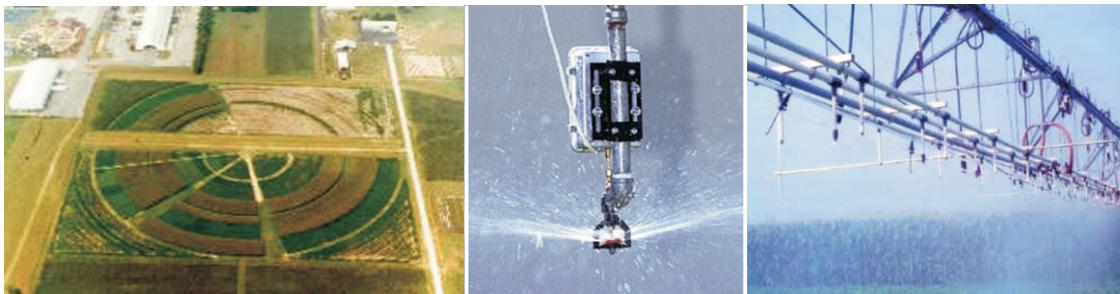


Conceitualização de um Sistema de Suporte à Decisão para o Dimensionamento e Manejo de Pivô Central em Condições de Irrigação de Precisão





*Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
Embrapa Cerrados
Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento*

ISSN 1676-918X

Agosto, 2005

Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento 156

Conceitualização de um Sistema de Suporte à Decisão para o Dimensionamento e Manejo de Pivô Central em Condições de Irrigação de Precisão

*Lineu Neiva Rodrigues
Fernando Falco Pruski
Juscelino Antônio de Azevedo
Euzebio Medrado da Silva*

Planaltina, DF
2005

Exemplares desta publicação podem ser adquiridos na:

Embrapa Cerrados

BR 020, Km 18, Rod. Brasília/Fortaleza

Caixa Postal 08223

CEP 73310-970 Planaltina, DF

Fone: (61) 3388-9898

Fax: (61) 3388-9879

<http://www.cpac.embrapa.br>

sac@cpac.embrapa.br

Comitê de Publicações

Presidente: *José de Ribamar N. dos Anjos*

Secretária-Executiva: *Maria Edilva Nogueira*

Supervisão editorial: *Maria Helena Gonçalves Teixeira*

Revisão de texto: *Maria Helena Gonçalves Teixeira*

Normalização bibliográfica: *Rosângela Lacerda de Castro*

Tratamento de ilustrações: *Jussara Flores de Oliveira*

Capa: *Wellington Cavalcanti*

Foto da capa: *Leo Miranda*

Editoração eletrônica: *Jussara Flores de Oliveira*

Impressão e acabamento: *Divino Batista de Souza*

Jaime Arbués Carneiro

Impresso no Serviço Gráfico da Embrapa Cerrados

1ª edição

1ª impressão (2005): tiragem 100 exemplares

Todos os direitos reservados.

A reprodução não autorizada desta publicação, no todo ou em parte, constitui violação dos direitos autorais (Lei nº 9.610).

CIP-Brasil. Catalogação na publicação.
Embrapa Cerrados.

-
- C744 Conceitualização de um sistema de suporte à decisão para o dimensionamento e manejo de pivô central em condições de irrigação de precisão / Lineu Neiva Rodrigues... [et al.]. – Planaltina, DF : Embrapa Cerrados, 2005.
68 p.— (Boletim de pesquisa e desenvolvimento / Embrapa Cerrados, ISSN 1676-918X ; 156)

1. Irrigação por pivô central. 2. Tomada de decisão. 3. Manejo de água. I. Rodrigues, Lineu Neiva. II. Série.

631.587 - CDD 21

© Embrapa 2005

Sumário

Resumo	5
Abstract	6
Introdução	7
Conceitualização do Sistema de Suporte à Decisão	13
Descrição das Equações e dos Modelos Matemáticos que Integram o SSD	15
Dimensionamento do pivô central	16
Vazão do sistema	16
Dimensionamento dos emissores	18
Diâmetro das tubulações que compõe a linha lateral	24
Distribuição da pressão ao longo da lateral do pivô	32
Intensidade de precipitação máxima e diâmetro molhado mínimo admissíveis	33
Manejo do pivô central	42
Umidade do solo	44
Evapotranspiração da cultura	45
Precipitação natural efetiva	52

Precipitação artificial efetiva	56
Lâmina interceptada pela cobertura vegetal	56
Escoamento superficial proveniente da célula de interesse para as células vizinhas	57
Percolação profunda	60
Profundidade do sistema radicular da cultura	60
Rendimento da cultura	61
Conclusão	63
Referências	63

Conceitualização de um Sistema de Suporte à Decisão para o Dimensionamento e Manejo de Pivô Central em Condições de Irrigação de Precisão

*Lineu Neiva Rodrigues¹; Fernando Falco Pruski²;
Juscelino Antônio de Azevedo³; Euzébio Medrado da Silva⁴*

Resumo - Embora a água seja um dos principais componentes de produção a afetar a produtividade das culturas, sua variabilidade dentro da área irrigada é frequentemente ignorada. Acredita-se que isto seja devido à falta de instrumentos confiáveis para sua medição em tempo real como, por exemplo, aqueles existentes para medição de nitrogênio. Nota-se que há, nesta área do conhecimento, uma grande oportunidade para utilização de modelos computacionais, os quais são usualmente utilizados no dimensionamento e manejo de sistemas de irrigação e que, agora, poderão ser utilizados na geração de mapas de umidade do solo, os quais poderão auxiliar o projetista no momento de interpretar os mapas de rendimento. O objetivo do presente trabalho foi apresentar a conceitualização de um sistema de suporte à decisão para o dimensionamento e manejo de pivô central em condições de irrigação de precisão. O sistema considera os principais componentes que influenciam no dimensionamento e manejo de equipamentos de irrigação do tipo pivô central. No dimensionamento, além da possibilidade de cálculos tradicionais como, por exemplo, o posicionamento de emissores ao longo da linha lateral, pode-se estimar a intensidade de precipitação máxima que pode ser aplicada ao solo sem provocar escoamento superficial. No manejo, apresentou-se um novo modelo para espacialização do escoamento superficial dentro da área irrigada, o que permite uma maior precisão no cálculo da umidade do solo no momento da irrigação.

Termos para indexação: modelagem, agricultura de precisão, evapotranspiração, precipitação, infiltração, escoamento superficial.

¹ Eng. Agríc., D.Sc., Embrapa Cerrados, lineu@cpac.embrapa.br

² Eng. Agríc., D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, ffpruski@ufv.br

³ Eng. Agríc., D.Sc., Embrapa Cerrados, juscelino@cpac.embrapa.br

⁴ Eng. Agríc., Ph.D., Embrapa Cerrados, euzebio@cpac.embrapa.br

Conceptualization of a Decision Support System to Design and Manage Center Pivots in Precision Irrigation Conditions

Abstract - *Even though water is one of the main production factors to affect crop yield, its variability inside the irrigated area has been frequently ignored. The reason for this seems to be the lack of affordable instrumentation to measure water variability in real time. There is, then, in this area of study a great opportunity to apply computer models to represent the variability soil water content. The objective of this paper is to present a conceptualization of a decision support system to design and manage center pivots in precision irrigation conditions. The system takes into account the main components that affect the design and management of the center pivot. In the design time, besides the possibility to make basic calculations such as the outlet position in the lateral line, the maximum application rate in each position inside the irrigated area can be calculated. In the management module, run off is distributed inside the irrigated area and the soil water content variability can be assessed.*

Index terms: modeling, precision farming, evapotranspiration, precipitation, infiltration, runoff.

Introdução

Para a sociedade, a agricultura possui diversos propósitos, todavia pode-se destacar como um dos mais importantes a produção de alimentos e fibras para uma população que se concentra em sua grande maioria nos centros urbanos. Tal propósito torna-se ainda mais importante quando se leva em consideração que a população mundial em 2030 será de aproximadamente 8,3 bilhões de pessoas e que, atualmente, segundo relatório da [FAO \(2002\)](#), uma em cada seis pessoas que vive nos países em desenvolvimento está em condições de subnutrição.

Nos Estados Unidos, em 1900, quatro em cada dez trabalhadores encontravam-se no campo, atualmente, a proporção é de três em cada cem ([COMMITTEE ON THE FUTURE OF IRRIGATION IN THE FACE OF COMPETING DEMANDS, 1996](#)). Em relação ao Brasil, a proporção talvez seja diferente, mas a tendência de migração de pessoas do campo para as grandes cidades é a mesma. Tal fato teve e ainda tem influência direta sobre o destino das águas derivadas dos cursos de água e foi um dos principais responsáveis pelo surgimento e crescimento da competição pelo uso da água entre os centros urbanos e a zona rural. [Rosegrant et al. \(2002\)](#) realizaram diversos estudos de cenários e projetaram que haverá aumento de 71% da água demandada para consumo doméstico entre 1995 e 2025. Em alguns países como a China e os Estados Unidos, já se nota uma substancial transferência de água da agricultura para as cidades as quais estão dispostas a remunerar melhor pelo seu uso.

Em virtude do aumento da necessidade de mais água para o consumo humano nos grandes centros urbanos e da maior conscientização da sociedade da importância da água para o lazer, para a fauna e para a flora, a quantidade de água disponível para agricultura será reduzida consideravelmente nos próximos anos. A agricultura terá grandes desafios nesse novo milênio, mas, sem dúvida, o maior deles será garantir suprimento adequado e regular de alimentos para a sociedade com o menor consumo de água possível. Essa tarefa, entretanto, não é simples e se agrava ainda mais quando se consideram os impactos que as mudanças climáticas terão sobre a agricultura de maneira geral. Por exemplo, [Postel \(1989\)](#) comenta que um aumento de 3 °C na temperatura do ar poderá elevar, as necessidades de irrigação em 15% e, ainda, se esse aumento na temperatura for acompanhado de redução na precipitação de 10% poderá haver elevação nas necessidades de irrigação de cerca de 26%.

A importância de tal constatação é ainda mais grave quando se consideram os seguintes aspectos: apenas 17% de toda a área cultivada no mundo é irrigada, entretanto, essas áreas produzem, atualmente, cerca de 40% de todo alimento que é produzido no mundo (POSTEL, 2000); 70% das águas derivadas dos cursos de água pelo homem são para fins de irrigação (FAO, 2002), sendo que aproximadamente metade delas se perde no sistema sem ser efetivamente utilizada pela cultura (POSTEL, 2000); aproximadamente 11,6% do total de água disponível no planeta já está sendo utilizado (SHIKLOMANOV, 1990), já se apontando para uma insustentabilidade da atual tendência de utilização da água (KLOHN; APPELGREN, 2005).

Relatório recente da FAO projeta que a produção de alimentos terá de aumentar cerca de 60% a fim de suprir as novas demandas nutricionais da sociedade e a uma população mundial que aumenta cerca de 80 a 85 milhões de pessoas a cada ano. Nesse contexto, a agricultura irrigada terá papel fundamental, mas terá também de mudar muito dos seus conceitos, como por exemplo, ao invés de se produzir mais a partir de cada hectare plantado deseja-se, nessa nova era, produzir mais a partir de cada gota de água derivada para a agricultura. Para isso, a água destinada para irrigação terá de ser manejada de maneira mais racional, não só pensando em extrair mais a partir de cada gota, mas também em liberar certa quantia para outros usos. Com isso, espera-se que a maneira como a irrigação é vista, atualmente, pela sociedade mude, ou seja, de competidora pelo uso da água, passe a ser vista como um componente essencial para produção de alimentos.

Seckler et al. (1998) reporta que aproximadamente metade do aumento na demanda de água que ocorrerá até 2025 poderá ser suprida melhorando-se a eficiência dos sistemas de irrigação. Para se atingir tal meta, entretanto, faz-se necessário o desenvolvimento de novas técnicas de manejo, de ferramentas computacionais e de novas tecnologias de irrigação.

A busca por uma agricultura sustentável tem levado os profissionais da área agrícola a repensar as técnicas de manejo e os aspectos econômicos das operações agrícolas adotadas. Isto, associado à necessidade de aplicar diferentes estratégias de manejo dentro da mesma área cultivada resultou em uma nova forma de otimização da produção agrícola, chamada agricultura de precisão. Essa técnica fundamenta-se no reconhecimento de que as propriedades físicas do solo, os níveis de nutrientes e o conteúdo de água variam de área para área e, também, dentro da mesma área irrigada. Tal variação pode ser atribuída a diferentes fatores, tais como: práticas agrícolas anteriores, topografia e desuniformidade na aplicação de água e nutrientes.

Com a agricultura de precisão, antigos conceitos estão sendo modificados e outros incorporados ao processo, e, com isto, a visão de como abordar e manejar o sistema agrícola tem-se modificado. Os avanços técnicos que se têm obtido nos sistemas de posicionamento global e de informação geográfica têm sido fator determinante para a concretização da agricultura de precisão.

Dentro da agricultura de precisão, a mecanização é a área que tem mais avançado. Em se tratando de irrigação de precisão pouco se tem feito. Os poucos grupos existentes no mundo, até onde se tem conhecimento, estão trabalhando principalmente no desenvolvimento de novos equipamentos de medida e aplicação de água e na geração e interpretação de mapas de rendimento.

Mesmo reconhecendo que os recursos são variáveis dentro da área irrigada, historicamente, o manejo e o dimensionamento de sistemas de irrigação têm sido praticados considerando a área irrigada como uma unidade homogênea. Isto é, usualmente a água, os nutrientes e os defensivos são aplicados de maneira uniforme dentro da área irrigada, sendo a quantidade a ser aplicada calculada com base na média ou na condição mais limitante para a cultura. Conseqüentemente, dentro da área irrigada, alguns pontos recebem a aplicação ótima e outros recebem aplicações menores ou maiores que a ótima. Tal procedimento tem contribuído para a baixa eficiência de irrigação hoje observada nos sistemas agrícolas.

A aplicação de água a uma taxa variada (irrigação de precisão) está apenas começando a ser explorada. Sistemas de irrigação autopropelidos como pivô central e linear móvel são particularmente adequados para a condição de irrigação de precisão por causa, principalmente, dos seus atuais níveis de automação e grande área irrigada com uma única linha lateral. Utilizando controles, sensores e ferramentas de tomada de decisão apropriados, esses sistemas de irrigação podem ser manejados de forma a aplicar, dentro da área irrigada, os diferentes requerimentos por água, defensivos e nutrientes ([EVANS, 1997](#)).

Embora a água seja o principal componente que afeta a produtividade, sua variabilidade dentro da área irrigada é freqüentemente ignorada. Acredita-se que isso se deva à falta de instrumentos confiáveis para sua medição em tempo real como, por exemplo, aqueles existentes para medição de nitrogênio. Nota-se que há, nessa área do conhecimento, grande oportunidade para utilização de modelos computacionais que são usualmente utilizados no dimensionamento e no manejo de sistemas de irrigação e que, agora, poderão ser utilizados na geração de mapas de umidade do solo que poderão auxiliar o projetista no momento de interpretar os mapas de rendimento.

O consumo de água na agricultura irrigada tem uma relação quase que direta com o consumo de energia. O consumo médio de energia de uma área irrigada por aspersão é da ordem de $2.714 \text{ kWh ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$. No Brasil, a irrigação consome em média $7.7789 \text{ GWh ano}^{-1}$, o que corresponde a 1,40% da capacidade instalada de geração hidráulica do País ([COMPANHIA ENERGÉTICA DE MINAS GERAIS, 1993](#)). De acordo com o relatório do Ministério das Minas e Energia ([BRASIL, 1996](#)), no Brasil, até o ano de 2015, será necessário quase triplicar a oferta de energia, implicando investimentos da ordem de duzentos bilhões de reais. A agricultura irrigada, em especial, é grandemente dependente de energia e, no Brasil, em particular, de energia elétrica. Em alguns casos, os gastos com energia elétrica em uma área irrigada chegam a representar 25% dos custos de produção.

