

FRANCISCO SOLON DANTAS NETO

**SISTEMA COMPUTACIONAL APLICADO AO
GERENCIAMENTO DA DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA EM
PERÍMETROS IRRIGADOS**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2003

**Ficha catalográfica preparada pela Seção de Catalogação e
Classificação da Biblioteca Central da UFV**

T

D192s
2003

Dantas Neto, Francisco Solon, 1969-

Sistema computacional aplicado ao gerenciamento da
distribuição de água em perímetros irrigados / Francisco
Solon Dantas Neto. – Viçosa : UFV, 2003
112p. : il.

Orientador: Antonio Alves Soares

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa

1. Água - Distribuição - Simulação por computador.
2. Irrigação. 3. Água na agricultura. 4. Projeto auxiliado
por computador. I. Universidade Federal de Viçosa.
II. Título.

CDD 20.ed. 627.52

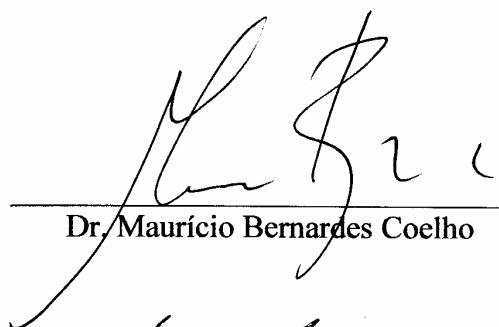
FRANCISCO SOLON DANTAS NETO

**SISTEMA COMPUTACIONAL APLICADO AO
GERENCIAMENTO DA DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA EM
PERÍMETROS IRRIGADOS**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

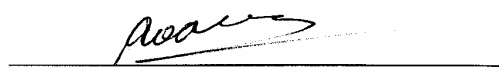
APROVADA: 18 de novembro de 2003.


Prof. Márcio Mota Ramos


Dr. Maurício Bernardes Coelho


Prof. Everardo Chartuni Mantovani
(Conselheiro)


Prof. Brauliro Gonçalves Leal
(Conselheiro)


Prof. Antonio Alves Soares
(Orientador)

*“Sutil, misterioso e profundo
é o verdadeiro sábio,
até fazer-se inexecutável,
atento como que avança sobre o rio gelado,
rústico como um tronco de árvore,
humilde como a neve que se derrete,
vazio como o vale,
simples como a água”.*

Lao-Tzé

À minha esposa, Ione.

*À Andréa Najla e Alexandra Ísis,
minhas queridas filhas.*

*Que possam crescer num mundo
sob a luz da ciência.*

Dedico.

*(...) Se se pudesse, o espírito que chora,
Ver através da máscara da face,
Quanta gente, talvez, que inveja agora
Nos causa, então piedade nos causasse!(...)*

Raimundo Correia

AGRADECIMENTOS

A Deus, pelos momentos felizes e pela força nos momentos difíceis.

À Universidade Federal de Viçosa, pela oportunidade do aprendizado.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo apoio financeiro.

Ao professor Antonio Alves Soares, pela amizade, pela confiança e pela sábia orientação.

Ao professor Everardo Chartuni Mantovani, pela amizade, pela oportuna sugestão do tema deste trabalho e pela sua colaboração.

Ao professor Brauliro Gonçalves Leal, pela amizade, pelos sábios conselhos e pela valiosa contribuição neste trabalho.

Aos professores José Maria Nogueira da Costa e Gilberto Chohaku Sedyama, pela amizade e pelos valiosos ensinamentos.

Aos meus pais Aldecir e Valteriza, de forma especial, por serem os primeiros a me conduzirem a esta realização.

À minha querida Ione, esposa e amiga, pela paciência, pelo carinho, pela compreensão, pelo apoio e pela dedicação na educação de nossas filhas, durante a minha ausência.

Aos professores do Departamento de Engenharia Agrícola, com quem tive oportunidade de convívio harmonioso.

Aos amigos Tarcísio da Silveira Barra e Márcio Rocha Francelino, pela especial amizade e ponto de apoio na minha estada em Viçosa.

Aos colegas do curso de Engenharia Agrícola, pela amizade e pelo companheirismo.

Aos amigos Ismael de Barros Rocha, Carlos Rodrigues Pereira, Salomão de Sousa Medeiros, Luiz de França Camboim Neto, Rolando Tito Bacca, Ricardo dos Santos Silva Amorim, Paulo Marçal dos Santos, Agnaldo, Alisson Luiz Bach Ferreira, Márcio Koetz e Jânio, pelos momentos felizes que me proporcionaram, amenizando a tarefa árdua do convívio distante da família.

A todos que, direta ou indiretamente, colaboraram para a conclusão deste trabalho.

BIOGRAFIA

FRANCISCO SOLON DANTAS NETO, filho de Antonio Aldecir de Oliveira e Valteriza Dantas de Oliveira, nasceu na cidade de Mossoró, RN, em 11 de agosto de 1969.

Em 1995, graduou-se em Agronomia pela Escola Superior de Agricultura de Mossoró (ESAM), onde atuou como monitor da disciplina Processamento de Dados.

Em 1998, concluiu o Programa de Pós-Graduação em Meteorologia Agrícola, em nível de Mestrado, na Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG.

Em 1999, iniciou o Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, em nível de Doutorado, na área de concentração em Irrigação e Drenagem, na Universidade Federal de Viçosa.

CONTEÚDO

	Página
RESUMO	ix
ABSTRACT	xi
1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS.....	4
3. REVISÃO DE LITERATURA	5
3.1. Aspectos Gerais	5
3.2. A Ciência da Irrigação.....	7
3.2.1. Demanda de água para irrigação.....	8
3.2.1.1. Conteúdo de água no solo	10
3.2.1.2. Evapotranspiração	11
3.2.1.3. Precipitação	14
3.2.2. Manejo de água em parcelas irrigadas	16
3.2.3. Perímetro irrigado	18
3.3. Distribuição de Água em Perímetros Irrigados	19
3.3.1. Métodos de distribuição de água.....	21
3.3.1.1. Método contínuo.....	22

	Página
3.3.1.2. Método rotativo	22
3.3.1.3. Método semidemanda	23
3.3.1.4. Método por sistema de turnos	24
3.3.1.5 – Método sob-demanda.....	24
3.4 – Softwares utilizados como ferramentas gerenciais.....	25
4. O MODELO COMPUTACIONAL.....	28
4.1. Estrutura de Banco de Dados.....	30
4.1.1. Caracterização do perímetro	30
4.1.2. Cadastro de dados climáticos.....	33
4.1.3. Cadastro de propriedades.....	34
4.1.4. Cadastro de solos.....	37
4.1.5. Cadastro da fonte d'água	37
4.1.6. Cadastro de culturas	37
4.1.7. Cadastro de equipamento de irrigação	39
4.2. Demanda de Água no Perímetro Irrigado	43
4.2.1. Estimativa da precipitação provável	45
4.2.2. Estimativa da evapotranspiração máxima da cultura.....	45
4.2.3. Estimativa da evapotranspiração da cultura	47
4.2.4 – Simulação do balanço de água no solo.....	49
4.2.5. Cálculo do volume de água alocado pelo perímetro irrigado...	53
4.2.6. Cálculos da vazão fornecida para as propriedades	53
4.2.7. Simulação do consumo de água	54
4.3. Distribuição de água no perímetro irrigado.....	56
4.3.1. Modelagem da rede de distribuição de água no perímetro irrigado	56
4.3.2. Monitoramento da distribuição de água no perímetro irrigado	58
5. SIMULAÇÃO DO GERENCIAMENTO DA DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA NO PERÍMETRO IRRIGADO DE SALINAS, MINAS GERAIS	61
5.1. Local do Estudo	61
5.2. Característica do Solo.....	62
5.3. Culturas Utilizadas.....	62
5.4. Base de Dados Climatológicos	63
5.5. Equipamentos de Irrigação	63

	Página
5.5. Equipamentos de Irrigação	63
5.6. Simulações Realizadas	64
5.7. Resultados e Discussão	64
5.7.1. Quantidade de água para irrigação	64
5.7.2. Distribuição de água no perímetro irrigado	73
6. RESUMO E CONCLUSÕES.....	85
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	88
APÊNDICES	94
APÊNDICE A	95
APÊNDICE B.....	98
APÊNDICE C.....	99
APÊNDICE D	101
APÊNDICE E – PROCEDIMENTOS DE CÁLCULOS PARA ESTI- MATIVA DA PRECIPITAÇÃO PROVÁVEL	102
APÊNDICE F – PROCEDIMENTOS DE CÁLCULOS DOS PARÂ- METROS PARA ESTIMATIVA DE EVAPOTRANS- PIRAÇÃO DE REFERÊNCIA PELO MÉTODO DE PENMAN-MONTEHRI	107

RESUMO

DANTAS NETO, Francisco Solon, D.S., Universidade Federal de Viçosa, novembro de 2003. **Sistema computacional aplicado ao gerenciamento da distribuição de água em perímetros irrigados.** Orientador: Antônio Alves Soares. Conselheiros: Everardo Chartuni Mantovani e Brauliro Gonçalves Leal.

Com o objetivo de dar suporte ao gerenciamento da distribuição de água em perímetros irrigados, desenvolveu-se um modelo computacional composto de três módulos principais: base de dados, consumo de água e distribuição de água. Na base de dados são armazenados os dados da estrutura física do perímetro, do clima, do solo, da cultura, da água e do equipamento de irrigação, necessários para as simulações do sistema computacional. No módulo consumo de água são feitos os cálculos das necessidades de irrigação das propriedades do perímetro irrigado, tomando como base o balanço diário de água nas camadas do solo. O sistema permite que se faça operação de manejo diário e simulações de consumo de água para períodos variáveis, e o acompanhamento da variação temporal dos componentes do balanço de água no solo. O módulo distribuição de água utiliza um modelo de representação da rede de distribuição de água, que produz uma interface gráfica baseada em uma árvore n-ária que representa a estrutura do perímetro com seus valores associados com uma figura da rede de distribuição,

permitindo que se faça consulta dos valores de vazão em qualquer ponto da rede de distribuição d'água. O modelo computacional foi testado, em base mensal e diária, para condições agroedafoclimáticas do perímetro irrigado de Salinas. Na maior parte do ano a evapotranspiração estimada pelo modelo excedeu a precipitação provável; os consumos alto, médio e baixo ocorreram em outubro, abril e janeiro, respectivamente; nos dois últimos decêndios do ano a precipitação provável supriu as necessidades hídricas da maioria das culturas; o modelo computacional permite informar, com antecedência, a necessidade de irrigação; a interface gráfica do modelo permite o acompanhamento das vazões distribuídas ao longo da rede de distribuição do perímetro; a cultura do abacaxi apresentou menor consumo de água, enquanto a banana apresentou o maior; o modelo representa um avanço tecnológico para gerenciar a distribuição de água.

ABSTRACT

DANTAS NETO, Francisco Solon, D.S., Universidade Federal de Viçosa, November 2003. **Computational System Applied to Water Distribution System Management in Irrigation District.** Adviser: Antônio Alves Soares. Committee members: Everardo Chartuni Mantovani and Brauliro Gonçalves Leal.

A computational system was developed in order to make easier the water distribution management in irrigation districts. The system was divided in three modules: data base, water demand and water distribution. In the data base are stored data of physical characteristics of the irrigation district, climate, soil, crop, water and irrigation equipments. In the water demand module the user has the option of simulating the water demand for each plot, for different periods, using the daily soil water balance. He also can monitor the soil water balance components. The system uses a water distribution net with graphical interface, representing the irrigation district in a tree, allowing checking the discharge at any part and any time. The model was tested, for the conditions of soil and climate in the Irrigation District of Salinas. For almost all the year the estimated evapotranspiration exceeded the dependable precipitation. The high, medium and low water consumption occurred in October, April and January, respectively. The irrigation demand for the pineapple crop was lower than for the banana crop. The

graphical interface allows the user to monitor the discharge of any sector of the water distribution system, at any time. The computational model represents a technical advance in irrigation water distribution management.

1. INTRODUÇÃO

O rápido crescimento da população mundial induziu à necessidade do uso eficiente da água de irrigação, figurando com importância vital, particularmente em países pobres, onde o grande potencial para aumento da produção de alimento e aumento da renda rural é obtido, freqüentemente, em áreas irrigadas.

Muitos países têm testemunhado um crescimento da escassez de água e o aumento na competição pelo seu uso entre diferentes usuários (doméstico, industrial, agricultura, pecuária e propósitos ambientais). Enquanto em alguns países o balanço global dos recursos hídricos ainda é positivo, sérios problemas de escassez de água estão se desenvolvendo em regiões áridas e semi-áridas. Estimativas revelam que mais de 30 países de regiões áridas e semi-áridas terão problemas com escassez de água até o ano de 2025, os quais terão uma disponibilidade anual de água menor que 1.000 m^3 *per capita*, reduzindo o desenvolvimento, ameaçando o suprimento de alimentos e agravando o empobrecimento do meio rural (SMITH, 2000).

Uma das causas da escassez de água está associada às limitações quantitativas devido às condições climáticas, à demanda crescente ligada ao aumento populacional, ao desenvolvimento econômico, e ao seu uso ineficiente. Essas causas não se excluem, mas requerem mecanismos de gestão diferentes, ou pelo menos, complementares.

O crescimento da produção agrícola exige transformações com inovações que permitam a melhoria da produtividade das culturas. Nessa ótica, a agricultura irrigada apresenta-se como uma alternativa de modernização tecnológica, proporcionando melhores resultados em relação à produtividade e viabilizando a produção em regiões nas quais o regime de pluviosidade apresenta condições adversas para uma exploração agrícola economicamente rentável.

A disponibilidade de água, no momento oportuno, é um dos elementos indispensáveis à produção agrícola, constituindo-se num dos fatores limitantes à produção, especialmente em regiões onde as estiagens são constantes e as chuvas são mal distribuídas. Uma forma viável para disponibilizar as quantidades de água necessária aos cultivos é encontrada com o uso da irrigação.

A irrigação, desde que bem conduzida sob o ponto de vista técnico, econômico e ambiental, é, comprovadamente, uma alternativa para viabilizar o aumento da produção, mediante ganhos substanciais de produtividade. A prática da agricultura irrigada possibilita o uso intensivo de recursos e a estabilidade na oferta de alimentos e matérias-primas para a agroindústria, além de contribuir para a capacitação tecnológica do produtor.

De acordo com BERNARDO (1992), a irrigação tem como principal objetivo suprir as necessidades de água das plantas, possibilitando aumento expressivo da produtividade, aumento da demanda de mão-de-obra, promovendo a fixação do homem ao meio rural e diminuindo o risco de investimento, além de permitir maior eficiência no uso de fertilizantes e tornar possível a introdução de culturas de maior valor econômico.

Entretanto, embora a irrigação seja uma técnica que visa ao aumento da produtividade das culturas, especialmente em regiões áridas e semi-áridas, ela apresenta grande impacto nas disponibilidades hídricas dos mananciais de água, devido à demanda de grandes volumes de água. Notadamente, esse fato pode ser verificado em regiões onde há grandes concentrações de áreas irrigadas, como no caso dos perímetros irrigados. Nessas regiões, nem sempre o aporte de água é suficiente para restabelecer um saldo positivo no balanço hídrico, apresentando um déficit na maior parte do ano. Especial atenção deve ser dada a essas regiões

no tocante ao gerenciamento da água para irrigação, que geralmente usa maior volume de água quando comparada com o consumo urbano e industrial.

Os perímetros irrigados são sistemas coletivos, cujo objetivo é a exploração racional da agricultura irrigada, contudo seu manejo apresenta uma operação complexa, uma vez que deve atender múltiplos usuários com diferentes demandas de água. A operação dos sistemas coletivos visa proporcionar às áreas irrigadas as quantidades de água requerida no momento em que for necessária, distribuindo de forma eqüitativa e beneficiando os usuários com o mesmo tratamento.

Medidas que resultem em melhorias das práticas de manejo do uso da água na agricultura irrigada, conduzindo a substanciais benefícios em termos de disponibilidade de água para expansão da atividade agrícola e outros usos, são a grande preocupação atual e devem ser objeto das estratégias de exploração e manutenção dos recursos hídricos disponíveis.

O uso de ferramentas que facilitem a tomada de decisão em relação à quantidade de água a ser alocada para os cultivos pode conduzir a análises dos diversos parâmetros relacionados ao planejamento de uso dos recursos hídricos. Nesse sentido, a utilização de sistemas computacionais, que atuem em conjunto ou que estejam embutidos na estrutura de modelos de simulação, possui papel relevante para o monitoramento de áreas irrigadas, visando a sustentabilidade e o gerenciamento eficiente e racional dos recursos hídricos nessas áreas. Tais ferramentas são componentes fundamentais para o planejamento e a operação de programas estratégicos de desenvolvimento local e, ou, regional, com base na utilização de recursos hídricos disponíveis.

2. OBJETIVOS

De acordo com as considerações anteriores, o presente trabalho teve os seguintes objetivos:

A) desenvolver, física e logicamente, um sistema computacional aplicado ao gerenciamento da distribuição de água em perímetros irrigados; e

B) analisar os resultados da aplicação do sistema computacional para cenários pré-estabelecidos para o perímetro irrigado de Salinas, Minas Gerais.

3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1 – Aspectos Gerais

Devido ao crescimento populacional, à expansão da fronteira agrícola e à degradação do meio ambiente, os recursos hídricos têm sido, atualmente, alvo de grande preocupação, principalmente no que se refere à sua disponibilidade para as diversas atividades entre seus múltiplos usuários. Sendo a água um recurso indispensável à vida, é de fundamental importância a discussão das relações entre seu uso e a sua disponibilidade.

O consumo mundial de água cresceu cerca de seis vezes entre o início e o final do século passado, o que correspondeu mais que o dobro da taxa de crescimento da população, e continua crescendo neste século. Segundo BRITO e COUTO (2002), a agricultura, em âmbito mundial, é a maior usuária dos recursos hídricos utilizados, responsável por cerca de 70% do seu uso, comparado ao industrial (23%) e ao doméstico (7%). Em algumas áreas, de acordo com FREITAS e SANTOS (1999), as retiradas de água são tão elevadas em comparação com as ofertas, que a disponibilidade hídrica superficial está sofrendo uma redução e os recursos subterrâneos rapidamente esgotados. A caracterização deste estado tem enfatizado a necessidade do uso eficiente dos recursos hídricos, principalmente no setor da agricultura irrigada.

Entretanto, apesar do grande consumo de água, a irrigação representa a maneira mais eficiente de aumento da produção de alimentos. De acordo com CHRISTOFIDIS (2002), no mundo, cerca de 275 milhões de hectares de solo irrigados são utilizados para produção de alimentos agrícolas, que correspondem a 18% da área cultivada, sendo, entretanto, responsáveis por cerca de 42% da produção total da agricultura. PAZ et al. (2000), relatam que o Brasil demonstra grande potencial para agricultura irrigada, apresentando cerca de 5% da área cultivada irrigada, respondendo por 16% da produção total e por 35% do valor dessa produção.

A agricultura irrigada geralmente caracteriza-se pela forma intensiva de exploração dos recursos naturais, procurando maximizar a produção agrícola por unidade de área e de tempo. Nessa exploração, o fornecimento de água deve ser tal que permita um nível de produção adequado sob o ponto de vista econômico. De acordo com SCALOPI (1988), esse aumento de produtividade deve proporcionar uma maior receita líquida para o irrigante, melhorando seu nível de vida e aumentando a oferta de alimento e fibras para os mercados interno e externo.

A intensificação da prática da irrigação configura uma opção estratégica de grande alcance para aumentar a oferta de produtos destinados ao mercado interno, consolidar a afirmação comercial do Brasil num mercado internacional altamente competitivo e melhorar os níveis de produção, produtividade, renda e emprego no meio rural e nos setores urbano-industriais que se vinculem, direta ou indiretamente, ao complexo de atividades da agricultura irrigada (LIMA et al., 1999).

Entretanto, alguns aspectos devem ser considerados em relação à utilização da irrigação. CARVALHO (1998), relata a preocupação no que se refere à disponibilidade da água, pois a irrigação de culturas extensivas demanda grandes quantidades de água. Além disso, o aumento do número de irrigantes numa região gera a necessidade de racionalização da distribuição da água e do adequado gerenciamento da expansão da fronteira agrícola irrigada.

3.2 – A Ciência da Irrigação

A irrigação é uma técnica milenar que nas últimas décadas vem se desenvolvendo acentuadamente. Historicamente, a humanidade tem dependido do desenvolvimento de técnicas de irrigação para manter e melhorar a produção agrícola.

Segundo MANTOVANI e SOARES (1998), a irrigação sempre foi um fator de riqueza, prosperidade e, conseqüentemente, segurança, desde tempos remotos de nossa história. Assim, grandes aglomerações que há mais de 4.000 anos fixaram-se às margens dos rios Huang Ho Iang-tse-Kiang, no vasto império chinês; Nilo, no Egito; Tigre e Eufrates, na Mesopotâmia; e Ganges, na Índia, surgiram e se conservaram graças à utilização eficiente de seus recursos hídricos. A correta utilização dessa técnica é considerada um fator crítico para o desenvolvimento regional e melhoria da condição de vida do meio rural.

De acordo com BORGES (2000), é importante destacar que a utilização racional da irrigação, promovendo o incremento da produtividade do trabalho de mão-de-obra rural, é o ponto de partida essencial em direção ao progresso, colocando de pé um dos importantes pilares do desenvolvimento de uma comunidade, região ou país; portanto, o manejo adequado da água na agricultura não pode ser considerado uma etapa independente dentro do processo agrícola, devendo ser analisado dentro de um contexto de um sistema integrado. Deve-se considerar, ainda, o compromisso com a produtividade de uma cultura explorada, sem o desperdício da água, que contribui para conservação do meio ambiente.

Segundo BOWMAN et al. (1991), a irrigação deficiente pode acarretar perdas na produção, enquanto a aplicação em excesso pode significar desperdício de água e energia, podendo também contribuir para a lixiviação de nutrientes.

O nível de produtividade de uma cultura é grandemente afetado pela lâmina de água disponível para suas atividades metabólicas. O fornecimento adequado de água para atender as necessidades da cultura não só garante um rápido crescimento, mas também pode proporcionar níveis máximos de rendimento da cultura.

Quando a quantidade de água para irrigação de culturas em uma área é suficiente para suprir suas necessidades, o planejamento de sistemas de irrigação para exploração dessas culturas pode ser simples e economicamente viável. Do contrário, quando a quantidade de água não é suficiente para atender as necessidades das culturas, caso de irrigação em déficit, torna-se necessário a seleção de culturas diferentes e a estimativa da quantidade de água necessária para cada relação solo-planta, para se estabelecer uma exploração economicamente rentável (DOORENBOS e KASSAN, 1977).

Os avanços na ciência da irrigação necessariamente implicarão na aquisição gradual e na utilização de conhecimentos que levarão a um controle mais preciso sobre a quantidade e a qualidade de água aplicada. Tal controle visa otimizar a prática da irrigação em sintonia com todas as outras variáveis que afetam a produção da cultura.

3.2.1 – Demanda de água para irrigação

O manejo da cultura irrigada, necessário para o bom desenvolvimento de uma atividade rentável, é altamente dependente do acompanhamento da umidade do solo, uma vez que o propósito da irrigação é repor aquela quantidade de água perdida pela evapotranspiração.

Segundo RAMOS (1986), culturas diferentes, sem restrição de umidade no solo, sujeitas à mesma condição climática, perdem diferentes quantidades de água em função da sua anatomia e fisiologia, das diferenças de área foliar, do estágio fenológico, do sistema radicular e de outros fatores. Nesse aspecto, conforme BORGES (2000), o monitoramento da quantidade de água que o perfil do solo pode armazenar para ser utilizado pela planta é fundamental para o bom gerenciamento da demanda de água a ser fornecida na irrigação das culturas. Em um perímetro irrigado, a quantidade de água demandada pelas culturas é um dos parâmetros básicos para o gerenciamento de um sistema de distribuição de água.

O controle eficiente da alocação de água, neste caso, consiste de uma programação do manejo diário da irrigação. Segundo GEORGE et al. (2000), o manejo da irrigação pode ser baseado no monitoramento da cultura, no monitoramento do solo ou em técnica de balanço de água. No monitoramento da cultura, os potenciais de água na folha e a temperatura são as técnicas mais usadas para decidir quando se deve irrigar. Um aspecto negativo deste método é que a decisão para irrigar depois que a planta tenha sofrido muito estresse pode afetar a produtividade da cultura. O monitoramento do solo pode ser efetivamente usado para programação da irrigação. Contudo, este processo requer intenso trabalho e tempo, podendo não ser um processo econômico. Vários trabalhos têm utilizado o método do balanço de água no planejamento de sistemas de irrigação, e, segundo BERNARDO (1995), basicamente, os modelos que utilizam o balanço de água diferem quanto ao grau de sofisticação e complexidade, número e tipo dos dados requeridos, uso de evapotranspiração e quanto ao modo de decidir quando se deve irrigar.

Segundo REICHARDT (1996), o balanço hídrico é a própria lei de conservação das massas e está intimamente ligada ao balanço de energia, pois os processos que envolvem requerem energia. Do ponto de vista agrônomo, o balanço hídrico é fundamental, pois define as condições hídricas sob as quais uma cultura está submetida. O balanço de água no solo representa um sistema contábil de monitoramento da água no solo, tendo a precipitação pluvial como principal entrada de água no sistema e a evapotranspiração como a principal saída.

De acordo como FERNANDES et al. (1998), o balanço de água no solo é baseado no cálculo da depleção da água no solo na zona radicular, a qual é constituída de dois valores extremos: reserva de água utilizável no perfil do solo, cujo limite inferior é o ponto de murcha permanente, e a reserva facilmente utilizável, que é a fração da reserva utilizável para a qual a evapotranspiração permanece em seu máximo valor em uma dada condição.

Muitos modelos de simulação computacional (SMITH, 1991a; SOUZA, 1993; COSTA et al., 1997; DANTAS NETO et al., 1999) têm sido propostos

para estimar requerimento de água da cultura usando o balanço de água no solo. Nos modelos de balanço de água no solo, de acordo com DANTAS NETO (1999), para que um critério de irrigação alcance resultados econômicos, devem ser analisadas as características da precipitação pluvial quanto à frequência e à distribuição, sendo parâmetros de importância para implantar e manejar projetos visando à irrigação suplementar.

ALLEN et al. (1998), afirmam que através do balanço de água na zona radicular, em base diária, o tempo e a lâmina de irrigação futura podem ser planejados, evitando o estresse hídrico que poderia ocorrer na cultura, e as irrigações seriam aplicadas no momento correto e na quantidade necessária. O correto cálculo dos componentes do balanço de água na zona radicular evitaria as perdas por percolação profunda, que poderiam causar perdas por lixiviação, não somente da água, como também de nutrientes, prevendo lâminas de irrigação menores que a capacidade máxima de armazenamento do solo.

3.2.1.1 – Conteúdo de água no solo

Quando se utiliza o balanço de água no solo para a programação de irrigação, a capacidade de armazenamento de água na zona radicular deve ser calculada. O objetivo é prevenir quanto à depleção deste conteúdo, para que não chegue abaixo de valores críticos ao longo do tempo (MARTIN et al., 1992).

Qualquer programação de irrigação requer a estimativa de remoção de água de uma determinada camada de solo na zona radicular. BURMAN e POCHOP (1994), relatam que a remoção de água pela evapotranspiração é proporcional à densidade de raízes em uma particular porção da zona radicular considerada.

O conceito de disponibilidade de água para as plantas trouxe, por muitos anos, controvérsias entre pesquisadores. A principal causa das controvérsias, segundo REICHARDT (1996) é, provavelmente, a falta de uma definição física do conceito. Do ponto de vista da disponibilidade de água para as plantas,

definiu-se “água disponível”, correspondente à água retida entre os potenciais correspondentes à capacidade de campo, CC, e ao ponto de murcha permanente, PMP; entretanto, este conceito estático de água disponível não representa a realidade, pois há evidências de que a planta pode extrair água abaixo do PMP e acima de CC. Uma outra razão é que, como o sistema solo-água-planta-atmosfera é dinâmico, ele não pode ser definido por um único ponto de energia estático.

Contudo, em muitos estudos a água considerada disponível é, geralmente, a porção entre a capacidade de campo e o ponto de murcha permanente. Segundo CHANG (1977), a capacidade de campo corresponde à umidade do solo após o excesso de água ter sido drenado e a taxa do movimento de descida ter diminuído. Nesta condição, o perfil pára de drenar e a água do solo entra em equilíbrio, resultando no máximo de água que um solo pode reter.

O conceito de ponto de murcha permanente, segundo CHANG (1977), foi primeiro introduzido por BRIGGS e SHANTZ, em 1912, após vários experimentos em diversos tipos de solo. Eles concluíram que todas as plantas, a uma dada condição de redução do conteúdo de umidade do solo, reduz seu conteúdo de umidade na mesma extensão quando alcançam o murchamento permanente. Portanto, o ponto de murcha permanente é uma característica do solo e não da planta. O ponto de murcha é geralmente alcançado a uma tensão de 15 atm. O ponto de murcha permanente é o limite inferior, no qual a umidade do solo não está prontamente disponível para a planta. Neste ponto, o fluxo de água no solo não atende mais a demanda atmosférica e a planta entra em murcha.

