



Sistema de suporte à decisão para alocação de água em projetos de irrigação

Mirléia A. de Carvalho¹, Arisvaldo V. Mélo Júnior², André Schardong³ & Rubem L. L. Porto⁴

RESUMO

Neste artigo se apresenta um modelo visando analisar a alocação de água para irrigação, denominado IrrigaLS. Os volumes de água armazenados no solo e nos reservatórios superficiais constituem variáveis de decisão do modelo de rede de fluxo na análise de alocação. O IrrigaLS é um dos programas que integram a base de modelos do sistema de suporte à decisão AcquaNet. As avaliações indicaram que o IrrigaLS foi eficiente para simular sistemas complexos de recursos hídricos sob condição de múltiplos usos, calcular a necessidade hídrica real das culturas e informar garantias de um suprimento mínimo de água para as culturas em períodos de seca. O programa considera a precipitação no balanço hídrico do solo, possibilita variar os volumes meta para armazenamento de água no solo e diferenciar as culturas em relação à sensibilidade ao déficit hídrico. O fato de considerar as interações entre os fatores água, solo, clima e planta, permite uma aproximação melhor para se obter eficiência de uso da água e também melhor estimativa da produção agrícola.

Palavras-chave: modelo de simulação, modelo de otimização, planejamento de recursos hídricos

Decision support system for water allocation in irrigation projects

ABSTRACT

This paper presents a model, called IrrigaLS, to analyze the water allocation for irrigation. The water volumes stored in the soil and in the superficial reservoirs constitute decision variables of the network flow model in the allocation analysis. IrrigaLS is one of the programs that form the base of models of the decision support system called AcquaNet. Evaluations have shown that IrrigaLS is efficient at simulating complex water resource systems under multiple usage condition. IrrigaLS allows the real water needs of the crops to be determined, it guarantees a minimum water supply to the crops during drought periods, as well as water saving by the inclusion of rainfall. It also makes possible the choice of soil moisture target, to differentiate the crops in relation to the water deficit sensitivity and to calculate the soil daily water budget. The fact that it takes into account the interactions between water, soil, weather and plant allows for a better approach to a more efficient water use as well as to estimate the agricultural production.

Key words: simulation model, optimization model, water resources planning

¹ DEG/UFLA, Campus Universitário, CP 3037, CEP 37200-000, Lavras, MG. Fone/Fax: (35) 3829-1481. E-mail: mirleia@ufla.br

² DEA/UFS, Cidade Universitária Prof. José Aluísio de Campos, Jardim Roza Elze, CEP 49100-000, São Cristóvão, SE. Fone: (79) 2105-6927, Fax: (79) 2105-6566. E-mail: arisvaldomello@ufs.br

³ Doutorando EPUSP, Av. Prof. Almeida Prado, 83, Travessa 2, Cidade Universitária, Prédio Engenharia Civil, PHD. CEP 05508-900, São Paulo, SP. Fone: (11) 3091-5549. E-mail: andreschardong@gmail.com

⁴ EPUSP. Fone: (11) 3091-5549. E-mail: rlporto@usp.br

INTRODUÇÃO

A eficiência do uso da água é tema de grande preocupação entre órgãos gestores de recursos hídricos em todo o País. A preocupação de se alcançar o uso racional da água constitui meta a ser perseguida nas ações de planejamento e da gestão de recursos hídricos.

Em ambiente de múltiplos usos, o bom conhecimento das necessidades dos diversos usuários e das disponibilidades hídricas é fundamental para uma boa gestão; entretanto, as incertezas hidrológicas, as variações das demandas e o grande número de variáveis representativas dos processos físicos, químicos e biológicos, conferem elevado nível de complexidade à análise dos sistemas de recursos hídricos.

Dentre os diversos usos da água, a irrigação é uma das atividades econômicas que apresentam as maiores demandas de água para a produção e, com o crescimento populacional, tende a se tornar cada vez maior (Garduno, 1994). No mundo, a agricultura consome aproximadamente 69% de toda a água derivada dos rios, lagos e aquíferos subterrâneos (Christofidis, 1997 apud Paz et al., 2000).

Há, portanto, a necessidade de se estimular um manejo racional do uso da água na agricultura. Segundo Paz et al. (2000), o uso eficiente da água está relacionado a outros conceitos de manejo atual dos recursos ambientais, sendo básico para o desenvolvimento sustentável.

O manejo adequado da água na agricultura não pode ser considerado uma etapa independente do processo de produção agrícola mas, sim, analisado dentro do contexto de um sistema integrado (Cardoso et al., 1998 apud Paz et al., 2000).

Sistemas de suporte a decisões (SSD) têm sido utilizados como ferramenta para auxiliar a resolução de tais problemas. Existem, atualmente, alguns SSD que simulam com eficiência sistemas complexos de recursos hídricos, assim como modelos que calculam a demanda de irrigação total e/ou suplementar (Carvalho, 2003), porém nenhum deles incorpora essas duas características.

Foi desenvolvida uma ferramenta que facilite a análise de estratégias de manejo de irrigação em um contexto integrado e compartilhado com os outros usos da água e, para o proposto, um programa computacional que utiliza um modelo de rede fluxo para solucionar o problema de alocação de água, um banco de dados e uma interface gráfica orientada a objeto.