Segundo estudos realizados pela Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG), se a irrigação fosse utilizada de forma racional, aproximadamente 20% da água e 30% da energia consumidas seriam economizadas; sendo 20% da energia economizada em virtude da aplicação desnecessária de água e 10% por causa do redimensionamento e da otimização dos equipamentos utilizados para a irrigação. Com base nesse trabalho, pode-se concluir que o manejo adequado da irrigação traria redução no consumo de água e energia ao País da ordem de $6.755.459.400 \text{ m}^3 \text{ ano}^{-1}$ e $2.336 \text{ GWh ano}^{-1}$, respectivamente.

Entre os equipamentos de irrigação, o pivô central é um dos mais exigentes em termos de energia, sendo que, no Brasil, a área irrigada com esse equipamento representa aproximadamente 39,2% da área total irrigada no País. Até o final da década de 1980, a tarifa energética era relativamente baixa e a água tratada como um recurso inesgotável. Naquele período, eram utilizados principalmente pivôs de alta pressão, com canhão na extremidade final da lateral. Com o aumento da tarifa energética, o custo do bombeamento da água tornou-se uma importante parcela do custo de produção, forçando o agricultor a procurar alternativas para reduzir esses custos. Uma das práticas que foi adotada nos Estados Unidos, a fim de diminuir o consumo de energia por hectare irrigado, foi a redução da pressão de operação do sistema. Entretanto, esse procedimento apresenta como principal inconveniente o aumento da intensidade de precipitação, o que conduz a um provável aumento do escoamento superficial. A adoção de inversores de frequência é outro procedimento que pode ser adotado, entretanto, em razão do preço desse equipamento, sua utilização nem sempre é economicamente viável.

O pivô central é um equipamento capaz de aplicar água com elevada uniformidade, mas irrigações provenientes de equipamentos mal dimensionados ou manejados apresentam, geralmente, grande desuniformidade. A maior dificuldade quando do dimensionamento de um pivô central é a estimativa da intensidade de precipitação máxima que pode ser aplicada ao solo sem provocar escoamento superficial; já, durante o manejo, a problemática é estimar o momento e a quantidade de água que deve ser aplicada dentro da área irrigada. A dificuldade é ainda maior quando se trabalha dentro das premissas de irrigação de precisão em que se deve também definir onde a água deve ser aplicada.

O conhecimento da variação de umidade dentro da área irrigada é fundamental para o entendimento das causas de variação de produtividade, sendo o escoamento superficial um dos fatores que influenciam na variação de umidade. Assim, a correta compreensão de como o escoamento superficial se distribui dentro da área irrigada é de fundamental importância para o entendimento da variação da umidade.

Embora se acredite que a irrigação continuará a desempenhar papel de fundamental importância para a sociedade, reconhece-se que, em decorrência de mudanças nos valores sociais e no aumento da competição pelo uso da água, a quantidade de água disponível para a agricultura irrigada irá diminuir. Admite-se, também, que as pressões para que se reduzam os danos ambientais provenientes da irrigação continuarão a aumentar. Para que a irrigação continue sendo vista como símbolo de progresso e crescimento e não como mais fator de destruição do meio ambiente, mudanças na maneira de manejar o sistema deverão ser adotadas. De acordo com [Camp e Sadler \(1998\)](#), a aplicação da irrigação, dos nutrientes e dos pesticidas de forma precisa pode ser uma alternativa para a conservação de água e para a otimização da utilização de nutrientes. Reconhece-se que a agricultura de precisão por si só não resolverá todos os problemas da agricultura, entretanto, não se pode negar que, com a sua prática, os desperdícios serão reduzidos consideravelmente.

Todavia, antes que a agricultura de precisão possa ser efetivamente utilizada por determinado produtor, a variação do rendimento dentro da área cultivada deverá ser muito bem quantificada e os fatores responsáveis por esta variação muito bem definidos. Essa tarefa, no entanto, não é simples. A dificuldade maior deve-se ao grande volume de informações disponíveis para serem analisadas. Nesse contexto, um sistema interativo para dar suporte ao técnico durante o processo

de tomada de decisão seria de grande utilidade. Um sistema que se preste a isto é usualmente conhecido como sistema de suporte à decisão e, usualmente, permite acessar rapidamente os dados disponíveis e avaliar diferentes cenários, sem, contudo, substituir ou desprezar a capacidade de julgamento do técnico responsável pela tomada da decisão.

A irrigação de precisão como uma nova técnica de manejo deve ser estudada e entendida antes de ser efetivamente recomendada ao produtor. Pesquisas devem focar principalmente na viabilidade técnica e econômica da adoção do manejo de água diferenciado. As seguintes perguntas devem, prioritariamente, ser respondidas: o retorno econômico proveniente da adoção dessa técnica é suficiente para se justificar os investimentos requeridos para a aquisição dos equipamentos necessários para a aplicação precisa de água? Quais os benefícios que podem advir da adoção desta técnica?

A tomada de decisão sobre o manejo de água diferenciado é muito mais complexa do que a tomada de decisão sobre a distribuição de nutrientes e herbicidas no campo. A primeira razão que se pode enumerar para essa maior complexidade é que a tomada de decisão de irrigar ou não é efetuada pelo menos umas 20 vezes durante o ciclo da cultura, enquanto fertilizantes e herbicidas são aplicados apenas uma ou duas vezes durante esse mesmo intervalo de tempo. Isso envolve a necessidade de um maior número e detalhamento de registros e mapas da distribuição da água no solo ao longo do ciclo da cultura, constituindo-se em uma tarefa complicada para a grande maioria dos produtores.

Pelo exposto, considera-se necessário o desenvolvimento de um sistema de suporte à decisão para o dimensionamento e manejo de pivô central em condições de irrigação de precisão que: (a) facilite a manutenção e a recuperação de registros de dados e de mapas; (b) auxilie o técnico na estimativa da máxima intensidade de precipitação que pode ser aplicada em uma área irrigada sem provocar escoamento superficial; (c) auxilie o técnico a decidir quanto de água deve ser aplicada, quando e onde esta água deverá ser aplicada; (d) sirva para simular o desempenho do sistema de irrigação dentro da área irrigada. Os resultados advindos das simulações poderão ser utilizados para auxiliar a escolha do procedimento a ser adotado para racionalizar o uso de energia; (e) gere mapas indicativos da variabilidade do conteúdo de umidade dentro da área irrigada. Tais mapas poderão ser utilizados para auxiliar a interpretação dos mapas de rendimento; e (f) possa ser utilizado para melhor entender os benefícios que, por

ventura, possam advir da irrigação de precisão. Este trabalho teve como objetivos: (a) conceitualizar um sistema de suporte à decisão que possa ser utilizado para o dimensionamento e o manejo de pivô central em condições de irrigação de precisão; (b) apresentar as equações e modelos matemáticos que integram este sistema.

Conceitualização do Sistema de Suporte à Decisão

Um sistema de suporte à decisão (SSD) é uma ferramenta desenvolvida para auxiliar o tomador de decisão, podendo ser utilizado para gerar cenários em função, por exemplo, de supostas políticas públicas a serem adotadas, mas não substitui, em nenhuma hipótese, o julgamento do indivíduo. Esses sistemas computacionais, por mais simples que sejam, utilizam um conjunto de modelos desenvolvidos para explicar o comportamento de determinado sistema físico. Quando associados a um banco de dados possibilitam gerar e apresentar informações que podem ser rapidamente interpretadas pelo tomador de decisão. Os programas computacionais ou *software* são, portanto, a “alma” do SSD.

O primeiro passo dado para o desenvolvimento do sistema de suporte em questão consistiu em um extenso levantamento bibliográfico, quando se procurou identificar, para cada processo considerado, os principais métodos e modelos já existentes. O passo seguinte foi identificar entre eles àqueles que possuíam potencial para serem utilizados em condições de irrigação de precisão. Esse procedimento possibilitou a identificação dos pontos considerados fracos, ou seja, possibilitou a identificação daqueles processos para os quais os métodos hoje existentes não são adequados para simulá-los, sendo necessário o desenvolvimento de novos procedimentos.

No desenvolvimento do *software*, optou-se por trabalhar com arquivos de entrada do tipo texto pelo fato de eles serem genéricos, podendo, portanto, serem lidos pelos principais sistemas de informações geográficas. Adoção desse tipo de arquivo facilita a manutenção do sistema, uma vez que é praticamente impossível desenvolver um *software* com capacidade para ler todos os formatos de arquivos atualmente existentes e ainda prever aqueles que serão desenvolvidos no futuro.

Na [Figura 1](#), é apresentado o esquema representativo do sistema de suporte à decisão.

Figura 1. Conceitualização do sistema de suporte à decisão para o dimensionamento e manejo de pivô central em condições de irrigação de precisão.

O sistema trabalha com dados do tipo raster e a resolução espacial de cada elemento (célula) dentro da área pode ser definida pelo próprio usuário. Quatro arquivos do tipo texto contendo informações de elevação, tipo de solo, rugosidade randômica e cultura, para toda a área a ser estudada, são necessários para a execução do sistema. Estes arquivos serão lidos pelo software e as respectivas imagens digitais geradas.

Uma vez lidas as diversas imagens digitais, o usuário poderá, com o auxílio do mouse, locar o pivô no local que ele deseja estudar (Figura 2a). A área abrangida pelo pivô central é, então, dividida em células quadradas com a dimensão especificada (Figura 2b). As informações de elevação do terreno, do solo e da cultura inseridas dentro da área do pivô central são, então, extraídas e armazenadas em matrizes para serem posteriormente utilizadas pelos modelos.

Cada célula é considerada como uma unidade homogênea à qual está associado um único valor de elevação, de solo, de rugosidade randômica e de cultura (Figura 2c). Assim, pode-se estudar a variabilidade espacial existente de uma célula para outra.

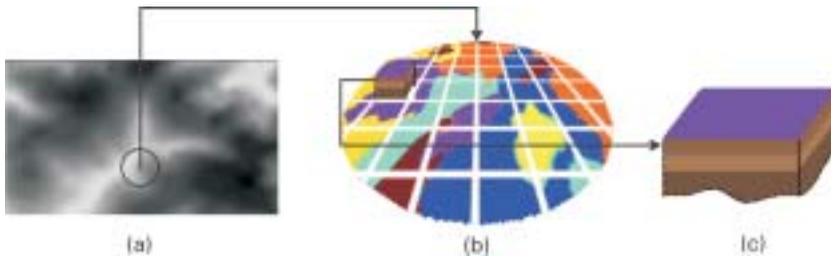


Figura 2. Imagem contendo: (a) mapa de elevação digital do terreno, destacando-se o local onde o pivô central foi instalado; (b) mapa de solo referente à área circunscrita à circunferência do pivô; (c) célula com a dimensão especificada pelo usuário.

Descrição das Equações e dos Modelos Matemáticos que Integram o SSD

Na seqüência, far-se-á uma apresentação das equações e dos modelos matemáticos utilizados no desenvolvimento do SSD. Para facilitar o entendimento, apresentar-se-ão, primeiramente, os procedimentos referentes à fase de dimensionamento do equipamento e, posteriormente, os referentes ao manejo.

Dimensionamento do pivô central

O dimensionamento de um pivô central é uma tarefa relativamente complexa, sendo a melhor solução muitas vezes obtida pelo processo de tentativa e erro. Ademais, nem sempre a melhor solução matemática é a que vai ser adotada na prática, uma vez que ela deve ser compatibilizada com os equipamentos disponíveis no comércio. Por esses e outros motivos, usualmente, o pivô central já vem dimensionado de fábrica.

Em irrigação de precisão, no entanto, o conhecimento da intensidade de aplicação máxima que pode ser aplicada em pontos específicos da área irrigada sem que haja escoamento superficial é de grande importância. Essa informação pode ser utilizada como uma referência de como variar a taxa de aplicação de água dentro da área irrigada.

Mesmo sendo o pivô um equipamento que já vem pronto de fábrica, é importante que o usuário, principalmente, aqueles mais qualificados, entendam como o dimensionamento do equipamento é feito e quais implicações que um dimensionamento inadequado pode ter, por exemplo, sobre o consumo de energia.

Vazão do sistema

A vazão do sistema é, via de regra, a primeira variável a ser calculada durante o dimensionamento do equipamento. O seu valor deve ser suficiente para atender aos requerimentos hídricos da cultura, o qual é dependente das condições climáticas da região em estudo. Havendo vários tipos de solo na área a ser irrigada, a vazão do sistema pode ser calculada pela equação:

$$Q_s = \frac{0,1157}{T} \frac{A_1 d_1}{f_1} \frac{A_2 d_2}{f_2} \dots \frac{A_n d_n}{f_n} \quad (1)$$

em que

Q_s = vazão do sistema, $L s^{-1}$;

A = área irrigada, ha;

d = lâmina bruta de irrigação, mm;

f = intervalo máximo entre irrigações, dia;

- T = fração de tempo em que o sistema permanece ligado em um dia ocorrido durante o período de pico, decimal; e
 1,2,n = índices referentes ao tipo de solos existentes na área irrigada.

A lâmina bruta de irrigação é a lâmina de água necessária para suprir a demanda evapotranspirométrica e as diversas perdas ocorridas no sistema. Essa variável, para um determinado tipo de solo existente dentro da área irrigada, é calculada, segundo [Allen et al. \(1999\)](#), pela equação:

$$d_i = f_i \frac{k_f ET_d + P_{ed}}{E_{pa}} \quad (2)$$

em que

- k_f = fator referente à freqüência de umedecimento do solo;
 ET_d = evapotranspiração da cultura referente à fase de projeto, mm dia⁻¹;
 P_{ed} = precipitação efetiva referente à fase de projeto, mm; e
 E_{pa} = eficiência de aplicação do pivô central, decimal.

Uma das grandes vantagens do pivô central é que ele pode ser ajustado para irrigar com elevada freqüência, tal prática, todavia, nem sempre é vantajosa, uma vez que as perdas por evaporação serão também maiores. No geral, o intervalo entre irrigações deve ser o maior possível de tal forma a não provocar estresse hídrico na cultura. Dessa forma, é importante conhecer o intervalo máximo que pode haver entre irrigações. Esta variável é calculada, segundo Allen et al. (1999), por meio da equação:

$$f_i = \frac{AD_i + Res_{Prec}}{k_f ET_d + P_d} \text{ Paradas} \quad (3)$$

em que

- AD = depleção máxima de água no solo permitida ocorrer entre irrigações, mm;
 Res_{Prec} = precipitação efetiva prevista, mm;
 Paradas = quantidade de paradas previstas para o sistema para fins de manutenção, dia.

sendo

$$AD_i = \frac{MAD_i}{100} RZ_j^3 AW_{i,j} \quad (4)$$

em que

MAD = depleção de água no solo permitida ocorrer entre irrigações durante a fase de manejo, mm;

Rz = profundidade efetiva do sistema radicular da cultura, m;

AW = quantidade de água disponível no solo, mm m⁻¹;

i = índice referente ao tipo de solo; e

j = índice referente à camada de solo.

Dimensionamento dos emissores

O cálculo da posição dos emissores ao longo da lateral do pivô é realizado conforme a metodologia apresentada por [Ferreira \(1993\)](#), a qual permite que os emissores sejam posicionados com espaçamentos constantes ou variáveis.

Atualmente, os pivôs podem ser equipados com os mais variados tipos de emissores; cada qual possui características próprias e se adapta melhor a determinadas condições de solo, clima e cultura. O modelo foi desenvolvido considerando quatro tipos de emissores:

- a) Impacto de alta pressão.
- b) Impacto de média pressão.
- c) Impacto de baixa pressão.
- d) Difusores.

Para se utilizar essa metodologia, faz-se necessário o conhecimento prévio do raio da área, ao redor do centro do pivô, na qual não se deseja aplicar água. Esse raio será, daqui por diante, denominado simplesmente de raio seco. Para posicionar os emissores ao longo da lateral do pivô, partiu-se do pressuposto que o perfil real de distribuição de água dos emissores possa ser representado adequadamente por um perfil teórico semi-elíptico ([Figura 3](#)).