3.2.1.2 – Evapotranspiração

A evapotranspiração é um fenômeno associado à perda conjunta de água diretamente do solo, pela evaporação, e da planta, pela evaporação da água através dos estômatos, transpiração. As necessidades hídricas de uma cultura são normalmente expressas pela taxa de evapotranspiração (ET). A quantificação dessa perda de água representa a evapotranspiração atual. Segundo HATFIELD e

FUCHS (1992), o entendimento do conceito de evapotranspiração atual é, provavelmente, o de mais fácil entendimento, contudo, o de mais difícil quantificação. De acordo com DOORENBOS e KASSAN (1979), o nível de ET está relacionado com a demanda evaporativa do ar. Essa demanda pode ser expressa como taxa evapotranspiração de referência (ET_o), que prediz o efeito do clima sobre o nível de evapotranspiração da cultura.

O conceito de evapotranspiração de referência foi introduzido para estudar a demanda evaporativa da atmosfera independentemente do tipo de cultura, seu desenvolvimento e prática de manejo. Segundo SMITH (1991b), a evapotranspiração de referência é definida como sendo a evapotranspiração de uma cultura hipotética, com altura fixa de 0,12 m, albedo igual 0,23, e resistência aerodinâmica ao transporte de vapor d'água igual a 69 s m^{-1} , correspondendo à evapotranspiração de uma superfície gramada, de altura uniforme, em crescimento ativo, cobrindo totalmente a superfície do solo, e sem restrição de água.

A medida direta da evapotranspiração é extremamente difícil e onerosa, pois exige instalações e equipamentos especiais, além de que tais estruturas são de alto custo, justificando-se apenas em condições experimentais (PEREIRA et al., 1997).

De acordo com DOORENBOS & PRUITT (1977), para se estimar a evapotranspiração de uma cultura, geralmente é necessário determinar a demanda evaporativa do ar (evapotranspiração de referência), ajustando-a, posteriormente, para as condições específicas e fase de desenvolvimento das culturas. MATZENAUER (1992) destaca a importância do conhecimento da evapotranspiração máxima das culturas, durante os diferentes períodos de desenvolvimento, como sendo fundamental para o planejamento e manejo da água na agricultura irrigada.

O produto da ET_o por um coeficiente de natureza empírica, k_c , específico para o cultivo de interesse, resulta na estimativa da evapotranspiração de tal cultivo. Esta metodologia proporciona uma grande facilidade operacional e sua precisão depende de uma adequada eleição de k_c e da estimativa precisa da ET_o.

Segundo CARVALHO (1998), a duração do período para estimativa da ET pode ser dada em função do tipo de sistema de irrigação, da cultura e da capacidade de retenção de água no solo. Estimativas mensais ou sazonais da ET podem também ser utilizadas no cálculo de volume de reservatórios. Apesar de geralmente se trabalhar com valores mensais de ETo, atividades como planejamento de irrigações, simulações da produção da cultura, modelagem hidrológica e calibração de sistemas de irrigação, freqüentemente, requerem estimativas de evapotranspiração para períodos diários. De acordo com JENSEN et al. (1990), alguns métodos para estimativas de ETo que utilizam média mensais de dados climáticos nem sempre são capazes de estimar ETo diariamente.

Diversos métodos são utilizados para estimar a evapotranspiração de referência. Dentre eles, DOORENBOS e PRUITT (1977), propuseram quatro métodos para estimativa da ETo, três dos quais utilizam medidas de elementos climáticas (temperatura, umidade relativa, velocidade do vento e radiação solar) e outro utiliza medidas de evaporação da água de um tanque classe A, apresentando facilidades operacionais e ajustes que possibilitam sua utilização em ampla escala. JENSEN et al. (1990) avaliaram vários métodos para a estimativa da ETo em diversas localidades de acordo com o clima, em áreas áridas e úmidas, tendo observado que o método de Penman-Monteith proporcionou um melhor ajuste aos dados medidos em lisímetro de pesagem.

Dentre os vários métodos para estimar a ETo, muitos têm aceitação quase unânimes, enquanto outros são bastante criticados e até desprezados. Não existe método de estimativa de evapotranspiração, usando dados meteorológicos, que seja universalmente adequado para todas as condições climáticas, especialmente para regiões tropicais e de grandes altitudes, sem que necessite de um ajuste local ou regional (MAEMO, 1994).

A utilização de cada um dos métodos de estimativa da ETo dependerá da disponibilidade de dados climáticos, da precisão desejada ou necessária, e principalmente da existência de informações que indiquem a precisão da equação, nas condições em que esteja sendo empregada.

A partir da década de 90, devido ao desenvolvimento acelerado dos recursos computacionais e de novas pesquisas conduzidas na área das relações água-solo-planta, a Food and Agriculture Organization (FAO) decidiu fazer uma revisão da metodologia proposta por DOORENBOS e PRUITT (1977), e numa primeira etapa, a nova proposta da FAO adotou o modelo de Penman-Monteith (ALLEN et al., 1998) como padrão para a estimativa da evapotranspiração de referência.

3.2.1.3 – Precipitação

A dependência da agricultura aos níveis de chuva é um fator há muito conhecido pelos agricultores. Tanto para a agricultura de sequeiro como para a agricultura irrigada o conhecimento da quantidade e da distribuição da precipitação é fundamental para o efetivo planejamento das práticas agrícolas.

A precipitação pluvial é um fator importante na consideração da estimativa de lâmina de irrigação, representando um aporte natural para o sistema de balanço de água no solo. Segundo ASSIS (1991), além do efeito no balanço de água, a precipitação influencia indiretamente outros elementos climáticos, como a temperatura do ar e do solo, a umidade do ar e a radiação solar, que atuam como fatores básicos para o crescimento e desenvolvimento das plantas.

Segundo DOORENBOS e PRUITT (1977), para estudos de irrigação suplementar, a contribuição das chuvas deve ser feita na forma de precipitação provável ou dependente, que é definida como sendo a quantidade de chuva que tem um determinado nível de probabilidade de ocorrência. No planejamento de irrigação suplementar essa probabilidade geralmente é fixada em 75%.

As precipitações pluviais não são distribuídas simetricamente em torno da precipitação média, mas distribuem-se irregularmente e apresentam grande desvio em relação à média, conforme tem sido constatado por vários pesquisadores, dentre eles CASTRO e LEOPOLDO (1995).

A ocorrência da chuva e sua quantidade podem ser analisadas mediante a obtenção das frequências observadas dos seus valores de séries históricas ou através de elaboração de modelos teóricos, sendo que os modelos teóricos permitem a utilização de técnicas de simulação. Esta característica tem motivado a aplicação de modelos teóricos de distribuição de chuva, com vistas ao planejamento agrícola, devendo ser ressaltado que o modelo teórico apresenta a vantagem de sintetizar os dados das séries históricas.

ASSIS (1991) destaca várias distribuições de probabilidade utilizadas para modelar a quantidade de chuva que ocorre durante o período chuvoso, concluindo que a distribuição gama, explicitada por THOM (1966), é considerada a mais adequada, especialmente para curtos períodos de tempo. ASSIS (1991) obteve resultados satisfatórios ao utilizar a distribuição gama para modelar a quantidade de chuva na localidade de Pelotas-RS e Piracicaba-SP. O mesmo autor utilizou esta distribuição de probabilidade, ajustando-a a totais semanais de chuva, para Pelotas, e concluiu que os totais semanais de chuva também podem ser representados, adequadamente, por este modelo.

FRIZZONE (1979) analisou cinco modelos para o cálculo da distribuição de frequência de precipitações em Viçosa-MG, tendo a distribuição gama apresentado comportamento satisfatório na estimativa das precipitações em períodos de 5, 10, 15 e 30 dias. PACE et al. (1989), estudando a ocorrência de precipitação provável mensal para a microrregião de Rio Largo-AL, demonstraram a viabilidade do modelo de distribuição de probabilidade gama, evidenciado pelo teste de Kolmogorov-Smirnov, a 10% de significância. RODRIGUES & PRUSKI (1997) estimaram a precipitação provável decenal para o município de João Pinheiro-MG, utilizando as distribuições gama e log-normal, com 13 níveis de probabilidade, e concluíram que o modelo gama ajustou-se adequadamente aos dados de chuva durante todo o ano.

3.2.2 – Manejo de água em parcelas irrigadas

A eficiência de um sistema de irrigação está diretamente relacionada com o seu manejo, e este consiste em técnicas que possibilitam o fornecimento adequado de água às culturas, em quantidade e qualidade, no momento oportuno, considerando os aspectos econômicos, sociais e ecológicos (SOUZA, 1993).

O momento correto da aplicação da irrigação influencia a produtividade da cultura, as quantidades sazonais de irrigação e a eficiência de armazenamento de água da irrigação. Irrigações excessivas podem provocar lixiviação de sais para além da zona radicular, poluindo o lençol freático. Irrigações deficitárias em períodos críticos da cultura, como floração e enchimento de grãos, podem proporcionar a redução da produtividade (MARTIN et al., 1992). O método ou critério de manejo da irrigação freqüentemente baseia-se no uso de valores escolhidos como indicadores da necessidade de irrigação para a cultura, usualmente com base nos parâmetros do solo ou da cultura. A quantidade de irrigação depende do estágio de crescimento da cultura, da demanda evapotranspirativa, da limitação do suprimento de água, da capacidade do sistema de irrigação, das práticas culturais, do valor econômico da cultura e das condições climáticas.

Segundo HOFFMAN et al. (1992), o manejo da irrigação consiste em se determinar quando se deve irrigar, a quantidade de água a ser aplicada em cada irrigação durante cada estágio de crescimento da planta, além da operação e manutenção do sistema de irrigação, de forma a atender às atividades produtivas programadas.

Segundo BURT (1995), o conceito de programação da irrigação consiste em aplicar água para a cultura na quantidade correta e no tempo apropriado para maximizar a produção e, ou, os rendimentos, enquanto mantém uma eficiência de irrigação razoavelmente alta.

De acordo com CHEN e KOCHER (1994), o manejo efetivo da agricultura depende da obtenção de informações precisas em pequeno intervalo

de tempo, sendo reconhecido como importante elemento para a obtenção de alta eficiência na utilização de insumos.

Muitas técnicas de manejo de água em áreas individuais têm sido amplamente desenvolvidas nas últimas décadas, bem como técnicas de medição de parâmetros, as quais são utilizadas para estimar, com maior precisão, as demandas de água pelas culturas. Entretanto, segundo CARVALHO (1998), a demanda nos sistemas de irrigação envolve um grande número de fatores não-técnicos, em razão das práticas culturais e da alocação de recursos. Este autor relata que, embora a demanda do sistema de irrigação para uma área individual possa ser estimada diretamente, a demanda de muitas áreas agregadas depende do tamanho da área, da capacidade de suprimento do sistema, do planejamento de plantio, da eficiência de aplicação etc.

Para um estudo integrado sobre a demanda de água para determinada época de plantio da cultura, algumas variáveis dominantes são importantes, como o acompanhamento da depleção de água no solo, a umidade inicial do solo e a uniformidade da aplicação de água. O conhecimento de relações funcionais entre a demanda de água e alguns parâmetros operacionais de campo é de grande importância para o agricultor em termos de sua estratégia de irrigação. Conhecendo as técnicas de aplicação de água, torna-se possível estimar a quantidade de água e a frequência de irrigação durante a época de plantio e, até mesmo, as práticas futuras (YAMASHITA e WALKER, 1994).

O manejo da irrigação com base na depleção de água no solo é um dos critérios mais usados para a programação da irrigação, particularmente usando o método do balanço de água no solo. Esse critério expressa a proporção ou a percentagem de água na zona radicular disponível para a planta ou extraível da capacidade de armazenamento de água no solo, que pode deplecionar entre os eventos de irrigação.

No gerenciamento e manejo de uma área irrigada, perímetro irrigado, ou de uma grande área irrigada, deve-se considerar os aspectos sociais e ecológicos da região e procurar maximizar a produtividade e a eficiência do uso e minimizar os custos, mantendo as condições de umidade do solo e de fitossanidade

favoráveis ao bom desenvolvimento da cultura irrigada, e procurar melhorar, ou no mínimo, manter as condições físicas, químicas e biológicas do solo, prolongando desta forma o período de vida útil do projeto.

Segundo BOWMAN et al. (1991), um manejo de irrigação adequado deve efetivamente estar interado com as informações de clima, de solo e também com as funções de respostas das culturas em relação à lâmina d'água aplicada, além de recursos de capital, de trabalho e de tecnologia agrícola, mantendo as condições de umidade e nutrientes no solo favoráveis ao bom desempenho da cultura.

3.2.3 – Perímetro irrigado

A tecnologia da irrigação, a partir dos anos 80, tem sido amplamente utilizada e sua adoção vem crescendo de forma acelerada. Com o objetivo de atender a demanda de recursos e tecnologia para a agricultura irrigada, os governos federal e estaduais têm criado programas, como a implantação de infraestrutura hidráulica, contemplando, entre outros, o desenvolvimento da agroindústria, visando o aproveitamento de matérias-primas originadas de sistemas agrícolas irrigados (CARVALHO, 1998).

Nesses programas podem ser caracterizados os perímetros irrigados, que segundo SCALOPPI (1988), são compostos, em sua maioria, por sistemas coletivos; compreendem as áreas e instalações necessárias ao desenvolvimento racional da agricultura irrigada; e incluem toda a infra-estrutura necessária para captação, bombeamento, adução, distribuição e aplicação de água em áreas irrigadas.

O manejo de um perímetro irrigado é uma operação complexa por ter que atender múltiplos usuários com diferentes demandas. A operação de sistemas coletivos, concentrando múltiplos usuários, visa atender o fornecimento de água requerida, nos momentos em que forem necessárias, às áreas irrigadas correspondentes a cada usuário no perímetro. A eficiência global da irrigação,

considerando o contexto coletivo, é quase sempre prejudicada, devido à existência de particularidades associadas à diversidade de interesses e responsabilidades, atingindo valores geralmente inferiores aos observados em sistemas individuais.

O fornecimento de água em perímetros irrigados geralmente é feito por meio de um sistema de canais primários e secundários dotados de estruturas de controle de vazão, o qual é abastecido por um reservatório ou uma unidade de bombeamento.

O dimensionamento e a operação dos sistemas coletivos visam proporcionar às áreas irrigadas as quantidades de água requerida no momento em que for necessária. De acordo com FERREIRA (1986), em qualquer perímetro moderno os canais principais são dimensionados e dotados de estruturas que permitem armazenar água de véspera, de modo que todos os canais secundários possam funcionar ao mesmo tempo. Os usuários, tanto os que se localizam no início quanto os que se localizam no final do canal principal, recebem o mesmo tratamento.

CARVALHO (1998), relata que o fornecimento de água de irrigação no momento adequado e de maneira eficiente constitui uma das principais metas das companhias que gerenciam os perímetros irrigados em todo mundo. Segundo LOFTIS e HOUGHTALEN (1987), a execução dessa tarefa é sempre difícil, mesmo em áreas onde o volume de água disponível é adequado, sendo o sucesso dessa prática dependente do alto nível de manejo do sistema de distribuição de água.

3.3 – Distribuição de Água em Perímetros Irrigados

Um sistema de distribuição de água compreende todos os meios e serviços materiais e organizacionais necessários para conduzir a água desde a fonte de abastecimento até os campos cultivados. Os sistemas de distribuição de água podem variar quanto ao tamanho, ao alcance e à disposição, desde os que

pretendem simplesmente distribuir a água de um rio para áreas próximas, conduzindo pequenos volumes, até os que conduzem grandes volumes de água em redes que se ramificam sobre uma área (KRAATZ & MAHAJAN, 1976).

O planejamento de distribuição de água visa desenvolver e implementar um plano para sua distribuição compatível com a capacidade e as restrições do sistema de distribuição. De acordo com BURT (1995), o planejamento da distribuição, associado à programação da irrigação, é uma combinação desejável para o desenvolvimento de uma política de programação da irrigação, com vistas a alcançar os melhores resultados agrônômicos.

Dentro de um enfoque operacional de um distrito de irrigação, JOHNSTON e ROBERTSON (1991) informam que o planejamento da distribuição de água refere-se ao método pelo qual o perímetro irrigado determina quem receberá água do sistema de distribuição e quando esta água será fornecida para o irrigante. Citam, ainda, que os componentes principais de um sistema de distribuição são a vazão, a frequência de irrigação e o tempo de fornecimento.

O planejamento da distribuição de água pode ser visto sob dois aspectos. O primeiro está relacionado com a conveniência para satisfazer a demanda hídrica das culturas, dentro do limite de disponibilidade de água no solo para o uso eficiente da água. O segundo está relacionado com a conveniente operação do sistema de distribuição. Considerando que o irrigante dentro do distrito de irrigação paga pelo uso da água, o sistema de distribuição deveria ser planejado a partir de uma combinação mais econômica possível entre as atividades em nível das propriedades, a programação da distribuição de água e a capacidade do sistema de distribuição.

Segundo BURT e PLUSQUELLEC (1992), a seleção e o manejo do sistema de distribuição de água afetam os aspectos agrônômicos e sociais dos projetos. A estratégia de controle da distribuição deve ser compatível com a flexibilidade do fornecimento de água, e as condições sociais, política, geográfica e econômica sobre as quais será usada.

SCALOPPI (1988), cita que diversos sistemas de fornecimento de água são utilizados em todo o mundo. Esses sistemas têm sido classificados em dois grandes grupos: o de programação rígida e o de programação flexível. O sistema de programação rígida caracteriza-se por apresentar ou a quantidade ou a frequência, ou ambas, previamente fixadas. Esta condição tende a favorecer o controle do órgão fornecedor de água e reduzir a capacidade das estruturas de captação, bombeamento, adução e distribuição de água. Por outro lado, resulta em reduzida eficiência de irrigação dos projetos e aumento dos problemas de drenagem e lixiviação de nutrientes do solo, causados por aplicações excessivas de água e má distribuição da mão-de-obra nas atividades de irrigação. O sistema de programação flexível é sistema dimensionado e operado para atender primariamente a conveniência dos usuários. Ao mesmo tempo, é mais complexo e caro do que o anterior, mas geralmente resulta em maior economia.

3.3.1 – Métodos de distribuição de água

Os métodos de distribuição de água mantêm uma estreita relação com os sistemas de condução, entretanto existem algumas exceções. Uma vez escolhido o método de distribuição, tem-se pouca probabilidade de trocá-lo. Cada método tem suas próprias características, as quais podem, ou não, se ajustar às condições locais (SAGARDOY et al., 1991).

Dentre as características que um sistema de fornecimento de água deve apresentar para ter um bom desempenho, podem-se citar: a adequabilidade, a eficiência e a equidade. A adequabilidade relaciona-se com a necessidade de fornecer quantidades adequadas de água às plantas em qualquer ponto do sistema; a eficiência reflete a conservação dos recursos hídricos no processo de fornecimento ou a prevenção do fornecimento excessivo de água; e a equidade apresenta uma característica relacionada com a habilidade do sistema em fornecer água uniformemente e de maneira adequada (McCORNICK, 1993).

A distribuição de água possui diferentes características, dependendo do método de distribuição utilizado. Os principais métodos de distribuição de água podem ser classificados em contínuo, rotativo, semidemanda, sistemas de turno e sob-demanda.

3.3.1.1 – Método Contínuo

Conforme SAGOARDOY et al. (1991), o método contínuo é o mais simples e também o menos eficiente, porque a entrega é feita geralmente de campo para campo, resultando em grandes perdas por evaporação. As perdas por infiltração e o escoamento excessivo são também elevados. Este método de distribuição pode trazer sérios problemas sociais no período de escassez de água, porque os irrigantes situados nas partes mais altas obtêm a água que necessitam, enquanto os que estão nas regiões mais baixas obtêm pouca ou nenhuma água. Nesse método, a água restante escorre de um campo para outro e é restrito quase que exclusivamente para áreas onde se tem água em abundância.

Cada parcela recebe a parte que lhe é devida e que lhe corresponde em relação à superfície de cada propriedade, em forma de fluxo ininterrupto. Desta forma, dispõe-se sempre de água, mesmo que não seja sempre necessário utilizá-la. Sua utilização real pode ser menor e intermitente. Quando a extensão das propriedades ou as parcelas são muito variáveis e as dimensões das saídas também, pode-se supor a realização de estrutura de vários tamanhos, o que será difícil projetar (KRAATZ e MAHAJAN, 1976).

3.3.1.2 – Método rotativo

O método rotativo é adotado, principalmente, quando existe uma administração mista no perímetro e se tem que decidir, por exemplo, se a administração pública será responsável pelo funcionamento dos canais principais

e secundários e os irrigantes distribuirão a água que recebem dos canais terciários. Uma das características principais desse método é que a água é distribuída por turnos. A duração desses turnos pode ser resultado da experiência local (SAGARDOY et al., 19991).

Nesse método, a água é transportada na realidade de uma zona para a outra em bloco e cada um dos usuários recebe uma quantidade fixa de água em intervalos de tempo definidos. Esse tipo de método pode ser aplicado entre vários irrigantes, entre grupos de irrigantes ou entre partes definidas de um projeto de irrigação. Segundo JOHNSTON e ROBERTSON (1993), este método é o mais restritivo, e a taxa, frequência e duração são fixadas pela política do órgão administrador do distrito e permanece fixada para toda a época de irrigação.

As organizações públicas podem operar facilmente este tipo de método, mas ele implica em grandes perdas operacionais. A baixa eficiência do sistema é devida principalmente ao fato de a demanda e a oferta serem dissociadas (SAGARDOY et al., 1991).

3.3.1.3 – Método semidemanda

Este método de distribuição de água é o mais comum devido a sua simplicidade. O irrigante solicita a água ao administrador do perímetro. A partir dos pedidos são feitos os cálculos necessários para atender a demanda de acordo com a capacidade de distribuição. O conhecimento da quantidade de água necessária é indispensável nesse método, pois, do contrário, não se poderá preparar uma tabela de entrega de água (SAGARDOY et al., 1991).

O método semidemanda é o que tem a maior aceitação entre os irrigantes. A água é distribuída entre as parcelas de acordo com a quantidade solicitada e dentro do horário preestabelecido. Este método permite ao irrigante retirar o volume de água que deseja, com a limitação correspondente à capacidade do sistema de distribuição. A construção de uma estrutura para distribuição com capacidade suficiente para satisfazer plenamente a demanda de

todos os irrigantes, ao mesmo tempo, não é economicamente viável. Neste caso, este método é pouco praticado para o caso de grandes estruturas de distribuição.

Segundo SAGARDOY (1991), esse método requer um sistema de irrigação bem projetado e construído, sendo necessário conhecer a capacidade de entrega do sistema, tendo-se, assim, a certeza que as tomadas são capazes de entregar a vazão estabelecida. Uma vantagem deste método é que nos períodos de escassez de água podem-se empregar turno de rega.

3.3.1.4 – Método por sistema de turnos

Neste método, o sistema de distribuição fornece água de acordo com período preestabelecido e os irrigantes recebem uma vazão no tempo previamente fixado. Este método é um melhoramento do método de rotação, uma vez que o turno de entrega de água não se aplica somente a estruturas primárias, mas também às parcelas. É um método muito eficiente sob o ponto de vista operacional e socialmente justo, pois oferece oportunidades iguais para todos os irrigantes (SAGARDOY et al., 1991).

3.3.1.5 – Método sob-demanda

Este método é utilizado geralmente em projetos com alto nível de tecnologia. O grau de intervenção humana na sua administração é mínimo, cabendo apenas decidir quando certa estrutura de distribuição terá seu nível de água alterado, uma vez que o método é operado com princípios automáticos. Possui uma eficiência muito alta (acima de 90%). Sua operação, no entanto, exige pessoal qualificado, visto que o sistema se limita a um controle geral automático (SAGARDOY, 1991).

Por definição, em sistema de distribuição operando sob-demanda, os usuários decidem quando e a quantidade de água a ser retirada da rede de

distribuição sem a necessidade de informar ao gerenciador do sistema. Usualmente, o método de distribuição sob-demanda é mais comum em sistemas de distribuição pressurizados, no qual os dispositivos de controle são mais seguros, comparativamente aos canais abertos (FAO, 2000). Este método é considerado o mais flexível, uma vez que uma quantidade ilimitada de água pode ser alocada para os usuários.

O método sob-demanda apresenta a grande vantagem de permitir que o irrigante utilize a água quando mais necessitar, resultando em uma maior flexibilidade para o usuário em relação ao manejo da irrigação em nível parcelar. Entretanto, em um sistema de distribuição sob-demanda, um número de condições preliminares devem ser garantidas. Os pontos inconvenientes deste método é o elevado custo e a necessidade de uma alta tecnologia para a construção dos sistemas e sua manutenção.

3.4 – Softwares utilizados como ferramentas gerenciais

O gerenciamento de água de irrigação é comumente não valorizado pelos operadores de sistemas de irrigação, contudo procuram preocupar-se demasiadamente com a água utilizada em nível parcelar.

De acordo com SOUZA (1992), a partir da década de 60, foram iniciados vários estudos visando a utilização do computador para estabelecer os calendários de irrigação, com base na equação do balanço hídrico do solo. Somente depois da década de 80, passou-se a utilizar o microcomputador, para se determinar quando e quanto irrigar, bem como, na automação dos sistemas de irrigação com base em tempo real.

Segundo FERREIRA (1999), a maioria dos projetos de irrigação foi desenvolvida numa época em que não havia a preocupação efetivamente com o calendário de entrega de água, mas com o calendário de irrigação parcelar. Com o aumento das áreas irrigadas, da população e da grande demanda pela indústria, a água tornou-se um bem escasso e caro. Devido ao grande avanço tecnológico,

procurou-se encontrar meios para melhorar os sistemas de distribuição de água, visando confiabilidade e equitatividade na entrega de água para os usuários. Assim, muitos programas surgiram como ferramentas para dar suporte à tomada de decisão por parte dos administradores do uso de água.

Segundo BURT (1995), muitos modelos teóricos para utilização em computador têm sido desenvolvidos, os quais examinam as complexidades hidráulicas do sistema de distribuição de água em conjunto com o conceito de balanço de água no solo. Entretanto, acrescenta, que a aplicabilidade desses modelos em tempo real pode não ser praticável para implementação de um plano de distribuição de água, uma vez que necessita do empenho dos produtores.

Um programa denominado INCA (Controle e Análise de Rede de Irrigação) foi desenvolvido como objetivo de dar suporte à administração de projetos de irrigação, e operar nos principais sistemas de distribuição de água. O objetivo desse programa é proporcionar uma forte ferramenta de análise, em computadores, das necessidades de água, determinando assim, o calendário de entrega de água e a evolução do desempenho do sistema, alcançando um aumento na qualidade dos serviços de entrega aos usuários. O INCA desenvolve calendários de distribuição de água com base nas demandas de campo, mapeando a entrega através da rede de distribuição para, desse modo, obter alvos operacionais nas estruturas reguladoras (MAKIN et al., 1995).

Com o objetivo de facilitar as atividades operacionais na rede de irrigação e melhorar a administração geral da água, a FAO desenvolveu um software como ferramenta de gerenciamento, o SIMIS (*Scheme Irrigation Management Information System*). Segundo FERREIRA (1999), o desenvolvimento do SIMIS seguiu alguns princípios básicos, buscando torná-lo aplicável em muitos sistemas de irrigação, adaptando-se às circunstâncias locais. Versatilidade é outra característica deste *software*, que aborda tanto o aspecto da água, como também outras atividades ligadas ao gerenciamento de um projeto de irrigação.

Considerando o gerenciamento e o manejo dos recursos hídricos em nível parcelar, com o propósito de monitorar a prática da irrigação, alguns

softwares já foram desenvolvidos: o *SCS Computer Irrigation Schedulig*, desenvolvido em 1998 pelo Serviço de Conservação de Solo dos Estados Unidos em conjunto com a Michigan State University; o CROPWAT, desenvolvido pela FAO em 1992, cujo objetivo é o cálculo do requerimento de água e programação da irrigação; o SAACI (Sistema para o Acompanhamento de Culturas Irrigadas), desenvolvido pela Secretaria de Recursos Hídricos, em 1992; o PROREG, em 1994, desenvolvido na Universidade Técnica de Lisboa; o SISDA (Sistema de Suporte à Decisão Agrícola; Manejo dos Cultivos e dos Recursos Hídricos), sistema especialista desenvolvido pela Secretaria de Recursos Hídricos em parceria com a Universidade Federal de Viçosa, cujo objetivo é a racionalização de uso de água e energia em lavouras irrigadas, auxiliando no manejo da irrigação.

4. O MODELO COMPUTACIONAL

O modelo computacional foi desenvolvido seguindo a metodologia de programação modulada, que consiste na divisão do sistema em vários módulos, de forma a proporcionar maior agilidade na sua implementação, bem como melhor desempenho em tempo de execução. Para implementação do *software* foi utilizada a linguagem de programação orientada a objeto, através do uso do aplicativo Delphi 3, em ambiente Windows. O sistema computacional pode ser executado em microcomputador PC e compatível.