O programa, denominado IrrigaLS, faz parte do sistema de suporte a decisão AcquaNet e é generalizado, ou seja, pode ser utilizado para representar diversos tipos de problemas de rede de fluxo, em bacias hidrográficas de diferentes características.

MATERIAL E MÉTODOS

O SSD AcquaNet

O AcquaNet é um sistema de suporte à decisão, composto de um banco de dados para armazenar as informações da

rede de fluxo, uma base de modelos e uma interface de comunicação com o usuário (Porto et al., 2003). O sistema foi originado de um modelo de rede de fluxo denominado Modsim (Labadie, 1988) e o ModsimLS (Roberto & Porto, 2001), uma versão atualizada do primeiro.

O AcquaNet mistura características dos modelos de simulação e otimização e pode incorporar as características estocásticas das vazões de entrada (Porto & Azevedo, 1997). Assim, a maior parte das configurações e estruturas operacionais das bacias hidrográficas pode ser representada por meio da especificação de dados de entrada apropriados (Roberto & Porto, 1999).

Uma das principais características do sistema é o fato de que o modelo incorpora automaticamente uma série de funções que são comuns na simulação de bacias hidrográficas sem que o usuário tenha que se preocupar em programá-las. Os usuários podem colocar quantos nós de demanda forem necessários para levar em conta as demandas na bacia.

O SSD possui uma interface de comunicação com o usuário amigável, a operação dos reservatórios é feita utilizando-se o conceito de volume meta ao qual se atribui uma prioridade, e as perdas por evaporação dos reservatórios são levadas em conta por meio de processo iterativo.

Atualmente, o sistema adota o intervalo de análise mensal e, além de ser um instrumento de gerenciamento, também pode ser usado para o planejamento, para a análise do impacto de propostas alternativas para a implantação de projetos de aproveitamento de recursos hídricos; e também pode servir no processo de seleção inicial de alternativas com base na análise econômica, em um nível simplificado, por meio da inclusão direta de dados de custos e benefícios, em lugar da especificação relativa de prioridades.

O modelo IrrigaLS

O modelo de alocação de água para irrigação, incorporado ao AcquaNet, foi desenvolvido com base na adaptação do conceito de reservatório superficial para funcionar como reservatório de armazenamento de água no solo; a representação esquemática das relações existentes entre os dois reservatórios é apresentada na Figura 1.

O IrrigaLS mantém as mesmas características do modelo original com a diferença de calcular a demanda de irrigação total e/ou suplementar, estabelecendo distinção entre as culturas com relação ao déficit hídrico. A lógica para calcular a alocação da água no sistema de recursos hídricos é não utilizar a água armazenada nos reservatórios superficiais enquanto a água armazenada no solo satisfizer as exigências hídricas das culturas.

Formulação matemática do modelo

A rede de fluxo é representada por nós e arcos, em que os nós são os pontos da rede para onde convergem ou de onde saem os fluxos e os arcos são as ligações entre os nós que transportam os fluxos. Fluxos são as quantidades de água por unidade de tempo, que são as variáveis de decisão do modelo. A Figura 2 ilustra as definições e exemplifica a configuração da rede.