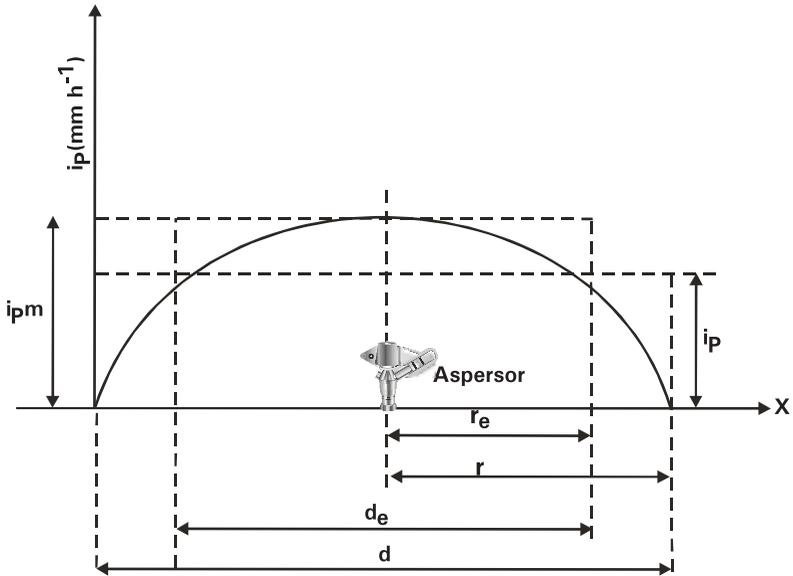


Figura 3. Esquema representativo do perfil teórico semi-elíptico de distribuição de água pelo emissor, destacando-se a intensidade de precipitação máxima (i_{pm}), a intensidade de precipitação média (i_p), o raio de alcance (r), o raio de alcance efetivo (r_e), o diâmetro de alcance (d) e o diâmetro de alcance efetivo (d_e).

Os aspersores de impacto de alta e de baixa pressão e os difusores são geralmente dispostos em espaçamentos iguais ao longo do pivô com vazão crescente do centro do pivô para a sua extremidade. A posição de cada emissor ao longo da linha lateral é estabelecida em função da sua distância ao centro do pivô. Os emissores são numerados em ordem crescente ao longo da tubulação, de zero até $n-1$, sendo o emissor de número zero situado nas proximidades do centro do pivô e o último emissor, ou seja, o de número $n-1$, na extremidade da lateral.

Considerando-se uma pequena área seca central ao redor do centro do pivô, a posição do emissor de número zero é calculada pela equação 5 e a dos demais pela equação 6.

$$S_0 = R_s - re_0 \tag{5}$$

$$S_i = R_s - 2re_0 - (2i - 1)re \tag{6}$$

em que

S_0 = posição, em relação ao centro do pivô, do emissor de ordem zero, m;

R_s = raio da área seca central, m;

re_0 = raio de alcance efetivo do emissor de ordem zero, m;

S_i = posição, em relação ao centro do pivô, do emissor de ordem i , m;

i = número de ordem do emissor; e

re = raio de alcance efetivo do emissor, m.

Os emissores de impacto de média pressão geralmente são dispostos em espaçamentos decrescentes do centro do pivô para a sua extremidade, sendo as suas vazões constantes. Como no caso anterior, a posição de cada emissor ao longo da lateral do pivô é estabelecida em função da sua distância ao centro do pivô. A posição do emissor de número zero é calculada pela equação 5 e a dos demais pela equação

$$S_i = S_{i-1} + \frac{F_{i-1}}{2} + \frac{F_i}{2} \quad (7)$$

em que F_i é a largura efetiva da faixa irrigada pelo emissor de ordem i , m.

sendo F_i calculado pela equação

$$F_i = \frac{2 S_{i-1} + F_{i-1} \left\{ \frac{2 S_{i-1} + F_{i-1}}{2} \right\}^{0,5} + 4 A_i}{2} \quad (8)$$

em que A_i é a área da faixa efetiva irrigada pelo emissor i , m².

A vazão dos emissores pode ser calculada, de forma generalizada para qualquer emissor ao longo da lateral do pivô, pela equação

$$Q_{ai} = \frac{A_i E T_d}{E_{pa} T_{1V}} \quad (9)$$

em que

Q_{ai} = vazão do emissor de número de ordem i , $L s^{-1}$; e

T_{1V} = tempo gasto pelo pivô para completar uma volta, s .

Quando se utilizam emissores igualmente espaçados ao longo da lateral do pivô, a área da faixa efetiva irrigada pelo emissor de ordem i é calculada pela equação

$$A_i = 2 S_i F_i \quad (10)$$

A largura efetiva da faixa irrigada pelo emissor de ordem i é igual ao diâmetro de alcance efetivo do emissor de ordem i , isto é

$$F_i = d_{ei} \quad (11)$$

O diâmetro de alcance efetivo do emissor de ordem i é

$$d_{ei} = \frac{d_{ai}}{4} \quad (12)$$

em que d_{ai} é o diâmetro de alcance do jato de água emitido pelo emissor de ordem i , m .

Neste caso, em que os espaçamentos são constantes ao longo da lateral do pivô, a largura efetiva da faixa irrigada pelos emissores ao longo do pivô é constante; assim, pode-se fazer

$$F_i = F \quad (13)$$

em que F é a largura da faixa efetiva irrigada por um emissor diferente do de ordem zero, m .

Substituindo as equações 5 e 13 na equação 10 e o resultado na equação 9, obtém-se a equação 14 que é utilizada no cálculo da vazão do emissor de ordem zero. Da mesma maneira, substituindo as equações 6 e 13 na equação 10 e o resultado na equação 9, tem-se a equação 15 que é utilizada no cálculo da vazão do emissor de ordem i , sendo $i > 0$.

$$Q_{a0} = \frac{2 E T_m F_0}{E_{pa} T} R_s \frac{F_0}{2} \quad (14)$$

$$Q_{ai} = \frac{2 E T_m F}{E_{pa} T} R_s F_0 \frac{F}{2} 2^i \quad (15)$$

em que

Q_{a0} = vazão do emissor de ordem zero, $m^3 s^{-1}$; e

F_0 = largura da faixa efetiva irrigada pelo emissor de ordem zero, m.

Conhecida a vazão, a pressão e o coeficiente de descarga de um determinado emissor i , pode-se calcular o diâmetro do bocal do emissor pela equação:

$$D_{bi} = 1000 \frac{Q_{ai}^{0,5}}{3,478 C_{d1} P_i^{0,5}} \quad (16)$$

em que

D_{bi} = diâmetro do maior bocal requerido para o emissor de ordem i , mm; e

C_{d1} = coeficiente de descarga do bocal, adimensional.

O procedimento consiste em comparar o diâmetro do bocal do emissor i que foi calculado por meio da equação 16 com o maior diâmetro de bocal existente no mercado para o emissor em questão, tendo sido este previamente cadastrado pelo usuário. Se o diâmetro do bocal do último emissor da linha lateral for inferior ao maior diâmetro permitido, a operação se encerra, caso contrário, faz-se necessário corrigir o diâmetro. Nesse caso, o passo seguinte depende do tipo de emissor que está sendo utilizado, isto é, aspersor de impacto ou difusor.

No caso de aspersores de impacto, se o D_{bi} for maior que o maior diâmetro de bocal fornecido pelo usuário, torna-se necessária a utilização de emissores com dois bocais, ou a redução do espaçamento entre emissores, ou, ainda, a redução da área irrigada.

No caso de se optar por utilizar pelo uso de emissores com dois bocais, o primeiro valor do diâmetro do bocal calculado, D_{bi} , é reduzido pela metade, e o diâmetro do menor bocal é calculado pela equação

$$d_{bi} = \frac{Q_{ai}}{3,478 P_i^{0,5}} \frac{C_{d1} D_{bi}^2}{C_{d2}} \quad (17)$$

em que

d_{bi} = diâmetro do menor bocal do aspersor de ordem i, mm; e

C_{d2} = coeficiente de descarga do menor bocal, adimensional.

Se o diâmetro do menor bocal for superior a 75% do valor do diâmetro do maior bocal, este é acrescido de uma constante (0,0001 mm), e o diâmetro do menor bocal é recalculado. Esse procedimento é repetido até que a combinação dos dois bocais seja capaz de fornecer a vazão necessária. Caso no final do procedimento o diâmetro do maior bocal supere novamente o maior diâmetro permitido, e o menor bocal seja 75% do maior bocal, é feito automaticamente um ajuste do espaçamento entre emissores.

No caso de difusores, apenas um bocal é permitido. O diâmetro do bocal é calculado pela equação 16, sendo necessário que o maior diâmetro de bocal cadastrado seja superior ao maior diâmetro calculado se não for, o pivô não pode ser dimensionado. Nesse caso, existem duas soluções: (a) reduzir o raio da área irrigada pelo pivô central; ou (b) diminuir o diâmetro de alcance do jato de água emitido pelo difusor, o que provoca redução do espaçamento entre emissores.

O raio da área molhada pelo emissor, denominado daqui por diante simplesmente de raio molhado, influencia diretamente o espaçamento entre emissores e, conseqüentemente, o custo do sistema. Ele depende da velocidade de saída do jato de água emitido, do ângulo de inclinação do emissor e do diâmetro de gotas. Para simular a variação desse parâmetro dentro da área irrigada e assim poder calcular o escoamento superficial, é usada a mesma equação utilizada pelo modelo CPED, isto é:

$$W_r = 0,3048 B_0 B_1 \frac{D_{ri}^2}{304,8} 3,281 P_i B_2 \frac{D_{ri}^2}{304,8} 3,281 P_i \quad (18)$$

Diâmetro das tubulações que compõe a linha lateral

A metodologia utilizada e descrita na seqüência baseia-se no método apresentado por [Ferreira \(1993\)](#), o qual tem como critério de dimensionamento a minimização do custo total anual do sistema. Esse custo é composto com os custos da linha lateral, da estação de bombeamento e de operação e da manutenção da estação de bombeamento.

A linha lateral do pivô central é formada por uma tubulação com tubos acoplados em série, com uma única entrada de água, localizada no centro do pivô, e com múltiplas saídas situadas no final de cada segmento de tubulação (Figura 4). Daqui por diante, cada segmento da tubulação compreendido entre dois emissores será denominado trecho da tubulação. Assim, o primeiro trecho, ou trecho de ordem zero, inicia-se no centro do pivô e termina no emissor de número de ordem zero, o segundo trecho inicia-se no emissor de ordem zero e termina no emissor 1, e assim sucessivamente, até o último trecho, ou trecho de ordem n-1.

Figura 4. Esquema representativo da linha lateral de um pivô central, sendo: Q_s , a vazão do sistema; Q_{t1} e Q_{tn-1} , a vazão nos trechos 1 e n-1, respectivamente; L_{t1} e L_{tn-1} , comprimento da tubulação 1 e n-1, respectivamente; Q_{a0} , Q_{a1} , Q_{an-2} e Q_{an-1} , vazões dos aspersores 0, 1, n-2, n-1, respectivamente; e S_0 , S_1 , S_{n-1} , posições dos aspersores 0, 1 e n-1, respectivamente.

Dessa forma, o comprimento de cada trecho é calculado pela equação:

$$L_{ti} = \frac{S_i}{S_{i-1}} \quad (19)$$

em que

L_{ti} = comprimento do trecho de ordem i, m.

A vazão da linha lateral diminui, de trecho para trecho, do centro do pivô até a sua extremidade. Tendo em vista que a vazão do trecho i é igual à vazão do trecho $i-1$ menos a vazão do emissor $i-1$, a vazão de cada trecho pode ser calculada pela equação

$$Q_{ti} = Q_s - \sum_{k=1}^{i-1} Q_{ak} \quad (20)$$

em que

Q_{ti} = vazão do trecho de ordem i , $m^3 s^{-1}$.

Para o caso de espaçamento constante entre emissores, a equação 20 pode ser escrita como

$$Q_{ti} = Q_s - Q_{a0} \left(i - 1 \right) \frac{2 ET_m F}{E_{pa} T} R_s F_0 \frac{F}{2} 0,5 i F \quad (21)$$

Para calcular o diâmetro das tubulações que minimizam o custo da linha lateral, utiliza-se o método desenvolvido por [Ferreira \(1993\)](#). Este método, o qual está descrita na seqüência, tem como critério de dimensionamento a minimização do custo total anual do sistema. Este custo é composto pelos custos da linha lateral, da estação de bombeamento e de operação e da manutenção da estação de bombeamento.

O método acima referido possibilita duas alternativas de cálculo, caracterizadas como: a) linha lateral composta de tubos de diâmetros decrescentes; e b) linha lateral composta de tubos com mesmo diâmetro.

O custo de capital de uma tubulação, incluindo todos os custos necessários para que esta fique pronta para entrar em operação, é função do diâmetro do tubo e é calculado, segundo [Cowan \(1971\)](#) e [Deb \(1974\)](#), pela equação

$$Y_1 = K_1 L D^{m_1} \quad (22)$$

em que

Y_1 = custo total da tubulação de distribuição, US\$;

K_1 = coeficiente da equação de custo da tubulação, adimensional;

- L = comprimento da tubulação, m;
 D = diâmetro interno do tubo, m; e
 m_1 = expoente da equação de custo da tubulação, adimensional.

O custo de capital de uma estação de bombeamento completa é função da potência instalada e é calculado, segundo [Cowan \(1971\)](#) e [Deb \(1974\)](#), pela equação

$$Y_2 = K_2 P_{ot}^{m_2} \quad (23)$$

em que

- Y_2 = custo da estação de bombeamento, US\$;
 K_2 = coeficiente da equação de custo da estação de bombeamento, adimensional;
 P_{ot} = potência do conjunto motobomba, kW; e
 m_2 = expoente da equação de custo da estação de bombeamento, adimensional.

A potência absorvida pelo conjunto motobomba pode ser calculada pela equação

$$P_{ot} = \frac{Q_s H_t}{1000 h_{mb}} \quad (24)$$

em que

- g = peso específico da água, N m⁻³;
 H_t = altura manométrica total, mca; e
 h_{mb} = eficiência do conjunto motobomba, decimal.

Substituindo a equação 24 na equação 23, obtém-se a equação 25, que é utilizada para estimar, em função da vazão e da altura manométrica, o custo da estação de bombeamento.

$$Y_2 = K_2 \frac{Q_s}{1000} H_t^{m_2} \quad (25)$$

A altura manométrica total é calculada pela equação

$$H_t = H + H_{ad} + \frac{P_s}{\rho g} + Y_0 + Z_{pc} - Z_{ad} \quad (26)$$

em que

DH = perda de carga total ao longo da tubulação de distribuição, mca;

DH_{ad} = perda de carga total na adutora, mca;

P_s = pressão de serviço do emissor, mca;

Y_0 = altura do bocal do emissor em relação ao solo, m;

DZ_{pc} = desnível entre o centro do pivô e o ponto mais desfavorável na área irrigada, m; e

DZ_{ad} = desnível entre a adutora e o centro do pivô, m.

No caso de operação contínua, segundo [Cowan \(1971\)](#) e [Deb \(1974\)](#), o custo de operação e manutenção de uma estação de bombeamento é função da vazão, da altura manométrica e de um fator que visa considerar o fato do pivô não operar continuamente ao longo de todo o ano, podendo ser calculado pela equação

$$Y_3 = 8760 Q_s (K_3 H_t + B_3) \quad (27)$$

em que

Y_3 = custo de operação e manutenção da estação de bombeamento, US\$;

K_3 = coeficiente da equação de custo de operação e manutenção da estação de bombeamento, adimensional; e

B_3 = coeficiente linear da equação de custo de operação e manutenção da estação de bombeamento, US\$.

sendo

$$\frac{t_o}{8760} \quad (28)$$

em que t_o é o tempo de operação anual do conjunto motobomba, h.

A hidroeletricidade representa mais de 90% da energia gerada no Brasil (COSTA, 1997). Este fator contribui para o maior uso de motores acionados por energia elétrica em sistemas de irrigação do tipo pivô central. Nestes casos, o principal componente do custo de operação e manutenção é o consumo de energia elétrica.