No desenvolvimento do sistema computacional foi dada ênfase à atual tendência de desenvolvimento de aplicativos computacionais, a qual se caracteriza por apresentar uma interface com o usuário de fácil manipulação, onde não sejam necessárias muitas entradas de dados para sua execução. Neste caso, não há necessidade do usuário ser um especialista na área, porém deve deter um mínimo de conhecimento para executar o modelo.

O sistema computacional foi desenvolvido com o objetivo de simular o consumo de água no perímetro irrigado, a partir das parcelas cultivadas, e monitorar sua distribuição para as propriedades. O sistema tem como base os recursos clima, solo, cultura e sistema de irrigação, consolidados em uma estrutura de banco de dados, que possibilita a execução de manejo, em tempo real, e simulação do consumo de água para diferentes épocas (Figura 1). Na

Figura 2 é apresentada a tela de abertura do modelo computacional “Perímetro Manager”, na qual a interface foi dividida nos módulos: Perímetro, Propriedades, Cadastros, Monitoramento, Simulação, Utilitários e Ajuda.

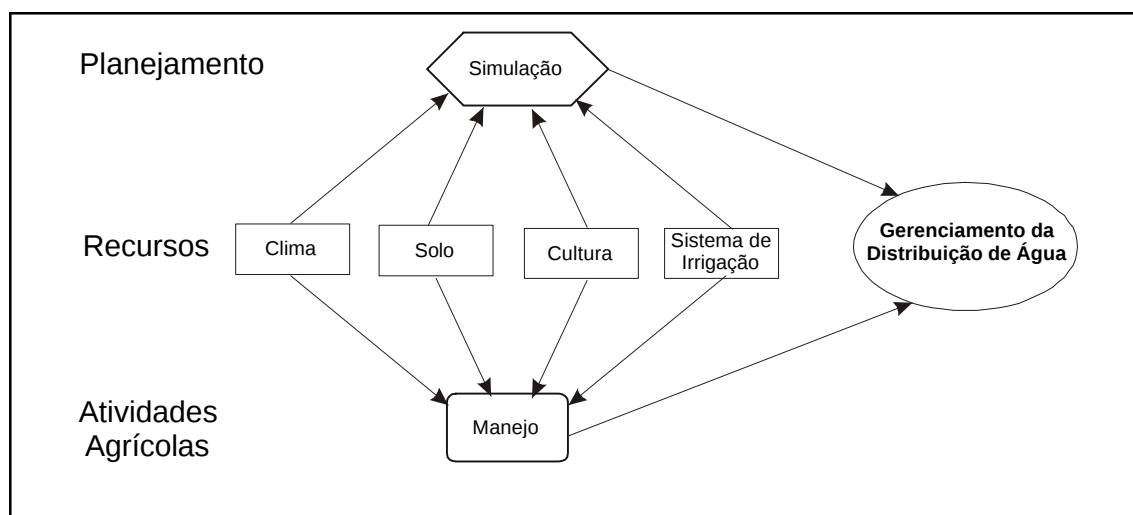


Figura 1 – Diagrama esquemático da estrutura do sistema computacional.

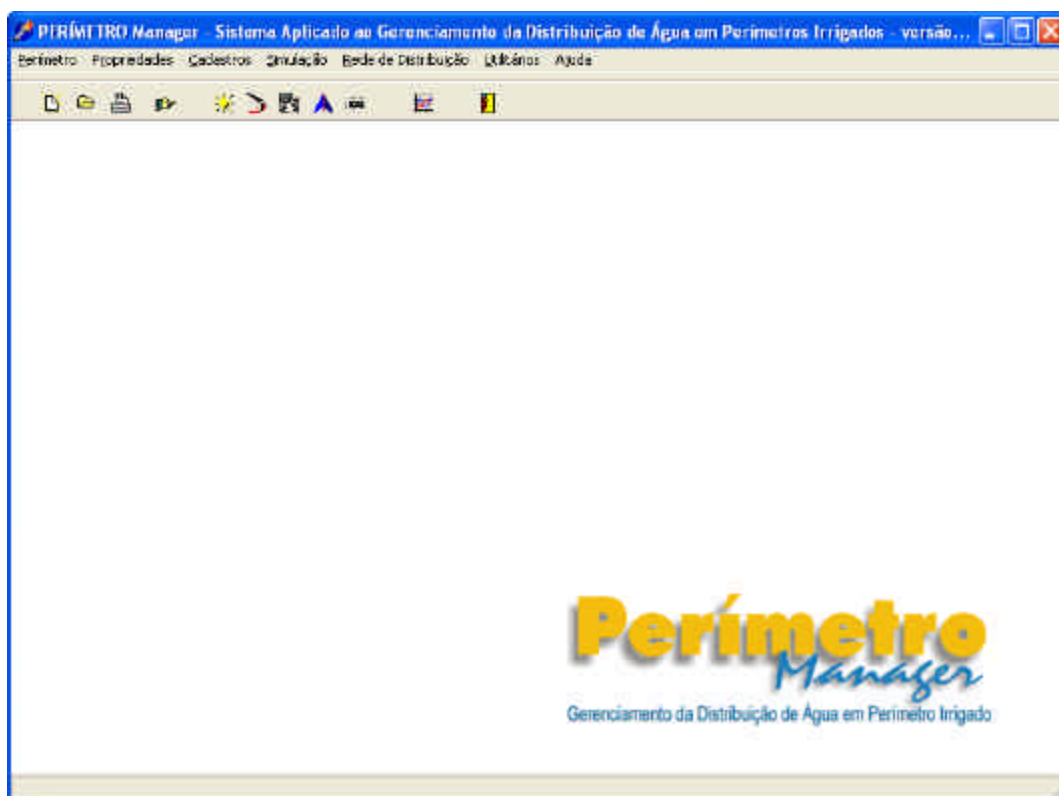


Figura 2 – Tela de abertura do modelo “Perímetro Manager”.

4.1. Estrutura de Banco de Dados

No desenvolvimento do modelo foi gerado um conjunto de tabelas que compõe um sistema de banco de dados relacional. As informações necessárias para uso do sistema computacional são armazenadas previamente nessa base de dados, tornando seu manuseio simples por não necessitar de muitas entradas de dados para sua execução. A flexibilidade do sistema de cadastro permite que sejam realizadas inclusões, consultas, alterações e exclusões em todos os módulos que usam a base de dados, que é dinâmica e versátil, ou seja, as informações podem ser usadas em vários módulos do programa e serem alteradas a qualquer momento.

O sistema de cadastro do modelo computacional foi dividido nos módulos caracterização do perímetro, cadastro do clima, cadastro das propriedades, cadastro dos solos, cadastro das fontes de água, cadastro das culturas e cadastro dos equipamentos de irrigação. Na Figura 3 é apresentado um diagrama geral da estrutura de cadastro e operação do sistema computacional.

4.1.1. Caracterização do perímetro

No módulo caracterização do perímetro são cadastradas as informações relativas à identificação e à infra-estrutura física do perímetro. Na identificação são informados o nome do perímetro irrigado, o órgão administrador, a localização e a área total. A infra-estrutura física do perímetro foi dividida em setores e, dentro dos setores, os trechos que irão compor a rede de distribuição de água. O setor pode ser definido como uma área dentro do perímetro que possui uma fonte única de abastecimento de água (Figura 4).

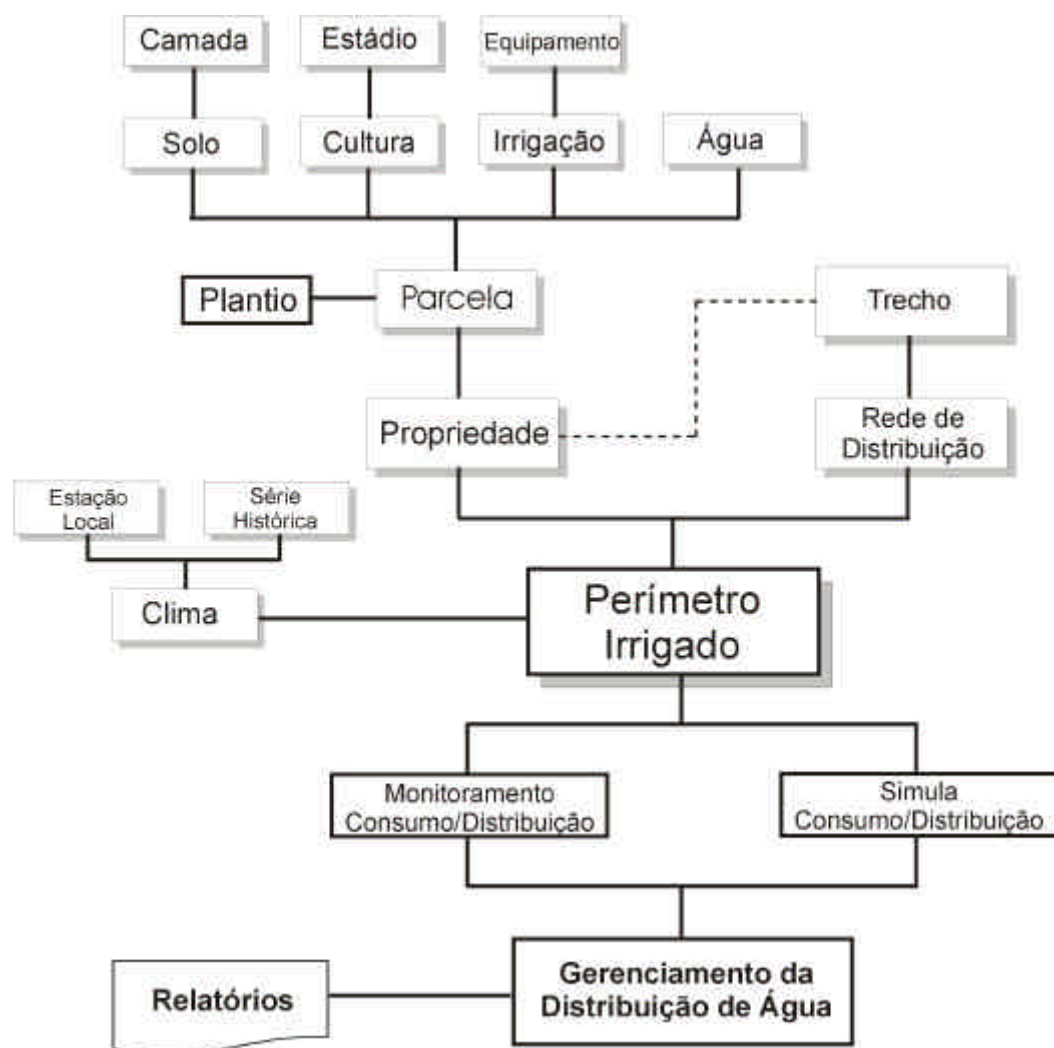


Figura 3 – Diagrama esquemático da estrutura de cadastro e operação do sistema computacional.

No cadastro dos setores são informados o nome do setor, o método de distribuição de água, no qual o usuário poderá escolher entre contínuo, rotativo, semi-demanda, sistema por turno ou sob-demanda. São informadas, ainda, a área do setor e a vazão de projeto do mesmo. Os campos número de propriedades e número de trechos no setor são preenchidos automaticamente, a partir do cadastro das propriedades e dos trechos, respectivamente.

Caracterização do perímetro

Identificação

Nome: Perímetro Irrigado de Salinas

Administração: Programa PDI-JEPAR

Município: Salinas UF: MG Área (ha): 450

Distribuição de água

Setores

Nome do Setor: Setor A Método de distribuição: Sob-demanda

Área (ha): Nº de Propriedades: 29 Nº de Trechos: 75 Vazão (m3/h):

Trechos

Nome_Trecho	Nome_Trecho_Pai	Comp_Trecho	Vazao_T
Motobomba	Fonte D'água	0	
Trecho 01	Motobomba	168.22	
Trecho 02	Trecho 01	80	

Fechar

Figura 4 – Tela de cadastro referente à caracterização do perímetro.

Após as informações dos setores terem sido armazenadas, o cadastro dos trechos é habilitado para receber inclusões. O cadastro de trecho recebe chave de indexação pelo trecho e setor, possibilitando que as inclusões dos trechos sejam realizadas dentro de cada setor. Ao incluir um novo trecho, o usuário deverá informar: o nome do trecho; o tipo do trecho, onde pode ser selecionado como conduto pressurizado ou livre; a estrutura referente ao trecho, selecionando-se entre estrutura de origem, estrutura de derivação, segmento, ou uma estrutura anexa; o comprimento do trecho, (m); o desnível do trecho, (m); vazão máxima de projeto para trecho, ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$); origem do trecho, ou seja, a estrutura que deu origem ao trecho; distância da fonte d'água, (m); direção do trecho em relação ao trecho de origem; e, ângulo da direção em relação ao sistema cartesiano, (graus). Na Figura 5 é apresentada uma tela com as informações necessárias para o cadastro do trecho.

Cadastro do trecho de distribuição

Nome: Trecho 01

Tipo: Presurizado

Classe: Estrutura

Comprimento (m): 168,22

Vazão (m3/h):

Ramificação do Trecho: Origem: Motobomba

Direção: Ângulo (Graus): -108

Perdas na condução (%): 0

OK Cancela

Figura 5 – Tela referente ao cadastro dos trechos dentro do setor.

4.1.2. Cadastro de dados climáticos

As informações referentes à estação e aos dados climatológicos são cadastradas no módulo perímetro e apresentadas na tela (Figura 6) com as seguintes informações: o nome da estação; sua localização; e a altura de instalação do anemômetro (m). A série de dados, incluída em base diária corresponde aos elementos: temperatura máxima (T_{max}), temperatura média (T_{med}), temperatura mínima ($T_{mín}$), temperatura do bulbo molhado (T_{bu}), em graus Celsius; evaporação de água do tanque classe A (mm); insolação, (h); umidade relativa do ar (%); velocidade do vento ($m\ s^{-1}$); e precipitação pluvial (mm). Os dados podem ser incluídos a partir da interface ou importados de uma série histórica de dados com arquivo em formato ASCII (*.txt).

Cadastro de Estações Climatológicas

Novo Salvar Alterar Cancelar Excluir Relatório Sair

Estação: Estação Araçuaí Código: 3

Cidade: Araçuaí UF: MG

Lat. (GG,MM): -16.52 Long. (GG,MM): -42.04 Alt. (m): 284.39 Altura do Anemômetro (m): 10

Observações
Código da Estação INMET: 83442

Importar Dados

Data da Coleta	Tmax (°C)	Tmin (°C)	Tmed (°C)	Ev. Classe A (mm)	Ins (h)	Tbu (°C)	UR
10/1/69	37.7	17.6	25.9	4	12.8	24	
11/1/69	38.4	17.8	27.1	7.8	12.1	25	
12/1/69	40.2	19.8	28.6	6.4	11.7	26	
13/1/69	38	22.3	28.1	8.4	10.2	24	
14/1/69	34.6	21.9	27.4	7.6	9.2	25	

Figura 6 – Tela referente aos dados climatológicos.

4.1.3. Cadastro de propriedades

O sistema computacional considera a propriedade como a unidade básica do sistema. Assim, para executar o monitoramento da distribuição de água ou simulação do consumo de água no perímetro, é necessário efetuar o cadastro das propriedades, que por sua vez conterão as parcelas cultivadas. No cadastro de propriedades são incluídos: o nome da propriedade; proprietário; área da propriedade (ha). O cadastro da propriedade estabelece uma ligação com a base de dados de caracterização física do perímetro, onde são selecionados o setor e o trecho, previamente cadastrados, dos quais a propriedade receberá água, incluído assim a propriedade na rede de distribuição (Figura 7).

Cadastro de Propriedade

Novo Salvar Alterar Cancelar Excluir Relatório Sair

Identificação

Nome da Propriedade: Propriedade 01 Código: 1

Proprietário: Projeto Salinas / PDI-JEPAR Área (há): 5.0128

Setor/Trecho a que pertence:

Setor: Setor A Trecho: Hidrómetro 29 Dist. da fonte d'água (m):

Parcelas:

Novo Salvar Alterar Cancelar Excluir

Parcela	Área (ha)	Cultura	Solo	Fonte d'água
Melão 01/01/2003	2	Melão	Solo Franco	Rio Salin
Melão 22/03/2003	2	Melão	Solo Franco	Rio Salin
Melão 10/06/2003	2	Melão	Solo Franco	Rio Salin
Melão 29/08/2003	2	Melão	Solo Franco	Rio Salin
Melão 17/11/2003	2	Melão	Solo Franco	Rio Salin
Milho 01/01/2003	1	Milho	Solo Franco	Rio Salin

Figura 7 – Tela referente ao cadastro das informações das propriedades.

Após o cadastro da propriedade, habilita-se o cadastro das parcelas dentro da propriedade. A parcela refere-se à área de exploração de uma cultura dentro da propriedade numa dada época do ano. Na inclusão da mesma devem ser informados: o nome da parcela; a cultura a ser plantada, que está previamente cadastrada no banco de culturas; o solo, previamente cadastrado no banco de solos; a fonte de abastecimento d'água, previamente cadastrada no banco de água; o método de irrigação utilizado (*aspersão convencional*, *micro-aspersão*, *gotejamento* ou *pivô central*); as características do equipamento; o turno de rega para a parcela (*variável* ou *fixo*). Na Figura 8 é apresentada a tela referente ao cadastro da parcela. A partir desta interface podem ser acessados as bases de dados de cultura, solo, fonte de água e métodos e equipamentos de irrigação.

Dados da Parcela

Nome da Parcela: Área (ha):

Cultura:

Solo:

Fonte de Água:

Método de Irrigação:

Equipamentos:

Turno de Rega: ☐ Variável ☒ Fixo Dias

Figura 8 – Tela referente ao cadastro da parcela.

Quando a parcela é cadastrada, não significa que a cultura foi plantada. A opção plantar permite efetivar o plantio, sua data, e o espaçamento utilizado, como apresentado na Figura 9.

Plantar Cultura

☒ Cultura Plantada

Data de Plantio:

Espaçamento (m): × ×

Umidade do Solo (% peso):

Figura 9 – Tela referente à informação de data de plantio e espaçamento da cultura.

4.1.4. Cadastro de solos

No cadastro de solo são incluídos os solos presentes no perímetro irrigado, contendo as informações: nome do solo, classe do solo, velocidade de infiltração básica, e uma breve descrição. Cada solo pode ser dividido em até quatro camadas, onde são informados por camada: capacidade de campo (% de peso); ponto de murchamento (% de peso); massa específica (g cm^{-3}); profundidade (m); percentagem de argila (%); percentagem de areia (%); e percentagem de silte (%). Na Figura 10 é apresentada a tela referente ao cadastro do solo com suas respectivas camadas.

4.1.5. Cadastro da fonte d'água

No cadastro da fonte de água para a irrigação devem ser informados: a fonte de água; a vazão captada; e as características físico-químicas da água. Essas informações são úteis para estabelecer a relação da qualidade da água com a sensibilidade da cultura, e estimar a lâmina de lixiviação de sais. Na Figura 11 é apresentada a tela referente ao cadastro da fonte de água.

4.1.6. Cadastro de culturas

No cadastro de culturas devem ser informados, conforme apresentado na Figura 12: o nome da cultura; a variedade ou cultivar; o fator de disponibilidade hídrica; a temperatura basal e ótima (grau Celsius); resistência à salinidade (mmhos cm^{-1}); e o valor de mercado (alto, médio ou baixo).

Cadastro de Solo

Novo Salvar Alterar Cancelar Excluir Relatório Sair

Solo: 4

Solo Franco

Classe: VIB

Descrição: Solo Franco usado para simulação

Camadas:

Novo Salvar Alterar Cancelar Excluir

Camada	Espessura (m)	CC (% peso)	PM (% peso)	Da (g/cm3)	% Argila	% Areia	% Silte
41	0.2	22	10	1.4	0	0	0
42	0.2	22	10	1.4	0	0	0
43	0.2	22	10	1.4	0	0	0

Figura 10 – Tela referente ao cadastro do solo e suas camadas.

Cadastro de Água

Novo Salvar Alterar Cancelar Excluir Relatório Sair

Fonte: 1

Fonte de captação: Rio Salinas Captação 1

Vazão captada (L/s): 50

Características Químicas:

CE (dS/m)	0.01	B (ppm)	4	Na (meq/L)	0.28
PSS (%)	0	SD (ppm)	5	CO ₃ (meq/L)	0
RAS	0.4	Ca (meq/L)	0.7	HCO ₃ (meq/L)	3.2
pH	7	Mg (meq/L)	0.3	SO ₄ (meq/L)	0
				Cl (meq/L)	0

Figura 11 – Tela referente ao cadastro da fonte de água.

Estádio	Duração (dias)	Duração (GD)	kc	Prof. Radicular (m)	Área Sombreada (%)
Emergência	12	200	0.4	0.1	10
Vegetativa	22	340	0.7	0.2	20
Floração	20	300	0.9	0.4	70
Maturação	27	400	0.95	0.5	80
Colheita	15	220	0.35	0.5	10

Figura 12 – Tela referente ao cadastro de culturas.

O desenvolvimento de cada cultura é dividido em estádios, onde devem ser cadastradas as informações: nome do estágio; duração do estágio (dias e graus-dia); coeficiente de cultura, profundidade do sistema radicular (mm); e percentagem de área sombreada (%). A Figura 13 ilustra a tela onde são fornecidos os dados referentes ao estágio de desenvolvimento da cultura.

4.1.7. Cadastro de equipamento de irrigação

O cadastro de equipamentos de irrigação está dividido em quatro módulos: Aspersão Convencional, Micro Aspersão, Gotejamento e Pivô Central e Superfície. Dentro de cada módulo são cadastrados os modelos de diferentes fabricantes dos equipamentos. Os dados referentes ao cadastro do equipamento são bastante úteis quando se pretende fazer a avaliação do sistema de irrigação. A Figura 14 ilustra a tela de cadastro das informações do sistema de irrigação por aspersão, onde são incluídos: o nome do equipamento; o modelo; o fabricante; o diâmetro do bocal do aspersor (mm); pressão de serviço do aspersor (mca); vazão do aspersor ($L s^{-1}$); espaçamento entre aspersores (m); espaçamento entre linhas (m); e coeficiente de uniformidade (%).

Dados do Estádio

Nome do Estádio:

Duração do Estádio:

Duração em dias:

Duração em Graus-dia:

Coefficiente de Cultura:

Kc: ☒ Kc Constante ☐ Kc Variável

Profundidade Radicular:

Profundidade (m):

Área Sombreada:

Área (%):

Figura 13 – Tela referente à entrada de informações do estádio da cultura.

Cadastro de Equipamentos - Aspersão Convencional

Novo Salvar Alterar Cancelar Excluir Relatório Sair

Equipamento

Nome:

Modelo:

Fabricante:

Aspersor

Dímetro do Bocal (mm): ×

Pressão de Serviço (mca):

Vazão do Aspersor (L/s):

Espaçamento

Entre Aspersores (m):

Entre Linhas (m):

Uniformidade

Coefficiente de Uniformidade Christiansen (%):

Figura 14 – Tela referente ao cadastro do equipamento de aspersão convencional.

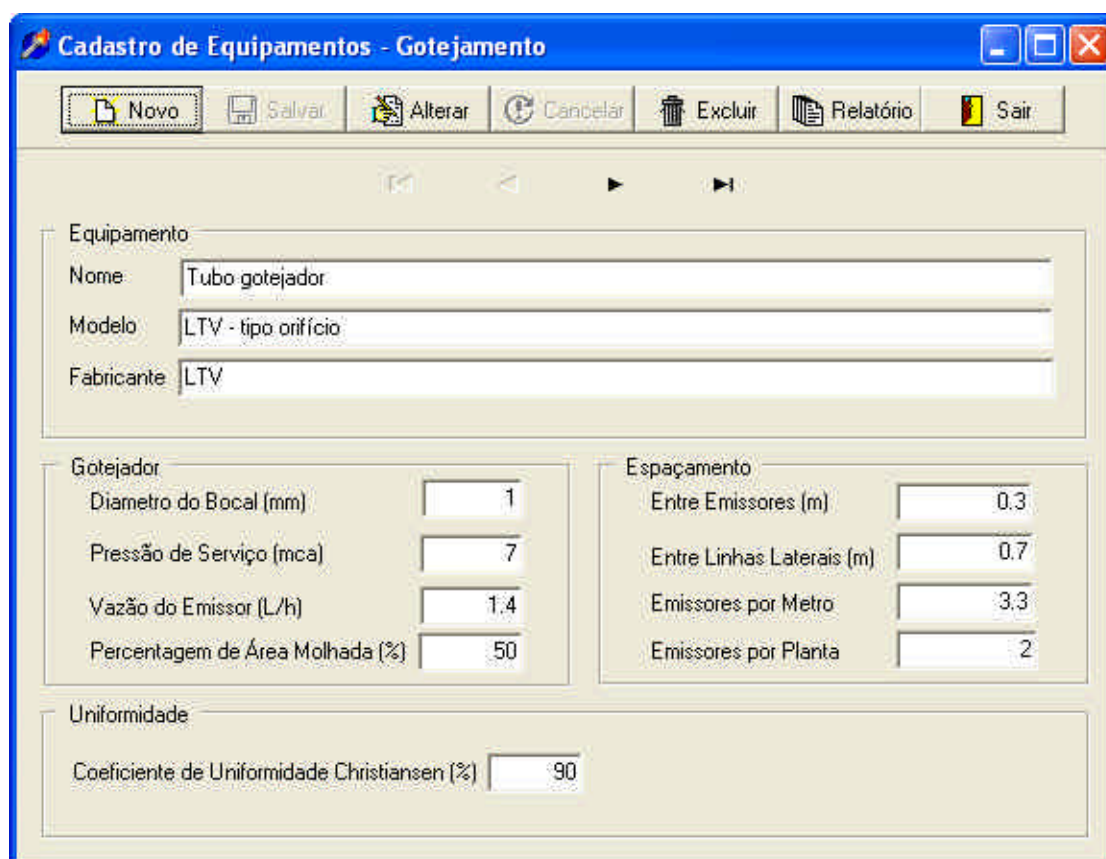
A Figura 15 ilustra os dados necessários para cadastrar um equipamento de irrigação por micro aspersão, onde são informados: o nome do equipamento; o modelo; o fabricante; o diâmetro do bocal do micro aspersor (mm); pressão de serviço do micro aspersor (mca); vazão do emissor ($L\ s^{-1}$); diâmetro molhado (m); espaçamento entre emissores (m); espaçamento entre linhas laterais (m); número de emissor por planta; e coeficiente de uniformidade (%).

A imagem mostra a interface de um software de cadastro de equipamentos de microaspersão. O título da janela é "Cadastro de Equipamentos - Microaspersão". No topo, há uma barra de ferramentas com botões: "Novo", "Salvar", "Alterar", "Cancelar", "Excluir", "Relatório" e "Sair". Abaixo da barra, há uma barra de navegação com setas. O formulário principal é dividido em seções:

- Equipamento:**
 - Nome: Microaspersor 1017
 - Modelo: FERCAL Giratório
 - Fabricante: FERCAL
- Micro Aspersor:**
 - Diâmetro do Bocal (mm): 1.3
 - Pressão de Serviço (mca): 10
 - Vazão do Emissor (L/h): 60
 - Diâmetro Molhado (m): 2.7
- Espaçamento:**
 - Entre Emissores (m): 4
 - Entre Linhas Laterais (m): 6
 - Emissores por Planta: 0.25
- Uniformidade:**
 - Coeficiente de Uniformidade Christiansen (%): 90

Figura 15 – Tela referente ao cadastro do equipamento de microaspersão.

Na Figura 16 são apresentados os dados necessários para cadastrar um equipamento de irrigação por gotejamento, onde são informados: o nome do equipamento; o modelo; o fabricante; o diâmetro do bocal do gotejador (mm); pressão de serviço (mca); vazão do emissor ($L\ s^{-1}$); percentagem de área molhada (%); espaçamento entre emissores (m); número de emissores por metro; número de emissor por planta; e coeficiente de uniformidade (%).



Cadastro de Equipamentos - Gotejamento

Novo Salvar Alterar Cancelar Excluir Relatório Sair

Equipamento

Nome: Tubo gotejador

Modelo: LTV - tipo orifício

Fabricante: LTV

Gotejador

Diametro do Bocal (mm): 1

Pressão de Serviço (mca): 7

Vazão do Emissor (L/h): 1.4

Percentagem de Área Molhada (%): 50

Espaçamento

Entre Emissores (m): 0.3

Entre Linhas Laterais (m): 0.7

Emissores por Metro: 3.3

Emissores por Planta: 2

Uniformidade

Coeficiente de Uniformidade Christiansen (%): 90

Figura 16 – Tela referente ao cadastro do equipamento gotejamento.

A Figura 17 ilustra os dados necessários para cadastrar um equipamento de irrigação tipo pivô central, onde são cadastrados: o nome do equipamento; o modelo; o fabricante; a velocidade do pivô central (m h^{-1}); raio da última torre (m); pressão de serviço (mca); vão em balanço (m); tempo máximo de operação diário (h); diâmetro do menor bocal (mm); diâmetro do maior bocal (mm); vazão (L s^{-1}); e coeficiente de uniformidade (%).