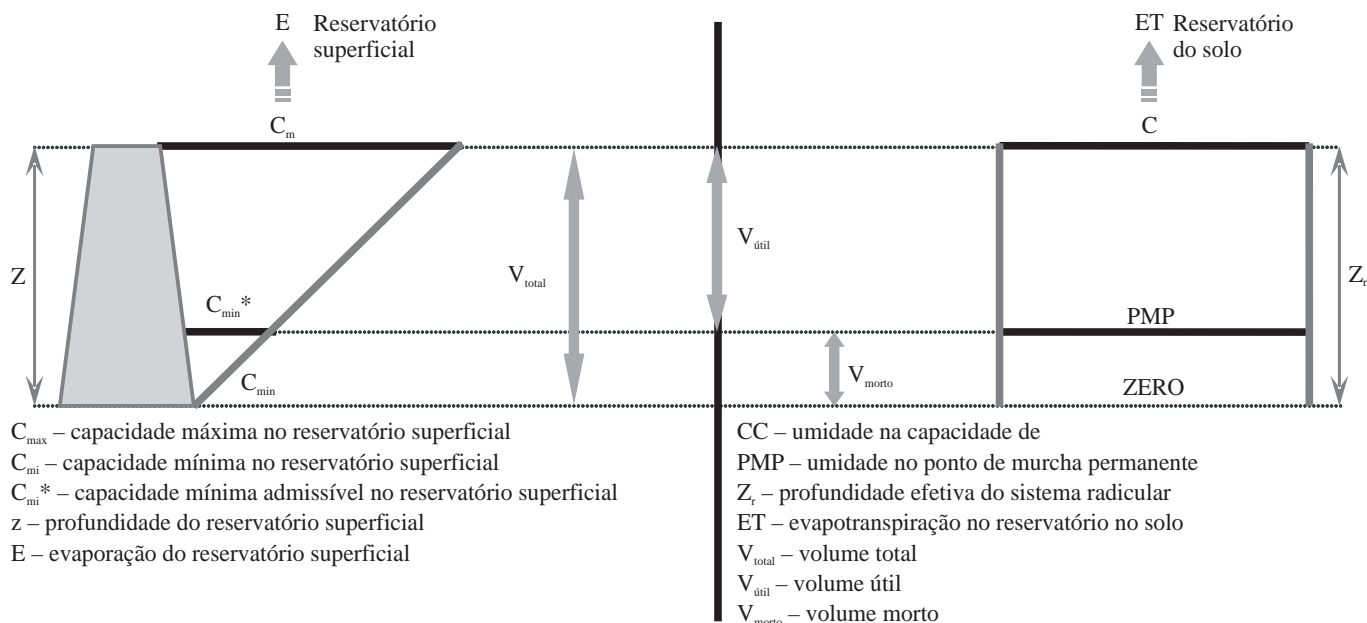


Figura 1. Representação esquemática das relações existentes entre o reservatório superficial e o do solo

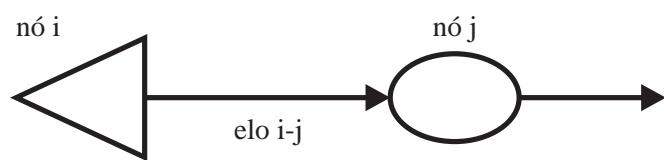


Figura 2. Representação de uma rede de fluxo com nós e arcos

O modelo considera que os arcos são limitados por uma capacidade de transporte mínima e máxima, que a soma dos quantitativos dos fluxos que chegam a um nó é igual à soma dos quantitativos dos fluxos que saem deste nó, e, ainda, que cada arco pode ser associado a um custo pelo transporte do fluxo.

A formulação do modelo de otimização a ser resolvido é apresentada pelas equações abaixo:

$$\text{Min} \sum c_{ij} X_{ij} \tag{1}$$

$$L_{ij} \leq X_{ij} \leq U_{ij} \tag{2}$$

$$\sum X_{ij} = \sum X_{jk} \tag{3}$$

em que: c_{ij} é o custo do transporte de uma unidade de fluxo através do arco ij ; x_{ij} é a quantidade de fluxo que passa pelo arco ij ; L_{ij} é a capacidade mínima do arco ij ; U_{ij} é a capacidade máxima do arco ij .

A Eq. 1 representa a função objetivo que minimiza o custo do transporte do fluxo pelos arcos e a Eq. 2 se refere à restrição de capacidade da rede, enquanto a Eq. 3 representa a restrição de conservação de massa.

Devido à sua grande eficiência se usou o algoritmo denominado Out-of-Kilter; trata-se de um algoritmo de programação linear primal-dual, desenvolvido especialmente para a solução eficiente de problemas de minimização de custos em redes de fluxo (Roberto, 2002).

Uma das principais características do modelo de alocação de água é que ele incorpora automaticamente uma série de funções que são comuns na simulação de bacias hidrográficas sem que o usuário tenha que se preocupar em programá-las e pode tratar um grande número de variáveis.

As demandas podem ser consumptivas ou não. O atendimento às demandas é feito de acordo com um valor de prioridade atribuída pelo usuário, que pode variar de 1 a 99, sendo o valor 1 a maior prioridade. As prioridades P e os custos C , estão relacionados de forma biunívoca ($C = 10P - 1000$); isto significa que os valores de C são sempre negativos; portanto, ao atender a uma prioridade o modelo estará diminuindo os custos da rede de um valor C por unidade de vazão fornecida.

Faz-se a operação dos reservatórios utilizando-se o conceito de volume meta ou nível meta, ao qual se atribui uma prioridade; desta forma, sempre que o volume armazenado for menor que o volume meta, o reservatório guardará água, desde que as outras prioridades da rede sejam menores.

O volume armazenado acima do nível meta tem custo zero, ou seja, é livre para atender a quaisquer demandas, por menores que sejam suas prioridades. As perdas de condução em canais e de evaporação dos reservatórios são levadas em conta por meio de processo iterativo.

A otimização do modelo de rede de fluxo é executada a cada intervalo de tempo mensal, de forma seqüencial. Este intervalo é usualmente utilizado para os problemas de planejamento e gerenciamento de recursos hídricos, embora a técnica seja aplicável a intervalos mais curtos.

Enfatiza-se, entretanto, que na maioria dos modelos de rede de fluxo a otimização efetuada não é dinâmica, isto é, não se garante o ótimo global para um período de n intervalos de tempo à frente.

Determinação das variáveis envolvidas

Admitindo-se o solo como reservatório de água em uma área agricultável, ele possui uma profundidade útil igual à

profundidade efetiva do sistema radicular (Z_r), uma capacidade máxima igual à capacidade de campo (CC) e uma capacidade mínima igual ao ponto de murcha permanente (PMP), conforme Figura 1.