Segundo Tsutiya, citado por Ferreira (1993), os custos decorrentes do consumo de energia elétrica são calculados pela equação

$$Y_{ec} = 8760 P_{ot} Y_{ec} \quad (29)$$

em que

Y_{ec} = custo anual do consumo de energia elétrica, R\$ ano⁻¹; e

y_{ec} = custo unitário da energia elétrica, R\$ (kWh)⁻¹.

Os diâmetros de mínimo custo são obtidos combinando-se a equação de Darcy-Weisbach, com um critério de mínimo custo e com a função de custo da tubulação.

A equação de Darcy-Weisbach pode ser representada, de forma generalizada para qualquer trecho de tubulação, pela equação

$$H_i = \frac{8}{g} \frac{f_{DWi}}{2} \frac{Q_{ti}^2}{D_i^5} L_i \quad (30)$$

em que

ΔH_i = perda de carga distribuída no trecho de ordem i , mca;

g = aceleração em virtude da gravidade, m s⁻²;

f_{DWi} = fator de atrito da fórmula de Darcy-Weisbach para o trecho de ordem i , adimensional;

Q_{ti} = vazão do trecho de ordem i , m³ s⁻¹;

D_i = diâmetro interno do segmento de tubulação de ordem i , m; e

L_i = comprimento do trecho de ordem i , m.

Fazendo-se, na equação 22, $Y_1 = Y_i$, $L = L_i$ e $D = D_i$, explicitando-a em relação a D_i , e substituindo-a na equação 30, obtém-se a equação 31, a qual fornece o custo de um trecho da linha lateral.

$$Y_i = \frac{8}{g^2} K \frac{f_{DWi}^{m_1/5} Q_i^{2 m_1/5} L_i^{1 m_1/5}}{H_i^{m_1/5}} \quad (31)$$

O custo total da linha lateral é a soma dos custos de todos os trechos que a constitui, isto é:

$$Y = \sum_{i=0}^{n-1} Y_i \quad (32)$$

Os diâmetros econômicos para os tubos que compõem a linha lateral são calculados em virtude de uma perda de carga total preestabelecida. A solução consiste em se obter um conjunto de segmentos de tubulação de tal modo que toda a perda de carga preestabelecida seja utilizada. Neste caso, em que os segmentos de tubulação são acoplados em série e que o custo por metro do trecho é diferente, existem diversas alternativas para se distribuir, entre os trechos, a perda de carga preestabelecida. Entretanto, apenas uma dessas alternativas será a de mínimo custo para a tubulação (FERREIRA, 1993). O mesmo autor concluiu que, quando o custo da tubulação for mínimo, a razão entre a perda de carga de um trecho e a perda de carga preestabelecida é igual à razão entre o custo desse mesmo trecho e o custo total da tubulação, isto é:

$$\frac{H_i}{H} = \frac{Y_i}{Y} \quad (33)$$

A razão de perda de carga de um trecho genérico da tubulação de distribuição, ou seja, a razão entre a perda de carga do trecho de ordem i e a perda de carga total da tubulação é calculada pela equação

$$R_i = \frac{H_i}{H} \quad (34)$$

em que

R_i = razão de perda de carga, adimensional.

Explicitando ΔH_i na equação 34 e substituindo-a na equação 31, tem-se

$$Y_i = \frac{8}{g^2} K \frac{f_{DWi}^{m_1/5} Q_i^{2 m_1/5} L_i^{1 m_1/5}}{H_i^{m_1/5} R_i^{m_1/5}} \quad (35)$$

Substituindo a equação 27 na equação 24, obtém-se

$$Y = \frac{8}{g^2} \frac{K}{H^{m_1/5}} \frac{f_{DWi}^{m_1/5} Q_i^{2m_1/5} L_i^{1-m_1/5}}{R_i^{m_1/5}} \quad (36)$$

As relações representadas pelas equações 33 e 34 podem ser escritas para um trecho de ordem k, sendo k uma constante. Fazendo-se isto, após as devidas substituições, obtém-se

$$\frac{R_i}{R_k} = \frac{Q_i}{Q_k} \frac{f_{DWi}^{m_1/5} L_i^{1-m_1/5}}{f_{Dk}^{m_1/5} L_k^{1-m_1/5}} \quad (37)$$

Para a solução de mínimo custo da linha lateral, a distribuição de perda de carga entre os tubos deve ser realizada em conformidade com a equação 37.

Conhecendo-se os valores da vazão, do comprimento e do fator de atrito para todos os trechos que compõem a linha lateral do pivô, a relação R_i/R_k para cada trecho pode ser calculada pela equação 37.

Pode-se, finalmente, calcular a perda de carga total de mínimo custo anual, ou seja, a perda de carga distribuída na linha lateral que minimiza o custo total anual do sistema. A qual pode ser, segundo [Ferreira \(1993\)](#), calculada pela equação

$$Y_s = R_1 Y_1 + R_2 Y_2 + Y_3 \quad (38)$$

em que

Y_s = custo total anual do sistema, US\$;

R_1 = fator de recuperação anual do capital da linha lateral, decimal; e

R_2 = fator de recuperação anual do capital da estação de bombeamento, decimal.

O fator de recuperação anual do capital da linha lateral e o fator de recuperação anual do capital da estação de bombeamento são calculados utilizando as equações 39 e 40 propostas por [Deb \(1974\)](#).

$$R_1 = \frac{j_u - 1}{1 + j_u} \frac{1 - (j_u - 1)^{N_1}}{1 - (j_u - 1)^{N_1}} \quad (39)$$

$$R_2 \frac{ju}{1} \frac{1 - ju^{N_2}}{ju^{N_2} - 1} - S_2 \quad ju S_2 \quad (40)$$

em que

ju = taxa de juros anual, decimal;

N₁ = tempo de recuperação do capital da linha lateral, anos; e

S₁ = taxa do valor residual da tubulação, decimal.

N₂ = tempo de recuperação do capital da estação de bombeamento, anos; e

S₂ = taxa do valor residual da estação de bombeamento, decimal.

Substituindo as equações 22, 23 e 27 na equação 38 e derivando a equação resultante em relação à perda de carga total, obtém-se

$$\frac{1}{H^{1 + m_1/5}} - 2 \frac{H}{H} m_2^{1/5} - 8760 \frac{Q_s K_3}{O} \quad (41)$$

sendo

$$1 \quad R_1 K \frac{8}{g} \frac{m_1^{m_1/5}}{2} \frac{m_1^{n-1}}{j_0} \frac{f_{DWi}^{m_1/5} Q_i^{2m_1/5} L_i^{1+m_1/5}}{R_i^{m_1/5}} \quad (42)$$

$$2 \quad m_2 R_2 K_2 \frac{Q_s^{m_2}}{1000 mb} \quad (43)$$

$$H \quad P_s \quad Y_0 \quad Z_{pc} \quad Z_{ad} \quad H_{ad} \quad (44)$$

A perda de carga total é calculada, utilizando o método de Newton-Raphson, por meio da equação 41.

Os diâmetros teóricos dos tubos que compõem a linha lateral, para o caso de tubos com diâmetros decrescentes, são calculados utilizando as equações 37, 34 e 30. E no caso de tubos de mesmo diâmetro pela equação 25, sendo o cálculo baseado em uma perda de carga pré-estabelecida.

O custo total anual do sistema é calculado pela soma dos custos da linha lateral, da estação de bombeamento e de operação da estação de bombeamento, sendo este calculado pela equação 38.

Distribuição da pressão ao longo da lateral do pivô

Para calcular a distribuição da pressão ao longo da lateral do pivô, deve-se levar em consideração, além da perda de carga ocorrida na tubulação, a variação na elevação do terreno. A pressão em um dado emissor da lateral é calculada pela equação

$$P_i = P_1 + H_i (Z_i - Z_1) \quad (45)$$

em que

P_i = pressão no emissor de ordem i , mca;

i = índice referente ao número de ordem do i -ésimo emissor; e

Z_i = desnível do trecho i , m.

A perda de carga é calculada trecho a trecho, utilizando-se a equação 30. O valor da pressão na fase de dimensionamento é calculado em relação à posição crítica, ou seja, o ponto mais elevado situado na faixa irrigada pelo último emissor. Deve-se esclarecer, entretanto, que tal procedimento gera, para o restante da área, ou seja, para os pontos mais baixos, diâmetros de bocais maiores do que o necessário.

A elevação de um determinado emissor é calculada com base na elevação da torre na qual ele está posicionado, tomando como referência o ponto pivô e desprezando-se o arco formado pela tubulação entre duas torres consecutivas ([Figura 5](#)). A elevação do emissor é calculada pela equação

$$Z_i = Z_j + \frac{S_i - S_j}{S_j} \quad (46)$$

em que

Z_j = elevação da torre j em relação a um determinado plano de referência, m;

j = índice referente à j -ésima torre;

S_i = distância do ponto pivô ao emissor i , m; e

S_j = distância do ponto pivô à torre j , m.

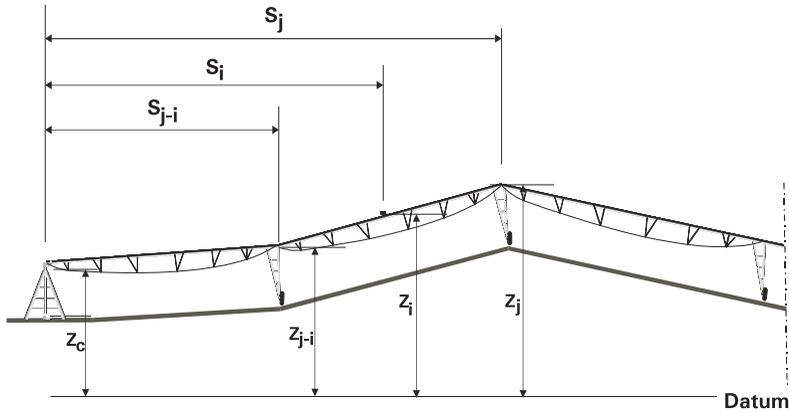


Figura 5. Esquema representativo da linha lateral de um pivô central, indicando-se os pontos que são considerados para calcular a elevação de um determinado emissor.

Intensidade de precipitação máxima e diâmetro molhado mínimo admissíveis

A maior dificuldade quando do dimensionamento de um pivô central é estimar a intensidade de precipitação máxima que pode ser aplicada ao solo sem provocar escoamento superficial. Convencionalmente, a intensidade de precipitação é calculada em função de um valor médio da velocidade de infiltração básica. Este procedimento acarreta erros podendo resultar em áreas com escoamento superficial. Isto ocorre em virtude das propriedades do solo variarem dentro da área irrigada. Além disso, a variação do diâmetro de gota produzida pelo emissor ao longo da circunferência percorrida por ele e ao longo do raio do pivô, combinada com a variação das propriedades físicas do solo induz a formação de diferentes níveis de selamento superficial na área irrigada, o que implica em áreas com maior ou menor tendência à ocorrência de escoamento superficial. Uma outra consequência da variabilidade espacial das propriedades físicas do solo é a variação da rugosidade randômica provocada pela ação dos implementos agrícolas dentro da área irrigada, o que implica, também, em áreas mais ou menos sujeitas à ocorrência de escoamento superficial.

A ocorrência do escoamento superficial é indesejável em qualquer área irrigada. Assim, a estimativa da intensidade de precipitação máxima que pode ser aplicada em uma dada área, sem provocar escoamento superficial, é de fundamental importância para um adequado dimensionamento do sistema de irrigação. O procedimento utilizado para calcular esta variável é uma adaptação do método apresentado por [Rodrigues et al. \(1999\)](#) e é descrito na seqüência.

Áreas submetidas à irrigação estão sujeitas, normalmente, a diversas práticas de preparo de solo que podem afetar a variabilidade espacial e temporal da infiltração da água no solo. Dessa forma, uma equação que descreva o processo de infiltração da água em uma área irrigada por pivô central deve ser capaz de representar os efeitos advindos das práticas de preparo do solo na infiltração ([MOHAMOUD et al., 1992](#)).

Dentre as várias equações disponíveis para estimar a infiltração, a proposta por Green-Ampt (GA) é uma das que apresenta maior potencial de utilização, por causa da sua simplicidade e por estar fundamentada no próprio processo físico da infiltração, o que não ocorre com as equações empíricas ([RODRIGUES ; PRUSKI, 1997](#)). Esta equação é representada por

$$VI(t) = K_s \left[1 - \frac{S_w (s_i - s)}{I(t)} \right] \quad (47)$$

em que

$VI(t)$ = velocidade de infiltração da água no solo, mm h^{-1} ;

K_s = condutividade hidráulica do solo saturado, mm h^{-1} ;

S_w = potencial matricial médio na frente de umedecimento, mm;

q_s = umidade do solo na saturação, $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$;

q_i = umidade atual do solo, $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$; e

$I(t)$ = infiltração acumulada, mm.

Originalmente, a equação de Green-Ampt foi derivada considerando que a região acima da frente de umedecimento encontra-se saturada. Com base nesta consideração, tem-se utilizado na equação de Green-Ampt a condutividade hidráulica do solo saturado e a umidade do solo na saturação. Entretanto, a condutividade hidráulica do solo, na região acima da frente de umedecimento (K_w), é menor que a condutividade hidráulica do solo saturado. Assim, recomenda-se utilizar, na equação 47, K_w em vez de K_s .

Diversos autores ([ONSTAD et al., 1973](#); [SLACK, 1980](#); [ZIRBEL et al., 1982](#)) constataram que a máxima umidade atingida no campo durante a infiltração, normalmente denominada saturação de campo (θ_w), é menor que a umidade do solo na saturação. Estes mesmos autores sugerem utilizar, na equação 47, θ_w em vez de θ_s .

O impacto das gotas de água com a superfície do solo induz a formação de uma camada de solo compacta, a qual é menos permeável à passagem de água que as camadas abaixo dela, sendo, normalmente, denominada selamento superficial ([HACHUM; ALFARO, 1980](#)).

É comum, no dimensionamento de um sistema de irrigação do tipo pivô central, o projetista não considerar a redução da velocidade de infiltração provocada pelo surgimento do selamento superficial. Neste caso, após algum tempo, a capacidade de infiltração da água no solo torna-se menor que a intensidade de precipitação e poderá haver a ocorrência do escoamento superficial.

Visando incorporar o efeito da camada de selamento superficial na VI, [Bernuth \(1982\)](#) sugere utilizar, na equação 47, K_h em vez de K_w , sendo K_h calculado pela equação

$$K_h = K_w \left(1 - \frac{F_r}{100} \right) \quad (48)$$

em que F_r é o fator de redução da condutividade hidráulica do solo saturado, %.

[Bernuth e Gilley \(1985\)](#), citando diversos trabalhos, concluíram que a porcentagem de redução da infiltração da água no solo é dependente do diâmetro das gotas, da velocidade de impacto delas com a superfície do solo e das características do solo. Esses mesmos autores ajustaram uma equação aos valores de velocidade de infiltração da água no solo obtidos por vários pesquisadores, sob diversas condições de solo e diâmetros de gotas, e utilizaram essa equação para calcular um fator redutor para a velocidade de infiltração. A equação obtida foi

$$F_r = 3,541 D_{g50}^{0,683} V_g^{1,271} S_{ar}^{0,353} S_s^{0,257} \quad (49)$$

em que

D_{g50} = diâmetro médio das gotas, mm;

V_g = velocidade de impacto das gotas com a superfície do solo, m s⁻¹;

S_{ar} = porcentagem de areia, %; e

S_s = porcentagem de silte, %.

Analisando a equação 49, nota-se que, quanto maiores o diâmetro médio da gota, a velocidade de impacto da gota e a porcentagem de silte no solo, maior é o fator de redução da velocidade de infiltração. Por outro lado, quanto maior a porcentagem de areia no solo, menor é esse fator.

Segundo [Ellison \(1944\)](#), a formação do selamento superficial, na maioria dos solos, se dá de maneira bastante rápida, variando geralmente de dois a três minutos. Desta forma, a variação do selamento superficial em função do tempo de duração da precipitação não é tão importante, e por este motivo ele foi desconsiderado na equação 49.