Cadastro de Equipamentos - Pivô Central			
Novo Salvar Alterar Cancelar Excluir Relatório Sair			
Equipamento			
Nome	Pivô Central de Coimbra		
Modelo	Light - PA3 - VL - 1- 88		
Fabricante	ASBRASIL - VALMATIC		
Pivô Central			
Velocidade do Pivô Central (m/h)	125.5	Tempo máximo de operação diário (h)	8
Raio da Última Torre (m)	57.9	Diâmetro do Menor Bocal (mm)	2
Pressão de Serviço (mca)	45	Diâmetro do Maior bocal (mm)	5
Vão em balanço/Faixa irrigada após última torre (m)	24	Vazão (L/s)	3.6
☐ Pivô equipado com emissor tipo LEPA			
Uniformidade			
Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (%)	90		

Figura 17 – Tela referente ao cadastro do equipamento pivô central.

4.2. Demanda de Água no Perímetro Irrigado

A demanda de água para as culturas é obtida individualmente para cada parcela cadastradas no perímetro irrigado. A soma dos consumos de água em cada parcela dentro da propriedade resultará na demanda de água a ser fornecida pelo sistema de distribuição do perímetro para esta propriedade. A vazão em cada trecho da rede de distribuição dependerá do consumo das propriedades que estão alimentadas pelo respectivo trecho e das vazões dos trechos a jusante.

A Figura 18 ilustra o fluxograma representativo das rotinas relativas ao cálculo do volume total diário de água a ser alocado pela rede de distribuição do perímetro. O componente principal desta rotina é o balanço de água no solo, realizado para cada parcela em nível diário. Na simulação do consumo de água, as lâminas de irrigação podem ser estimadas baseando-se na demanda total ou baseada em demanda de irrigação suplementar. Neste último caso, a contribuição da chuva como aporte de água no solo é com base nas precipitações prováveis, obtidas da série histórica dos dados climáticos.

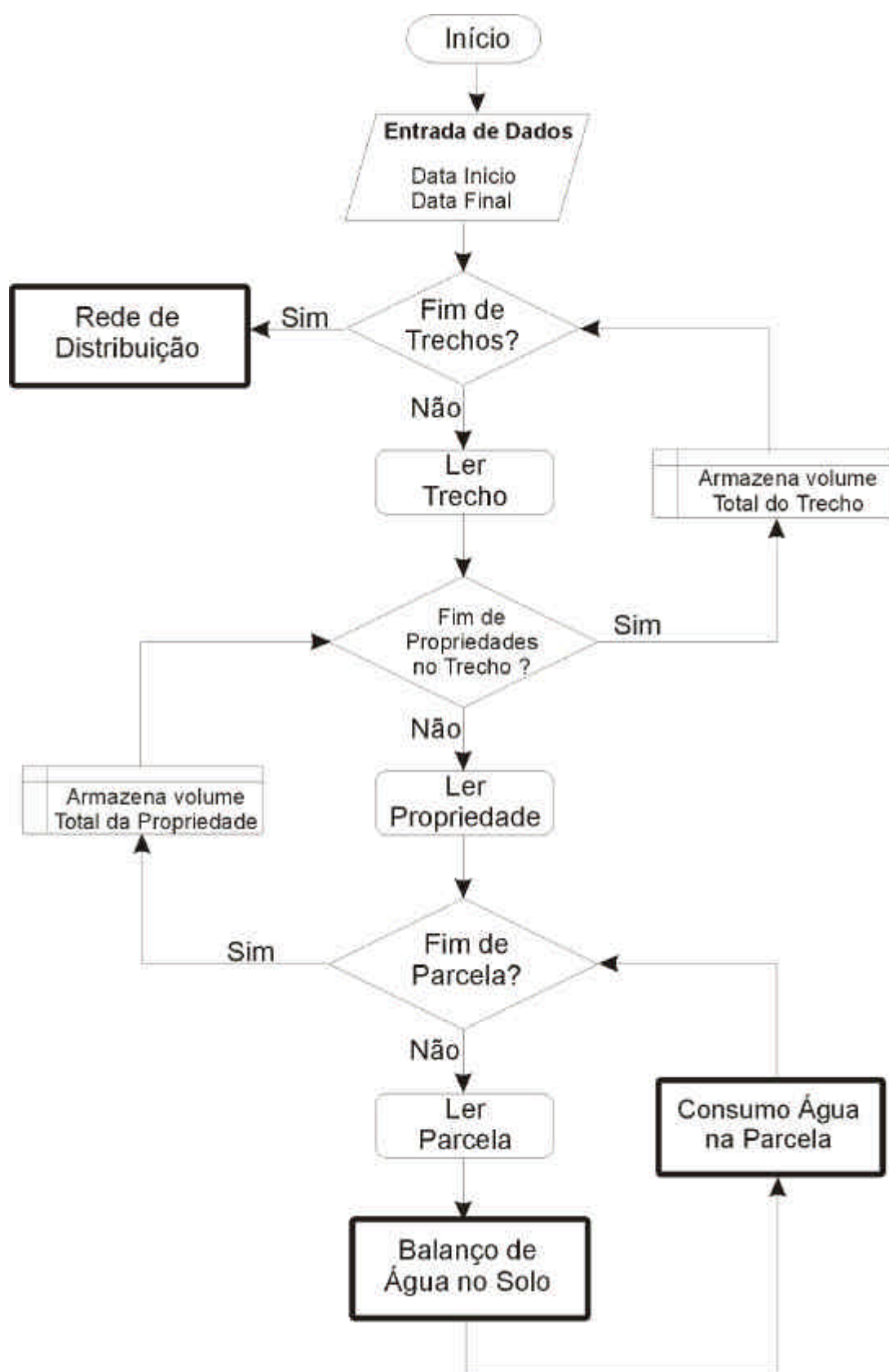


Figura 18 – Fluxograma representativo das rotinas relativas ao cálculo do volume de água no perímetro irrigado.

4.2.1. Estimativa da precipitação provável

A precipitação provável pode ser definida como a quantidade mínima de precipitação com determinada probabilidade de ocorrência. O modelo de distribuição de probabilidade gama incompleta é apropriado para estimar a altura de chuva para períodos chuvosos. O modelo misto, na forma da Equação 1, foi utilizado para estimar a quantidade de precipitação provável, segundo procedimento sugerido por THOM (1966).

$$P(Y \leq y) = P_s + P_c G(Y \leq y) \quad (1)$$

em que

P_s = probabilidade de ocorrência de períodos secos (zeros);
 P_c = probabilidade de chover no período; e
 $G(Y)$ = distribuição da probabilidade gama.

Os procedimentos para solução da equação 1 estão apresentados no Apêndice E.

4.2.2. Estimativa da evapotranspiração máxima da cultura

Para estimar a evapotranspiração máxima da cultura (ET_m) foram utilizados os conceitos de coeficiente de cultura (k_c) e de evapotranspiração de referência (ET_o), conforme a equação 2. Os valores de k_c utilizados nas estimativas da ET_m , para cada fase de desenvolvimento da cultura, foram cadastrados na base de dados das culturas do sistema computacional, considerando os valores sugeridos por DOORENBOS e PRUIT (1977) e DOORENBOS e KASSAN (1979) ou informações de pesquisas locais.

$$ET_m = k_c ET_o \quad (2)$$

A evapotranspiração de referência (ET_o) é uma função das condições climáticas e pode ser estimada usando diferentes métodos, dependendo da disponibilidade de dados climáticos para sua estimativa. O sistema computacional considera o método de Penman-Monteith (ALLEN et al., 1998) como padrão para o cálculo da ET_o, segundo a equação 3. Os procedimentos de cálculo da evapotranspiração de referência pelo método de Penman-Monteith estão apresentados no Apêndice F.

$$ET_o = \frac{0,408\Delta(Rn - G) + g \frac{900}{T + 273} U_2 (ea - ed)}{\Delta + g (1 + 0,34U_2)} \quad (3)$$

em que

- ET_o = evapotranspiração de referência, mm d⁻¹;
- R_n = saldo de radiação na superfície da cultura, MJ m⁻² d⁻¹;
- G = fluxo de calor no solo, MJ m⁻² d⁻¹;
- T = temperatura média diária, °C;
- U₂ = velocidade do vento à 2m de altura, m s⁻¹;
- ea = pressão de saturação de vapor, kPa;
- ed = pressão de vapor, kPa;
- ea - ed = déficit de pressão de vapor, kPa;
- Δ = declividade da curva de pressão de vapor, kPa °C⁻¹; e
- γ = constante psicrométrica, kPa °C⁻¹.

4.2.3. Estimativa da evapotranspiração da cultura

Segundo DOORENBOS e KASSAM (1979), quando a evapotranspiração da cultura (ET_c) for menor que a evapotranspiração máxima (ET_m) ocorre um déficit de evapotranspiração, podendo resultar numa redução da produtividade. O cálculo de ET_c diária, considerando um solo com j camadas, foi feito utilizando a Equação 4.

$$ET_{c_i} = \sum_{j=1}^n k_{s_i} k_{l_i} k_j ET_m \quad (4)$$

em que

K_j = proporção de água retirada do solo na camada j;

ks_i = coeficiente de umidade do solo; e

kl_i = coeficiente de localização.

Os valores de k_j foram considerados em função do número de camadas no solo ocupada pelo sistema radicular, para $1 \leq j \leq n$, como segue:

para $j = 1$, $k_1 = 1,0$;

para $j = 2$, $k_1 = 0,6$ e $k_2 = 0,4$;

para $j = 3$, $k_1 = 0,5$, $k_2 = 0,4$ e $k_3 = 0,1$; e

para $j = 4$, $k_1 = 0,4$, $k_2 = 0,3$, $k_3 = 0,2$ e $k_4 = 0,1$.

O coeficiente de umidade do solo (ks_i), que expressa o efeito do estresse hídrico causado pela diminuição do teor de água do solo, foi calculado pela função logarítmica expressa pela equação 5, como sugerida por BERNARDO (1995).

$$k_s = \frac{\ln(LAA + 1)}{\ln(CTA + 1)} \quad (5)$$

em que

LAA_j = lâmina de água disponível no solo na camada j; e
CTA_j = capacidade total de água no solo na camada j.

O coeficiente de localização, kl, que corrige a ET devido ao efeito de localização, foi calculado pela equação 6.

$$kl_i = Ps_i + 0,15 (1 - Ps_i) \quad (6)$$

em que Ps é igual a percentagem de área sombreada. Caso a área sombreada seja menor do que a área molhada, usa-se a percentagem de área molhada no lugar de Ps.

Para quantificar os elementos do balanço hídrico durante o crescimento e desenvolvimento de uma cultura agrícola, o ciclo da cultura pode ser dividido em estádios de desenvolvimento.

No sistema computacional, a duração de cada estágio pode ser determinada em termos de dias ou de graus-dia. Os graus-dia acumulados (GD) podem ser calculados em função da temperatura média diária (T), da temperatura basal da cultura (T_b) e da temperatura máxima da cultura (T_{max}), com base nas Equações 7 e 8.

$$GD = \sum_{i=1}^n GD_i \quad (7)$$

$$GD_i = \begin{cases} 0, & T_i \leq T_b \quad \text{ou} \quad T_i > T_{\max} \\ T_i - T_b, & T_i \geq T_b \end{cases} \quad (8)$$

em que

GD_i = Graus-dia do i-ésimo dia após o plantio, °C;

T_i = temperatura média do ar do dia i, °C;

T_b = temperatura basal da cultura, °C; e

T_{max} = temperatura máxima da cultura, °C.

4.2.4 – Simulação do balanço de água no solo

Considerando uma cultura com o seu sistema radicular a profundidade D , plantada em um solo dividido em n horizontes, cada horizonte à profundidade Z_j e com as propriedades físico-hídricas capacidade de campo (CC_j), ponto de murchamento (PM_j) e massa específica (Dg_j), para $1 \leq j \leq n$. A equação do balanço hídrico do dia i desse solo é dada pela Equação 9.

$$Lam_i = Lam_{i-1} + Prec_i + Irr_i - ETC_i - Esc_i - Exc_i \quad (9)$$

em que

Lam_i = lâmina de água disponível no solo no dia i , mm;

Lam_{i-1} = lâmina de água disponível no solo no dia $i-1$, mm;

$Prec_i$ = precipitação total do dia i , mm;

Irr_i = irrigação do dia i , mm;

ETC_i = evapotranspiração da cultura no dia i , mm;

Esc_i = escoamento superficial do dia i , mm; e

Exc_i = excesso hídrico do dia i , mm.

O valor da lâmina de água no solo no dia i foi obtido por meio do somatório das lâminas de água em cada camada j do solo, através das equações 10 e 11.

$$Lam_i = \sum_{j=1}^n Lam_{i,j} \quad (10)$$

$$Lam_{i,j} = 10(Umid_{i,j} - PM_j)Dg_jEsp_j \quad (11)$$

em que

$Umid_{i,j}$ = umidade da camada j no dia i, %;

$Lam_{i,j}$ = lâmina de água da camada j no dia i, mm;

PM_j = ponto de murchamento da camada j, %;

Dg_j = massa específica da camada j, g cm⁻³; e

Esp_j = espessura da camada j ocupada pelo sistema radicular, m.

O valor diário do escoamento superficial (Esc_i) foi calculado pela equação 12.

$$Esc_i = Prec_i - Pef_i \quad (12)$$

O valor diário da precipitação efetiva foi calculado de acordo com o modelo proposto por MOTA e OLIVEIRA (1978), através da equação 13.

$$Pef_i = 19,9784 \ln(Prec_i) + [34,6123 - 10,7001 \ln(Prec_i)] \frac{Lam_{i-1,1}}{CTA_{i,1}} - 41,3155 \quad (13)$$

em que

Pef_i = precipitação efetiva do dia i, mm; e

$CTA_{i,1}$ = capacidade total de água da camada 1 do solo no dia i, mm.

O valor diário da capacidade total de água no solo da camada j ($CTA_{i,j}$) foi calculado pela equação 14.

$$CTA_{i,j} = 10(CC_j - PM_j)Dg_jEsp_j \quad (14)$$

em que

CC_j = capacidade de campo da camada j, %.

O valor diário do excesso hídrico (Exc_i) foi calculado pelas equações 15 e 16.

$$Exc_i = \sum_{j=1}^n Exc_{i,j} \quad (15)$$

$$Exc_{i,j} = \begin{cases} Lam_{i,j} - CTA_{i,j}, & Lam_{i,j} > CTA_{i,j} \\ 0, & Lam_{i,j} \leq CTA_{i,j} \end{cases} \quad (16)$$

O valor diário da irrigação (Irr_i), em mm, é igual a irrigação total necessária (ITN_i), a qual foi calculada usando as equações 17 a 20.

$$IRN_i = (CTA_i - f) - Pefet_i \quad (17)$$

$$IRN_i = (CTA_i - LAA_i) - Pefet_i \quad (18)$$

$$CTA_i = \sum_{j=1}^n CTA_{i,j} \quad (19)$$

em que

- IRN_i = irrigação real necessária no dia i, mm.
 f = fator de disponibilidade hídrica, adimensional.
 P_{efet_i} = precipitação efetiva no dia i, mm.

$$ITN_i = \frac{IRN_i}{Epa} \quad (20)$$

em que Epa é igual a eficiência de aplicação baseada na percentagem da área adequadamente irrigada, estimada seguindo a metodologia apresentada por KELLER e BLIESNER (1990), calculada pelas equações 21 a 24.

$$Epa = DEpa \cdot Re \cdot Oe \quad (21)$$

$$DEpa = 100 + [606 - 24,9 pa + 0,349 pa^2 - 0,00186 pa^3] (1 - CU / 100) \quad (22)$$

$$Re = 0,976 + 0,005 ET - 0,00017 ET^2 + 0,0012 VV - CI (0,00043 ET + 0,00018 VV + 0,000016 ET VV) \quad (23)$$

$$CI = 0,032 \frac{P^{1,3}}{B} \quad (24)$$

em que

- $DEpa$ = eficiência de distribuição para área adequadamente irrigada, %.
 Re = porção efetiva de água aplicada que chega a superfície do solo, adimensional
 Oe = porção de água efetivamente aplicada pelo sistema.

O momento da irrigação foi obtido quando $Lam_i \leq IRN_i$. As equações 17 e 18 são aplicadas para os caso de turnos de rega variável e fixo, respectivamente.

4.2.5. Cálculo do volume de água alocado pelo perímetro irrigado

De posse dos valores de irrigação total necessária diária em cada parcela irrigada dentro do perímetro, o volume total diário de água a ser aplicado pelo sistema de distribuição é calculado usando-se as equações 25 e 26.

$$Vol_i = \sum_{L=1}^n Vol_{L,i} \quad (25)$$

$$Vol_L = \sum_{P=1}^n 10 ITN_{P,i} A_P \quad (26)$$

em que

Vol_i = volume de água necessário a ser alocado no perímetro irrigado no dia i, m^3 ;

$Vol_{L,i}$ = volume de água diário a ser alocado para o lote L, em m^3 ;

$ITN_{P,i}$ = irrigação total necessária a ser aplicada na parcela P no dia i, $mm\ d^{-1}$; e

A_P = área da parcela P, ha.

4.2.6. Cálculos da vazão fornecida para as propriedades

O cálculo da vazão fornecida para cada propriedade depende do consumo em cada parcela e sua área de cultivo, dada pelas equações 27 e 28.

$$Q_{L.} = \sum_{P=1}^n Q_P \quad (27)$$

$$Q_P = c \ ITN_P \ A_P \quad (28)$$

em que

- Q_L = vazão fornecida para a propriedade L, em $m^3 \ h^{-1}$;
 Q_P = vazão necessária para a parcela P da propriedade L, em $m^3 \ h^{-1}$;
 ITN_P = irrigação total necessária a ser aplicada na parcela P, no dia i, em $mm \ d^{-1}$; e
 C = 0,4167 [conversão para $m^3 \ h^{-1}$].

4.2.7. Simulação do consumo de água

No módulo simula consumo do sistema computacional podem ser realizadas simulações do consumo de água no perímetro irrigado para um período especificado pelo usuário. A Figura 19 ilustra a tela com os dados necessários para a simulação do consumo de água para um dado período. A simulação é realizada considerando todas as parcelas que estejam plantadas nas propriedades do perímetro irrigado.

Os resultados da simulação são apresentados na parte inferior da tela, que podem ser conferidos pelo usuário os dados sobre o trecho, a propriedade, a parcela, a cultura, a área da parcela, o volume e a vazão simulados. Com o final da simulação, o botão *Balanco na Parcela* é habilitado. Ao se clicar o botão *Balanco na Parcela*, o sistema gera as informações diárias do balanço de água no solo para a parcela que esteja sendo indicada pelo usuário na tabela de resultados. O resultado do balanço de água da parcela pode ser apresentado em forma tabular ou em forma gráfica, para o período simulado, como ilustrado na Figura 20.

Simulação de Consumo de Água

Simular Consumo

☐ Por parcela
☐ Por Propriedade
☐ Por trecho
☐ Por Setor
☒ Todo o Perímetro

Propriedade:
 Parcela:

Intervalo para Simulação

Data Inicial:
 Data Final:
 Tempo simulado: 31 dias

Clima

☒ Série Histórica
☐ Dados Reais
 Cálculo da ETo:

Irrigação

☐ Total
☒ Suplementar

Probabilidades

Precipitação - %:

Fases da Cultura

Duração da fase:

Resultado

Trecho	Propriedade	Parcela	Cultura	Area (ha)	Volume (m3)	Vazão (m3/h)
46	Propriedade 25	Banana	Banana	2	926.85	38.62
46	Propriedade 25	Milho 01/01/2003	Milho	1		
46	Propriedade 25	Feijão 01/11/2003	Feijão	1		
47	Propriedade 24	Banana	Banana	2	926.85	38.62
47	Propriedade 24	Milho 01/01/2003	Milho	1		

Figura 19 – Tela referente à simulação de consumo de água.

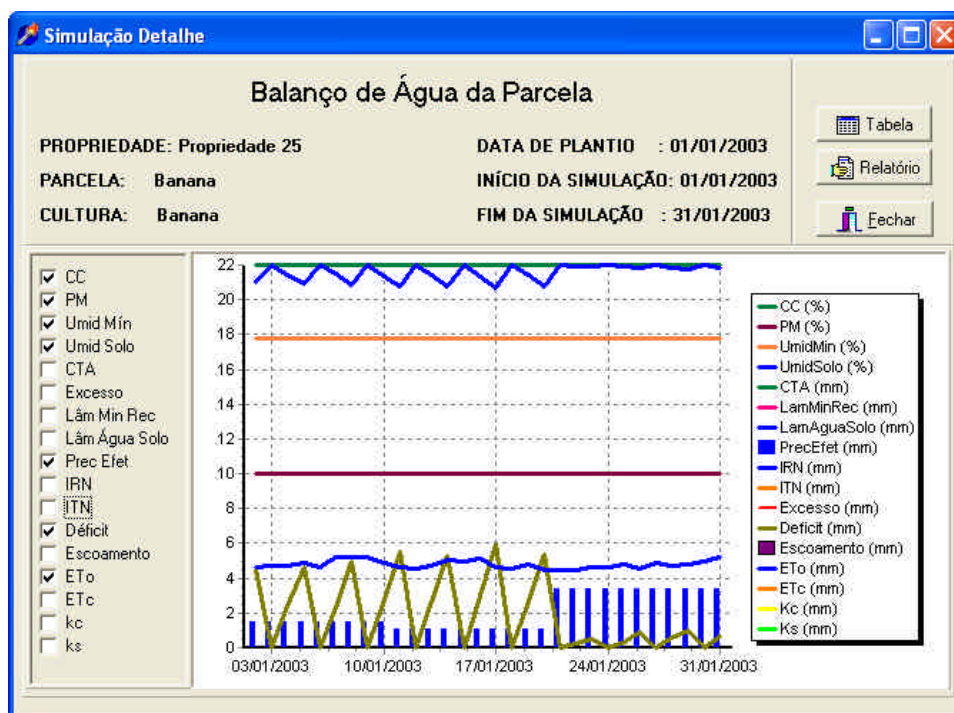


Figura 20 – Tela referente à evolução dos valores dos componentes do balanço de água no solo, para o período simulado, para a parcela selecionada.

Através da simulação do consumo de água no perímetro o sistema habilita a opção para acesso à rede de distribuição de água, clicando o botão *Rede de Distribuição*, onde são informadas, graficamente, a variação espacial da vazão distribuída ao longo dos trechos de distribuição e a indicação das propriedades que estão recebendo água naquele momento.

Os dados necessários para efetuar uma simulação de consumo de água são carregados a partir da base de dados do sistema, tornando mais eficiente o manuseio do mesmo pelo usuário.

4.3. Distribuição de água no perímetro irrigado

Para a caracterização física do perímetro irrigado, o mesmo foi dividido em setores, e cada setor foi composto por uma rede de distribuição de água. A rede de distribuição de água foi dividida em segmentos denominados de trechos. Os trechos podem ser caracterizados pelos seus atributos, os quais foram transformados em variáveis cujos valores podem ser quantificados ao longo do tempo. Cada segmento possui propriedade de oferta e de demanda, possibilitando analisar a variação espaço-temporal da distribuição de água no perímetro.

4.3.1. Modelagem da rede de distribuição de água no perímetro irrigado

O modelo de representação da distribuição de água compreende a rede de distribuição, que é formada pelos trechos, e o perímetro irrigado, representado pela integração dos trechos. LEAL et al. (2003), propuseram um modelo matemático para representar a dinâmica de bacias hidrográficas e seus corpos d'água, sendo capaz de representar as características mais importantes de bacias hidrográficas e suas variações espaço-temporais a partir de seus corpos d'água os quais são divididos em segmentos. Um corpo d'água pode ser um rio, um lago, uma represa, dentre outros. Esse modelo foi, então, utilizado para representar a rede de distribuição de água no perímetro. Os atributos da rede de

distribuição podem ser transformados em variáveis cujos valores podem ser quantificados ao longo do tempo

O perímetro irrigado P_p , composto por ntp trechos T_{pt} , $t=1,..., ntp$, pode ser representado pela equação 29.

$$P_p = \{T_{pt}\}_{t=1}^{ntp} \quad (29)$$

em que

- P = perímetro irrigado p ;
- T_{pt} = trecho t do perímetro irrigado p ; e
- ntp = número de trechos do perímetro p .

A representação matemática de um trecho deve possuir parâmetros capazes de o identificar univocamente dentro do perímetro irrigado e de guardar suas características mais relevantes. Assim, um trecho T_{pt} pode ser representado pela equação 30, considerando suas propriedades de oferta e de demanda. Cada uma dessas propriedades pode ainda ser representada pela equação 31.

$$T_{pt} = \{Oferta, Demanda\} \quad (30)$$

$$X_{ptx} = \{Y_{ptxi}, F_{ptxi}\}_{i=1}^{ntpx} \quad (31)$$

em que

- X, x = propriedades de ofertas e de demandas do trecho;
- Y = valor quantitativo ou qualitativo da variável i da propriedade X do trecho t do perímetro irrigado p ;

- F = descrição da variável i da propriedade X do trecho t do perímetro p ; e
- n_{ptx} = número de variáveis da propriedade X .

Dessa forma, a rede de distribuição de água no perímetro irrigado e sua variação espaço-temporal, H , pode ser representada pela equação 32.

$$H = \left\{ D_h, \left\{ \left\{ Y_{hptri}, F_{hptri} \right\}_{i=1}^{n_{ptr}}, \dots, \left\{ Y_{hptli}, F_{hptli} \right\}_{i=1}^{n_{ptl}} \right\}_{t=1}^{n_{pt}} \right\}_{p=1}^{n_p} \right\}_{h=1}^{nh} \quad (32)$$

em que

- H = variação espaço-temporal da rede de distribuição de água do perímetro irrigado;
- D = período de tempo da observação de valores quantitativos ou qualitativos da rede de distribuição de água do perímetro irrigado; e
- nh = número de observações realizadas na rede de distribuição de água no perímetro irrigado.

4.3.2. Monitoramento da distribuição de água no perímetro irrigado

O monitoramento da distribuição de água diz respeito ao manejo em tempo real do perímetro irrigado, ou seja, diariamente é executado o balanço de água no solo para todas as parcelas e gerado o consumo de água no perímetro. Para o dia manejado o sistema oferece a opção de verificação do *status* de umidade do solo, onde são informadas as variações dos valores dos componentes do balanço de água no solo até o dia da manejado. Uma vez calculadas, as demandas das parcelas são, então, passadas para os respectivos trechos de

distribuição de água responsável pelo abastecimento das propriedades a eles associados na forma de vazão.

O sistema computacional, a partir da base de dados que caracteriza a rede de distribuição, através dos trechos, configura uma árvore n-ária com todos os componentes da rede de distribuição. A partir desta árvore traça-se o desenho da rede de distribuição, seus trechos e elementos constituintes, como as propriedades. Gerada a interface gráfica, a variação espacial das vazões na rede de distribuição pode ser visualizada, indicada pela variação de cores de acordo com o valor da vazão em cada trecho, com cores mais fortes para os maiores valores de vazão, como ilustrada na Figura 21.

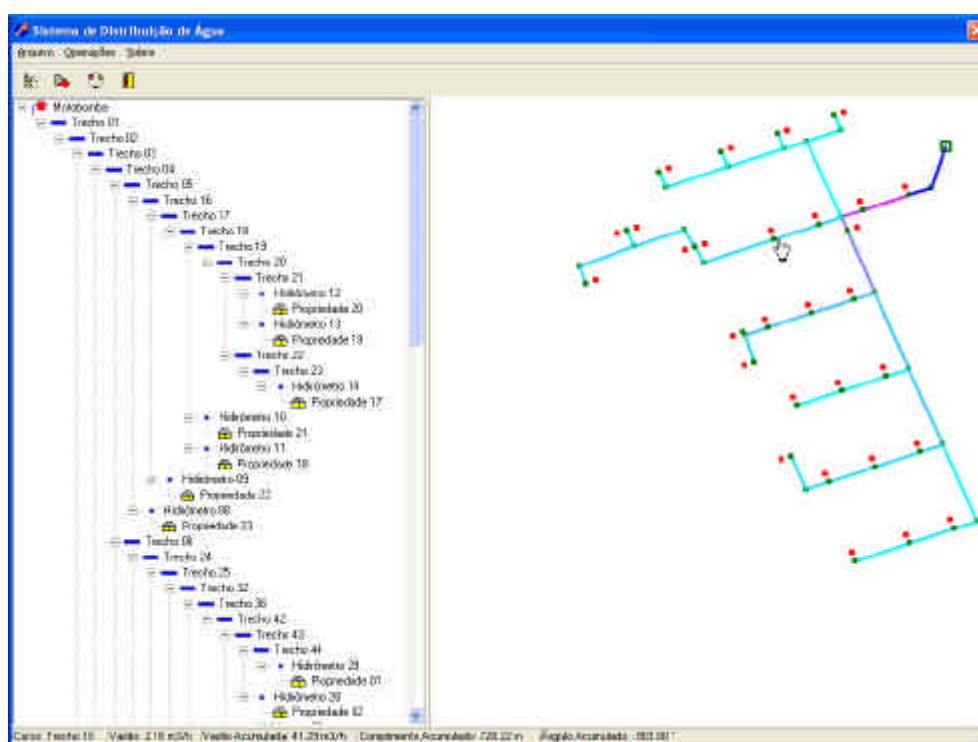


Figura 21 – Tela referente ao monitoramento da rede de distribuição de água no perímetro irrigado, destacando os trechos da rede de distribuição e sua árvore de controle.