Segundo Reichardt & Timm (2004), o volume de água considerado disponível para a planta no perfil do solo e na Z_r é dado por:

$$VDA = CAA A_i 10^{-3} \quad (4)$$

em que: VDA é o volume disponível de água no solo (hm^3); A_i a área total irrigada (km^2); e CAA a lâmina real de água no solo (mm), expressa pela seguinte equação (Doorenbos & Kassan, 1979):

$$CAA = CTA Z_r f = \frac{1}{10} (CC - PMP) D_a Z_r f \quad (5)$$

em que: CTA é a capacidade total de água no solo (mm cm^{-1} de solo); Z_r a profundidade efetiva do sistema radicular (cm); f a fração de esgotamento de água disponível no solo; CC o conteúdo da umidade à capacidade de campo (%); PMP o conteúdo da umidade no ponto de murcha (%) e D_a a densidade aparente do solo (g cm^{-3}).

Segundo Lima et al. (1999) e se admitindo as perdas existentes no sistema de irrigação, a irrigação total necessária (ITN) é calculada por:

$$ITN = \frac{IRN}{\varepsilon} \quad (6)$$

em que: ITN é a lâmina total de irrigação necessária (mm); IRN a lâmina real de irrigação necessária (mm), que deve ser menor ou igual a CAA ($IRN \leq CAA$); e ε a eficiência de aplicação da irrigação (adimensional).

Para o caso de irrigação suplementar acrescenta-se, à lâmina de água do solo, a precipitação efetiva (PP_e) e a água no solo antes da primeira irrigação (AS). A PP_e é calculada pelo IrrigaLS através do método do Soil Conservation Service (SCS). O cálculo da evapotranspiração real ou atual (ET_a) é baseado na disponibilidade de umidade do solo:

$$ET_a = ET_p K_s \quad (7)$$

em que: ET_a é a evapotranspiração atual ou real da cultura (mm m^{-1}); e ET_p a evapotranspiração potencial da cultura (mm m^{-1}) calculada por:

$$ET_p = ET_o K_c \quad (8)$$

em que: ET_o é a evapotranspiração de referência (mm m^{-1}); e K_c o coeficiente de cultura (adimensional) (Doorenbos & Pruitt, 1977).

No IrrigaLS a ET_a é calculada a partir da adaptação da tabela cota-área-volume do reservatório superficial; tal adaptação parte das definições da capacidade de armazenamento de água no solo e do coeficiente que relaciona a umidade do solo (K_s) cuja determinação é dada pela seguinte

equação, em que a umidade do solo decresce de forma exponencial:

$$K_s = \frac{\ln(UA - PMP + 1)}{\ln(CC - PMP + 1)} = \frac{\ln(CAA + 1)}{\ln(CTA + 1)} \quad (9)$$

em que: K_s é o coeficiente que relaciona a umidade do solo (adimensional); UA a umidade atual de água no solo (mm); CAA é definido na Eq. 2; e CTA é definido na Eq. 4.

Na Tabela 1 são mostradas as adaptações feitas; as colunas de números um, quatro e seis, correspondem aos dados da curva cota-área-volume do reservatório do solo.

Tabela 1. Demonstração da montagem da tabela cota-área-volume no modelo IrrigaLS

Cota	Umidade do Solo [%]	CAA [mm]	Volume [Mm ³]	Ks [adimens]	Área [km ²]
1	PMP	0		0	
2					
3	interpol	interpol	CAA.A _i .10-3	interpol	Ks . A _i
4					
5	CC	CTA		1	

Depois de realizada a interpolação na tabela cota-área-volume, o valor resultante será multiplicado pela ET_p para se obter o volume de água evapotranspirado, conforme a equação a seguir.

$$K_s A_i ET_p = \frac{ET_a}{ET_p} A_i ET_p = ET_a A_i \quad (10)$$

Faz-se a montagem da tabela no modelo sem interferência do usuário. As variáveis envolvidas dependem das condições de umidade do solo, do clima e da cultura, que são dados de entrada do modelo.

O rendimento da cultura é determinado considerando-se o efeito do estresse hídrico na planta, através da relação entre a queda de rendimento relativo ($1 - Y_a/Y_p$) e o déficit de evapotranspiração relativa ($1 - ET_a/ET_p$), dada pelo coeficiente de resposta da cultura (K_y) obtido empiricamente (Doorenbos & Kassan, 1979), conforme:

$$(1 - Y_a/Y_p) = K_y (1 - ET_a/ET_p) \quad (11)$$

em que: Y_a é o rendimento real obtido; Y_p o rendimento potencial ou máximo obtido; K_y o coeficiente de resposta da cultura (tabelado); ET_a a evapotranspiração atual [mm m^{-1}]; e ET_p a evapotranspiração potencial (mm m^{-1}).

Ferramentas de avaliação da irrigação

O modelo fornece a opção de se calcular o balanço hídrico diário do solo para indicar, de maneira mais precisa, o manejo da irrigação. Os valores das variáveis envolvidas no cálculo do balanço são apresentados na forma de gráficos e tabelas. A comparação dos resultados obtidos com o IrrigaLS e com o balanço hídrico diário, possibilita verificar a precisão do modelo de alocação.