O selamento superficial é um fenômeno que ocorre na superfície do solo. A espessura da camada de selamento superficial é variável. Segundo [Hachum e Alfaro \(1980\)](#), ela pode variar de 3 mm a 6 mm. Neste trabalho, entretanto, considera-se que o selamento superficial ocorre em uma camada de 10 mm de espessura.

A intensidade de precipitação sob um pivô central varia continuamente com o tempo. [Heermann e Hein \(1968\)](#), assumindo modelo de distribuição da precipitação semi-elíptico ou triangular, apresentaram equações para descrever a intensidade de precipitação sob um pivô central. [Kincaid et al. \(1969\)](#) conduziram experimentos de campo para testar a validade destas equações e verificaram que os valores de intensidade de precipitação calculados, considerando modelo de distribuição semi-elíptico, representaram melhor os valores experimentais.

[Allen \(1990\)](#) considerou o modelo de distribuição de precipitação semi-elíptico e expressou a intensidade de precipitação em função da lâmina aplicada pela equação

$$i_p(L) = i_{pm} \left[1,05 + 1,6 \frac{L(t)^2}{d} \right]^{0,5} \quad (50)$$

em que

$i_p(L)$ = intensidade de precipitação em função da lâmina aplicada ao solo, mm h⁻¹;

i_{pm} = intensidade de precipitação máxima real, mm;

$L(t)$ = lâmina aplicada ao solo em função do tempo, mm; e

d = lâmina total a ser aplicada, mm.

Segundo [Allen \(1990\)](#), a equação 50 não é definida para $L(t) = 0$ e para $L(t) = d$, pois nestes pontos a declividade da curva tende para o infinito.

A ação de implementos agrícolas no preparo do solo causa perturbações aleatórias na superfície deste, denominadas rugosidade randômica. A rugosidade da superfície do solo, incluindo aquela provocada pela ação de implementos agrícolas durante o preparo do solo, determina a quantidade de água que pode ser mantida na superfície como lâmina armazenada superficialmente ([MORGAN et al., 1998](#)).

Segundo [Potter \(1990\)](#), a rugosidade da superfície do solo é uma propriedade dinâmica, a qual interfere em muitos dos processos que ocorrem na superfície; dentre estes, destacam-se a infiltração da água no solo, o armazenamento e o escoamento superficial. Entretanto, o preparo do solo e as condições climáticas podem modificar rapidamente esta propriedade, embora a taxas diferentes, conforme o tipo de solo.

Em virtude disso, [Mohamoud et al. \(1992\)](#), trabalhando a favor da segurança, recomendam não utilizar esse parâmetro na fase de dimensionamento. No entanto, a consideração do armazenamento superficial permite a escolha de sistemas com pressão de operação menor, o que pode reduzir o custo inicial do sistema.

Com o objetivo de contabilizar a influência do armazenamento superficial no cálculo da intensidade de precipitação máxima, sem comprometer a segurança, utiliza-se no modelo o menor valor que este parâmetro poderá assumir até um dado período.

De acordo com [Onstad \(1984\)](#), o armazenamento superficial é função da rugosidade randômica e da declividade do solo e é calculado pela equação

$$A_s = 0,112 RR + 3,1RR^2 + 1,2 RR J_0 \quad (51)$$

em que

A_s = armazenamento superficial máximo, m;

RR = rugosidade randômica, m; e

J_0 = declividade da superfície do solo, $m\ m^{-1}$.

A rugosidade randômica é calculada pela equação 52, a qual foi desenvolvida por [Alberts et al. \(1995\)](#).

$$RR_i = RR_0 \frac{T_{ds}}{100} + RR_{t-1} \left(1 - \frac{T_{ds}}{100}\right) \quad (52)$$

em que

RR_i = rugosidade randômica imediatamente após o preparo do solo, m;

RR_0 = rugosidade randômica provocada pela ação do implemento de preparo do solo, m;

T_{ds} = porcentagem da superfície do solo alterada pela ação do implemento de preparo do solo, %; e

RR_{t-1} = rugosidade randômica da superfície do solo no dia anterior ao preparo do solo, m.

O decaimento da rugosidade randômica em função da lâmina precipitada é calculado pela equação ([POTTER, 1990](#))

$$RR_t = RR_i e^{-0,3 \frac{L_a}{b_{rr}}^{0,6}} \quad (53)$$

em que

L_a = lâmina aplicada desde o preparo do solo, m.

sendo

$$b_{rr} = 63 - 62,7 \ln(0,5 S_{mor}) - 15,7 S_a - 0,25 S_a^2 \quad (54)$$

em que S_{mor} é a porcentagem de matéria orgânica, %.

Incluindo o efeito do armazenamento superficial, como fator atenuador do escoamento superficial, e incorporando as modificações sugeridas por [Bower \(1966\)](#), [Slack \(1980\)](#) e [Bernuth \(1982\)](#), pode-se escrever a equação 47 da seguinte forma

$$VI t \quad K_h \quad 1 \quad \frac{S_w \quad w \quad i}{I t \quad A_s} \quad (55)$$

Sempre que a intensidade de precipitação exceder a capacidade de infiltração da água no solo, poderá ocorrer o acúmulo de água sobre a superfície do solo e, posteriormente, o escoamento superficial. Para que este não ocorra em uma área onde a declividade seja maior que zero e não haja presença de vegetação ou de cobertura morta, uma das duas condições deverá ocorrer:

condição 1 - $i_p \leq CI$ durante toda a irrigação (Figura 6) ou

$$\text{condição 2 - } A_s \int_{t_{ip}}^{t_{fp}} i_p \, dt \leq VI \int_{t_{ip}}^{t_{fp}} t \, dt \quad (\text{Figura 7})$$

em que t_{ip} e t_{fp} são os tempos de início e fim do empoçamento de água sobre a superfície do solo.

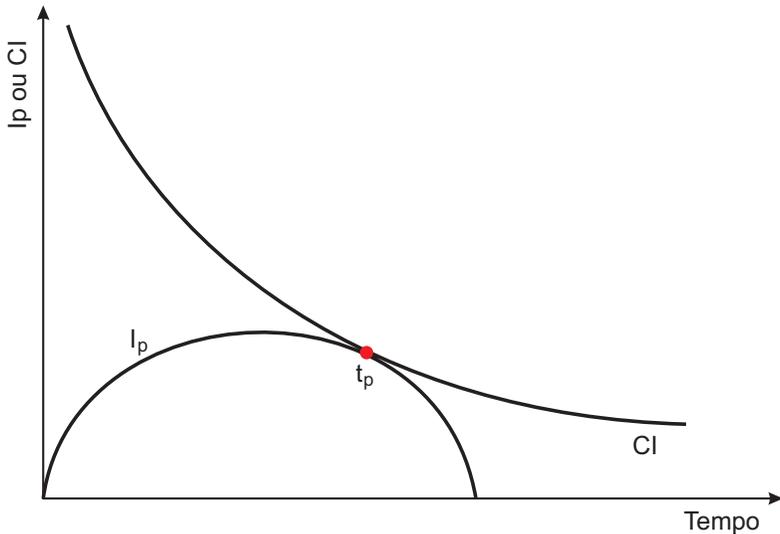


Figura 6. Curvas hipotéticas representativas do comportamento da capacidade de infiltração da água no solo (CI) e da intensidade de precipitação (i_p) típicas de irrigação por pivô central, destacando-se o tempo de empoçamento (t_p).

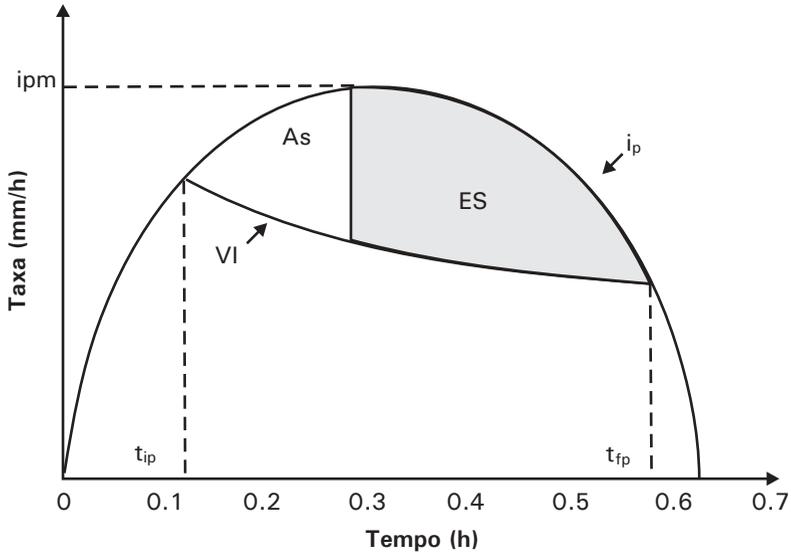


Figura 7. Curvas hipotéticas representativas do comportamento da velocidade de infiltração da água no solo (VI) e da intensidade de precipitação (i_p) em condições típicas de sistemas de irrigação do tipo pivô central, destacando-se os tempos de início (t_{ip}) e de final (t_{fp}) de empoçamento, o armazenamento (As) e o escoamento (ES) superficial.

No instante crítico (t_p), momento em que a curva representativa de i_p toca a curva de CI, o valor de i_p é igual ao valor de CI, e são iguais também as declividades das curvas de i_p e CI, ou seja

$$CI = i_p \quad (56)$$

$$\frac{d CI}{d L t} = \frac{d(i_p)}{d L t} \quad (57)$$

Substituindo as equações 50 e 55 nas equações 56 e 57 e fazendo os devidos ajustes, obtêm-se as equações 58, 59 e 60, que, quando resolvidas, fornecem o valor, em $mm h^{-1}$, da intensidade de precipitação máxima admissível que pode ser aplicada de modo a evitar o escoamento superficial para uma determinada condição de solo, de clima e de cultura.

$$i_{pma} = \frac{4,47 K_h (A_s L(t) S_w d) L_p}{A_s L t L_p 78,96 L^2 t^{0,5}} \quad (58)$$

$$\frac{44,13 i_{pma} [L_p \quad 2 L(t)]}{5 L_p \quad 78,96 L^2 t^{0,5} L_p} \frac{K_h S_w d}{A_s L t^2} \quad (59)$$

$$\frac{d()}{d(L(t))} \frac{2 K_h S_w d}{A_s L t^3} \frac{1853,80 i_{pma} L_p}{5 L_p \quad 78,96 L^2 t^{1,5}} \quad (60)$$

em que θ_d é o déficit de umidade no rolo ($\theta_w - \theta_i$)

sendo

$$78,96 L(t) \quad 1,26 L_p \quad (61)$$

As equações resultantes estão na forma para serem resolvidas pela técnica numérica de Newton-Raphson. O procedimento consiste em se atribuir um valor inicial para $L(t)$ na equação 58 e calcular o valor da intensidade de precipitação máxima admissível. Os valores de $L(t)$ e de i_{pma} são, então, substituídos nas equações 59 e 60, sendo o erro calculado pela equação 62. O procedimento se encerra quando o módulo do erro for inferior à precisão desejada. É utilizada uma precisão de 0,0001. Recomenda-se, com o intuito de otimizar o tempo computacional, iniciar o procedimento com um valor de $L(t)(L_p/2)$.

$$\text{Erro} \frac{\quad}{d()/d(L(t))} \quad (62)$$

Tendo-se calculado, para cada mancha de solo da área irrigada, a intensidade de precipitação máxima admissível em relação a uma determinada lâmina líquida de irrigação pode-se calcular o tempo total que uma determinada célula está recebendo água em cada passada do pivô. Esta variável pode ser calculada, para o caso de um perfil teórico elíptico, pela equação

$$t_{mol} \frac{4 d_n}{i_{pma}} \quad (63)$$

em que d_n é a lâmina líquida de irrigação.

A velocidade com que a última torre tem que se deslocar para aplicar a lâmina líquida de irrigação é

$$V_{desl} \frac{2 R}{60 H_{FP} T_{1V}} \quad (64)$$

sendo

$$T_{1V} \frac{d DE_{pa}}{ET_d} \quad (65)$$

em que

t_{mol} = tempo total em que um determinado ponto do solo recebe água durante uma passada do pivô, h;

v_{desl} = velocidade de deslocamento da última torre, m min⁻¹;

T_{1V} = tempo gasto para que o pivô complete uma volta, dias;

H_{FP} = horas de funcionamento do equipamento por dia, h; e

DE_{pa} = eficiência de distribuição de água estabelecida durante a fase de projeto, decimal.

A eficiência de distribuição de água é calculada pela equação

$$DE_{pa} = 100 - 606 \cdot pa - 24,9 \cdot pa^2 - 0,349 \cdot pa^3 - 0,00186 \cdot pa^4 + 1 \cdot \frac{CUC}{100} \quad (66)$$

em que

pa = percentagem da área adequadamente irrigada.

O passo seguinte consiste em se calcular o diâmetro molhado mínimo, o que pode ser feito por meio da equação

$$d_{mol_{min}} = t_{mol} \cdot v_{desl} \quad (67)$$

Se o diâmetro molhado do último emissor da linha lateral do pivô for menor que o diâmetro molhado mínimo admissível, têm-se duas opções possíveis. A primeira consiste em se reduzir o comprimento da linha lateral do pivô e a segunda em se fazer com que o diâmetro molhado do último emissor seja igual ou menor que o diâmetro molhado mínimo calculado. Neste último caso, haverá, conseqüentemente, uma redução do espaçamento entre emissores.

Manejo do pivô central

O manejo da irrigação, ou seja, o processo de definir a necessidade de água com volume apropriado para garantir o balanço hídrico do solo, de modo a viabilizar a produtividade das culturas dentro de níveis aceitáveis, é fator importante no processo produtivo. Historicamente, ele tem sido feito considerando a área

irrigada como uma unidade homogênea (Figura 8a). Conseqüentemente, dentro da área irrigada, haverá pontos em que a irrigação está sendo adequada, ou seja, de acordo com o estabelecido em projeto, outros em que a irrigação está em excesso, ou seja, maior que a ideal, implicando em perdas por percolação, e outros em que a irrigação está sendo deficiente, indicando um provável comprometimento da produção. Ademais, em algumas áreas, a irrigação está sendo conduzida no momento correto, em outras antes do momento adequado e em outras após o momento adequado.

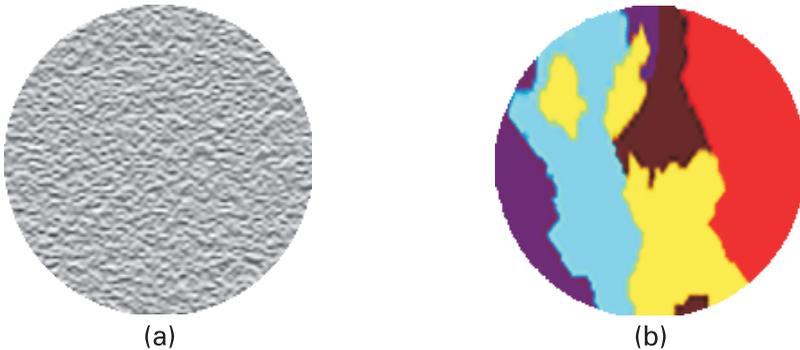


Figura 8. Esquema representativo de uma área homogênea (a) e de uma outra indicando zonas de manejo de irrigação (b).

A aplicação da irrigação após o momento ideal pode prejudicar a produtividade da cultura; já a sua aplicação antes do momento correto pode não prejudicar a produtividade da cultura, mas pode provocar uma queda na eficiência do uso da água, uma vez que, para manter a mesma produtividade, serão necessárias irrigações mais freqüentes, o que aumenta as perdas por evaporação direta da água do solo e, além disso, o sistema fica mais suscetível à ocorrência de estresse hídrico em virtude de uma parada não programada.

Com o aperfeiçoamento dos sistemas de posicionamento global e com o desenvolvimento de emissores capazes de aplicar água a uma taxa diferenciada dentro da área irrigada, o manejo da irrigação de maneira diferenciada está se tornando uma realidade. Atualmente além de saber quanto de água aplicar e quando aplicá-la deve-se determinar onde, dentro da área irrigada, ela deve ser aplicada.