A partir dessa interface poderão ser consultadas as vazões que passam em cada trecho e a vazão demanda naquele trecho, selecionando-se o elemento a partir da representação gráfica da árvore ou diretamente da figura que materializa

a rede de distribuição. Tendo sido selecionado o elemento, o sistema faz uma busca na árvore de controle para identificar sua posição na figura e calcula a vazão que está passando naquele ponto, bem como a que está sendo retirada naquele ponto. Os valores de vazão gerados nessa interface podem ser visualizados na parte inferior da tela ou habilitando-se o formulário com o resumo das características do elemento selecionado, como ilustrado na Figura 22.

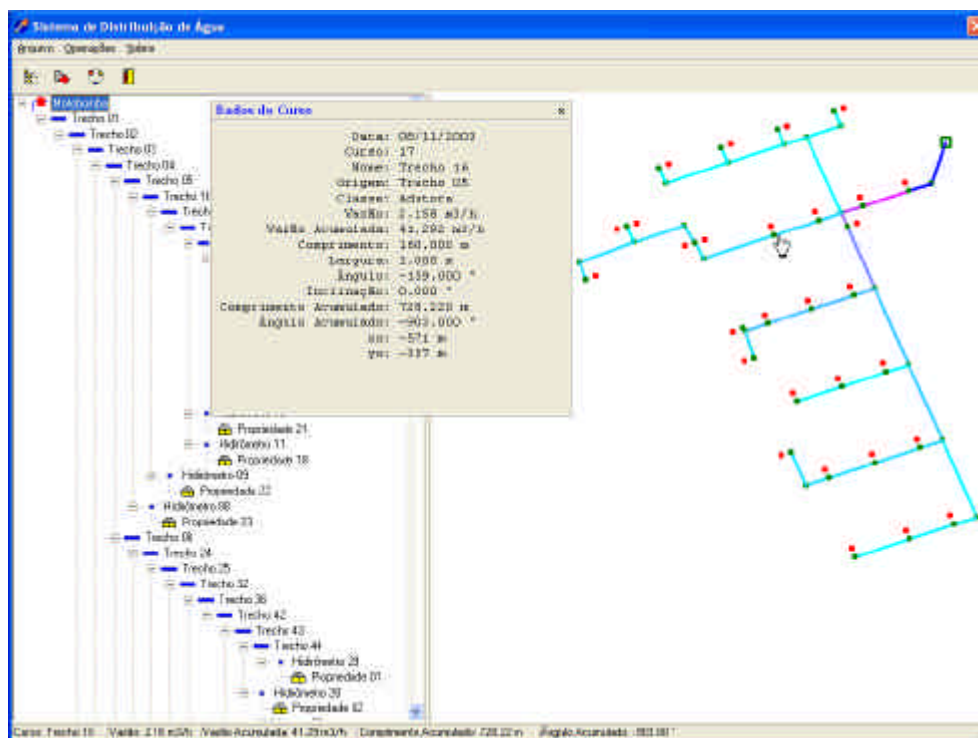


Figura 22 – Tela referente ao monitoramento da rede de distribuição de água no perímetro irrigado, destacando as informações em tempo real de determinado trecho da rede de distribuição.

5. SIMULAÇÃO DO GERENCIAMENTO DA DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA NO PERÍMETRO IRRIGADO DE SALINAS, MINAS GERAIS

Com o objetivo de testar a aplicação do modelo computacional, foi realizado um estudo de caso para o gerenciamento da distribuição de água no perímetro irrigado de Salinas, Minas Gerais. No estudo foi estabelecido um cenário de exploração de cultura ao longo de um ano, considerando as diversas culturas implantadas, as características do solo, da água e dos sistemas de irrigação utilizados para o fornecimento de água.

Os resultados da aplicação do modelo computacional foram analisados em relação à quantidade de água para irrigação das culturas e a distribuição de água para as propriedades, através dos trechos da rede de distribuição de água do perímetro irrigado.

5.1. Local do Estudo

O modelo computacional foi testado utilizando-se os dados do projeto de irrigação do perímetro irrigado de Salinas, localizado no município de Salinas-MG, região Nordeste de Minas Gerais, o qual faz parte da bacia hidrográfica do

Rio Jequitinhonha, cujas coordenadas geográficas são: 16° 10' de latitude Sul e 42° e 17' de longitude Oeste e a 471 m de altitude.

O clima da região é semi-árido predominantemente quente por quase todos os meses do ano, que se caracteriza por um período de seca marcante, com chuvas mal distribuídas e um outro período de chuvas torrenciais e espaçadas. O perímetro irrigado abrange uma área irrigada de 450 ha e tem como fonte hídrica o rio Salinas. O mapa do perímetro irrigado, a área selecionada para o estudo e a rede de distribuição de água, suas propriedades e os trechos de distribuição estão ilustrados nas Figuras 1A a 3A, do Apêndice A, respectivamente.

A área selecionada é composta por 29 propriedades, e cada propriedade foi dividida em três parcelas, que foram cultivadas durante todo o ano (Quadro 1B, do Apêndice B).

5.2. Característica do Solo

Para as simulações foi considerado um solo de textura média dividido em três camadas com profundidades de 0,20 m, cada camada. As características físico-hídricas consideradas foram a umidade do solo à capacidade de campo igual a 22%, em base peso; umidade equivalente ao ponto de murcha permanente igual a 10%, em base peso; e a massa específica do solo igual a 1,4 g cm⁻³.

5.3. Culturas Utilizadas

Cada parcela da propriedade correspondeu a uma cultura implantada. Dessa forma, uma parcela, com área de 2 ha recebeu uma cultura principal e as duas outras parcelas receberam culturas de exploração secundária, composta de culturas anuais. Como culturas principais foram selecionados o melão, a banana, o maracujá e o abacaxi. As de exploração secundária foram o milho e o feijão. No Quadro 1B, do Apêndice B, estão relacionadas as culturas exploradas nas

propriedades. As características agronômicas de cada cultura estão relacionadas no Quadro 1C e 2C, do Apêndice C. Para as culturas anuais, foram efetuados vários plantios ao longo do ano, de modo que a área da propriedade estivesse sempre ocupada com a cultura durante todo o ano. As datas de plantio de cada cultura pode ser consulta no Quadro 1B, do Apêndice B.

5.4. Base de Dados Climatológicos

Devido à ausência de dados climatológicos do município de Salinas, foram utilizados os dados do município de Araçuaí, dada as mesmas características climáticas e por pertencer à mesma região climaticamente homogênea. O cálculo da demanda evapotranspirativa e da precipitação provável, foram baseados em série histórica de 18 anos de dados pertencente ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET).

5.5. Equipamentos de Irrigação

Os equipamentos de irrigação foram utilizados de acordo com a cultura explorada. Assim, para as culturas do abacaxi, milho e feijão foi utilizado o sistema de irrigação por aspersão; para as culturas do melão e do maracujá foi utilizado o sistema por gotejamento; e para a cultura da banana utilizou-se o sistema por microaspersão. No Quadro 1D, do Apêndice D, são apresentadas as características dos equipamentos de irrigação utilizados.

Para as culturas irrigadas por aspersão, foi adotado turno de rega variável; e, para as culturas sob irrigação localizada e microaspersão, foi estabelecido um turno de rega de três dias.

5.6. Simulações Realizadas

Foram realizadas simulações para todos os meses do ano, obtendo-se o consumo total e médio de cada mês, para se verificar os meses de alto, médio e baixo consumo de água no perímetro irrigado. Para cada mês foi simulado o consumo de água no 15º dia para verificar o consumo de água nesses dias e a necessidade de distribuição de água nos trechos da rede de distribuição do perímetro.

As simulações foram realizadas considerando irrigação suplementar; o método de Penman-Monteith, para o cálculo da evapotranspiração de referência; e a precipitação provável foi estimada para um nível de 75% de probabilidade.

5.7. Resultados e Discussão

5.7.1. Quantidade de água para irrigação

Para o gerenciamento diário da distribuição da água no perímetro irrigado, o modelo computacional calcula a quantidade de água a ser aplicada às culturas, de forma a suprir a lâmina de água deficitária no solo, tomando como base a lâmina mínima requerida ou o turno de rega fixo das culturas.

- Lâmina de evapotranspiração e precipitação provável

A evolução sazonal dos valores de evapotranspiração de referência (ET_o), da precipitação provável e do saldo de radiação solar estão apresentadas na Figura 23. Verifica-se que, com exceção dos dois últimos decêndios, ao longo do ano a lâmina evapotranspirada excede aos valores de precipitação provável, enfatizando a necessidade de irrigação suplementar das culturas implantadas no perímetro de Salinas para as épocas de chuva e irrigação total no período seco.

Observa-se que, considerando os valores médios da série histórica, a ETo variam de aproximadamente 2,7 mm d⁻¹, em junho, a 5,8 mm d⁻¹, em janeiro. Esses valores são consequência principalmente da evolução do saldo da radiação solar ocorrido ao longo do ano, que governa o processo de evapotranspiração.

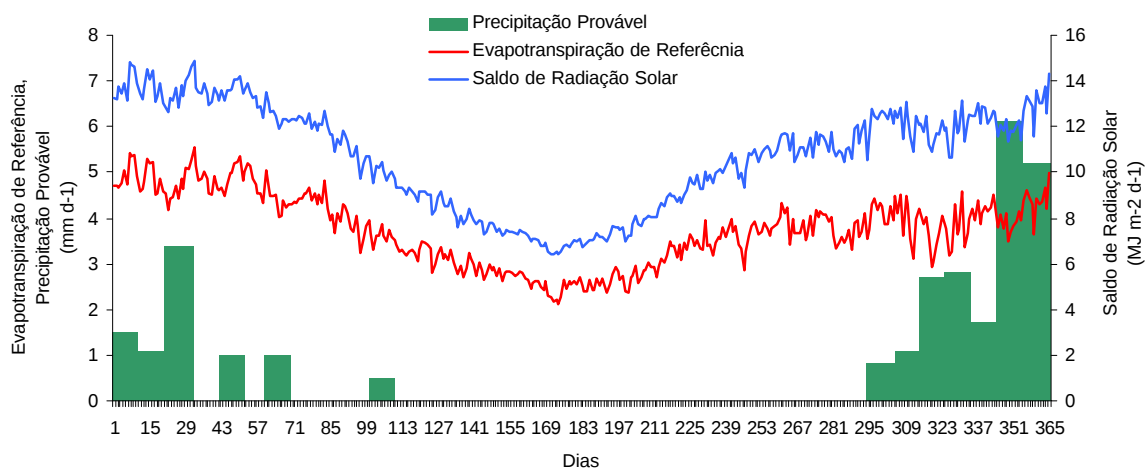


Figura 23 – Variação sazonal da precipitação provável e da evapotranspiração de referência para o perímetro irrigado de Salinas.

Os valores de precipitação provável revelam a existência de uma estação chuvosa e uma estação seca bem definidas na região de Salinas. O período da estação chuvosa concentrando-se do final de outubro ao início de março, enquanto a estação seca estende-se de abril ao início de outubro. Observa-se, ainda, a ocorrência de períodos secos durante a estação chuvosa, principalmente no mês de fevereiro, caracterizado como veranico.

Os maiores valores de precipitação pluvial, que ocorrem no mês de dezembro, são suficientes para satisfazer as necessidades hídricas das culturas, considerando-se apenas a demanda atmosférica neste período.

Salienta-se que os valores de precipitação provável referem-se à quantidade mínima de chuva que poderá ocorrer dentro do nível de probabilidade, ou seja, assegura-se que chova a quantidade estimada ou mais para determinado período. Neste caso, os valores de precipitação provável podem

ser utilizados nas simulações visando o planejamento futuros das necessidades hídricas das culturas baseadas em lâmina de irrigação suplementar.

- Lâmina de água e volume necessário para irrigação

As informações sobre a lâmina de irrigação das culturas são utilizadas para subsidiar a tomada de decisão sobre a necessidade de irrigação das culturas e orientar os irrigantes a respeito da época de irrigação e da quantidade de água a ser alocada para a propriedade. Neste caso, o modelo computacional efetua, diariamente, o manejo de irrigação por parcela e informa a necessidade ou não de irrigação para o dia em questão. Na simulação, poderá ser prevista com antecedência situações de consumo de água no futuro em todas as propriedades do perímetro, auxiliando o planejamento da distribuição de água.

Nos Quadros 1 a 4 estão apresentados os valores de lâmina de água necessária para irrigação simulada para as diversas culturas exploradas nas propriedades, para os meses de janeiro a dezembro. Esses valores foram simulados considerando a demanda de irrigação suplementar.

Quadro 1 – Lâmina de água para irrigação, em mm, simulada para diferentes culturas ao longo do ano, para as propriedades 1, 2, 3, 4, 5, 10 e 14

Cultura	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.
Melão 1	171,0	400,6	193,9									
Melão 2			33,2	299,6	457,4							
Melão 3						87,3	399,4	290,9				
Melão 4								2,1	224,4	484,4		
Melão 5											25,0	193,6
Milho 1	11,0	118,0	128,1	52,4								
Milho 2						87,0	101,3	52,2				
Milho 3										70,9	40,3	53,1
Feijão 1												
Feijão 2			60,1	87,0	96,9							
Feijão 3							43,9	94,3	98,7			
Feijão 4												

Quadro 2 – Lâmina de água para irrigação, em mm, simulada para diferentes culturas ao longo do ano, para a propriedade 6, 9, 15, 18, 19, 20, 21 e 29

Cultura	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.
Maracujá	41,9	153,6	265,5	366,0	518,1	570,0	612,9	622,8	628,0	682,7	570,4	542,2
Milho 1	11,0	118,0	128,1	52,4								
Milho 2						87,0	101,3	52,2				
Milho 3										70,9	40,3	53,1
Feijão 1												
Feijão 2			60,1	87,0	96,9							
Feijão 3							43,9	94,3	98,7			
Feijão 4												

Quadro 3 – Lâmina de água para irrigação, em mm, simulada para diferentes culturas ao longo do ano, para a propriedade 7, 8, 12, 16, 17, 24 e 25

Cultura	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.
Banana	35,1	137,6	177,5	189,2	218,5	204,3	222,8	260,8	302,7	338,2	226,4	147,6
Milho 1	11,0	118,0	128,1	52,4								
Milho 2						87,0	101,3	52,2				
Milho 3										70,9	40,3	53,1
Feijão 1	0,0											
Feijão 2			60,1	87,0	96,9							
Feijão 3							43,9	94,3	98,7			
Feijão 4											0,0	0,0

Quadro 4 – Lâmina de água para irrigação, em mm, simulada para diferentes culturas ao longo do ano, para a propriedade 11, 13, 22, 23, 26, 27, e 28

Cultura	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.
Abacaxi	7,7	60,8	57,8	55,6	60,4	50,1	55,8	78,8	85,7	111,0	23,2	24,2
Melão 1	171,0	400,6	193,9									
Melão 2			33,2	299,6	457,4							
Melão 3						87,3	399,4	290,9				
Melão 4								2,1	224,4	484,4		
Melão 5											25,0	193,6
Milho 1	11,0	118,0	128,1	52,4								
Milho 2						87,0	101,3	52,2				
Milho 3										70,9	40,3	53,1

Analisando os valores de lâminas de irrigação verificou-se que o mês de outubro é o que apresenta maior exigência em lâminas de água para irrigação na maioria das propriedades. Apesar do mês de outubro apresentar taxas médias de demanda evapotranspirativa, a maioria das culturas está na fase de floração/maturação, quando apresentam coeficientes de cultura (k_c) máximos dos seus ciclos, necessitando de elevadas quantidades de água para o seu desenvolvimento, sendo as culturas da banana e do maracujá as principais responsáveis pela alta exigência hídrica neste mês. Ademais, não há nenhuma contribuição de precipitação provável para o balanço de água no solo neste mês, configurando uma situação de irrigação com base na demanda total.

O mês de abril apresenta uma condição de consumo médio de água no perímetro irrigado. A demanda evapotranspirativa neste mês apresenta uma tendência de aumento, contudo, algumas culturas anuais estão no final ou no início de seus ciclos, apresentando um k_c baixo e, conseqüentemente, baixa exigência hídrica, como no caso da cultura do melão, ilustrada nas Figuras 24 e 25, onde se verifica que no mês de setembro a cultura encontra-se, em sua maior parte, na fase inicial e na fase de crescimento vegetativo. Neste mês, examinando-se os Quadros 1 a 4, verificou-se que o principal responsável pelo consumo de água foi a cultura da banana.

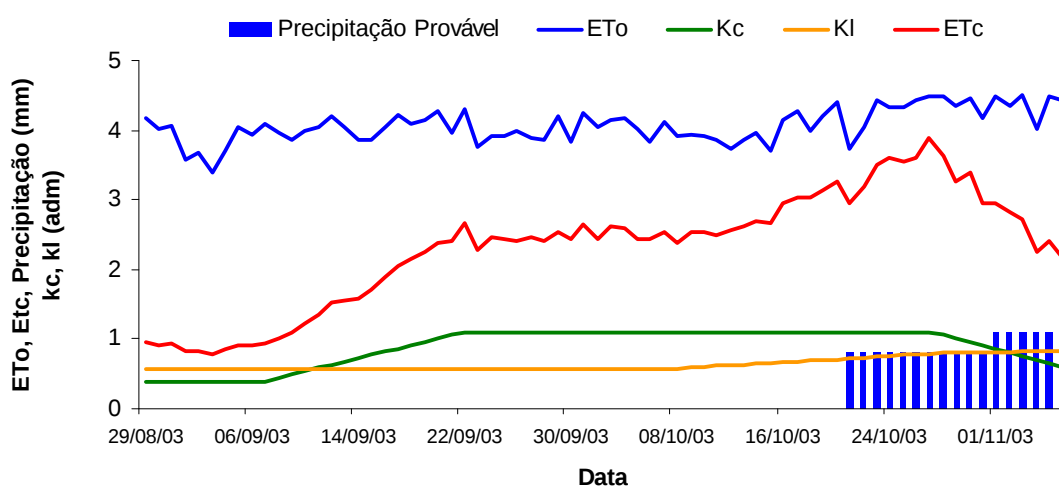


Figura 24 – Evapotranspiração de referência diária, precipitação provável, coeficiente de localização, evapotranspiração da cultura e coeficiente da cultura do melão, plantado em 29 de agosto.

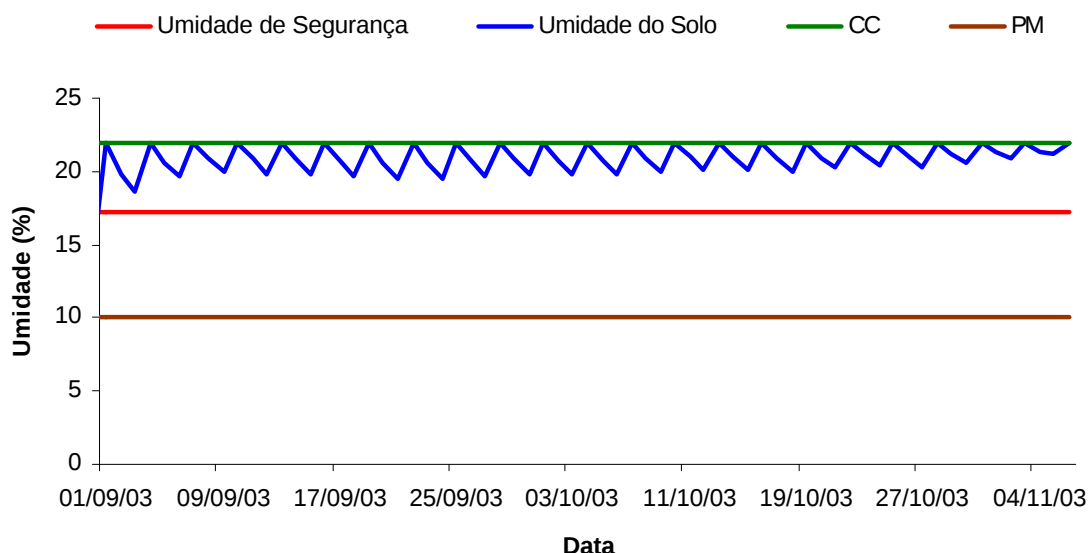


Figura 25 – Umidade diária do solo no solo cultivado com a cultura do melão, plantado em 29 de agosto de 2003.

O menor consumo de lâmina de água para irrigação ao longo do ano foi observado nos meses de janeiro e dezembro que, apesar da ocorrência de altas taxas de evapotranspiração, apresenta quantidades de precipitação provável suficiente para suprir as necessidades hídricas da maioria das culturas no perímetro. Nas Figuras 26 e 27 são ilustradas a variação da lâmina de água no solo para as culturas do abacaxi e cultura da banana. Como pode ser observado, nos dois últimos decêndios do mês de dezembro não há necessidade de irrigação; a precipitação provável é suficiente para manter a umidade do solo na capacidade de campo.

A partir das necessidades hídricas das culturas, o modelo computacional gera os volumes de água necessários para irrigação das culturas nas propriedades. Esses volumes são transferidos para a rede de distribuição de água do perímetro irrigado na forma de vazões, que serão alocadas para as propriedades.

No Quadro 5 são apresentados os volumes mensais de água simulados para irrigação das culturas para as propriedades do perímetro irrigado. Em média, os meses de janeiro e novembro são os que apresentam menores volumes de água necessários à irrigação do perímetro, anteriormente justificado em função da ocorrência da precipitação provável, que contribui com o aporte de água para o

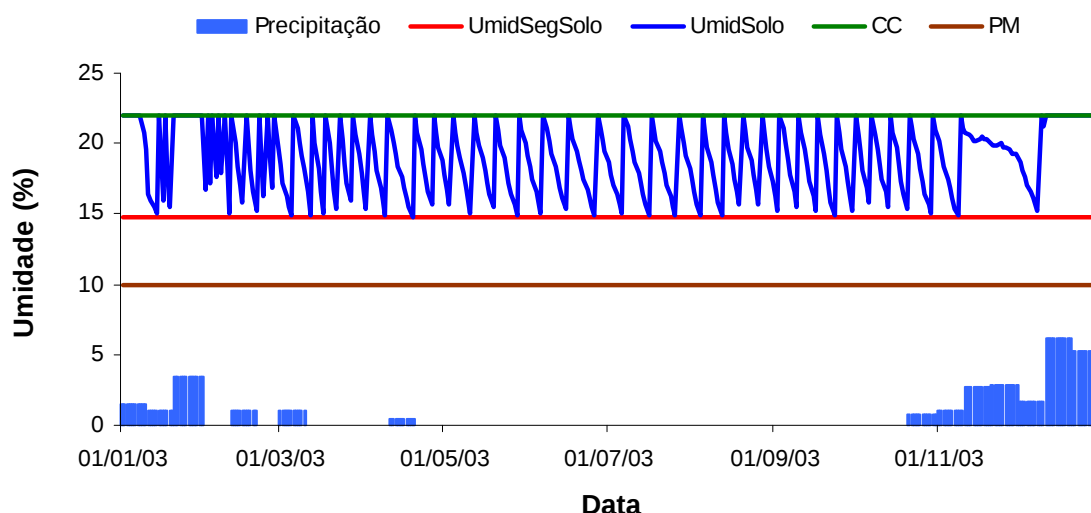


Figura 26 – Umidade da água no solo, ao longo do ano, para a cultura do abacaxi, plantado em 1º de janeiro de 2003.

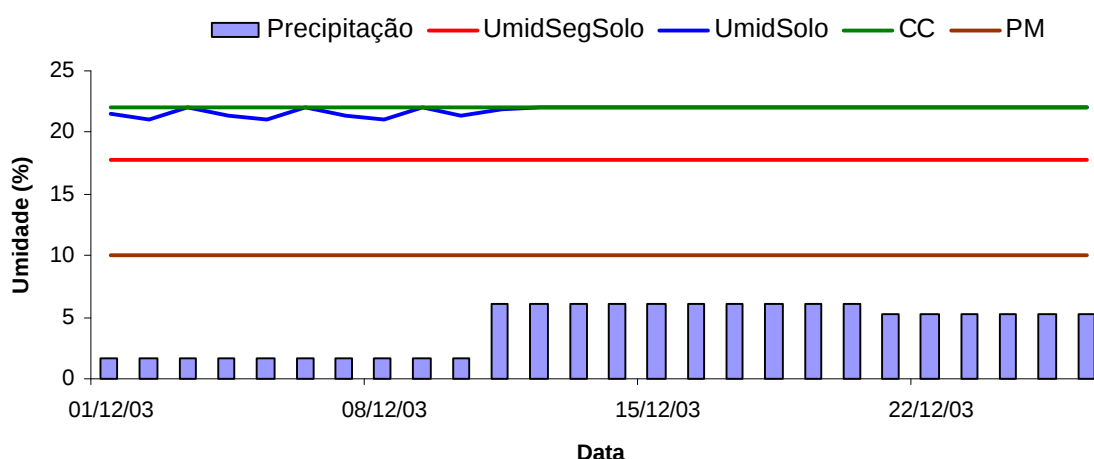


Figura 27 – Umidade do solo para a cultura da banana, no mês de dezembro.

solo. No Quadro 5, observa-se um baixo consumo médio de água no mês de junho, como pode ser verificado na Figura 28, principalmente ocasionado pela baixa taxa de evapotranspiração ocorrida neste período. Os maiores volumes de água necessários para irrigação foram observados no mês de outubro.

Examinando os Quadros 1 a 4 e o Quadro 5, pode-se verificar que as propriedades cujas áreas eram exploradas com a cultura do abacaxi, como cultura principal, foram as que apresentaram menor volume necessário à irrigação ao

Quadro 5 – Volume de água simulado para irrigação, em m³, para as propriedades do perímetro irrigado de Salinas, ao longo do ano de 2003

Propriedade	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.	Total
Propriedade 1	3531,4	9191,6	6424,3	7387,2	10117,3	2615,4	9440,3	7324,4	5474,9	10395,8	903,9	4403,0	77209,5
Propriedade 2	3531,4	9191,6	6424,3	7387,2	10117,3	2615,4	9440,3	7324,4	5474,9	10395,8	903,9	4403,0	77209,5
Propriedade 3	3531,4	9191,6	6424,3	7387,2	10117,3	2615,4	9440,3	7324,4	5474,9	10395,8	903,9	4403,0	77209,5
Propriedade 4	3531,4	9191,6	6424,3	7387,2	10117,3	2615,4	9440,3	7324,4	5474,9	10395,8	903,9	4403,0	77209,5
Propriedade 5	3531,4	9191,6	6424,3	7387,2	10117,3	2615,4	9440,3	7324,4	5474,9	10395,8	903,9	4403,0	77209,5
Propriedade 6	948,9	4253,1	7192,9	8715,8	11332,1	12269,9	13710,4	13920,4	13547,5	14362,4	11810,8	11374,6	123438,9
Propriedade 7	812,2	3932,1	5431,2	5179,6	5339,0	4956,5	5908,7	6680,4	7041,4	7473,3	4931,5	3483,2	61169,0
Propriedade 8	812,2	3932,1	5431,2	5179,6	5339,0	4956,5	5908,7	6680,4	7041,4	7473,3	4931,5	3483,2	61169,0
Propriedade 9	948,9	4253,1	7192,9	8715,8	11332,1	12269,9	13710,4	13920,4	13547,5	14362,4	11810,8	11374,6	123438,9
Propriedade 10	3531,4	9191,6	6424,3	7387,2	10117,3	2615,4	9440,3	7324,4	5712,7	10395,8	903,9	4403,0	77447,4
Propriedade 11	1974,9	6402,0	4707,9	4633,5	5782,6	2743,8	6123,2	5028,8	3957,7	7772,0	1118,3	2950,5	53195,2
Propriedade 12	812,2	3932,1	5431,2	5179,6	5339,0	4956,5	5908,7	6680,4	7041,4	7473,3	4931,5	3483,2	61169,0
Propriedade 13	1974,9	6402,0	4707,9	4633,5	5782,6	2743,8	6123,2	5028,8	3957,7	7772,0	1118,3	2950,5	53195,2
Propriedade 14	3531,4	9191,6	6424,3	7387,2	10117,3	2615,4	9440,3	7324,4	5712,7	10395,8	903,9	4403,0	77447,4
Propriedade 15	948,9	4253,1	7192,9	8715,8	11332,1	12269,9	13710,4	13920,4	13547,5	14362,4	11810,8	11374,6	123438,9

Continua...

Quadro 5, cont.

