

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO

INSTITUTO DE TECNOLOGIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA



IRRIGAÇÃO



*PROF. JORGE LUIZ PIMENTA MELLO, D.S.
PROF. LEONARDO DUARTE BATISTA DA SILVA, D.S.
ABRIL - 2007*

Este material se constitui no principal apoio à condução das disciplinas IT 115 – **Irrigação e Drenagem**, oferecida ao curso de Licenciatura em Ciências Agrícolas e IT 157 – **Irrigação**, oferecida aos cursos de Agronomia e Engenharia Agrícola.

É um paradoxo a Terra se mover ao redor do Sol e a água ser constituída por dois gases altamente inflamáveis. A verdade científica é sempre um paradoxo, se julgada pela experiência cotidiana que se agarra à aparência efêmera das coisas.

Karl Marx

AGRADECIMENTO

*Quero expressar o meu agradecimento todo especial ao jovem Professor **Leonardo Duarte Batista da Silva**, um grande e sincero amigo e excepcional figura humana, por ter contribuído de forma brilhante e competente para a melhoria do presente material, opinando sempre de maneira correta sobre o que já estava produzido, e ampliando-o com muita propriedade intelectual. Aproveito a oportunidade para parabenizá-lo pela forma magnífica e categórica que o fez brilhantemente o primeiro colocado em concurso público para Professor da UFRRJ, fato este que só veio ratificar a sua competência. Por certo, além de nos brindar com a sua convivência no dia a dia, ele irá trazer uma grande e importante contribuição à área de Recursos Hídricos do Departamento de Engenharia. Seja bem-vindo meu caro amigo.*

UFRRJ, julho de 2006.

PROF. JORGE LUIZ PIMENTA MELLO

AGRADECIMENTO

*Deixo, aqui registrado a minha satisfação em participar desse trabalho com o Professor **Jorge Luiz Pimenta Mello**, que desde quando cheguei à UFRRJ em 2002, foi sempre uma referência, um incentivador e um grande amigo. Espero que esse trabalho seja apenas o primeiro de muitos, que com certeza ainda virão. Obrigado pela oportunidade de ser co-autor deste texto que visa promover o ensino público, gratuito e de qualidade, cuja meta principal é contribuir para construção de um país melhor para todos.*

UFRRJ, outubro de 2006.

PROF. LEONARDO DUARTE BATISTA DA SILVA

ÍNDICE

	Pág.
Capítulo I – Introdução ao estudo da irrigação	I.1
1.1 – Considerações iniciais	I.1
1.2 – Histórico e desenvolvimento	I.1
1.3 – A irrigação no Brasil e no mundo	I.4
1.4 – Área irrigada e métodos de irrigação utilizados nas diferentes regiões do Brasil	I.8
1.5 – A irrigação e o meio ambiente	I.12
1.6 – Contaminação dos mananciais hídricos	I.13
1.7 – Cobrança pelo uso da água para irrigação	I.14
1.8 – Tipos de sistemas	I.16
1.9 – Critérios para a seleção do método	I.16
1.10 – Vantagens da irrigação	I.17
Capítulo II – Estudos Climáticos: Evapotranspiração	II.1
2.1 – Introdução	II.1
2.2 – Conceitos fundamentais	II.3
2.3 – Fatores intervenientes no processo de evapotranspiração	II.3
2.4 – Evapotranspiração potencial das culturas e a de referência	II.4
2.5 – Quantificação da evapotranspiração	II.6
2.5.1 – Métodos diretos	II.8
2.5.1.1 – Lisímetros	II.8
2.5.1.2 – Parcelas experimentais no campo	II.11
2.5.2 – Métodos indiretos	II.12
2.5.2.1 – Tanque Evaporimétrico “Classe A”	II.12
2.5.2.2 – Método de Thornthwaite	II.16
2.5.2.3 – Método de Blaney-Criddle modificado (FAO)	II.19
2.4.2.3 – Método da Radiação	II.23
2.4.2.4 – Método de Hargreaves – Samani	II.27
2.4.2.5 – Método de Penman-Monteith-FAO	II.29
Capítulo III – Estudos Pedológicos	III.1
3.1 – Disponibilidade de água no solo	III.1
3.2 – Infiltração da água no solo	III.6
3.2.1 – Introdução	III.6
3.2.2 – Equações representativas da infiltração	III.8
3.2.2.1 – Equação tipo potencial	III.8
3.2.2.1 – Equação tipo potencial modificada (equação de Kostiakov-Lewis)	III.12
3.2.3 – Métodos de determinação de Vi e I	III.13
3.2.3.1 – Método do infiltrômetro de anel	III.13
3.2.3.2 – Método do infiltrômetro de sulco	III.14
3.2.3.3 – Método da entrada e saída da água no sulco	III.15
3.2.4 – Resolução da equação de infiltração utilizando o método numérico de Newton-Raphson	III.19
Capítulo IV – Sistemas de Irrigação	IV.1
4.1 – Introdução	IV.1
4.2 – Parâmetros para o dimensionamento de um sistema de irrigação	IV.2
4.3 – Classificação dos sistemas de irrigação	IV.5
4.4 – Fatores que influenciam na escolha do método de irrigação	IV.5

Capítulo V – Irrigação por Aspersão	V.1
5.1 – Introdução	V.1
5.1.1. – Forma de aplicação da água	V.1
5.1.2. – Adaptabilidade do sistema	V.2
5.1.2.1. – Solos	V.2
5.1.2.2. – Topografia	V.2
5.1.2.3. – Clima	V.2
5.1.2.4. – Culturas	V.3
5.2 – Vantagens e limitações do sistema	V.3
5.3 – Componentes do sistema	V.4
5.3.1 – Aspersores	V.4
5.3.1.2 – Classificação quanto ao mecanismo de rotação	V.5
5.3.1.3 – Classificação quanto à pressão de serviço do aspersor	V.5
5.3.2 – Tubulações	V.5
5.3.3 – Moto-bomba	V.6
5.3.4 – Acessórios	V.6
5.4 – Classificação dos sistemas por aspersão	V.6
5.5 – Disposição dos aspersores no campo	V.7
5.6 – Fatores que afetam o desempenho de um aspersor	V.8
5.6.1 – Bocais dos aspersores	V.8
5.6.2 – Pressão de serviço dos aspersores	V.8
5.6.3 – Superposição	V.8
5.6.4 – Ventos	V.9
5.7 – Vazão dos aspersores	V.9
5.8 – Intensidade de precipitação dos aspersores	V.9
5.9 – Seleção do aspersor	V.9
5.10 – Dimensionamento das tubulações	V.10
5.10.1 – Linhas laterais	V.10
5.10.1.1 – Considerações sobre perda de carga (<i>hf</i>) nas linhas laterais	V.12
5.10.1.2 – Determinação do fator de Christiansen	V.12
5.10.1.3 – Procedimento para dimensionamento de LL com dois diâmetros	V.15
5.10.1.4 – Relação entre a pressão no início da LL, no final e pressão média	V.20
5.10.1.5 – Linhas ou ramais de espera em sistemas por aspersão	V.22
5.10.2 – Linha principal	V.25
5.11 – Altura manométrica total	V.27
5.12 – Potência do conjunto moto-bomba	V.27
5.13 – Projeto de um sistema de irrigação por aspersão convencional	V.27
5.14 – Desempenho de um sistema de irrigação por aspersão convencional	V.38
Capítulo VI – Irrigação Localizada	VI.1
6.1 – Introdução	VI.1
6.2 – Vantagens do sistema	VI.2
6.3 – Limitações do sistema	VI.2
6.4 – Componentes do sistema	VI.2
6.5 – Descrição dos componentes do sistema	VI.3
6.5.1 – Moto-bomba	VI.3
6.5.2 – Cabeçal de controle	VI.3
6.5.3 – Linha principal	VI.3
6.5.4 – Linha de derivação	VI.3
6.5.5 – Linha lateral	VI.3
6.5.6 – Emissores	VI.3
6.6 – Dimensionamento do sistema – gotejamento	VI.4
6.6.1 – Quantidade de água necessária	VI.4
6.6.2 – Evapotranspiração	VI.4

6.6.3 – Irrigação real necessária	VI.7
6.6.4 – Irrigação total necessária	VI.7
6.6.5 – Tempo de irrigação por posição	VI.7
6.6.6 – Número de unidades operacionais	VI.7
6.6.7 – Vazão necessária ao sistema	VI.8
6.6.8 – Dimensionamento hidráulico do sistema	VI.8
6.6.8.1 – Linhas laterais	VI.8
6.6.8.2 – Linhas de derivação	VI.9
6.6.8.3 – Linha principal	VI.9
6.6.9 – Altura manométrica total	VI.9
6.6.10 – Potência do conjunto moto-bomba	VI.9
6.6.11 – Projeto de um sistema	VI.10
Capítulo VII – Irrigação por Pivô Central	VII.1
7.1 – Introdução	VII.1
7.2 – Tipos de pivôs	VII.2
7.3 – Variação da vazão ao longo do pivô	VII.2
7.4 – Intensidade de precipitação	VII.4
7.5 – Lâmina aplicada por volta do pivô central	VII.5
7.6 – Intensidade de precipitação média em cada ponto	VII.5
7.7 – Precipitação máxima em cada ponto	VII.6
7.8 – Velocidade de deslocamento da última torre	VII.8
7.9 – Tempo mínimo de rotação	VII.8
7.10 – Vazão necessária ao sistema	VII.8
7.11 – Uniformidade de aplicação com pivô central	VII.8
7.12 – Eficiência de aplicação com pivô central	VII.9
7.13 – Limitações para uso do pivô central	VII.9
7.13.1 – Solos	VII.9
7.13.2 – Declividade do terreno	VII.9
7.13.3 – Culturas	VII.9
Capítulo VIII – Irrigação por Autopropelido	VIII.1
8.1 – Introdução	VIII.1
8.2 – Escolha do autopropelido e do aspersor canhão	VIII.2
8.3 – Largura da faixa molhada pelo autopropelido	VIII.2
8.4 – Comprimento da faixa molhada pelo autopropelido	VIII.2
8.5 – Comprimento do percurso do autopropelido	VIII.2
8.6 – Tempo de irrigação por faixa	VIII.2
8.7 – Lâmina bruta de irrigação aplicada	VIII.3
8.8 – Intensidade de aplicação média	VIII.3
8.9 – Tempo total de irrigação por faixa	VIII.4
8.10 – Número de faixas irrigadas por dia	VIII.4
8.11 – Número de faixas irrigadas por autopropelido	VIII.5
8.12 – Área irrigada por autopropelido	VIII.5
8.13 – Dimensionamento hidráulico do autopropelido	VIII.5
Capítulo IX – Irrigação por Sulcos de Infiltração	IX.1
9.1 – Introdução	IX.1
9.2 – O método de irrigação por sulcos de infiltração	IX.2
9.2.1 – Características de um sistema de irrigação por sulcos	IX.3
9.2.1.1 – Forma e tamanho do sulco	IX.3
9.2.1.2 – Infiltração	IX.3
9.2.1.3 – Espaçamento entre sulcos	IX.4
9.2.1.4 – Declividade e vazão	IX.5
9.2.1.5 – Comprimento dos sulcos	IX.6

9.2.2 – Procedimento para determinação das curvas de avanço	IX.6
9.2.3 – Considerações sobre o tempo de avanço relacionado com o tempo de oportunidade	IX.8
9.2.4 – Abastecimento de água aos sulcos	IX.9
9.2.5 – Manejo de água aos sulcos	IX.10
9.2.6 – Projeto de um sistema de irrigação por sulcos de infiltração	IX.10
Capítulo IX – Irrigação por Inundação	X.1
10.1 – Introdução	X.1
10.2 – Tipo de solo	X.1
10.3 – Declividade do terreno	X.2
10.4 – Dimensões dos tabuleiros	X.3
10.5 – Forma dos diques ou taipas	X.3
10.6 – Manejo de água nos tabuleiros	X.3
10.7 – Determinação das vazões mobilizadas aos tabuleiros	X.4
10.7.1 – Determinação da vazão máxima para encher o tabuleiro	X.4
10.7.2 – Determinação da vazão necessária para manter a lâmina constante	X.5

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO AO ESTUDO DA IRRIGAÇÃO

1.1 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A técnica da irrigação pode ser definida como sendo a aplicação artificial de água ao solo, em quantidades adequadas, visando proporcionar a umidade adequada ao desenvolvimento normal das plantas nele cultivadas, a fim de suprir a falta ou a má distribuição das chuvas.

Dessa forma, o objetivo que se pretende com a irrigação é satisfazer as necessidades hídricas das culturas, aplicando a água uniformemente e de forma eficiente, ou seja, que a maior quantidade de água aplicada seja armazenada na zona radicular à disposição da cultura. Este objetivo deve ser alcançado sem alterar a fertilidade do solo e com mínima interferência sobre os demais fatores necessários à produção cultural.

Os fatores necessários para prover as culturas de água necessária para máxima produtividade, são principalmente: energia, água, mão-de-obra e as estruturas de transporte da água, devendo existir uma completa inter-relação entre eles de tal forma que se um deles não se encontrar bem ajustado, o conjunto ficará comprometido, prejudicando o objetivo a ser alcançado que é a máxima produtividade.

1.2 - HISTÓRICO E DESENVOLVIMENTO

Na literatura, nota-se que a irrigação foi uma das primeiras modificações no ambiente realizadas pelo homem primitivo. As primeiras tentativas de irrigação foram

bastante rudimentares, mas a importância do manejo da água tornou-se evidente na agricultura moderna. Tribos nômades puderam estabelecer-se em determinadas regiões, irrigando terras férteis e, assim, assegurando produtividade suficiente para a sua subsistência.

Dados históricos das sociedades antigas mostram a sua dependência da agricultura irrigada, onde grandes civilizações desenvolveram-se nas proximidades de grandes rios como o rio Nilo, no Egito, por volta de 6000 A.C., rio Tigre e Eufrates, na Mesopotâmia, por volta de 4000 a.C., e Rio Amarelo, na China, por volta de 3000 a.C. Na Índia, há indícios da prática da irrigação em 2500 a.C. Nas civilizações antigas, a irrigação era praticada fazendo-se represamentos de água cercados por diques. Com o avanço da tecnologia e divulgação das mesmas, a irrigação espalhou-se por várias partes do mundo.

Todos os anos, as águas do Nilo, engrossadas pelas chuvas que caem em setembro/outubro nas cabeceiras, cobriam as margens e se espalhavam pelo Egito. Quando baixavam, deixavam uma camada de húmus extremamente fértil, onde os camponeses plantavam trigo e seus animais pastavam. Havia, entretanto, um grave inconveniente: se a cheia era muito alta, causava devastação; se fosse fraca, restavam menos terras férteis para semear e os alimentos escasseavam - eram os anos de vacas magras. Tornava-se vital controlar essas cheias. Sob o comando do faraó Ramsés III, os egípcios construíram diques que prensaram o rio em um vale estreito, elevando suas águas e represando-as em grandes reservatórios, de onde desciam aos campos através de canais e comportas, na quantidade desejada. O homem começava a dominar a ciência da irrigação e se dava conta de sua importância para o progresso. Experiências semelhantes ocorriam em outras partes do mundo de então. A maioria das grandes civilizações surgiu e se desenvolvia nas bacias dos grandes rios.

Na Índia, os métodos de irrigação nos vales dos rios Indo e Ganges são conhecidos e praticados desde os tempos memoriais. Na China, sua imensa população sempre teve que realizar muitos esforços para cultivar arroz. Com muito engenho, o camponês chinês elevava a água, por processo manual, até os terraços que construíam nas escarpas das montanhas e, de lá, distribuíam-na cuidadosamente, quadra por quadra, com total aproveitamento do líquido e do solo.

A irrigação no México e América do Sul foi desenvolvida pelas civilizações Maias e Incas há mais de 2000 anos. A técnica da irrigação continua a ser utilizada nessas terras, em algumas com sistemas de condução e distribuição de água bem antigos. No Irã,

Ganats, túneis com 3000 anos conduzem água das montanhas para as planícies. Barragens de terra construídas para irrigar arroz no Japão, bem como tanques de irrigação em Sri Lanka, datam 2000 anos e se encontram em pleno uso.

Nos EUA, a irrigação já era praticada pelos índios da região sudoeste a 100 A.C.. Exploradores espanhóis encontraram evidências de canais de irrigação e derivações ao longo de vários pontos dos rios. Os espanhóis também introduziram aos índios novos métodos de irrigação e novas culturas irrigadas, tais como frutíferas, vegetais, oliveira, trigo, e cevada. Como em outras áreas do mundo a irrigação permitiu que índios se estabelecessem e desfrutassem de fonte mais segura de alimentos.

Os pioneiros na região oeste dos EUA não foram diferentes do que os povos das civilizações antigas. Os agricultores desenvolveram técnicas de irrigação que eram empregadas através de cooperativas. O desenvolvimento da agricultura irrigada no oeste americano teve apoio do governo através dos atos: Desert Land Act em 1877 e do Carey Act em 1894. Nas regiões sudoeste da Califórnia e Utah, a irrigação não expandiu rapidamente até o ato Reclamation Act, em 1902. O desenvolvimento da irrigação deveu-se ao apoio do governo, fornecendo crédito, e técnicos especializados para a construção da infra-estrutura de distribuição e armazenamento de água para irrigação. Depois da Segunda Guerra Mundial, a agricultura irrigada expandiu rapidamente na região Central das Grandes Planícies e na região Sudoeste. Nos últimos anos, a expansão das áreas irrigadas tem diminuído bastante em função dos baixos preços em commodities, da alta dos custos de energia e da menor disponibilidade dos recursos hídricos.

O Japão, a Indonésia e outros países do Oriente adotaram sistemas parecidos. Aqui na América do Sul, os Maias, Incas e Astecas deixaram vestígios de suas obras de irrigação onde hoje se localizam o México, Peru, norte do Chile e Argentina. Na Espanha e na Itália ainda sobrevivem redes de canais e aquedutos dos tempos dos dominadores árabes e romanos.

Israel e Estados Unidos constituem exemplos a parte. Sem a irrigação, a agricultura seria impossível em Israel, com seu solo pedregoso, ausência severa de chuvas e um único rio perene, o Jordão. Aproveitando de forma extremamente racional o pequeno Jordão, construindo imenso aqueduto do lago Tiberíades até o deserto de Neguev, extraindo água dos mananciais subterrâneos e aplicando modernos processos científicos no uso econômico da água, a nação israelense consegue não só abastecer-se como exportar cereais, frutas e laticínios. Já os Estados Unidos dispensam comentários na condição de

maior produtor mundial de alimentos, e devem muito de sua prosperidade aos gigantescos e numerosos projetos de irrigação que implantaram em vários pontos de seu território.

O desenvolvimento de várias civilizações antigas pode ser traçado através do sucesso da irrigação. A irrigação antiga teve como consequência dois grandes impactos: suprimento de alimento e aumento de população. Através da irrigação foi possível estabelecer uma fonte mais estável de alimentos, fibras e suportar populações mais densas. O insucesso de civilizações pode ser notado através de aspectos físicos e sociais ligados ao desenvolvimento da irrigação. Entre os aspectos físicos podemos citar a incapacidade em lidar com inundações e salinidade. Em outra instância, a falta de cooperação entre povos que desenvolviam e operavam sistemas de irrigação. Problemas semelhantes ainda acontecem nos dias de hoje em áreas com agricultura irrigada em expansão.

O planeta conta atualmente com cerca de 220 milhões de hectares de terras irrigadas. Ainda é pouco; representam menos de 5% das áreas disponíveis para a agricultura. No entanto, alimentam mais da metade da população que vive sobre a Terra. Esta desproporção é uma prova das vantagens da cultura irrigada sobre a lavoura de sequeiro.

O Brasil é um país iniciante e tem dois desafios: o do Nordeste, onde há clima seco, problemas de salinidade da água e poucos rios perenes, como o São Francisco, e o do restante do país, com suas más distribuições pluviométricas e outros fatores.

1.3 - A IRRIGAÇÃO NO BRASIL E NO MUNDO

A irrigação no Brasil depende de fatores climáticos. No semi-árido do Nordeste, é uma técnica absolutamente necessária para a realização de uma agricultura racional, pois os níveis de chuva são insuficientes para suprir a demanda hídrica das culturas. Nas regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste, pode ser considerada como técnica complementar de compensação da irregularidade das chuvas. A irrigação supre as irregularidades pluviométricas, chegando a possibilitar até três safras anuais. É o caso do município de Guaíra (SP), onde operam mais de uma centena de equipamentos do tipo pivô central. Na Amazônia, o fenômeno é inverso, pois há excesso de chuvas; neste caso, deve-se retirar água do solo, através de drenagem. É o que ocorre na Fazenda São Raimundo (Pará), parte do projeto Jari.

Na safra de 1987/1988, a agricultura irrigada foi responsável por 16% da produção brasileira de grãos. Ela abastece todo o mercado de verduras e legumes dos grandes centros populacionais, colabora ativamente no fornecimento de frutas para o mercado interno e para a exportação. O mesmo ocorre com a produção de flores. Também é significativa sua participação na produção de sucos cítricos para exportação, pois eleva a produtividade média de duas para seis e até dez caixas de laranja por pé. Esta produtividade foi alcançada na Fazenda 7 Lagoas, em Mogi Guaçu (SP), com o uso de equipamento autopropelido, e na região de Bebedouro (SP), com irrigação localizada (Figura I.1). A iniciativa privada é responsável por 94% dessa irrigação, e os 6% restantes são projetos públicos.

A distribuição da irrigação no Brasil pode ser dividida em três grupos:

- irrigação "obrigatória" no Nordeste;
- irrigação "facilitada" no Rio Grande do Sul;
- irrigação "profissional" nas regiões Sudeste, Centro-Oeste e parte da região Sul.

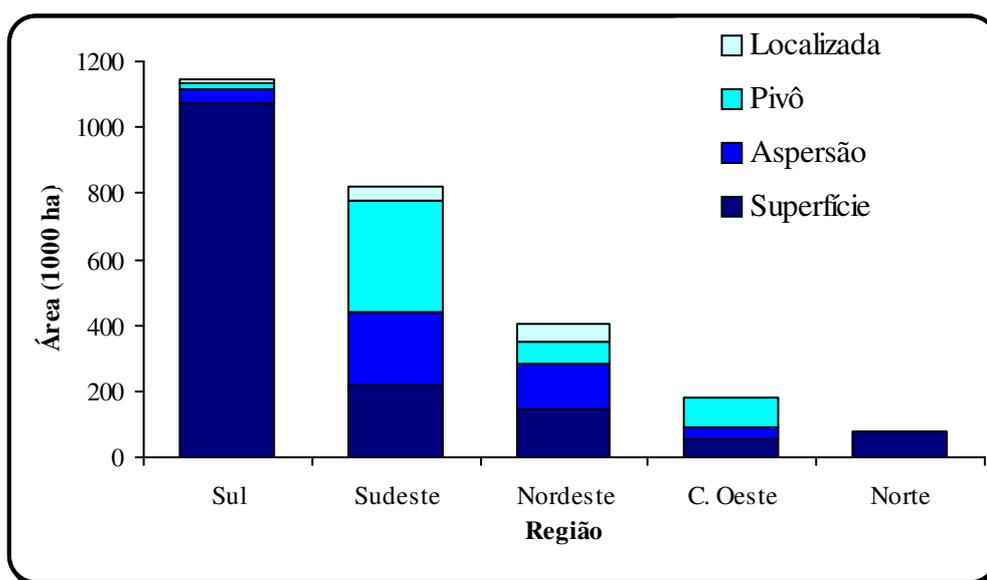


Figura I.1 - Métodos de irrigação por região no Brasil.

No Rio Grande do Sul, vastas extensões de áreas planas e uma boa disponibilidade de água facilitaram a implantação de grandes tabuleiros que produzem arroz irrigado. O projeto Camaquã é um exemplo a ser lembrado. O método predominante é a inundação, com baixo nível tecnológico. Abrange mais de 40% de área irrigada no país, apresentando interessantes exemplos de canais de distribuição de água explorados por particulares.

A irrigação "profissional" deve ser entendida como aquela em que o agricultor investe na tecnologia de irrigação, buscando garantir, aumentar ou melhorar sua produção. É praticada principalmente nos Estados de São Paulo, Minas Gerais, Mato Grosso do Sul, Paraná e Santa Catarina. Adotam-se, em geral, duas safras anuais em culturas de maior retorno econômico, como feijão, frutas, produção de sementes selecionadas, tomate e flores. Predomina o método da aspersão, com uma tendência para a utilização de equipamentos do tipo pivô central, que são automatizados e cobrem grandes áreas (em média 50 a 60, chegando a mais de 120 hectares por um único equipamento). Tal irrigação desenvolveu-se a partir de 1980, impulsionada por programas de incentivo e pela implantação da indústria nacional de equipamentos. Disponibilidade restrita de recursos hídricos e de energia elétrica no meio rural são empecilhos para a sua maior expansão. A região dos cerrados do Brasil Central é considerada de grande potencial para a adoção da agricultura irrigada, podendo transformar-se em enorme celeiro de produção de grãos.

A partir de 1995, houve um crescimento significativo da irrigação no país, com a implementação de projetos particulares e a diversificação dos métodos de irrigação. Em 1996, na implantação de projetos privados, foram incluídos aproximadamente 10 mil hectares em 3.100 operações de investimentos, envolvendo, aproximadamente, US\$ 23,2 milhões (média de US\$ 7.480 por ha), com a seguinte participação regional:

- Norte: 2,4%;
- Nordeste: 26,4%;
- Centro-oeste: 34,1%;
- Sudeste: 25,6%; e
- Sul 11,5%.

A história da irrigação no Nordeste está vinculada à luta contra a falta de água no polígono das secas. Desde o Segundo Império, é constante a promessa de irrigar a região com a política de construção de açudes e resultados práticos muito localizados. Condições adversas de clima, solos em geral inadequados, falta de infra-estrutura, sérios problemas na estrutura fundiária, práticas agrícolas de baixo nível tecnológico e questões políticas são alguns problemas existentes. A implantação de um perímetro irrigado envolve custos muito elevados, de 6 mil a 20 mil dólares por hectare. Os projetos particulares consomem entre 600 a 3.500 dólares. O perímetro deve ser suprido com rede de energia elétrica, escolas, hospitais, estradas, habitações, treinamento etc.

Alguns projetos públicos foram instalados sob o enfoque de uma "solução social". Existem também problemas de salinização do solo devido ao manejo inadequado da irrigação e falta de drenagem. Chapman (1975) estimou em mais de 25 mil hectares de área

total salinizada nessa região do Brasil. Sob esse aspecto, devem ser considerados os projetos Morada Nova e Curu-Paraipava, ambos no Ceará, dentre outros. A iniciativa privada soube ser mais eficiente, tirando proveito da infra-estrutura, bem como dos resultados positivos das próprias iniciativas governamentais, e vem obtendo sucesso com a irrigação, principalmente nos Estados do Ceará, Rio Grande do Norte, Bahia e Pernambuco. Pode ser destacado o projeto do Grupo Maisa (Mossoró Agro Industrial S.A.), em Mossoró (RN), que abastece praticamente todo o país com melão produzido sob irrigação localizada e com uso de água subterrânea.

No Vale do São Francisco, região favorecida pela insolação e pela disponibilidade de água, floresce auspiciosamente, no pólo Petrolina-Juazeiro, a agricultura irrigada (merecem destaque os projetos Tourão, Nilo Coelho e do grupo Milano). Baseada na infra-estrutura governamental e ligada à iniciativa privada, essa agricultura irrigada abastece uma agroindústria recém implantada e fornece frutas para o mercado interno e para exportação. Em termos de extensão, toda a região nordestina contribui com menos de 300.000 ha do total irrigado no país.

De acordo com dados da FAO (Food and Agriculture Organization), a China possui a maior área irrigada do planeta, sendo esta superior a 52 milhões de hectares. O Brasil ocupa a 17ª posição, com mais de 2,6 milhões de hectares irrigados (Tabela I.1). A maioria da área irrigada no mundo teve seu desenvolvimento recentemente. Em 1961 era cerca de 137 milhões de hectares, que se expandiu a uma taxa de 2% ao ano. Atualmente esta expansão caiu para uma taxa de 1% ao ano.

A área irrigada nos EUA era de aproximadamente 7,5 milhões de hectares em 1945. Nesta época essas áreas eram distribuídas na região sudoeste (2,3 milhões de ha), nos estados montanhosos (2,5 milhões de ha) e a região noroeste (1,4 milhões de ha). A seca da década de 1950 estimulou a irrigação nas Grandes Planícies (Nebraska, Iowa, Oklahoma, Kansas, etc) com água subterrânea bombeada do vasto aquífero Ogallala. Com o surgimento do sistema de irrigação por aspersão por Pivô Central e a água subterrânea prontamente disponível, a irrigação expandiu rapidamente nas décadas de 60 e 70. A área irrigada expandiu na região úmida do sudeste também nas décadas de 60 e 70. O total de área irrigada essencialmente se estabilizou na década de 80, em função do baixo preço de commodities, do alto preço da energia e do escasseamento dos recursos hídricos. Em 1987, a área irrigada nos EUA era estimada em 19 milhões de ha.

A história da irrigação praticamente se confunde com a história da humanidade. Já foi possível comprovar, por exemplo, que há 4.500 a.C., essa prática agrícola foi usada no continente asiático e mais tarde, por volta de 2000 a.C., também pelos chineses e depois indianos (1000 a.C.).

Na África, às margens do histórico rio Nilo, os Egípcios foram seus precursores. Na Europa, foram os espanhóis, gregos e italianos, e na América, os Incas (Peru), e os Astecas (México).

No Brasil credita-se aos padres jesuítas, na antiga fazenda Santa Cruz, no estado do Rio de Janeiro, por volta de 1589, a primazia de terem sido os pioneiros na implantação de sistemas de irrigação para fins agrícolas.

Os anos se passaram e a irrigação, de prática rudimentar, se estruturou em bases técnico-científicas a tal ponto que, hoje, é tida como verdadeira ciência. Pesquisas realizadas pela FAO mostram que 50 % da população mundial alimenta-se de produtos agrícolas cultivados em áreas irrigadas.

Tabela I.2 - Áreas irrigadas, plantadas e métodos de irrigação utilizados no Brasil

Estado Região	Superf. (ha)	Aspers. (ha)	Pivô (ha)	Localiz. (ha)	Totais (ha)	Região (%)	País (%)	Área plantada (x 1000 ha)	Irrg/Plant (%)
PR	20.000	10.000	20.000	5.000	55.000	4,8	2,1	7.745,7	0,71
RS	950.000	19.000	19.000	5.000	974.000	84,9	37	7.393,1	13,17
SC	105.000	12.600		1.200	118.800	10,4	4,5	3.138,4	3,79
Região Sul	1.075.000	41.600	20.000	11.200	1.147.800		43,7	18.277,2	6,28
%Região	93,7	3,6	1,7	1					
ES	8.760	24.400	6.000	360	39.520	4,8	1,5	800	4,94
MG	96.000	68.400	80.000	15.620	260.020	31,70	9,9	4.450,5	5,84
RJ	40.000	28.000		4.000	72.000	8,8	2,7	345,2	20,86
SP	75.000	100.000	250.000	25.000	450.000	54,8	17,1	6.900	6,52
R. Sudeste	219.760	220.800	336.000	44.980	821.540		31,2	12.495,7	6,57
%Região	26,7	26,90	40,9	5,5					
AL	7.200	300			7.500	1,9	0,3	585,2	1,28
BA	42.060	41.090	38.980	18.480	140.610	35	5,3	3.800	3,7
CE	29.848	26.388	17.772	3.025	77.033	19,2	2,9	2.316	3,33
MA	22.400	10.600	2.100	4.900	40.000	10	1,5	1.874,8	2,13
PB	112	635			747	0,2	0	1.059,1	0,07
PE	29.120	40.000	8.900	6.980	85.000	21,2	3,2	1.419,8	5,99
PI	10.824	4.250	790	2.325	18.189	4,5	0,7	1.500	1,21
RN	3.090	2.734	480	8.184	14.488	3,6	0,6	632,4	2,29
SE	1.080	9.758		7.200	18.038	4,5	0,7	1.041,6	1,73
R. Nordeste	145.734	135.755	69.022	51.094	401.605		15,3	14.228,9	2,82
%Região	36,3	33,8	17,2	12,70					
DF	460	3.500	5.800	150	9.910	5,5	0,4	222,7	4,45
GO	9.000	27.500	70.000		106.500	59,1	4,1	2.662,8	4
MT	3.000	2.100	3.000		8.100	4,5	0,3	3.121,8	0,26
MS	39.000	2.900	12.500	1.200	55.600	30,9	2,1	1.738,3	3,2
R. C. Oeste	51.460	36.000	91.300	1.350	180.110		6,8	7.745,6	2,33
%Região	28,6	20	50,70	0,7					
AC	600				600	0,8	0	120,4	0,5
AP	100				100	0,1	0	3,5	2,87
AM	700	500			1.200	1,5	0	75,9	1,58
PA	6.260				6.260	8	0,2	965,7	0,65
RO		100			100	0,1	0	801,4	0,01
RR	4.800	200			5.000	6,4	0,2	27,4	18,27
TO	64.150	950			65.100	83,1	2,5	220,4	29,54
R. Norte	76.610	1.750			78.360		3	2.214,6	3,54
%Região	97,8	2,2							
Brasil	1.568.564	435.905	516.322	108.624	2.629.415			54.962	4,78
%País	59,7	16,6	19,6	4,1					

Fonte: Christopidis (1997) e Telles (1999).

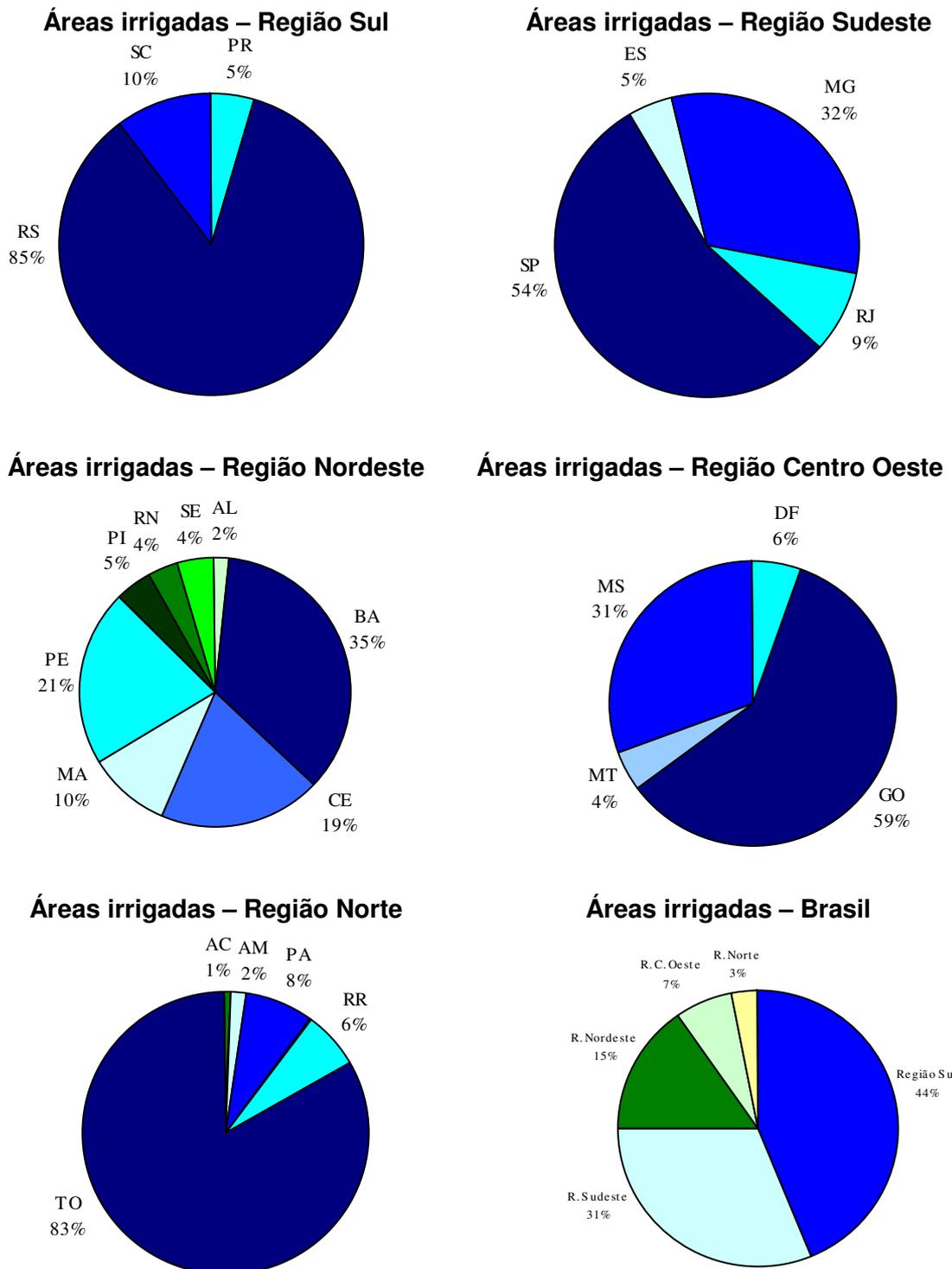


Figura I.2 – Distribuição das áreas irrigadas por Estados e Regiões.

1.5 - A IRRIGAÇÃO E O MEIO AMBIENTE

Os impactos positivos da atividade agrícola, como geração de empregos, oferta de alimentos, produtos essenciais à vida humana, fixação do homem no campo ou em pequenos centros, são evidentes, amplamente reconhecidos e de grande importância. Mas, de certa forma a sociedade tem sido complacente com os danos ambientais provocados pelas atividades agrícolas, em favor dos benefícios gerados pelo setor. No entanto, é irracional e injustificável que, para produzirmos o alimento de hoje, comprometamos os recursos naturais de amanhã.

O impacto ambiental é definido pela resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) 001/86 (CONAMA, 1992), como qualquer alteração das propriedades físicas, químicas e biológicas do meio ambiente, causada por qualquer forma de matéria ou energia resultante das atividades humanas que direta ou indiretamente afetam:

- a saúde, a segurança e o bem-estar da população;
- as atividades sociais e econômicas;
- a biota;
- as condições estéticas e sanitárias do meio ambiente; e,
- a qualidade dos recursos ambientais.

É importante ressaltar que o conceito de impacto ambiental abrange apenas os efeitos da ação humana sobre o meio ambiente, isto é não considera os efeitos oriundos de fenômenos naturais, e ainda dá ênfase principalmente aos efeitos destes impactos no homem, demonstrando uma conotação antropocêntrica dessa definição.

Existem muitas evidências no mundo de que, após os benefícios iniciais da irrigação, grandes áreas têm-se tornado impróprias à agricultura. Apesar de seus imensos benefícios, ela tem criado impactos ambientais adversos no solo, à disponibilidade e qualidade da água, à saúde pública, à fauna e flora e, em alguns casos, às condições socioeconômicas da população local.

Em geral os grandes projetos de irrigação incluem barragens, lagos, unidades de bombeamento, canais e tubulações, sistema de distribuição de água nas parcelas e sistemas de drenagem. Assim, para analisar os efeitos da irrigação sobre o meio ambiente, devem ser considerados os diversos tipos de impactos ambientais inerentes aos projetos de irrigação, ou seja, impactos ambientais nas áreas inundadas, impactos ambientais a jusante das barragens e impactos ambientais propriamente dito.

Não se pode concordar com aqueles que preconizam a paralisação do desenvolvimento de novos projetos de irrigação por causa de possíveis problemas ecológicos, mas também não se pode concordar com os que desconsideram totalmente os impactos ambientais relacionados com os novos projetos e se apóiam somente na relação custo-benefício. Ambos analisam, exclusivamente, uma única face do problema. Acredita-se que, na maioria dos casos, é possível compatibilizar desenvolvimento e proteção do meio ambiente.