A utilização de zonas de manejo é uma alternativa para se manejar o sistema de forma mais racional (Figura 8b). Dentro desta nova estratégia, novas questões deverão ser respondidas, tais como: Qual o número ideal de zonas de manejo? Qual o tamanho ideal dessas zonas? Para que estas questões sejam respondidas de maneira adequada, mais estudos devem ser conduzidos no sentido de entender melhor o sistema irrigado, neste contexto, a modelagem é uma ferramenta de grande utilidade.

Umidade do solo

Para se desenvolver estratégias de manejo de irrigação diferenciado, faz-se necessário o conhecimento da variabilidade espacial da umidade do solo dentro da área irrigada, sendo esta influenciada diretamente pela evapotranspiração, infiltração, escoamento superficial e percolação profunda. Ou seja, em solos diferentes, espera-se que estas variáveis se comportem de maneiras diferentes.

O movimento da água pelo sistema solo-planta pode ser descrito por meio da equação de conservação de massa. Tomando-se a área irrigada por um pivô central como sendo a escala de trabalho, pode-se assumir que o movimento da água é predominantemente na direção vertical, ou seja, pode-se desprezar o movimento da água no sentido horizontal. Assim a equação de conservação da massa em uma direção pode ser utilizada para estimar a umidade do solo. Desprezando-se a ascensão capilar, a umidade do solo, A_w , em cada célula da área de interesse é calculada pela equação

$$A_{w_{t,i,j}} - A_{w_{t-1,i,j}} = (Entradas - Perdas) \quad (68)$$

$$A_{w_{t,i,j}} - A_{w_{t-1,i,j}} = [(R_{t,i,j} + I_{t,i,j}) - (IC + ET_{c,t,i,j} + DP + ES_{t,i,j})] \quad (69)$$

em que

Etc = evapotranspiração da cultura, mm;

R = precipitação natural efetiva, mm;

I = precipitação artificial efetiva, mm;

IC = lâmina interceptada pela cobertura vegetal, mm;

DP = percolação profunda, mm;

t = índice relativo ao tempo; e

i, j = índice relativo a posição das células.

Os maiores erros que ocorrem ao se utilizar a técnica do balanço de água do solo para se calcular a umidade são em razão da consideração de um perfil de solo homogêneo em termos de característica de solo e de umidade. Visando diminuir os erros associados a esta consideração, o perfil do solo é dividido em três camadas, contabilizadas a partir da superfície do solo até a profundidade máxima do sistema radicular de uma cultura em pleno desenvolvimento. Considera-se que a primeira camada de solo possui 10 cm de espessura e as demais espessuras iguais (Figura 9).

O ponto de referência para distribuição da umidade no perfil do solo é a capacidade de campo. Toda água que exceda a quantidade de água existente no solo quando ele se encontra na capacidade de campo é passada imediatamente para a próxima camada de solo.

Figura 9. Esquema representativo da divisão da zona radicular em camadas.

Evapotranspiração da cultura

A estimativa da quantidade de água necessária na irrigação é essencial para o correto manejo de qualquer sistema de irrigação. Nos últimos anos, diversas metodologias foram propostas para essa finalidade. Dentre elas, têm-se destacado aquelas que se baseiam na utilização da evapotranspiração para quantificação da irrigação necessária. A evapotranspiração constitui a

transferência de água na forma de vapor do sistema solo-planta para a atmosfera, sendo do solo para a atmosfera denominada evaporação e da planta para a atmosfera transpiração ([RODRIGUES et al., 1998](#)).

Apesar da similaridade física dos dois processos, a evaporação direta da água do solo (E) não é idêntica à transpiração (T), pois, mesmo com total abertura estomática, a resistência à difusão do vapor da água é maior nas folhas do que na água livre ([CHANG, 1968](#)).

A evaporação direta é um processo puramente físico que ocorre, basicamente, nas camadas superficiais do solo. Assim, para que a água localizada nas camadas mais profundas do solo evapore, ela deve deslocar-se para a superfície; esse movimento, além de ser dependente da textura e da umidade do perfil do solo, é muito lento. Já a transpiração é um processo mais complicado do que a E, uma vez que envolve tanto a fisiologia da planta como a física do fluxo de água no solo. A transpiração, por sua vez, não se limita às camadas superficiais do solo, posto que envolve a região do solo abrangida pelo sistema radicular da cultura. Em virtude da maior dificuldade em estimar a transpiração, em certos casos ela tem sido calculada como a diferença entre a evapotranspiração e a evaporação direta ([RODRIGUES et al., 1999](#)).

Para fins de modelagem e para possibilitar a adequada representação da variabilidade da umidade do solo dentro da área irrigada, é interessante que a metodologia utilizada para estimativa da evapotranspiração da cultura (ET_c) seja sensível à variabilidade espacial das características do solo e da própria umidade do solo. Neste sentido, os métodos que calculam a ET_c separando a evaporação direta da água do solo da transpiração das plantas têm uma grande aplicabilidade.

Diversos métodos que separam a E da T podem ser encontrados na literatura ([RITCHIE, 1972](#); [HANKS, 1974](#); [KANEMASU et al., 1976](#); [TANNER; JURY, 1976](#)). neste sistema, optou-se por utilizar o modelo proposto por Ritchie (1972) e modificado por [Ritchie e Johnson \(1990\)](#) e por [Jones e Ritchie \(1990\)](#). Neste método, foi assumido que E é limitada pela fração da radiação líquida que atinge a superfície do solo até que certa quantia de água tenha sido evaporada. A partir daí, então, E passa a ser limitada pelo solo e é calculada por uma fórmula empírica em função do tempo. A T, por sua vez, é função do índice de área foliar (IAF) e da expressão proposta por [Priestley e Taylor \(1972\)](#).

Ritchie (1972) apresentou uma descrição matemática simples para o processo da E, considerando as duas primeiras fases de secamento descritas por Philip (1957) e dois parâmetros para representá-las (U e α). O parâmetro U representa a quantidade de água que evapora na fase 1, e α é uma constante relativa à difusividade da água na superfície do solo durante a segunda fase de secamento.

Durante o primeiro estágio de secamento do solo, a evaporação direta (E_1) é calculada pela equação 70 ou pela equação 71, conforme o valor do índice de área foliar.

$$E_1 = ET_{MAX} (1 - 0,43 IAF), \text{ se } IAF < 1 \tag{70}$$

$$E_1 = \frac{ET_{MAX}}{1,1} e^{-0,4 IAF}, \text{ se } IAF \geq 1 \tag{71}$$

em que

E_1 = evaporação da água do solo durante o primeiro estágio de secamento, mm dia⁻¹;

ET_{MAX} = evapotranspiração máxima, mm dia⁻¹; e

IAF = índice de área foliar, adimensional.

A ET_{MAX} é calculada com base no conceito de evaporação de equilíbrio, equação 70, desenvolvido por Slatyer e Mcilroy (1961) e utilizado por Priestley e Taylor (1972).

$$EEQ = R_s (0,00488 - 0,00437 T_d)(t_d - 29) \tag{72}$$

sendo

$$T_d = 0,6 T_{MAX} + 0,4 T_{MIN} \tag{73}$$

$$R_s = \frac{2}{c} e^{-0,75 IAF} \tag{74}$$

A ET_{MAX} , calculada por meio da Equação 75, é função do valor de EEQ e de uma correção α_1 , dependente do valor da temperatura.

$$ET_{MAX} = \alpha_1 EEQ \tag{75}$$

$$T = T_{MAX} - 1,1 \text{ se } T_{MAX} > 35 \text{ C} \quad (76)$$

$$T = T_{MAX} - 1,1 - 0,05 (T_{MAX} - 35) \text{ se } T_{MAX} > 35 \text{ C} \quad (77)$$

$$T = T_{MAX} - 0,01 e^{0,18 (T_{MAX} - 20)} \text{ se } T_{MAX} > 5 \text{ C} \quad (78)$$

A equação 76 visa compensar o efeito do ar não saturado; a equação 77, o efeito da advecção; e a Equação 78, a influência das baixas temperaturas nos estômatos.

Durante o segundo estágio de secamento do solo, considera-se que a evaporação direta (E_2) abaixo da cobertura vegetal seja igual àquela que ocorre em solo descoberto, uma vez que nesse estágio de secamento E é mais dependente das propriedades físico-hídricas do solo do que da demanda atmosférica (RITCHIE; JOHNSON, 1990). Nesse caso, E depende do tempo transcorrido desde a troca de fase, que por sua vez é função do parâmetro U (RODRIGUES et al., 1997). Nesse estágio, a evaporação direta (E_2) é calculada pela equação 79 ou 80.

$$E_2 = \alpha t^{0,5} \quad (79)$$

$$E_2 = \alpha t^{0,5} - \alpha (t - 1)^{0,5} \quad (80)$$

em que

E_2 = evaporação da água do solo durante o segundo estágio de secamento, mm dia⁻¹;

α = constante que caracteriza o segundo estágio de secamento do solo, mm dia^{-0,5};

t = tempo transcorrido desde o início do segundo estágio de secamento, dia.

Uma vez que a água não foi fator limitante ao processo da transpiração, ela foi calculada em função da ET_{MAX} e do estágio de desenvolvimento da cultura expresso pelo IAF, utilizando-se para isto as equações

$$T = ET_{MAX} \left(1 - e^{-IAF} \right), \text{ se } IAF < 3 \quad (81)$$

$$T = ET_{MAX}, \text{ se } IAF > 3 \quad (82)$$

$$\text{Se } E \leq T \text{ então } ET_{MAX} = E \quad (83)$$

$$ET_c = E \text{ se } E > T \quad (84)$$

Uma vez calculada a evapotranspiração da cultura, o próximo passo consiste em estabelecer como se processa a extração de água pelas raízes dentro do perfil do solo. Para resolver esta questão é utilizado o procedimento proposto por [Prajamwong et al. \(1997\)](#). Segundo estes autores, a evapotranspiração deve ser distribuída de forma diferente dentro do perfil do solo, sendo a maneira como ela se distribui função da densidade radicular da cultura e da umidade em cada camada de solo.

Para estimar como o sistema radicular da planta retira água do solo, a região que contém o sistema radicular da cultura é dividida em quatro partes com espessuras iguais. O padrão de extração de água é, então, feito da seguinte maneira: 40% da ET_c é retirada da primeira camada, 30% da segunda, 20% da terceira e 10% da última camada (Figura 10). Analisando-se este padrão de extração de água, nota-se que uma maior quantidade de água é extraída nas regiões mais próximas à superfície, sendo cerca de 70% extraída na primeira metade da profundidade do sistema radicular.

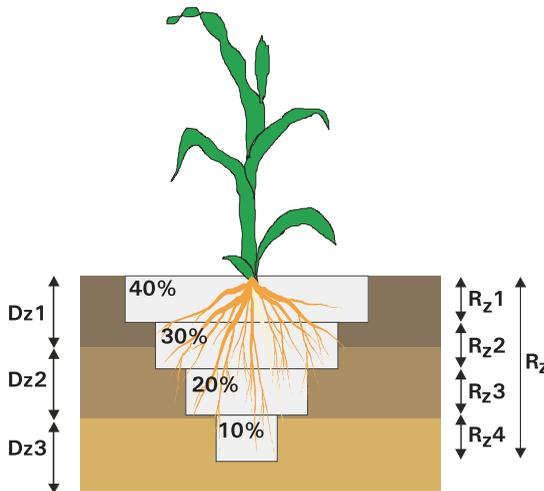


Figura 10. Esquema representativo do padrão de extração de água pelas raízes da cultura.

Considera-se que o padrão de distribuição da densidade radicular dentro do solo segue o mesmo padrão de distribuição da extração de água anteriormente estabelecido, ou seja, 40%, 30%, 20% e 10%. A densidade radicular relativa em cada camada de solo é função da profundidade atual do sistema radicular, podendo ser calculada pela equação

$$PD_i = \frac{PD_{mx,m} R_{z,i,m}}{100 R_{z,m}} \quad (85)$$

sendo que

$$PD_i = \frac{PD_i^3}{i} \quad (86)$$

em que

PD_i = fator de densidade radicular;

$PD_{mx,m}$ = percentagem máxima de densidade radicular em cada zona do sistema radicular, %;

$R_{z,i,m}$ = profundidade do sistema radicular na zona m , o qual se localiza na camada de solo i , m ;

$R_{z,m}$ = espessura das zonas que compõe o sistema radicular (1/4 da profundidade do sistema radicular), m ;

m = índice relativo à camada do sistema radicular; e

i = índice relativo à camada de solo.

A taxa de extração de água do solo pela evapotranspiração é influenciada também pela umidade atual. Assim, independente da distribuição das raízes no perfil do solo, as plantas retiram água mais facilmente em regiões com maior umidade. A fim de contabilizar a influência da umidade do solo no processo de extração de água, [Prajamwong et al. \(1997\)](#) sugeriram utilizar um fator de disponibilidade de água no perfil do solo como uma forma de ponderar a variabilidade de umidade, podendo este fator ser escrito da seguinte forma

$$MAF_i = \frac{(i - PMP)}{i - PMP_i} \quad (87)$$

sendo que

$$\sum_{i=1}^3 MAF_i = 1 \quad (88)$$

em que

MAF_i = fator de disponibilidade de água no solo; e

r_i = camada de solo mais profunda na qual o sistema radicular se encontra.

Combinando-se o fator de disponibilidade de água no solo com o fator de densidade radicular, obtém-se um novo fator de ponderação, equação 89, que pode ser utilizado para representar a forma como se procede a extração de água, em termos potenciais, dentro do perfil do solo.

$$RETF_i = MAF_i (1 - \beta) PD_i \quad (89)$$

sendo que

$$\sum_{i=1}^3 RETF_i = 1 \quad (90)$$

em que

$RETF_i$ = fator de distribuição da evapotranspiração referente à camada de solo i ; e

β = fator de ponderação função da disponibilidade de água no solo e da densidade radicular ($0 < \beta < 1$).

Pode-se, então, escrever a equação 82 da seguinte maneira

$$ET_{ci} = RETF_i (E - T) \quad (91)$$

em que

ET_{ci} = extração de umidade do solo na camada de solo i .

A quantidade de água que pode ser retirada de cada camada do solo é limitada ao valor do ponto de murcha permanente, ou seja, o valor da umidade do solo não poderá em nenhuma hipótese ser inferior ao valor do ponto de murcha permanente.

Precipitação natural efetiva

Sempre que possível os sistemas de irrigação devem ser dimensionados e manejados considerando-se que parte da demanda hídrica da cultura será suprida via precipitação natural, ou seja, o planejamento e a operação dos sistemas de irrigação devem ser conduzidos considerando-se que a irrigação será suplementar. Infelizmente, nem toda chuva pode ser efetivamente utilizada pela cultura, a parcela da precipitação que infiltra no solo e permanece disponível para ela é denominada precipitação efetiva ([RODRIGUES et al., 2003](#)).

Nos últimos anos, várias metodologias foram desenvolvidas com a finalidade específica de estimar a precipitação efetiva em áreas agrícolas, dentre elas destaca-se, por ser a mais utilizada, a desenvolvida pelo Serviço de Conservação de solos dos Estados Unidos (USADA-SCS). Este método foi desenvolvido com base no balanço de água do solo realizado em 22 estações meteorológicas dos Estados Unidos. Foram utilizados para isso 50 anos de dados. Este método leva em consideração a percolação profunda e o déficit de água no solo, entretanto, no cômputo da precipitação efetiva, não se considera, pelo menos de forma explícita, a localização geográfica e o tipo de solo da área de interesse. A precipitação efetiva é um parâmetro difícil de ser quantificado, principalmente, em virtude da grande variabilidade espacial e temporal da infiltração e da precipitação (RODRIGUES et al., 2003).

Verificou-se, assim, a necessidade de desenvolver uma metodologia para estimativa da precipitação efetiva que considere a variabilidade espacial das características do solo dentro da área irrigada. A metodologia utilizada pelo modelo para esta finalidade foi desenvolvida por Rodrigues et al. (2003) e será apresentada na seqüência.