Propriedade	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.	Total
Propriedade 16	812,2	3932,1	5431,2	5179,6	5339,0	4956,5	5908,7	6680,4	7041,4	7473,3	4931,5	3483,2	61169,0
Propriedade 17	812,2	3932,1	5431,2	5179,6	5339,0	4956,5	5908,7	6680,4	7041,4	7473,3	4931,5	3483,2	61169,0
Propriedade 18	948,9	4253,1	7192,9	8715,8	11332,1	12269,9	13710,4	13920,4	13547,5	14362,4	11810,8	11374,6	123438,9
Propriedade 19	948,9	4253,1	7192,9	8715,8	11332,1	12269,9	13710,4	13920,4	13547,5	14362,4	11810,8	11374,6	123438,9
Propriedade 20	948,9	4253,1	7192,9	8715,8	11332,1	12269,9	13710,4	13920,4	13547,5	14362,4	11810,8	11374,6	123438,9
Propriedade 21	948,9	4253,1	7192,9	8715,8	11332,1	12269,9	13710,4	13920,4	13547,5	14362,4	11810,8	11374,6	123438,9
Propriedade 22	1974,9	6402,0	4707,9	4633,5	5782,6	2743,8	6123,2	5028,8	3957,7	7772,0	1118,3	2950,5	53195,2
Propriedade 23	1974,9	6402,0	4707,9	4633,5	5782,6	2743,8	6123,2	5028,8	3957,7	7772,0	1118,3	2950,5	53195,2
Propriedade 24	812,2	3932,1	5431,2	5179,6	5339,0	4956,5	5908,7	6680,4	7041,4	7473,3	4931,5	3483,2	61169,0
Propriedade 25	812,2	3932,1	5431,2	5179,6	5339,0	4956,5	5908,7	6680,4	7041,4	7473,3	4931,5	3483,2	61169,0
Propriedade 26	1974,9	6402,0	4707,9	4633,5	5782,6	2743,8	6123,2	5028,8	3957,7	7772,0	1118,3	2950,5	53195,2
Propriedade 27	1974,9	6402,0	4707,9	4633,5	5782,6	2743,8	6123,2	5028,8	3957,7	7772,0	1118,3	2950,5	53195,2
Propriedade 28	1974,9	6402,0	4707,9	4633,5	5782,6	2743,8	6123,2	5028,8	3957,7	7772,0	1118,3	2950,5	53195,2
Propriedade 29	948,9	4253,1	7192,9	8715,8	11332,1	12269,9	13710,4	13920,4	13547,5	14362,4	11810,8	11374,6	123438,9
Media	1786,9	5886,4	5982,3	6556,2	8252,7	5874,8	8965,1	8434,4	7730,1	10151,3	4936,7	5753,6	80310,5

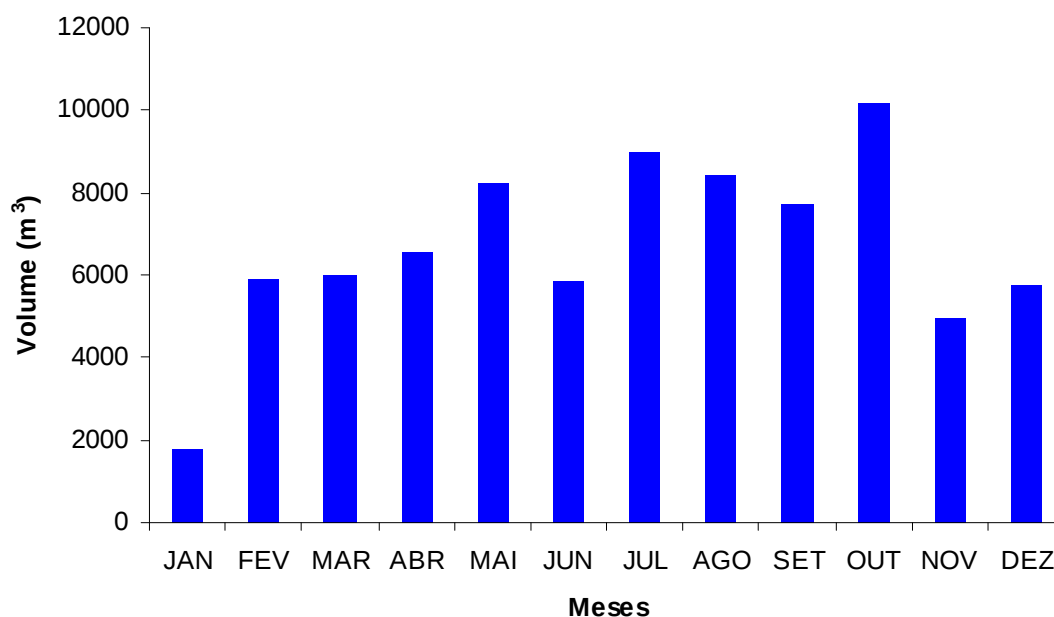


Figura 28 – Volume de água médio mensal simulado para irrigação, para as propriedades do perímetro irrigado de Salinas.

longo do ano. Esta evidência é perfeitamente esperada, uma vez que a cultura do abacaxi é caracterizada por apresentar baixa exigência hídrica, além de ser resistente ao déficit de água e apresentar baixa profundidade efetiva do sistema radicular, resultando em baixos valores de lâminas irrigação.

5.7.2. Distribuição de água no perímetro irrigado

A variação da vazão ao longo da rede de distribuição foi analisada para os meses de alta, média e baixa demanda de água no perímetro irrigado, observados anteriormente, considerando a vazão média por trecho de distribuição nesses meses e a vazão observada no 15º dia desses meses.

- Vazão ao longo da rede de distribuição de água

No Quadro 6 são apresentadas as vazões médias diárias na rede de distribuição de água para os meses de janeiro a dezembro. Na Figura 29 é ilustrada a vazão média diária na rede de distribuição para os meses de janeiro, abril e outubro. Verifica-se que no mês de alta demanda de irrigação no perímetro (outubro), em termos médios, todos os trechos da rede de distribuição são requeridos para distribuição de água para as propriedades, ficando ocupado diariamente, gerando uma vazão média diária de $395,7 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ no ponto de captação da rede. Ao longo da rede de distribuição a vazão nos trechos são variáveis, apresentando os menores valores nos trechos localizados nas extremidades da rede de distribuição, onde são verificadas apenas as vazões necessárias para a propriedade. No mês de média demanda (abril), o sistema também é requerido para operar diariamente, em todos os trechos de distribuição, gerando uma vazão média de $266,0 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ na estação de bombeamento. Para o mês de baixa demanda (janeiro), a maioria dos trechos de distribuição de água opera com baixa vazão, gerando uma necessidade de bombeamento de água na fonte de $69,7 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$, correspondendo a 17,6% e 26,2% da vazão média bombeada nos meses de outubro e abril, respectivamente.

A informação dos valores médios simulados para determinados períodos mostra-se de grande utilidade para o operador do sistema de distribuição de água, uma vez que poderão ser planejadas, antecipadamente, as estratégias de distribuição de água com base nas vazões requeridas pelo sistema.

Na Figura 30 é ilustrada a variação da vazão ao longo da rede de distribuição de água, para o 15º dia dos meses de janeiro, abril e outubro. Pode-se verificar que, apesar do mês de outubro ser o de maior demanda média no perímetro, para o 15º dia os trechos de distribuição de água não foram usados para aplicação de água no perímetro, o que pode ser visualizado na Figura 31 e apresentado no Quadro 7. Nessa figura verifica-se a variação espacial da distribuição com tonalidade de cor igual para todos os trechos representando um valor mínimo. Pode-se identificar, também, que as propriedades não estão

Quadro 6 – Vazão média diária, em m³ h⁻¹, na rede de distribuição de água, para os meses de janeiro a dezembro

Trechos	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.
0	69,7	254,0	244,8	264,1	329,4	235,4	344,1	324,9	341,1	395,7	225,5	236,4
1	69,7	254,0	244,8	264,1	329,4	235,4	344,1	324,9	341,1	395,7	225,5	236,4
2	69,7	254,0	244,8	264,1	329,4	235,4	344,1	324,9	341,1	395,7	225,5	236,4
3	68,6	248,2	237,1	256,9	322,0	228,5	336,1	315,9	330,3	385,6	218,6	231,7
4	67,5	242,3	229,4	249,7	314,5	221,6	328,2	306,9	319,5	375,6	211,8	227,1
5	11,5	50,2	61,4	68,5	85,5	82,7	98,1	97,3	103,4	108,2	78,1	74,9
6	46,7	157,2	137,7	149,8	189,4	110,5	187,0	170,6	176,6	216,8	108,8	123,2
7	9,2	34,9	30,3	31,4	39,6	28,5	43,1	39,0	39,5	50,6	24,9	28,9
8	2,7	9,5	6,7	6,4	7,9	3,8	8,2	6,8	6,5	10,4	2,8	4,5
9	2,7	9,5	6,7	6,4	8,0	3,8	8,2	6,8	6,5	10,4	2,8	4,5
10	6,6	25,4	23,5	25,0	31,6	24,7	34,9	32,2	33,0	40,2	22,0	24,4
11	2,7	9,5	6,7	6,4	8,0	3,8	8,2	6,8	6,5	10,4	2,8	4,5
12	3,9	15,9	16,8	18,5	23,5	20,9	26,7	25,5	26,4	29,8	19,2	19,8
13	2,7	9,5	6,7	6,4	8,0	3,8	8,2	6,8	6,5	10,4	2,8	4,5
14	1,3	6,3	10,1	12,1	15,5	17,0	18,4	18,7	19,9	19,3	16,4	15,3
15	1,3	6,3	10,1	12,1	15,5	17,0	18,4	18,7	19,9	19,3	16,4	15,3
16	8,8	40,7	54,7	62,1	77,5	78,9	89,9	90,6	96,8	97,7	75,3	70,4
17	6,2	31,2	48,0	55,6	69,4	75,1	81,7	83,8	90,3	87,3	72,5	65,8
18	6,2	31,2	48,0	55,6	69,4	75,1	81,7	83,8	90,3	87,3	72,5	65,8
19	3,6	18,5	27,8	31,4	38,4	41,0	44,8	46,4	50,6	48,7	39,7	35,3
20	3,6	18,5	27,8	31,4	38,4	41,0	44,8	46,4	50,6	48,7	39,7	35,3
21	2,6	12,7	20,1	24,2	31,0	34,1	36,9	37,4	39,7	38,6	32,8	30,6
22	1,1	5,9	7,7	7,2	7,4	6,9	7,9	9,0	10,8	10,0	6,8	4,7
23	1,1	5,9	7,7	7,2	7,4	6,9	7,9	9,0	10,8	10,0	6,8	4,7
24	45,6	151,3	130,0	142,6	182,0	103,6	179,0	161,6	165,8	206,7	101,9	118,5
25	34,8	110,1	88,8	99,4	129,7	65,4	123,8	108,3	109,0	142,9	65,2	82,3
26	10,9	41,2	41,2	43,2	52,3	38,3	55,2	53,3	56,7	63,8	36,7	36,3
27	8,2	31,7	34,5	36,8	44,2	34,4	47,0	46,5	50,2	53,4	33,9	31,7
28	3,5	18,0	25,5	26,5	30,4	39,5	34,3	36,7	41,5	39,4	30,1	24,7
29	2,2	11,7	15,4	14,4	14,9	13,8	15,9	18,0	21,7	20,1	13,7	9,4
30	1,1	5,9	7,7	7,2	7,4	6,9	7,9	9,0	10,8	10,0	6,8	4,7
31	1,1	5,9	7,7	7,2	7,4	6,9	7,9	9,0	10,8	10,0	6,8	4,7
32	26,1	80,6	62,9	70,6	92,3	40,9	84,4	73,0	74,0	99,2	42,2	55,3
33	8,7	29,5	25,8	28,8	37,4	24,5	39,3	35,3	35,1	43,7	23,0	26,9
34	6,0	20,0	19,1	22,4	29,4	20,7	31,1	28,6	28,5	33,3	20,2	22,4
35	1,3	6,3	10,1	12,1	15,5	17,0	18,4	18,7	19,9	19,3	16,4	15,3
36	14,2	41,0	27,1	30,8	41,6	10,9	38,1	29,5	26,0	41,9	11,4	21,2
37	11,9	39,5	35,8	39,8	50,7	30,0	46,4	43,5	48,0	57,3	30,8	34,1
38	7,1	25,9	26,8	29,6	36,8	27,6	39,1	37,5	39,4	43,3	27,0	27,0
39	2,4	12,2	17,8	19,3	22,9	23,9	26,4	27,7	30,7	29,3	23,3	20,0
40	1,1	5,9	7,7	7,2	7,4	6,9	7,9	9,0	10,8	10,0	6,8	4,7
41	1,1	5,9	7,7	7,2	4,2	6,9	7,9	9,0	10,8	10,0	6,8	4,7
42	14,2	41,0	27,1	30,8	41,6	10,9	38,1	29,5	26,0	41,9	11,4	21,2
43	9,5	27,4	18,1	20,5	27,7	7,3	25,4	19,7	17,3	27,9	7,6	14,2
44	4,7	13,7	9,0	10,3	13,9	3,6	12,7	9,8	8,7	14,0	3,8	7,1

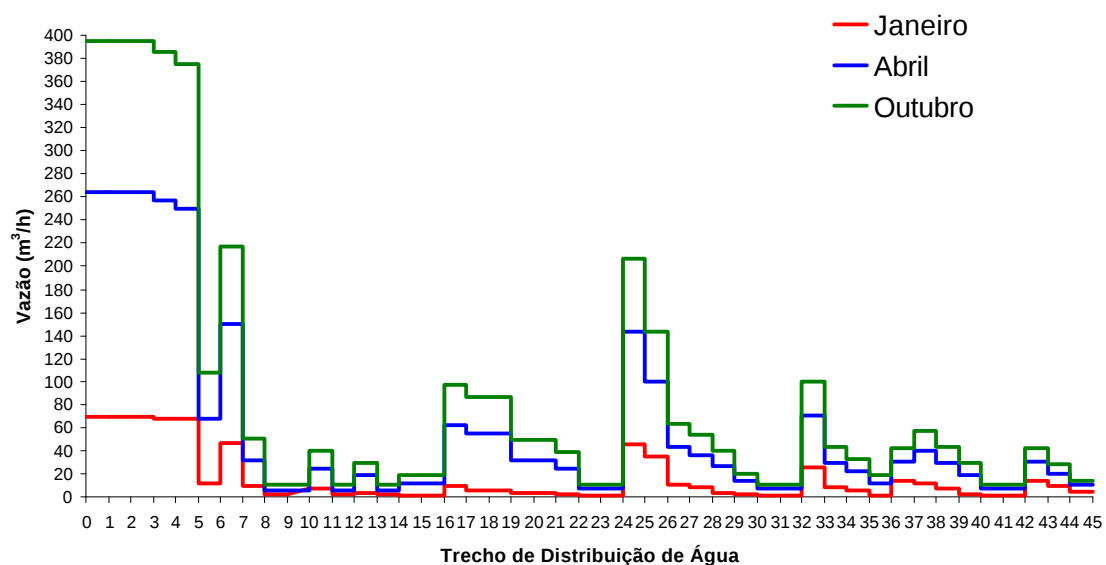


Figura 29 – Vazão média diária ao longo da rede de distribuição de água do perímetro irrigado de Salinas, para os meses de janeiro, abril e outubro.

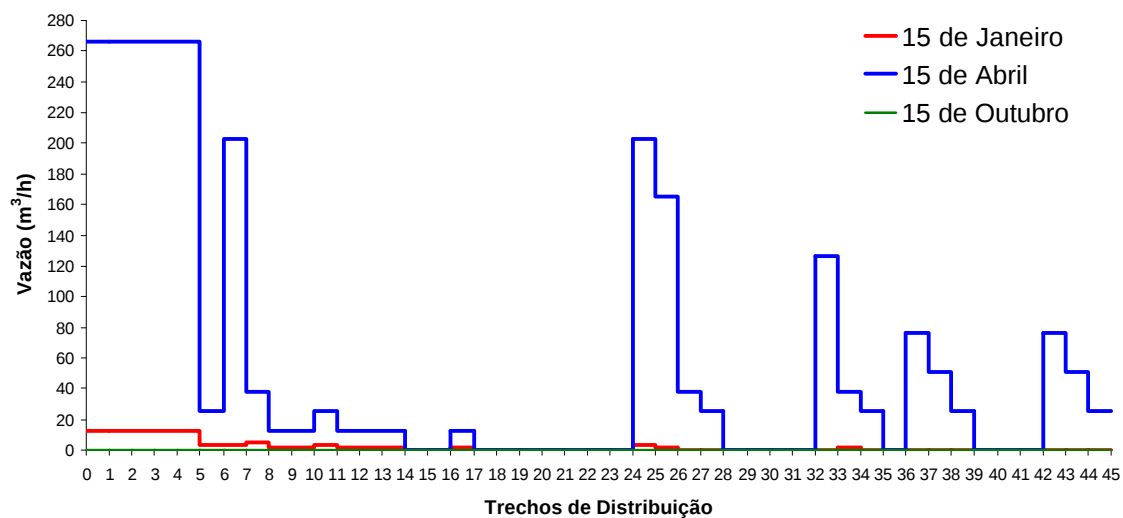


Figura 30 – Vazão diária ao longo da rede de distribuição de água do perímetro irrigado de Salinas, para o 15º dia dos meses de janeiro, abril e outubro.

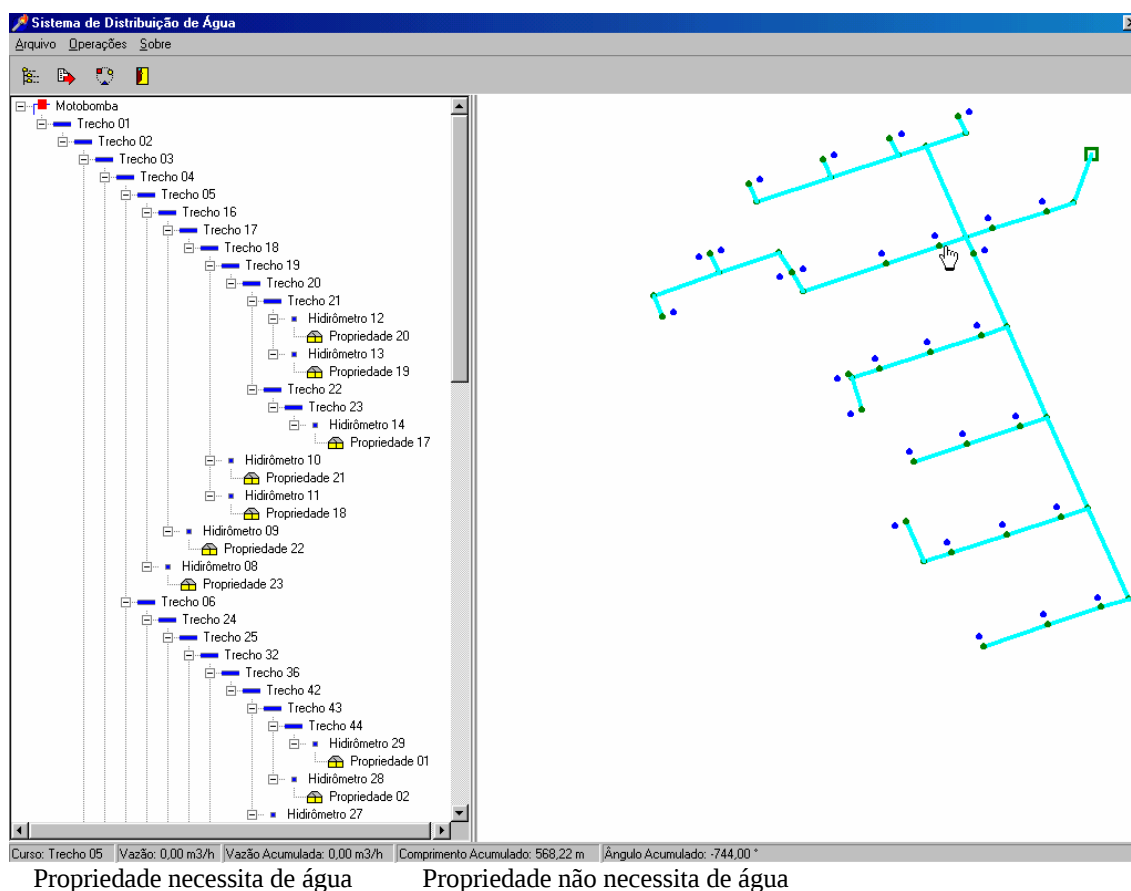


Figura 31 – Variação espacial da vazão, em $\text{m}^3 \text{h}^{-1}$, na rede de distribuição de água para o dia 15 de outubro, no perímetro irrigado de Salinas.

necessitando de água, sinalizadas com os pontos em azul não requerendo que seja bombeada água neste dia.

Para o 15^o dia do mês de abril, mês de demanda média no perímetro, observa-se que a maioria dos trechos estava sendo usada para distribuição de água no perímetro irrigado, gerando uma vazão na captação da ordem de $266,1 \text{ m}^3 \text{h}^{-1}$. Os trechos que não distribuíram água neste dia correspondem aos trechos que abastecem as propriedades que não estão necessitando de água neste dia. Na Figura 32 é ilustrada a variação espacial da distribuição de água no perímetro irrigado, onde podem ser observadas as propriedades que não estão necessitando de água (pontos azuis). No Quadro 7 são apresentados os valores da vazão para este dia.

Quadro 7 – Vazão, em $\text{m}^3 \text{h}^{-1}$, para 15º dia dos meses de janeiro, abril e outubro

Trechos	15 de janeiro	15 de abril	15 de outubro
0	12,3	266,1	0,0
1	12,3	266,1	0,0
2	12,3	266,1	0,0
3	12,3	266,1	0,0
4	12,3	266,1	0,0
5	3,5	25,3	0,0
6	3,5	202,7	0,0
7	5,3	38,0	0,0
8	1,8	12,7	0,0
9	1,8	12,7	0,0
10	3,5	25,3	0,0
11	1,8	12,7	0,0
12	1,8	12,7	0,0
13	1,8	12,7	0,0
14	0,0	0,0	0,0
15	0,0	0,0	0,0
16	1,8	12,7	0,0
17	0,0	0,0	0,0
18	0,0	0,0	0,0
19	0,0	0,0	0,0
20	0,0	0,0	0,0
21	0,0	0,0	0,0
22	0,0	0,0	0,0
23	0,0	0,0	0,0
24	3,5	202,7	0,0
25	1,8	164,7	0,0
26	0,0	38,0	0,0
27	0,0	25,3	0,0
28	0,0	0,0	0,0
29	0,0	0,0	0,0
30	0,0	0,0	0,0
31	0,0	0,0	0,0
32	0,0	126,7	0,0
33	1,8	38,0	0,0
34	0,0	25,3	0,0
35	0,0	0,0	0,0
36	0,0	76,0	0,0
37	0,0	50,7	0,0
38	0,0	25,3	0,0
39	0,0	0,0	0,0
40	0,0	0,0	0,0
41	0,0	0,0	0,0
42	0,0	76,0	0,0
43	0,0	50,7	0,0
44	0,0	25,3	0,0

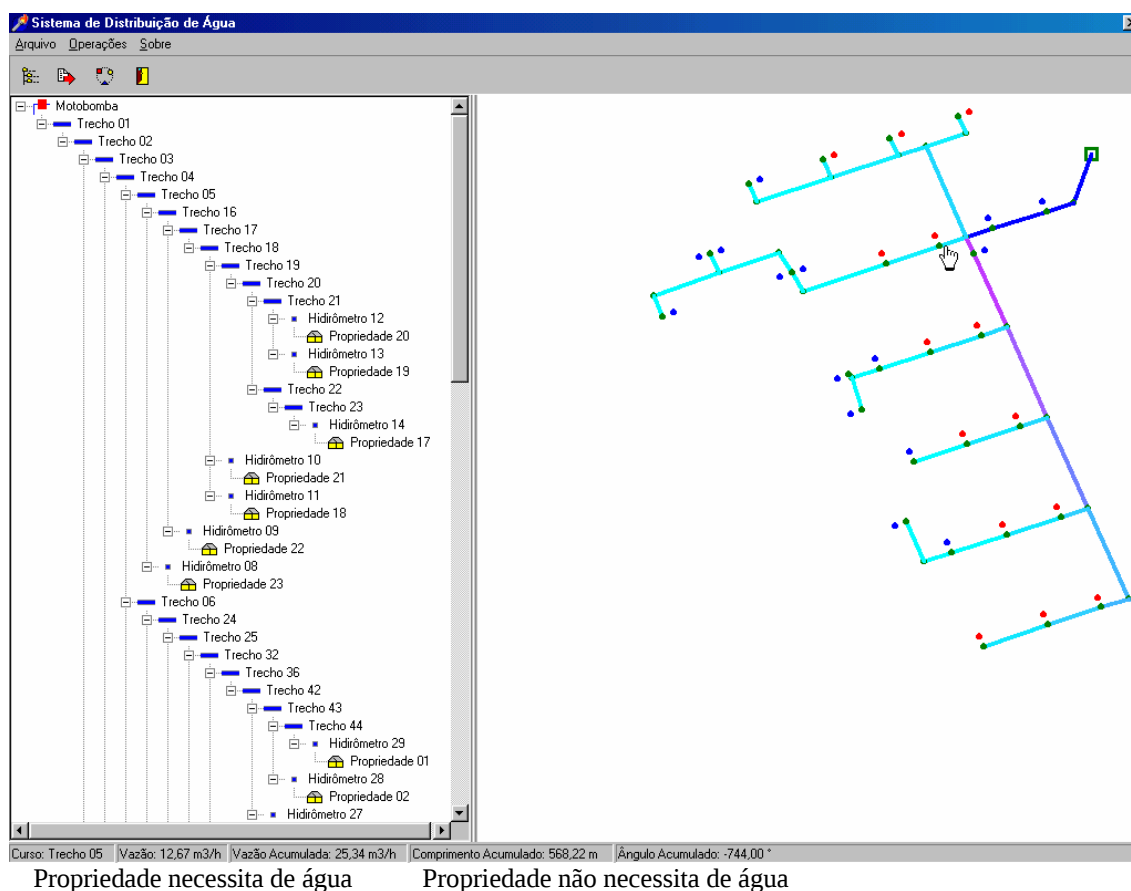


Figura 32 – Variação espacial da vazão, em $\text{m}^3 \text{h}^{-1}$, na rede de distribuição de água para o dia 15 de abril, no perímetro irrigado de Salinas.

Para a simulação no dia 15 de janeiro (mês de menor demanda), apesar de baixas vazões, parte dos trechos de distribuição foi utilizada para distribuição de água no perímetro. A maioria das propriedades não estava necessitando de água neste dia, como seria de se esperar, uma vez que a contribuição da chuva foi suficiente para satisfazer as necessidades hídricas das culturas, captando apenas $12,3 \text{ m}^3 \text{h}^{-1}$ na fonte de abastecimento. A Figura 33 ilustra essa constatação, onde se verifica que apenas algumas propriedades estão necessitando de água (pontos vermelhos).

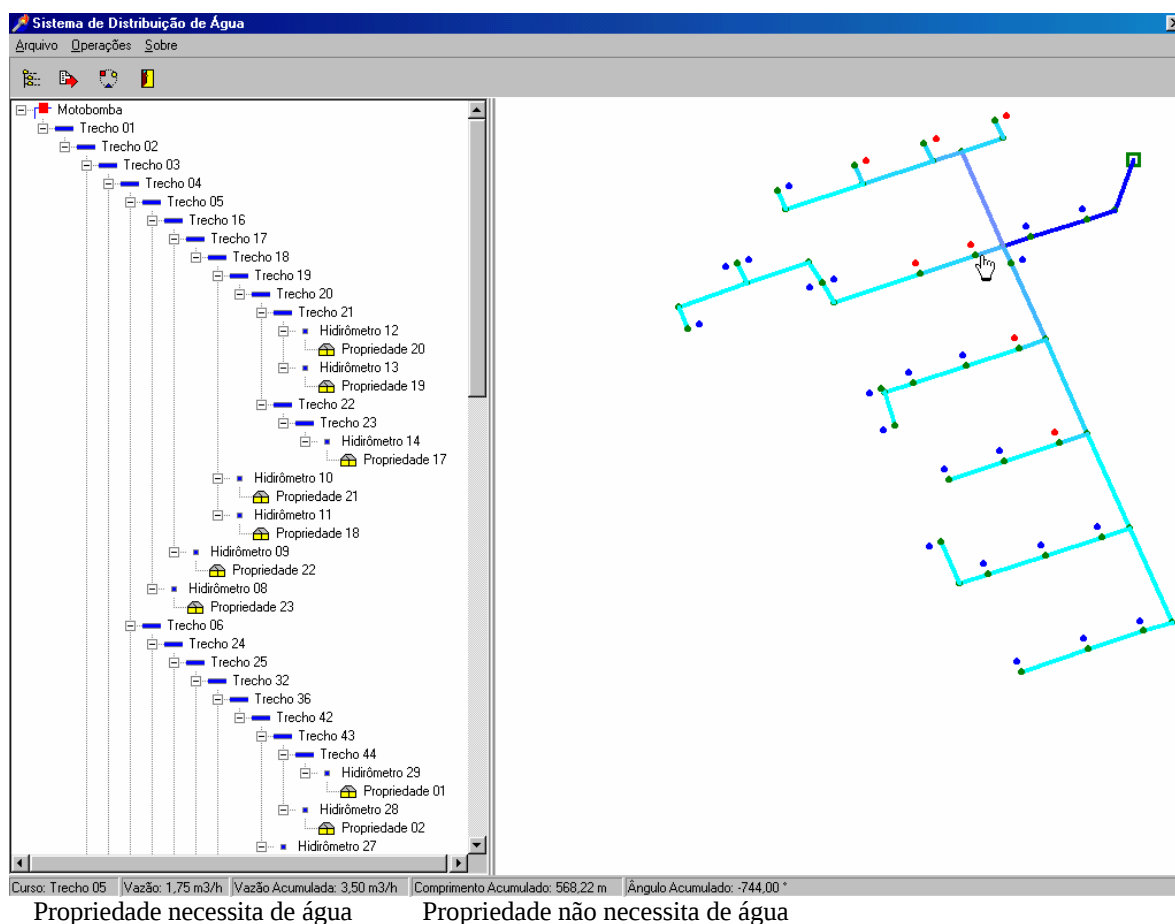


Figura 33 – Variação espacial da vazão, em $\text{m}^3 \text{h}^{-1}$, na rede de distribuição de água para o dia 15 de janeiro, no perímetro irrigado de Salinas.