O insumo água é tão importante quanto qualquer outro, mas pouco se tem feito quanto ao seu uso racional. A partir daí, nos deparamos com as técnicas de manejo da irrigação. Conhecendo-se as características físico-hídricas do solo, o clima, a cultura e os princípios de funcionamento dos equipamentos de irrigação, pode-se propor um uso racional da água e, conseqüentemente, sem danos ao meio ambiente (Folegatti, 1996).

1.6 - CONTAMINAÇÃO DOS MANANCIAIS HÍDRICOS

Muitas vezes, devido à necessidade de controle de sais do solo, baixa eficiência do sistema de irrigação ou mesmo à falta de um manejo criterioso da irrigação, a quantidade de água aplicada pode ser bastante superior àquela necessária. O excesso de água aplicada que não é evapotranspirada pelas culturas retorna aos rios e córregos, por meio do escoamento superficial e subsuperficial, ou vai para os lençóis subterrâneos, por percolação profunda, arrastando consigo sais solúveis, fertilizantes (principalmente nitratos), resíduos de defensivos e herbicidas, elementos tóxicos, sedimentos, etc. A contaminação dos recursos hídricos causa sérios problemas ao suprimento de água potável, tanto no meio rural como nos centros urbanos.

A contaminação de rios e córregos é mais rápida e acontece imediatamente após a aplicação da água de irrigação por meio dos sistemas por superfície, ou seja, nas modalidades por sulcos de infiltração, por faixas ou por inundação. No Brasil, tem-se verificado sérios problemas devido à aplicação de herbicidas na irrigação por inundação do arroz, uma vez que parte da vazão aplicada sempre circula pelos tabuleiros e retorna aos córregos. Na irrigação por sulcos, grande parte da vazão aplicada no início escoada no final dos sulcos. Essa água escoada transporta sedimentos, em virtude da erosão no início do sulco, e os diversos químicos aplicados na agricultura. No final da parcela, esta é coletada pelo dreno que a conduz aos córregos, causando contaminação.

A contaminação de rios e córregos também pode ocorrer de modo mais lento, por meio do lençol freático subsuperficial, que arrasta os elementos citados, exceto os sedimentos. Essa contaminação pode ser agravada se no perfil do solo que está sendo irrigado houver sais solúveis, pois a água que se movimentará no perfil do solo arrastará tanto os sais trazidos para a área irrigada pela água de irrigação como os sais dissolvidos no perfil do solo. Um exemplo clássico desse caso é um projeto implementado na bacia do Rio Colorado, EUA.

A contaminação da água subterrânea é mais lenta. O tempo necessário para a água percolada atingir o lençol subterrâneo aumenta com o decréscimo da permeabilidade do solo, com a profundidade do solo e com a profundidade do lençol freático. Dependendo da permeabilidade do solo, para atingir um lençol freático situado a aproximadamente 30 m de profundidade, o tempo necessário pode variar de 3 a 50 anos, o que torna o problema mais sério devido ao longo tempo para se conscientizar de que a água subterrânea está sendo poluída. Na poluição subterrânea, os sais dissolvidos, os nitratos, os pesticidas e os metais pesados são as substâncias químicas mais preocupantes.

Quanto maiores forem as perdas por percolação e por escoamento superficial na irrigação, maiores serão as chances de contaminação dos mananciais e do lençol subterrâneo. Assim, torna-se cada vez mais necessário dimensionar e manejar os sistemas de irrigação com maior eficiência, bem como evitar o uso descontrolado de químicos na irrigação por inundação, utilizando-os cautelosamente na irrigação por sulco e por faixa. Antes de implementar um projeto de irrigação, principalmente de irrigação por superfície, é de suma importância fazer um estudo geológico da região para evitar áreas com alto potencial de contaminação dos recursos hídricos, em razão da existência de grandes concentrações de sais solúveis no perfil do solo.

No Brasil, atualmente, a agricultura irrigada tem descarregado seu excedente de água diretamente no sistema hidrológico da bacia. Contudo, à medida que a área irrigada aumentar, os conflitos sobre o uso de água se agravarão, uma vez que a população está se conscientizando sobre a importância da qualidade dos mananciais.

1.7 - COBRANÇA PELO USO DA ÁGUA PARA IRRIGAÇÃO

Na irrigação, existe muita perda de água devido, principalmente, à baixa eficiência dos sistemas e falta de um monitoramento da quantidade de água necessária e

aplicada. Todavia, estas causas não justificam as perdas, visto que estas podem ser minimizadas pelo uso de um sistema de irrigação mais eficiente e de técnicas de manejo adequadas. Com isso, pode-se dizer que a principal causa dos desperdícios de água na agricultura é que o seu uso não é cobrado. Com a introdução da cobrança pelo uso da água é de se esperar um uso mais racional, com conseqüente redução no consumo.

A cobrança pela utilização dos recursos hídricos vêm sendo um dos temas mais polêmicos no que se refere à análise da viabilidade econômica da irrigação. A experiência estrangeira revelou que em muitos países, como a França, Alemanha, Inglaterra, entre outros, a cobrança pela utilização da água foi a maneira encontrada para enfrentar o desafio de melhorar as condições de aproveitamento, recuperação e conservação dos recursos hídricos.

Neste sentido, vem sendo implantado em nosso país a Política Nacional de Recursos Hídricos. A Lei nº 9433 de 8 de janeiro de 1997 instituiu a Política e o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, cujos fundamentos são baseados no fato de que a água é um recurso natural limitado, dotado de valor econômico. A racionalização dos recursos hídricos é um dos objetivos principais da Política Nacional de Recursos Hídricos.

A cobrança pelo uso da água deverá estimular o agricultor irrigante a adotar medidas para evitar perdas e desperdícios e, também, constituir receitas que possam viabilizar financiamentos para a aplicação em projetos e obras hidráulicas e de saneamento. Os valores a serem cobrados levarão em conta diversos fatores, dentre os quais destacam-se: a vazão captada e sua variação, o consumo efetivo, a finalidade a que se destina, a carga poluidora lançada e sua variação, a existência de obras hidráulicas de regularização de vazões e outros.

Alguns dos projetos existentes no semi-árido do Brasil já vêm realizando a cobrança há algum tempo, com preços de até R\$ 0,06 por metro cúbico de água utilizado. Blanco et al. (1999) realizaram simulações dos efeitos da cobrança pelo uso da água sobre a viabilidade de implantação de um sistema de irrigação para a cultura da manga, em Petrolina (PE), e verificaram haver uma necessidade de aumento na produção de 40, 60 e 80%, em média, para viabilizar a irrigação, caso o preço cobrado pela utilização da água fosse de US\$ 0,00, 0,03 e 0,06, respectivamente. De acordo com os dados apresentados na literatura, os autores concluíram que este aumento de produção poderia ser alcançado e a

cobrança pelo uso da água não inviabilizou a implantação do sistema, independentemente do valor cobrado.

Embora necessária, a cobrança pela utilização dos recursos hídricos poderá causar, em curto prazo, impactos negativos na agricultura. Estima-se que a redução no número de lavouras irrigadas no Estado de São Paulo possa ser de 50%, com conseqüente redução no número de empregos, migração do homem do campo para as cidades e redução no volume de negócios das empresas do setor de irrigação. Por outro lado, a irrigação será encarada com maior seriedade, obrigando o agricultor irrigante a realizar um manejo adequado da irrigação para que a relação custo/benefício seja minimizada. Além disso, por ocasião da outorga de utilização dos recursos hídricos, é necessária a apresentação de um projeto de irrigação no qual deve ser explicitado o método de controle da irrigação, sendo que a outorga pode ser cancelada se, em sua vigência, tal controle não for realizado.

1.8 - TIPOS DE SISTEMAS

Os sistemas de irrigação são divididos em três grupos:

- irrigação por superfície: compreende os métodos de irrigação nos quais a condução da água do sistema de distribuição (canais e tubulações) até qualquer ponto de infiltração, dentro da parcela a ser irrigada, é feita diretamente sobre a superfície do solo;
- irrigação por aspersão: é o método de irrigação em que a água é aspergida sobre a superfície do terreno, assemelhando-se a uma chuva, por causa do fracionamento do jato d'água em gotas; e,
- irrigação localizada: é o método em que a água é aplicada diretamente sobre a região radicular, com pequena intensidade e alta freqüência.

1.9 - CRITÉRIOS PARA A SELEÇÃO DO MÉTODO

A seleção do método de irrigação tem a finalidade de estabelecer a viabilidade técnica e econômica, maximizando a eficiência e minimizando os custos de investimento e operação, e ao mesmo tempo, mantendo as condições favoráveis ao desenvolvimento das culturas. Entre os critérios mais utilizados, destacam-se: topografia, características do solo, quantidade e qualidade da água, clima, cultura e, considerações econômicas.

1.10 - VANTAGENS DA IRRIGAÇÃO

Entre as inúmeras vantagens do emprego racional da irrigação, podem-se citar as seguintes:

- a) suprimento em quantidades essenciais e em épocas oportunas das reais necessidades hídricas das plantas cultivadas podendo aumentar consideravelmente o rendimento das colheitas;
- b) garante a exploração agrícola, independentemente do regime das chuvas;
- c) permite o cultivo e/ou colheita duas ou mais vezes ao ano (milho, feijão, batata, frutas, etc) em determinadas regiões;
- d) permite um eficaz controle de ervas daninhas (arroz por inundação); e,
- e) por meio da fertirrigação, facilita e diminui os custos da aplicação de corretivos e fertilizantes hidrossolúveis; etc.

CAPÍTULO 2

ESTUDOS CLIMÁTICOS

EVAPOTRANSPIRAÇÃO

2.1 - INTRODUÇÃO

A transferência de água para a atmosfera, no estado de vapor, quer pela evaporação de superfícies líquidas, quer pela evaporação de superfícies úmidas ou pela transpiração vegetal, constitui importante componente do ciclo hidrológico.

O termo evaporação designa a transferência de água para a atmosfera sob a forma de vapor que se verifica em um solo úmido sem vegetação, nos oceanos, lagos, rios e outras superfícies de água. De maneira geral, o termo evapotranspiração é utilizado para expressar a transferência de vapor d'água que se processa para a atmosfera proveniente de superfícies vegetadas. Fundamentalmente, a evapotranspiração é proveniente de duas contribuições: a evaporação da umidade existente no substrato (solo ou água) e a transpiração resultante das atividades biológicas dos vegetais.

A mudança de fase da água consome ou libera grande quantidade de energia. A passagem do gelo para o estado líquido e vice-versa, envolve aproximadamente 80 cal g⁻¹ e de líquido para vapor e vice-versa, envolve cerca de 590 cal g⁻¹. Como o vapor é transportado na atmosfera, podendo condensar e precipitar a grande distância da sua origem, a mudança de fase de líquido para vapor e vapor para líquido representa o principal mecanismo para a redistribuição da energia em todo o globo terrestre.

Segundo a teoria cinética dos gases, a passagem da água para a fase gasosa se dá como resultado do aumento de energia cinética das moléculas, requerendo assim o dispêndio de uma certa quantidade de calor, que é chamado calor latente de

vaporização. Dessa forma, a transformação de fase líquido-vapor depende do saldo de energia disponível à superfície-fonte, bem como de sua temperatura. Sendo assim, se essa camada estiver saturada, a quantidade de moléculas que passa ao estado gasoso, em um certo intervalo de tempo, torna-se igual à quantidade das que retornam ao estado líquido no mesmo intervalo. Nessas circunstâncias, a evaporação virtualmente cessa. Somente quando a camada atmosférica adjacente não está saturada é que a quantidade de moléculas de água que se desprendem da superfície-fonte é superior a das que retornam a ela. O vapor d'água produzido é, por conseguinte, removido pelo vento, evitando, com isso, que a atmosfera adjacente se sature.

Um outro aspecto importante a ser considerado é que com o aumento da velocidade do vento, há aumento de turbulência, fazendo com que se processe uma aceleração da difusão vertical do vapor d'água gerado na interface superfície-atmosfera. Como consequência, o fluxo vertical de vapor d'água para a atmosfera está condicionado pelo saldo de energia disponível, pela velocidade do vento e pelo teor de umidade presente na camada de ar próxima à superfície evaporante.

Em superfícies de água livre, tal como ocorre nos rios, lagos e oceanos, a evaporação sofre influência das propriedades físicas da água. Em se tratando de solo úmido, sem vegetação, as propriedades físicas do solo condicionam a evaporação. Dentre estas propriedades destacam-se a coloração do solo, que interfere no coeficiente de reflexão e, em decorrência, no balanço de energia, e a rugosidade, que interfere na turbulência das camadas de vento que se deslocam próximo à superfície.

Quando a superfície-fonte é vegetada, os fatores intervenientes no processo de evapotranspiração aumentam, uma vez que diversos fatores passam a interferir neste. Dentre estes fatores destacam-se a fase de desenvolvimento da cultura, o índice de área foliar, as condições fitossanitárias e as condições de umidade do solo.

Informações da quantidade de água evaporada e ou evapotranspirada são necessárias em diversos estudos hidrológicos e para adequado planejamento e manejo. O conhecimento da evapotranspiração é essencial para estimar a quantidade de água requerida para irrigação. O conhecimento do consumo de água nas diversas etapas de desenvolvimento das plantas cultivadas permite que a administração da irrigação seja feita de forma mais racional, de acordo com a real exigência da cultura. Esse conhecimento também tem a sua importância na agricultura não irrigada, pois permite o planejamento de épocas de semeadura em função da disponibilidade hídrica média da região considerada, permitindo maior eficiência no aproveitamento das precipitações.

2.2 – CONCEITOS FUNDAMENTAIS

Com o objetivo de propiciar melhor entendimento dos termos que serão utilizados no texto, serão definidos na seqüência aqueles de maior importância.

Evapotranspiração (ET) - é o processo combinado pelo qual a água é transferida da superfície terrestre para a atmosfera envolvendo a evaporação da água da superfície do solo e a água interceptada pelas plantas, e a transpiração proporcionada por elas.

Evapotranspiração potencial da cultura (ET_{pc}) - é a evapotranspiração que ocorre em uma cultura em que o solo não apresenta restrição de umidade e, portanto, não há restrição para a taxa de evapotranspiração.

Evapotranspiração real (ET_{rc}) - é a evapotranspiração de uma determinada cultura sob condições normais de manejo, isto é, sem a obrigatoriedade do teor de umidade permanecer sempre próximo à capacidade de campo. Dessa forma, concluiu-se que a $ET_{rc} \leq ET_{pc}$.

Evapotranspiração da cultura de referência (ET_o) - é a evapotranspiração que ocorre em uma cultura de referência quando o solo não apresenta restrição de umidade. Como cultura de referência normalmente é utilizada a grama ou a alfafa. No presente estudo, considerar-se-á a grama como cultura de referência e, dessa forma, segundo Doorenbos e Pruitt (1977) a ET_o é definida como sendo a evapotranspiração que se processa em um solo coberto totalmente por grama, com crescimento ativo e uniforme, sem deficiência hídrica e com altura entre 8 e 15 cm. Esse parâmetro tem sido utilizado como base agrometeorológica para a estimativa da evapotranspiração da maioria das culturas de interesse comercial (ET_{pc}).

2.3 – FATORES INTERVENIENTES NO PROCESSO DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO

A ocorrência do processo de evapotranspiração além de depender dos elementos climáticos, também é dependente dos fatores fisiológicos das plantas. Como a evaporação do solo e a transpiração das plantas ocorrem simultaneamente na natureza, em áreas vegetadas é comum considerar-se a evapotranspiração de forma única, uma vez que as perdas que se processam devido à transpiração dos vegetais componentes de uma bacia hidrográfica é de determinação difícil, visto que, além da presença de vegetais com

características diferentes cobrindo o solo, eles também estão submetidos a condições completamente diferenciadas no que diz respeito a solo e seu teor de umidade, e vários outros fatores que interferem na transpiração.

A grande maioria dos métodos elaborados para a estimativa da evapotranspiração tem aplicação mais específica para áreas agrícolas e para culturas de interesse comercial. Em uma bacia hidrográfica, independente de sua área, existem diversos vegetais que vão desde pequenas plantas até grandes árvores, ocasionando com isso uma heterogeneidade acentuada de perda de água por evapotranspiração, uma vez que é impossível a individualização deste parâmetro para cada cultura. A utilização de técnicas como a fotogrametria e foteinterpretação, como também o geoprocessamento, permite uma aproximação mais efetiva da estimativa da evapotranspiração em bacias hidrográficas, pois é possível identificar os diferentes grupos de vegetais presentes na bacia. Dessa forma, por meio de aproximações e comparações com culturas agrícolas mais bem estudadas, é possível uma estimativa mais criteriosa da evapotranspiração provável.

2.4 – EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL DAS CULTURAS E A DE REFERÊNCIA

A quantidade de água evapotranspirada depende da planta, do solo e do clima. O fator clima predomina sobre os demais.

A evapotranspiração varia de cultura para cultura como também nos diferentes estádios de desenvolvimento delas. Isto é atribuído, em parte, à arquitetura foliar (ângulo da folha, altura e densidade), em parte às características das folhas (números dos estômatos e período de abertura), além da duração do ciclo e época de plantio. A Tabela II.1 apresenta a relação da quantidade de água necessária durante o ciclo para algumas culturas:

Tabela II.1 – Necessidade total de água para algumas culturas

Culturas	Quantidade de água (mm)
Algodão	550 - 1100
Milho	400 - 800
Soja	400 - 800
Feijão	300 - 600
Verduras em geral	250 - 500

Doorenbos e Pruitt (1977), na publicação conhecida como boletim FAO-24, propuseram uma metodologia para determinar a evapotranspiração das diferentes culturas por meio de duas etapas: primeiramente, a estimativa da evapotranspiração da cultura de referência (ET_o) e, segundo, a eleição de um coeficiente de cultura (K_c), tabelado, e distinto para cada cultura e para cada estágio de desenvolvimento. O produto de ET_o pelo K_c selecionado, estima a evapotranspiração da cultura de interesse. Assim,

$$ET_{pc} = ET_o \times K_c \quad (I.1)$$

O conceito de DOORENBOS e PRUITT (1977) tornou-se o mais aceito mundialmente e, praticamente, todos os projetos passaram a utilizar essa metodologia para estimar a evapotranspiração de uma cultura.

Com referência ao coeficiente de cultura (K_c), segundo Pereira (1997) ele representa a integração dos efeitos de três características que distinguem a evapotranspiração de qualquer cultura da de referência: a) a altura da cultura (h) que afeta a rugosidade e a resistência aerodinâmica; b) a resistência da superfície relativa ao sistema solo-planta, que é afetada pela área foliar (determinando o número de estômatos), pela fração de cobertura do solo pela vegetação, pela idade e condição das folhas, e pelo teor de umidade à superfície do solo e, c) o albedo da superfície solo-planta, que é influenciado pela fração de cobertura do solo pela vegetação e pelo teor de umidade à superfície do solo, e influencia o saldo de radiação disponível à superfície, R_n, que é a principal fonte de energia para as trocas de calor e de massa no processo de evaporação.

Durante o período vegetativo, o valor de K_c varia à medida que a cultura cresce e se desenvolve, do mesmo modo que varia com a fração de cobertura da superfície do solo pela vegetação, e à medida que as plantas envelhecem e atingem a maturação. Essa variação pode ser representada por uma curva dos valores de K_c, que caracteriza tipicamente o desenvolvimento de uma cultura anual, desde o plantio até à colheita, sendo que as mudanças na forma da curva acompanham o desenvolvimento e a senescência da cultura.

Uma vez que a ET_o representa um índice climático associado à evaporação, o K_c varia essencialmente de acordo com as características da cultura, traduzindo em menor escala a variação dos fatores climáticos. Este fato torna possível a transferência de valores padrão dos K_c's de um local para outro e de um clima para outro. A Tabela II.2

apresenta valores de Kc para algumas culturas em seus diferentes estádios de desenvolvimento.

Tabela II.2 - Valores médios do coeficiente **Kc** para algumas culturas

CULTURA	ESTÁDIOS DE DESENVOLVIMENTO DA CULTURA					PERÍODO TOTAL DE CRESCIMENTO
	(I)	(II)	(III)	(IV)	(V)	
Banana - tropical - subtropical	0,4 – 0,50 0,5 – 0,65	0,70 – 0,85 0,80 – 0,90	1,00 – 1,10 1,00 – 1,20	0,90 – 1,00 1,00 – 1,15	0,75 – 0,85 1,00 – 1,15	0,70 – 0,80 0,85 – 0,95
Feijão - verde - seco	0,30 – 0,40 0,30 – 0,40	0,65 – 0,75 0,70 – 0,80	0,95 – 1,05 1,05 – 1,20	0,90 – 0,95 0,65 – 0,75	0,85 – 0,95 0,25 – 0,30	0,85 – 0,90 0,70 – 0,80
Repolho	0,40 – 0,50	0,70 – 0,80	0,95 – 1,10	0,90 – 1,00	0,80 – 0,95	0,70 – 0,80
Algodão	0,40 – 0,50	0,70 – 0,80	1,05 – 1,25	0,80 – 0,90	0,65 – 0,70	0,80 – 0,90
Amendoim	0,40 – 0,50	0,70 – 0,80	0,95 – 1,10	0,75 – 0,85	0,55 – 0,60	0,75 – 0,80
Milho - verde - grãos	0,30 – 0,50 0,30 – 0,50	0,70 – 0,90 0,80 – 0,85	1,05 – 1,20 1,05 – 1,20	1,00 – 1,15 0,80 – 0,95	0,95 – 1,10 0,55 – 0,60	0,80 – 0,95 0,75 – 0,90
Cebola - seca - verde	0,40 – 0,60 0,40 – 0,60	0,70 – 0,80 0,60 – 0,75	0,95 – 1,10 0,95 – 1,05	0,85 – 0,90 0,95 – 1,05	0,75 – 0,85 0,95 – 1,05	0,80 – 0,90 0,65 – 0,80
Ervilha	0,40 – 0,50	0,70 – 0,85	1,05 – 1,20	1,00 – 1,15	0,95 – 1,10	0,80 – 0,95
Pimenta	0,30 – 0,40	0,60 – 0,75	0,95 – 1,10	0,85 – 1,00	0,80 – 0,90	0,70 – 0,80
Batata	0,40 – 0,50	0,70 – 0,80	1,05 – 1,20	0,85 – 0,95	0,70 – 0,75	0,75 – 0,90
Arroz	1,10 – 1,15	1,10 – 1,50	1,10 – 1,30	0,95 – 1,05	0,95 – 1,05	1,05 – 1,20
Açafrão	0,30 – 0,40	0,70 – 0,80	1,05 – 1,20	0,65 – 0,70	0,20 – 0,25	0,65 – 0,70
Sorgo	0,30 – 0,40	0,70 – 0,75	1,00 – 1,15	0,75 – 0,80	0,50 – 0,55	0,75 – 0,85
Soja	0,30 – 0,40	0,70 – 0,80	1,00 – 1,15	0,70 – 0,85	0,40 – 0,50	0,75 – 0,90
Beterraba	0,40 – 0,50	0,75 – 0,85	1,05 – 1,20	0,90 – 1,00	0,60 – 0,70	0,80 – 0,90
Cana-de-açúcar	0,40 – 0,50	0,70 – 1,00	1,00 – 1,30	0,75 – 0,80	0,50 – 0,60	0,85 – 1,05
Fumo	0,30 – 0,40	0,70 – 0,80	1,00 – 1,20	0,90 – 1,00	0,75 – 0,85	0,85 – 0,95
Tomate	0,40 – 0,50	0,70 – 0,80	1,05 – 1,25	0,80 – 0,95	0,60 – 0,65	0,75 – 0,90
Melancia	0,40 – 0,50	0,70 – 0,80	0,95 – 1,05	0,80 – 0,90	0,65 – 0,75	0,75 – 0,85
Trigo	0,30 – 0,40	0,70 – 0,80	1,05 – 1,20	0,65 – 0,75	0,20 – 0,25	0,80 – 0,90
Alfafa	0,30 – 0,40				1,05 – 1,20	0,85 – 1,05
Citros						0,85 – 0,90

Primeiro número: UR > 70% e velocidade do vento < 5 m s⁻¹
Segundo número: UR < 20% e velocidade do vento > 5 m s⁻¹
Caracterização dos estádios:
- Estádio I – emergência até 10% do desenvolvimento vegetativo (DV)
- Estádio II – 10% do DV até 80% do DV
- Estádio III – 80% do DV até 100% do DV (inclusive frutos formados)
- Estádio IV – maturação
- Estádio V – colheita

Fonte: Doorenbos e Kassan. Efectos del agua en el rendimiento de los cultivos.

2.5 – QUANTIFICAÇÃO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO

A quantificação da água necessária a ser aplicada às plantas, ou seja, àquela referente à evapotranspirada pelo sistema solo-planta, é fator primordial para o planejamento, dimensionamento e manejo adequados de uma área agrícola irrigada.

Em toda a literatura especializada, diversos métodos para a estimativa da evapotranspiração são citados, constituindo-se basicamente dois grupos: o dos métodos diretos e o dos indiretos ou empíricos. Os métodos diretos caracterizam-se pela determinação da evapotranspiração diretamente na área, onde se destacam os diferentes tipos de lisímetros, ou mesmo pelo método do balanço de água no solo. Os indiretos são caracterizados pelo uso de equações empíricas ou modelos matemáticos, que se utilizam de dados meteoro-climático-fisiológicos para a sua aplicação. Estes, por se tratarem de uma estimativa, têm inúmeros problemas de precisão, principalmente quando aplicados em condições climáticas diferentes das quais foram elaborados.

Diversos pesquisadores em todo o mundo propuseram métodos para a estimativa da evapotranspiração com as mais diferentes concepções e número de variáveis envolvidas.

A utilização dos diferentes métodos para se estimar a evapotranspiração para um certo local de interesse fica na dependência da disponibilidade dos elementos climáticos. Em termos práticos, antes de se eleger o método a ser utilizado, é necessário saber quais os elementos climáticos que estão em disponibilidade. A partir disso, verifica-se quais os que podem ser aplicados.

Um fato importante a considerar é que nem sempre o método que apresenta o maior número de parâmetros em sua estrutura é o mais eficiente para um certo local. Para se saber aquele que melhor se adapta ao local de interesse, é necessário que se procedam a testes *in loco* para tal fim. Para que isto seja levado a efeito, há necessidade de se contar com informações confiáveis de medições diretas da evapotranspiração, situação esta que é extremamente rara.

Vários são os métodos de estimativa da ETo e a literatura sobre o assunto é bastante vasta, entre eles Camargo (1962), Doorenbos & Pruitt (1977); Berlato & Molion (1981); Ometto (1981); Rosenberg et al. (1983); Villa Nova & Reichardt (1989) e Pereira et al. (1997).

Dentre os vários métodos de estimativa da ETo, muitos tem grande aceitação, enquanto outros são bastante criticados e até desprezados (Pereira et al., 1997). Segundo o autor, os critérios de rejeição, muitas vezes, não são claros ou acham-se associados à má interpretação do conceito de ETo e ao uso de lisímetros mal expostos, sem a devida área tampão, usados para o teste dos métodos.

Muitos trabalhos como os de Stanhill (1961), Camargo (1966), Hashemi & Habibian (1979); Samani & Pessarakli (1986), e mais recentemente Soriano & Pereira (1993), Santos et al. (1994) e Camargo & Sentelhas (1997), em diferentes partes do Brasil e do mundo, vem avaliando o desempenho de diferentes métodos de estimativa da ETo. As conclusões, no entanto, variam muito segundo a condição do autor, o que dificulta ao técnico, ligado à irrigação, decidir sobre a conveniência de utilizar determinado método (Camargo & Sentelhas, 1997).

2.5.1 – Métodos diretos

A medição direta da evapotranspiração é feita por meio de lisímetros, ou mesmo pelo método do balanço de água no solo.

2.5.1.1 – Lisímetros

Estes equipamentos são tanques enterrados, contendo uma amostra representativa do solo e da vegetação que se deseja estudar, e devem representar com bastante fidelidade as condições reais de campo. As plantas dentro do lisímetro têm que ser similares às que as rodeiam em todos os aspectos agrônômicos, o que inclui: variedade, estágio de desenvolvimento, condições fitossanitárias, adubação, etc.

Existem diferentes tipos de lisímetros: os de drenagem e o de pesagem mecânica ou eletrônica.

No presente estudo, vamos destacar os lisímetros de drenagem (Figura II.1). Esses equipamentos permitem a determinação da evapotranspiração pela diferença, para um dado período de tempo, entre a água fornecida e a água percolada.

A sua estrutura básica é composta por um tanque de alvenaria que possui no fundo um dreno que possibilita o escoamento da água percolada que é recolhida por um recipiente.

Antes de se colocar o solo no tanque, há necessidade de alguns procedimentos importantes para que ele funcione adequadamente. As paredes devem receber o tratamento de um impermeabilizante para evitar fuga de água pelas laterais do tanque. Na parte inferior é necessária a instalação de um filtro, com uma espessura de 10 a 15 cm, que é feito com materiais de diferentes granulometrias. Comumente, utiliza-se camadas superpostas de britas nº 0 ou nº 1, cascalho fino, areia grossa e areia fina. Para se evitar aprisionamento do ar no fundo do tanque, deve-se instalar um tubo de pequeno diâmetro, junto à parede lateral, do fundo até a parte superior do tanque.

Depois de preparado, o lisímetro deverá ser preenchido com solo. Na escavação, o solo deverá ser separado segundo seus horizontes para que seja transferido para o lisímetro obedecendo à ordem do seu perfil natural. É recomendável que os níveis do solo no interior do lisímetro e fora dele sejam iguais. Em geral, recomenda-se aguardar aproximadamente um ano para se trabalhar efetivamente com o lisímetro para acomodamento do solo em seu interior.

Na operação com este tipo de lisímetro, adiciona-se água com um volume suficiente que permita drenagem. Quando cessar a drenagem, pode-se garantir que o teor de umidade do solo no interior do tanque encontra-se na sua capacidade máxima de retenção. Após um certo intervalo de tempo, adiciona-se água no tanque, também com um volume que permita drenagem. Encerrado o processo de drenagem, contabiliza-se o volume aplicado e o volume percolado; a diferença representa o volume que foi necessário para reconduzir o solo à sua capacidade máxima de retenção.

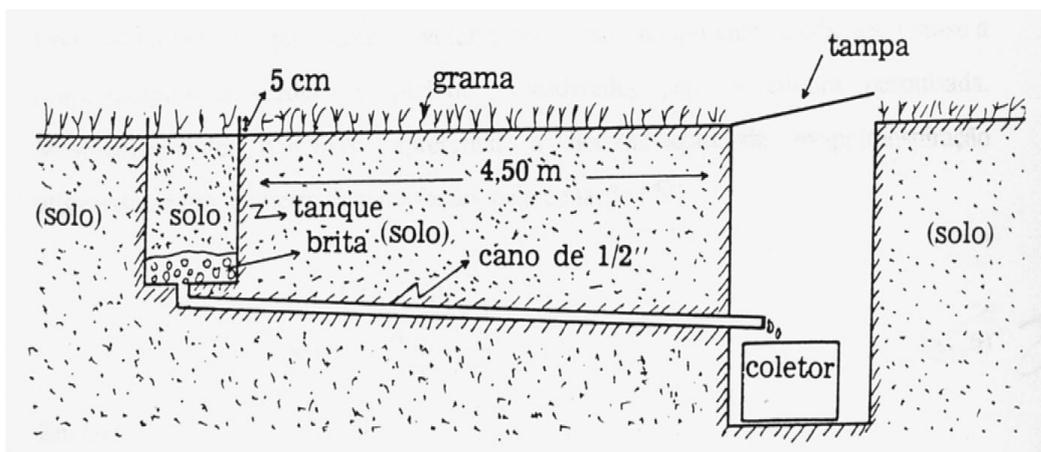


Figura II.1 - Esquema de um lisímetro de drenagem ou de percolação.

Como a evapotranspiração é normalmente expressa em milímetros por dia, basta dividir o volume retido pela área superficial do tanque, obtendo-se a lâmina equivalente, uma vez que 1 milímetro equivale a 1 litro por metro quadrado. Dividindo a lâmina equivalente ao volume retido pelo tempo entre medições, tem-se a evapotranspiração média no período considerado para a cultura pesquisada. Matematicamente, pode-se representar a evapotranspiração, utilizando-se um lisímetro de percolação, pela Equação II.2.

$$ET_{pc} = \frac{(V_a - V_p) + P}{A \cdot T} \quad (II.2)$$

em que:

- ET_{pc} = evapotranspiração média da cultura [mm d⁻¹];
- V_a = volume de água aplicado [L];
- V_p = volume de água percolado [L];
- A = área do tanque [m²];
- T = intervalo entre medições [dia]; e
- P = precipitação ocorrida no período considerado [mm].

Para culturas de pequeno porte, é comum a utilização de tanque de cimento amianto ou de plástico com volume de 1 m³, o mesmo que é utilizado como caixa d'água em residências.

Exemplo de aplicação II.1

Com o objetivo de determinar a evapotranspiração para uma cultura de milho por meio de um lisímetro de percolação, foram levantados os seguintes dados:

- volume de água aplicado (V_a): 0,10 m³;
- volume de água percolado (V_p): 0,05 m³;
- área do lisímetro (A): 1,2 m²;
- intervalo entre medições (T): 7 dias; e
- precipitação no período considerado: não houve.

a) Volume de água retido (V_r):

$$V_r = V_a - V_p$$

$$V_r = 0,1 - 0,05 = 0,05 \text{ m}^3 = 50 \text{ L}$$

b) Lâmina equivalente ao volume retido (L_{Vr}):

$$L_{Vr} = \frac{Vr}{A} = \frac{50 \text{ L}}{1,2 \text{ m}^2} = 41,67 \text{ L m}^{-2}$$

Sabendo-se que 1 L m^{-2} equivale a 1 mm, tem-se que: $L_{Vr} = 41,67 \text{ mm}$

c) Evapotranspiração média do período considerado (ET_{pc})

$$ET_{pc} = \frac{L_{Vr}}{T} = \frac{41,67 \text{ mm}}{7 \text{ dias}}$$

$$ET_{pc} = 5,95 \text{ mm d}^{-1}$$

2.5.1.2 – Parcelas experimentais no campo

Pela dependência de vários fatores, este método só deve ser utilizado para a determinação da evapotranspiração total, durante todo o ciclo da cultura, e nunca a ET_{pc} diária ou semanal, pois, nestes casos, os erros seriam grandes. A água necessária, durante todo o ciclo da cultura, é calculada pela soma da quantidade de água aplicada nas irrigações, precipitações efetivas, mais a quantidade de água armazenada no solo antes do plantio, menos a quantidade de água que ficou retida no solo após a colheita.

2.5.2 – Métodos indiretos

A estimativa da evapotranspiração por meio de equações matemáticas constitui-se no processo mais comum e mais usual para obter a perda de água que se observa em uma área vegetada.

Viu-se, anteriormente, que os métodos diretos (lisímetros), quando bem conduzidos, permitem a determinação da evapotranspiração de uma área vegetada com bastante confiabilidade, mas necessitam de uma infra-estrutura muito específica e até certo ponto muito complexa para o fim a que se propõem, além de demandarem um tempo relativamente grande para que as medições realizadas possam ser tomadas como referência para o planejamento e manejo de uma área. Via de regra, os lisímetros são equipamentos que ficam muito restritos a centros de pesquisas e tem a sua importância fundamental na calibração dos métodos indiretos para se estimar a evapotranspiração.

Difícilmente um equipamento deste tipo é instalado em áreas agrícolas para o seu manejo. Em virtude deste fato, a adoção dos métodos indiretos faz-se necessária pela sua maior facilidade de operação, podendo oferecer bons resultados quando utilizados criteriosamente.

Dos métodos indiretos disponíveis para a estimativa da evapotranspiração, vamos destacar os seguintes: tanque evaporimétrico “Classe A”, método de Thornthwaite, método de Blaney-Criddle modificado, método da radiação, método de Hargreaves-Samani e método de Penman-Monteith-FAO.

2.5.2.1 – Tanque evaporimétrico “Classe A”

Para a estimativa da evapotranspiração de uma certa cultura, o modelo de tanque evaporimétrico mais utilizado em todo o mundo e adotado pela FAO (**Food and Agricultural Organization**) é o “Classe A” (Figura II.2). Essa estimativa é feita por meio de dois passos: o primeiro é a estimativa da evapotranspiração de referência utilizando a Equação II.3, e o segundo, é a estimativa da evapotranspiração da cultura de interesse, por meio da Equação II.1.

$$ET_o = E_v \times K_t \quad (II.3)$$

em que:

ET_o = evapotranspiração da cultura de referência [$mm\ d^{-1}$];

E_v = evaporação medida no tanque “Classe A” [$mm\ d^{-1}$]; e

K_t = coeficiente do tanque [adimensional].

Para se determinar a evaporação ocorrida no tanque, utiliza-se um micrômetro de gancho (Figura II.3), e as leituras são feitas em um poço tranqüilizador instalado em seu interior, que tem por finalidade evitar perturbações na superfície líquida, principalmente pequenas ondas formadas por ventos e, dessa forma, possibilitar a estabilidade do nível da água quando da realização das leituras. Cuidado especial deve ser tomado com a localização do poço tranqüilizador dentro do tanque. Para isso, é comum marcar com tinta no fundo do tanque a posição que deve ser mantido o poço tranqüilizador, o qual deve ser nivelado para evitar erros de leituras.



Figura II.2 – Tanque evaporimétrico “Classe A”.

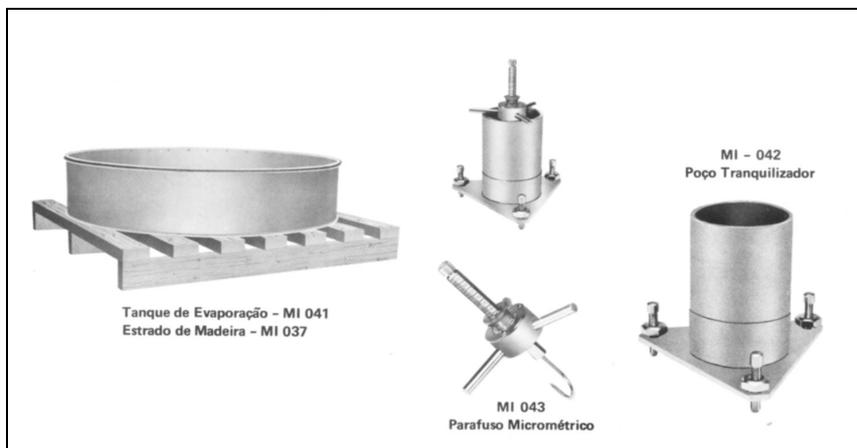


Figura II.3 – Detalhes do micrômetro de gancho e poço tranquilizador.

A seleção do coeficiente do tanque depende basicamente das características climáticas da região e do meio no qual está instalado.

O K_t é dependente das condições de umidade relativa (UR, em %), velocidade do vento (U , em km d^{-1}) e do comprimento da bordadura (L , em m), nas quais o tanque está instalado. Para determiná-lo, podemos utilizar a Tabela II.3, segundo Doorenbos e Pruitt (1977), ou por meio da equação proposta por Snyder (Equação II.4).

$$K_t = 0,482 + 0,024 \times \text{LN}(L) - 0,000376 \times U + 0,0045 \times \text{UR} \quad (\text{II.4})$$

Pereira et al. (1995), utilizando o método de Penman-Monteith, aplicando a um gramado e ao Tanque Classe A, propuseram um modelo alternativo para K_t , representado pela Equação II.5.

$$K_t = K_{t_{\max}} \times \frac{\delta + \gamma}{\delta + \gamma \times \left(1 + \frac{rc}{ra}\right)} \quad (\text{II.5})$$

em que:

- $K_{t_{\max}}$ = valor máximo de K_t , igual a 0,85;
- rc = resistência do dossel (gramado), igual a 69 sm^{-1} ;
- ra = resistência aerodinâmica ao transporte de vapor d'água, (Equação II.6);
- δ = declividade da curva de pressão de vapor, em $\text{kPa} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ (Equação II.7);
- γ = constante psicrométrica ($0,0622 \text{ kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$).

$$ra = \frac{208}{U} \quad (\text{II.6})$$

$$\delta = \frac{4098 \times e_a}{(T + 237,3)^2} \quad (\text{II.7})$$

em que e_a é a pressão de vapor de saturação, determinada pela Equação II.8.

$$e_a = 0,6108 \times e^{\left(\frac{17,27 \times T}{T+237,3}\right)} \quad (\text{II.8})$$

Esse método de estimativa de E_{To} é bastante utilizado no manejo da irrigação, sendo recomendado pela FAO (Doorenbos & Pruitt, 1977), pois é de fácil determinação e de relativo baixo custo. Sua utilização, no entanto, apresenta algumas limitações, entre elas: **a)** para a obtenção dos valores de K_t são necessários dados de velocidade do vento na altura do tanque; **b)** a leitura do nível da água é dificultada quando a aquisição dos dados não é automatizada; **c)** o tanque deve estar protegido quanto ao acesso de animais na área; **d)** o local de instalação em área irrigadas é problemático (dentro ou fora?); **e)** normalmente o método apresenta superestimativas de E_{To} em comparação a outros métodos e medidas.