As seguintes suposições foram feitas no desenvolvimento da metodologia:

- a) A precipitação medida em um determinado local da área de interesse é representativa de toda área.
- b) Não se considera a variação espacial da precipitação dentro da área de interesse.
- c) A chuva somente atinge a superfície do solo após a interceptação pela cobertura vegetal ter sido completada.

- d) O solo, dentro da camada que está sendo analisada, é homogêneo e, a sua umidade, dentro desta camada, é constante.
- e) As propriedades hidrológicas do solo principalmente a condutividade hidráulica do solo saturado e o potencial matricial médio da frente de umedecimento são constantes durante todo o período considerado.
- f) A capacidade de armazenamento superficial do solo é invariável com o tempo.

Com o início da precipitação, começa, simultaneamente, a interceptação da chuva pela cobertura vegetal. A lâmina interceptada e retida pela cultura não atingirá o solo, sendo, posteriormente, perdida por evaporação. Considera-se que toda a precipitação é interceptada pela cobertura vegetal até o momento em que o total precipitado se iguala à lâmina de interceptação potencial, neste momento tem-se o tempo final da interceptação da chuva pela cobertura vegetal o qual é calculado pela equação

$$\int_0^{t_{(ICV)}} i_i dt = ICV \quad (92)$$

em que

$t_{(ICV)}$ = tempo final da interceptação da chuva pela cobertura vegetal, h;

i_i = intensidade de precipitação natural, mm h⁻¹; e

ICV = interceptação da chuva pela cobertura vegetal, mm.

A intensidade de precipitação é obtida com base em pluviogramas e, para sua correta determinação, recomenda-se a instalação de um pluviógrafo na área de interesse. Dentro de um determinado intervalo de tempo, especificado a priori, a intensidade de precipitação é considerada constante.

Após o $t_{(ICV)}$, inicia-se o processo de infiltração de água no solo. Embora na natureza a infiltração seja um processo único e contínuo, para fins de uso da equação de Green e Ampt (GA), ela deve ser dividida em duas fases. A primeira fase (fase I), denominada neste trabalho de fase de não empoçamento, acontece quando a capacidade de infiltração de água no solo é maior que a i_i . A segunda fase (fase II), denominada de fase de empoçamento, ocorre quando $VI \geq i_i$. A clara distinção entre estas duas fases é de fundamental importância para uso da

equação de GA, uma vez que a lâmina infiltrada no solo durante um determinado intervalo de tempo é calculada de forma diferente em cada uma delas.

Se durante o evento chuvoso ocorrer a fase II, tem-se o cálculo do armazenamento superficial. O escoamento superficial começará quando a capacidade de armazenamento superficial for preenchida e terminará ou com o término da precipitação ou quando $i_i \in VI$. Antes que ocorra a percolação profunda, a lâmina infiltrada deve elevar a umidade do solo até a capacidade de campo. Assim, faz-se necessário conhecer o valor do déficit de água no solo em relação à capacidade de campo, a qual é calculada fazendo-se o balanço hídrico diário da água no solo.

A precipitação efetiva é calculada pela equação

$$R = \int_0^t i_i dt - \int_0^{t_{(cv)}} i_i dt - \int_{t_i}^{t_f} i_i dt \quad VI \quad DP \quad (93)$$

em que

t = tempo de duração da precipitação natural, min;

t_i = tempo a partir do qual o armazenamento superficial foi totalmente preenchido, min;

t_f = tempo a partir do qual $i_i \in VI$, ou ocorreu o término da precipitação.

Uma dificuldade que surge na solução do problema, quando se utilizam pluviogramas para representar o perfil da intensidade de precipitação, é quando o tempo final de interceptação pela cobertura vegetal, o tempo inicial e final do empoçamento ou o tempo final de preenchimento do armazenamento superficial ocorre na transição de um valor de intensidade de precipitação para outro, uma vez que esta transição é descontínua.

[Silva e Rodrigues \(2003\)](#) propuseram uma solução para este problema. Eles sugerem utilizar a função Weibull, de modo a tornar contínuas as referidas transições, permitindo, assim, a determinação exata dos pontos de interesse. Ressalta-se que a função é aplicada apenas quando o ponto de interesse ocorrer na transição de valores de intensidade.

O método proposto por [Silva e Rodrigues \(2003\)](#) consiste em normalizar a função Weibull, o que é feito da seguinte forma

$$i_N = \frac{i_{io} - i_{imin}}{i_{imax} - i_{imin}} \quad (94)$$

$$t = \frac{T - T_{min}}{T_{max} - T_{min}} \quad (95)$$

em que

i_N = intensidade de precipitação natural normalizada;

i_{io} = intensidade de precipitação natural observada, mm h⁻¹;

i_{imin} = menor valor de intensidade de precipitação natural observada, mm h⁻¹;

i_{imax} = maior valor de intensidade de precipitação natural observada, mm h⁻¹;

T = tempo observado de duração da precipitação natural, min;

T_{min} = menor tempo observado de duração da precipitação natural, min; e

T_{max} = maior tempo observado de duração da precipitação natural, min.

A função Weibull já normalizada pode então ser representada pela equação 96, para o caso em que se deseja representar a transição de um valor menor de intensidade para um maior, e pela equação 97, em caso contrário.

$$i_N = 1 - e^{-w t} \quad (96)$$

$$i_N = e^{-w t} \quad (97)$$

em que

α_w = parâmetro de escala; e

λ = parâmetro de forma.

Esta transformação faz com que tanto os valores de i_N como de t fiquem compreendidos entre 0 e 1. Aplicando-se tal transformação aos valores observados, tem-se que t será sempre 0, 0,5 ou 1,0 e i_N sempre 0 ou 1.

Especificamente para o valor de tempo $t=0,5$ existem dois valores distintos de i_N , tornando este ponto não diferenciável. Tomando-se como exemplo o caso

em que o valor da variável passa de um nível inferior para um superior, tem-se no tempo $t=0,5$ que o limite de i_N pela esquerda é zero, enquanto que o limite de i_N pela direita é 1. Para resolver este problema, propõe-se que o valor de i_N no tempo $t=0,5$ seja igual a 0,5, ou seja, metade da magnitude de i_N no intervalo. Deste modo, tanto a equação 96 como a equação 97 podem ser utilizadas para estabelecer os limites dos parâmetros α_w e λ para ajuste dos modelos propostos, podendo-se para isto utilizar qualquer metodologia de otimização não linear.

Precipitação artificial efetiva

É comum, no dimensionamento de um sistema de irrigação do tipo pivô central, o projetista não considerar a redução da velocidade de infiltração provocada pelo surgimento do selamento superficial. A consequência disso é que, após algum tempo, a capacidade de infiltração da água no solo torna-se menor que a intensidade de precipitação e poderá haver a ocorrência do escoamento superficial. Neste caso, apenas uma parcela da lâmina de irrigação aplicada em uma determinada área de interesse se infiltrará e ficará efetivamente disponível para a cultura, a outra parcela escoará e será depositada nas partes mais baixas do terreno. A parcela da lâmina de irrigação que fica efetivamente disponível para a cultura será denominada, daqui por diante, de precipitação artificial efetiva e é calculada pela equação

$$I \int_{t_{(ICV)}}^{t_{s1}} i_p dt + \int_{t_{s1}}^{t_{s2}} i_p dt + \int_{t_{s2}}^t VI dt + \int_{t_{s2}}^t i_p dt + \int_0^{t_{(ICV)}} i_p dt = DP \quad (98)$$

em que

i_p = intensidade de precipitação artificial, mm h⁻¹;

t_{s1} = tempo em que i_p / CI , min; e

t_{s2} = tempo em que $i_p \in VI$, min.

Lâmina interceptada pela cobertura vegetal

A lâmina interceptada pela cobertura vegetal (ICV) representa a fração da precipitação retida pela cobertura vegetal e que, portanto, não atingirá a superfície do solo. Neste sistema, ela é calculada pela equação 99 proposta por [Ehlers \(1989\)](#)

$$ICV = 0,932 - 0,499 IAF - 0,0057 IAF^2 \quad (99)$$

Escoamento superficial proveniente da célula de interesse para as células vizinhas

Uma vez que foi verificada a ocorrência de escoamento superficial na célula de interesse, ou célula central, este se deslocará em direção às partes mais baixas do terreno, isto faz com que as células localizadas em pontos mais elevados recebam quantidade de água inferior à calculada e àquelas localizadas em partes mais baixas do terreno recebam uma quantidade de água superior à desejada.

Quando se trabalha em pequena escala, como por exemplo, uma área equivalente à área de um pivô central, o conhecimento de como o escoamento superficial se distribui dentro da área de interesse é de grande importância. Diversas metodologias já foram desenvolvidas visando espacializar o escoamento superficial dentro de uma bacia hidrográfica. [Yuan e Vanderpool \(1986\)](#) desenvolveram um programa para gerar a malha de drenagem de uma bacia, neste programa eles assumiram que o escoamento superficial geralmente escoar na direção da maior declividade. Este procedimento, o qual foi também utilizado por [Wang e Hjelmfelt \(1998\)](#), é o mais utilizado, e parece ser adequado quando se trabalha na escala da bacia hidrográfica. Para o caso de pivô central, foi desenvolvida uma metodologia, a qual é apresentada na seqüência.

O procedimento consiste em distribuir o escoamento superficial gerado pela célula de interesse entre as células vizinhas (Figura 11).

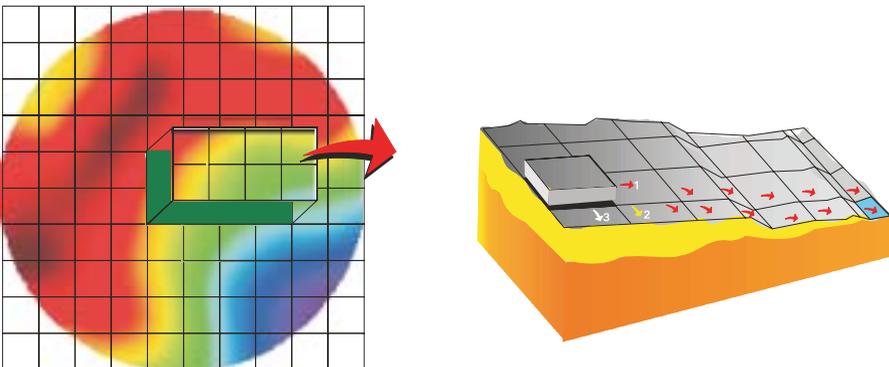


Figura 11. Esquema representativo da distribuição do escoamento superficial produzido pela célula central para as suas células vizinhas.

Assim se a célula de interesse, quando comparada com suas vizinhas, for a célula mais alta, o escoamento superficial por ela gerado será distribuído entre as suas oito células vizinhas. A fração máxima da lâmina de escoamento superficial gerada pela célula central que pode ir para cada uma das células vizinhas é calculada pela equação

$$Q_{c_i} = \frac{DE_{c,i}}{n} Q_c \quad (100)$$

em que

Q_{c_i} = fração máxima da lâmina de escoamento superficial produzido pela célula central que pode se deslocar para a célula vizinha i , $L s^{-1}$;

$DE_{c,i}$ = diferença de nível entre a célula central, onde o escoamento superficial ocorre, e a célula i que está sendo analisada, m ; e

n = número de células vizinhas que estão abaixo da célula central ($1 \leq n \leq 8$).

Quando a célula central for a célula mais baixa, quando comparada com a suas vizinhas, não haverá ocorrência de escoamento superficial, ou seja, todo o escoamento por ela produzido fica nela mesmo armazenado.

É importante salientar que a equação 100 é apenas um indicativo da quantidade máxima do escoamento superficial que pode ir da célula central para a célula vizinha. No entanto, apenas parte desta lâmina realmente atingirá a célula vizinha, uma vez que parte dela vai se infiltrar no trajeto entre a célula central e a célula vizinha. Da lâmina de água que escoo da célula central para uma de suas vizinha parte infiltra no solo e a outra parte escoo para as células vizinhas, destas, a menos, é claro, que ela seja a célula mais baixa. A estimativa de quanto da lâmina de escoamento se infiltra na célula vizinha e de quanto escoo desta para a próxima célula é feita com base no tempo que o escoamento gasta para percorrer uma determinada distância e no tempo gasto para infiltrar a lâmina de escoamento.

Considerando-se que o escoamento sobre a superfície do solo é essencialmente turbulento e que as grandezas são medidas em termos de unidade de largura, o tempo gasto para a lâmina de escoamento se deslocar do centro da célula central para o centro de uma de suas vizinhas, $t_{esc(c'ij)}$, é calculado pela equação

$$t_{esc\ c\ i} = \frac{D_{c\ i} n}{\frac{DE_{c,i}}{D_{c\ i}} \frac{1}{2} Q_{c\ i} \frac{2}{3}} \quad (101)$$

em que

$D_{c \rightarrow i}$ = distância medida do centro da célula central ao centro de uma de suas células vizinhas i , m ; e

n = coeficiente de rugosidade de Manning.

O tempo necessário para infiltrar toda a lâmina de escoamento superficial proveniente da célula central é calculado pela equação

$$t_{InfEsc} = \frac{Q_{c\ i}}{k_{s,m}} \quad (102)$$

em que

$k_{s,m}$ = medida da condutividade hidráulica do solo saturado, $mm\ h^{-1}$;

O uso da equação 102 implica em uma superestimativa do t_{InfEsc} , uma vez que parte do pressuposto que o solo já encontra-se com condutividade próxima à saturação. A redução deste tempo implica em uma conseqüente subestimativa da lâmina total infiltrada.

Se $t_{esc\ c\ i} = t_{InfEsc}$ toda a lâmina de escoamento infiltra-se no trajeto entre a célula central e a célula vizinha em estudo.

Em caso contrário a lâmina infiltrada é calculada da seguinte maneira

$$Q_{EscInf(i)} = t_{esc\ c\ i} k_{s,m} \quad (103)$$

A fração do Es, produzido pela célula central, que realmente chega à célula vizinha é, então, calculada pela equação

$$QR_{c\ i} = Q_{c\ i} - Q_{EscInf(i)} \quad (104)$$

O resultado obtido da equação 104 é somado com o Es produzido pela própria célula vizinha, que passa a ser a célula central, e a redistribuição do Es continua.

No caso de precipitação natural, a distribuição do escoamento superficial é realizada após a ocorrência do evento chuvoso. Já no caso de irrigação, temos duas situações a considerar:

- a) A célula vizinha que receberá o Q encontra-se em sentido contrário ao do deslocamento do pivô. Neste caso, a distribuição de Q é feita em uma só etapa, a qual se procede imediatamente após a passagem completa do diâmetro de cobertura do emissor mais próximo à célula central sobre ela, em seguida, caso seja necessário, é feita a distribuição da parcela do escoamento que não infiltrou na célula vizinha para as outras células.
- b) A célula vizinha que receberá o Q encontra-se no sentido de deslocamento do pivô. Neste caso, a distribuição do Q é feita por etapas. Após a passagem completa, sobre a célula, do diâmetro de cobertura resultante de todos os emissores que irrigam a célula central, a distribuição de Q se processa. A continuação do processo de distribuição do Es, ou seja, a distribuição da parcela de Q que não infiltrou na célula central para as outras só se realiza quando o diâmetro de cobertura resultante passar completamente sobre esta.

Percolação profunda

A quantidade de água que drena abaixo da zona do sistema radicular da cultura é conhecida como sendo a água perdida por percolação profunda. Antes que ocorra a percolação profunda, a lâmina infiltrada deve elevar a umidade do solo da camada que contém a parte final do sistema radicular da cultura até a capacidade de campo. A percolação profunda é calculada pela equação

$$P_p = \max (0, I \text{ ou } R - DEF) \quad (105)$$

em que

P_p = percolação profunda, mm; e

DEF = déficit de água no solo em relação à capacidade de campo.

Profundidade do sistema radicular da cultura

A profundidade do sistema radicular da cultura em um dado período é calculada pela seguinte equação

$$R_z^j - R_z^k = \int_{j_k}^j \frac{R_z^k - R_z^{k-1}}{j_z - j_k} \quad (106)$$

em que

R_z = profundidade do sistema radicular, m;

R_z^k = profundidade do sistema radicular no início do próximo estágio de desenvolvimento da cultura, m;

R_z^{k-1} = profundidade do sistema radicular no início do atual estágio de desenvolvimento da cultura, m;

j = contador do estágio fenológico da cultura, dias; e

k = estágio de desenvolvimento da cultura.

