATFLOOD (Kouwen, 1988) considera em sua formulação a cobertura do solo e o conceito de unidade de resposta conjunta ("grouped response unit" - GRU). A unidade de resposta conjunta pode ser definida como uma região da bacia hidrográfica cujas unidades hidrológicas podem ser agrupadas de forma conveniente tendo em vista o processo de modelagem da bacia. Por exemplo, regiões uniformes do ponto de vista meteorológico, convenientes para a interpolação de registros meteorológicos, ou em células de grade, que são convenientes para a integração com coordenadas de mapas e informações de sensoriamento remoto (Tao e Kouwen, 1989). Nesta abordagem, áreas que apresentam resposta hidrológica similar dentro de um GRU são consideradas em conjunto, independente de sua localização na unidade, sendo tratadas separadamente no cálculo do escoamento superficial. A definição das unidades de resposta conjunta leva em consideração a cobertura do solo na bacia: regiões que apresentam a mesma classe de uso do solo são agrupadas em uma mesma unidade, e consideradas em conjunto no modelo.

A análise de sensibilidade realizada para o WATFLOOD utilizou o índice de sensibilidade definido anteriormente. A construção da matriz de reestruturação envolve o cálculo das derivadas segundas da vazão gerada pelo modelo em relação a cada um dos parâmetros. Para este trabalho as derivadas foram calculadas numericamente. Neste estudo foi utilizada a bacia do rio Big Otter, localizada em Tillsonburg, Ontario, Canadá. De forma similar ao estudo efetuado com o modelo

SMAP, gerou-se uma série de vazões a partir de dados medidos de precipitação de forma a criar um cenário potencialmente perfeito. O evento chuvoso observado no dia 16 de junho de 1984 foi escolhido para esta análise; onde se considerou a média dos dados horários de precipitação de 6 postos do Serviço Ambiental Atmosférico (Atmosphere Environment Service - AES). Todos os postos localizam-se fora dos limites da bacia. Ainda como parte do cenário criado, considerou-se uma distribuição hipotética das classes de cobertura do solo para a bacia: em cada elemento do modelo admitiu-se que cada uma das classes consideradas (solo nu, plantação, floresta e área alagadiça) ocupava 25% da área de cada elemento. Neste sentido, os resultados para os índices de sensibilidade dos parâmetros não apresentariam tendenciosidade ou seriam afetados pelas diferentes proporções das coberturas vegetais na bacia. Admitiu-se ainda que a umidade do solo apresentava-se constante para cada elemento.

Foram considerados para o estudo 17 parâmetros com os seguintes valores adotados: ISM (umidade inicial do solo) = 0.17; DS1 (coeficiente do reservatório superficial da classe solo nu) = 2.00; DS2 (coeficiente do reservatório superficial da classe floresta) = 10.00; DS3 (coeficiente do reservatório superficial da classe plantação) = 3.00; DS4 (coeficiente do reservatório superficial da classe área alagadiça) = 10^9 ; REC1 (coeficiente do reservatório subterrâneo da classe solo nu) = 0.00101; REC2 (coeficiente do reservatório subterrâneo da classe floresta) = 0.00101; REC3 (coeficiente do reservatório subterrâneo da classe plantação) = 0.00101; REC4 (coeficiente do reservatório subterrâneo da classe área alagadiça) = 0.00101; AK1 (permeabilidade do solo para a classe solo nu) = 0.036; AK2 (permeabilidade do solo para a classe floresta) = 1.80; AK3 (permeabilidade do solo para a classe plantação) = 0.02; AK4 (permeabilidade do solo para a classe área alagadiça) = 2.02; R31 (rugosidade superficial para a classe solo nu) = 19.70; R32 (rugosidade superficial para a classe floresta) = 19.70; R33 (rugosidade superficial para a classe plantação) = 19.70 e R34 (rugosidade superficial para a classe área alagadiça) = 8.98.

Cada parâmetro inicial foi perturbado em três diferentes graus: $\pm 10\%$, $\pm 30\%$ e $\pm 50\%$. A partir da perturbação de um único parâmetro, foram geradas pelo modelo as séries de vazões correspondentes. Para cada perturbação e para cada posto foi associada uma matriz de reestruturação; a partir destas, foi possível calcular os índices de sensibilidade para cada um dos parâmetros do modelo. A tabela 2 apresenta a classificação final dos parâmetros em relação à sensibilidade do modelo, medida através do índice de sensibilidade – quanto menor a posição, maior a sensibilidade do modelo. A classificação final foi realizada segundo o seguinte critério: para cada perturbação os parâmetros foram classificados com base na média dos índices de sensibilidade obtidos para cada um dos 4 postos.