Para a operação adequada do tanque é necessário que o nível de água em seu interior oscile entre 5 e 7,5 cm da borda. Quando o nível da água estiver próximo de 7,5 cm da borda, o tanque deverá ser reabastecido após a leitura, elevando o nível aos 5 cm.

Tabela II.3 - Valores dos coeficientes do tanque “Classe A” (Kt)

Vel. do vento (U) (m s ⁻¹)	Posição do tanque R (m)	Exposição A Tanque circundado por grama			Exposição B Tanque circundado por solo nu		
		UR média(%)			UR média(%)		
		Baixa < 40%	Média 40 - 70%	Alta > 70%	Baixa < 40%	Média 40 - 70%	Alta > 70%
Leve < 2	1	0,55	0,65	0,75	0,70	0,80	0,85
	10	0,65	0,75	0,85	0,60	0,70	0,80
	100	0,70	0,80	0,85	0,55	0,65	0,75
	1000	0,75	0,85	0,85	0,50	0,60	0,70
Moderado 2 - 5	1	0,50	0,60	0,65	0,65	0,75	0,80
	10	0,60	0,70	0,75	0,55	0,65	0,70
	100	0,65	0,75	0,80	0,50	0,60	0,65
	1000	0,70	0,80	0,80	0,45	0,55	0,60
Forte 5 - 8	1	0,45	0,50	0,60	0,60	0,65	0,70
	10	0,55	0,60	0,65	0,50	0,55	0,65
	100	0,60	0,65	0,75	0,45	0,50	0,60
	1000	0,65	0,70	0,75	0,40	0,45	0,55
Muito forte > 8	1	0,40	0,45	0,50	0,50	0,60	0,65
	10	0,45	0,55	0,60	0,45	0,50	0,55
	100	0,50	0,60	0,65	0,40	0,45	0,50
	1000	0,55	0,60	0,65	0,35	0,40	0,45

OBS:

Para áreas extensas de solo nu, reduzir os valores de Kt em 20% em condições de alta temperatura e vento forte, e de 5 a 10% em condições de temperatura, vento e umidade moderados.

R (m) representa a menor distância do centro do tanque ao limite da bordadura (grama ou solo nu).

Exemplo de aplicação II.2

Determine a evapotranspiração para a cultura de milho utilizando os dados de um tanque evaporimétrico “Classe A”, de acordo com os dados:

- período de medição: 7 dias;
- evaporação registrada pelo tanque no período (Ev): 51,5 mm;
- velocidade média do vento no período: (2,5 m s⁻¹) ;
- umidade relativa média do ar: 65%; e
- tanque circundado por grama com R = 100 m;
- coeficiente de cultura (Kc) para o milho = 0,85.

De acordo com a Tabela II.3, o valor de K_t é 0,75. Aplicando a Equação II.3, tem-se:

$$ET_o = 51,5 \times 0,75 = 38,62 \text{ mm em 7 dias}$$

O valor médio de ET_o é igual a $5,52 \text{ mm d}^{-1}$.

Utilizando a Equação II.1, tem-se: $ET_{pc} = 5,52 \times 0,85 = 4,7 \text{ mm d}^{-1}$

2.5.2.2 – Método de Thornthwaite

Este método foi proposto por Thornthwaite (1948) para estimativa da evapotranspiração potencial (ETP), ou de referência (ET_o), mensal de um gramado, em posto meteorológico, visando sua utilização em uma classificação climática mais racional. De acordo com Pereira et al. (1997), a ETP é tida como a chuva ideal, para que uma dada região não apresente nem excesso nem deficiência hídrica durante o ano.

O método de Thornthwaite é baseado num conjunto de equações elaboradas a partir de balanços hídricos em bacias hidrográficas e em medidas realizadas em lisímetros. O método utiliza somente a temperatura do ar como variável condicionante do processo de evapotranspiração, sendo por isso muito criticada (Pereira & Camargo, 1989). No entanto, segundo os mesmos autores ela funciona muito bem desde que sejam asseguradas as condições de contorno para a ETP, ou seja, extensa área gramada e sem restrição hídrica, funcionando, assim, muito bem em regiões de clima úmido e em meses chuvosos, onde tais condições são satisfeitas.

O emprego deste método para fins de projeto e manejo de irrigação acaba limitado, haja vista que a irrigação é utilizada em locais e períodos que fogem da condições de contorno de ETP, ou seja, em períodos secos, além da sua confiabilidade a nível diário ser restrita, funcionando melhor na escala mensal, e de haver necessidade de se conhecer os dados normais de temperatura do local para a determinação dos índices de calor (I e a). Abaixo segue a formulação do método de Thornthwaite, para um mês padrão (ET_{Pp}), de 30 dias, sendo todos os dias com fotoperíodo igual a 12 horas:

$$ET_{Pp} = 16 \times \left(10 \frac{T_i}{I} \right)^a \quad T_i > 0 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (\text{II.9})$$

$$a = 6,75 \times 10^{-7} \times I^3 - 7,71 \times 10^{-5} \times I^2 + 1,7912 \times 10^{-2} \times I + 0,49239 \quad (\text{II.10})$$

$$I = \sum_{i=1}^{12} \left(\frac{T_i}{5} \right)^{1,514} \quad T_i > 0 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (\text{II.11})$$

em que T_i é a temperatura média de cada mês ($^\circ\text{C}$).

Para a conversão da ETPp em ETP, procede-se a correção para dias do mês e fotoperíodo, conforme Equação II.12.

$$\text{ETP} = \text{ETPp} \times \frac{N}{12} \times \frac{ND}{30} \quad (\text{II.12})$$

em que

N = fotoperíodo, em horas; e

ND = número de dias do mês.

Esse método vem sendo largamente empregado em várias partes do mundo e do Brasil, sendo que sua utilização é mais indicada na caracterização climática e no planejamento agrícola, inclusive a irrigação, devido à sua simplicidade no tocante ao número de variáveis necessárias. No entanto, seu emprego na escala diária para manejo da irrigação também é possível, devendo o usuário estar ciente de suas limitações. Abaixo segue a aplicação do método para determinação da ETP.

Exemplo de aplicação II.3

Determine a evapotranspiração potencial pelo método de Thornthwaite para o mês de janeiro, para um local com as seguintes características:

a) fotoperíodo médio mensal = 11,6 h;

b) dados normais de temperatura do ar (T_{med} anual = $21,1^\circ\text{C}$)

T_{med} jan = $24,0^\circ\text{C}$ T_{med} fev = $22,7^\circ\text{C}$ T_{med} mar = $23,9^\circ\text{C}$ T_{med} abr = $21,1^\circ\text{C}$

T_{med} mai = $17,6^\circ\text{C}$ T_{med} jun = $16,8^\circ\text{C}$ T_{med} jul = $17,2^\circ\text{C}$ T_{med} ago = $18,9^\circ\text{C}$

T_{med} set = $20,3^\circ\text{C}$ T_{med} out = $22,2^\circ\text{C}$ T_{med} nov = $22,9^\circ\text{C}$ T_{med} dez = $23,8^\circ\text{C}$

- Cálculo de I:

$$I = \left(\frac{24,0}{5}\right)^{1,514} + \left(\frac{22,7}{5}\right)^{1,514} + \left(\frac{23,9}{5}\right)^{1,514} + \left(\frac{21,1}{5}\right)^{1,514} + \dots + \left(\frac{22,9}{5}\right)^{1,514} + \left(\frac{23,8}{5}\right)^{1,514}$$

$$I = 106,9928$$

- Cálculo de a:

$$a = 6,75 \times 10^{-7} \times (106,9928)^3 - 7,71 \times 10^{-5} \times (106,9928)^2 + 1,7912 \times 10^{-2} \times (106,9928) + 0,49239$$

$$a = 2,353$$

- Cálculo da ETPp:

Para $T_i = 24,0 \text{ }^\circ\text{C}$

$$ETP_p = 16 \times \left(10 \frac{24,0}{106,9928}\right)^{2,353}$$

$$ETP_p = 107 \text{ mm}$$

- Cálculo as ETP:

$$ETP = 107 \times \frac{11,6}{12} \times \frac{31}{30} = 106,88 \text{ mm}$$

$$ETP = 3,45 \text{ mm d}^{-1}$$

2.5.2.3 – Método de Blaney-Criddle modificado

A equação original de Blaney-Criddle é relativamente antiga (1950) e uma das mais empregadas para a estimativa da evapotranspiração para regiões de clima semi-árido. Com o objetivo de melhor definir os efeitos do clima sobre a evapotranspiração, o boletim nº 24 da FAO, em 1977, apresentou modificações substanciais no método original visando aprimorar a estimativa da evapotranspiração com determinações a partir de um grande número de medições em climas distintos, como também considerar o efeito da umidade do ar, insolação e velocidade do vento. Dessa forma, Frevert et al. (1983), apresentaram a última modificação da equação modificada pela FAO e a sua forma geral é apresentada como segue:

$$ET_o = a + b \times p \times (0,46 \times T + 8,13) \quad (\text{II.13})$$

$$a = 0,0043 \times UR_{\min} - \left(\frac{n}{N} \right) - 1,41 \quad (\text{II.14})$$

$$b = 0,81917 - 0,0041 \times UR_{\min} + 1,0705 \times \frac{n}{N} + 0,06565 \times U_2 - 0,00597 \times UR_{\min} \times \frac{n}{N} - 0,000597 \times UR_{\min} \times U_2 \quad (\text{II.15})$$

em que:

- p = percentagem mensal de horas de luz solar em relação ao total anual (Tab. II.4).
- T = temperatura média do período, em °C;
- URmin = umidade relativa mínima do período, em %;
- n = insolação do período (número real de horas de brilho solar);
- N = fotoperíodo (número máximo de horas de brilho solar) – Tab. II.5; e,
- U₂ = velocidade do vento a 2 m, em m s⁻¹.

Apesar de aparentemente simples, esse método envolve uma série de variáveis que acaba limitando seu emprego.

Condições ideais para utilização do método:

- a) só deve ser utilizado quando se tem os valores das temperaturas medidas;
- b) deve se restringir a períodos não inferiores a um (1) mês;
- c) se não houver possibilidades de se comprovar as condições de umidade relativa do ar média das mínimas, insolação e ventos, as determinações de ETo são de pouca confiança;
- d) não deve ser aplicado em regiões equatoriais em que as temperaturas se mantêm relativamente constantes e com grande variação dos outros parâmetros climáticos envolvidos;
- e) também não deve ser utilizado em regiões de grande altitude devido à temperatura mínima diária ser muito baixa, além de ser bastante altos os níveis de radiação diurna.

Tabela II.4 - Percentagem mensal de horas de luz solar em relação ao total anual (p), para diferentes latitudes

Lat. Norte	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Lat. Sul	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun
60°	0,15	0,20	0,26	0,32	0,38	0,41	0,40	0,34	0,28	0,22	0,17	0,13
58°	0,16	0,21	0,26	0,32	0,37	0,40	0,39	0,34	0,28	0,23	0,18	0,15
56°	0,17	0,21	0,26	0,32	0,36	0,39	0,38	0,33	0,28	0,23	0,18	0,16
54°	0,18	0,22	0,26	0,31	0,36	0,38	0,37	0,33	0,28	0,23	0,19	0,17
52°	0,19	0,22	0,27	0,31	0,35	0,37	0,36	0,33	0,28	0,24	0,20	0,17
50°	0,19	0,23	0,27	0,31	0,34	0,36	0,35	0,32	0,28	0,24	0,20	0,18
48°	0,20	0,23	0,27	0,31	0,34	0,36	0,35	0,32	0,28	0,24	0,21	0,19
46°	0,20	0,23	0,27	0,30	0,34	0,35	0,34	0,32	0,28	0,24	0,21	0,20
44°	0,21	0,24	0,27	0,30	0,33	0,35	0,34	0,31	0,28	0,25	0,22	0,20
42°	0,21	0,24	0,27	0,30	0,33	0,34	0,33	0,31	0,28	0,25	0,22	0,21
40°	0,22	0,24	0,27	0,30	0,32	0,34	0,33	0,31	0,28	0,25	0,22	0,21
35°	0,23	0,25	0,27	0,29	0,31	0,32	0,32	0,30	0,28	0,25	0,23	0,22
30°	0,24	0,25	0,27	0,29	0,31	0,32	0,31	0,30	0,28	0,26	0,24	0,23
25°	0,24	0,26	0,27	0,29	0,30	0,31	0,31	0,29	0,28	0,26	0,25	0,24
20°	0,25	0,26	0,27	0,28	0,29	0,30	0,30	0,29	0,28	0,26	0,25	0,25
15°	0,26	0,26	0,27	0,28	0,29	0,29	0,29	0,28	0,28	0,27	0,26	0,25
10°	0,26	0,27	0,27	0,28	0,28	0,29	0,29	0,28	0,28	0,27	0,26	0,26
5°	0,27	0,27	0,27	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,27	0,27	0,27
0°	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27

Tabela II.5 - Duração máxima de insolação diária média (N), em diferentes meses e latitudes

LAT	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
10° N	11,6	11,8	12,1	12,4	12,6	12,7	12,6	12,4	12,2	11,9	11,7	11,5
8° N	11,7	11,9	12,1	12,3	12,5	12,6	12,5	12,4	12,2	12,0	11,8	11,6
6° N	11,8	11,9	12,1	12,3	12,4	12,5	12,4	12,3	12,2	12,0	11,9	11,7
4° N	11,9	12,0	12,1	12,2	12,3	12,4	12,3	12,2	12,0	12,0	11,9	11,9
2° N	12,0	12,0	12,1	12,2	12,2	12,2	12,0	12,0	12,1	12,1	12,0	12,0
0°	12,1	12,1	12,1	12,1	12,1	12,1	12,1	12,1	12,1	12,1	12,1	12,1
2° S	12,2	12,2	12,1	12,1	12,0	12,0	12,0	12,0	12,1	12,1	12,2	12,2
4° S	12,3	12,2	12,1	12,0	11,9	11,8	11,9	12,0	12,1	12,2	12,3	12,4
6° S	12,4	12,3	12,1	12,0	11,9	11,7	11,8	11,9	12,1	12,2	12,4	12,5
8° S	12,5	12,4	12,1	11,9	11,7	11,6	11,7	11,9	12,1	12,3	12,5	12,6
10° S	12,6	12,4	12,1	11,9	11,7	11,5	11,6	11,8	12,0	12,3	12,6	12,7
12° S	12,7	12,5	12,2	11,8	11,6	11,4	11,5	11,7	12,0	12,4	12,7	12,8
14° S	12,8	12,6	12,2	11,8	11,5	11,3	11,4	11,6	12,0	12,4	12,8	12,9
16° S	13,0	12,7	12,2	11,7	11,4	11,2	11,2	11,6	12,0	12,4	12,9	13,1
18° S	13,1	12,7	12,2	11,7	11,3	11,1	11,1	11,5	12,0	12,5	13,0	13,2
20° S	13,1	12,8	12,2	11,6	11,2	10,9	11,0	11,4	12,0	12,5	13,2	13,3
22° S	13,4	12,8	12,2	11,6	11,1	10,8	10,9	11,3	12,0	12,6	13,2	13,5
24° S	13,5	12,9	12,3	11,5	10,9	10,7	10,8	11,2	11,9	12,6	13,3	13,6
26° S	13,6	12,9	12,3	11,5	10,8	10,5	10,7	11,2	11,9	12,7	13,4	13,8
28° S	13,7	13,0	12,3	11,4	10,7	10,4	10,6	11,1	11,9	12,8	13,5	13,9
30° S	13,9	13,1	12,3	11,4	10,6	10,2	10,4	11,0	11,9	12,8	13,6	14,1
32° S	14,0	13,2	12,3	11,3	10,5	10,0	10,3	10,9	11,9	12,9	13,7	14,2
34° S	14,2	13,3	12,3	11,3	10,3	9,8	10,1	10,9	11,9	12,9	13,9	14,4
36° S	14,3	13,4	12,4	11,2	10,2	9,7	10,0	10,7	11,9	13,0	14,0	14,6
38° S	14,5	13,5	12,4	11,1	10,1	9,5	9,8	10,6	11,8	13,1	14,2	14,8
40° S	14,7	13,6	12,4	11,1	9,9	9,3	9,6	10,5	11,8	13,1	14,3	15,0

Exemplo de aplicação II.4

Estimar a evapotranspiração de referência (ET_o) utilizando o método de Blaney-Criddle modificado, para um local com as seguintes características:

- latitude: 23° 37' S; longitude: 43° 35' WG; altitude: 19 m;
- mês: janeiro;
- temperatura média do mês: 26,3° C;
- umidade relativa do ar média das mínimas: 47,5%;
- número de horas reais de insolação (n): 9,35;
- velocidade média mensal do vento no mês (U₂): 2,67 m s⁻¹.

Resolução

Da Tabela II.4, para o mês de janeiro e latitude de 23° 37'S → p ≅ 0,31
Número máximo possível de horas de insolação (N) - (Tabela II.5) = 13,5

- cálculo de a

Aplicando a equação (II.14) vamos ter:

$$a = 0,0043 \times 47,5 - \left(\frac{9,35}{13,5} \right) - 1,41 = -1,90$$

- cálculo de b

Aplicando a equação (II.15) vamos ter:

$$b = 0,81917 - 0,0041 \times 47,5 + 1,0705 \times \frac{9,35}{13,5} + 0,06565 \times 2,67 - 0,00597 \times 47,5 \times \frac{9,35}{13,5} \\ - 0,000597 \times 47,5 \times 2,67 \\ b = 1,269$$

- cálculo de ET_o

Aplicando a equação (II.13) vamos ter:

$$ET_o = -1,90 + 1,269 \times 0,31 \times (0,46 \times 26,3 + 8,13)$$

$$ET_o = 6,06 \text{ mm d}^{-1}$$

2.5.2.3 – Método da radiação

Esse método, à exemplo do de Blaney-Criddle modificado, também é de fácil utilização. Foram elaborados quatro grupos de gráficos correlacionando a **ET_o** com o produto **W R_s**, onde **W** é o índice de ponderação, valor tabelado (Tabela II.6) que depende da temperatura e da altitude, e **R_s** é a radiação solar (Equação II.16). Esta correlação tem a interferência direta da umidade relativa do ar média mensal em quatro níveis, e quatro níveis de velocidade do vento. Esses gráficos estão apresentados na Figura II.4.

$$R_s = R_a \left(0,25 + 0,50 \frac{n}{N} \right) \quad (\text{II.16})$$

em que:

R_s = radiação solar expressa em equivalente de evaporação [mm d⁻¹];

R_a = radiação no topo da atmosfera, expressa em equivalente de evaporação, valores tabelados, Tabela II.7, [mm d⁻¹].

Exemplo de aplicação II.5

Estimar a evapotranspiração de referência (ET_o) utilizando o método da radiação, para um local com as seguintes características:

- latitude: 22° 45' S; longitude: 43° 41' WG; altitude: 31 m;
- temperatura média do mês (janeiro): 26° C;
- umidade relativa média do ar: 65%;
- número real de horas de brilho solar: 6,57;
- número máximo possível de horas de insolação (Tabela 5): 13,4; e
- velocidade média do vento: 2,52 m s⁻¹.

Resolução

Na Tabela II.6, para: T_a = 26° C e altitude de 31 m → W = 0,75

Na Tabela II.7, para: latitude de 22° 45' S e mês de janeiro → R_a = 17,4 mm d⁻¹

Utilizando a Equação II.16 para: n/N = 0,49 e R_a = 17,4 mm d⁻¹ → R_s = 8,2 mm d⁻¹

O produto W R_s = 8,2 x 0,75 = 6,15 mm d⁻¹

Tomando-se a Figura II.4 para:

- UR = 65%
- vento: 2,52 m s⁻¹ (moderado: reta 2)
- W Rs = 6,15 mm d⁻¹

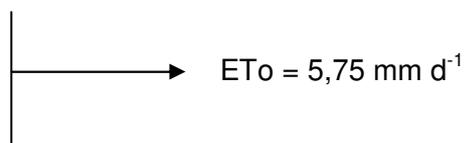


Tabela II.6 - Valores do índice de ponderação (**W**) para os efeitos da radiação sobre a ETo em diferentes temperaturas e altitudes

Temperatura (°C)	Altitude (m)					
	0	500	1000	2000	3000	4000
2	0,43	0,45	0,46	0,49	0,52	0,55
4	0,46	0,48	0,49	0,52	0,55	0,58
6	0,49	0,51	0,52	0,55	0,58	0,61
8	0,52	0,54	0,55	0,58	0,61	0,64
10	0,55	0,57	0,58	0,61	0,64	0,66
12	0,58	0,60	0,61	0,64	0,66	0,69
14	0,61	0,62	0,64	0,66	0,69	0,71
16	0,64	0,65	0,66	0,69	0,71	0,73
18	0,66	0,67	0,69	0,71	0,73	0,76
20	0,68	0,70	0,71	0,73	0,75	0,78
22	0,71	0,72	0,73	0,75	0,77	0,79
24	0,73	0,74	0,75	0,77	0,79	0,81
26	0,75	0,76	0,77	0,79	0,81	0,83
28	0,77	0,78	0,79	0,81	0,82	0,84
30	0,78	0,79	0,80	0,82	0,84	0,85
32	0,80	0,81	0,82	0,84	0,85	0,86
34	0,82	0,82	0,83	0,85	0,86	0,88
36	0,83	0,84	0,85	0,86	0,88	0,89
38	0,84	0,85	0,86	0,87	0,88	0,90
40	0,85	0,86	0,87	0,88	0,89	0,90

Tabela II.7 - Valores da radiação extraterrestre (**R_a**), mm d⁻¹, para diferentes latitudes e meses do ano

Lat. Sul	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
50°	17,5	14,7	10,9	7,0	4,2	3,1	3,5	5,5	8,9	12,9	16,5	18,2
48°	17,6	14,9	11,2	7,5	4,7	3,5	4,0	6,0	9,3	13,2	16,6	18,2
46°	17,7	15,1	11,5	7,9	5,2	4,0	4,4	6,5	9,7	13,4	16,7	18,3
44°	17,8	15,3	11,9	8,4	5,7	4,4	4,9	6,9	10,2	13,7	16,7	18,3
42°	17,8	15,5	12,2	8,8	6,1	4,9	5,4	7,4	10,6	14,0	16,8	18,3
40°	17,9	15,7	12,5	9,2	6,6	5,3	5,9	7,9	11,0	14,2	16,9	18,3
38°	17,9	15,8	12,8	9,6	7,1	5,8	6,3	8,3	11,4	14,4	17,0	18,3
36°	17,9	16,0	13,2	10,1	7,5	6,3	6,8	8,8	11,7	14,6	17,0	18,2
34°	17,8	16,1	13,5	10,5	8,0	6,8	7,2	9,2	12,0	14,9	17,1	18,2
32°	17,8	16,2	13,8	10,9	8,5	7,3	7,7	9,6	12,4	15,1	17,2	18,1
30°	17,8	16,4	14,0	11,3	8,9	7,9	8,1	10,1	12,7	15,3	17,3	18,1
28°	17,7	16,4	14,3	11,6	9,3	8,2	8,6	10,4	13,0	15,4	17,2	17,9
26°	17,6	16,4	14,4	12,0	9,7	8,7	9,1	10,9	13,2	15,5	17,2	17,8
24°	17,5	16,5	14,6	12,3	10,2	9,1	9,5	11,2	13,4	15,6	17,1	17,7
22°	17,4	16,5	14,8	12,6	10,6	9,6	10,0	11,6	13,7	15,7	17,0	17,5
20°	17,3	16,5	15,0	13,0	11,0	10,0	10,4	12,0	13,9	15,8	17,0	17,4
18°	17,1	16,5	15,1	13,2	11,4	10,4	10,8	12,3	14,1	15,8	16,8	17,1
16°	16,9	16,4	15,2	13,5	11,7	10,8	11,2	12,6	14,3	15,8	16,7	16,8
14°	16,7	16,4	15,3	13,7	12,1	11,2	11,6	12,9	14,5	15,8	16,5	16,6
12°	16,6	16,3	15,4	14,0	12,5	11,6	12,0	13,2	14,7	15,8	16,4	16,5
10°	16,4	16,3	15,5	14,2	12,8	12,0	12,4	13,5	14,8	15,9	16,2	16,2
8°	16,1	16,1	15,5	14,4	13,1	12,4	12,7	13,7	14,9	15,8	16,0	16,0
6°	15,8	16,0	15,6	14,7	13,4	12,8	13,1	14,0	15,0	15,7	15,8	15,7
4°	15,5	15,8	15,6	14,9	13,8	13,2	13,4	14,3	15,1	15,6	15,5	15,4
2°	15,3	15,7	15,7	15,1	14,1	13,5	13,7	14,5	15,2	15,5	15,3	15,1
0°	15,0	15,5	15,7	15,3	14,4	13,9	14,1	14,8	15,3	15,4	15,1	14,8

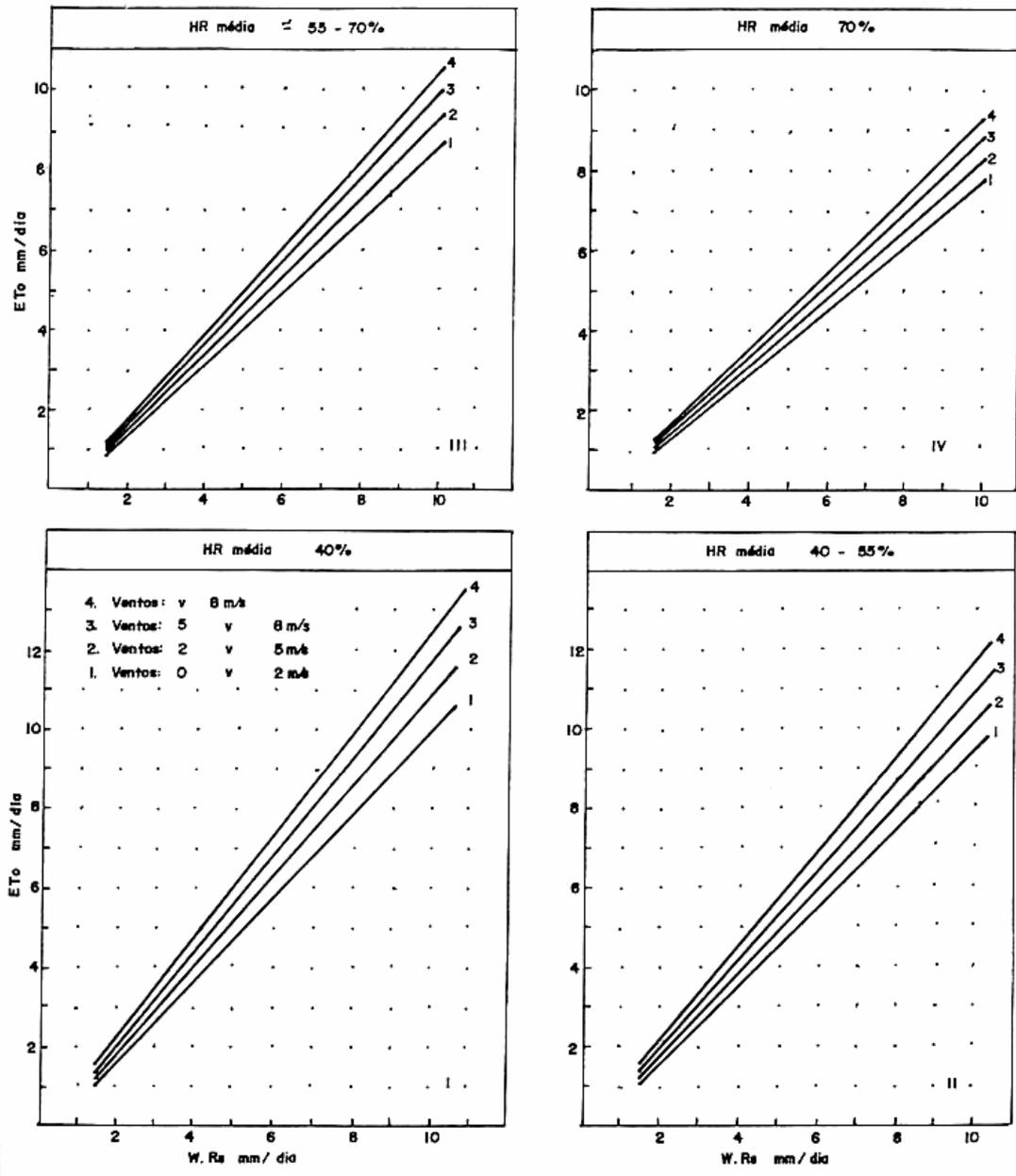


Figura II.4 - Estimativa da ETo a partir de valores calculados de W Rs e do conhecimento da umidade relativa média e ventos diurnos.

2.5.2.4 – Método de Hargreaves - Samani

A equação geral para o cálculo da evapotranspiração de referência por este método, é representada pela Equação II.17.

$$ET_o = 0,0023 \times R_a \times (T + 17,8) \times \sqrt{T_{\max} - T_{\min}} \quad (II.17)$$

em que:

ET_o = evapotranspiração de referência [mm d^{-1}];

R_a = radiação no topo da atmosfera [$\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$];

T = temperatura média [$^{\circ}\text{C}$];

T_{\max} = temperatura média das máximas [$^{\circ}\text{C}$];

T_{\min} = temperatura média das mínimas [$^{\circ}\text{C}$];

A determinação de R_a é feita pela Equação II.18.

$$R_a = 37,586 \times d_r \times (\omega_s \times \sin \varphi \times \sin \delta_s + \cos \varphi \times \cos \delta_s \times \sin \omega_s) \quad (II.18)$$

em que:

d_r = distância relativa Terra-Sol [rad];

ω_s = ângulo horário do por-do-sol [rad];

φ = latitude do lugar [rad]; e

δ_s = declinação solar [rad].

A determinação de d_r é feita de acordo com a Equação II.19:

$$d_r = 1 + 0,033 \times \cos \left(\frac{2 \pi J}{365} \right) \quad (II.19)$$

em que J é o número do dia do ano.

Para valores mensais, J pode ser determinado como:

$$J = \text{inteiro} (30,42 \times M - 15,23) \quad (II.20)$$

em que M é o número do mês (1 a 12).

A Equação II.21 estima o ângulo horário do pôr-do-sol.

$$\omega_s = \arccos (-\tan \varphi \times \tan \delta_s) \quad (\text{II.21})$$

OBS: Na Equação II.21, para o Hemisfério Norte a latitude tem sinal positivo e, para o Hemisfério Sul, tem sinal negativo.

A declinação solar é determinada pela Equação II.22.

$$\delta_s = 0,4093 \times \text{sen} \left(\frac{2\pi}{365} J - 1,405 \right) \quad (\text{II.22})$$

Exemplo de aplicação II.6

Estimar a evapotranspiração de referência (ET_o), por meio do método de Hargreaves-Samani, de acordo com os seguintes dados:

- mês: julho;
- temperatura máxima: 25,0 °C;
- temperatura mínima: 12,4 °C;
- latitude do local: 27° 45' S.

Resolução

- Determinação de J para o mês de julho (mês 7)

$$J = \text{inteiro} (30,42 \times 7 - 15,23) = 197$$

- Determinação de d_r

$$d_r = 1 + 0,033 \cos \left(\frac{2\pi}{365} \times 197 \right) = 0,968 \text{ rad}$$

- Determinação de δ_s

$$\delta_s = 0,4093 \times \text{sen} \left(\frac{2\pi}{365} \times 197 - 1,405 \right) = 0,3745 \text{ rad}$$

- Determinação de ω_s

Como a latitude do lugar é igual a 27° 45' S, ou seja, 0,4843 rad, vamos ter:

$$\omega_s = \arccos [-\tan (-0,4843) \times \tan (0,3745)] = 1,3625 \text{ rad}$$

- Determinação de R_a

$$R_a = 37,586 \times 0,968 \times \left(\begin{array}{l} 1,3625 \times \text{sen}(-0,4843) \times \text{sen}(0,3745) + \\ \cos(-0,4843) \times \cos(0,3745) \times \sin(1,3625) \end{array} \right)$$

$$R_a = 20,88 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$$

- Determinação de ET_o

$$ET_o = 0,0023 \times 20,8768 \times (18,7 + 17,8) \times \sqrt{25,0 - 12,4} = 6,22 \text{ mm d}^{-1}$$

2.5.2.5 – Método de Penman-Monteith-FAO

Para padronização dos procedimentos de cálculo da evapotranspiração da cultura de referência, baseando-se na equação de Penman-Monteith, a FAO propôs a seguinte notação, que passou a ser conhecida como equação de Penman-Monteith-FAO (Equação II.23):

$$ET_o = \frac{\delta}{\delta + \gamma \left(1 + \frac{r_c}{r_a} \right)} \times \frac{(R_n - G)}{\lambda} + \frac{\gamma}{\delta + \gamma \left(1 + \frac{r_c}{r_a} \right)} \times \frac{900}{T + 273,15} \times U_2 \times DPV \quad (\text{II.23})$$

em que:

ET_o = evapotranspiração da cultura de referência [mm d^{-1}];

δ = declividade da curva de pressão de vapor de saturação [$\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$];

λ = calor latente de evaporação [MJ kg^{-1}].

r_c = resistência do dossel da planta [s m^{-1}];

r_a = resistência aerodinâmica [s m^{-1}];

R_n = saldo de radiação à superfície [$\text{MJ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$];

G = fluxo de calor no solo [$\text{MJ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$];

γ = constante psicrométrica [$\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$];

T = temperatura média do ar [$^\circ\text{C}$];

U_2 = velocidade do vento a 2 m de altura [m s^{-1}];

DPV = déficit de pressão de vapor [kPa]; e

900 = fator de transformação de unidades.

Os componentes da Equação II.23, de acordo com SMITH (1991), podem ser obtidos conforme descrito a seguir.

- Declividade da curva de pressão de vapor (δ), determinada pelas Equações II.7 e II.8.
- Calor latente de evaporação (λ)

$$\lambda = 2,501 - 2,361 \times 10^{-3} T \quad (\text{II.24})$$

- Constante psicrométrica (γ)

$$\gamma = 0,0016286 \times \frac{P}{\lambda} \quad (\text{II.25})$$

em que P [kPa] é pressão atmosférica à altitude Z [m], calculada pela Equação 26.

$$P = 101,3 \times \left(\frac{293 - 0,0065 \times Z}{293} \right)^{5,25} \quad (\text{II.26})$$

- Pressão parcial de vapor (e_d)

$$e_d = e_a \times \frac{UR}{100} \quad (\text{II.27})$$

em que UR é a umidade relativa média do ar [%].

- Déficit de pressão de vapor (DPV)

$$DPV = e_a - e_d \quad (\text{II.28})$$

- Saldo de radiação (R_n)

A determinação do saldo de radiação é feita pela Equação II.19.

$$R_n = R_{ns} - R_{nl} \quad (\text{II.29})$$

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 [$\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$].

- Saldo de radiação de ondas curtas (R_{ns})

O saldo de radiação de ondas curtas é a radiação efetivamente recebida pelo dossel da cultura, levando-se em consideração as perdas por reflexão. A Equação II.30 é a que representa a determinação desse componente.

$$R_{ns} = (1 - \alpha) \times R_s \quad (\text{II.30})$$

em que:

α = coeficiente de reflexão da superfície do dossel para a radiação solar de ondas curtas (albedo). O valor médio para grama é de 0,23; e

R_s = radiação solar incidente [$\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$], calculada pela Equação II.16.

OBS: A radiação solar no topo da atmosfera (R_a), a ser utilizada na Equação II.16, terá que ser calculada de acordo com o procedimento apresentado no método de Hargreaves-Samani. Além disso, o número máximo possível de horas de insolação para um dado local (N) deverá ser calculado por meio da Equação II.31:

$$N = \frac{24}{\pi} \times \omega_s \quad (\text{II.31})$$

em que ω_s é calculado pela Equação II.21.

- Saldo de radiação de ondas longas (R_{nl})

A radiação térmica da vegetação e do solo para a atmosfera, bem como a refletida da atmosfera e da nuvem, pode ser representada pela Equação II.32.

$$R_{nl} = \left(0,9 \times \frac{n}{N} + 0,1 \right) \times \left(0,34 - 0,14 \times \sqrt{e_d} \right) \times \sigma \times \left(T_{kx}^4 + T_{kn}^4 \right) \times \frac{1}{2} \quad (\text{II.32})$$

em que:

σ = constante de Stefan-Boltzmann [$4,903 \times 10^{-9} \text{ MJ m}^2 \text{ K}^{-4} \text{ d}^{-1}$];

T_{kx} = temperatura máxima diária [K]; e,

T_{kn} = temperatura mínima diária [K].

- Velocidade do vento (U_2)

Para ajustar os dados de velocidades do vento obtidos de instrumentos instalados em diferentes alturas do padrão de 2 m, para o qual a equação de PM-FAO tem sido calibrada, a Equação II.33 pode ser usada.

$$U_2 = \frac{4,868}{\text{LN}(67,75 z - 5,42)} \times U_z \quad (\text{II.33})$$

em que:

U_z = velocidade do vento à altura z [m s^{-1}];

U_2 = velocidade do vento a 2 m de altura [m s^{-1}]; e

z = altura da medição da velocidade do vento [m].

- Fluxo de calor no solo (G)

Como consequência do calor armazenado no solo, pode haver a ocorrência de algum fluxo de calor. Para estimar esse fluxo, para um dado período, a Equação II.34 pode ser usada.

$$G = 0,38 \times (T_n - T_{n-1}) \quad (\text{II.34})$$

em que:

G = fluxo de calor no solo [$\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$];

T_n = temperatura do dia n [$^{\circ}\text{C}$]; e,

T_{n-1} = temperatura do dia $n - 1$ [$^{\circ}\text{C}$].

OBS: se a estimativa for mensal, T_n será a temperatura média do mês em questão; T_{n-1} a temperatura média do mês anterior.

- Resistência do dossel da planta

Considerando a grama como cultura de referência, o valor de r_c foi parametrizado para uma altura da cultura de 0,12 m. Dessa forma, seu valor é 69 s m^{-1} .

- Resistência aerodinâmica (r_a) estimada pela Equação II.6.

Exemplo de aplicação II.7

Estimar a evapotranspiração de referência (ET_o), por meio do método de Penman-Monteith-FAO, de acordo com os seguintes dados:

- mês: fevereiro;
- coordenadas geográficas do local: latitude: 27° 45' S; altitude: 31 m;
- temperatura máxima: 31,4 °C;
- temperatura mínima: 19,8 °C;
- temperatura média: 25,6 °C;
- umidade relativa do ar média das máximas: 91,7%;
- umidade relativa do ar média das mínimas: 45,3%;
- umidade relativa do ar média : 68,5%;
- velocidade média dos ventos: 2,45 m s⁻¹;
- insolação média mensal: 6,22 h
- temperatura média do mês de janeiro: 26 °C.