Rendimento da cultura

O rendimento relativo da cultura é calculado em função do seu rendimento potencial pela equação 154. Durante o transcorrer das simulações, reduções no rendimento da cultura provocadas ou por falta ou por excesso de água são contabilizados. No início da simulação, o rendimento relativo é colocado como sendo 100%.

$$Y_{r,estadio} = 1 - K_{y,estadio} \cdot 1 - \frac{ET_{c,estadio}}{ET_{m,estadio}} \quad (107)$$

em que

$Y_{r,estadio}$ = redução no rendimento relativo da cultura para cada estágio de crescimento, decimal;

$K_{y,estadio}$ = fator de resposta relativo ao s^{th} estágio de crescimento, mm;

$ET_{c,estadio}$ = evapotranspiração da cultura acumulada até o i^{th} estágio de crescimento, mm; e

$ET_{m,estadio}$ = evapotranspiração máxima acumulada até ao i^{th} estágio de crescimento, mm.

Segundo Allen citado por Prajamwong (1997), a redução relativa no rendimento da cultura ocorrida durante o seu ciclo, $Y_{r,ciclo(1)}$, pode ser feita da seguinte forma

$$Y_{r,ciclo(1)} = \text{Max}(Y_{r,1}, Y_{r,2}, \dots, Y_{r,k}) \quad (108)$$

em que

k = número de estádios de crescimentos.

A publicação da FAO número 33 também fornece valores do fator de resposta relativo a todo o ciclo da cultura, sendo o $Y_{r,ciclo(2)}$, neste caso, calculado pela equação

$$Y_{r,ciclo(2)} = 1 - K_{y,ciclo} \left(1 - \frac{ET_{c,ciclo}}{ET_{m,ciclo}} \right) \quad (109)$$

em que

$K_{y,ciclo}$ = fator de resposta relativo ao ciclo da cultura;

$ET_{c,ciclo}$ = evapotranspiração da cultura acumulada durante o ciclo da cultura, mm;

$ET_{m,ciclo}$ = evapotranspiração máxima acumulada durante o ciclo da cultura, mm; e

O rendimento relativo utilizado pelo modelo é obtido da seguinte relação

$$Y_{r,ciclo} = \text{Min } Y_{r,ciclo(1)}, Y_{r,ciclo(2)} \quad (110)$$

O excesso de irrigação ou precipitação causa problemas de aeração na zona do sistema radicular e pode afetar o rendimento. A redução no rendimento por causa do excesso de irrigação é calculada pela equação

$$Y_I = 1 - \frac{P_{pciclo}}{AD} \quad (111)$$

em que

Y_I = redução no rendimento da cultura por causa do excesso de irrigação, decimal;

e = coeficiente empírico, adimensional ($e = 0,05$ é utilizado como valor default); e

P_{pciclo} = percolação profunda total ocorrida durante o ciclo da cultura, mm.

Conclusão

Neste boletim de pesquisa foram apresentados os fundamentos teóricos básicos para confecção de um sistema de suporte à decisão para o dimensionamento e manejo de irrigação de precisão. Os modelos apresentados podem ser utilizados para auxiliar na tomada de decisão com relação ao dimensionamento e manejo do pivô. No dimensionamento, além da possibilidade de cálculos tradicionais como, por exemplo, o posicionamento de emissores ao longo da linha lateral, pode-se estimar a intensidade de precipitação máxima que pode ser aplicada ao solo sem provocar escoamento superficial. No manejo, apresentou-se um novo modelo para espacialização do escoamento superficial dentro da área irrigada, isto permitirá uma maior precisão no cálculo da umidade do solo no momento da irrigação.

Agradecimentos

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico pela concessão da bolsa de pesquisa (Profix) ao primeiro autor e pelo financiamento do projeto de pesquisa.

Referências

- ALBERTS, E. E.; NEARING, M. A.; WELTZ, M. A.; RISSE, L. M.; PIERSON, F. B.; ZHANG, X. C.; LAFLEN, J. M.; SIMANTON, J. R. Soil component. In: FLANANGAN, D. C.; NEARING, M. A. (Ed.). **Water erosion prediction project (WEPP)**. West Lafayette: USDA-ARS, 1995. (USDA-ARS. NSERL Report, 10).
- ALLEN, R. G. Applicator section along center pivots using soil infiltration parameters. In: NATIONAL IRRIGATION SYMPOSIUM, 3., 1990, Phoenix. **Proceedings...** Phoenix: ASAE, 1990. p. 549-555.
- ALLEN, R. G.; KELLER, J.; MARTIN, D. **Center pivot system design**. 2. ed. Fairfax: The Irrigation Association, 1999. 294 p.
- BECCARD, R. W.; HEERMANN, D. F. Performance of pumping plant-center-pivot sprinkler irrigation systems. St. Joseph: ASAE, 1981. (ASAE Paper, 81-2548).
- BEN-HUR, M.; SHAINBERG, I.; MORIN, J. Variability of infiltration in a field

with surface-sealed soil. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 51, n. 5, p. 1299-1302, 1987.

BERNUTH, R. D. von. **A physically based analysis of potential runoff under center pivot irrigation incorporating infiltration reduction**. 1982. 138 p. Tese (Doutorado) - University of Nebraska, Lincoln, 1982.

BERNUTH, R. D. von; GILLEY, J. R. Evaluation of center pivot application packages considering droplet induced infiltration reduction. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 28, n. 6, p. 1940-1946, 1985.

BITTINGER, M. W.; LONGENBAUGH, R. A. Theoretical distribution of water from a moving irrigation sprinkler. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 5, n. 1, p. 26-30, 1962.

BOWER, H. Rapid field measurement of air entry value and hydraulic conductivity of soil as significant parameters in flow system analysis. **Water Resources Research**, Washington, v. 2, n. 4, p. 729-738, 1966.

BRASIL. Ministério das Minas e Energia. **Balanco energético nacional**. Brasília, DF, 1996. 150 p.

CAMP, C. R.; SADLER, E. J. Site-specific crop management with a center pivot. **Journal of Soil and Water Conservation**, Ankeny, v. 53, n. 4, p. 312-314, 1998.

CHANG, Jen-Hu. **Climate and agriculture**. Chicago: Aldine, 1968. 304 p.

COMMITTEE ON THE FUTURE OF IRRIGATION IN THE FACE OF COMPETING DEMANDS. **A new era for irrigation**. Washington: National Academy, 1996. 203 p.

COMPANHIA ENERGÉTICA DE MINAS GERAIS. **Estudo de otimização energética: setor irrigação - pivô central**. Belo Horizonte, 1993. 22 p. Relatório desenvolvido pela CEMIG em parceria com a UFV.

COSTA, R. C. A conservação de energia elétrica e a preservação de recursos hídricos. **A Água em Revista**, v. 5, n. 9, p. 4-9, 1997.

COWAN, J. Checking trunk designs for cost-effectiveness. **Water and Water Engineering**, v. 75, n. 908, p. 385-386, 1971.

DEB, A. K. Least cost design of water main system in series. **Journal of the Enviromental Engineering Division**, v. 100, n. EE4, p. 821-835, 1974.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. **Efectos del agua sobre el rendimiento de los cultivos**. Roma: FAO, 1979. 212 p. (Estúdios FAO: Riego y drenaje, 33).

EHLERS, W. Transpiration efficiency of oat. **Agronomy Journal**, Madison, v. 81, p. 810-817, 1989.

ELLISON, W. D. Studies of raindrop erosion. **Agricultural Engineering**, St. Joseph, v. 25, n. 4, p. 131-136, 1944.

EVANS, R. G. If you build it, will it work?: testing precision center-pivot irrigation. **GPS World Magazine**, Eugene, p. 10-17, 1997.

FAO. **The state of food insecurity in the world**. Rome, 2002. 30 p.

FERREIRA, E. **Dimensionamento de mínimo custo anual de sistema de irrigação por pivô central**. 1993. 123 p. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 1993.

HACHUM, A. Y.; ALFARO, J. F. Rain infiltration into layered soils: prediction. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v. 106, n. 4, p. 311-319, 1980.

HANKS, R. J. Model for predicting plant yield as influenced by water use. **Agronomy Journal**, Madson, v. 66, p. 660-665, 1974.

HEERMANN, D. F.; HEIN, P. R. Performance characteristics of self-propelled center-pivot sprinkler irrigation system. **Transactions of the ASAE**, v. 11, n. 1, p. 11-15, 1968.

HOWELL, T. A. Irrigation's role in enhancing water use efficiency. In: NATIONAL IRRIGATION SYMPOSIUM, 2000, Phoenix. **Proceedings...** Phoenix: American Society of Agricultural Engineers, 2000. p. 66-80.

JONES, J. W.; RITCHIE, J. T. Crop growth models. In: HOFFMAN, G. J.; HOWEL, T. A.; SOLOMON, K. H. (Ed.). **Management of farm irrigation systems**. St. Joseph: ASAE, 1990. p. 63-89.

KANEMASU, E. T.; STONE, L. R.; POWERS, W. L. Evapotranspiration model tested for soybean and sorghun. **Agronomy Journal**, Madison, v. 68, p. 569-572, 1976.

KINCAID, D. C.; HEERMANN, D. F.; KRUSE, E. G. Application rates and runoff in center-pivot sprinkler irrigation. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v.12,

n.6, p.790-794, 1969.

KLOHN, W. E.; APPELGREN, B. G. **Challenges in the field of water resources management in agriculture**. Disponível em: <www.fao.org/waicent/faoinfo/agricult>. Acesso em: 21 jul. 2005.

MOHAMOUD, Y.; McCARTY, T. R.; EDWING, L. K. Optimum center-pivot irrigation system design with tillage effects. **Journal of the Irrigation and Drainage Division**, New York, v. 118, n. 2, p. 291-305, 1992.

MORGAN, R. P. C.; QUINTON, J. N.; SMITH, R. E.; GOVERS, G.; POESEN, J. W. A.; AUERSWALD, K.; CHISCI, G.; TORRI, D.; STYCZEN, M. E.; FOLLY, A. J. V. **The european soil erosion model (EUROSEM)**: documentation and user guide: version 3.6. Silsoe: [s.n.], 1998. 89 p.

ONSTAD, C. A.; OLSON, T. C.; STONE, L. R. An infiltration model tested with monolith moisture measurements. **Soil Science**, Baltimore, v. 116, n. 1, p. 13-17, 1973.

ONSTAD, C. A. Depressional storage on tilled soil surfaces. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 27, n. 3, p. 729-732, 1984.

PHILIP, J. R. Evaporation and moisture and heat fields in the soil. **Journal of Meteorology**, v. 14, p. 354-366, 1957.

POSTEL, S. **Water for agriculture: facing the limits**. Washington: Worldwatch Institute, 1989. (Worldwatch Paper, 93).

POSTEL, S. Redesigning irrigated agriculture. In: NATIONAL IRRIGATION SYMPOSIUM, 4., 2000, Phonix. **Proceedings...** St.Joseph: ASAE, 2000. p. 1-12.

POTTER, K. N. Soil properties effect on random roughness decay by rainfall. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 33, n. 6, p. 1889-1892, 1990.

PRAJAMWONG, S.; MERKLEY, G. P.; ALLEN, R. G. Decision support model for irrigation water management. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v. 123, n. 2, p. 106-113, 1997.

PRIESTLEY, C. H. B.; TAYLOR, R. J. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. **Monthly Weather Review**, v. 100, p. 80-92, 1972.

PRUSKI, F. F.; RODRIGUES, L. N.; SILVA, D. D. Methodology to estimate runoff on agricultural lands. In: SOARES, A. A.; SATURNINO, H. M. (Ed.).

Competitive use and conservation strategies for water and natural resources.

Brasília: ABID, 2001. p. 253-262.

RITCHIE, J. T.; JOHNSON, B. S. Soil and plant factors affecting evaporation.

In: STWART, B. A.; NIELSEN, D. R. (Ed.). **Irrigation of agricultural crops.**

Madison: ASA, 1990. p. 363-390. (Agronomy Monograph, 30).

RITCHIE, J. T. Model for predicting evaporation from a row crop with an

incomplete cover. **Water Resources Research**, Washington, v. 8, p. 1204-1213, 1972.

RODRIGUES, L. N.; PRUSKI, F. F. Otimização do desempenho de sistemas de

irrigação do tipo pivô central com o uso da equação de Green-Ampt. In:

CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 26., 1997, Campina Grande. **Resumos...** Campina Grande: Sociedade Brasileira de Engenharia

Agrícola, 1997. 1 CD-ROM.

RODRIGUES, L. N.; SEDIYAMA, G. C.; SOCCOL, O. J.; MANTOVANI, E. C.

Modelo de Ritchie para determinações da transpiração do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) e da evaporação direta da água do solo. **Revista Brasileira de**

Agrometeorologia, Santa Maria, v. 6, n. 2, p. 179-185, 1998.

RODRIGUES, L. N.; SEDIYAMA, G. C.; SOCCOL, O. J.; MANTOVANI, E. C.

The Ritchie model for determining dry bean crop (*Phaseolus vulgaris* L.)

transpiration and soil water evaporation. In: CONFERENCE ON AGRICULTURAL AND FOREST METEOROLOGY, 23., 1998, Albuquerque, New Mexico.

Weather data requirements for integrated pest management. Boston: American Meteorological Society, 1998. p. 208-211.

RODRIGUES, L. N.; PRUSKI, F. F.; MARTINEZ, M. A.; SILVA, D. D.

Metodologia para estimativa da intensidade de precipitação máxima admissível em pivô central. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 19, n. 2, p. 151-162, 1999.

RODRIGUES, L. N.; PRUSKI, F. F. Metodologia para estimativa da precipitação

efetiva em áreas agrícolas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 32., 2003, Goiânia. **Novas fronteiras: o desafio da engenharia agrícola: [trabalhos apresentados].** Goiânia: SBEA, 2003. 1 CD-ROM.

ROSEGRANT, M. W.; CAI, X.; CLINE, S. A. **World water and food to 2025:**

dealing with scarcity. Washington: International Food Policy Research Institute, 2002. 322 p.

SECKLER, D.; AMARASINGHE, U.; MOLDEN, D.; SILVA, R.; BARKER, R. **World water demand supply, 1990 to 2025: scenarios and issues**. Colombo: IIMI, 1998. 40 p. (IWMI Research Report, 19).

SHIKLOMANOV, I. A. Global water resources. **Nature and Resources**, Paris, v. 26, n. 3, p. 34-43, 1990.

SILVA, E. M.; RODRIGUES, L. N. Interpolador para dados de pluviogramas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 13., 2003, Santa Maria. **Situação atual e perspectivas da agrometeorologia: anais**. Santa Maria: Sociedade Brasileira de Agrometeorologia: Universidade Federal de Santa Maria, 2003. v. 1, p. 435-436.

SLACK, D. C. Modeling infiltration under moving sprinkler irrigation system. **Transactions of the ASAE**, v. 23, n. 1, p. 596-600, 1980.

SLATYER, R. O.; McILROY, I. C. Evaporation and the principle of its measurements. In: SLATYER, R.O.; McILROY, I. C. (Ed.). **Practical microclimatology**. Austrália: CSIRO, 1961. cap. 3.

TANNER, C. R.; JURY, W. A. Estimating evaporation and transpiration from a row crop during incomplete cover. **Agronomy Journal**, Madison, v. 68, p. 239-243, 1976.

WANG, M.; HJELMFELT, A. T. DEM based overland flow routing model. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 3, n. 1, p. 1-8, 1998.

YUAN, L. P.; VANDERPOOL N. L. Drainage network simulation. **Computers and Geosciences**, v. 12, n. 5, p. 653-665, 1986.

ZIRBEL, M. L.; LARSON, C. L.; SLACK, D. C. **Laboratory method for evaluation Green-Ampt infiltration parameters**. St. Joseph: ASAE, 1982. 12 p. (ASAE Paper, 82-2033).