Tabela 2 - Classificação dos parâmetros do modelo WATFLOOD
com base no índice de sensibilidade

Parâmetro	Posição + 10%	Posição - 10%	Posição + 30%	Posição - 30%	Posição + 50%	Posição - 50%	Soma	Posição final
1 – ISM	2	2	2	2	1	1	10	2
2 – DS1	1	1	1	1	2	2	8	1
3 – DS2	12	12	12	13	12	12	73	12
4 – DS3	3	3	3	3	3	3	18	3
5 – DS4	17	17	17	17	17	17	102	17
6 – REC1	5	5	5	5	5	6	31	5
7 – REC2	10	11	10	6	11	11	59	10
8 – REC3	4	4	4	4	4	5	25	4
9 – REC4	11	10	11	7	12	12	63	11
10 – AK1	7	7	8	10	7	8	47	7
11 – AK2	16	16	15	12	14	14	87	16
12 – AK3	6	6	9	8	8	7	44	6
13 – AK4	13	13	16	14	15	13	84	14
14 – R31	9	9	7	9	9	9	52	8
15 – R32	14	14	14	15	13	16	86	13
16 – R33	8	8	6	11	10	10	53	9
17 – R34	15	15	13	16	16	15	90	15

A posição final atribuída a cada parâmetro foi baseada na ordem ascendente da soma das posições determinadas para cada perturbação. Analisando a tabela 2 percebe-se que a umidade inicial do solo possui um efeito significativo no modelo, já que este parâmetro possui um papel significativo na definição do hidrograma para determinado evento chuvoso. Um outro resultado interessante da análise de sensibilidade do modelo WATFLOOD foi que os parâmetros associados às classes área alagadiça e floresta tiveram um efeito menos relevante do que os associados às classes solo nu e plantação. Este resultado indica que essas duas classes devem merecer maior atenção na modelagem da região. Resultado semelhante foi apresentado em Kite (1992) a partir da análise de sensibilidade do modelo SLURP, que também levou em consideração as diferentes classes de cobertura do solo da região estudada, a saber: solo nu, floresta e grama. Este modelo também tem como parâmetros o armazenamento em depressões e a condutividade saturada do solo. Os resultados apresentados no referido artigo indicaram que o modelo apresentou maior sensibilidade aos parâmetros relacionados às classes solo nu e grama. No modelo WATFLOOD a posição do índice de sensibilidade indica a seguinte ordem de importância: umidade inicial do solo, coeficiente do reservatório superficial, coeficiente do reservatório subterrâneo, permeabilidade e rugosidade superficial do solo.

DISCUSSÕES E CONCLUSÕES

A revisão da literatura sobre análise de sensibilidade de SVATS mostrou pontos importantes. Por exemplo, na análise realizada para o BATS (Gao *et al.*, 1996), o modelo revelou uma elevada sensibilidade à quantidade de chuva anual, a parâmetros relacionados à textura do solo e a parâmetros biofísicos da cobertura vegetal. Um dos efeitos resultantes dessa variabilidade é a previsão da umidade do solo, que foi subestimada. Dentro das linhas propostas para a evolução dos esquemas de superfície, o segundo ponto nos mostra a importância em melhor descrever a variabilidade horizontal dos processos de superfície. Nesta linha, o acoplamento de modelos hidrológicos, dotados de parametrizações que descrevam melhor a variabilidade da umidade no solo na escala de subgrade, e que permitam que essa variabilidade seja adequadamente representada nas escalas regionais e continentais, em modelos atmosféricos, deve representar um importante avanço para previsão dos campos de precipitação. Uma vez que os modelos atmosféricos sejam capazes de gerar campos de precipitação mais realistas, espera-se um efeito sinérgico para os modelos hidrológicos, que mostraram-se sensíveis, por exemplo, ao estado inicial da umidade do solo, conforme conclusões da análise de sensibilidade aplicada aos modelos chuva-vazão.

Neste trabalho efetuou-se a análise de sensibilidade de dois modelos hidrológicos chuva-vazão, de diferentes concepções, o que permitiu uma melhor compreensão do comportamento e do papel dos parâmetros de cada um. Para o modelo SMAP foram obtidas expressões analíticas para as derivadas da função objetivo. O índice de concentricidade e o índice de sensibilidade foram obtidos. Para o modelo WATFLOOD foram obtidas numericamente as derivadas da vazão resultante, o que permitiu que fossem calculados os índices de sensibilidade do modelo.