Resolução

a) Determinação da pressão de vapor de saturação

$$e_a = 0,6108 \times e^{\left(\frac{17,27 \times 25,6}{25,6 + 237,3}\right)} = 3,28 \text{ kPa}$$

b) Determinação da pressão parcial de vapor

$$e_d = 3,28 \times \frac{68,5}{100} = 2,25 \text{ kPa}$$

c) Determinação do déficit de pressão de vapor

$$DPV = e_a - e_d = 3,28 - 2,25 = 1,03 \text{ kPa}$$

d) Determinação da declividade da curva de pressão de vapor

$$\delta = \frac{4098 \times 3,28}{(25,6 + 237,3)^2} = 0,1945 \text{ kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$$

e) Determinação do calor latente de evaporação

$$\lambda = 2,501 - 2,361 \times 10^{-3} \times 25,6 = 2,44 \text{ MJ kg}^{-1}$$

f) Determinação da pressão atmosférica

$$P = 101,3 \times \left(\frac{293 - 0,0065 \times 31}{293} \right)^{5,25} = 100,93 \text{ kPa}$$

g) Determinação da constante psicrométrica $\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$

$$\gamma = 0,0016286 \times \frac{100,93}{2,44} = 0,067 \text{ kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$$

h) Determinação do saldo de radiação

h.1) Cálculo de J para o mês de fevereiro (mês 2)

$$J = \text{inteiro} (30,42 \times 2 - 15,23) = 45$$

h.2) Cálculo de d_r

$$d_r = 1 + 0,033 \times \cos \left(\frac{2\pi}{365} \times 45 \right) = 1,0236 \text{ rad}$$

h.3) Cálculo de δ_s

$$\delta_s = 0,4093 \times \sin \left(\frac{2\pi}{365} \times 45 - 1,405 \right) = -0,2413 \text{ rad}$$

h.4) Cálculo de ω_s

Como a latitude do lugar é igual a $27^\circ 45' \text{ S}$, ou seja, $0,4843 \text{ rad}$, vamos ter:

$$\omega_s = \arccos[-\tan(-0,4843) \times \tan(-0,2413)] = 1,7006 \text{ rad}$$

h.5) Cálculo de R_a

$$R_a = 37,586 \times 1,0236 \left(\frac{1,7006 \times \sin(-0,4843) \sin(-0,2413) + \cos(-0,4843) \cos(-0,2413) \sin(1,7006)}{\cos(-0,4843) \cos(-0,2413) \sin(1,7006)} \right) = 40,06 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$$

h.6) Cálculo de N

$$N = \frac{24}{\pi} \times 1,7006 = 12,99 \text{ h}$$

h.7) Cálculo de R_s

$$R_s = 40,06 \times \left(0,25 + 0,50 \times \frac{6,22}{12,99} \right) = 19,60 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$$

h.8) Cálculo de R_{ns}

$$R_{ns} = (1 - 0,23) \times 19,60 = 15,10 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$$

h.9) Cálculo de R_{nl}

$$R_{nl} = \left(0,9 \times \frac{6,22}{12,99} + 0,1 \right) \times \left(0,34 - 0,14 \times \sqrt{2,25} \right) \times \left(4,903 \times 10^{-9} \right) \times \left(304,55^4 + 292,95^4 \right) \times \frac{1}{2}$$

$$R_{nl} = 2,70 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$$

OBS: os valores 304,55 e 292,95 referem-se às temperaturas máxima e mínima expressas em graus Kelvin, respectivamente.

h.10) Cálculo de R_n

$$R_n = 15,10 - 2,70 = 12,40 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$$

i) Cálculo de G

$$G = 0,38 \times (25,6 - 26,0) = -0,152 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$$

j) Cálculo de r_a

$$r_a = \frac{208}{2,45} = 84,90 \text{ s m}^{-1}$$

Finalmente, a evapotranspiração será calculada por meio da Equação II.23.

$$ET_o = \frac{0,1945}{0,1945 + 0,067 \left(1 + \frac{69}{84,90}\right)} \frac{12,40 - (-0,152)}{2,44} + \frac{0,067}{0,1945 + 0,067 \left(1 + \frac{69}{84,90}\right)} \frac{900}{25,6 + 273,15} \times 2,45 \times 1,03$$

$$ET_o = 4,78 \text{ mm d}^{-1}$$

CAPÍTULO 3

ESTUDOS PEDOLÓGICOS

3.1 - DISPONIBILIDADE DE ÁGUA NO SOLO

A água no solo teoricamente considerada disponível para as plantas é aquela armazenada entre a capacidade de campo (Cc) e o ponto de murchamento (Pm). Em termos de potencial matricial, a água disponível se encontra entre 0,1 - 0,3 atm e 15 atm. Diz-se teoricamente disponível porque, para a maioria das plantas, muito antes do solo atingir o Pm, a água já deixa de ser disponível, ou seja, a planta já não consegue absorver a quantidade de água necessária para o seu metabolismo e sua transpiração. Porém, o conceito clássico de água disponível nos fornece um critério para caracterizar o solo quanto à sua capacidade de armazenamento. De modo geral, um solo raso e/ou de textura grossa, apresenta uma menor capacidade de retenção e, conseqüentemente, exige irrigações mais freqüentes.

A capacidade de campo (Cc) representa a quantidade de água retida pelo solo em condições de campo contra a força da gravidade. O ponto de murchamento (Pm) representa o teor de umidade de equilíbrio, entre a força de coesão, exercida pelas partículas do solo sobre a película de água aderente às mesmas e a força de sucção exercida pelas raízes das plantas. Em um solo no qual o Pm tenha sido atingido, ainda contém certa percentagem de umidade, a qual, entretanto, não pode ser utilizada pelas plantas, por estar fortemente retida pelo mesmo.

De acordo com a equação que representa o armazenamento de água no solo, o cálculo da água disponível a uma determinada profundidade é facilmente realizado desde que se conheçam os teores de umidade correspondentes à Cc e Pm, a densidade aparente do solo (dap) e a profundidade de interesse (z).

Primeiramente, pode-se calcular a disponibilidade total de água (DTA) no solo:

$$DTA = \frac{C_c - P_m}{100} \times dap \quad (III.1)$$

onde DTA é expressa em mm de água por mm de solo.

A disponibilidade total de água geralmente aumenta a medida que a textura do solo vai diminuindo. Na Tabela III.1 são apresentados os limites comumente encontrados nas texturas básicas.

A capacidade real de água (CRA), leva em consideração a profundidade de interesse, que normalmente corresponde à profundidade efetiva do sistema radicular (Pef) – Tabela III.2a e III.2b. Sendo assim:

$$CRA = DTA \times P_{ef} \quad (III.2)$$

onde a Pef é expressa em mm.

Tabela III.1 - Limites de DTA para solos de diferentes texturas

Textura	Disponibilidade total de água	
	mm por cm de solo	m ³ ha ⁻¹ por cm de solo
Grossa	0,4 a 0,8	4 a 8
Média	0,8 a 1,6	8 a 16
Fina	1,2 a 2,4	12 a 24

A CRA não está igualmente disponível para as plantas em todo o seu intervalo, o que, em termos práticos, resulta na possibilidade do solo limitar a evapotranspiração das culturas em sua taxa máxima. Assim, adota-se uma faixa do CRA que irá constituir-se na disponibilidade real de água (DRA) e espera-se ainda que ela

possibilite a ocorrência da evapotranspiração no seu nível máximo. A DRA é função do tipo da cultura e da demanda evapotranspirométrica. Dessa forma:

$$DRA = CRA \times f \quad (III.3-a)$$

onde **f** é denominado fator de disponibilidade hídrica, tabelado em função da cultura. A seguir será feita uma explanação mais detalhada sobre este fator.

Tabela III.2a - Profundidade efetiva do sistema radicular de algumas culturas

Culturas	Profundidade (cm)
Hortaliças	
• Alface	15 - 30
• Batata	25 - 60
• Cebola	25 - 60
• Ervilha	50 - 70
• Melão	20 - 40
• Milho Doce	30 - 50
• Pepino	35 - 50
• Tomate	25 - 70
Cereais	
• Cereais Menores	50 - 100
• Feijão	20 - 40
• Milho	30 - 60
• Trigo	20 - 40
Frutas	
• Banana	30 - 50
• Citros	60 - 150
• Morango	20 - 40
• Videira	50 - 100
Forrageiras	
• Alfafa	40 - 70
• Pastagens de Gramíneas	40 - 100
• Sorgo	50 - 100
Plantas Industriais	
• Algodão	50 - 110
• Cana de Açúcar	50 - 120
• Soja	40 - 70
• Tabaco	30 - 60

(Adaptado de RAPOSO, 1980)

A evapotranspiração máxima (ET_m) é o consumo hídrico necessário para manter uma cultura sem deficiência. À medida que se esgota a água disponível no solo, em um determinado ponto (umidade crítica), a demanda hídrica da cultura torna-se inferior à ET_m. A fração da água total disponível que pode ser utilizada sem que a ET_r seja inferior à ET_m, é definida como fator de disponibilidade hídrica (**f**). Assim, quando a

evapotranspiração é pequena, a água do solo pode estar disponível à níveis bem baixos de umidade. Inversamente, à níveis de demanda muito elevados, a água do solo pode não estar disponível às culturas em umidades próximas da capacidade de campo. Então, todas as vezes que o conteúdo de água do solo for inferior à umidade crítica, haverá deficiência hídrica da cultura.

Tabela III.2b – Profundidade efetiva do sistema radicular de algumas culturas e a percentagem da presença de raízes com efetiva absorção de água

Cultura	Profundidade efetiva	
	(cm)	(%)
Abacaxi	20	95
Amendoim	70	85
Algodão	30	83 – 89
Arroz	10	93
Arroz-várzea	15 - 20	80 – 90
Batata	15 – 20	90
Cacau	40	85
Café	50	80
Cana-de-açúcar	70	80
Citrus	50	80
Feijão	20 – 30	81 – 98
Mamão	50	85
Milho	50	80
Morango	10	85 – 94
Pessegueiro	50	87
Pepino	30	88
Quiabo	20	90
Soja	50	82
Tomate	50	68 – 81
Trigo	35	85
Hortaliças	10 – 15	80
Cereais	15 – 35	80
Fruteiras	50	80

O valor de f é estimado em função do solo, da cultura e das condições climáticas (Bailey, 1990 e Doorenbos & Kassam, 1979a). Algumas culturas, como a maioria das hortaliças, necessitam constantemente de solos relativamente úmidos para que não haja déficit hídrico. Outras culturas, como o algodão e o sorgo, podem utilizar muito mais a água do solo antes que a E_{Tr} seja inferior à E_{Tm} . As culturas podem ser agrupadas de acordo com as suas especificidades fisiológicas (Tabela III.3) e, dessa forma, em função do grupo a que pertence e a sua evapotranspiração máxima, seleciona-se fator f (Tabela III.4). A margem de tolerância desse fator é estreita para as culturas que têm a parte colhida

carnosa ou fresca (frutas, hortaliças e forragens) e é mais ampla naquelas cuja parte colhida é seca (cereais para grãos, algodão e oleaginosas). O valor de **f** pode variar com o período vegetativo e geralmente é maior na fase de maturação devido à baixa evapotranspiração.

A água do solo se transmite e é absorvida pelo sistema radicular das culturas mais facilmente em solos de textura mais grossa que nos de textura mais fina, devido às diferenças na condutividade hidráulica. Por esse motivo, normalmente, os valores de **f** são maiores nos solos de textura mais grossa do que nos de textura mais fina.

Tabela III.3 - Grupos de culturas de acordo com a influência da redução de água do solo, na redução da ET_m

GRUPO	CULTURAS
1	cebola, pimenta, batata
2	banana repolho, uva, ervilha, tomate
3	alfafa, feijão, cítricas, amendoim, abacaxi, girassol, melancia, trigo
4	algodão, milho, azeitona, açafrao, sorgo, soja, beterraba, cana-de-açúcar, fumo

Tabela III.4 - Valores de **f** para diferentes grupos de cultura e valores de evapotranspiração máxima diária

GRUPO	ET _m (mm d ⁻¹)								
	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0,50	0,425	0,35	0,30	0,25	0,225	0,20	0,20	0,175
2	0,675	0,575	0,475	0,40	0,35	0,325	0,275	0,25	0,225
3	0,80	0,70	0,60	0,50	0,45	0,425	0,375	0,35	0,30
4	0,875	0,80	0,70	0,60	0,55	0,50	0,45	0,425	0,40

Considerando a irrigação real necessária (IRN) como sendo a quantidade de água que se necessita aplicar por irrigação, apresentam-se dois casos:

a) **Irrigação total**: quando toda a água necessária à cultura for suprida pela irrigação; neste caso, IRN = DRA. Para os sistemas de irrigação por sulcos de infiltração ou aspersão, IRN = DRA. Quando se utiliza os sistemas de irrigação por pivô central, auto-propelido ou localizados, IRN < DRA, pois a automação, inerente a estes métodos, permite se irrigar com maior freqüência. Dessa forma, a IRN será estimada pela Equação III.3-b.

$$IRN = \frac{C_c - P_m}{100} \times d_{ap} \times P_{ef} \times f \quad (III.3-b)$$

b) **Irrigação suplementar**: quando parte da água necessária à cultura for suprida pela irrigação e a outra parte pela precipitação. Como nem toda a água precipitada é utilizada no suprimento às culturas, denomina-se precipitação efetiva (P_e), aquela parte da precipitação que fica retida na zona radicular e é efetivamente utilizada pela cultura. A irrigação real necessária será então estimada pela Equação III.4.

$$IRN = \left(\frac{C_c - P_m}{100} \times d_{ap} \times P_{ef} \times f \right) - P_e \quad (III.4)$$

Normalmente a precipitação efetiva não é considerada ao se dimensionar um projeto de irrigação. Entretanto, a fim de compensar a não inclusão desse parâmetro no cálculo da demanda máxima de irrigação, pode-se dimensionar os projetos em 100 % da ET_{pc} para a região nordeste, e em 80 % da ET_{pc} para as outras regiões do país.

Para se calcular a quantidade total de água a ser aplicada por irrigação (ITN), é necessário se estabelecer a eficiência aplicação do sistema de irrigação (E_a) a ser utilizado. Esses valores são atribuídos em função do sistema de irrigação empregado e será tema para discussão ao se estudar sistemas de irrigação.

$$ITN = \frac{IRN}{E_a} \quad (III.5)$$

3.2 – INFILTRAÇÃO DA ÁGUA NO SOLO

3.2.1 – Introdução

A infiltração é o processo pelo qual a água penetra no solo através de sua superfície. Após a passagem da água pela superfície do solo, ou seja, cessada a infiltração, a camada superior atinge um “alto” teor de umidade, enquanto que as camadas inferiores apresentam-se ainda com “baixos” teores de umidade. Há então, uma tendência de um movimento descendente da água provocando um molhamento das camadas inferiores, dando origem ao fenômeno que recebe o nome de redistribuição.

Os fenômenos infiltração e redistribuição caracterizam a capacidade de infiltração do solo, que por sua vez, vai comandar a velocidade de infiltração (V_i) da água aplicada à uma determinada taxa (taxa de aplicação). A V_i condiciona o tempo de irrigação necessário para a aplicação da quantidade de água desejada como também determina a escolha do melhor método de irrigação. A medida que se vai adicionando água no solo, a

frente de umedecimento vai atingindo uma profundidade cada vez maior, diminuindo a diferença de umidade entre essa frente e a camada superficial, que vai se tornando cada vez mais úmida. Com isto, a **Vi** vai se reduzindo substancialmente até atingir um valor constante, característico de cada tipo de solo, e que recebe o nome de velocidade de infiltração básica (**Vib**).

Normalmente, solos arenosos apresentam grandes valores de **Vi** e, conseqüentemente, podem ocorrer grandes perdas por percolação, sendo, dessa forma, impróprios para a irrigação por superfície. Por outro lado, a **Vib** é usada no momento da escolha do aspersor, já que a intensidade de aplicação, típica de cada um deles, deve ser menor ou igual a ela.

Se num solo com baixa capacidade de infiltração aplicarmos água a uma taxa elevada, a velocidade de infiltração será correspondente à capacidade de infiltração daquele solo. Poderá haver escoamento superficial daquela água aplicada na taxa excedente à sua capacidade de infiltração. A **Vi** pode ser expressa em termos de altura de lâmina d'água ou volume d'água por unidade de tempo por unidade de área (mm h^{-1} ou $\text{m}^3 \text{min}^{-1} \text{m}^{-1} \text{m}^{-1}$).

Portanto, a **Vi** depende diretamente da textura e estrutura do solo e, para um mesmo solo, depende do teor de umidade na época da irrigação, da sua porosidade, do tipo de argila predominante e da existência de camada menos permeável (camada compactada) ao longo do perfil.

Outro termo muito utilizado é a infiltração acumulada (**I**), que é a quantidade total de água infiltrada, durante um determinado tempo. Geralmente é expressa em mm ou cm (altura de lâmina de água infiltrada na superfície do solo).

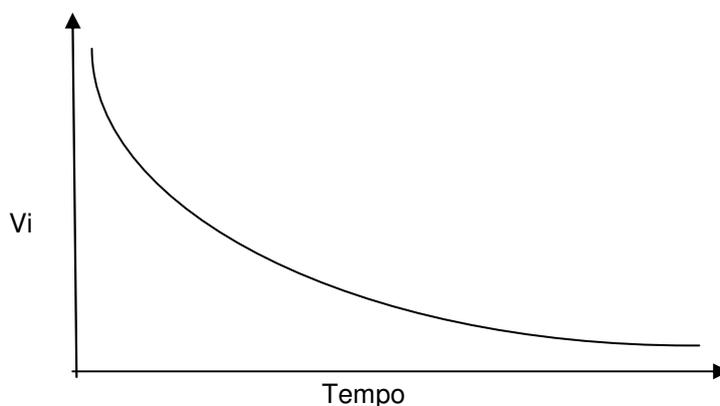


Figura III.1 - Curva típica de velocidade de infiltração, para diferentes tipos de solo e conteúdo de umidade.

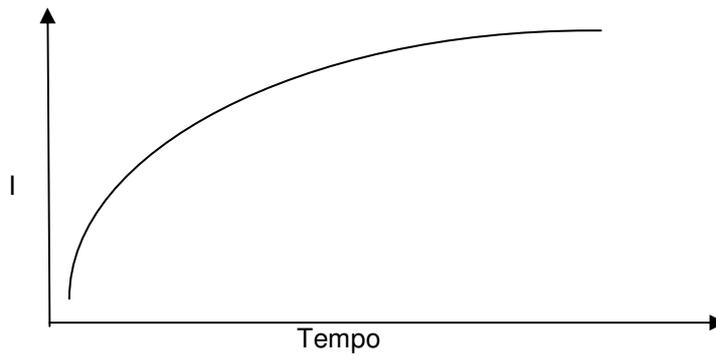


Figura III.2 - Curva típica de infiltração acumulada.

3.2.2 – Equações representativas da infiltração

A infiltração acumulada de água no solo (**I**) pode ser descrita por meio de várias equações, onde serão apresentadas as duas mais utilizadas.

3.2.2.1 – Equação tipo potencial

A equação potencial mais conhecida é denominada equação de Kostiakov, representada pela Equação III.6.

$$I = k \times T^a \quad (\text{III.6})$$

em que:

I = infiltração acumulada [cm, mm];

k = constante dependente do solo [adimensional];

T = tempo de infiltração [horas, min]; e

a = constante dependente do solo [adimensional], variando de 0 a 1 em valor absoluto.

Essa equação descreve bem a infiltração para pequenos tempos de irrigação, comuns na aplicação de lâminas de água médias e pequenas.

Para se determinar a equação que representa a velocidade de infiltração instantânea (V_{inst}) é necessário derivar a equação de infiltração acumulada em relação ao tempo. Sua forma será então:

$$V_{inst} = \frac{dI}{dT} = k \times a \times T^{a-1} \quad (III.7)$$

A equação de Kostiakov possui limitações para longos tempos de irrigação. Rearranjando a Equação III.7, teremos:

$$V_{inst} = \frac{k \times a}{T^{1-a}} \quad (III.8)$$

Verifica-se na equação que, a medida que o tempo de infiltração vai-se tornando muito grande, a velocidade de infiltração tende para zero. Essa situação não é real uma vez que, na realidade, a velocidade tende para a V_{ib} , cujo valor é diferente de zero.

A equação que representa a velocidade de infiltração média (V_{im}) é obtida pela divisão da equação de I pelo tempo T (Equação III.9).

$$V_{im} = \frac{I}{T} = \frac{k \times T^a}{T} = k \times T^{a-1} \quad (III.9)$$

A determinação dos coeficientes **a** e **b** é feita utilizando-se o método analítico (regressão linear) ou o método gráfico (uso de papel log-log).

a) Método analítico

Como o método da regressão linear só pode ser aplicado para equações lineares, inicialmente a equação de infiltração, que é uma equação exponencial, deverá ser transformada em uma equação linear. Para isso, basta aplicar as operações logarítmicas correspondentes à equação de infiltração. Assim,

$$\text{Log } I = \text{Log } k + a \text{ Log } T \quad (III.10)$$

Dessa forma, verifica-se que essa apresentação da equação de infiltração nada mais é que uma equação da reta do tipo $Y = A + B X$, em que:

- $Y = \text{Log } I$
- $A = \text{Log } k$
- $B = a$
- $X = \text{Log } T$

No método da regressão linear, os valores de A e B são determinados pelas seguintes expressões:

$$A = \frac{\sum X \times \sum XY - \sum X^2 \times \sum Y}{(\sum X)^2 - m \times \sum X^2} \quad (\text{III.11})$$

$$B = \frac{\sum X \times \sum Y - m \times \sum XY}{(\sum X)^2 - m \times \sum X^2} \quad (\text{III.12})$$

em que **m** é o número de pares de dados I e T.

Os pares de valores I x T são obtidos por meio de teste de campo. Essas determinações serão assuntos discutidos a seguir.

Obtidos os valores de A e B, determina-se **k** e **a**, ou seja, retorna-se a equação exponencial de origem. O valor de **k** é encontrado aplicando o antilog A, e **a** é o próprio valor de B.

b) Método gráfico

Os dados de I e T são plotados em um papel Log-Log e traça-se a linha reta de melhor ajuste dos pontos. O ponto de intercessão do prolongamento da reta com o eixo das ordenadas (relativo aos valores do tempo T), será o valor de **k**, e a declividade da reta será o valor de **a**.

Exemplo de aplicação III.1

Em um teste de infiltração foram levantados os seguintes dados:

Tac (min)	I (mm h ⁻¹)	x = Log Tac	Y = Log I	X ²	X Y
1	300	0,0000	2,4771	0,0000	0,0000
3	150	0,4771	2,1761	0,2276	1,0382
5	150	0,6990	2,1761	0,4886	1,5210
10	72	1,0000	1,8573	1,0000	1,8573
15	84	1,1761	1,9243	1,3832	2,2632
25	54	1,3979	1,7324	1,9542	2,4218
35	54	1,5441	1,7324	2,3841	2,6749
50	44	1,6990	1,6435	2,8865	2,7922
65	40	1,8129	1,6021	3,2867	2,9044
95	26	1,9777	1,4150	3,9114	2,7984
125	16	2,0969	1,2041	4,3970	2,5249
185	18	2,2672	1,2553	5,1401	2,8459
245	14	2,3892	1,1461	5,7081	2,7383
Total		18,5371	22,3418	32,7675	28,3805

Número de pares de valores T x I (m) = 13

Utilizando as Equações III.11 e III.12, vamos ter:

$$A = \frac{18,5371 \times 28,3805 - 32,7675 \times 22,3418}{(18,5371)^2 - 13 \times 32,7675} = 2,5013$$

$$B = \frac{18,5371 \times 22,3418 - 13 \times 28,3805}{(18,5371)^2 - 13 \times 32,7675} = -0,55$$

$$\text{Como: } A = \text{Log } k \implies k = \text{antilog } A \implies k = \text{antilog } 2,5013 = 317,12$$

$$\text{Como: } B = a \implies a = -0,55$$

A forma final da equação de infiltração será: $I = 317,12 T^{-0,55}$

3.2.2.1 – Equação tipo potencial modificada (equação de Kostiakov-Lewis)

Com o objetivo de solucionar o problema de **Vi** tender a zero para um tempo de infiltração muito grande, foi proposta a Equação III.13.

$$I = k \times T_0^a + V_{ib} \times T_0 \quad (\text{III.13})$$

em que

I = infiltração acumulada [$m^3 m^{-1} m^{-1}$];

k = constante dependente do solo [adimensional];

T_o = tempo de oportunidade de irrigação [min];

a = constante dependente do solo [adimensional], com variação de 0 a 1 em valor absoluto; e,

V_{ib} = velocidade de infiltração básica da água no solo [$m^3 min^{-1} m^{-1} m^{-1}$].

Derivando a Equação III.13 em relação ao tempo de oportunidade, teremos:

$$V_{inst} = \frac{dI}{dT_o} = k \times a \times T_o^{a-1} + V_{ib} \quad (III.14)$$

$$V_{inst} = \frac{k \times a}{T_o^{1-a}} + V_{ib} \quad (III.15)$$

Nessa forma da equação, verifica-se que, a medida que o tempo de oportunidade vai-se tornando muito grande, a velocidade de infiltração tende para a velocidade de infiltração básica, que é a situação real.

Os parâmetros da equação de infiltração (k e a) também são estimados pelo método da regressão linear, procedendo-se um arranjo na Equação III.13.

$$I - (V_{ib} \times T) = k \times T^a \quad (III.16)$$

$$\text{Log}[I - (V_{ib} \times T)] = \text{Log } k + a \times \text{Log } T \quad (III.17)$$

Com esse arranjo, $Y = \text{Log}(I - V_{ib} T)$, e os outros parâmetros são os mesmos utilizados anteriormente.

Apesar da modificação feita na equação potencial (Kostiakov) visando solucionar o problema de V_i tender a zero e não à V_{ib} , essas equações não levam em consideração o teor de umidade inicial do solo. Por isso, o teste de infiltração deve ser realizado quando o solo estiver com um teor de umidade próximo àquele em que se efetuará a irrigação. Desta maneira, o problema é parcialmente resolvido.

3.2.3 – Métodos de determinação de Vi e I

Os métodos usados para se determinar a velocidade de infiltração da água no solo, podem ser classificados em dois grupos:

- métodos que representam a infiltração praticamente na vertical: ocorre nas irrigações por inundação e por aspersão;
- métodos que representam a infiltração tanto na direção vertical como na horizontal, que é o caso da irrigação por sulcos e gotejamento (infiltração radial).

3.2.3.1 – Método do infiltrômetro de anel

Esse tipo de infiltrômetro é formado por dois cilindros de chapa de aço ou de ferro com 1/8" de espessura, com 30 cm de altura e diâmetros de 25 e 50 cm, sendo que as bordas inferiores dos cilindros são biseladas em ângulo de 30° para facilitar a introdução no solo.

Para a instalação dos cilindros, inicialmente escolhe-se o local para a execução do teste, de modo que ele seja representativo da área total, evitando-se locais pedregosos, elevações e depressões.

Os cilindros são cravados no solo, concentricamente e em nível, até uma profundidade de 15 cm, por meio de golpes com uma marreta sobre um pranchão de madeira assentado sobre eles, evitando-se assim que as bordas superiores amassem.

As medições serão realizadas no cilindro de menor diâmetro; o de maior diâmetro tem como finalidade fazer com que a água contida no interior do menor cilindro infiltre o mais verticalmente possível.

Para a execução do teste, coloca-se, inicialmente, uma folha de plástico no interior do cilindro de prova, forrando-o totalmente. Logo após, adiciona-se água nos dois cilindros, de modo que os níveis se igualem. Anota-se, com uma régua, a carga hidráulica no cilindro interno, retirando-se imediatamente o plástico para que se inicie a infiltração da água. Dessa forma, mede-se a altura de água infiltrada a intervalos de tempo. À medida que o tempo avança a velocidade de infiltração diminui e, sendo assim, os intervalos de tempo deverão ser cada vez maiores entre duas medições. Quando se atingirem intervalos de tempo

de 60 min, mantém-se este intervalo até que se verifique a mesma altura infiltrada nesse tempo.

Durante o teste, os cilindros deverão ser reabastecidos todas as vezes que a carga hidráulica se situar próximo de 5 cm. A cada reabastecimento, deverá ser anotada a nova altura de referência. A relação entre a lâmina infiltrada e o tempo necessário para esta infiltração nos dará a velocidade de infiltração instantânea. A soma das lâminas infiltradas durante o teste nos dará a infiltração acumulada.

Com os dados obtidos no teste, construiremos uma tabela onde teremos os valores equivalentes à variação da velocidade de infiltração ao longo do tempo, bem como todos os valores da infiltração acumulada durante o teste. Dessa forma, serão determinados os parâmetros da equação de infiltração. O exemplo de aplicação III.2 ilustrará a utilização do infiltrômetro de anel.

3.2.3.2 – Método do infiltrômetro de sulco

Consiste em represar a água em um pequeno sulco aberto no solo, em geral de 1 m, e ir acrescentando água, à medida que ela for se infiltrando. Permite-se uma variação máxima de 2 cm no nível de água dentro do sulco. Deve-se utilizar dois sulcos ao lado como bordadura.

Com uma trena, mede-se um trecho de 1,0 m de sulco, delimitando-o com duas chapas de ferro cravadas em cada extremidade. Coloca-se no meio do sulco um piquete para se fazer o controle do nível de água dentro do infiltrômetro. Em seguida, o sulco é preenchido rapidamente com água até o nível de referência, iniciando-se o teste. Ao ocorrer a infiltração, a água deve ser repostada até o nível de referência. Entretanto, ao invés de se medir h , como no método anterior, acrescenta-se água ao sulco através de um recipiente de volume conhecido, de forma que se saiba qual o volume infiltrado no solo no momento das leituras.

Embora este método represente a condição de infiltração bidimensional (como ocorre na irrigação por sulcos), ele não representa as condições dinâmicas da irrigação (remoção do selamento), subestimando a infiltração, além de se fazer uma pequena amostragem espacial. Uma outra característica deste método é que, o efeito de cargas distintas (nível d'água no sulco) diminui com o passar da irrigação, mas não é totalmente eliminado, pois quando se aumenta a carga, não apenas o gradiente é

aumentado más também o perímetro molhado do sulco (área de infiltração). O exemplo de aplicação III.3 ilustrará a utilização do infiltrômetro de sulco.

3.2.3.3 – Método da entrada e saída da água no sulco

Consiste em colocar um medidor de vazão (calhas medidoras) no início do sulco e um outro afastado de 20 a 40 m do primeiro. Essa distância é função do tipo de solo, sendo recomendado o maior valor para solos argilosos e o menor para arenosos.

O método apresenta a grande vantagem de ser dinâmico, simulando as condições reais de escoamento da água na superfície do sulco. Além disso, é mais representativo, pois utiliza uma maior área para a realização do teste. A desvantagem apresentada é que necessita de um maior volume de água e é mais trabalhoso que os demais. Este método, de modo geral, superestima a infiltração, pois não considera a variação do volume de água armazenado na superfície, o qual acaba sendo contabilizado como infiltração.

Quando a vazão no final do sulco atingir um valor constante, a **Vib** pode ser determinada pela diferença entre a vazão aplicada no início do sulco (Q_e) e a que escoou no seu final (Q_s), dividida pela área do sulco ($L \times E$).

$$Vib = \frac{Q_e - Q_s}{L \times E} \quad (III.18)$$

Ao se fazer a irrigação por sulcos, a velocidade de infiltração deve ser determinada pelo método de entrada e saída ou pelo infiltrômetro de sulco.

O exemplo de aplicação III.4 ilustrará a utilização do infiltrômetro de entrada e saída.

Exemplo de aplicação II.2

Determinação da equação de infiltração pelo método do infiltrômetro de anel

Tempo Acumulado (Tac) (min)	ΔT (min)	Inf. Acumulada (Iac) (mm)	ΔI (mm)	V_i ($m^3 \text{ min}^{-1} m^{-1} m^{-1}$)	Iac – Vib x Tac	(Y) Log(Iac – Vib x Tac)	(X) Log Tac	X^2	XY
2,8	2,8	19,0	19,0	0,00679	0,01782	- 1,74899	0,44716	0,19995	- 0,78208
14,0	11,2	29,0	10,0	0,00089	0,02312	- 1,63601	1,14613	1,31361	- 1,87508
22,5	8,5	34,0	5,0	0,00059	0,02455	- 1,60995	1,35218	1,82839	- 2,17694
32,0	9,5	39,0	5,0	0,00053	0,02556	- 1,59244	1,50515	2,26548	- 2,39686
44,0	12,0	44,0	5,0	0,00042	0,02552	- 1,59312	1,64345	2,70093	- 2,61821
56,5	12,5	49,0	5,0	0,00040	0,02527	- 1,59739	1,75205	3,06968	- 2,79871
68,5	12,0	54,0	5,0	0,00042	0,02523	- 1,59808	1,83569	3,36976	- 2,93358
80,5	12,0	59,0	5,0	0,00042	0,02519	- 1,59877	1,90580	3,63207	- 3,04694
Total						-12,97475	11,58761	18,37987	-18,62840

$$V_i = \frac{\Delta I}{\Delta T}$$

Velocidade de infiltração básica (Vib) = $0,00042 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1} \text{ m}^{-1} \text{ m}^{-1}$

Aplicando-se as Equações 37 e 38, determinam-se os coeficientes da equação de infiltração para o presente caso, cuja forma é:

Equação de infiltração: $I = 0,01692 \times T_o^{0,10333} + 0,00042 \times T_o$

Exemplo de aplicação II.3

Determinação da equação de infiltração pelo método do infiltrômetro de sulco

Tempo Acumulado (Tac) (min)	ΔT (min)	lac (mm)	ΔI (mm)	V_i ($m^3 \text{ min}^{-1} m^{-1} m^{-1}$)	lac – Vib x Tac ($m^3 m^{-1} m^{-1}$)	(Y) Log(lac – Vib x Tac)	(X) Log Tac	X^2	XY
8,0	8,0	60,0	60,0	0,00750	0,03712	-1,4304	0,9031	0,8156	-1,2918
13,0	5,0	75,0	15,0	0,00300	0,03782	-1,4223	1,1139	1,2409	-1,5843
17,0	4,0	95,0	20,0	0,00500	0,04638	-1,3337	1,2304	1,5140	-1,6410
22,0	5,0	110,0	15,0	0,00300	0,04708	-1,3272	1,3424	1,8021	-1,7816
27,0	5,0	140,0	30,0	0,00600	0,06278	-1,2022	1,3617	1,8543	-1,6370
34,0	7,0	160,0	20,0	0,00286	0,06276	-1,2023	1,5315	2,3454	-1,8413
40,0	6,0	180,0	20,0	0,00333	0,06560	-1,1831	1,6021	2,5666	-1,8954
47,0	7,0	200,0	20,0	0,00286	0,06558	-1,1832	1,6721	2,7959	-1,9785
54,0	7,0	220,0	20,0	0,00286	0,06556	-1,1834	1,7324	3,0012	-2,0500
61,0	7,0	240,0	20,0	0,00286	0,06554	-1,1835	1,7853	3,1874	-2,1129
Total						-12,6513	14,2749	21,1234	-17,8138

$$V_i = \frac{\Delta I}{\Delta T}$$

Velocidade de infiltração básica (Vib) = $0,00286 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1} \text{ m}^{-1} \text{ m}^{-1}$

Aplicando-se as Equações 37 e 38, determinam-se os coeficientes da equação de infiltração para o presente caso, cuja forma é:

Equação de infiltração: $I = 0,01782 T_o^{0,33736} + 0,00286 T_o$

Exemplo de aplicação II.4

Determinação da equação de infiltração pelo método da entrada e saída

Comprimento dos sulcos (L) = 20 m;

Espaçamento entre sulcos (E) = 1 m,

Equação da calha WSC na entrada do sulco: $Q_e = 0,00036 H^{1,99}$.

Equação da calha WSC na saída do sulco: $Q_s = 0,0000059 H^{2,7184}$; (Q_e e Q_s em $L s^{-1}$; H em mm)

Tempo Acumulado (Tac) (min)	Entrada do sulco		Saída do sulco		ΔQ ($L s^{-1}$)	Vi	ΔI	Iac	Iac – Vib x Tac	(Y)	(X)	χ^2	XY
	H (mm)	Q_e ($L s^{-1}$)	H (mm)	Q_s ($L s^{-1}$)						Log(Iac – Vib x Tac)	Log Tac		
0,0	79,0	2,1507	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
4,5	79,0	2,1507	45,0	0,1841	1,9666	0,0059	0,0266	0,0266	0,0154	- 1,8124	0,6532	0,4267	- 1,1839
9,5	65,0	1,4588	59,0	0,3844	1,0744	0,0032	0,0161	0,0427	0,0189	- 1,7235	0,9777	0,9559	- 1,6851
14,5	65,0	1,4588	63,0	0,4594	0,9994	0,0030	0,0150	0,0577	0,0215	- 1,6676	1,1614	1,3489	- 1,9368
19,5	65,0	1,4588	65,0	0,5001	0,9587	0,0029	0,0144	0,0721	0,0234	- 1,6308	1,2900	1,6641	- 2,1037
24,5	65,0	1,4588	66,0	0,5213	0,9375	0,0028	0,0141	0,0862	0,0250	- 1,6021	1,3892	1,9299	- 2,2256
29,5	65,0	1,4588	69,0	0,5883	0,8705	0,0026	0,0131	0,0993	0,0256	- 1,5918	1,4698	2,1603	- 2,3396
34,5	65,0	1,4588	70,0	0,6117	0,8471	0,0025	0,0127	0,1120	0,0258	- 1,5884	1,5378	2,3648	- 2,4426
39,5	65,0	1,4588	70,0	0,6117	0,8471	0,0025	0,0127	0,1247	0,0260	- 1,5850	1,5966	2,5491	- 2,5306
44,5	65,0	1,4588	70,0	0,6117	0,8471	0,0025	0,0127	0,1874	0,0262	- 1,5817	1,6484	2,7172	- 2,6073
Total										-14,7833	11,7241	16,1169	-19,0552

OBS: Vi ($m^3 min^{-1} m^{-1} m^{-1}$), ΔI ($m^3 m^{-1} m^{-1}$), Iac ($m^3 m^{-1} m^{-1}$)

$$Vi = \frac{\Delta Q}{L \times E} \quad \Delta I = \frac{\Delta Q \times \Delta T}{L \times E} \quad \Delta Q = Q_e - Q_s$$

Velocidade de infiltração básica (Vib) = $0,0025 m^3 min^{-1} m^{-1} m^{-1}$

Aplicando-se as Equações 37 e 38, determinam-se os coeficientes da equação de infiltração para o presente caso, cuja forma é:

Equação de infiltração: $I = 0,0111 \times T_o^{0,2401} + 0,0025 \times T_o$

3.2.4 – Resolução da equação de infiltração utilizando o método numérico de Newton-Raphson

A equação de infiltração é resolvida normalmente tendo o tempo de oportunidade como incógnita. Apesar de ser um parâmetro explícito da equação, sua determinação só pode ser feita por meio de um método numérico, uma vez que a solução não é algebricamente direta.

Se houver possibilidade de se utilizar uma calculadora programável, a solução é simples em função dos recursos disponíveis nessas calculadoras, ou seja, qualquer que seja a marca, elas possuem em sua estrutura solução para esse tipo de determinação numérica. Quando se dispuser apenas de calculadoras que não possuem o recurso de estrutura de programação, a solução para equações que se assemelham à de infiltração (Kostiakov-Lewis), normalmente tem que ser feita por tentativas, processo este que, por vezes, pode ser extremamente demorado.

Para facilitar a solução desse tipo de equação, um procedimento bastante utilizado é o método numérico de Newton-Raphson. O exemplo de aplicação III.5 ilustrará a utilização desse método para resolução da equação de Kostiakov-Lewis.

Exemplo de aplicação III.5

Um solo apresenta a seguinte equação de infiltração:

$$I = 0,01337 \times T_o^{0,2132} + 0,000235 \times T_o$$

Calcular o tempo necessário para que seja aplicada uma lâmina de irrigação de 100 mm. A área será irrigada pelo sistema de irrigação por sulcos de infiltração com os sulcos espaçados de 0,75 m.

Resolução

A equação de Kostiakov-Lewis é ajustada para um volume infiltrado em 1 m de comprimento por 1 m de largura da área a ser irrigada. Assim, a unidade de I é $m^3 m^{-1} m^{-1}$. O tempo é expresso em minutos.