Através da interface gráfica da rede de distribuição pode ser consultada a vazão que passa em cada trecho, bem como a vazão demandada neste trecho, com a simples movimentação do *mouse* sobre a área da rede de distribuição, ou diretamente na árvore de controle dos trechos, que ainda poderá informar sobre algumas características dos elementos que compõem a estrutura física da rede.

O uso desta interface gráfica representa o principal avanço tecnológico do modelo computacional, uma vez que se pode, além de acessar o valor da vazão transportada em qualquer trecho da rede de distribuição, visualizar a variação espacial desta vazão, orientando o operador do sistema na tomada de decisão a respeito da distribuição da água para as propriedades do perímetro irrigado.

- Vazão captada na fonte de abastecimento

Na Figura 34 é ilustrada a vazão média diária e a vazão do 15º dia do mês, na fonte de captação de rede de distribuição de água, para os meses de janeiro a dezembro, no perímetro irrigado. De uma maneira geral, para a vazão média captada na fonte, os meses de outubro, julho e setembro são os que apresentam maiores valores de vazão captada na fonte d'água, em contraposição ao mês de janeiro, que apresenta os menores valores. Entretanto, ao se comparar os valores de vazão média captada com os valores de vazão do 15º dia de cada mês, verifica-se que o valor médio diário para os meses de janeiro a dezembro destoa dos valores simulados para o 15º dia de cada mês, indicando que a vazão diária observada ao longo do ano é muito variável. Contudo, havia de se esperar um comportamento como este, uma vez que o valor médio tende a ser influenciado pelos valores extremos. Esta evidência reforça a necessidade de implantação de programas de manejo diário da irrigação em nível de parcelas nas propriedades, para indicação correta das necessidades hídricas dos cultivos. Neste caso, o uso do modelo computacional mostra-se de grande valia para esta finalidade, uma vez que o mesmo poderia ser usado para o acompanhamento da variação da umidade do solo e indicar as necessidades de irrigação das culturas.

- Tempo de aplicação de água pelos hidrômetros

No Quadro 8 estão apresentados os tempos de aplicação de água pelos hidrômetros instalados na rede de distribuição de água do perímetro irrigado, para o 15º dia dos meses de janeiro a dezembro. Verificou-se que no 15º dia dos meses de março, setembro, outubro e novembro, todos os hidrômetros da rede de distribuição estavam fechado, uma vez que não houve necessidade de aplicação de água para as propriedades nesses dias, resultando em tempo zero de aplicação de água para as propriedades. Analisando o tempo de aplicação de água pelos hidrômetros, para os meses de baixa, média e alta demanda, verificou-se um

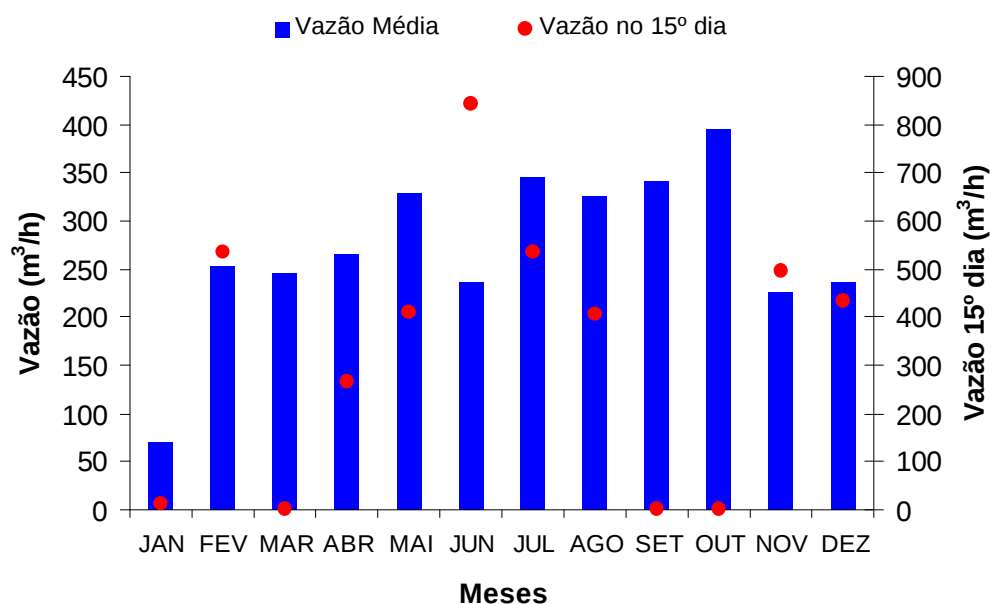


Figura 34 – Vazão média diária e vazão para o 15º dia do mês, na fonte de captação da rede de distribuição de água, ao longo do ano, para o perímetro irrigado de Salinas.

tempo médio de aplicação de água pelos hidrômetros de 0,2, 3,6 e 0,0 horas para os meses de janeiro, abril e outubro, respectivamente. Apesar do mês de outubro representar, em média, o mês de maior demanda de água no perímetro irrigado, e analisando-se o 15º dia de cada mês, verificou-se que o dia 15 de junho apresentou os maiores valores de tempo de distribuição de água pelos hidrômetros, com uma média de 14,1 horas, com todos os hidrômetros abertos. A variação do tempo de aplicação de água pelos hidrômetros para o 15º dia dos meses de janeiro, abril e outubro pode ser visualizada na Figura 35. No dia 15 de janeiro a maioria dos hidrômetros encontrava-se fechada, com o tempo zero de aplicação de água para a propriedade, e os hidrômetros que estavam abertos distribuíram água durante em período pequenos de tempo devido a baixa demanda neste dia ($0,2 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$). Para o dia 15 de abril alguns hidrômetros encontravam-se fechados, entretanto este dia apresentou tempos elevados de aplicação de água em alguns hidrômetros que distribuíram água, com valores que chegaram a 13,5 horas de aplicação. Para o 15º dia do mês de outubro todos os hidrômetros encontravam-se fechados, caracterizando que as propriedades não necessitavam de água neste dia.

Quadro 8 – Tempo de aplicação de água, em horas, pelos hidrômetros instalados na rede de distribuição de água do perímetro irrigado, para o 15º dia dos meses de janeiro a dezembro

Hidrômetro	15/jan.	15/fev.	15/mar.	15/abr.	15/mai.	15/jun.	15/jul.	15/ago.	15/set.	15/out.	15/nov.	15/dez.
1	0,0	5,7	0,0	0,0	0,0	15,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	9,4
2	0,0	5,8	0,0	0,0	0,0	15,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	9,6
3	0,0	1,9	0,0	0,0	0,0	5,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3,1
4	1,0	9,6	0,0	7,1	10,9	6,7	8,5	11,3	0,0	0,0	0,0	0,0
5	0,9	9,2	0,0	6,8	10,4	6,4	8,1	10,8	0,0	0,0	0,0	0,0
6	0,9	9,2	0,0	6,8	10,4	6,4	8,1	10,8	0,0	0,0	0,0	0,0
7	0,0	6,5	0,0	0,0	0,0	20,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	16,9
8	0,9	9,0	0,0	6,6	10,1	6,3	7,9	10,6	0,0	0,0	0,0	0,0
9	0,9	9,2	0,0	6,8	10,4	6,4	8,1	10,8	0,0	0,0	0,0	0,0
10	0,0	5,9	0,0	0,0	0,0	20,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	16,9
11	0,0	6,9	0,0	0,0	0,0	20,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	16,9
12	0,0	7,8	0,0	0,0	0,0	20,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	16,9
13	0,0	6,9	0,0	0,0	0,0	20,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	16,9
14	0,0	5,7	0,0	0,0	0,0	15,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	9,4
15	0,9	9,0	0,0	6,6	10,1	6,3	7,9	10,6	0,0	0,0	0,0	0,0
16	0,0	18,4	0,0	13,5	20,7	6,4	16,3	21,7	0,0	0,0	0,0	0,0
17	0,0	7,0	0,0	0,0	0,0	20,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	16,9
18	0,0	5,6	0,0	0,0	0,0	15,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	9,2
19	0,0	5,7	0,0	0,0	0,0	15,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	9,4
20	1,0	9,4	0,0	6,9	10,6	6,5	8,3	11,1	0,0	0,0	0,0	0,0
21	0,0	5,9	0,0	4,3	6,6	2,0	5,2	6,9	0,0	0,0	0,0	0,0
22	0,0	2,6	0,0	0,0	0,0	12,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	10,3
23	0,0	18,4	0,0	13,5	20,7	6,4	8,1	10,8	0,0	0,0	0,0	0,0
24	0,0	18,4	0,0	13,5	20,7	6,4	16,3	21,7	0,0	0,0	0,0	0,0
25	0,0	6,4	0,0	0,0	0,0	20,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	16,9
26	0,0	5,6	0,0	0,0	0,0	15,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	9,2
27	0,0	6,0	0,0	4,4	6,8	2,1	5,3	7,1	0,0	0,0	0,0	0,0
28	0,0	6,0	0,0	4,4	6,8	2,1	5,3	7,1	0,0	0,0	0,0	0,0
29	0,0	6,0	0,0	4,4	6,8	2,1	5,3	7,1	0,0	0,0	0,0	0,0
Média	0,2	7,9	0,0	3,6	5,6	11,2	4,1	5,5	0,0	0,0	0,0	6,5

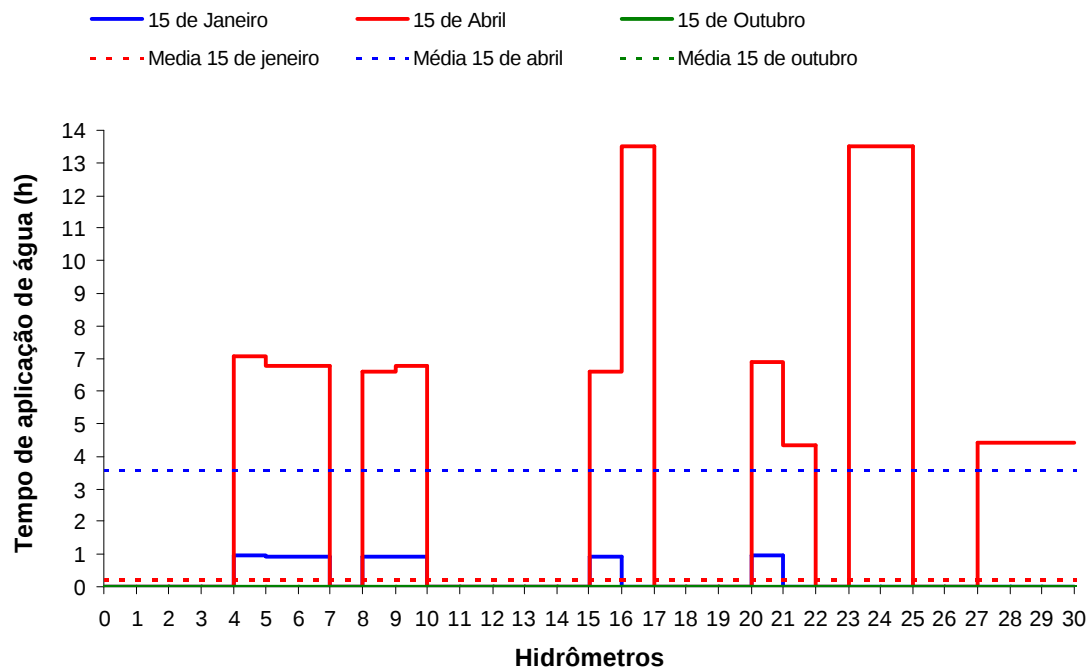


Figura 35 – Tempo de aplicação de água pelos hidrômetros instalados na rede de distribuição de água do perímetro irrigado, para o 15º dia dos meses de janeiro, abril e outubro.

Depreende-se do exposto que a utilização do modelo computacional para o gerenciamento da distribuição de água pode nortear o agente administrador do perímetro no sentido de planejar melhor a distribuição de água, de modo que os usuários possam receber as quantidades de água de forma eqüitativa, bem como poderá orientar no sentido de evitar sobrecarga no sistema de distribuição.

6. RESUMO E CONCLUSÕES

Um modelo computacional foi desenvolvido para dar suporte ao gerenciamento da distribuição de água em perímetros irrigados, tendo como base os recursos do clima, solo, cultura, água e equipamentos de irrigação, consolidados em uma estrutura de banco de dados relacional. O sistema computacional é composto de três módulos principais: a base de dados, a simulação do consumo de água e a distribuição de água no perímetro irrigado.

O módulo base de dados possui a flexibilidade de serem realizadas inclusões, consultas, alterações e exclusões nos bancos de dados do sistema. Este módulo é responsável pelo cadastro das informações no sistema, relativas à caracterização física da rede de distribuição de água, cadastro de dados climáticos, das propriedades, dos solos, das fontes de água, das culturas e dos equipamentos de irrigação. O módulo base de dados é quem dá todo o suporte para execução dos demais módulos do sistema.

O módulo consumo de água é responsável pelo cálculo das necessidades de água nas parcelas irrigadas do perímetro, obtidas a partir da simulação do balanço de água no solo, realizado por camada ocupada pelo sistema radicular. As quantidades de água são obtidas a partir do manejo diário ou pelas simulações para períodos indicados pelo usuário. O manejo utiliza dados climáticos observados no dia, enquanto a simulação utiliza dados de uma série histórica. A

simulação pode ser baseada na irrigação total ou suplementar. Os resultados podem ser visualizados pelas tabelas ou pelos gráficos, onde é possível fazer o acompanhamento do *status* de lâmina de água no solo.

No módulo de distribuição da água foi utilizado um modelo matemático para representação da rede de distribuição de água, que considera a rede dividida em trechos. Este módulo utiliza os dados gerados no módulo anterior, calculando a vazão a ser distribuída em cada trecho da rede, materializada em uma interface gráfica baseada em uma árvore n-ária, que desenha a rede de distribuição e apresenta a variação espacial da vazão distribuída nos trechos. A vazão pode ser consultada em cada trecho a partir do desenho da rede de distribuição de água.

O gerenciamento da distribuição de água foi simulado para efeito de teste do modelo computacional, onde simulou-se o consumo de água ao longo do ano e para o 15º dia de cada mês, utilizando-se dados do perímetro irrigado de Salinas-MG. Os resultados permitiram chegar às seguintes conclusões:

- a lâmina evapotranspirada, estimada pelo modelo computacional, excedeu a precipitação provável para a maior parte do ano;
- o balanço de água no solo, simulado pelo modelo computacional indicou os meses de outubro, abril e janeiro como sendo de alta, média e baixa exigência em lâminas de irrigação, respectivamente;
- a lâmina de precipitação provável dos meses de janeiro e dezembro, estimada pelo modelo computacional, contribuiu para reduzir o consumo de água para a maioria das culturas;
- o uso do modelo computacional permitiu informar, com antecedência, a necessidade de irrigação para as propriedades do perímetro;
- a interface gráfica do modelo permitiu o acompanhamento das vazões distribuídas ao longo da rede de distribuição do perímetro, informando seus valores em cada trecho;
- a cultura do abacaxi apresentou a menor demanda de irrigação e a cultura da banana, a maior;
- observou-se alta variação nos valores diários de vazões na rede de distribuição, ao longo do ano;

- evidenciou-se a necessidade de implantação de programas de manejo diário da irrigação; e
- o modelo representa um avanço tecnológico para gerenciar a distribuição de água no perímetro irrigado e nortear a tomada de decisão em agricultura irrigada.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration – guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO, 1998. 300 p. (Irrigation and Drainage, Paper, 56).

ASSIS, F. N. **Modelagem da ocorrência e da quantidade de chuva e de dias secos em Piracicaba-SP e Pelotas-RS**. Piracicaba: ESALQ/USP, 1991. 134 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 1991.

ASSIS, F. N. Ajuste da função gama aos totais semanais de chuva de Pelotas-RS. **R. Bras. de Agromet.**, v. 1, n. 1, p. 131-136, 1993.

BERNARDO, S. Desenvolvimento e perspectiva da irrigação no Brasil. **Revista Engenharia na Agricultura**, Viçosa, v. 1, n. 14, p. 1-14, 1992.

BERNARDO, S. Irrigação e produtividade. **Revista Engenharia na Agricultura**, Viçosa, v. 6, n. 3, p.186-196, 1998.

BERNARDO, S. **Manual de irrigação**. Viçosa-MG: UFV, 1995. 657 p.

BORGES, H. Q. **Avaliação do SISDA (Sistema de Suporte a Decisão Agrícola) para o manejo da irrigação na região de Araçuaí-MG**. Viçosa-MG: UFV, 2000. 121 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, 2000.

BOWMAN, J. A.; SIMMONS, F. W.; KIPEL, B. C. Irrigation in Midwest: lessons from Illinois. **Journal of Irrigation and Drainage Division**, New York, v. 117, n. 5, p. 700-715, 1991.

BRITO, R. A. L.; COUTO, L. Agricultura irrigada, recursos hídricos e produção de alimentos: uma interação produtiva e positiva. **Revista ITEM**, n. 55, p. 64-69, 2002.

BURMAN, R.; POCHOP, L. O. **Evaporation, evapotranspiration and climatic data**. Amsterdam: Elsevier Science, 1994. 278 p.

BURT, C. M. Guidelines for establishing irrigation scheduling policies. In: **Workshop Irrigation Scheduling: From theory to practice**. Rome: ICID/FAO, 1995.

BURT, C. M.; PLUSQUELLEC, H. L. Water delivery control. In: HOFFMAN, G. J.; HOWELL, T. A.; SOLOMON, K. H. (Ed.). **Management of farm irrigation systems**. St. Joseph: ASAE, 1992. 1.040 p. (Monograph, 9).

CARVALHO, D. F. **Otimização do uso de água no perímetro irrigado do Gorutuba**. Viçosa, MG: UFV, 2000. 145 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, 1998.

CASTRO, R.; LEOPOLDO, P. R. Ajuste da distribuição gama incompleta na estimativa da precipitação pluviométrica provável para os períodos de 15 e 10 dias da cidade de São Manuel-SP. **Energia na Agricultura**, v. 10, n.1, p. 20-29, 1995.

CHRISTOFIDIS, D. Irrigação, a fronteira hídrica na produção de alimentos. **Revista ITEM**, n.54, pp. 46-55, 2002.

COSTA, L. C.; MANTOVANI, E. C.; SOARES, A. A.; LEAL, B G. **Sisda: a decision support system for agriculture in Brazil**. In: Information technology as a tool to assess land use options in space and time. Proceeding of an international workshop. Lima, 1997, p. 33-39.

CHEN, C.; KOCHER, M. **Better utilization of optimal information for agricultural management**. St. Joseph: ASAE, 1994. 11 p. (ASAE, Paper, 94-3077).

DANTAS NETO, F. S. **Caracterização e análise espaço-temporal da demanda evapotranspirativa e do regime pluvial na bacia dos Rios do Leste**. Viçosa, MG: UFV, 1999. 70 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, 1999.

DANTAS NETO, F. S.; COSTA, J. M. N.; SOARES, A. A.; SEDIYAMA, G. C.; COSTA, L. C. DEMANDAsis: sistema computacional para calculo da demanda de irrigação suplementar. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 11, 1999, Florianópolis, **Anais...** Florianópolis: SBA, 1999. (CD ROM).

DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. **Yield response to water**. Rome: FAO, 1979. 172 p. (Irrigation and Drainage Paper, 33).

DOORENBOS, J.; PRUIT, W. O. **Las necesidades de agua de los cultivos**. Roma: FAO, 1977. 194p. (Irrigation and Drainage Paper, 24).

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION. **Performance analysis of on-demand pressurized irrigation systems**. Rome: FAO, 2000. 132 p. (Irrigation and Drainage Paper, 59).

FERREIRA, M. C. R. C. **Gerenciamento do distrito de irrigação Jaguaribe-Apodi em base ao modelo computacional "SIMIS" (FAO)**. Fortaleza, CE: UFC, 1999. 218 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Federal do Ceará, 1999.

FREITAS, M. A. V.; SANTOS, A. H. M. Importância da água e da informação hidrológica. In: FREITAS, M. A. V. **O estado das águas no Brasil – perspectiva e gestão da informação de recursos hídricos**. Brasília: ANEEL, SRH, MMA, SRH, MME, 1999. 334 p.

FRIZZONE, J. A. **Análise de cinco modelos para cálculo da distribuição e frequência de precipitação na região de Viçosa, MG**. Viçosa: UFV, 1979. 100 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, 1979.

GEORGE, B. A.; SHENDE, S. A.; RAGHUWANSHI, N. S. Development and testing of an irrigation scheduling model. **Agricultural Water Management**, v. 46, p. 121-136, 2000.

HARGREAVES, G. H.; SAMANI, Z. A. Reference crop evapotranspiration from temperature. **Appl. Eng. Agric.**, v. 1, p. 96-99. 1985.

HATFIELD, J. L.; FUCHS, M. Evapotranspiration models. In: HOFFMAN, G. J.; HOWELL, T. A.; SOLOMON, K. H. (Ed.). **Management of farm irrigation systems**. St. Joseph: ASAE, 1992. 1.040 p. (Monograph, 9).

HOFFMAN, G. J.; HOWELL, T. A.; SOLOMON, K. H. (Ed.). **Management of farm irrigation systems**. St. Joseph: ASAE, 1992. 1.040 p. (Monograph, 9).

JENSEN, M.; BURMAN, R. D.; ALLEN, R. G. **Evapotranspiration and irrigation water requirements**. New York: ASCE. 1990. 332 p. (Manuals and Reports on Engineering Practice, nº 70).

JOHNSTON, W. R.; ROBERTSON, J. B. **Management, operation and maintenance of irrigation and drainage systems**. New York: ASCE. 1991. 432 p. (Manuals and Reports on Engineering Practice, 57).

KRAATZ, D. B.; MAHAJAN, I. K. **Pequenas obras hidráulicas**. Roma: FAO, 1976. v. 26/1.

LEAL, B. G.; CATALUNHA, M. J.; SEDIYAMA, G. C. Modelo matemático para representar a dinâmica de bacias hidrográficas e seus corpos d'água. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 32, 2003, Goiânia-GO. **Anais...** Goiânia: CONBEA, 2003. CD-ROM.

LIMA, J. E. F. W.; FERREIRA, R. S. A.; CHRISTOFIDIS, D. O uso da irrigação no Brasil. In: FREITAS, M. A. V. **O estado das águas no Brasil – perspectiva e gestão da informação de recursos hídricos**. Brasília: ANEEL, SRH, MMA, SRH, MME, 1999. 334 p.

LOFTIS, J. C.; HOUGHTALEN, R. J. Optimizing temporal water allocation by irrigation ditch companies. **Transaction of the ASAE**, St Joseph, v. 30, n. 4, p. 1075-1082. 1987.

MAEMO, P.; BERNARDO, S.; GOMIDE, R. L.; SEDIYAMA, G. C. Parâmetros de ajuste e comparação dos métodos de estimativa da evapotranspiração de referência propostos pela FAO, para a região de Sete Lagoas-MG. In: CONGRESSO NACIONAL DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM, 10, 1994, Salvador. **Anais...** Salvador: ABID, 1994. p. 519-530.

MANTOVANI, E. C.; SOARES, A. A. **Manejo da irrigação**. In: MANTOVANI, E. C.; COSTA, L. C. (Ed.) **Sistema de suporte à decisão agrícola: manejo da cultura e dos recursos hídricos**. In: WORKSHOP INTERNACIONAL SOBRE MANEJO INTEGRADO DAS CULTURAS E DOS RECURSOS HÍDRICOS. Brasília/DF, 2 a 4 de junho, 1998, 153 p.

MAKIN, W. I.; CORNISH, G. A.; KINKGDOM, U. Irrigation scheduling at system level – an analysis of practical applications of the INCA software. In: 46th INTERNATIONAL EXECUTIVE COANCIL. ICID/FAO Workshop Irrigation Scheduling: from theory to practice, 1995. Rome. **Anais...** Rome: FAO, 1995.

MARTIN, D. L.; STEGMAN, E. C.; FERERES, E. Irrigation scheduling principles. In: HOFFMAN, G. J.; HOWELL, T. A.; SOLOMON, K. H. (Ed.). **Management of farm irrigation systems**. St. Joseph: ASAE, 1992. 1040 p. (Monograph, 9).

MELO, A. M. N. **Determinação da necessidade térmica, adequação de coeficiente da cultura (kc) e efeito da irrigação e da adubação nitrogenada na produção do maracujazeiro amarelo**. Viçosa, MG: UFV, 2001. 139 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, 2001.

MIRANDA, F. R.; BLEICHER, E. **Evapotranspiração e coeficiente de cultivo e de irrigação para a cultura do melão (*cucumis melo* L.) na região litorânea do Ceará**. EMBRAPA: Fortaleza, 2001. 17 p. (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 2).

MOTA, F. S.; OLIVEIRA, M. O. Indicação para elaboração de um programa de computador para o balanço hídrico diário versátil (adaptado de Baier et al., 1972) para o Brasil. **Boletim Técnico do Instituto Nacional de Meteorologia**, n. 16, p. 23-36, 1978.

PAZ, V. P. S.; TEODORO, R. E. F.; MENDONÇA, F. C. Recursos hídricos, agricultura e meio ambiente. Campina Grande: **Agriambi**, v. 4, n. 3, p. 465-473. 2000.

PACE, E. L.; SOUZA, J. L.; CARMO, M. E. A. Ocorrência provável de precipitação mensal para a microrregião de Rio Largo do estado de Alagoas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 6, 1989, Maceió. **Anais...** Maceió: SBA, 1989. p. 204-210.

PEREIRA, A. R.; VILLA NOVA, N. A.; SEDIYAMA, G. C. **Evapotranspiração**. Piracicaba: FEALQ, 1997. 183 p.

RAMOS, M. M. **Modelagem da demanda de água para planejamento de irrigação suplementar**. São Carlos, SP: USP, 1986. 170 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade de São Paulo, 1986.

REICHARDT, K. **Dinâmica da matéria e da energia em ecossistemas**. Piracicaba, SP: USP/ESALQ, 1996. 513 p.

RODRIGUES, L. N., PRUSKI, F. F. Precipitação provável para João Pinheiro, Minas Gerais, utilizando as funções de distribuição de probabilidade gama e log-normal. Viçosa-MG. **Engenharia na Agricultura**, v. 5, n. 3, p. 237-24, 1997.

SAGARDOY, J. A.; BOTTRALL, A.; UITTENBOGAARD, G. O. **Organization, operation and maintenance of irrigation schemes**. Rome: FAO, 1991. [n.p.] (Irrigation and Drainage Paper, 40).

SCALOPI, E. J. **Sistemas de irrigação e seus componentes**. Brasília: ABEAS, 1988. 86 p. (módulo 5).

SEDIYAMA, G. C. **Evapotranspiração: Necessidades de água para as plantas cultivadas**. Brasília, DF: ABEAS, 1996. 176 p. (Curso de Engenharia e Manejo de Irrigação, Módulo 3).

SMITH, M. **CROPWAT: a computer program for irrigation planning and management**. FAO Land and Water Development Division, FAO: Rome, 1991a.

SMITH, M. **Report on the expert consultation on revision of FAO methodologies for crop water requirements**. Rome: FAO, 1991b, 45 p.

SMITH, M. The application of climatic data for planning and management of sustainable rainfed and irrigated crop production. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 103, p. 99-108, 2000.

SOUZA, E. F. **Modelo computacional aplicado ao manejo e planejamento da irrigação**. Viçosa, MG: UFV, 1993. 65 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, 1993.