Verificou-se que a equação de percolação do modelo SMAP, de forma semelhante à do modelo SIXPAR, possui parâmetros que apresentam certo grau de interação, o que pode levar a problemas no processo de calibração do modelo. A análise do modelo WATFLOOD revelou que a umidade inicial do solo constitui-se em um parâmetro fundamental, informação que pode ser obtida na escala da bacia hidrográfica através do uso de técnicas de sensoriamento remoto. Mostrou-se ainda que um mesmo parâmetro, associado a diferentes classes de uso do solo, apresenta efeitos distintos sobre o modelo. A análise de sensibilidade pode indicar a quais parâmetros os resultados de uma simulação se mostram mais sensíveis, ou seja, aqueles que contribuem de forma mais intensa para a incerteza na resposta do modelo. Esta análise pode-se constituir ainda em um guia para a decisão de quais parâmetros obter de forma mais acurada.

REFERÊNCIAS

- AVISSAR, R. (1998) Which type of soil-vegetation-atmosphere transfer scheme is needed for general circulation models: a proposal for higher-order scheme. *J. Hydrology*. v.212-213. pp.136-154.
- AVISSAR, R., PIELKE, R.A. (1989) A parameterisation of heterogeneous land surfaces for atmospheric numerical models and its impact on regional meteorology. *Month. Wea. Rev.* v.117, pp. 2113-2136.
- AVISSAR, R., VERSTRAETE, M.M. (1990) The representation of continental surface processes in atmospheric models. *Reviews of Geophysics and Space Physics*. n.28, pp. 35-52.
- BEVEN, K.J., KIRKBY, M.J. (1979) A physically-based, variable contributing area model of a basin hydrology. *Hydrol. Sci. Bul.* n.24, 1-3
- CARSON, D.J. (1982) Current parametrization of land surface processes in atmospheric general circulation models. In: Eagleson, P. (ed.) *Land Surface Porcesses in Atmospheric General Circulation Models*. Cambridge University Press, New York, pp.67-108.
- COLLINS, D.C, AVISSAR, R. (1994) An evaluation with the Fourier Amplitude Sensitivity Test (FAST) of which land surface parameters are of greatest importance in atmospheric modelling. *J. Climate*. v.7,n.5,pp.681-703.
- DEARDORFF, J.W. (1978) Efficient prediction of ground surface temperature and moisture, with inclusion of a layer of vegetation. *J. Geophy. Res.* v.83, p.21889-1903.
- DICKINSON, R.E. (1983) Land surface processes and cliamte-surface albedoes and energy balance. In: Saltzmann, B. (ed.). *Theory of Climate. Advances in Geophysics*. v.25. pp. 305-353.
- DICKINSON, R.E. (1984) Modeling evaporation for three-dimensional global climate models. In: Hansen, J.E e Takahasi, T. (eds.). *Geophysics Monographs*. n.29. Maurice Ewing. v.5. Climate processes and climate sensitivity. American Geophysical Union, Washington D.C. pp.58-71.
- DOOGE, J.C.I. (1992) Hydrology Models and Climate Change. *J. Geophy. Res.* v.97, n.D3, pp.2677-2686.
- FAMIGLIETTI, J.S., WOOD, E.F. (1990) Evapotranspiration and runoff from large land areas : Land surface hydrology for atmospheric general circulation models, in Wood, E.F.(ed) *Land surface-atmospheric interactions for climate models : observations, models and analyses*.
- GAO, X., SOROOSHIAN S. e GUPTA, H.V. (1996) Sensitivity analysis of the biosphere-atmosphere transfer scheme. *J. Geophy. Res.* v.101, n.D3, pp.7279-7289.