Uma lâmina de 100 mm de água equivale a uma infiltração de $0,1 \text{ m}^3 \text{ m}^{-1} \text{ m}^{-1}$. Como o espaçamento entre sulcos é de 0,75 m, a infiltração será $0,075 \text{ m}^3 \text{ m}^{-1} \text{ m}^{-1}$. A equação de infiltração terá, dessa forma, o tempo de oportunidade como incógnita, ou seja,

$$0,075 = 0,01337 \times T_o^{0,2135} + 0,000235 \times T_o$$

Aplicação do método de Newton-Raphson:

Passo 1: rearranjar a equação de infiltração e igualar os termos à uma função $F(T_o)$.

$$F(T_o) = 0,01337 \times T_o^{0,2135} + 0,000235 \times T_o - 0,075$$

Passo 2: derivar a equação obtida no passo 1.

$$F'(T_o) = 0,0028545 \times T_o^{-0,7865} + 0,000235$$

Passo 3: atribuir um valor inicial para o tempo de oportunidade (T_o) e determinar $F(T_o)$ e $F'(T_o)$. Como sugestão, pode-se atribuir $T_o = 100$ min. Assim:

$$F(T_o) = -0,0157$$

$$F'(T_o) = 0,0003113$$

Passo 4: determinar uma correção para o valor atribuído ao tempo de oportunidade, dado pela seguinte relação:

$$\text{Correção} = \frac{F(T_o)}{F'(T_o)}$$

$$\text{Correção} = \frac{-0,0157}{0,0003113} = -50,63$$

Passo 5: determinar o tempo ajustado dado pela seguinte relação:

$$T_{aj} = \text{Tempo atribuído} - \text{Correção} = 100 - (-50,63) = 150,63 \text{ min}$$

Passo 6: determinar os novos valores de $F(T_0)$, $F'(T_0)$ para o tempo ajustado. Assim:

$$F(T_0) = -0,0005974$$

$$F'(T_0) = 0,0002894$$

$$\text{Correção} = -2,064$$

Passo 7: determinar o novo tempo ajustado.

$$T_{aj} = 150,63 - (-2,064) = 152,69 \text{ min}$$

Passo 8: determinar os novos valores de $F(T_0)$ e $F'(T_0)$ para o novo tempo ajustado. Assim:

$$F(T_0) = 0$$

$$F'(T_0) = 0$$

$$\text{Correção} = 0$$

Como o valor da correção foi zero, o problema foi solucionado, ou seja, o tempo necessário para a infiltração da lâmina de 100 mm (T_0) será 152,69 min. Em termos práticos, poderá ser utilizado 150 min.

CAPÍTULO IV

SISTEMAS DE IRRIGAÇÃO

4.1 - INTRODUÇÃO

Sistemas de irrigação é um conjunto de técnicas da Engenharia Agrícola que visa distribuir água às plantas cultivadas em quantidades adequadas para promover um desenvolvimento vegetal adequado, com um mínimo de perdas de água.

Basicamente, um projeto de irrigação é composto por dois sistemas: o sistema de irrigação e o de drenagem, quando necessário.

O **sistema de irrigação** é composto essencialmente pelos seguintes subsistemas:

➤ Subsistema de captação

A captação de água pode ser feita de duas maneiras: por bombeamento ou por gravidade. A captação por bombeamento é a mais comum, uma vez que a maioria dos casos, a fonte de água se encontra em cota inferior a área a ser irrigada. Como as fontes de água para irrigação podem ter diferentes origens (rios, nascentes, reservatórios, poços, etc), poucos são os casos onde a captação pode ser por gravidade. Em rios, por exemplo, é possível a captação por gravidade, desde que a cota do nível da água se encontre acima do terreno a ser irrigado. Nesse caso, um canal parte diretamente do rio, transportando a água

para a distribuição na área. Esta tomada é conhecida como “**a fio d’água**”, mas é pouco comum, uma vez que, na época de necessidade de irrigação, o nível de água dos rios é baixo. Essa tomada é muito comum em reservatórios.

➤ **Subsistema de condução**

Compreende o conjunto de estruturas hidráulicas responsável pela condução e distribuição da água em toda a área a ser irrigada. Cada método de irrigação tem o seu conjunto específico de estruturas. Esse assunto será estudado detalhadamente a medida que for sendo discutido cada método de irrigação.

➤ **Subsistema de aplicação**

A forma de aplicação de água é dependente dos diferentes métodos de aplicação. Cada método tem sua especificidade de aplicação. Como exemplo, no método de irrigação por aspersão, a aplicação da água é feita por meio de aspersores; no método por sulcos de infiltração, são utilizados sifões que derivam a água de um canal de distribuição para os sulcos. O estudo e dimensionamento desses equipamentos serão vistos posteriormente.

O **sistema de drenagem**, comum aos métodos de irrigação por superfície, é o responsável pela eliminação dos excessos inevitáveis de água de irrigação e precipitação. Os métodos de irrigação por aspersão e localizados, salvo em situações especiais, dispensam o sistema de drenagem, devido às altas eficiências de aplicação que possuem, pois permitem maiores condições para incorporar ao solo a quantidade de água necessária, com muito pouca perda, desde que o manejo se processe de maneira eficiente.

4.2 - PARÂMETROS PARA O DIMENSIONAMENTO DE UM SISTEMA DE IRRIGAÇÃO

➤ **Evapotranspiração de referência (ET_o):** estimada por meio de um dos métodos empíricos já estudados anteriormente.

➤ **Lâmina de irrigação ou irrigação real necessária:** estimada por meio da Equação III.3-b. Normalmente é expressa em mm ou m³ ha⁻¹.

➤ **Necessidade de irrigação:** freqüentemente é expressa em termos de vazão característica, correspondendo ao mês de máxima demanda. É determinada por meio da Equação IV.1.

$$q_c = \frac{V_m \times 10^3}{N \times 30 \times 3600} \quad (\text{IV.1})$$

em que:

q_c = vazão característica, em $L s^{-1} ha^{-1}$;

V_m = volume mensal de irrigação, correspondente ao mês de máxima demanda, em $m^3 ha^{-1}$; e,

N = número de horas de irrigação por dia. Se N for igual a 24 horas, a vazão característica é chamada de vazão contínua.

➤ **Turno de rega :** representa o intervalo entre irrigações (Equação IV.2).

$$T_R = \frac{IRN}{ETPc} \quad (\text{IV.2})$$

É expresso em dias, uma vez que IRN é expressa em mm e $ETPc$ em $mm d^{-1}$. Ao se determinar o T_R , é comum encontrar valor fracionário mas, como só podemos usá-lo com valor inteiro, aproximamos para o imediatamente inferior. Exemplo: se $T_R = 4,4$ dias, adotaremos 4 dias e ajustamos o IRN em função do T_R e da $ETPc$.

➤ **Equação de infiltração da água no solo:** representada por meio da Equação III.13.

➤ **Número de irrigações diárias:** é a relação entre o número de horas disponíveis por dia para se proceder às irrigações e o tempo de irrigação (Equação IV.3).

$$N_i = \frac{N}{T_i} \quad (\text{IV.3})$$

A determinação do tempo de irrigação é função do método de irrigação utilizado. Informações detalhadas serão dadas quando do estudo de métodos de irrigação. Um outro fator que interfere na determinação de N é o tempo necessário para mudança dos equipamentos entre as irrigações. A exemplo do tempo de irrigação, esse fator é função do método de irrigação e do manejo adotado.

- **Eficiência de irrigação:** é função da quantidade de água mobilizada para a irrigação e a realmente incorporada ao solo. Esse valor varia em função do método de irrigação empregado. A eficiência total de irrigação é função das eficiências de condução, de distribuição e a de aplicação.
- ◆ **Eficiência de condução** (E_c): representa todas as perdas que ocorrem desde a tomada d'água até os limites da área a ser irrigada. É variável em função do tipo de conduto utilizado para o transporte da água, que pode ser um canal em terra ou revestido, ou mesmo uma tubulação. Para fins de anteprojeto, podem ser utilizados os seguintes valores:
 - canais em terra: 75% para os não revestidos e 85% para os revestidos;
 - tubulações: 95%.
- ◆ **Eficiência de distribuição** (E_d): representa todas as perdas que ocorrem na distribuição de água por toda a área. Podem ser utilizados os mesmos valores referentes à eficiência de condução.
- ◆ **Eficiência de aplicação** (E_a): representa todas as perdas que ocorrem durante a aplicação de água por toda a área. Varia de 65 a 90%, dependendo do método de irrigação empregado.

A eficiência total de irrigação (E_i), será então determinada pela Equação IV.4.

$$E_i = E_c \times E_d \times E_a \quad (IV.4)$$

Normalmente, os valores de E_i são os seguintes:

- para métodos de irrigação por superfície: 40 a 60%;
- para métodos de irrigação por aspersão : até 85%;
- para métodos de irrigação localizados : até 95%.

- **Vazão de projeto:** é função da necessidade hídrica máxima mensal para a(s) cultura(s), e da área a ser irrigada (Equação IV.5) .

$$Q_p = ETP_{c_{\text{máx}}} \times A \quad (IV.5)$$

A $ETP_{c_{\max}}$ é expressa em $m^3 ha^{-1} d^{-1}$, e a área de projeto em ha. A vazão total de projeto é determinada em função da eficiência de irrigação do método de irrigação utilizado. Todos os cálculos referentes à esse parâmetro será objeto de estudo em dimensionamento de sistemas de irrigação.

4.3 – CLASSIFICAÇÃO DOS SISTEMAS DE IRRIGAÇÃO

4.3.1 - Sistemas por superfície ou por gravidade

- Sulcos de infiltração
- Inundação ou submersão
- Faixas
- Subirrigação (elevação do nível do lençol freático)

4.3.2 - Sistemas por aspersão

- Aspersão convencional
- Montagem direta
- Pivô central
- Autopropelido
- Sistema linear

4.3.3 - Sistemas localizados

- Microaspersão
- Gotejamento

4.3.4 - Sistemas não convencionais

- Xique-xique
- Outros

4.4 - FATORES QUE INFLUENCIAM NA ESCOLHA DO MÉTODO DE IRRIGAÇÃO

4.4.1 - Água

- Vazão da fonte
- Freqüência da disponibilidade
- Custo
- Qualidade

4.4.2 - Solos

- Textura
- Salinidade
- Profundidade

4.4.3 - Cultura

- Hábitos de crescimento
- Característica da parte comercial
- Especificidade quanto a doenças

4.4.4 - Topografia

- Declividade

4.4.5 - Clima

4.4.6 - Mecanização e tratos culturais

4.4.7 - Mão-de-obra

4.4.8 - Aspectos econômicos

4.4.9 - Desejo do proprietário

CAPÍTULO V

IRRIGAÇÃO POR ASPERSÃO

5.1 – INTRODUÇÃO

5.1.1. – Forma de aplicação da água

Neste método de irrigação a água é aplicada ao solo sob a forma de uma chuva mais ou menos intensa e uniforme sobre a superfície, com o objetivo de que a infiltração se processe no ponto o qual ela alcança. O processo de aplicação de água por um aspersor consiste em um jato d'água emitido a grande velocidade que se dispersa no ar em um conjunto de gotas, distribuindo-se sobre a superfície do terreno, com o objetivo de se conseguir uma distribuição uniforme entre vários aspersores. A Figura V.1 ilustra um sistema de irrigação por aspersão em operação.



Figura V.1 – Sistema de irrigação por aspersão em operação.

5.1.2. – Adaptabilidade do sistema

5.1.2.1. – Solos

Este sistema se adapta a qualquer tipo de solo no que diz respeito à textura e estrutura. Solos com textura que possibilita alta velocidade de infiltração, permite a utilização de aspersores com maior intensidade de aplicação, permitindo menor tempo de irrigação por posição e, conseqüentemente, maior número de irrigações diárias para uma mesma lâmina de aplicação. Dessa forma, maior número de irrigações diárias proporciona menor área irrigada por posição, diminuindo a quantidade de equipamentos necessários ao projeto e menor custo de implantação, mas, em contrapartida, exige maior utilização de mão-de-obra. Maiores detalhes sobre esta questão serão discutidos no tópico sobre projeto de sistemas de irrigação por aspersão.

5.1.2.2. – Topografia

Com relação à declividade, a irrigação por aspersão é comumente utilizada em terrenos planos, de encosta, terraços e platôs mais elevados. Terrenos com declividades muito acentuadas dificultam a adoção do sistema, uma vez que, nesses casos, é quase impossível que as linhas laterais tenham espaçamentos constantes entre si, situação essa que é desejável para que o sistema apresente uma uniformidade de distribuição dentro de limites aceitáveis.

5.1.2.3. – Clima

Como o sistema por aspersão é caracterizado pela aplicação de água simulando uma chuva, o vento, a umidade relativa do ar e a temperatura são os parâmetros climáticos que exercem grande influência na distribuição de água. Ventos com velocidades elevadas provocam má distribuição da água na superfície do solo, provocada pelo desvio do jato d'água, ou seja, a água lançada por um certo aspersor não é aplicada efetivamente na área de domínio desse aspersor conforme as características operacionais testadas pelo fabricante do equipamento. Com aos outros dois parâmetros climáticos, baixa umidade relativa e altas temperaturas do ar provocam considerável evaporação durante a operação do sistema. Regiões com ventos fortes, baixas umidades relativas e altas temperaturas, não são indicadas para utilização dos sistema por aspersão.

5.1.2.4. – Culturas

O sistema por aspersão adapta-se a maioria das culturas, exceto para algumas, como, por exemplo, o tomate, uma vez que, devido a característica da aplicação da água, pode favorecer o desenvolvimento de doenças fúngicas. Especial cuidado deve ser levado em conta quanto aos tratamentos fitossanitários, pois a forma de aplicação da água propicia a lavagem de algum produto químico aplicado na planta, diminuindo sua eficiência, além de poluir o solo e o subsolo e, conseqüentemente, o lençol freático. É preciso estabelecer uma adequada programação das irrigações para evitar estas interferências.

5.2 – VANTAGENS E LIMITAÇÕES DO SISTEMA

As vantagens da irrigação por aspersão são derivadas principalmente de dois aspectos fundamentais: **1)** o controle da irrigação só está limitado pelas condições atmosféricas; e, **2)** a uniformidade de aplicação da água é independente das características hidrofísicas do solo.

Dessa forma, as principais vantagens do sistema são:

- a) uma vez que a dose de rega é dependente do tempo de aplicação, o sistema pode se adaptar tanto a pequenas quanto a grandes doses;
- b) não há necessidade de sistematização do terreno, adaptando-se a topografias onduladas, permitindo preservar a fertilidade natural do solo;
- c) adapta-se perfeitamente à rotação de culturas. Neste caso, o dimensionamento deve ser feito para o cultivo mais exigente em termos de necessidade de água; para cultivos de menor exigência hídrica, o manejo é feito unicamente com o controle do tempo de aplicação;
- d) permite menor uso de mão-de-obra quando comparado aos sistemas de irrigação por superfície;
- e) permite a aplicação de fertilizantes e tratamentos fitossanitários como também é muito eficiente contra o efeito de geadas nos cultivos;

- f) uma vez que toda a rede hidráulica é pressurizada, não há perda de área útil para construção de canais ou outras estruturas hidráulicas;
- g) é o método mais eficiente para a lixiviação de sais por originar um movimento de água no solo em subsaturação, obrigando-a a circular pelos poros menores e, portanto, mais em contato com a solução do solo;

As principais limitações de uso do sistema são as seguintes:

- a) é possível a aspersão propiciar a propagação de pragas e doenças em algumas culturas;
- b) pode causar problemas de sanidade na parte aérea da planta quando se utiliza água salina ou residual para a irrigação;
- c) é fortemente afetada pela ação dos ventos;
- d) maior custo de implantação e manutenção ao ser comparado com os sistemas de irrigação por superfície.

5.3 – COMPONENTES DO SISTEMA

Um sistema de irrigação por aspersão é composto basicamente por: estação de bombeamento, uma ou mais linhas principais, linhas laterais ou ramais, aspersores e acessórios da rede hidráulica. A seguir será feita uma abordagem geral sobre os componentes do sistema.

5.3.1 – Aspersores

Em geral, os aspersores podem ser classificados com base em distintos aspectos, a saber: velocidade de rotação, mecanismo de rotação e pressão de serviço.

5.3.1.1 – Classificação quanto a velocidade de rotação

- **de alta rotação:** velocidade acima de 6 rpm; são usados em jardins, hortas e viveiros;
- **de baixa rotação:** velocidade de 1/4 até 3 rpm; são os de uso geral em agricultura. Para uma mesma pressão, os de baixa rotação conseguem maior alcance que os de alta rotação, permitindo que os aspersores tenham maior espaçamento entre eles.

5.3.1.2 – Classificação quanto ao mecanismo de rotação

- **de reação:** quando a inclinação do bocal de saída origina a rotação;
- **de turbina:** quando o jato de água emitido pelo aspersor incide sobre uma turbina, originando a rotação; e,
- **de choque:** quando o jato incide sobre um braço mecânico com uma mola, que faz girar o aspersor de forma intermitente. O aspersor pode ser de rotação completa ou, mediante um mecanismo especial pode mover-se somente em um setor circular; são chamados de aspersores setoriais.

5.3.1.3 – Classificação quanto à pressão de serviço do aspersor

- **de baixa pressão** (menos de 250 kPa): são aspersores com diâmetro de bocal menor que 4 mm, com vazão menor que $1 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$, com rotação por choque. São adequados para operarem com 12 m de espaçamento entre eles, e utilizados em jardinagem, irrigação de hortaliças e para irrigação em fruteiras operando sub-copa, aplicando água bem próximo à superfície do solo. Também podem ser utilizados em sistemas de cobertura total anti-gelada;
- **de média pressão** (de 250 a 400 kPa): são aspersores com um ou dois bocais com diâmetros entre 4 e 7 mm, emitindo vazões entre 1 e $6 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$; e,
- **de alta pressão** (acima de 400 kPa): são aspersores tipo canhão com 1, 2 ou 3 bocais e vazões entre 6 e $40 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$, estando disponíveis canhões que podem superar $200 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$. O mecanismo de rotação pode ser de choque ou de turbina, com alcance entre 25 e 70 m. Os de longo alcance podem apresentar baixa uniformidade de distribuição ao ser afetado por ventos. Um outro detalhe importante é que esses aspersores de grande porte ficam limitados à pouquíssimas culturas devido ao tamanho da gota e a grande altura de queda poder causar danos ao solo nu ou à cultura.

OBS: $1 \text{ atm} = 1 \text{ kg cm}^{-2} = 10,33 \text{ mca} = 101,3 \text{ kPa}$.

5.3.2 – Tubulações

Os materiais utilizados nas tubulações para um sistema de irrigação por aspersão são quase que totalmente em PVC rígido. Somente na linha principal do sistema pode haver a necessidade de se utilizar em algum trecho da rede tubos em aço zincado ou

aço galvanizado quando se necessitar de diâmetros superiores à 4 polegadas. Atualmente só estão disponíveis no mercado nacional tubos em PVC rígido em 2, 3 e 4 polegadas com conexão por engate rápido e com comprimento padrão de 6 m. No dimensionamento das linhas laterais ou ramais, só se utilizam tubos em PVC, principalmente em sistemas semi-fixos ou móveis. Somente em casos especiais e por conveniência do projeto, pode-se pensar na possibilidade da utilização de tubos em aço nas linhas laterais.

5.3.3 – Moto-bomba

O conjunto moto-bomba utilizado na irrigação por aspersão é formado por bombas de pressão ou centrífugas de eixo horizontal ou do tipo turbina, e por motores elétricos ou de combustão. Os detalhes sobre a seleção do conjunto que melhor se adapta às necessidades do projeto já foi objeto de estudo na disciplina de Hidráulica, pré-requisito para o estudo de irrigação.

5.3.4 – Acessórios

Os acessórios utilizados em um sistema de irrigação por aspersão são aqueles inerentes à qualquer instalação hidráulica, ou seja, são necessários registros, válvulas, manômetros, curvas, tês ou cruzeta para derivação, tubo de subida para o aspersor com tripé, tampão final (para o fechamento no final da tubulação), e outros que se fizerem necessários.

5.4 – CLASSIFICAÇÃO DOS SISTEMAS POR ASPERSÃO

A classificação mais geral que é feita para o sistema de irrigação por aspersão é em função da mobilidade dos diferentes elementos que compõem o sistema. Sendo assim, tem-se:

5.4.1 – Sistemas fixos

Neste caso eles podem ser fixos permanentes ou fixos temporários. Nos permanentes, todos os elementos da rede hidráulica são fixos durante a vida útil do sistema;

nos temporários, todo o sistema é instalado no início do plantio e deslocados para outra área quando do final da exploração agrícola no local onde estava.

5.4.2 – Sistemas móveis ou portáteis

Nesta modalidade todos os elementos da instalação são móveis, incluindo o conjunto moto-bomba. Por esta razão, é mais comum o uso de motores de combustão interna, pois a exigência de instalação elétrica em cada ponto de tomada do equipamento é inviável por razões de ordem econômica.

Em áreas agrícolas é muito comum a implantação de sistemas de aspersão com o uso de moto-bombas com motor a diesel, devido a infraestrutura elétrica, na maioria absoluta dos casos, ser monofásica. Até há pouco tempo o motor de maior potência monofásico se restringia à 12,5 CV. Recentemente, a empresa EBERLE lançou no mercado um motor de 50 CV monofásico, o que, por certo, fez com que se aumentasse o uso de motores elétricos para aspersão, pois são mais eficientes, ao invés dos movidos à combustível.

5.4.3 – Sistemas semifixos

Esta modalidade é ainda a mais empregada no Brasil em irrigação por aspersão. Consiste na instalação da moto-bomba e da(s) linha(s) principal (is) fixos e as linhas laterais ou ramais totalmente móveis. À cada irrigação, as linhas laterais, onde estão acoplados os aspersores, são desmontadas e remontadas nas posições seguintes para uma nova irrigação. Tem um custo de instalação menor que o sistema fixo, mas exige maior mão-de-obra.

5.5 – DISPOSIÇÃO DOS ASPERSORES NO CAMPO

- Em quadrado: o espaçamento entre aspersores (EA) é igual ao espaçamento entre linhas laterais (EL);
- Em retângulo: o espaçamento entre aspersores (EA) é menor que o espaçamento entre linhas laterais (EL);
- Em triângulo: o espaçamento entre aspersores (EA) é menor que o espaçamento entre linhas laterais (EL).

5.6 – FATORES QUE AFETAM O DESEMPENHO DE UM ASPERSOR

5.6.1 – Bocais dos aspersores

Dependendo da categoria do aspersor, ele pode se apresentar com 1, 2 ou 3 bocais. Os aspersores agrícolas mais comuns possuem dois bocais, sendo um deles para longo alcance e o outro para se proceder a distribuição da água próximo do aspersor, funcionando como espalhador do jato. Nos aspersores de apenas um bocal, este tem dupla função, ou seja, emite água à longo alcance e a espalha, intermitentemente. Já os de três bocais, um é para longo alcance e dois são espalhadores.

5.6.2 – Pressão de serviço dos aspersores

A pressão de serviço do aspersor exerce grande influência na sua operação, uma vez que a vazão emitida é dependente do diâmetro dos bocais e da pressão de serviço. Quando da seleção do aspersor que melhor se adapta ao projeto em desenvolvimento, por meio do catálogo do fabricante do equipamento, a pressão de serviço vem especificada dentro de limites recomendados. Tanto pressões acima como abaixo do limite recomendado vão provocar uma distribuição irregular de água e, conseqüentemente, baixa uniformidade de aplicação. Isto se deve ao fato de que, pressões muito altas pulverizam o jato d'água em demasia proporcionando maiores perdas por evaporação e deriva e, pressões muito baixas não são suficientes para fracionar o jato de modo a proceder à aspersão de maneira adequada.

5.6.3 – Superposição

Considerando que a aplicação de água por um aspersor se processa de modo circular, se projetarmos os aspersores com espaçamento tal que o alcance de um jato apenas interfaceie o outro, haverá, por conseqüência, área entre os aspersores que não receberão água. Dessa forma, é imprescindível que haja superposição dos jatos d'água para que nenhuma área fique sem água. O espaçamento entre aspersores é definido no catálogo do fabricante e a percentagem de superposição é dependente do tipo de aspersor selecionado; algumas modificações devem ser procedidas em função da intensidade do vento na área a ser trabalhada.

5.6.4 – Ventos

Os ventos influem diretamente na uniformidade de aplicação uma vez que provocam a mudança na direção do jato d'água. Quanto maior a velocidade do vento e menor o diâmetro de gotas maior a interferência e menor a uniformidade de aplicação. A recomendação mais apropriada quanto à interferência se ventos é a seguinte:

Velocidade do vento (m s ⁻¹)	Espaçamento entre aspersores (m)
Sem vento	65 a 70% do Dc do aspersor
0 – 2	55 a 65% do Dc do aspersor
2 – 4	45 a 55% do Dc do aspersor
> 4	30 a 45% do Dc do aspersor

Os principais procedimentos utilizados para melhorar consideravelmente a uniformidade de distribuição na presença de ventos são:

- diminuir o espaçamento entre aspersores;
- usar aspersores de baixa pressão;
- as LL devem se localizar perpendiculares à direção predominante dos ventos; e,
- implantar barreiras quebra-ventos.

5.7 – VAZÃO DOS ASPERORES

$$Qa = Cd \times A \sqrt{2 \times g \times Ps} \quad (V.1)$$

em que:

- Qa = vazão do aspersor, em m³ s⁻¹;
- Cd = coeficiente de descarga (0,96);
- A = área dos bocais, em m²;
- g = aceleração da gravidade (9,81 m s⁻²);
- Ps = pressão de serviço do aspersor, em (mca).

5.8 – INTENSIDADE DE PRECIPITAÇÃO DOS ASPERORES

$$Ip = \frac{Qa}{EA \times EL} \quad (V.2)$$

em que:

I_p = intensidade de precipitação, em $m\ s^{-1}$;

Q_a = vazão do aspersor, em $m^3\ s^{-1}$;

EA = espaçamento entre aspersores, em m; e,

EL = espaçamento entre linhas laterais, em m.

OBS: a unidade usual de I_p , utilizada em catálogos de fabricantes, é $mm\ h^{-1}$.

5.9 – SELEÇÃO DO ASPERSOR

A intensidade de precipitação deverá ser, no máximo, igual a velocidade de infiltração básica do solo.

$$I_p \leq V_{ib}$$

5.10 – DIMENSIONAMENTO DAS TUBULAÇÕES

5.10.1 – Linhas laterais

A Figura V.1 ilustra uma linha lateral derivando-se de uma linha principal.

- **Critério para dimensionamento:** a variação de vazão entre o primeiro e o último aspersor não poderá ser maior que 10%, ou seja:

$$Q_1 = 1,1 Q_n$$

Como conseqüência: $Ps_1 = 1,21 Ps_n$

Vamos verificar essa conseqüência. Considerando a equação para determinação da vazão de bocais (Eq. V.1), vamos ter:

Primeiro aspersor: $Q_1 = C_d \times A \times \sqrt{2g \times Ps_1}$

Último aspersor: $Q_n = C_d \times A \times \sqrt{2g \times Ps_n}$

Dividindo Q_1 por Q_n , teremos:

$$\frac{Q_1 = Cd \times A \times \sqrt{2g \times Ps_1}}{Q_n = Cd \times A \times \sqrt{2g \times Ps_n}}$$

Como $Q_1 = 1,1 Q_n$:

$$\frac{1,1 Q_n = Cd \times A \times \sqrt{2g \times Ps_1}}{Q_n = Cd \times A \times \sqrt{2g \times Ps_n}}$$

$$1,1 = \frac{\sqrt{Ps_1}}{\sqrt{Ps_n}} \qquad 1,21 = \frac{Ps_1}{Ps_n} \qquad Ps_1 = 1,21 Ps_n$$

Com essa conclusão, pode-se então concluir que para um limite de variação de vazão de 10% entre o primeiro e o último aspersor de uma linha lateral de aspersão, a pressão de serviço tem um limite de variação equivalente a 21% da pressão de serviço do aspersor.

- Critério geral para dimensionamento

Em termos práticos, considera-se que *a variação de pressão ao longo de uma LL não poderá exceder a 20% da pressão de serviço do aspersor somada a diferença de nível entre os extremos da linha.*

- Equação para dimensionamento: a equação utilizada é a de Hazen-Williams.

$$hf = 10,646 \times \frac{\left(\frac{Q}{C}\right)^{1,852}}{D^{4,87}} \times L \qquad (V.3)$$

Resumindo:

Linha lateral em nível:	limite de $hf = 0,20 \times Ps$
Linha lateral em aclave (subindo):	limite de $hf = 0,20 \times Ps - \Delta Z$
Linha lateral em declive (descendo):	limite de $hf = 0,20 \times Ps + \Delta Z$

Onde ΔZ é o desnível topográfico.

IMPORTANTE: para o dimensionamento de uma rede hidráulica, o parâmetro principal é o diâmetro da tubulação. Como o objetivo das equações é a determinação do diâmetro interno, é necessário verificar se existe comercialmente esse diâmetro, por meio de consulta aos catálogos dos diferentes fabricantes; nem sempre o diâmetro nominal, que é utilizado na comercialização do produto, coincide com a real dimensão do diâmetro interno da tubulação.

5.10.1.1 – Considerações sobre perda de carga (hf) nas linhas laterais

Ao longo da LL a vazão é variável, uma vez que vai diminuindo em função da presença dos aspersores. De acordo com a equação de Hazen-Williams, se a vazão diminui a perda de carga também se reduz, uma vez que essas variáveis são diretamente proporcionais. Dessa forma, a perda de carga na tubulação é menor comparada com a condição de vazão constante ao longo dela. Para se determinar a perda de carga real ao longo da linha lateral, há necessidade de calculá-la em cada trecho entre dois aspersores e depois totalizá-la. Este assunto já foi estudado na disciplina de Hidráulica. Como este método é por demais trabalhoso, uma vez que se tivermos 20 aspersores ao longo de uma linha lateral, haverá necessidade de se determinar a perda de carga em 20 trechos da tubulação, aplicando a equação de Hazen-Williams para cada um dos trechos. No intuito de tornar esse cálculo mais simplificado, Christiansen, em 1942, elaborou uma metodologia que permite determinar a percentagem de redução da perda de carga entre os dois extremos de uma tubulação, devido a redução de vazão. Dessa forma, calcula-se a perda de carga considerando que a vazão que entra é a mesma que chega ao final da tubulação, ou seja, desconsiderando-se a redução de vazão, e a multiplica pelo fator de Christiansen, determinado de acordo com as condições apresentadas a seguir.

5.12.1.2 – Determinação do fator de Christiansen

1. Para o caso em que o primeiro aspersor se situar à uma distância da linha principal igual ao espaçamento entre eles, ao longo da linha lateral.

$$F = \frac{1}{m+1} + \frac{1}{2 \times N} + \frac{\sqrt{m-1}}{6 \times N^2} \quad (V.4)$$

em que:

F = fator de Christiansen;

m = expoente da vazão na eq. de Hazen-Williams (1,852); e,

N = número de aspersores na LL.

2. Para o caso em que o primeiro aspersor se situar à uma distância da linha principal com um espaçamento diferente do espaçamento entre eles, ao longo da linha lateral.

$$F_r = \frac{R + N \times F - 1}{R + N - 1} \quad (\text{V.5})$$

$$R = \frac{EA_0}{EA} \quad (\text{V.6})$$

em que:

F_r = fator de Christiansen ajustado;

EA_0 = distância da linha principal ao primeiro aspersor.

Baseado no fator de Christiansen, a equação geral de Hazen-Williams para dimensionamento de linhas laterais do sistema de irrigação por aspersão será:

$$hf = 10,646 \times \frac{\left(\frac{Q}{C}\right)^{1,852}}{D^{4,87}} \times L \times F \quad (\text{V.7})$$

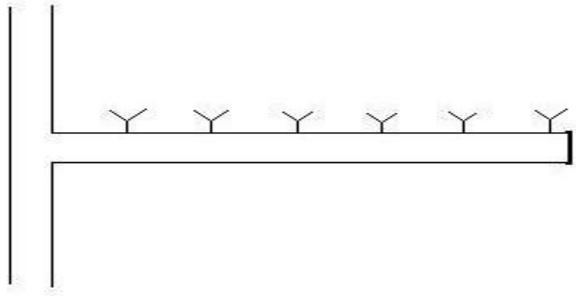
ou

$$hf = 10,646 \times \frac{\left(\frac{Q}{C}\right)^{1,852}}{D^{4,87}} \times L \times F_r \quad (\text{V.8})$$

Exemplo de aplicação V.1

Calcular a perda de carga na LL representada abaixo, sabendo-se que:

- $Q_a = 2,71 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$
- $EA = 12 \text{ m}$
- $D = 3''$



a) Resolução pelo cálculo da **hf** por trecho

Trecho	Qa (m ³ h ⁻¹)	L (m)	hf (mca)
0 - 1	16,26	12	0,1711
1 - 2	13,55	12	0,1221
2 - 3	10,84	12	0,0808
3 - 4	8,13	12	0,0474
4 - 5	5,42	12	0,0224
5 - 6	2,71	12	0,0062
Total			0,4500

b) Resolução aplicando o fator F

Como a LL possui 6 aspersores, tem-se:

$$F = \frac{1}{m+1} + \frac{1}{2 \times N} + \frac{\sqrt{m-1}}{6 \times N^2} = \frac{1}{1,852+1} + \frac{1}{2 \times 6} + \frac{\sqrt{1,852-1}}{6 \times (6)^2} = 0,438$$

$$hf = 10,646 \times \frac{\left(\frac{Q}{C}\right)^{1,852}}{D^{4,87}} \times L \times F = 10,646 \times \frac{\left(\frac{16,26/3600}{140}\right)^{1,852}}{(0,0762)^{4,87}} \times 72 \times 0,438 = 0,45 \text{ mca}$$

Com isto, podemos verificar que os valores da perda de carga real na linha lateral foram os mesmos. Daqui a diante, só será utilizada a metodologia de Christiansen para determinação de perda de carga em linhas laterais.

No intuito de facilitar a utilização do fator de Christiansen, a Tabela V.1 apresenta os valores respectivos de **F** em função do número de aspersores, para utilização na equação de Hazen-Williams.

Tabela V.1 – Valores do coeficiente de Christiansen (F)

N	F	N	F	N	F	N	F	N	F
1	1,000	11	0,397	21	0,375	31	0,367	41	0,363
2	0,639	12	0,393	22	0,374	32	0,366	42	0,363
3	0,534	13	0,390	23	0,373	33	0,366	43	0,362
4	0,485	14	0,387	24	0,372	34	0,365	44	0,362
5	0,457	15	0,385	25	0,371	35	0,365	45	0,362
6	0,438	16	0,382	26	0,370	36	0,365	46	0,362
7	0,425	17	0,381	27	0,369	37	0,364	47	0,361
8	0,416	18	0,379	28	0,369	38	0,364	48	0,361
9	0,408	19	0,377	29	0,368	39	0,364	49	0,361
10	0,402	20	0,376	30	0,367	40	0,363	50	0,361

Exemplo de aplicação V.2

Calcular o diâmetro recomendado para uma LL de aspersores, de acordo com os seguintes dados:

- $Q_a = 4,42 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$
- $EA = 18 \text{ m}$
- $Ps = 30 \text{ mca}$
- $N = 12$

Como a LL possui 12 aspersores com EA de 18 m, tem-se:

- $L = 216 \text{ m}$
- $F = 0,393$

Limite de perda de carga na LL = $20\% \times 30 \text{ mca} = 6 \text{ mca}$

Aplicando a eq. de H.W. para D, tem-se: $D = 0,086 \text{ m}$

Este diâmetro não é comercial e se encontra entre os diâmetros comerciais de 3" e 4".

Para $D = 3''$ $hf = 10,82 \text{ mca}$

Para $D = 4''$ $hf = 2,67 \text{ mca}$

Conclusão:

Se apenas 1 diâmetro for utilizado na LL, obrigatoriamente terá que ser aquele cuja **hf** não exceda ao limite permissível. No presente caso, é o diâmetro de 4". Verifica-se, assim, que o limite de **hf** (6 mca) se encontra entre as hf's dos diâmetros de 3 e 4". Como medida econômica, essa LL deverá ter 2 diâmetros, parte em 4" (inicial) e a outra parte em 3" (final).

5.10.1.3 – Procedimento para dimensionamento de LL com dois diâmetros

Esse procedimento é recomendado quando o diâmetro calculado se encontra entre as dimensões de dois diâmetros comerciais e a metodologia utilizada será por meio do **método da vazão fictícia**, cujo procedimento para a sua aplicação é apresentado a seguir.

a - Determinação dos comprimentos e seus respectivos diâmetros: utiliza-se a equação V.9 para se determinar o comprimento L_2 .

$$L_2 = \frac{\left[\left(\frac{D_1}{D} \right)^n - 1 \right]^{\frac{1}{m+1}}}{\left[\left(\frac{D_1}{D_2} \right)^n - 1 \right]} \times L \quad (\text{V.9})$$

em que:

D = diâmetro encontrado pela equação V.7 ou V.8, utilizando-se o limite de hf ;

D_1 = diâmetro comercial imediatamente superior à D ;

D_2 = diâmetro comercial imediatamente inferior à D ;

L_2 = comprimento do trecho com o menor diâmetro [m];

L = comprimento total da tubulação [m];

n = expoente do diâmetro na equação de Hazen-Williams (4,87); e,

m = expoente da vazão na equação de Hazen-Williams (1,852).

O comprimento L_1 será então determinado por: $L_1 = L - L_2$

b - Determinação das hf 's: de acordo com esse método, a perda de carga na LL com os dois diâmetros, obedecerá a Equação V.10.

$$hf_{LL} = hf_1 + hf_2 - hf_3 \quad (\text{V.10})$$

em que:

hf_1 = perda de carga utilizando D_1 , L , Q_{total} ;

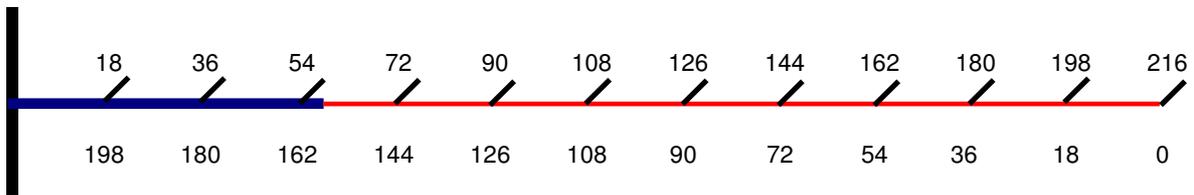
hf_2 = perda de carga utilizando D_2 , L_2 , Q_2 ;

hf_3 = perda de carga utilizando D_1 , L_2 , Q_2 .

Exemplo de aplicação V.3

Retomar ao exemplo de aplicação V.2 e redimensionar a LL utilizando dois diâmetros.