A resposta da cultura ao suprimento hídrico é quantificada por meio da verificação do efeito de água sobre o seu rendimento, ferramenta que possibilita, ao usuário, visualizar qual cultura é mais resistente ao déficit hídrico e permite verificar a possibilidade de ampliação da área irrigada.

A interface do IrrigaLS

A interface IrrigaLS foi desenvolvida no formato típico de um sistema de suporte a decisões, ou seja, estão presentes, em sua estrutura, um módulo de diálogo, uma base de dados e o modelo de alocação de água. O módulo de diálogo permite que toda a topologia do problema seja formulada apenas com a utilização do mouse e de uma série de ícones, em que os ícones representam reservatórios, canais, nós de passagem e ligações. Ao se acionar o botão dois do mouse sobre cada um desses ícones, tem-se acesso à base de dados da estrutura representada pelo ícone acionado; após a execução do programa os resultados podem ser consultados em forma gráfica ou tabular.

Os dados e resultados podem ser facilmente exportados para planilhas eletrônicas e processadores de texto; da mesma forma, os dados de entrada podem ser importados de planilhas. A topologia da rede de fluxo referente à bacia é construída por meio de nós e arcos representativos dos componentes físicos do sistema hídrico.

Considerando que as culturas apresentam exigências hídricas diferentes na montagem da topologia da rede, cada área ocupada por determinada cultura é considerada uma demanda de irrigação. Na Figura 3 se apresenta um exem-

plo de esquema da topologia usada na simulação de um sistema no IrrigaLS.

A tela de entrada e edição de dados para a demanda de irrigação consta das seguintes partes:

- características: em que são solicitadas as características da cultura, do sistema de irrigação e do solo, as quais se encontram no banco de dados mas, caso o usuário faça opção por outros valores, pode-se entrar manualmente;
- água (perda e contribuições): em que são solicitadas a evapotranspiração de referência, a precipitação e a água no solo, antes da primeira irrigação;
- volume meta do solo: em que são solicitadas a prioridade e o volume meta do solo.

O modelo IrrigaLS oferece três ferramentas de avaliação da irrigação, cujas opções podem ser acessadas através do menu Irrigação. As três opções são:

- método tradicional: apresenta o balanço hídrico diário no solo;
- comparação dos resultados: compara os resultados mensais do método do balanço hídrico e do IrrigaLS;
- comparação da queda de produção: oferece a visualização do efeito do déficit hídrico sobre a produção da cultura.

A eficiência do IrrigaLS e a validade das adaptações foram verificadas mediante comparação com outros dois métodos. Utilizaram-se, para análise, as demandas de irrigação que fazem parte do reservatório de Ponte Nova (Figura 3) por serem as mais representativas do sistema. Os métodos em