SOUZA, F. **Manejo computadorizado da irrigação utilizando o programa “CROPWAT” da FAO: estudo de caso de híbrido de milho no vale do curu – Ceará**. Fortaleza, 1992. 85 p.

THOM, H. C. S. **Some methods of climatological analysis**. Geneve: WMO, 1966. 53p. (Technical Note, 81).

WRIGHT, J. L. New evapotranspiration crop coefficients. **J. Irrig. Drain. Div.**, ASCE 108 (IR2), p. 57-74, 1982.

YAMASHITA, S.; WALKER, W. R. Command area water demands. II: water-demand function. **Journal of Irrigation and Drainage Division**, New York, v. 120, n. 6, p. 1043-1055, 1994.

APÊNDICES

APÊNDICE A

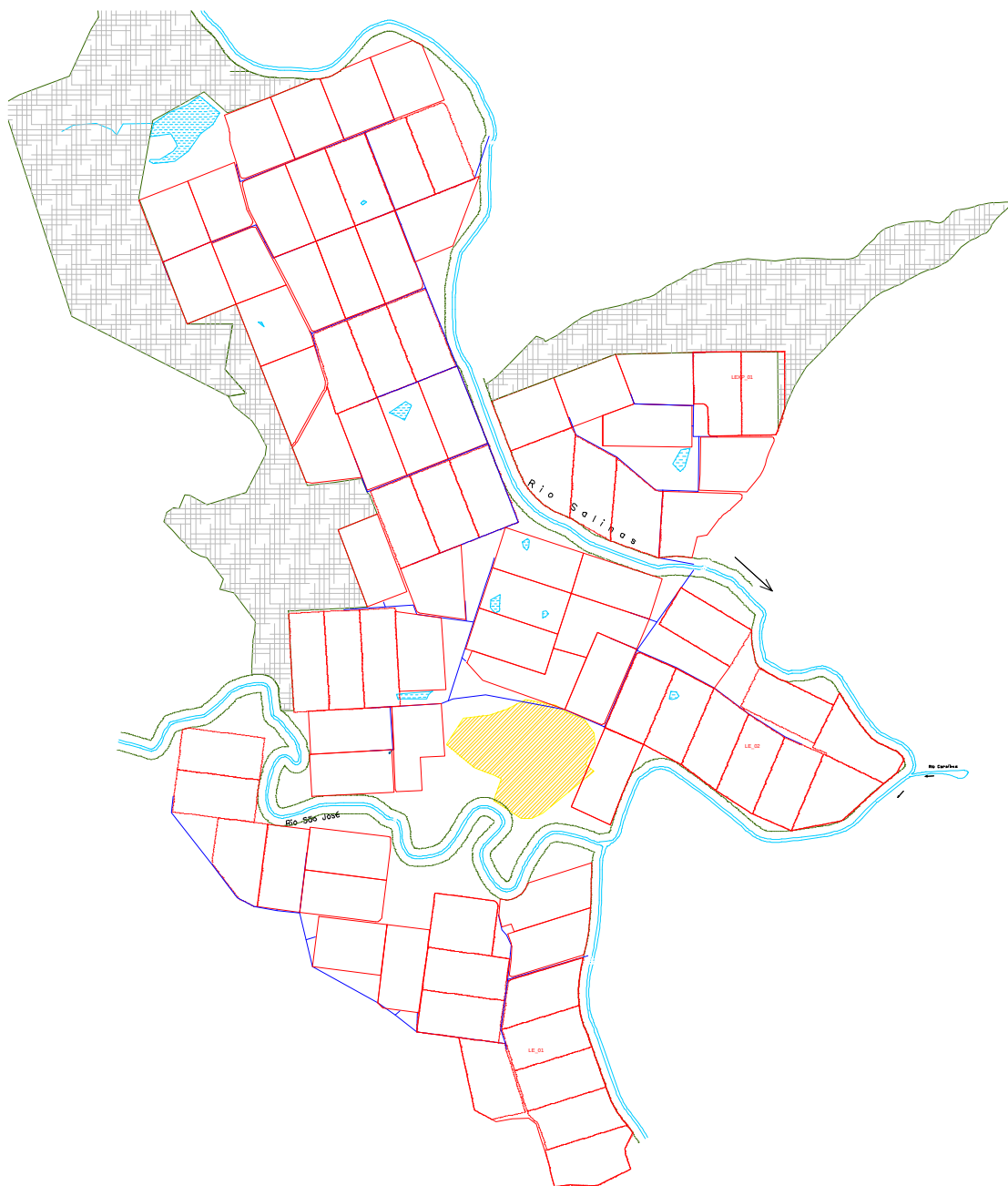


Figura 1A – Mapa do Perímetro irrigado de Salinas, Minas Gerais.

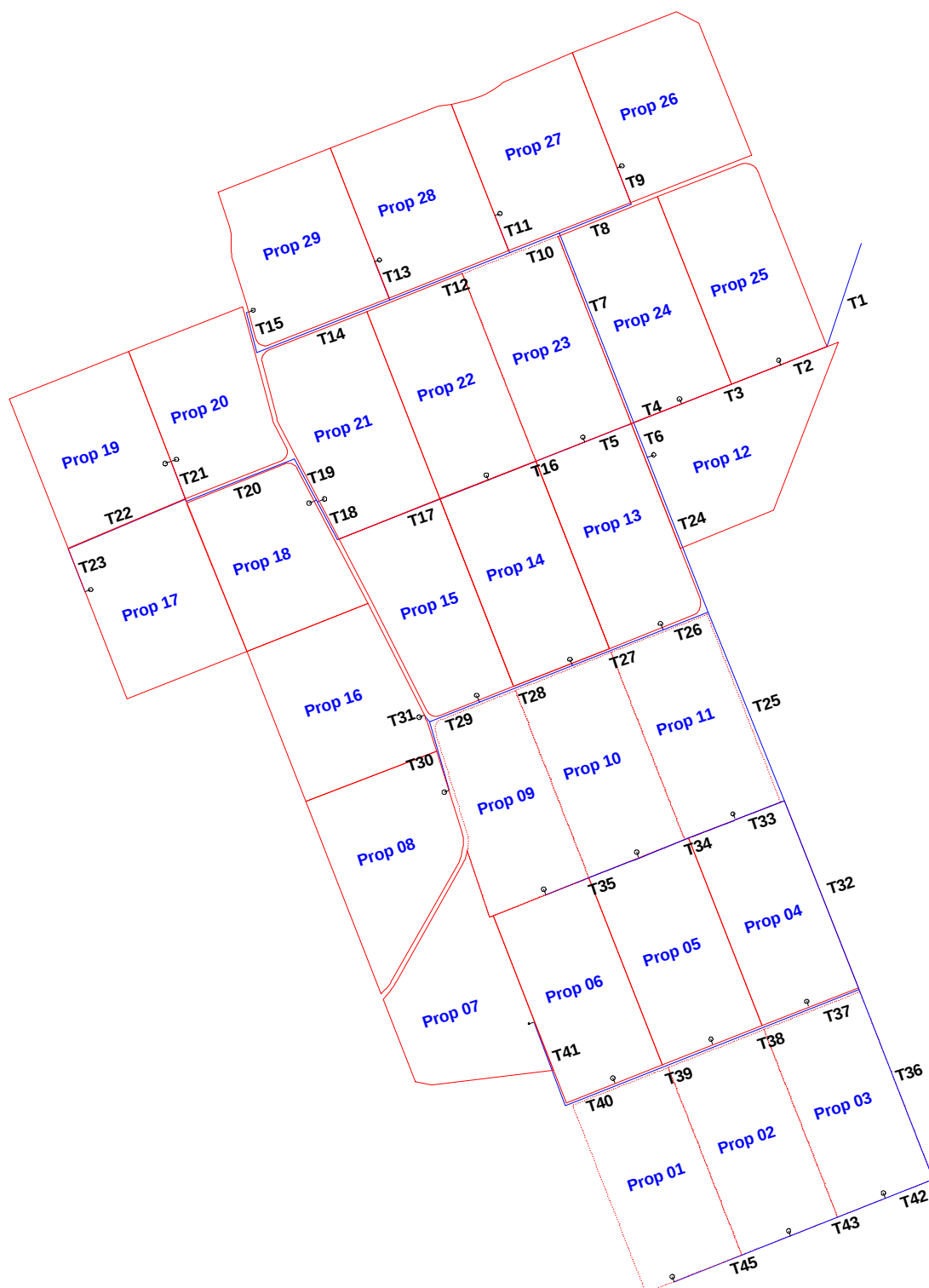


Figura 2A – Setor do perímetro selecionado para o estudo.

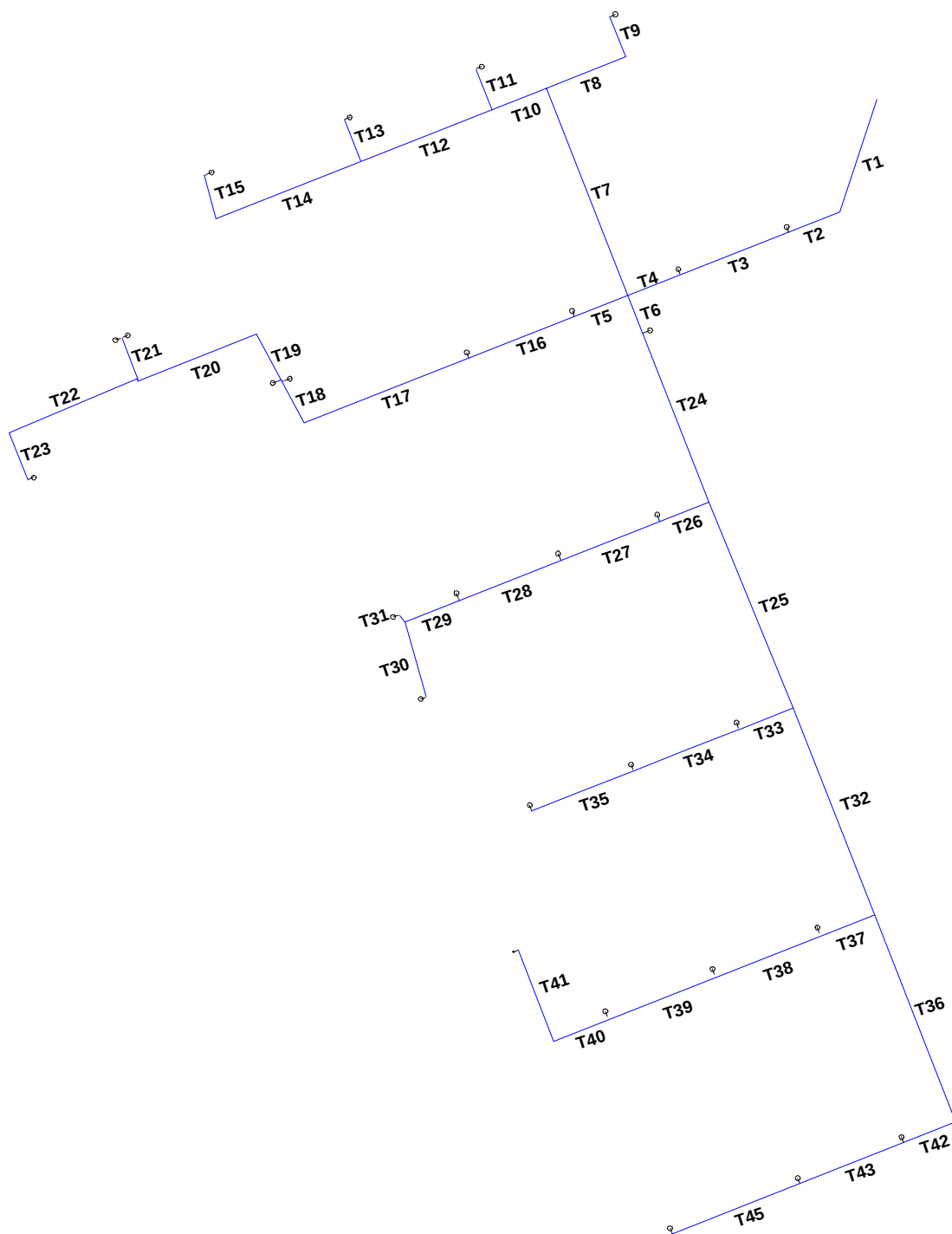


Figura 3A – Trechos de distribuição de água selecionados para o estudo.

APÊNDICE B

Quadro 1B – Propriedades, parcelas implantadas, áreas das parcelas, culturas, métodos de irrigação utilizados e datas de plantios das culturas, para o setor estudado do perímetro irrigado de Salinas, Minas Gerais

Propriedades	Parcela	Área	Cultura	Método de Irrigação	Data de Plantio
01, 02, 03, 04, 05, 10 e 14	Melão 01/01/2003	2,0	Melão	Gotejamento	01/01/2003
	Melão 22/03/2003	2,0	Melão	Gotejamento	22/03/2003
	Melão 10/06/2003	2,0	Melão	Gotejamento	10/06/2003
	Melão 29/08/2003	2,0	Melão	Gotejamento	29/08/2003
	Melão 17/11/2003	2,0	Melão	Gotejamento	17/11/2003
	Milho 01/01/2003	1,0	Milho	Aspersão Convencional	01/01/2003
	Milho 11/05/2003	1,0	Milho	Aspersão Convencional	11/05/2003
	Milho 18/09/2003	1,0	Milho	Aspersão Convencional	18/09/2003
	Feijão 01/11/2002	1,0	Feijão	Aspersão Convencional	01/11/2002
	Feijão 01/03/2003	1,0	Feijão	Aspersão Convencional	01/03/2003
	Feijão 01/07/2003	1,0	Feijão	Aspersão Convencional	01/07/2003
06, 09, 15, 18, 19, 20, 21 e 29.	Feijão 01/11/2003	1,0	Feijão	Aspersão Convencional	01/11/2003
	Maracujá	2,0	Maracujá	Gotejamento	01/01/2003
	Milho 01/01/2003	1,0	Milho	Aspersão Convencional	01/01/2003
	Milho 11/05/2003	1,0	Milho	Aspersão Convencional	11/05/2003
	Milho 18/09/2003	1,0	Milho	Aspersão Convencional	18/09/2003
	Feijão 01/11/2002	1,0	Feijão	Aspersão Convencional	01/11/2002
	Feijão 01/03/2003	1,0	Feijão	Aspersão Convencional	01/03/2003
	Feijão 01/07/2003	1,0	Feijão	Aspersão Convencional	01/07/2003
07, 08, 12, 16, 17, 24 e 25	Feijão 01/11/2003	1,0	Feijão	Aspersão Convencional	01/11/2003
	Banana	2,0	Banana	Microaspersão	01/01/2003
	Milho 01/01/2003	1,0	Milho	Aspersão Convencional	01/01/2003
	Milho 11/05/2003	1,0	Milho	Aspersão Convencional	11/05/2003
	Milho 18/09/2003	1,0	Milho	Aspersão Convencional	18/09/2003
	Feijão 01/11/2002	1,0	Feijão	Aspersão Convencional	01/11/2002
	Feijão 01/03/2003	1,0	Feijão	Aspersão Convencional	01/03/2003
	Feijão 01/07/2003	1,0	Feijão	Aspersão Convencional	01/07/2003
11, 13, 22, 23, 26, 27, e 28	Feijão 01/11/2003	1,0	Feijão	Aspersão Convencional	01/11/2003
	Abacaxi	2,0	Abacaxi	Aspersão Convencional	01/01/2003
	Melão 01/01/2003	1,0	Melão	Gotejamento	01/01/2003
	Melão 22/03/2003	1,0	Melão	Gotejamento	22/03/2003
	Melão 10/06/2003	1,0	Melão	Gotejamento	10/06/2003
	Melão 29/08/2003	1,0	Melão	Gotejamento	29/08/2003
	Melão 17/11/2003	1,0	Melão	Gotejamento	17/11/2003
	Milho 01/01/2003	1,0	Milho	Aspersão Convencional	01/01/2003
	Milho 11/05/2003	1,0	Milho	Aspersão Convencional	11/05/2003
	Milho 18/09/2003	1,0	Milho	Aspersão Convencional	18/09/2003

APÊNDICE C

Quadro 1C – Dados sobre os índices das culturas e espaçamentos utilizados no estudo

Feijão*					
f(%)	Valor de Mercado	Temp. Basal (°C)	Temp. Ótima (°C)	Salinidade Máxima (mmhos.cm⁻¹)	Espaçamento (m)
0,5	Médio	18	35	1,5	0,8 x 0,1
Milho*					
0,5	Médio	10	30	3,5	1,0 x 0,2
Melão**					
0,4	Alto	18	35	3,6	2,0 x 0,5
Banana***					
0,35	Alto	10	25	1,0	3,0 x 3,0
Abacaxi***					
0,6	Médio	10	25	1,0	0,3 x 0,4 x 0,9
Maracujá****					
0,5	Médio	8	27	2,3	2,0 x 2,75

Fonte: *ALLEN et al. (1998); *DORRENBOS e PRUIT (1979); **MIRANDA e BLEICHER (2001); ***BORGES (2000); **** MELO (2001).

Quadro 2C – Dados sobre os estádios de desenvolvimento das culturas utilizadas no estudo

Feijão*					
Fase	Duração (dias)	Duração (graus-dia)	kc	Profundidade Raiz (m)	Área Sombreada (%)
Emergência	12	200	0,40	0,1	10,0
Vegetativa	22	340	0,70	0,2	20,0
Floração	20	300	0,90	0,4	70,0
Maturação	27	400	0,95	0,5	80,0
Colheita	15	220	0,35	0,5	10,0
Milho*					
Emergência	20	260	0,40	0,15	10,0
Vegetativo	33	429	0,78	0,4	20,0
Floração	17	221	1,13	0,5	70,0
Maturação	40	520	0,88	0,5	80,0
Colheita	10	130	0,58	0,5	20,0
Melão**					
Emergência	10	100	0,40	0,1	10,0
Desenvolvimento	15	200	0,70	0,25	30,0
Intermediário	35	350	1,10	0,4	75,0
Final	10	100	0,60	0,4	80,0
Banana***					
Início	90	1170	1,0	0,2	20,0
Desenvolvimento	90	1170	1,0	0,3	50,0
Floração/Maturação	90	1170	1,2	0,4	100,0
Final	90	1170	0,9	0,4	100,0
Abacaxi***					
Início	90	1560	0,50	0,1	20,0
Desenvolvimento	270	4200	0,75	0,2	50,0
Floração/Maturação	90	1500	0,90	0,2	80,0
Final	90	1500	0,75	0,2	80,0
Maracujá****					
Inicial	30	575	0,40	0,1	5,0
Desenvolvimento	150	1920	0,70	0,6	21,0
Floração/Maturação	140	2360	0,80	0,6	28,0
Final	100	1680	0,60	0,6	28,0

Fonte: *ALLEN et al. (1998); *DORRENBOS e PRUIT (1979); ** MIRANDA e BLEICHER (2001); *** BORGES (2000); **** MELO (2001).

APÊNDICE D

Quadro 1D – Dados sobre os equipamentos de irrigação utilizados no estudo

	Aspersão	Microaspersão	Gotajamento
	Naan	Micro Naan Hadar	Tubo gotejador
Modelo	427 setorial	7110	LTV - tipo orifício
Fabricante	Naan	Naan	LTV
Ø do bocal (mm)	3,5	1,1	1,0
Vazão (L h ⁻¹)	720,0	52,0	1,4
Pressão de Serv. (kPa)	294,0	150,0	68,6
Espaçamento (m)	12,0 x 12,0	6,0 x 6,0	0,3 x 0,7
CUC (%)	85,0	91,0	90,0
Emissores por planta	-	0,25	2,0
Ø molhado	-	6,0	-

* Obs.: considerou-se que os equipamentos operaram em condições excelente de montagem e manutenção.

APÊNDICE E

PROCEDIMENTOS DE CÁLCULOS PARA ESTIMATIVA DA PRECIPITAÇÃO PROVÁVEL

O modelo misto, na forma da equação 1, foi utilizado para estimativa das quantidades de precipitação provável, segundo procedimento sugerido por THOM (1966).

$$P(Y \leq y) = P_s + P_c G(Y \leq y) \quad (1)$$

em que

P_s = probabilidade de ocorrência de períodos secos (zeros);

P_c = probabilidade de chover no período; e

$G(Y)$ = distribuição da probabilidade gama.

A distribuição de probabilidade gama, que descreve a distribuição de freqüência das quantidades de chuvas, pode ser expressa, de acordo com THOM (1966), pela equação 2.

$$G(Y \leq y) = \frac{1}{\Gamma(a)b^a} \int_0^y Y^{a-1} e^{-\frac{Y}{b}} dY \quad (2)$$

para $Y, \alpha, \beta, \Gamma(\alpha) > 0$

em que

$G(Y)$ = probabilidade de ocorrer uma quantidade de precipitação igual ou inferior a y ;

Y = variável aleatória de precipitação;

α = parâmetro de forma;

β = parâmetro de escala da variável aleatória Y ;

$\Gamma(\alpha)$ = função gama; e

Y = valor que tem probabilidade acumulada $G(Y)$ de ocorrer

A função gama é expressa pela equação 3.

$$\Gamma(a) = \int_0^{\infty} y^{a-1} e^{-y} dy \quad (3)$$

A função gama pode ser obtida, segundo Abramowitz e Stegun (1972), citados por ASSIS (1993), por aproximação, pela equação 4.

$$\Gamma(a) = \sqrt{\frac{2p}{a}} e^{a [\ln a - f(a)]} \quad (4)$$

em que

$$f(a) = 1 - \frac{1}{12a^2} + \frac{1}{360a^4} - \frac{1}{1260a^6} \quad (5)$$

Os parâmetros α e β foram obtidos pelo método da máxima verossimilhança, usando as equações 6 e 7, conforme THOM (1966):

$$a = \frac{1}{4A} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{4A}{3}} \right) \quad (6)$$

$$b = \frac{\bar{X}}{a} \quad (7)$$

em que

$$A = \ln \bar{X} - X_g \quad (8)$$

em que

$$\bar{X} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i \quad (9)$$

$$X_g = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \ln(X_i) \quad (10)$$

em que

$\bar{X}$ = média aritmética das observações; e

X_g = média geométrica das observações.

A equação 2 não tem solução imediata. Assim, as estimativas das chuvas para determinados valores de probabilidade foram obtidas através de desenvolvimento em série, por meio da seguinte função:

$$G(t) = \frac{t^a}{a\Gamma(a)e^t} F(a, t) \quad (11)$$

em que

$$F(a, t) = 1 + \frac{t}{a+1} + \frac{t^2}{(a+1)(a+2)} + \frac{t^3}{(a+1)(a+2)(a+3)} + \dots \quad (12)$$

A probabilidade de ocorrência de um valor de chuva menor ou igual a Y é dada por $G(t)$, em que $t = Y/b$.

Para estimativa da quantidade de chuva Y , a um determinado valor de probabilidade, Pr , determina-se o valor de t na Equação 11 que satisfaça a igualdade:

$$G(t) - Pr = 0 \quad (13)$$

Para a solução da equação 13 foi utilizado o algoritmo de Newton-Raphson, na forma:

$$t_{i+1} = t_i - \frac{\frac{t_i^a}{a\Gamma(a)e^{t_i}} F(a, t_i) - \text{Pr}}{\frac{t_i^{a-1}}{\Gamma(a)e^{t_i}}} \quad (14)$$

O valor inicial de t (t_o), para iniciar a interação, depende de α e Pr . As equações 15 a 19 foram sugeridas por THOM (1968) para a estimativa de t_o .

Para $\alpha \geq 1$ e $\text{Pr} \geq 0,50$,

$$t_o = \ln \frac{1}{1 - \text{Pr}} + [1,51 - 2 \text{Pr}(1 - \text{Pr})](\alpha - 1) \quad (15)$$

Para $\alpha \geq 1$ e $\text{Pr} < 0,50$,

$$t_o = \ln \frac{1}{1 - \text{Pr}} + [0,49 - 2 \text{Pr}(1 - \text{Pr})](\alpha - 1) \quad (16)$$

Para $\alpha < 1$ e $0,50 < \text{Pr} < 0,90$,

$$t_o = \frac{1,309 \text{Pr}}{1 - 0,658 \text{Pr}^2} - 0,10 \quad (17)$$

Para $\alpha < 1$ e $\text{Pr} \geq 0,90$,

$$t_o = \frac{1,309 \text{Pr}}{1 - 0,658 \text{Pr}^2} - 0,06 \quad (18)$$

Para $\alpha < 1$ e $\text{Pr} \leq 0,50$,

$$t_o = 0,01 \quad (19)$$

APÊNDICE F

PROCEDIMENTOS DE CÁLCULOS DOS PARÂMETROS PARA ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA PELO MÉTODO DE PENMAN-MONTEITH

O método de Penman-Monteith (ALLEN et al., 1998) segue a equação 1.

$$ET_o = \frac{0,408\Delta(Rn - G) + g \frac{900}{T + 273} U_2 (ea - ed)}{\Delta + g (1 + 0,34U_2)} \quad (1)$$

em que

- ET_o = evapotranspiração de referência, mm d⁻¹;
- Rn = saldo de radiação na superfície da cultura, MJ m⁻² d⁻¹;
- G = fluxo de calor no solo, MJ m⁻² d⁻¹;
- T = temperatura média diária, °C;
- U_2 = velocidade do vento à 2m de altura, m s⁻¹;
- ea = pressão de saturação de vapor, kPa;
- ed = pressão de vapor, kPa;
- $ea - ed$ = déficit de pressão de vapor, kPa;
- Δ = declividade da curva de pressão de vapor, kPa °C⁻¹; e
- γ = constante psicrométrica, kPa °C⁻¹.

Os valores de Δ , ea , ed , Rn , Rns , Rs , N , ω_s , δ , Ra , dr , Rnl , e G foram calculados pelas equações 22 a 34, respectivamente.

$$\Delta = 4098 \frac{ea}{(T + 237,3)^2} \quad (2)$$

$$ea = 0,611 e^{\frac{17,27T}{T+237,3}} \quad (3)$$

em que

e = base do logaritmo natural, adimensional.

$$ed = \frac{UR}{\frac{50}{ea(Tn)} + \frac{50}{ea(Tx)}} \quad (4)$$

em que

UR = umidade relativa média do dia, %;

$ea(Tn)$ = pressão de saturação de vapor à temperatura mínima Tn , kPa; e

$ea(Tx)$ = pressão de saturação de vapor à temperatura máxima Tx , kPa.

$$Rn = Rns - Rnl \quad (5)$$

em que

R_{ns} = saldo de radiação de ondas curtas, $\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$; e

R_{nl} = saldo de radiação de ondas longas, $\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$.

$$R_{ns} = (1 - \text{albedo}) R_s \quad (6)$$

em que

albedo = albedo, adimensional, albedo=0,23; e

R_s = radiação de ondas curtas, $\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$.

$$R_s = \left(0,25 + 0,50 \frac{n}{N} \right) R_a \quad (7)$$

em que

n/N = fração relativa de luz solar, adimensional;

n = horas de brilho solar diário, h;

N = duração total do dia, h; e

R_a = radiação solar extraterrestre, $\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$.

$$N = 7,64 w_s \quad (8)$$

$$w_s = \arccos(-\tan j \tan d) \quad (9)$$

$$d = 0,409 \sin(0,0172J - 1,39) \quad (10)$$

$$Ra = 37,6 dr (w_s \sin j \sin d + \cos j \cos d \sin w_s) \quad (11)$$

em que

dr = distância relativa Terra-Sol, adimensional;

φ = latitude, rad;

δ = declinação solar, rad; e

ω_s = ângulo horário do pôr do sol, rad.

$$dr = 1 + 0,033 \cos(0,0172J) \quad (12)$$

em que

J = número do dia do ano, adimensional.

$$Rnl = 2,45 \times 10^{-9} \left(0,9 \frac{n}{N} + 0,1 \right) \left(0,34 - 0,14 \sqrt{ed} \right) \left[(Tx + 273,15)^4 + (Tn + 273,15)^4 \right] \quad (13)$$

em que

T_x = temperatura máxima do dia, °C; e

T_n = temperatura mínima do dia, °C.

$$G = 0,38(T_i - T_{i-1}) \quad (14)$$

em que

T_i = temperatura média do dia i, °C; e

T_{i-1} = temperatura média do dia i-1, °C.

A correção para a velocidade do vento em função da altura de instalação do anemômetro e pode ser estimada por meio da Equação 35.

$$\frac{U_z}{U_2} = \frac{4,87}{\ln(67,8 z - 5,42)} \quad (15)$$

em que

U_z = velocidade do evento medida à altura z, m s⁻¹; e

Z = altura de medição da velocidade do vento, m, z = 10 m.

Os valores de γ , P e λ foram obtidos por meio das Equações 16 a 18, respectivamente.

$$g = 0,00163 \frac{P}{l} \quad (16)$$

em que

P = pressão atmosférica, kPa; e

λ = calor latente, MJ kg⁻¹.

$$l = 2,501 - 2,361 \times 10^{-3} T \quad (17)$$

$$P = 101,3 \left(\frac{293 - 0,0065 Z}{293} \right)^{5,26} \quad (18)$$

em que

Z = altitude, m.