O esquema da linha lateral com os aspersores é o seguinte:



a) Determinação de L_2

$$L_2 = \left[\frac{\left(\frac{0,1016}{0,086} \right)^{4,87} - 1}{\left(\frac{0,1016}{0,0762} \right)^{4,87} - 1} \right]^{\frac{1}{1,852+1}} \times 216 = 157,9 \text{ m}$$

O múltiplo de 6 m mais próximo é $L_2 = 156 \text{ m}$. Podemos verificar que este ponto encontra-se entre o terceiro e o quarto aspersores. Assim sendo, L_1 será igual a 60 m.

b) Perda de carga na linha lateral

- Determinação de hf_1

para: $N = 12$; $Q_{LL} = 53,04 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$; $L = 216 \text{ m}$; $D = 4''$; $C = 140$; $F_{12} = 0,393$:

$$hf_1 = 10,646 \times \frac{\left(\frac{53,04/3600}{140} \right)^{1,852}}{(0,1016)^{4,87}} \times 216 \times 0,393 = 2,66 \text{ mca}$$

- Determinação de hf_2

para: $N = 9$; $Q_{L2} = 39,78 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$; $L_2 = 156 \text{ m}$; $D = 3''$; $C = 140$; $F_9 = 0,408$:

$$hf_2 = 10,646 \times \frac{\left(\frac{39,78/3600}{140} \right)^{1,852}}{(0,0762)^{4,87}} \times 156 \times 0,408 = 4,76 \text{ mca}$$

- Determinação de hf_3

para: $N = 9$; $Q_{L2} = 39,78 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$; $L_2 = 156 \text{ m}$; $D = 4''$; $C = 140$; $F_9 = 0,408$:

$$hf_1 = 10,646 \times \frac{\left(\frac{39,78/3600}{140}\right)^{1,852}}{(0,1016)^{4,87}} \times 156 \times 0,408 = 1,17 \text{ mca}$$

- Determinação de hf_{LL}

$$hf_{LL} = hf_1 + hf_2 - hf_3$$

$$hf_{LL} = 2,66 + 4,76 - 1,18 = 6,25 \text{ mca}$$

Conclusão

Conforme apresentado anteriormente, o limite de perda de carga não deve ultrapassar a 21% da P_s do aspersor – em termos práticos utiliza-se 20%. Podemos verificar no presente caso que a P_s do aspersor utilizado é de 30 mca e, portanto, 21% de P_s equivale a 6,30 mca. Portanto, o valor encontrado para hf_{LL} (6,25 mca), atende ao critério estabelecido.

Exemplo de aplicação V.4

Dimensionar uma linha lateral de um sistema de irrigação por aspersão, de acordo com os seguintes dados:

- largura da área a ser irrigada = 740 m;
- cada lado da linha principal ficará com 370 m com uma diferença de nível entre os extremos de 2 m;
- aspersor:
 - espaçamento: 18 x 24 m;
 - vazão = $2,772 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$
 - pressão de serviço = 50 mca;
 - raio de alcance = 19 m.

Resolução:

a) determinação do número de aspersores da linha lateral: como a área possui 370 m de comprimento e os aspersores têm 18 m de espaçamento entre eles, tem-se:

$$N = \frac{370}{18} = 20,55 \text{ ou seja, } 20 \text{ aspersores}$$

Dessa forma, a linha lateral terá um comprimento real de 360 m.

b) características da linha lateral para dimensionamento:

- $L_{LL} = 360 \text{ m}$;
- $Q_{LL} = 20 \times 2,772 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1} = 55,44 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$;
- limite de $hf = 0,2 \times Ps - \Delta Z = 0,2 \times 50 - 2 = 8 \text{ mca}$;
- $F_{20} = 0,376$

Aplicando a eq. de H.W. para D, tem-se: $D = 0,0907 \text{ m}$

Este diâmetro não é comercial e se encontra entre os diâmetros comerciais de 3" e 4".

c) Determinação de L_2

$$L_2 = \left[\frac{\left(\frac{0,1016}{0,0907} \right)^{4,87} - 1}{\left(\frac{0,1016}{0,0762} \right)^{4,87} - 1} \right]^{\frac{1}{1,852+1}} \times 360 = 218,65 \text{ m}$$

O múltiplo de 6 m mais próximo é $L_2 = 216 \text{ m}$. Podemos verificar que neste ponto encontra-se a tomada de um aspersor e, sendo assim, diminuiremos para 210 m. O comprimento L_1 será igual a 150 m.

d) Perda de carga na linha lateral

- Determinação de hf_1

para: $N = 20$; $Q_{LL} = 55,44 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$; $L = 360 \text{ m}$; $D = 4''$; $C = 140$; $F_{20} = 0,376$:

$$hf_1 = 10,646 \times \frac{\left(\frac{55,44 / 3600}{140}\right)^{1,852}}{(0,1016)^{4,87}} \times 360 \times 0,376 = 4,61 \text{ mca}$$

- Determinação de hf_2

para: $N = 12$; $Q_{L2} = 33,264 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$; $L_2 = 210 \text{ m}$; $D = 3''$; $C = 140$; $F_{12} = 0,393$:

$$hf_2 = 10,646 \times \frac{\left(\frac{33,264 / 3600}{140}\right)^{1,852}}{(0,0762)^{4,87}} \times 210 \times 0,393 = 4,43 \text{ mca}$$

- Determinação de hf_3

para: $N = 12$; $Q_{L2} = 33,264 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$; $L_2 = 210 \text{ m}$; $D = 4''$; $C = 140$; $F_{12} = 0,393$:

$$hf_2 = 10,646 \times \frac{\left(\frac{33,264 / 3600}{140}\right)^{1,852}}{(0,1016)^{4,87}} \times 210 \times 0,393 = 1,09 \text{ mca}$$

- Determinação de hf_{LL}

$$hf_{LL} = hf_1 + hf_2 - hf_3$$

$$hf_{LL} = 4,61 + 4,43 - 1,09 = 7,95 \text{ mca}$$

Conclusão: podemos verificar, no presente caso, que a perda de carga total da linha lateral está atendendo o limite estabelecido que é de 8 mca.

5.10.1.4 – Relação entre a pressão no início da LL (P_{in}), no final (P_{fim}) e pressão média (P_{med})

O critério utilizado impõe que a pressão nos aspersores ao longo da LL deverá ser de tal ordem que, **na média**, seja aproximadamente igual a pressão de serviço recomendada pelo fabricante.

Estudo de um caso

Seja uma LL com as seguintes condições:

- $P_s = 35$ mca; $EA = 24$ m; $Q_a = 5,76$ m³ h⁻¹; $D = 4''$
- Considerar o primeiro aspersor localizado a 12 m da entrada da LL

Cálculo da hf por trecho				Posição	Pin (mca)		
Trecho	Q (m ³ h ⁻¹)	L (m)	hf (mca)		Caso 1	Caso 2	Caso 3
				Entrada	35,00	41,50	39,88
0 – 1	74,88	12	0,71	1 ^o asp	34,29	40,79	39,17
1 – 2	69,12	24	1,23	2 ^o asp	33,06	39,56	37,94
2 – 3	63,36	24	1,05	3 ^o asp	32,01	38,51	36,89
3 – 4	57,60	24	0,88	4 ^o asp	31,13	37,63	36,01
4 – 5	51,84	24	0,72	5 ^o asp	30,41	36,91	35,29
5 – 6	46,08	24	0,58	6 ^o asp	29,83	36,33	34,71
6 – 7	40,32	24	0,45	7 ^o asp	29,38	35,88	34,26
7 – 8	34,56	24	0,34	8 ^o asp	29,04	35,54	33,92
8 – 9	28,80	24	0,24	9 ^o asp	28,80	35,30	33,68
9 – 10	23,04	24	0,16	10 ^o asp	28,64	35,14	33,52
10 – 11	17,28	24	0,09	11 ^o asp	28,55	35,05	33,43
11 – 12	11,52	24	0,04	12 ^o asp	28,51	35,01	33,39
12 – 13	5,76	24	0,01	13 ^o asp	28,50	35,00	33,38
hf Total			6,50	Média	30,51	37,01	35,39

Caso 1: $Pin = P_s$

Caso 2: $Pin = P_s + hf_{LL}$

Caso 3: $Pin = P_s + 0,75 hf_{LL}$

Conclusão

A situação que compatibiliza a média das pressões ao longo da LL com a P_s do aspersor é o caso 3. Assim sendo:

$$Pin = P_s + 0,75 \times hf_{LL} \quad (V.12)$$

Esta condição se aplica à LL em nível com aspersores localizados ao nível da LL. Se as LL estiverem em aclave ou em declive e os aspersores localizados à uma certa altura da LL tem-se:

$$Pin = P_s + 0,75 \times hf_{LL} + Aa \quad (\text{em nível}) \quad (V.12a)$$

$$Pin = P_s + 0,75 \times hf_{LL} + 0,5 \Delta Z + Aa \quad (\text{em aclave}) \quad (V.12b)$$

$$Pin = P_s + 0,75 \times hf_{LL} - 0,5 \Delta Z + Aa \quad (\text{em declive}) \quad (V.12c)$$

Em termos gráficos, a Figura V.2 ilustra as equações anteriores.

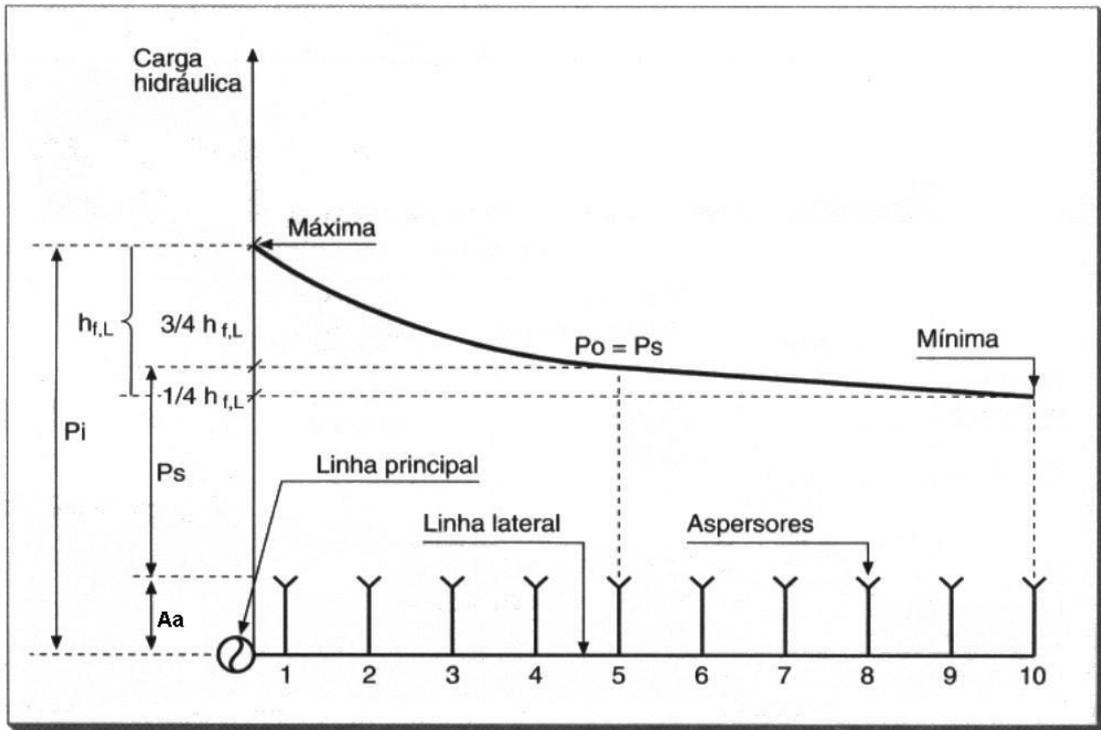


Figura V.2 – Variação da pressão de serviço ao longo de uma linha lateral de um sistema de irrigação por aspersão.

5.10.1.5 – Linhas ou ramais de espera em sistemas de irrigação por aspersão

No dimensionamento de um sistema de irrigação por aspersão, é muito comum optar-se por trabalhar com ramal de espera, ou seja, enquanto um ramal está em operação, um outro ramal já se encontra montado na posição seguinte. Apesar de, a princípio, ocorrer um aumento no custo de implantação do sistema, este procedimento permite maior número de irrigações por dia, porque não há perda de tempo entre uma irrigação e outra; enquanto um ramal está em operação, o que acabou de operar é imediatamente transportado para a posição seguinte. Com isso, o tempo disponível diário para se proceder às irrigações aumenta. Sendo assim, a área irrigada por posição é menor e, como consequência, o equipamento terá menor vazão a ser transportada, permitindo-se menores diâmetros de tubulação. Durante o exemplo prático de dimensionamento, um pouco mais adiante, este assunto será mais discutido. A Figura V.3 ilustra este procedimento.

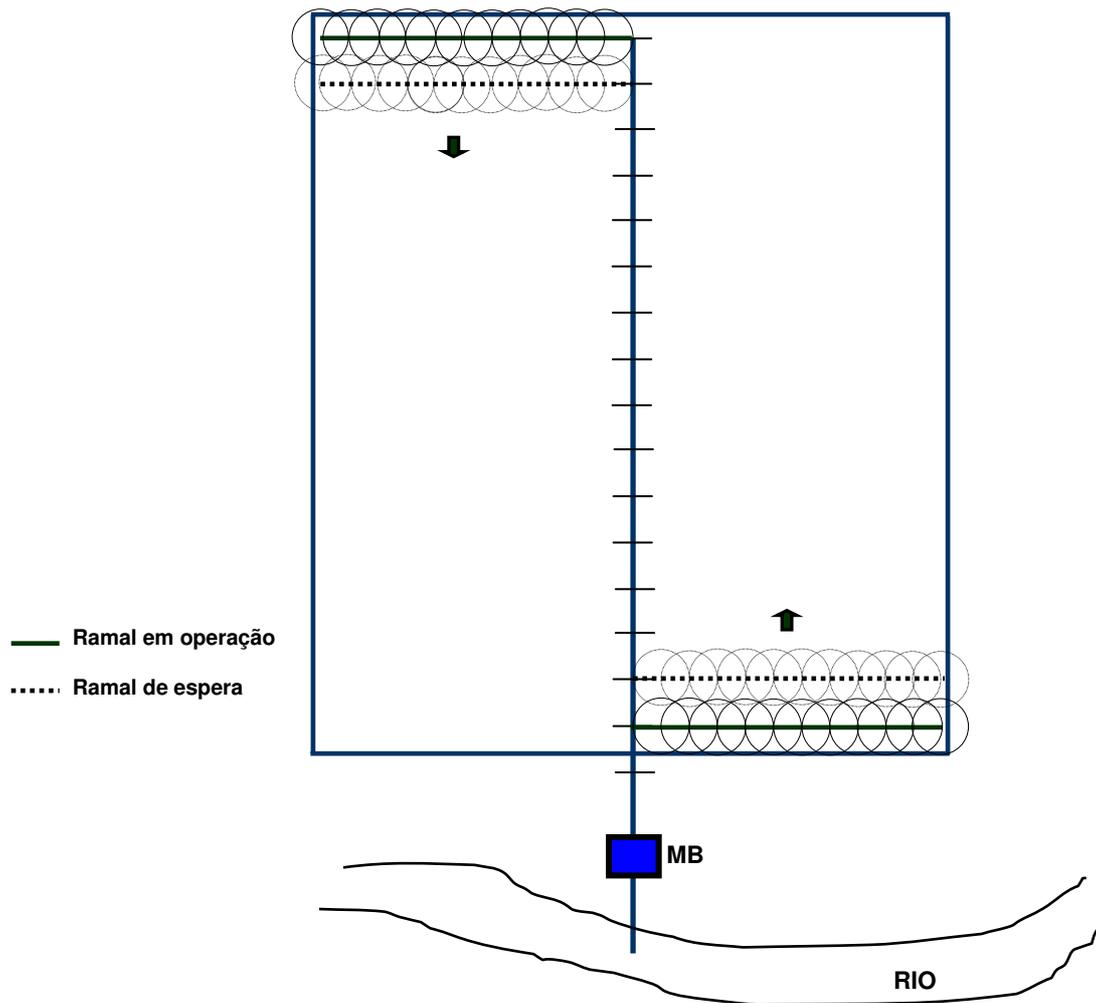


Figura V.3 – Esquema de um sistema de irrigação por aspersão com linha de espera.

Exemplo de aplicação V.5

Um sistema de irrigação por aspersão deverá ser dimensionado para irrigar uma área, cujas dimensões são 380 m de largura por 740 m de comprimento. Serão utilizados aspersores que terão as seguintes características operacionais: $P_s = 30$ mca; $Q_a = 2,76 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$; $R_a = 14$ m; $EA \times EL = 12 \times 18$ m. A lâmina líquida de água máxima a ser retida no solo é de $280 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ com uma demanda evapotranspirométrica de $6,0 \text{ mm d}^{-1}$. Considerando que haverá possibilidade de se trabalhar 10 h por dia com o sistema operando com uma eficiência de aplicação de 75%, calcule o número de ramais necessários ao projeto, dimensione-os e calcule a área que efetivamente será irrigada.

a) Determinação do turno de rega

$$TR = \frac{IRN}{ETP_c} = \frac{28 \text{ mm}}{6,0 \text{ mm dia}^{-1}} = 4,67 \text{ dias}$$

Considerando que a lâmina de 28 mm é a máxima, ou seja, para o f máximo, e como o TR obrigatoriamente tem que ser um número inteiro, utilizaremos uma lâmina de 24 mm para um TR de 4 dias.

b) Determinação da lâmina bruta de irrigação

$$ITN = \frac{IRN}{E_a} = \frac{24 \text{ mm}}{0,75} = 32 \text{ mm}$$

c) Determinação da intensidade de precipitação do aspersor

$$I_p = \frac{Q_a}{EA \times EL} = \frac{2,76 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}}{12 \times 18 \text{ m}} = 12,77 \text{ mm h}^{-1}$$

d) Determinação do tempo de irrigação

$$T_i = \frac{ITN}{I_p} = \frac{32 \text{ mm}}{12,77 \text{ mm h}^{-1}} = 2,5 \text{ h}$$

e) Determinação do número de irrigações por dia

$$N_i = \frac{\text{Número de horas de trabalho disponíveis por dia}}{T_i} = \frac{10}{2,5} = 4$$

OBS: serão utilizados ramais de espera.

f) Determinação da área de projeto hidráulico

Como o turno de rega é de 4 dias e podemos fazer 4 irrigações por dia, a área total do projeto será sub-dividida em 16 subáreas. Assim, teremos:

$$A_{ph} = \frac{\text{Área total}}{\text{Número de subáreas}} = \frac{740 \times 380 \text{ m}}{16} = 17575 \text{ m}^2$$

g) Determinação do número de ramais ou linhas laterais (LL) necessários ao projeto

O melhor posicionamento da linha principal que abastecerá as linhas laterais (maiores detalhes serão discutidos posteriormente) é no meio da área ao longo da maior dimensão do terreno. Dessa forma, as LL terão um comprimento de 190 m ($380 \text{ m} \div 2$) e a área irrigada por cada uma delas será:

$$A_{iLL} = \text{Comprimento da LL} \times \text{Espaçamento entre LL} = 190 \text{ m} \times 18 \text{ m} = 3420 \text{ m}^2$$

O número de LL será então:

$$N_{LL} = \frac{A_{ph}}{A_{iLL}} = \frac{17575 \text{ m}^2}{3420 \text{ m}^2} = 5,14$$

Como não há possibilidade de usarmos LL fracionada, dimensionaremos para trabalhar com 5 LL.

h) Determinação das dimensões efetivas da área do projeto

Como vamos trabalhar com 5 LL, a área de projeto hidráulico ajustada deverá ser:

$$A_{ph} \text{ ajustada} = 5 \times 3420 \text{ m}^2 = 17100 \text{ m}^2$$

A área total será então: $17100 \text{ m}^2 \times 16 \text{ subáreas} = 273600 \text{ m}^2$

Mantendo-se a mesma largura para que não haja alteração no comprimento da LL, o comprimento terá uma pequena redução, ou seja:

$$\text{Comp. da área} = \frac{273600 \text{ m}^2}{380 \text{ m}} = 720 \text{ m}$$

Assim, o projeto será dimensionado para uma área de 720 m por 380 m.

i) Dimensionamento da LL

Considerando que o primeiro aspersor ficará com um espaçamento em relação à linha principal igual ao espaçamento entre eles, verificaremos que a LL terá 15 aspersores e seu comprimento real será de 180 m. Os 10 m que faltam para o final da área serão cobertos pelo último aspersor uma vez que seu raio de alcance é de 14 m. Assim, teremos:

Calcular o diâmetro recomendado para uma LL de aspersores, de acordo com os seguintes dados:

- $L = 180$ m;
- $Q_{LL} = 15 \times 2,76 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1} = 41,4 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$;
- $P_s = 30$ mca
- $F_{15} = 0,385$
- Limite de hf na LL = 20% x 30 mca = 6 mca

Aplicando a equação de H.W, tem-se: $D = 0,075$ m

Este diâmetro está muito próximo do diâmetro de 3" e, dessa forma, não há necessidade de associação. Assim sendo, utilizando-se $D = 3"$, a hf na LL será de 5,58 mca.

5.10.2 – Linha principal

O diâmetro da linha principal é determinado por três critérios:

- Determinação baseada na velocidade média permitida ao longo da linha;
- Determinação baseada na perda de carga preestabelecida entre a primeira e a última linha lateral;
- Determinação baseada em análise econômica.

No presente estudo, somente vamos considerar o dimensionamento baseado no critério de velocidade. Este método se baseia na condição de que a velocidade média nos diferentes trechos da linha principal deve se situar entre 1,0 e 2,5 m s^{-1} . O procedimento de cálculo é o seguinte:

- Com os valores de Q e C, atribui-se um valor a D e calcula-se a perda de carga unitária (J) pela equação de Hazen-Williams, ou seja:

$$J = 10,646 \times \frac{\left(\frac{Q}{C}\right)^{1,852}}{D^{4,87}} \quad (\text{V.13})$$

- Com os valores de C, D e J, calcula-se a velocidade pela mesma equação de Hazen-Williams, só que explicitada para V, ou seja:

$$V = 0,355 \times C \times D^{0,63} \times J^{0,54} \quad (\text{V.14})$$

- Calcula-se para diferentes diâmetros de tal sorte que escolher-se-á aquele em que a velocidade ficar entre os limites citados.

Exemplo de aplicação V.6

Determinar qual deverá ser o diâmetro de uma linha principal de um sistema de irrigação por aspersão, de acordo com os seguintes dados:

- número de linhas laterais = 2;
- vazão da linha lateral = 48,62 m³ h⁻¹;
- comprimento da linha principal = 160 m;
- tubulação: em PVC, C = 140, para D até 4"; acima de 4", aço zincado, C = 120.

a) Vazão do sistema

$$Q_T = 2 \times 48,62 = 97,24 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$$

$$Q_T = 0,0270 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$$

b) Cálculo das velocidades

- Para D = 4"

$$J = 10,646 \times \frac{\left(\frac{0,0270}{140}\right)^{1,852}}{0,1016^{4,87}} = 0,09635 \text{ m m}^{-1}$$

$$V = 0,355 \times 140 \times 0,1016^{0,63} \times 0,09635^{0,54} = 3,33 \text{ m s}^{-1}$$

- Para D = 6" : J = 0,01180 m m⁻¹ e V = 1,48 m s⁻¹

Conclusão: o diâmetro recomendado para a linha principal em questão é o de 6", com uma velocidade média de $1,48 \text{ m s}^{-1}$, o que propicia uma perda de carga nos 160 m da tubulação, de 2,85 mca.

5.11 – Altura manométrica total

$$H_{\text{man}} = (h_s + h_r + hf_s + hf_{LP} + Pin_{LL}) \times 1,05 \quad (\text{V.15})$$

OBS: O fator 1,05 equivale às perdas de cargas localizadas, ou seja, considera-se essas perdas como sendo 5% de todas as outras.

5.12 – Potência do conjunto moto-bomba

$$\text{Pot} = \frac{Q \times H_{\text{man}}}{75 \times R_{\text{MB}}} \quad (\text{V.16})$$

5.13 – Projeto de um sistema de irrigação por aspersão convencional

Dimensione um sistema de irrigação por aspersão convencional em uma área de 16,2 ha (540 m x 300 m) para a implantação de uma cultura de feijão. Para o dimensionamento do projeto, foram levantados os seguintes dados:

1. irrigação real necessária: $300 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$;
2. evapotranspiração máxima da cultura: $5,0 \text{ mm d}^{-1}$;
3. velocidade de infiltração básica da água no solo: $14,0 \text{ mm h}^{-1}$;
4. fonte de água para abastecer o projeto: rio margeando um dos lados da menor dimensão do terreno;
5. topografia da área do projeto:
 - menor dimensão do terreno: em nível;
 - maior dimensão do terreno: desnível de 17 metros entre os dois extremos;
6. distância do início da área do projeto à moto-bomba: 30 m;
7. número de horas de trabalho disponíveis por dia: 10;
8. eficiência de aplicação do sistema: 75%;
9. rendimento do conjunto moto-bomba: 80%.
10. considere o período de irrigação 1 dia a menos que o turno de rega;
11. altura de sucção: 4 m;
12. desnível geométrico entre a moto-bomba e o início da área do projeto: 10 m;
13. altura do aspersor: 1,5 m;
14. dados técnicos do aspersor a ser utilizado:

Bocais (mm)	Pressão de Serviço (mca)	Vazão ($\text{m}^3 \text{ h}^{-1}$)	Diâmetro Irrigado (m)	Intensidade de Precipitação (mm h^{-1})		
				6 x 12 m	12 x 12 m	12 x 18 m
2,4 x 5,0	20	1,58	23	21,9	11,0	7,3
	25	1,79	23	24,9	12,4	8,3
	30	1,95	24	27,1	13,5	9,0
	35	2,12	24	29,4	14,7	9,8
	40	2,28	25	31,7	15,8	10,6
	45	2,40	26	33,3	16,7	11,1
	50	2,56	26	35,6	17,8	11,9
2,4 x 6,2	20	2,22	25	30,8	15,4	10,3
	25	2,50	25	34,7	17,4	11,6
	30	2,75	26	38,2	19,1	12,7
	35	2,98	26	41,4	20,7	13,8
	40	3,18	27	44,2	22,1	14,7
	45	3,37	27	46,8	23,4	15,6
	50	3,52	27	48,4	24,4	16,3

Resolução

1 - Seleção do aspersor

Para uma Vib de 14 mm h^{-1} , o aspersor mais adequado é o que possui as seguintes características:

- bocais = $2,4 \times 6,2 \text{ mm}$;
- pressão de serviço = 35 mca ;
- vazão = $2,98 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$;
- diâmetro irrigado = 26 m ;
- espaçamentos = $12 \times 18 \text{ m}$;
- intensidade de precipitação = $13,8 \text{ mm h}^{-1}$.

2 - Determinação da lâmina bruta de irrigação

$$ITN = \frac{IRN}{Ea} = \frac{30 \text{ mm}}{0,75} = 40 \text{ mm}$$

3 - Determinação do turno de rega

$$TR = \frac{IRN}{ET_{pc}} = \frac{30 \text{ mm}}{5 \text{ mm dia}^{-1}} = 6 \text{ dias}$$

4 - Período de irrigação

$$PI = 6 - 1 = 5 \text{ dias}$$

5 - Determinação do tempo de irrigação

$$Ti = \frac{ITN}{I_p} = \frac{40 \text{ mm}}{13,8 \text{ mm h}^{-1}} = 2,9 \text{ h} = 2 \text{ h } 54 \text{ min} \cong 3 \text{ h}$$

6 - Determinação do número de irrigações por dia

Como só há disponibilidade de 10 horas de trabalho por dia, serão feitas 3 irrigações diárias, optando –se trabalhar com ramais de espera. Pode-se verificar que com essa decisão, teremos 1 hora que não será utilizada. Se quiséssemos ocupar as 10 horas

disponíveis seria necessário diminuir a intensidade de precipitação do aspersor para, com isso, aumentar o tempo de irrigação. Para isso basta selecionar um outro aspersor que propicie a intensidade de precipitação desejada. Uma possível vantagem desse procedimento é que o aspersor com menor I_p também apresenta menor vazão, possibilitando conseguir uma menor diâmetro na linha lateral. Só é possível saber procedendo ao dimensionamento. No presente caso não se optou por esse ajuste porque se concluiu não ser necessário

7 - Determinação do número total de irrigações a cada turno de rega ou o número de subáreas que a área total será dividida

$$N_t = 3 \text{ irrigações por dia} \times 5 \text{ dias} = 15$$

8 - Determinação do número de linhas laterais necessárias ao projeto

8.1 - área irrigada por cada linha lateral

$$A_{iLL} = \text{Comp. da LL} \times \text{EL} = 150 \text{ m} \times 18 \text{ m} = 2700 \text{ m}^2$$

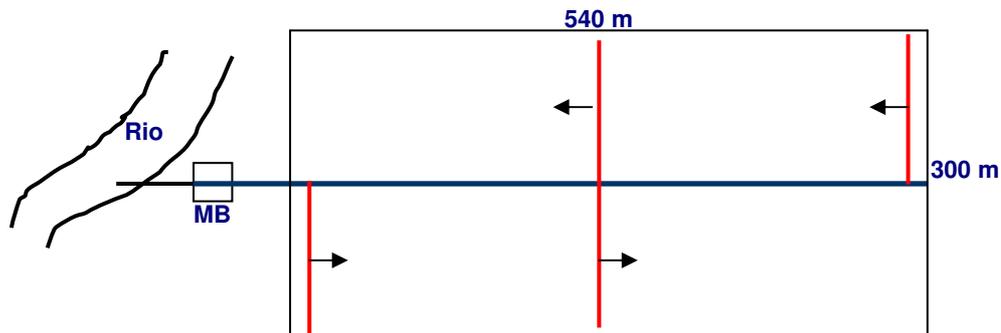
8.2 - área irrigada em cada irrigação (área de projeto hidráulico)

$$A_{ph} = \frac{\text{Área total}}{\text{Número de subáreas}} = \frac{540 \times 300 \text{ m}}{15} = 10800 \text{ m}^2$$

8.3- número de linhas laterais

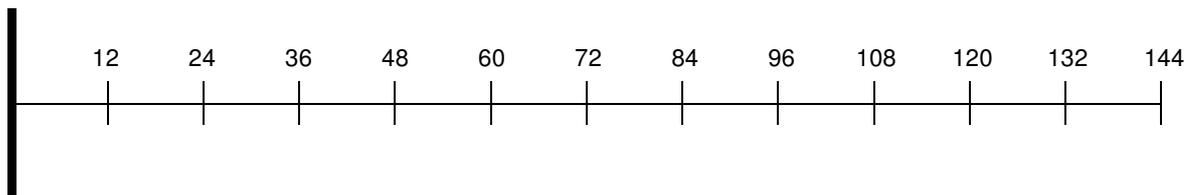
$$N_{LL} = \frac{A_i}{A_{iLL}} = \frac{10800 \text{ m}^2}{2700 \text{ m}^2} = 4 \text{ linhas laterais}$$

Dessa forma, o *lay out* mais adequado para a área é o seguinte:



9 - Dimensionamento das linhas laterais

9.1 - Determinação do comprimento real da linha lateral: como o espaçamento entre os aspersores é de 12 m, com o primeiro situado à 12 m da linha principal, o comprimento da linha será de 144 m, com o seguinte croqui:



Para:

- L = 144 m;
- N = 12;
- $F_{12} = 0,393$;
- $Q_{LL} = 12 \times 2,98 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1} = 35,76 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1} = 0,009933 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$;
- Limite de hf = $0,20 \times 35 \text{ mca} = 7,0 \text{ mca}$;

Aplicando a equação de Hazen-Williams, o diâmetro será de 0,066 m. Assim, o diâmetro calculado encontra-se entre 2" (0,0508 m) e 3" (0,0762 m), o que leva à necessidade de associação de diâmetros na LL.

Para:

- D = 0,066 m;
- $D_1 = 0,0762 \text{ m}$;
- $D_2 = 0,0508 \text{ m}$;
- L = 144 m

$$L_2 = \left[\frac{\left(\frac{0,0762}{0,066} \right)^{4,87} - 1}{\left(\frac{0,0762}{0,0508} \right)^{4,87} - 1} \right]^{\frac{1}{1,852+1}} \times 144 = 76,29 \text{ m}$$

O múltiplo de 6 m (comprimento padrão dos tubos) inferior mais próximo ao L_2 calculado é 72 m. Como nesse ponto da LL encontra-se localizado um aspersor, o comprimento adequado para L_2 é 66 m. Dessa forma:

$$L_1 = L - L_2 = 144 - 66 = 78 \text{ m.}$$

Definidos os dois trechos da linha lateral, as características de cada um deles ficarão:

Trecho 1:

- $D_1 = 3''$;
- $L_1 = 78 \text{ m}$;
- $N = 6$;
- $Q_1 = 6 \times 2,98 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1} = 17,88 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1} = 0,004967 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$;
- $F_6 = 0,438$

Trecho 2:

- $D_2 = 2''$;
- $L_2 = 66 \text{ m}$;
- $N = 6$;
- $Q_2 = 6 \times 2,98 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1} = 17,88 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1} = 0,004967 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$;
- $F_6 = 0,438$

De acordo com o método da vazão fictícia, as perdas de carga na linha lateral serão então:

$$hf_1 (D_1, L, Q_{LL}, F_{12}) = 3,47 \text{ mca}$$

$$hf_2 (D_2, L_2, Q_2, F_6) = 3,54 \text{ mca}$$

$$hf_3 (D_1, L_2, Q_2, F_6) = 0,49 \text{ mca}$$

Finalmente, a perda de carga na linha lateral será:

$$hf_{LL} = hf_1 + hf_2 - hf_3 = 3,47 + 3,54 - 0,40 = 6,52 \text{ mca}$$

Verifica-se que esse valor de hf é inferior ao limite de 20% da pressão de serviço dos aspersores que é de 7 mca, devido a necessidade de se reduzir o trecho L_2 , que é o trecho que proporciona maior perda de carga.

10 - Dimensionamento da linha principal

10.1 – *Lay out* de movimentação das linhas laterais

OBS:

- a) a primeira posição do primeiro ramal situar-se-á a 12 m do início da área;
- b) a primeira posição do terceiro ramal situa-se à 6 m do final da área;
- c) as linhas no formato tracejado representam a posição de cada linha lateral na posição intermediária do turno de rega.

10.2 – Determinação dos diferentes trechos de transporte de vazão ao longo da linha principal

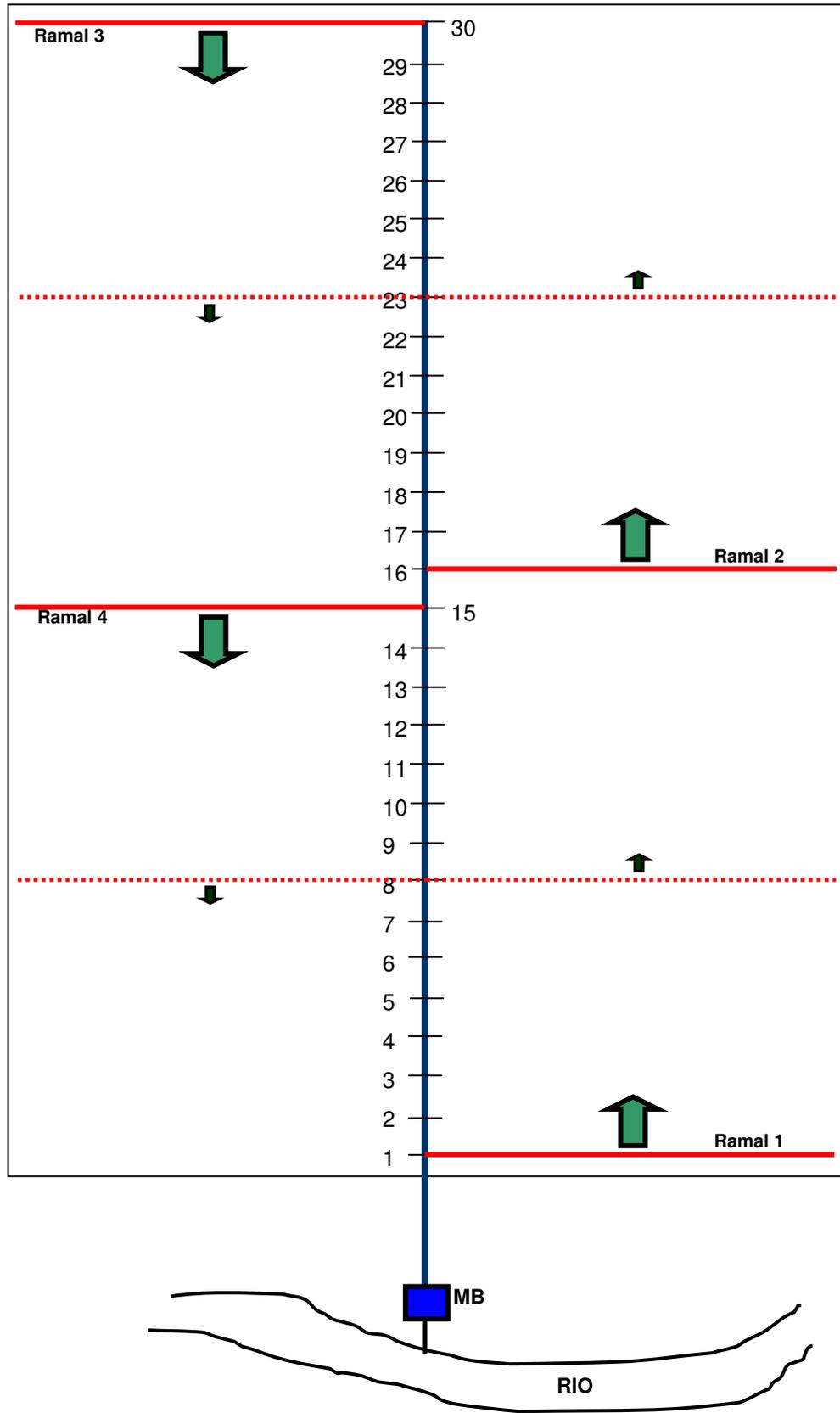
De acordo com a posição dos ramais, tanto no início quanto na posição intermediária do turno de rega, pode-se verificar que a vazão total do sistema não é transportada em toda a extensão linha principal. Dessa forma, há necessidade de se determinar os trechos e suas respectivas vazões para então dimensioná-los.

Quando os ramais estiverem na metade do turno de rega, eles se encontrarão nas posições mostradas no *lay out* no formato tracejado (esquema a seguir). Assim, vê-se que a vazão total para abastecer os 4 ramais, terá que ser transportada da moto-bomba até a tomada 8; definiu-se aí o trecho 1. A partir daí até a tomada 15, a exigência máxima será equivalente à vazão de 3 ramais; definiu-se aí o trecho 2. Da tomada 15 até a 23, escoará, no máximo, a vazão de 2 ramais, definindo-se o trecho 3. Finalmente, pode-se perceber sem nenhuma dificuldade, que da tomada 23 até a 30, somente será necessário o transporte de vazão para abastecer 1 ramal, sendo então o trecho 4.

Após definição dos diferentes trechos, procede-se o dimensionamento hidráulico da linha principal.

De acordo com os dados do projeto e conforme apresentado no *lay out* da área, os trechos terão as seguintes características:

Trecho 1: MB – tomada 8 (4 Q_{LL})	L = 168 m
Trecho 2: tomada 8 – tomada 15 (3 Q_{LL})	L = 126 m
Trecho 3: tomada 15 – tomada 23 (2 Q_{LL})	L = 144 m
Trecho 4: tomada 23 – tomada 30 (1 Q_{LL})	L = 126 m



10.3 – Determinação dos diâmetros da tubulação em cada trecho

O dimensionamento será baseado no critério de velocidade, ou seja, permite-se uma velocidade de escoamento na tubulação entre 1,0 e 2,5 m s⁻¹.

Por questões de ordem prática, vamos começar o dimensionamento pelo último trecho da linha principal (trecho 4), ou seja, o que abastece somente uma linha lateral.

- **Trecho 4:** verificar-se-á, inicialmente, se o diâmetro da LP pode ser o mesmo da LL (3”).

$$Q = 1 \times 35,76 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1} = 0,009933 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$$

$$L = 126 \text{ m}$$

Teste para D = 3” (0,0762 m) utilizando-se tubo de PVC (C = 140)

Aplicando a equação de Hazen-Williams: J = 0,061346 m

$$\text{Para: } C = 140; J = 0,06138 \text{ m e } D = 0,0762 \text{ m} \quad V = 2,17 \text{ m s}^{-1} \quad hf = 7,73 \text{ mca}$$

Esta velocidade atende ao critério estabelecido e, sendo assim, o diâmetro do último trecho da LP é o mesmo da LL.

- **Trecho 3:** será testado o diâmetro comercial imediatamente superior (4”)

$$Q = 2 \times 35,76 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1} = 0,019867 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$$

$$L = 144 \text{ m}$$

Teste para D = 4” (0,1016 m) utilizando-se tubo de PVC (C = 140)

Aplicando a equação de Hazen-Williams: J = 0,05459 m

$$\text{Para: } C = 140; J = 0,05459 \text{ m e } D = 0,1016 \text{ m} \quad V = 2,45 \text{ m s}^{-1} \quad hf = 6,87 \text{ mca}$$

Esta velocidade atende ao critério estabelecido.