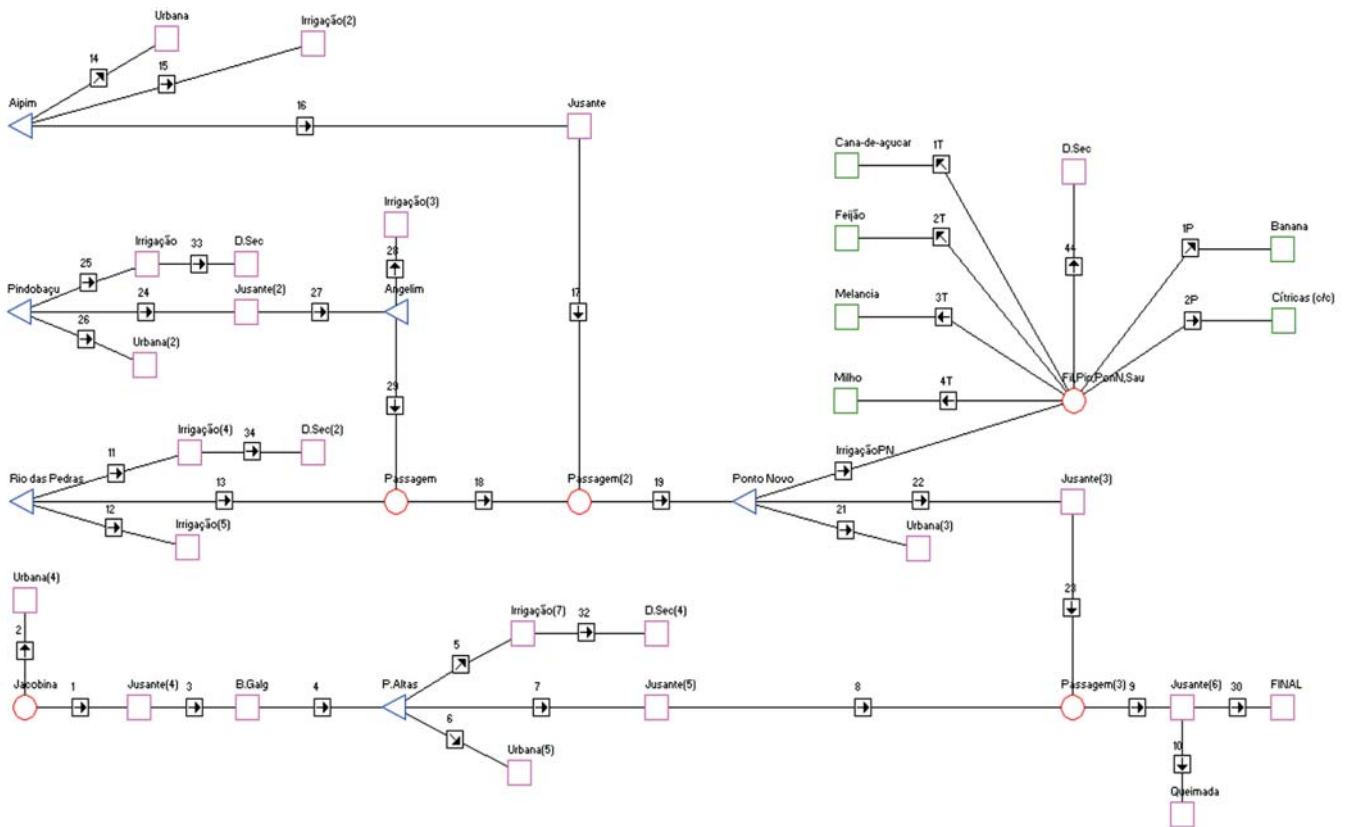


Figura 3. Topologia do sistema Itapicuru no IrrigaLS

análise foram:

- IrrigaLS x Balanço hídrico: permitiu verificar a validade das adaptações;
- IrrigaLS x ModSimLS: permitiu verificar se o IrrigaLS é apto para simular sistemas complexos de recursos hídricos e verificar as vantagens do modelo sobre um SSD convencional.

Região de estudo

A área escolhida para verificação do IrrigaLS foi a bacia do Itapicuru por se tratar de uma região que apresenta déficit hídrico com solos agricultáveis. A bacia do rio Itapicuru apresenta uma área de drenagem de 36.440 km² e está localizada na região semi-árida do Estado da Bahia.

O regime hídrico da região é irregular, mas com boa disponibilidade de águas superficiais e subterrâneas, além de recursos de solo apropriados para se desenvolver a agricultura irrigada. A bacia é constituída de seis reservatórios com capacidade total de armazenamento de 256 hm³ e as prioridades de fornecimento de água, são: consumo humano, des-sedentação de animais, irrigação e indústria. As precipitações variam de 478 a 1440 mm, com período chuvoso de fevereiro a junho e período seco de agosto a janeiro. O tipo predominante de solo são os Planossolos Solódicos.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados comparados se referem a diferentes culturas (banana, cana-de-açúcar, cítricas, melancia e milho). As culturas em estudo se diferenciam com relação ao ciclo vegetativo e os valores do coeficiente de cultura (K_c), à profundidade efetiva do sistema radicular (Z_r), ao coeficiente de resposta da cultura (K_y) e à área cultivada (A_i).

A comparação entre os resultados obtidos com o modelo IrrigaLS e os obtidos com o método do balanço hídrico, foi feita considerando-se, primeiro, $K_s = 1$ e volume meta (V_{meta}) do solo igual ao volume na CC. Na Tabela 2 se apresentam o número de irrigações mensais (N_i), os valores de IRN, ITN e ET_a (média anual) e os erros relativos e obtidos por ambos os métodos.

Os erros relativos para ET_a se apresentaram inferiores a 2,62% para as culturas em estudo, mostrando que as adaptações na tabela cota-área-volume do reservatório do solo no IrrigaLS são válidas. Verifica-se, também, que os erros relativos, apesar de aceitáveis (menor que 10%) não mantêm a mesma proporção entre IRN, ITN e ET_a nem entre as culturas, essas diferenças podem ser atribuídas à variação da área (A_i), uma vez que o modelo utiliza números inteiros nos cálculos. A velocidade de processamento é favorecida mas, em se tratando de pequenos volumes, há uma limitação na precisão do modelo.

Considerou-se, em uma segunda comparação, uma variação logarítmica de K_s e V_{meta} do solo abaixo da CC. Os valores de IRN, ITN e ET_a (média anual) e os erros relativos e obtidos pelo IrrigaLS e pelo método do balanço hídrico, para as culturas, são apresentados na Tabela 3.

Comparando-se os dados da Tabela 2 com os dados da Tabela 3, verifica-se que no método do balanço hídrico as lâminas para K_s logarítmico resultaram menores que para $K_s = 1$; no IrrigaLS, as lâminas são iguais, tanto para $K_s = 1$ como para K_s logarítmico; tais resultados se justificam pela diferença das metodologias de cálculo entre os dois métodos e indicam a validade das adaptações sugeridas nesse estudo, comprovando que o IrrigaLS é viável na determinação da demanda de irrigação.