- HENDERSON-SELLERS, A .(1991) "Incorporating" vegetation and soil schemes into atmospheric general circulation climate models. Proceedings of the IAHS Symposium on Hydrological Interactions between Atmosphere, Soil and Vegetation, Vienna, IAHS publication n.204, pp. 11-20.
- KITE, G.W., KOUWEN, N. (1992) Watershed modelling using land classifications. Water Resour. Res. v.28, n.12, pp.3193-3200.
- KOUWEN, N. (1988) WATFLOOD : a micro-computer based forecasting system based on real-time weather radar. Can. Water Resour. Journal. v.13, n.1, pp.62-77.
- KUHN, T.S. (1957) The Copernican revolution : planetary astronomy in the development of western thought.
- LOPES, J.E.G., BRAGA, B.P.F., CONEJO, J.G.L. (1981) SMAP, a simplified hydrologic model. International Symposium on Rainfall-Runoff Modelling, Mississippi State University, Mississippi.
- HOLLOWAY, J.L. e MANABE, S. (1971) Simulation of climate by a global general circulation model. I: Hydrology cycle and heat balance. Month. Wea. Rev. n.99, pp. 335-370.
- MANABE, S., SMAGORINSKI, J. e STRICKLER, R.J. (1965) Simulated climatology of a general circulation model with a hydrolocal cycle. Mont. Wea. Rev. v.97, pp.739-774.
- McCUMBER, M.C. (1980) A numerical simulation of the influence of heat and moisture fluxes upon meso-scale circulations. Ph.D.Thesis, No. UVA-ENV SCI MESO 1980-2, University of Virginia, 255pp.
- PITMAN, A .J., GIORGI, F., HENDERSON-SELLERS, A . (1991) South East Australia's wintertime precipitation : Sensitivity of climate predictions to model resolution, Australian Meteo. Magazine, n.39, pp. 21-35.
- PITMAN, A .J. (1993) The sensitivity of the land surface to the parameter values : a reassessment. In: Wilkinson, W.B. (ed.) Macroscale modelling of the hydrosphere. Proceedings of the Yokohama Symposium, IAHS Publication n.214, pp. 125-132.
- SELLERS, P.J. (1986) The simple biosphere model (SiB). In: Rosenzweig, C. e Dickinson R. (eds.) Proceedings of the workshop held at NASA/Goddard, Greenbelt, Maryland, janeiro 1986, UCAR/Oe Dickinson R. (eds.) Proceedings of the workshop held at NASA/Goddard, Greenbelt, Maryland, janeiro 1986, UCAR/OIES Report OIES-2, pp. 87-90.
- SELLERS, P.J., MINTZ, Y., SUD, Y.C. e DALCHER, A. (1986) A simple biosphere model (SiB) for use within general circulation models. J. Atmos. Sciences. v.43. pp.505-531.
- SOROOSHIAN, S.,GUPTA, V.K. (1985) The analysis of structural identifiability: theory and application to conceptual rainfall-runoff models. Water Resour. Res.v.12, n.4,pp.487-495.

- TAO, T., KOUWEN, N. (1989) Remote sensing and fully distributed modelling for flood forecasting, J. Water Resour. Plan. and Manag. ASCE, v.115, pp. 809-823.
- WILSON, M.F., HENDERSON-SELLERS, A., DICKINSON, R.E., KENNEDY, P.J. (1987) Sensitivity of the Biosphere Atmosphere Transfer Scheme (BATS) to the inclusion of variable soil characteristics. J. Climate and Applied Meteorology, n.26, pp.341-362.
- WOOD, E.F., LETTENMAIER, D.P., ZARTARIAN, V.G. (1992) A land-surface hydrology parameterization with subgrid variability for general circulation models. J. Geophys. Res. v.97, n.D3, pp.2717-2728.
- XU, L., LETTENMAIER, D.P., WOOD, E.F., BURGESS, S.J. (1994) A simple hydrologically based model of land surface water and energy fluxes for general circulation models. J. Geophys. Res. v.99, n.D7, pp.14,415-14,428.
- YAMADA, T. (1982) A numerical model simulation of turbulent air flow in an above the canopy. J. of Meteorological Society of Japan. v.60. pp.439-454.
- YANG, Z.L., PITMAN, A. J., HENDERSON-SELLERS, A. (1993) Implementing an advanced land-surface scheme into an AGCM : methodology and results. In : Bolle, H.J., Feddes, R.A. and Kalma, J.D.(eds) Exchange processes at the land surface for a range of space and time scales. Proceedings of the Yokohama Symposium, IAHS publication n. 212, pp.583-590.
- YU, Z., LAKHTAKIA M.N., YARNAL, B., WHITE, R.A., MILLER, D.A., FRANKS B., BARRON, E.J., DUFFY, C. E SCHWARTZ, F.W. (1999) Simulating the river-basin response to atmospheric forcing by linking a mesoscale meteorological model and hydrologic model system. J. Hydrology. v.218. pp.72-91.