- **Trecho 2:**

$$Q = 3 \times 35,76 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1} = 0,0298 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$$

$$L = 126 \text{ m}$$

Teste para D = 5” (0,127 m) utilizando-se tubo de aço zincado (C = 120)

Aplicando a equação de Hazen-Williams: J = 0,05191 m

$$\text{Para: } C = 120; J = 0,05191 \text{ m e } D = 0,127 \text{ m} \quad V = 2,35 \text{ m s}^{-1} \quad hf = 6,54 \text{ mca}$$

Esta velocidade atende ao critério estabelecido.

- Trecho 1:

$$Q = 4 \times 35,76 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1} = 0,039733 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$$

$$L = 168 \text{ m}$$

Teste para $D = 6''$ (0,1524 m) utilizando-se tubo de aço zincado ($C = 120$)

Aplicando a equação de Hazen-Williams: $J = 0,03639 \text{ m}$

$$\text{Para: } C = 120; J = 0,03639 \text{ m e } D = 0,1524 \text{ m} \quad V = 2,18 \text{ m s}^{-1} \quad hf = 6,11 \text{ mca}$$

Esta velocidade atende ao critério estabelecido.

A perda de carga total na linha principal será igual a 27,25 mca. Apesar de se ter atendido o critério de velocidade, pode-se optar pela redução desta perda visando, com isso, uma diminuição da altura manométrica total, o que pode resultar em uma moto-bomba com menor potência. Com esse intuito, a linha principal será redimensionada, aumentando-se os diâmetros dos trechos 3 e 4. Assim sendo, teremos:

Trecho 3:

$$Q = 2 \times 35,76 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1} = 0,019867 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$$

$$L = 144 \text{ m}$$

Teste para $D = 5''$ (0,127 m) utilizando-se tubo de aço zincado ($C = 120$)

Aplicando a equação de Hazen-Williams: $J = 0,0245 \text{ m}$

$$\text{Para: } C = 120; J = 0,0245 \text{ m e } D = 0,127 \text{ m} \quad V = 1,57 \text{ m s}^{-1} \quad hf = 3,53 \text{ mca}$$

Esta velocidade atende ao critério estabelecido.

Trecho 4:

$$Q = 1 \times 35,76 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1} = 0,009933 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$$

$$L = 126 \text{ m}$$

Teste para $D = 4''$ (0,1016 m) utilizando-se tubo de PVC ($C = 140$)

Aplicando a equação de Hazen-Williams: $J = 0,02012 \text{ m}$

$$\text{Para: } C = 120; J = 0,01512 \text{ m e } D = 0,1016 \text{ m} \quad V = 1,22 \text{ m s}^{-1} \quad hf = 1,90 \text{ mca}$$

Esta velocidade atende ao critério estabelecido.

Para essa nova situação, a perda de carga total na linha principal será igual a 18,08 mca. Verifica-se que essa nova situação faz com que a perda de carga total do sistema se reduza necessitando-se, com isso, de uma menor potência do conjunto moto-bomba, quando se compara com a situação anterior. Em contrapartida, ao se aumentar os diâmetros nos trechos 3 e 4 o custo das tubulações aumentou. Para se decidir entre as duas

possibilidades, há necessidade de se proceder à uma análise de custo-benefício. Para dar continuidade ao dimensionamento, vamos considerar a segunda situação que proporcionou uma perda de carga na LP de 18,08 mca.

11 – Dimensionamento da linha de sucção

Como a tubulação de recalque terá um diâmetro de 6”, a sucção deverá trabalhar com o diâmetro comercial imediatamente superior. Será utilizado uma tubulação de aço zincado de 8”, com um comprimento de 6 m. Nessa condições, a perda de carga total será de 0,0538 m com um escoamento à uma velocidade de 1,22 m s⁻¹.

12 – Determinação da pressão no início da linha lateral

$$Pin_{LL} = Ps + \frac{3}{4} hf_{LL} + Aa \pm \frac{1}{2} \Delta Z$$
$$Pin_{LL} = 35 + \frac{3}{4} \times 6,52 + 1,5 \pm \frac{1}{2} \times 0 = 41,39 \text{ mca}$$

13 – Determinação da altura manométrica total

$$Hman = (H_s + H_r + hf_s + hf_{LP} + Pin_{LL}) \times 1,05$$
$$Hman = [4 + (10 + 17) + 0,0538 + 18,08 + 41,39] \times 1,05 = 95,05 \text{ mca}$$

14 – Determinação da potência do conjunto moto-bomba

$$Pot = \frac{Q \times Hman}{75 \times Rmb} = \frac{39,73 \times 95,05}{75 \times 0,80} = 63 \text{ CV}$$

OBS: se tivéssemos optado por usar a situação em que a perda de carga na LP fosse de 27,25 mca, a altura manométrica total seria 104,68 mca e a potência da moto-bomba seria de 69,3 CV.

5.14 – Desempenho de um sistema de irrigação por aspersão convencional

A análise do desempenho de um sistema de irrigação por aspersão pode ser feita por meio da determinação do coeficiente de uniformidade, que reflete numericamente a qualidade da aplicação de água pelo sistema, ou seja, determina a uniformidade de distribuição da água.

Para se determinar o coeficiente de uniformidade, procede-se aos seguintes passos:

- escolhe-se um aspersor e divide-se a área em sua volta em subáreas quadradas de iguais dimensões, normalmente utilizando-se o espaçamento 3 x 3 m;
- no centro de cada subárea são instalados coletores que interceptarão a água emitida pelo aspersor. Desta forma, o volume ou lâmina de água interceptada por cada coletor representa a precipitação recebida na subárea a qual se encontra;
- após o encerramento do teste, registram-se todos os volumes interceptados pelos coletores conforme apresentado na Figura V.3, considerando a superposição entre os jatos de água emitidos pelos quatro aspersores mais próximos;
- partindo-se do espaçamento recomendado pelo fabricante do aspersor, delimita-se quatro áreas de influência simulando a operação de quatro aspersores aplicando água em cada subárea onde se encontram os coletores (Figura V.4).

A determinação numérica do coeficiente de uniformidade pode ser feita por meio de várias equações, sendo mais conhecidas as que serão apresentadas a seguir.

1) Coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC): determinado pela Equação V.17.

$$CUC = 100 \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^n |X_i - \bar{X}|}{n \bar{X}} \right) \quad (V.17)$$

em que:

X_i = precipitação observada em cada coletor;

\bar{X} = média das precipitações; e

n = número de observações.

2) Coeficiente de uniformidade de distribuição (CUD): determinado pela Equação V.18.

$$CUD = 100 \frac{\bar{x}}{\bar{X}} \quad (V.18)$$

em que:

\bar{x} = média de 25% do total de coletores com as menores precipitações; e

\bar{X} = média das precipitações, considerando todas elas.

3) Coeficiente de uniformidade estatístico (CUE): determinado pela Equação V.19.

$$CUE = 100 \left[1 - \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^2}{(n-1) (\bar{X})^2}} \right] \quad (V.19)$$

Relação entre os coeficientes

$$CUD = 1,59 CUC - 59$$

$$CUE = 1,25 CUC - 25$$

Exemplo de aplicação V.5

Considerando os dados apresentados nas Figuras V.3 e V.4, que representam o resultado de um teste de uniformidade, determinar os coeficientes para o caso em análise.

O levantamento dos dados constantes das Figuras V.4 e V.5, foi feito de acordo com as seguintes condições:

- espaçamento entre coletores = 3m;
- tempo de teste = 2 horas;
- volume coletado em cm³.

0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	14	21	26	21	27	14	4	0	0	0
0	0	0	21	29	27	33	21	27	27	17	5	0	0
0	0	15	29	33	49	61	33	49	30	26	15	0	0
0	1	28	30	48	60	75	74	57	45	27	23	4	0
0	4	30	31	55	71	66	68	64	48	31	24	7	0
0	6	31	30	54	62	65	63	60	49	31	24	11	0
0	2	27	28	47	55	62	63	57	44	24	30	8	0
0	0	21	28	32	46	52	53	44	32	26	26	0	0
0	0	5	23	26	28	32	33	28	26	26	7	0	0
0	0	0	8	22	21	26	26	28	23	6	0	0	0
0	0	0	0	3	8	16	15	12	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

■ Aspersor

Figura V.3 - Valores obtidos em teste de precipitação de um aspersor.

69	91	79	85	86	76
86	111	86	89	106	96
74	92	108	104	104	85
66	97	108	111	99	93
101	113	106	103	104	105
87	106	79	89	103	89

Figura V.4 – Resultado da superposição para espaçamento de 18 x 18 m.

- Coeficiente de uniformidade de Christiansen:

$$\bar{X} = \frac{\sum X_i}{n} = \frac{3386}{36} = 94,1 \text{ cm}^3$$

$$\sum (X_i - \bar{X}) = 384 \text{ cm}^3$$

$$\text{CUC} = 100 \left(1 - \frac{384}{36 \times 94,1} \right) = 88,67\%$$

- Coeficiente de uniformidade de distribuição (CUD)

$$\text{CUD} = 1,59 \text{ CUC} - 59 = 1,59 \times 88,67 - 59 = 82\%$$

- Coeficiente de uniformidade estatístico (CUE):

$$\text{CUE} = 1,25 \text{ CUC} - 25 = 1,25 \times 88,67 - 25 = 85,8\%$$

CAPÍTULO VI

IRRIGAÇÃO LOCALIZADA

6.1 – INTRODUÇÃO

- Forma de aplicação da água (Figura VI.1)
- Adaptabilidade do sistema
 - a – Solos
 - b – Topografia
 - c – Clima
 - d – Culturas



Figura VI.1 – Sistema de irrigação por gotejamento em operação.

6.2 – VANTAGENS DO SISTEMA

- Maior eficiência no uso da água;
- Maior produtividade: como a irrigação é diária, há maior uniformidade da umidade do solo e, com isso, maior desenvolvimento da cultura;
- Maior eficiência de adubação;
- Maior eficiência de controle fitossanitário;
- Não interfere nos tratos culturais;
- Pode ser adotado para qualquer tipo de solo e qualquer topografia;
- Pode ser usado com água salina ou em solos salinos; e,
- Maior economia de mão-de-obra.

6.3 – LIMITAÇÕES DO SISTEMA

- Entupimento dos emissores;
- Distribuição do sistema radicular da planta é mais concentrado.

6.4 – COMPONENTES DO SISTEMA (ver Figura VI.2)

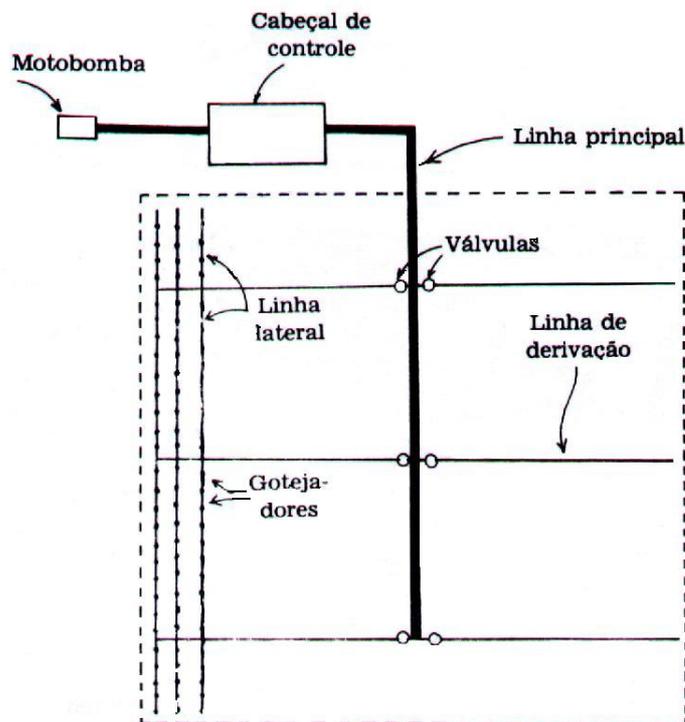


Figura VI.2 – Esquema de instalação de um sistema de irrigação localizada.

6.5 – DESCRIÇÃO DOS COMPONENTES DO SISTEMA

6.5.1 – Moto-bomba

Centrífuga de eixo horizontal ou do tipo turbina, acionada por motores elétricos ou de combustão.

6.5.2 – Cabeçal de controle

Juntamente com os emissores, o cabeçal de controle é um dos mais importantes componentes do sistema. Fica localizado após a moto-bomba, no início da linha principal e é constituído pelos seguintes equipamentos:

- medidor de vazão;
- filtros (areia e tela);
- injetor de fertilizantes;
- válvulas de controle de pressão;
- registros e manômetros.

6.5.3 – Linha principal (LP)

É constituída por tubos em polietileno ou em PVC. Pode ser superficial ou enterrada.

6.5.4 – Linha de derivação (LD)

Transporta a água da LP até as linhas laterais. São sempre em polietileno ou em PVC. Normalmente são instaladas válvulas para controle de pressão no início das LD para controle de vazão do sistema.

6.5.5 – Linha lateral (LL)

São sempre instaladas em nível e constituídas por tubos em polietileno, com o diâmetro variando de 12 a 32 mm. O espaçamento entre as LL é dependente do espaçamento entre as fileiras de plantio.

6.5.6 – Emissores

Os emissores podem ser gotejadores ou microaspersores.

6.6 – DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA - GOTEJAMENTO

6.6.1 – Quantidade de água necessária

É dependente do turno de rega a ser estabelecido (varia de 1 a 4 dias).

6.6.2 – Evapotranspiração

É expressa em termos de lâmina d'água evapotranspirada e depende da percentagem de área molhada efetivamente pelo emissor. Sua determinação é feita por meio da Equação VI.1.

$$ETg = ETpc \times \frac{P}{100} \quad (VI.1)$$

em que:

ETg = evapotranspiração média na área [mm d⁻¹];

ETpc = evapotranspiração potencial da cultura [mm d⁻¹];

P = percentagem de área molhada em relação a área total, obtido pelas Equações VI. 2 e VI.3.

➤ Irrigação em faixa contínua

$$P = \frac{P_1 \times S_1 + P_2 \times S_2}{Sf} \quad (VI.2)$$

em que:

S1 = maior espaçamento dentro dos pares de linhas laterais que dará P = 100, em função da vazão do gotejador e do tipo de solo, em m;

P1 = 100;

Sf = espaçamento entre fileiras de plantio, em m;

S2 = Sf - S1; e,

P2 = tabelado em função de S2.

OBS: A **Tabela VI.1** apresenta todos os parâmetros para a aplicação da Equação VI.2.

Exemplo de aplicação VI.1

Determinar o valor de P para um sistema de irrigação por gotejamento onde cada fileira de plantio deverá ser abastecida por duas linhas laterais. Os gotejadores utilizados aplicam uma vazão de 4 L h^{-1} e as linhas de plantio estão espaçadas de 5 m.

Utilizando a Tabela VI.1, vamos ter:

$$S_1 = 1,2 \text{ m (maior valor para } P = 100)$$

$$S_2 = 5 - 1,2 = 3,8 \text{ m}$$

$$P_2 = 32\% \text{ (para } S_2 = 3,8 \text{ m)}$$

Aplicando a equação 2, tem-se:

$$P = \frac{100 \times 1,2 + 32 \times 3,8}{5} = 48,3\%$$

► Irrigação por árvore

$$P = 100 \frac{n \times S_g \times S_m}{S_f \times S_c} \quad (\text{VI.3})$$

em que

n = número de gotejadores por árvore;

S_g = espaçamento entre gotejadores, em m;

S_m = largura da faixa molhada que é o maior valor de S_1 para $P = 100$ em função da vazão e tipo de solo;

S_c = espaçamento entre plantas, em m.

Tabela VI.1 - Valores da percentagem de área molhada (P) para irrigação localizada

Espaçamento das linhas laterais em metros (S1)	Vazão por gotejador ou por saída (L h ⁻¹)														
	1,5			2,0			4,0			8,0			12,0		
	Espaçamento recomendado entre gotejadores ao longo da linha lateral (Sg) para solos de textura grossa (G), média (M) e fina (F), em metros.														
	G	M	F	G	M	F	G	M	F	G	M	F	G	M	F
	0,2	0,5	0,9	0,3	0,7	1,0	0,6	1,0	1,3	1,0	1,3	1,7	1,3	1,6	2,0
0,8	38	88	100	50	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
1,0	33	70	100	40	80	100	80	100	100	100	100	100	100	100	100
1,2	25	58	92	33	67	100	67	100	100	100	100	100	100	100	100
1,5	20	47	73	26	53	80	53	80	100	80	100	100	100	100	100
2,0	15	35	55	20	40	60	40	60	80	60	80	100	80	100	100
2,5	12	28	44	16	32	48	32	48	64	48	64	80	64	80	100
3,0	10	23	37	13	26	40	26	40	53	40	53	67	53	67	80
3,5	9	20	31	11	23	34	23	34	46	34	46	57	46	57	68
4,0	8	18	28	10	20	30	20	30	40	30	40	50	40	50	60
4,5	7	16	24	9	18	26	18	26	36	26	36	44	36	44	53
5,0	6	14	22	8	16	24	16	24	32	24	32	40	32	40	48
6,0	5	12	18	7	14	20	14	20	27	20	27	34	27	34	40

6.6.3 – Irrigação real necessária (IRN)

$$IRN = ET_g \times TR \quad (VI.4)$$

6.6.4 – Irrigação total necessária (ITN): determinada pela Equação III.5.

6.6.5 – Tempo de irrigação por posição (T_i)

➤ Irrigação em faixa contínua

$$T_i = \frac{ITN \times S_g \times S_1}{Q_g} \quad (VI.5)$$

➤ Irrigação por árvore

$$T_i = \frac{ITN \times A_1}{n \times Q_g} \quad (VI.6)$$

em que:

- Q_g = vazão do gotejador, em $L h^{-1}$;
- S_g = espaçamento entre gotejadores, em m;
- A_1 = área representada por cada árvore, em m^2 ; e,
- n = número de gotejadores por planta.

6.6.6 – Número de unidades operacionais (N)

Determina o número de subáreas em que o projeto será dividido.

$$N = \frac{TR \times n_h}{T_i} \quad (VI.7)$$

em que n_h é o número de horas de trabalho por dia. É comum se utilizar n_h igual a 24 h.

6.6.7 – Vazão necessária ao sistema (Q)

$$Q = \frac{A \times ITN}{N \times T_i} \quad (VI.8)$$

em que:

- Q = vazão de projeto, em L h⁻¹;
- A = área do projeto, em m²;
- ITN = irrigação total necessária, em mm (L m⁻²);
- N = número de unidades operacionais; e
- T_i = tempo de irrigação, em h.

6.6.8 – Dimensionamento hidráulico do sistema

6.6.8.1 – Linhas laterais

Critério: a variação de vazão entre o primeiro e o último gotejador não poderá ser maior que 10%. Para essa condição, a perda de carga ao longo da LL não poderá exceder à 20% da pressão de serviço do gotejador.

➤ **Equação para dimensionamento: Hazen-Williams modificada** (Equação VI.9)

$$hf = 10,646 \times \frac{\left(\frac{Q}{C}\right)^{1,852}}{D^{4,87}} \times L \times F \times \left(\frac{C}{C_g}\right)^{1,852} \quad (VI.9)$$

em que:

- Q = vazão de projeto, em m³ s⁻¹;
- C = coef. de rugosidade do tubo (140 para PVC e 144 para PE);
- D = diâmetro da tubulação, em (m);
- L = comprimento da tubulação, em (m);
- F = fator de Christiansen;
- C_g = coeficiente de rugosidade do tubo com gotejadores, que varia de 80 a 140; em termos médios, adota-se C_g = 100.

Pressão no início da linha lateral (Pin_{LL})

$$Pin_{LL} = P_s + 0,75 \times hf_{LL} \pm 0,4 \times \Delta Z \quad (VI.10)$$

6.6.8.2 – Linhas de derivação

São instaladas na direção da maior declividade do terreno e podem ser usados mais de um diâmetro em seu dimensionamento.

Critério: O limite de hf na LL somado ao limite na LD não poderá ultrapassar a 30% da Ps do gotejador. Caso, no dimensionamento, seja utilizado um limite de hf inferior a 20% na LL, esta diferença deverá ser transferida para a LD, de tal sorte que, a soma entre os dois limites não ultrapasse 30% da Ps do gotejador.

➤ **Equação para dimensionamento** – (Equação VI.9)

➤ **Pressão no início da linha de derivação (P_{inLD})**

$$P_{inLD} = P_{inLL} + hf_{LD} \pm \Delta Z_{LD} \quad (VI.11)$$

6.6.8.3 – Linha principal

O dimensionamento é feito pelo mesmo critério utilizado para aspersão.

6.6.9 – Altura manométrica total (Hm)

$$Hm = H_S + H_R + hf_S + hf_{CC} + hf_{LP} + P_{inLD} + hf_{LOC} \quad (VI.12)$$

em que:

- H_S = altura de sucção, em (m);
- H_R = altura de recalque, em (m);
- hf_S = perda de carga na sucção, em (m);
- hf_{CC} = perda de carga no cabeçal de controle, em (mca);
- hf_{LP} = perda de carga na linha principal, em (mca);
- P_{inLD} = pressão no início da LD, em (mca); e,
- hf_{LOC} = perda de carga localizada, em (mca).

OBS: A perda de carga no cabeçal de controle é especificada pelo fabricante do equipamento. As perdas de cargas localizadas, normalmente, são consideradas como sendo igual a 5% da soma das outras perdas. Assim, a equação VI.12 fica:

$$Hm = (H_S + H_R + hf_S + hf_{CC} + hf_{LP} + P_{inLD}) \times 1,05 \quad (VI.12-a)$$

6.6.10 – Potência do conjunto moto-bomba: Equação V.16.

6.6.11 – Projeto de um sistema

Dimensionar um sistema de irrigação por gotejamento, sendo dados:

- área: 540 x 180 m;
- cultura: figo, com espaçamento de 3 x 3 m;
- evaporação medida pelo tanque Classe A: 8 mm d⁻¹ (maior demanda);
- velocidade do vento: 190 km d⁻¹;
- umidade relativa do ar média: 60%;
- tanque circundado por grama: R = 10 m;
- kc = 1,0;
- turno de rega pré-fixado = 3 dias;
- vazão do gotejador = 3,5 L h⁻¹;
- pressão de serviço do gotejador = 10 mca;
- espaçamento entre gotejadores = 1,5 m;
- serão utilizados 2 gotejadores por árvore;
- considerar número de horas de irrigação diária igual a 24;
- P = 50%;
- solo: textura média;
- considerar Ea = 90% e Rmb = 0,80.

Resolução

1) Evapotranspiração

$$ETg = (E_v \times k_t \times k_c) \times \frac{P}{100}$$
$$ETg = (8 \times 0,7 \times 1,0) \times \frac{50}{100} = 2,8 \text{ mm d}^{-1}$$

2) Lâminas real e total necessárias

$$IRN = ETg \times TR = 2,8 \times 3 = 8,4 \text{ mm}$$

$$ITN = \frac{IRN}{Ea} = \frac{8,4}{0,90} = 9,3 \text{ mm}$$

3) Tempo de irrigação por posição

Como a irrigação será por árvore, vamos ter:

$$T_i = \frac{ITN \times A_1}{n \times Q_g} = \frac{9,3 \times 3 \times 3}{2 \times 3,5} = 12 \text{ h}$$

4) Número de unidades operacionais

$$N = \frac{TR \times n_h}{T_i} = \frac{3 \times 24}{12} = 6$$

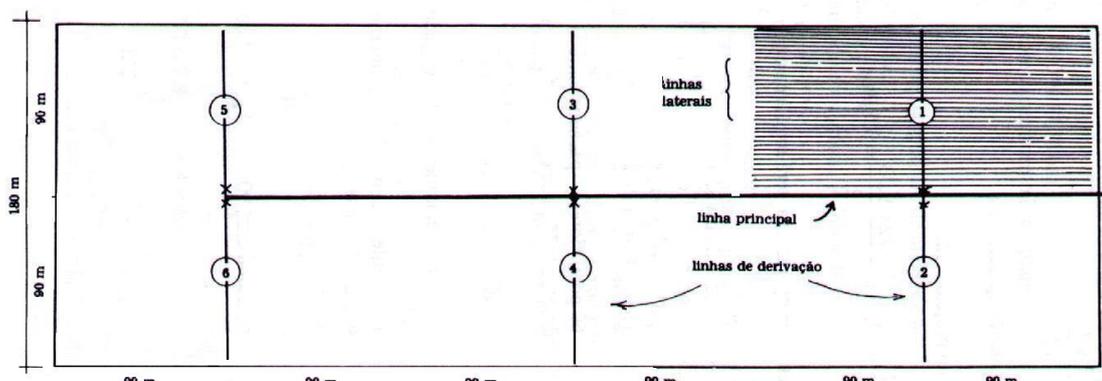
Como a área total do projeto é 9,72 ha, cada unidade operacional terá 1,62 ha.

5) Vazão necessária ao sistema

$$Q = 2,78 \times \frac{A \times ITN}{N \times T_i} = 2,78 \times \frac{9,72 \times 9,3}{6 \times 12} = 3,5 \text{ L s}^{-1}$$

Neste caso, cada unidade operacional de 1,62 ha será irrigada a cada 12 horas, fazendo-se 2 irrigações por dia, ou seja, irrigar-se-á 2 unidades operacionais por dia (3,24 ha).

6) Croqui da área



7) Dimensionamento das linhas laterais

De acordo com o croqui, o comprimento das LL é de 90 m. Como o espaçamento entre gotejadores é de 1,5 m, cada LL terá 60 gotejadores.

- limite de $hf = 20\% \times 10 \text{ mca} = 2,0 \text{ mca}$
- $Q_{LL} = 60 \times 3,5 \text{ L h}^{-1} = 210 \text{ L h}^{-1} = 5,83 \times 10^{-5} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$
- $L = 90 \text{ m}$
- $F_{60} = 0,36$
- $C = 144$
- $C_g = 100$

$$D^{4,87} = 10,646 \times \frac{\left(\frac{Q}{C}\right)^{1,852}}{hf} \times L \times F \times \left(\frac{C}{C_g}\right)^{1,852}$$
$$D^{4,87} = 10,646 \times \frac{\left(\frac{5,83 \times 10^{-5}}{144}\right)^{1,852}}{2} \times 90 \times 0,36 \times \left(\frac{144}{100}\right)^{1,852} = 0,0123 \text{ m}$$

Como esse diâmetro não é comercial, será utilizado o diâmetro comercial imediatamente superior ao valor encontrado, ou seja, $D = 0,0127 \text{ m}$.

Utilizando a equação de Hazen-Williams para esse diâmetro, vamos encontrar $hf = 1,69 \text{ mca}$. Como poderíamos utilizar até 2 mca e só vamos utilizar 1,69 mca, o restante (0,31 mca) será incorporado ao limite de hf na LD.

8) Pressão no início da LL

$$P_{in_{LL}} = P_s + 0,75 \times hf_{LL} \pm 0,4 \times \Delta Z$$

$$P_{in_{LL}} = 10 + 0,75 \times 1,69 \pm 0,4 \times 0 = 11,27 \text{ mca}$$

9) Dimensionamento das linhas de derivação

De acordo com o croqui, cada LD terá 90 m de comprimento, com 60 LL cada uma (30 LL de cada lado).

- limite de hf = 10% x 10 mca = 1,0 mca
- limite de hf disponível = 1,0 + 0,31 = 1,31 mca
- $Q_{LD} = 60 \times 210 \text{ L h}^{-1} = 12600 \text{ L h}^{-1} = 0,0035 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$
- L = 90 m
- $F_{60} = 0,36$
- C = 144
- $C_g = 100$

$$D^{4,87} = 10,646 \times \frac{\left(\frac{Q}{C}\right)^{1,852}}{hf} \times L \times F \times \left(\frac{C}{C_g}\right)^{1,852}$$

$$D^{4,87} = 10,646 \times \frac{\left(\frac{0,0035}{144}\right)^{1,852}}{1,31} \times 90 \times 0,36 \times \left(\frac{144}{100}\right)^{1,852} = 0,0635 \text{ m}$$

Esse diâmetro é exatamente o de 2,5". Dessa forma, as LD estão dimensionadas.

10) Pressão no início da LD

$$P_{in_{LD}} = P_{in_{LL}} + hf_{LD} + \Delta Z$$

$$P_{in_{LD}} = 11,27 + 1,31 + 0 = 12,58 \text{ mca}$$

11) Dimensionamento da linha principal

Como cada unidade operacional só tem uma LD, conclui-se então que a vazão da LP é a mesma da LD.

Para o dimensionamento da LP será utilizado o critério de velocidade.

Teste para D = 2,5"

$$J = 0,0205 \text{ m m}^{-1}$$

$$hf = 9,23 \text{ mca}$$

$$V = 1,10 \text{ m s}^{-1}$$

Teste para D = 3"

$$J = 0,00844 \text{ m m}^{-1}$$

$$hf = 3,8 \text{ mca}$$

$$V = 0,77 \text{ m s}^{-1}$$

De acordo com os valores apresentados, o diâmetro da LP será em 2,5".

12) Altura manométrica total

- Será considerado para a tubulação de recalque (moto-bomba até o cabeçal de controle) um comprimento de 150 m e diâmetro em 3". Dessa forma, a hf nessa linha (eq. de HW) será de 1,27 mca;
- Considerando uma altura de sucção de 5 m, tubulação de sucção com diâmetro de 4" e comprimento de 10 m, a hf nessa linha será de 0,024 mca;
- Como a margem da fonte d'água está em nível com o terreno, Hr = 0;
- Perda de carga no cabeçal de controle = 10 mca.

Assim:

$$H_m = H_s + H_r + hf_S + hf_{CC} + hf_{LP} + Pin_{LD} + hf_{LOC}$$

$$H_m = [5 + 0 + 0,024 + 10 + (1,27 + 9,23) + 12,58] \times 1,05$$

$$H_m = 40 \text{ mca}$$

OBS: A LP do sistema foi subdividida em duas partes, sendo uma da moto-bomba ao cabeçal de controle, denominada linha de recalque, e uma outra, do CC até o final da área, denominada linha principal propriamente dita. Dessa forma, aparece na equação de Hm dois valores referentes à hf_{LP}, respectivos a cada parte.

12) Potência da moto-bomba

$$Pot = \frac{Q \times H_{man}}{75 \times R_{mb}} = \frac{3,5 \times 40}{75 \times 0,80}$$

$$Pot = 2,3 \text{ CV}$$

CAPÍTULO VII

IRRIGAÇÃO POR PIVÔ CENTRAL

7.1 – INTRODUÇÃO

Esse sistema consiste em se aplicar água ao solo sob a forma de aspersão, onde os aspersores são instalados sobre uma haste apoiada em torres que se movem auxiliadas por rodas pneumáticas acionadas por motores. As torres se movem de forma circular fazendo com que a área irrigada seja função do comprimento (raio) do pivô ao quadrado. Quanto maior o comprimento do pivô menor é o custo por unidade de área, o que leva a se trabalhar, normalmente, com os maiores pivôs. O custo médio é de aproximadamente R\$ 3000,00 por hectare. As Figuras VII.1 e VII.2 ilustram um pivô central típico.



Figura VII.1 – Fotografia de um pivô central.



Figura VII.2 – Fotografia de um pivô central.

7.2 – TIPOS DE PIVÔS

Existem atualmente vários tipos de pivôs, mas, em relação aos aspersores, eles se classificam em tipos A, B e C.

Tipo A : foi o primeiro introduzido no Brasil. Usa aspersores de tamanho variado (menores no centro e maiores na extremidade) com a P_s inicial variando de 45 a 70 mca e largura da faixa molhada variando de 50 a 60 m.

Tipo B : usa aspersores médios de mesmo tamanho mas variando o diâmetro de bocais. O espaçamento entre aspersores diminui a medida que se afasta do centro do pivô. A P_s inicial varia de 45 a 55 mca e largura da faixa molhada varia de 25 a 30 m.

Tipo C : este tipo de pivô não utiliza aspersores mas difusores que aplica água praticamente nebulizada. Devido a esse fato, o vento exerce uma influência muito acentuada neste tipo de pivô. A P_s inicial varia de 25 a 40 mca e largura da faixa molhada varia de 6 a 9 m. A principal vantagem desse tipo em relação aos outros dois é o baixo consumo de energia.

Independente do tipo de pivô, é comum a instalação de um aspersor tipo canhão hidráulico em sua extremidade para aumento de área irrigada. Como esse tipo de aspersor exige uma pressão de serviço entre 40 e 60 mca para o seu funcionamento, há necessidade de se instalar uma moto-bomba tipo “booster” na extremidade da linha para aumento da pressão exigida pelo canhão.

Utilizando-se um pivô de 500 m de comprimento, a área irrigada será de 78,5 ha. Se na sua extremidade tiver um aspersor tipo canhão com 30 m de raio de alcance, o comprimento total passa para 540 m e a área irrigada para 88,2 ha, propiciando um aumento de 12,4%.

7.3 – VARIAÇÃO DA VAZÃO AO LONGO DO PIVÔ

Como o pivô central irriga uma área circular, se considerarmos um setor de circunferência veremos que para um mesmo comprimento ao longo do raio a área irrigada é maior. Assim, a medida que se avanço do centro do pivô para a extremidade a vazão é variável. A Figura VII.3 será tomada como base para uma análise de vazão ao longo do pivô.

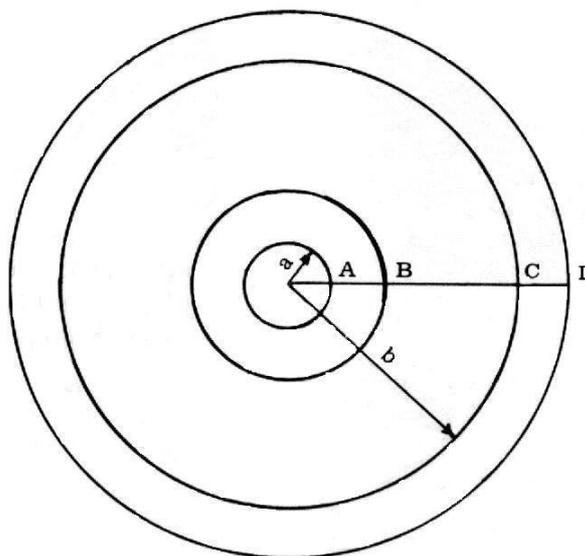


Figura VII.3 – Esquema para análise de vazão ao longo de um pivô central.

Vamos fazer uma análise comparativa entre as áreas representadas pelos segmentos A-B e C-D. Os comprimentos desses dois segmentos são iguais e será representado por y . Assim, sendo, vamos ter:

- área irrigada equivalente ao segmento A-B

$$A-B = \pi (a + y)^2 - \pi a^2$$

$$S_{A-B} = \pi (a^2 + 2 a y + y^2) - \pi a^2 = \pi a^2 + 2 \pi a y + \pi y^2 - \pi a^2 = 2 \pi a y + \pi y^2$$

$$S_{A-B} = \pi y (2 a + y) \quad (VII.1)$$

- área irrigada equivalente ao segmento C-D

$$C-D = \pi (b + y)^2 - \pi b^2$$

$$S_{A-B} = \pi (a^2 + 2 b y + y^2) - \pi b^2 = \pi b^2 + 2 \pi b y + \pi y^2 - \pi b^2 = 2 \pi b y + \pi y^2$$

$$S_{A-B} = \pi y (2 b + y) \quad (VII.2)$$

Considerando que q é a vazão por unidade de área e, considerando as áreas representadas pelos segmentos A-B e C-D, vamos ter:

$$\frac{q \times (C-D)}{q \times (A-B)} = \frac{2 \times b + Y}{2 \times a + Y} \quad (VII.3)$$

Essa relação nos permite concluir que quanto maior o afastamento entre duas subáreas analisadas ao longo do pivô maior a relação entre elas e, conseqüentemente, maior a vazão da subsequente comparada com a antecedente.

Em termos práticos, é comum se comparar as vazões entre os vãos das torres ao longo do pivô. Para isso, basta sabermos a vazão total aplicada pelo pivô e o espaçamento entre as torres; substituindo na equação acima, saberemos facilmente a distribuição de vazão ao longo do pivô.

7.4 – INTENSIDADE DE PRECIPITAÇÃO

À exemplo do sistema por aspersão convencional, a intensidade de precipitação aplicada pelo pivô central não poderá exceder a velocidade de infiltração básica do solo.

Considerando que a largura da faixa molhada ao longo do pivô praticamente não varia, mas, em contrapartida, ocorre variação de vazão, a tendência é que a intensidade de precipitação aumente.

A intensidade de precipitação em um pivô central é determinada pela relação entre a lâmina de irrigação e o tempo necessário para que o pivô complete uma volta.

A equação que nos permite calcular o tempo de precipitação em um ponto qualquer ao longo do pivô, é a seguinte:

$$T_r = \frac{60 \times H \times d}{2 \pi r} \quad (\text{VII.4})$$

em que:

T_r = tempo de precipitação em um ponto r qualquer ao longo do pivô (min);

H = número de horas para uma volta do pivô;

d = diâmetro de cobertura do aspersor no ponto considerado (m);

r = distância do ponto considerado ao centro do pivô (m).

Exemplo de aplicação VII.1

Determinar o tempo de aplicação ao longo de um pivô central a 50, 100, 200 e 400 m, para os pivôs tipo A, B e C. Os cálculos serão apresentados no quadro a seguir. Os valores do diâmetro de cobertura (d) para os aspersores utilizados em cada pivô encontram-se no quadro a seguir.

Tempo de rotação (horas por volta)	Tempo de irrigação no ponto			
	r = 50 m	r = 100 m	r = 200 m	r = 400 m
	Pivô tipo A			
	d = 24 m	d = 27 m	d = 40 m	d = 53 m
24	110 min	62 min	46 min	30 min
48	220 min	124 min	92 min	61 min
	Pivô tipo B			
	d = 27 m	d = 27 m	d = 27 m	d = 27 m
24	124 min	62 min	31 min	16 min
48	248 min	124 min	62 min	31 min
	Pivô tipo C			
	d = 9 m	d = 9 m	d = 9 m	d = 9 m
24	41 min	21 min	10 min	5 min
48	83 min	41 min	21 min	10 min

7.5 – LÂMINA APLICADA POR VOLTA DO PIVÔ CENTRAL

Como a lâmina aplicada depende da intensidade de precipitação e do tempo de permanência em cada ponto ao longo do pivô, o aumento do tempo ocasionará um aumento da lâmina aplicada e vice-versa.

A lâmina média aplicada por um pivô central em cada volta é calculada pela Equação VII.5.

$$L = 0,36 \times \frac{Q \times H}{A} \quad (\text{VII.5})$$

em que:

- L = lâmina média aplicada, em mm;
- Q = vazão do pivô, em L s⁻¹;
- H = tempo para uma volta do pivô, em h; e,
- A = área irrigada pelo pivô, em ha.

7.6 – INTENSIDADE DE PRECIPITAÇÃO MÉDIA EM CADA PONTO

É calculada por meio da Equação VII.6 ou da VII.7.

$$IP_{med} = \frac{L}{T_r} \quad (\text{VII.6})$$

$$IP_{med} = 2,26 \frac{Q \times r}{A \times d} \quad (\text{VII.7})$$

Exemplo de aplicação VII.2

Determinar a lâmina aplicada, o tempo de irrigação e a intensidade de precipitação média (Quadro VII.1) a 50, 100, 200 e 400 m nos três tipos de pivôs, sabendo-se que:

- vazão de projeto = 40 L s⁻¹;
- comprimento do pivô = 400 m.

7.7 – PRECIPITAÇÃO MÁXIMA EM CADA PONTO

$$IP_{max} = \frac{4}{\pi} \times IP_{med} = 1,27 IP_{med} \quad (\text{VII.8})$$

Retomar ao exemplo anterior e calcular a IP_{max} para R = 200 m.