No método do balanço hídrico, a menos que se prefira considerar a umidade no solo constante ($K_s = 1$), a cultura

Tabela 2. Lâminas irrigadas real e total (IRN e ITN) e a evapotranspiração atual (ET_a) obtidos pelo IrrigaLS e pelo método do balanço hídrico

Cultura	N_i^1	Balanço Hídrico			IrrigaLS ³			Erro Relativo [%]		
		Lâminas (mm)								
		IRN	ITN	ET_a	IRN	ITN	ET_a	IRN	ITN	ET_a
Banana	12	672,78	764,52	960,60	672,38	762,83	960,54	0,06	0,22	0,01
Cana-de-açúcar	11	245,94	336,91	361,15	246,14	328,32	360,00	-0,08	2,55	0,32
Cítricas (c/c) ²	10	561,44	638,00	840,53	578,02	617,76	830,00	-2,95	3,17	1,25
Feijão	9	128,59	176,16	252,29	141,47	191,00	253,33	-10,01	-8,43	-0,41
Melancia	9	217,04	297,32	328,12	210,82	287,60	320,00	2,87	3,27	2,48
Milho	9	214,24	293,49	321,57	221,60	290,30	330,00	-3,44	1,08	-2,62

1 – número total de irrigações; 2 – com controle de ervas; 3 – $K_s = 1$ e volume meta do solo igual ao volume na CC

Tabela 3. Lâminas irrigadas real e total (IRN e ITN) e a evapotranspiração atual (ET_a) obtidas pelo IrrigaLS e pelo método do balanço hídrico

Cultura	N_i^1	Balanço Hídrico			IrrigaLS ³			Erro Relativo [%]		
		Lâminas [mm]								
		IRN	ITN	ET_a	IRN	ITN	ET_a	IRN	ITN	ET_a
Banana	11	590,99	671,58	879,03	672,38	762,83	960,54	-13,77	-13,6	-9,273
Cana-de-açúcar	9	173,08	237,10	288,29	246,14	328,32	360,00	-42,21	-38,5	-24,87
Cítricas (c/c) ²	8	446,33	507,20	725,50	578,02	617,76	830,00	-29,51	-21,8	-14,40
Feijão	9	106,77	146,26	230,46	141,47	191,00	253,33	-32,50	-30,6	-9,924
Melancia	8	177,38	242,99	288,46	210,82	287,60	320,00	-18,85	-18,4	-10,93
Milho	9	178,46	244,47	285,79	221,60	290,30	330,00	-24,17	-18,7	-15,47

1 – número total de irrigações; 2 – com controle de ervas; 3 – K_s logarítmico e volume meta do solo igual ao volume na CC

retira do solo uma lâmina igual a CAA; só depois de esgotada esta lâmina, o solo receberá água até que atinja novamente a CC; neste processo, a umidade no solo é variável e o IrrigaLS procura manter o reservatório do solo sempre no volume meta com $K_s = 1$ ou com K_s logarítmico.

Como os erros relativos se apresentaram maiores que 10% e as lâminas no método do balanço hídrico resultaram menores que no IrrigaLS (Tabela 3), achou-se conveniente, portanto, reduzir o volume meta dos reservatórios do solo no IrrigaLS e analisar este efeito sobre a economia de água.

O volume meta no IrrigaLS foi encontrado através de tentativas, em que o melhor valor foi aquele que indicou menor erro relativo em comparação com o método do balanço hídrico. Na Tabela 4 são apresentadas as economias conseguidas com esta redução do volume meta. Observa-se que a economia advinda da redução do volume meta justifica o uso de tal processo.

Tabela 4. Economia conseguida no IrrigaLS, na lâmina total irrigada (ITN) com redução do volume meta (V_{meta})

Culturas	ITN (mm)		Economia (%)
	$V_{meta} = 1$	$V_{meta} < 1$	
Banana	762,83	669,33	12,26
Cana-de-açúcar	328,32	221,79	32,45
Cítricas (c/e) ¹	617,76	456,35	26,13
Feijão	191,00	104,65	45,21
Melancia	287,60	266,48	7,34
Milho	290,30	236,34	18,59

¹ com controle de ervas

A economia de água obtida com o modelo IrrigaLS, chegou a 45,21% na cultura do feijão quando se utilizou o $V_{meta} < 1$; esta melhoria na eficiência de uso da água foi devida à inclusão da PPE e à fixação de um V_{meta} de armazenamento de água no solo que assegurasse um volume mínimo de água nos períodos secos.

A relação entre a diminuição de rendimento relativo ($1 - Y_a/Y_p$) e o déficit de evapotranspiração relativa ($1 - ET_a/ET_p$) para as culturas estudadas, é apresentada na Figura 4; nota-se que o efeito do suprimento reduzido de água sobre o rendimento das cítricas ($K_y < 1$) é menos pronunciado que em relação às outras culturas que têm valores de $K_y > 1$ durante o período de escassez de água.

Quando se envolve o cultivo de várias culturas, o suprimento de irrigação para as cítricas pode ser reduzido em detrimento de outras culturas mais sensíveis, também se pode dizer que, sob condições de déficit hídrico limitado, a produção total das cítricas é incrementada através da ampliação da área irrigada, ao invés de atender plenamente às necessidades hídricas da cultura em uma área limitada.

Verifica-se, com relação ao atendimento das demandas da bacia do rio Itapicuru, que nenhuma demanda sofreu déficit hídrico quando a simulação foi realizada pelo IrrigaLS. Os resultados indicaram um déficit durante quatro meses consecutivos na demanda de irrigação do reservatório de Ponto Novo, podendo representar queda significativa no rendimento das culturas.

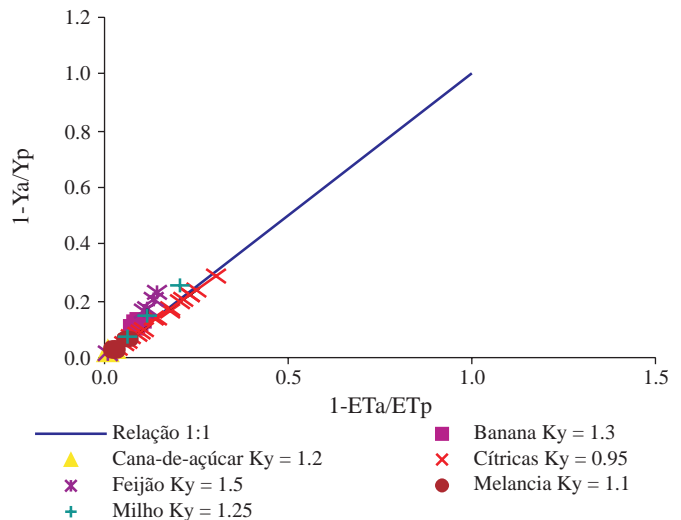


Figura 4. Relação entre a diminuição de rendimento relativo ($1 - Y_a/Y_p$) e o déficit de evapotranspiração relativa ($1 - ET_a/ET_p$) para as culturas estudadas

CONCLUSÕES

1. O modelo IrrigaLS mostrou-se apto para simular sistemas complexos de recursos hídricos.
2. A possibilidade de analisar a alocação de água na bacia em condição de múltiplos usos contribui para melhorar as condições de planejamento e auxiliar a tomada de decisão.
3. O modelo calcula, automaticamente, a demanda de irrigação, sem a necessidade de cálculos externos.
4. É garantido um fornecimento mínimo de água em períodos secos.
5. É determinada quantidades ótimas de água para a cultura como resultado da interação das características edafoclimáticas e do sistema de irrigação.
6. É determinada a necessidade hídrica real da planta (ET_a) possibilitando melhor eficiência de uso da água e ainda analisa o efeito do déficit hídrico na produção das culturas.

LITERATURA CITADA

- Carvalho, M. A. Sistema de suporte a decisão para alocação de água em projetos de irrigação. São Paulo: EPUSP, 2003. 219p. Tese Doutorado
- Doorenbos, J.; Kassam, A. H. Yield response to water. Roma: FAO, 1979. 193p. Irrigation and Drainage. Paper 33.
- Doorenbos, J.; Pruitt, W. O. Guidelines for predicting crop water requirements. Roma: FAO, 1977. 144p. Irrigation and Drainage, Paper 24
- Garduno, H. Efficient water use: A multi-dimensional approach. In: Garduno, H.; Cortés, F. A. (ed.). Efficient water use. Montevideo: UNESCO-ROSTLAC, 1994. p.17-24.
- Labadie, J. W. MODSIM: River basin network flow model for conjunctive stream-aquifer management. Fort Collins: Department of Civil Engineering, Colorado State University, 1988. 55p.
- Lima, J. E. F. W.; Ferreira, R. S. A.; Christofidis, D. O estado das águas no Brasil. In: Freitas, M. A. V. (ed.). O uso da irrigação no Brasil. Brasília: ANEEL, SIH; MMA. SRH; MMEF. 1999. Parte 3. p.73-82.

- Paz, V. P. da S.; Teodoro, R. E. F.; Mendonça, F. C. Recursos hídricos, agricultura irrigada e meio ambiente. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.4, n.3, p.465-473, 2000.
- Porto, R. L. L.; Azevedo, L. G. T. Sistemas de suporte a decisões de recursos hídricos. In: Porto, R. L. L. *Técnicas quantitativas para o gerenciamento de recursos hídrico*. Porto Alegre: UFRGS/ABRH, 1997. cap.2, p.43-95.
- Porto, R. L. L.; Roberto, A. N.; Schardong, A.; Mélo Júnior, A.V. Sistema de suporte a decisão para análise de sistemas de recursos hídricos. In: Silva, R. C. V. *Métodos numéricos em recursos hídricos*. Porto Alegre: ABRH, 2003. cap.2, p.93-240.
- Reichardt, K.; Timm, L. C. Solo, planta e atmosfera: Conceitos, processos e aplicações. Barueri: Manole, 2004. 478p.
- Roberto, A. N. Modelos de rede de fluxo para alocação de água entre múltiplos usos em uma bacia hidrográfica. São Paulo: EPUSP, 2002. 105p. Dissertação Mestrado
- Roberto, A. N.; Porto, R. L. L. Alocação da água entre múltiplos usos em uma Bacia Hidrográfica. In: *Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, 13, 1999, Belo Horizonte. Anais... Belo Horizonte: ABRH, 1999. CD Rom.
- Roberto, A. N.; Porto, R. L. L. O sistema ModsimLS: Um modelo de rede de fluxo para simulação de bacias hidrográficas. In: *Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, 14, 2001, Aracaju. Anais... Aracaju: ABRH, 2001. CD Rom