Pivô tipo A	IP _{med} =	IP _{max} =
Pivô tipo B	IP _{med} =	IP _{max} =
Pivô tipo C	IP _{med} =	IP _{max} =

Quadro VII.1 - Cálculos para os três tipos de pivôs.

Vel. de rotação (h/volta)	L (mm/volta)	T _r (min)	I _p média (mm h ⁻¹)	L (mm/volta)	T _r (min)	I _p média (mm h ⁻¹)	L (mm/volta)	T _r (min)	I _p média (mm h ⁻¹)	L (mm/volta)	T _r (min)	I _p média (mm h ⁻¹)
Pivô tipo A												
	r = 50 m d = 24 m			r = 100 m d = 27 m			r = 200 m d = 40 m			r = 400 m d = 53 m		
24												
48												
Pivô tipo B												
	r = 50 m d = 27 m			r = 100 m d = 27 m			r = 200 m d = 27 m			r = 400 m d = 27 m		
24												
48												
Pivô tipo C												
	r = 50 m d = 9 m			r = 100 m d = 9 m			r = 200 m d = 9 m			r = 400 m d = 9 m		
24												
48												

7.8 – VELOCIDADE DE DESLOCAMENTO DA ÚLTIMA TORRE

$$V_{\min} = \frac{d_c}{T_{\max}} \quad (\text{VII.9})$$

Para que não haja escoamento superficial ou empoçamento, é necessário que V_{\min} da última torre seja tal que ela percorra o diâmetro de cobertura do aspersor (d_c) em um tempo máximo, de tal sorte que a V_{ib} do solo, nesse tempo, seja igual ou maior que a precipitação máxima do pivô nesta última torre. O tempo máximo de rotação (T_{\max}), é obtido por meio da equação VII.10.

$$T_{\max} = \frac{2\pi \times R}{V_{\min}} \quad (\text{VII.10})$$

7.9 – TEMPO MÍNIMO DE ROTAÇÃO

$$T_{\min} = \frac{2\pi \times R}{V_{\max}} \quad (\text{VII.11})$$

Para um pivô de 500 m e $V_{\max} = 100 \text{ m h}^{-1}$, vamos ter:

$$T_{\min} = \frac{2 \times \pi \times 500}{100} = 31,4 \text{ h}$$

7.10 – VAZÃO NECESSÁRIA AO SISTEMA

$$Q = \frac{1}{0,36} \times \frac{L \times A}{H} \quad (\text{VII.12})$$

7.11 – UNIFORMIDADE DE APLICAÇÃO COM PIVÔ CENTRAL

Mínimo de 80%.

7.12 – EFICIÊNCIA DE APLICAÇÃO COM PIVÔ CENTRAL

Varia de 70 a 90% sendo 80% o valor mínimo aceitável para um pivô bem dimensionado e com um manejo adequado e correto.

7.13 – LIMITAÇÕES PARA USO DO PIVÔ CENTRAL

7.13.1 – Solos

Mais leves são melhores para evitar empocamento de água.

7.13.2 – Declividade do terreno

Máximo de 15%. Quanto maior a declividade, menor o espaçamento entre torres.

7.13.3 – Culturas

Tem a mesma limitação que o sistema por aspersão convencional.

CAPÍTULO VIII

IRRIGAÇÃO POR AUTOPROPELIDO

8.1 – INTRODUÇÃO

Esse sistema consiste de um aspersor tipo canhão hidráulico de médio ou grande alcance colocado sobre uma carreta com uma moto-bomba. Nesta carreta encontra-se um carretel cuja finalidade é enrolar um cabo de aço que promova a locomoção do equipamento. O abastecimento é feito por uma mangueira que conecta a moto-bomba à hidrantes colocados estrategicamente nas imediações da área. A Figura VIII.1 ilustra um sistema por autopropelido. Alguns tipos de autopropelidos não possuem cabo de aço para seu tracionamento, o qual é feito pela própria mangueira de abastecimento de água. O tipo mais comum é com cabo de aço.



Figura VIII.1 – Fotografia de um sistema autopropelido.

8.2 – ESCOLHA DO AUTOPROPELIDO E DO ASPERSOR CANHÃO

A seleção do equipamento mais adequado para o caso em questão, considera a cultura, a área a ser irrigada e o tipo de solo, como também o tipo de autopropelido, caracterizando a pressão de serviço, diâmetro dos bocais do aspersor canhão, vazão e ângulo de giro do aspersor (pode ser utilizado um canhão com giro de 360° ou setorial, ou seja, o ângulo de giro é regulado).

8.3 – LARGURA DA FAIXA MOLHADA PELO AUTOPROPELIDO (L)

A largura de faixa molhada é determinada pelas condições de vento.

Condições do vento	Largura de faixa molhada
Sem vento	L = 80% do d_c do aspersor
< 8 km h ⁻¹	L = 70 a 80% do d_c do aspersor
8 a 17 km h ⁻¹	L = 60 a 70% do d_c do aspersor
> 17 km h ⁻¹	L = 50 a 60% do d_c do aspersor

8.4 – COMPRIMENTO DA FAIXA MOLHADA PELO AUTOPROPELIDO (C)

O comprimento da faixa equivalente a duas vezes o comprimento da mangueira de abastecimento mais a largura da faixa molhada.

8.5 – COMPRIMENTO DO PERCURSO DO AUTOPROPELIDO (CP)

O comprimento do percurso equivale ao comprimento da faixa menos a largura da faixa molhada.

OBS: verificar que, do comprimento da faixa molhada pelo autopropelido, deverá ser descontado o raio de alcance em cada extremidade (que nada mais é que a largura da faixa molhada) para se determinar o comprimento do percurso.

8.6 – TEMPO DE IRRIGAÇÃO POR FAIXA (T_i)

O tempo de irrigação por faixa relaciona o tempo de percurso e o tempo em que o equipamento funciona parado nas extremidades de cada faixa. Sua determinação é feita por meio da Equação VIII.1.

$$T_i = T_p + 2 T_e \quad (\text{VIII.1})$$

em que:

T_p = tempo de percurso; e

T_e = tempo que o autoprovelido funciona parado nas extremidades da faixa.

Normalmente, T_e se situa entre 10 e 20% de T_p .

O tempo de irrigação por faixa pode ser determinado pela Equação VIII.2.

$$T_i = \frac{C}{V} \quad (\text{VIII.2})$$

em que V é a velocidade de deslocamento determinada por meio da Equação VIII.3.

$$V = \frac{Q}{L \times \text{ITN}} \quad (\text{VIII.3})$$

O tempo de percurso pode ser determinado por meio da Equação VIII.4.

$$T_p = \frac{C_p}{V} \quad (\text{VIII.4})$$

Dessa forma, o tempo que o autoprovelido funciona parado nas extremidades da faixa fica então determinado por meio da Equação VIII.5.

$$T_e = \frac{T_i - T_p}{2} \quad (\text{VIII.5})$$

8.7 – LÂMINA BRUTA DE IRRIGAÇÃO APLICADA (ITN)

$$\text{ITN} = \frac{Q \times T_i}{C \times L} \quad (\text{VIII.6})$$

8.8 – INTENSIDADE DE APLICAÇÃO MÉDIA (IP_{MED})

$$IP_{med} = \frac{\text{ITN}}{\text{Tempo no local}} \times \frac{360}{\alpha} \quad (\text{VIII.7})$$

em que α é o ângulo de giro do aspensor para o caso dos setoriais.

O tempo no local é determinado pela equação VIII.8 ou VIII.9.

$$\text{Tempo no local} = \frac{L}{V} \quad (\text{VIII.8})$$

$$\text{Tempo no local} = \frac{L^2 \times \text{ITN}}{Q} \quad (\text{VIII.9})$$

Substituindo a Equação VIII.9 na Equação VIII.7, vamos ter:

$$\text{IP}_{\text{med}} = \frac{Q}{L^2} \times \frac{360}{\alpha} \quad ((\text{VIII.10}))$$

)

8.9 – TEMPO TOTAL DE IRRIGAÇÃO POR FAIXA (T_t)

Ao final da irrigação de uma faixa, o autopropelido deverá ser preparado para iniciar a irrigação em outra faixa. Essa mudança demora de 0,5 à 1,5 h dependendo da qualidade da mão-de-obra e do equipamento. As tarefas inerentes à essa mudança são as seguintes: mudança da mangueira de abastecimento para o hidrante da nova posição, ancoragem do cabo de aço para o tracionamento do autopropelido na nova faixa e outras pequenas tarefas que se fizerem necessárias. Assim, tempo total de irrigação por faixa (T_t) será:

$$T_t = T_i + T_m \quad (\text{VIII.11})$$

em que T_m é o tempo de mudança.

8.10 – NÚMERO DE FAIXAS IRRIGADAS POR DIA (N_F)

$$N_F = \frac{N_h}{T_t} \quad (\text{VIII.12})$$

em que N_h é o número de horas disponíveis por dia para se proceder a irrigação.

8.11 – NÚMERO DE FAIXAS IRRIGADAS POR AUTOPROPELIDO (N)

$$N = TR \times N_F \quad (\text{VIII.13})$$

OBS: caso não se trabalhe com o turno de rega e sim com o período de irrigação, há necessidade de substituir TR na Equação VIII.13 por Pi.

8.12 – ÁREA IRRIGADA POR AUTOPROPELIDO (A_P)

$$A_P = C \times L \times N \quad (\text{VIII.14})$$

8.13 – DIMENSIONAMENTO HIDRÁULICO DO AUTOPROPELIDO

Os itens necessários para se dimensionar um sistema autopropelido são os seguintes:

- vazão do aspersor;
- pressão de serviço do aspersor;
- altura do aspersor;
- diferença de nível entre os extremos da faixa;
- perda de carga na mangueira e na turbina (fornecidas pelo fabricante do equipamento);
- perda de carga na linha principal;
- diferença de nível entre a tomada d'água e a entrada da área ;
- altura de sucção;
- perda de carga localizada (5% do somatório das demais perdas).

A altura manométrica total será determinada pela soma de todos os itens anteriores exceto a vazão do aspersor.

A potência da moto-bomba é determinada pela mesma equação já utilizada para sistemas pressurizados.

CAPÍTULO IX

IRRIGAÇÃO POR SULCOS DE INFILTRAÇÃO

9.1 – INTRODUÇÃO

A irrigação por superfície foi o primeiro método de irrigação a ser utilizado no mundo. Há 6.000 anos, a civilização da Mesopotâmia já empregava esse método de irrigação, ainda que de forma rudimentar. Em 1980, cerca de 16 % das terras cultivadas no mundo eram irrigadas, sendo que 10 % desse total eram irrigadas por superfície. Em 1982, o estado de Minas Gerais contava com uma área irrigada de 123.000 ha, sendo que 74 % desta era irrigada por superfície.

Apesar de ser um dos métodos mais utilizados, os projetos de irrigação por superfície geralmente operam com baixa eficiência de aplicação. No Brasil, estudos realizados em Pernambuco e Bahia concluíram que a eficiência de aplicação média está em torno de 33 %.

Inicialmente, existem duas razões que justificam a baixa eficiência de aplicação (E_a) em sistemas de irrigação por superfície:

- a) falta de combinação adequada das variáveis comprimento da área, declividade da superfície do terreno, vazão aplicada e tempo de aplicação;
- b) manejo deficiente; na maioria dos manejos o tempo de aplicação não é adotado adequadamente, ocasionando aplicação excessiva de água.

Quando se procede à uma avaliação de um projeto de irrigação em operação, os erros de manejo são facilmente detectados e corrigidos, podendo, em alguns casos, ser necessário o redimensionamento do sistema.

9.2 – O MÉTODO DE IRRIGAÇÃO POR SULCOS DE INFILTRAÇÃO

A irrigação por sulcos consiste na aplicação de água em pequenos canais, sulcos ou corrugações (Figura IX.1A, IX.1b e IX.1C). A água aplicada nos sulcos infiltra ao longo do seu perímetro molhado e se movimenta vertical e lateralmente, umedecendo o perfil do solo (Figura IX.2).

Nessa modalidade de irrigação, a vazão total de projeto é subdividida em pequenas vazões, que são aplicadas nos sulcos, escoando à baixa velocidade, de tal sorte a aplicar a lâmina de irrigação necessária. De modo geral, a vazão conduzida por um sulco varia entre 0,5 e 2,5 L s⁻¹.



Figura IX.1A – Sistema de irrigação por sulcos de infiltração.



Figura IX.1B – Sistema de irrigação por sulcos de infiltração.



Figura IX.1C – Sistema de irrigação por sulcos de infiltração.

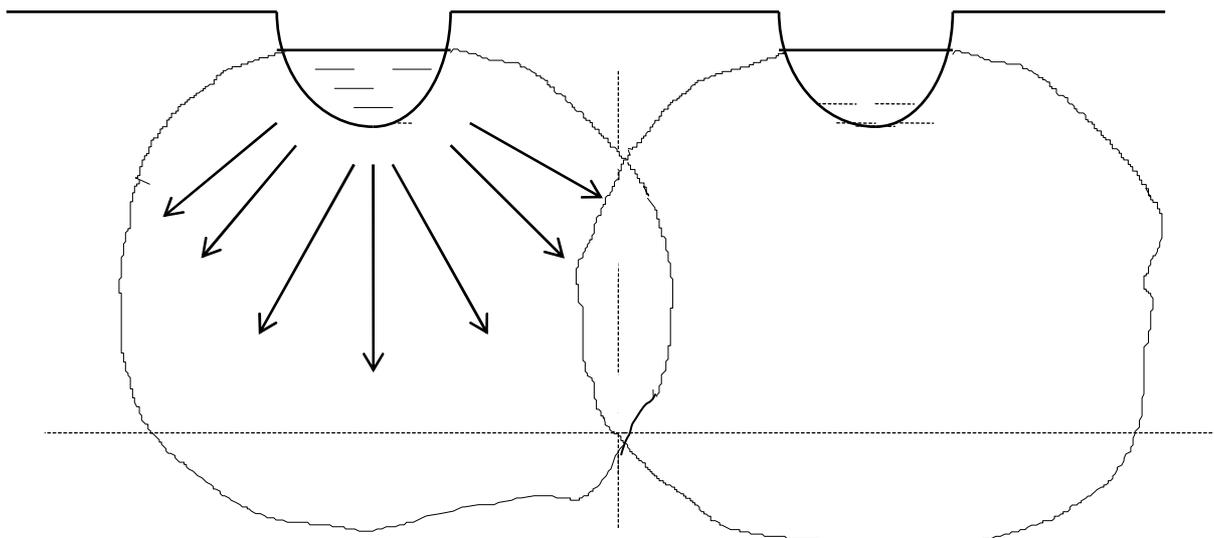


Figura IX.2 - Desenho esquemático mostrando a distribuição da água no solo na irrigação por sulcos de infiltração.

9.2.1 – Características de um sistema de irrigação por sulcos

9.2.1.1 – Forma e tamanho do sulco

A forma geométrica do sulco é importante, principalmente quanto à capacidade da seção transversal em conduzir água na quantidade suficiente e a distribuir uniformemente. A forma mais comum é em V com profundidade de 15 a 20 cm e largura superior de 25 a 30 cm.

9.2.1.2 – Infiltração

A textura do solo e a maneira como a água é aplicada, exercem muita influência no perfil de infiltração. Dessa forma, a equação de infiltração da água no solo deve ser determinada pelo método da entrada e saída, que é o que simula com bastante propriedade o sistema de irrigação por sulcos. Não havendo possibilidades de se utilizar esse método, deve-se optar pelo infiltrômetro de sulco.

9.2.1.3 – Espaçamento entre sulcos

O espaçamento a ser adotado entre os sulcos vai depender de algumas características, tais como:

- tipo de solo;
- tratos culturais; e,
- espaçamento adequado para a cultura.

Quanto ao tipo de solo, particular importância é dada a textura. As Figuras IX.3 e IX.4 apresentam a forma de infiltração em solos arenosos e argilosos.

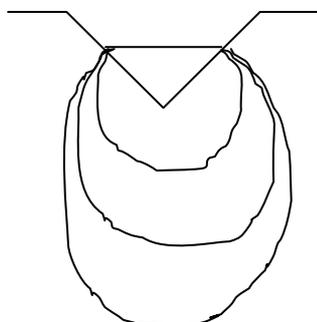


Figura IX.3 – Perfil de infiltração típico de um solo arenoso.

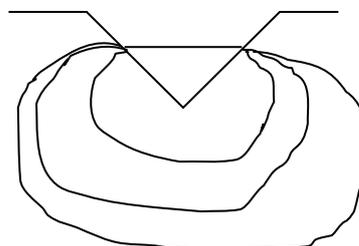


Figura IX.4 – Perfil de infiltração típico solo argiloso.

De acordo com as Figuras IX.3 e IX.4 verifica-se que o espaçamento entre sulcos em um solo argiloso poderá ser maior que no arenoso.

Quanto aos tratos culturais mecanizados, é importante que os espaçamentos entre sulcos sejam compatíveis com as máquinas que serão utilizadas para que não ocorra destruição deles.

Com referência ao espaçamento da cultura, tanto quanto possível, pode-se proceder à ligeiras modificações para que os dois outros fatores (tipo de solo e tratos culturais) se ajustem melhor. De modo geral, pode-se utilizar os seguintes espaçamentos:

- para culturas com espaçamento de 1 m: 1 sulco por linha de plantio;
- para culturas com espaçamento maior que 1 m: 1 ou mais sulcos por linha de plantio;
- para culturas com espaçamento menor que 1 m: 1 sulco para cada duas linhas de plantio.

9.2.1.4 – Declividade e vazão

A declividade a ser adotada deverá ser aquela que não cause erosão aos sulcos quando eles estão em operação. A declividade ótima oscila entre 0,5 e 2,0% e é definida no momento da execução do projeto de sistematização do terreno onde será implantado o projeto de irrigação por sulcos.

A determinação da vazão máxima não erosiva a ser aplicada aos sulcos, rigorosamente deve ser feita por meio de ensaio no campo. Maiores detalhes sobre esses ensaios serão vistos logo em seguida. Quando não houver condições de se proceder aos ensaios, pode-se estimar empiricamente essa vazão por meio da Equação IX.1.

$$Q_{\max} = \frac{C}{S^a} \quad (\text{IX.1})$$

em que:

Q_{\max} = vazão máxima não erosiva, em $L s^{-1}$;

S = declividade dos sulcos, em %; e,

C e a = coeficientes empíricos que dependem do tipo de solo (Tabela IX.1).

Tabela IX.1 - Valores dos coeficientes **C** e **a**, em função da textura do solo

Textura	C	a
Muito fina	0,892	0,937
Fina	0,988	0,550
Média	0,613	0,733
Grossa	0,644	0,704
Muito grossa	0,665	0,548

Na prática, normalmente são utilizadas duas vazões durante a irrigação por sulcos, sendo uma inicial, que é máxima não erosiva, e uma final, que equivale à 50% da inicial. Esse procedimento é fundamental para que as perdas por percolação e por escoamento superficial, inerentes à esse sistema de irrigação, se situem em limites aceitáveis.

9.2.1.5 – Comprimento dos sulcos

O comprimento dos sulcos é dependente dos seguintes fatores:

- geometria da área;
- tipo de solo;
- declividade do sulco; e,
- vazão aplicada aos sulcos.

De acordo com esses fatores, verifica-se que o comprimento ideal deve ser determinado por um teste de campo. Essa determinação é feita por meio das **curvas de avanço** da água em sulcos de infiltração.

Apesar do teste de campo ter como principal objetivo a determinação do comprimento dos sulcos, outros parâmetros de grande importância na elaboração de um projeto também serão definidos, tais como: vazão máxima não erosiva, equação de avanço, equação de infiltração da água no solo e espaçamento adequado para os sulcos.

9.2.2 – Procedimento para determinação das curvas de avanço

Escolhe-se um local que seja representativo da área a ser irrigada, construindo-se três ou mais sulcos com comprimentos de 50 m, onde deverão ser ensaiadas diversas vazões.

Os sulcos são piqueteados de 5 em 5 m ou, no máximo, de 10 em 10 m. No início do sulco instala-se um medidor de vazão - o mais comum são as calhas WSC. Para cada vazão ensaiada registra-se o tempo que a água atinge cada um dos piquetes instalados ao longo do sulco. Com os dados obtidos, determina-se a equação representativa para a vazão ensaiada.

Existem vários tipos de equações que descrevem a velocidade de avanço da água no sulco. Entretanto, a equação potencial é a mais comum (Equação IX.2).

$$L = p \times T_a^r \quad (IX.2)$$

em que:

- L = distância alcançada pela frente de avanço, em m;
- T_a = tempo de avanço até a distância L, em min; e,
- p e r = parâmetros de ajuste da equação.

Uma relação simples para se estimar p e r pode ser utilizada considerando pontos correspondentes à metade do sulco (L_{med}) e o comprimento total (L_{max}), conforme Equações IX.3 e IX.4.

$$r = \frac{\ln(L_{\max}) - \ln(L_{\text{med}})}{\ln(T_{\text{amax}}) - \ln(T_{\text{amed}})} \quad (\text{IX.3})$$

$$p = \frac{L_{\max}}{T_{\text{amax}}^r} \quad (\text{IX.4})$$

em que:

- T_{a max} = tempo de avanço para o comprimento L_{max};
- T_{a med} = tempo de avanço para o comprimento L_{med}.

De posse das equações para cada vazão, pode-se construir as curvas de avanço relacionando-se o comprimento dos sulcos com o tempo de avanço (Figura IX.5).

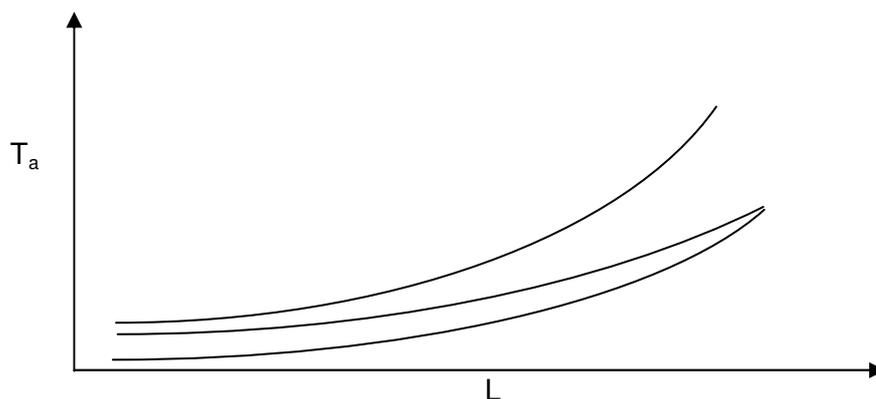


Figura IX.5 – Curvas de avanço da água em sulcos de infiltração.

Não há número específico de vazões que deverão ser testadas, mas é importante que seja determinada àquela que provoca erosão nos sulcos. A vazão máxima não erosiva será então àquela ensaiada anterior à erosiva.

9.2.3 –.Considerações sobre o tempo de avanço relacionado com o tempo de oportunidade

Um dos grandes problemas da utilização dos sistemas de irrigação por superfície consiste no fato de apresentarem uma eficiência de irrigação bem inferior aos sistemas pressurizados. Com o objetivo de minimizar as perdas por percolação e por escoamento no final dos sulcos, foram desenvolvidos vários procedimentos objetivando o dimensionamento desses sistemas. Uma combinação adequada entre comprimento, declividade e vazão deve ser aquela em que o tempo de avanço seja de tal ordem que a perda por percolação no início da área não seja excessiva.

Existem vários critérios adotados com o objetivo de se obter eficiências aceitáveis na irrigação por sulcos. No presente caso, será enfatizado o critério de CRIDDLE, que preconiza que o comprimento do sulco deve ser tal que o tempo de avanço seja igual a 1/4 do tempo de oportunidade para que IRN seja aplicada no final do sulco.

Atualmente existem modelos matemáticos de simulação que possibilitam proceder o dimensionamento dos sistemas de irrigação por superfície maximizando a eficiência de aplicação sem a necessidade de se utilizar regras práticas.

De acordo com o critério de CRIDDLE, determina-se o tempo de oportunidade por meio da equação de infiltração da água no solo (equação de Kostiakov-Lewis), em função da IRN, ou seja:

$$IRN = k \times T_0^a + Vib \times T_0$$

De posse do valor de IRN e da equação determinada para o solo em questão (com os coeficientes k, a e Vib), determina-se o tempo de oportunidade. Com esse valor, determina-se o tempo de avanço (1/4 T_o). O tempo total de irrigação é representado pela Equação IX.5.

$$T_i = T_a + T_o \quad (IX.5)$$

9.2.4 – Abastecimento de água aos sulcos

Os sulcos são abastecidos por meio de sifões, que são tubos curvos de plástico comum ou de polietileno, que derivam água do canal abastecedor para os sulcos. A Figura IX.6 ilustra essa operação.

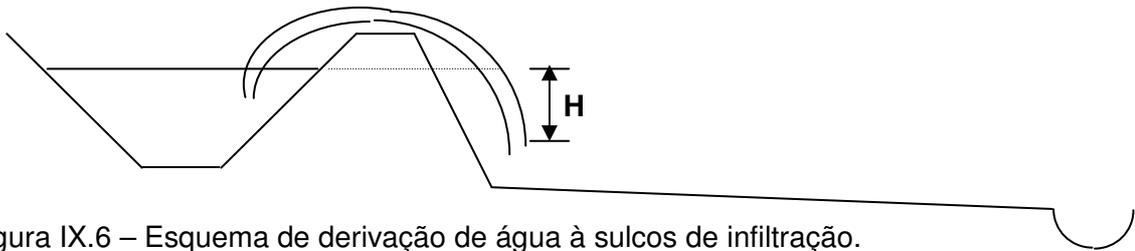


Figura IX.6 – Esquema de derivação de água à sulcos de infiltração.

A vazão que o sifão deriva para o sulco é determinada pela Equação IX.6.

$$Q_s = C_d \times A \times \sqrt{2 \times g \times H} \quad (\text{IX.6})$$

em que:

- Q_s = vazão do sifão, em $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$;
- C_d = coeficiente de descarga do sifão (Equação IX.7);
- A = área do sifão, em m^2 ;
- g = $9,81 \text{ m s}^{-2}$; e,
- H = carga hidrostática agindo no sifão, em m.

$$C_d = \sqrt{\frac{0,6889 \times D^{4/3}}{0,0683 \times L + D^{4/3}}} \quad (\text{IX.7})$$

em que:

- D = diâmetro do sifão, em polegadas; e,
- L = comprimento do sifão, em m.

Para se instalar os sifões adequadamente, é necessário determinar qual será a carga hidráulica (H) necessária para que seja aplicada a vazão determinada quando da determinação do tempo de avanço e do comprimento dos sulcos.

9.2.5 – Manejo de água aos sulcos

O manejo é feito adotando-se o procedimento “cut back” em que, durante o tempo de avanço é aplicada a vazão inicial e, durante o tempo de oportunidade, aplica-se a vazão reduzida, que corresponde a metade da vazão inicial.

Para facilitar a operação de manejo, utiliza-se dois sifões por sulco, cada um aplicando a vazão reduzida. Durante o tempo de avanço, são usados os dois sifões propiciando a vazão inicial e, durante o tempo de oportunidade, é retirado um dos sifões, garantindo-se assim a aplicação da vazão reduzida (metade da inicial).

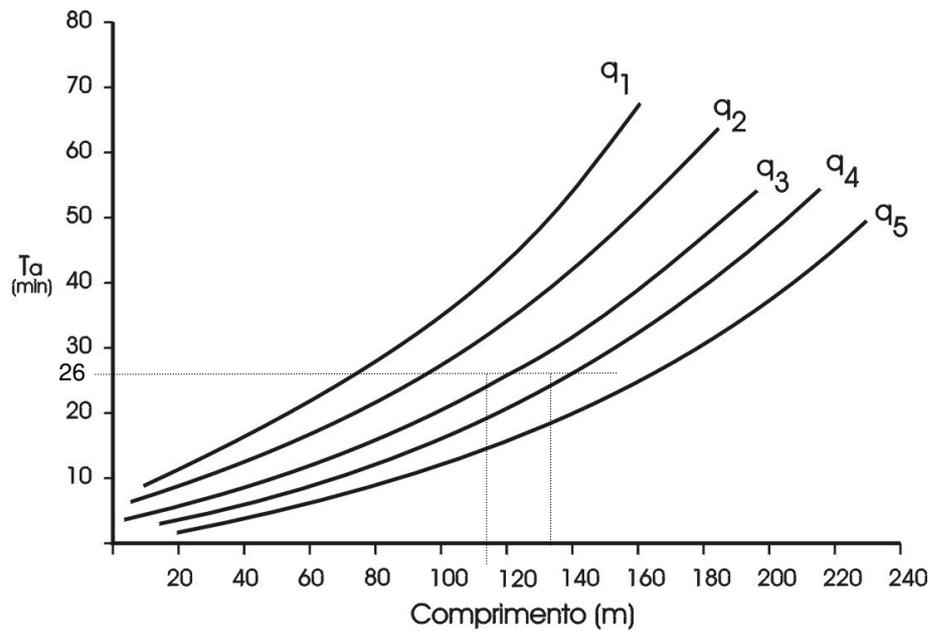
9.2.6 – Projeto de um sistema de irrigação por sulcos de infiltração

Pretendendo-se irrigar uma área pelo sistema de irrigação por sulcos de infiltração, foram levantados os seguintes dados:

- Solo:
 - textura: média;
 - características físicas:

Horizonte	Prof. (cm)	Cc (%)	Pm (%)	dap
A1	0 – 20	26,3	14,8	1,41
A2	20 – 40	28,9	15,6	1,47
B1	40 – 60	30,3	16,3	1,39
B2	60 – 75	30,9	17,1	1,43

- equação de infiltração da água no solo: $I = 0,01134 \times T_0^{0,04523} + 0,000348 \times T_0$
- curvas de avanço da água nos sulcos: foram ensaiadas 5 vazões ($q_1 = 0,32 \text{ L s}^{-1}$; $q_2 = 0,78 \text{ L s}^{-1}$; $q_3 = 1,56 \text{ L s}^{-1}$; $q_4 = 2,22 \text{ L s}^{-1}$; $q_5 = 3,45 \text{ L s}^{-1}$) constatando-se que a vazão q_5 era erosiva. Para cada vazão ensaiada, determinou-se as respectivas equações de avanço e, com essas equações, foram construídas as curvas apresentadas a seguir.



- Cultura:
 - profundidade efetiva do sistema radicular: 0,55 m;
 - duração do ciclo: 120 dias;
 - necessidades hídricas:
 - mês 1 = 130 mm
 - mês 2 = 150 mm
 - mês 3 = 121 mm
 - mês 4 = 114 mm
 - fator f: 0,5.

- Área a ser irrigada:
 - dimensões: 250 x 600 m;
 - declividades após sistematização: 0,5 % na direção da menor dimensão do terreno e em nível na outra direção;

- Dados complementares:
 - número de horas de trabalho por dia: 8;
 - critério para dimensionamento: deverá ser adotado o critério de Criddle;
 - espaçamento entre sulcos: 1 m;

Diante dos dados fornecidos, elabore o projeto de irrigação para a área em questão.

Resolução

- a) Determinação da IRN: calcular-se-á a IRN para cada profundidade e a total

$$IRN = \frac{26,3 - 14,8}{100} \times 1,41 \times 200 \times 0,5 = 16,2 \text{ mm}$$

$$IRN = \frac{28,9 - 15,6}{100} \times 1,47 \times 200 \times 0,5 = 19,6 \text{ mm}$$

$$IRN = \frac{30,3 - 16,3}{100} \times 1,39 \times 150 \times 0,5 = 14,6 \text{ mm}$$

$$IRN = 50,36 \text{ mm}$$

- b) Determinação do tempo de oportunidade

Como o espaçamento entre sulcos é de 1 m, vamos ter que:

$$IRN = 0,05036 \text{ m}^3 \text{ m}^{-1} \text{ m}^{-1}.$$

Aplicando na equação de infiltração, o tempo de oportunidade será:

$$0,05036 = 0,01134 \times T_o^{0,04523} + 0,000348 \times T_o$$

$$T_o = 104 \text{ min}$$

- c) Determinação do tempo de avanço: utilizando o critério de Criddle, o tempo de avanço deverá ser 1/4 do tempo de oportunidade. Assim:

$$T_a = 26 \text{ min}$$

- d) Determinação do tempo de irrigação: o T_i será a soma do T_o com o T_a

$$T_i = 104 + 26 = 130 \text{ min}$$

- e) Determinação do turno de rega

Considerando o mês de máxima demanda ($ET_{pc} = 150 \text{ mm}$), teremos: $ET_{pc} = 5 \text{ mm d}^{-1}$. O turno de rega será:

$$T_R = \frac{50,36}{5} = 10 \text{ dias}$$

- f) Determinação do número de irrigações por dia

Como o tempo de irrigação é de 130 min e o tempo disponível diário é de 8 h (480 min), vamos ter:

$$N_i = \frac{480}{130} = 3 \text{ irrigações por dia}$$

Serão gastos 390 min por dia para o procedimento das irrigações. O restante do tempo (90 min) será consumido com o transporte de sifões e outras tarefas que se fizerem necessárias.

g) Determinação do número de irrigações por turno de rega

$$N_t = 3 \text{ irrig. por dia} \times 10 \text{ dias} = 30 \text{ irrigações por turno}$$

h) Determinação da área a ser irrigada por cada irrigação

$$\text{Área total} = 250 \times 600 \text{ m} = 150.000 \text{ m}^2$$

$$S_i = \frac{150.000}{30} = 5.000 \text{ m}^2 \text{ por irrigação}$$

i) Determinação do comprimento ideal para os sulcos

De acordo com as curvas de avanço, pode-se ver que para o $T_a = 26$ min com a vazão máxima não erosiva ($q_4 = 2,22 \text{ L s}^{-1}$), o comprimento dos sulcos será de 140 m. Devido a conformação da área, se usarmos sulcos com esse comprimento, não teremos sulcos com comprimentos iguais em toda a área, uma vez que eles serão construídos ao longo da dimensão de 250 m. Optou-se então, pelo comprimento de 120 m, usando-se, para esse comprimento, a vazão $q_3 = 1,56 \text{ L s}^{-1}$. Assim sendo, dividiremos a área em duas partes iguais e os sulcos terão comprimentos iguais em toda a área. Como os sulcos são espaçados de 1 m, a área de cada um deles será de 120 m^2 .

Uma vez que o comprimento da área é de 250 m e serão ocupados 240 m ($120 \text{ m} \times 2$), os 10 m restantes serão utilizados para a construção de canais, drenos e vias de acesso à área irrigada.

Dessa forma, da área total de 150.000 m^2 , deverá ser diminuída àquela referente aos 10 m que não serão utilizados com sulcos ($10 \text{ m} \times 600 \text{ m} = 6.000 \text{ m}^2$). A área efetiva ocupada com sulcos será então igual a 144.000 m^2 e a área a ser irrigada por cada irrigação será de 4.800 m^2 .

j) Determinação do número de sulcos irrigados à cada irrigação

$$n_s = \frac{4.800 \text{ m}^2}{120 \text{ m}^2} = 40 \text{ sulcos}$$

k) Determinação da vazão necessária ao projeto

$$Q_p = 1,56 \times 40 = 62,4 \text{ L s}^{-1}$$

l) Determinação da eficiência de aplicação do sistema

No sistema de irrigação por sulcos de infiltração, a eficiência de aplicação é determinada em função do dimensionamento do projeto. Usando como condição de manejo a aplicação da vazão inicial durante o tempo de avanço e da vazão reduzida durante o tempo de oportunidade, teremos:

$$26 \text{ min} \times 1,56 \text{ L s}^{-1} \times 60 = 2433,6 \text{ L}$$

$$104 \text{ min} \times 0,78 \text{ L s}^{-1} \times 60 = 4867,2 \text{ L}$$

$$\text{Volume total aplicado} = 7300,8 \text{ L}$$

A lâmina bruta aplicada será:

$$\text{ITN} = \frac{7300,8 \text{ L}}{120 \text{ m}^2} = 60,84 \text{ mm}$$

A eficiência de aplicação do sistema, para o presente caso, será:

$$E_a = \frac{\text{IRN}}{\text{ITN}} = \frac{50,36}{60,84} = 82,77 \%$$

Verifica-se que essa eficiência está bastante alta considerando o sistema de irrigação por sulcos de infiltração, fato esse que não é muito comum para essa modalidade de irrigação.

m) Determinação da vazão total a ser recalçada

A vazão de $62,4 \text{ L s}^{-1}$ é a que realmente deverá chegar à cabeceira dos sulcos. Considerando que os canais de condução de água serão revestidos, pode-se considerar tanto a eficiência de condução quanto a de distribuição igual a 85 %. Assim:

$$Q_b = \frac{62,4}{0,85 \times 0,85} = 86,37 \text{ L s}^{-1}$$

CAPÍTULO X

IRRIGAÇÃO POR INUNDAÇÃO

10.1 – INTRODUÇÃO

De maneira geral, esse método é empregado na irrigação da cultura do arroz. O método se caracteriza na manutenção de uma lâmina de água sobre a superfície do solo. A área a ser irrigada é dividida em subáreas denominadas tabuleiros, que são separados por diques ou taipas, cuja finalidade é a retenção da água sobre a superfície do solo, conforme Figura X.1.

A irrigação por inundação praticamente dispensa os tratos culturais convencionais devido a permanência da lâmina d'água durante quase todo o ciclo da cultura do arroz.

10.2 – TIPO DE SOLO

Os solos devem ser de textura média a argilosa e ter quando saturados um velocidade de infiltração básica não superior a 3 mm h^{-1} , apresentando uma camada impermeável à uma profundidade de 0,5 a 3,0 m.



Figura X.1. – Sistema de irrigação por inundação.

10.3 – Declividade do terreno

Como o sistema é caracterizado pela permanência de uma lâmina d'água sobre a superfície do solo, é necessário que a declividade seja pequena, ou seja, a topografia da área deve ser a mais plana possível. Em terrenos onde se faz necessária a sistematização, o principal fator a ser observado é a profundidade de corte, que não deverá exceder, na média, a 20 cm, evitando-se assim, a exposição de sub-solo. Quando o terreno é plano, sem necessidade de sistematização, os diques deverão ser construídos em curvas de nível e a diferença de nível entre eles não deve ser maior que 6 cm (Figura X.2).

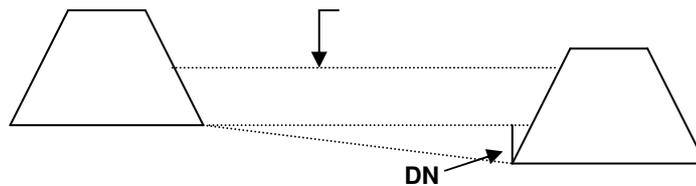


Figura X.2 – Representação esquemática de tabuleiros em curvas de nível.

10.4 – Dimensões dos tabuleiros

Os tabuleiros não deverão ser nem muito grandes nem muitos pequenos. Se forem muito pequenos dificultarão o manejo, principalmente se a colheita for mecanizada. Se muito grandes, a lâmina d'água fica desuniforme. A dimensão média deve se situar entre 1 e 4 ha.

10.5 – Forma dos diques ou taipas

Normalmente para implantação de projetos em grandes áreas, os diques têm forma trapezoidal e são construídos com um implemento denominado entaipadeira. Em áreas pequenas são construídos por meio de uma lâmina acoplada na dianteira de um trator de pneus, ficando com um formato semelhante à um camalhão. As entaipadeiras constróem taipas trapezoidais com 30 cm de altura, 40 cm de base menor e 80 cm de base maior.

A altura da lâmina d'água nos tabuleiros se situa entre 20 e 25 cm. Deve-se observar a DN entre os diques para que não fique nenhuma parte do tabuleiro sem água.

10.6 – Manejo de água nos tabuleiros

O manejo pode ser feito de duas maneiras: contínuo ou intermitente. No manejo contínuo, a água é derivada aos tabuleiros sem interrupção e normalmente só é utilizado quando a água que abastece o projeto for por gravidade. Já no intermitente, após os tabuleiros serem abastecidos, o fornecimento de água é interrompido e só serão reabastecidos quando tiver apenas uma pequena lâmina de água neles. É utilizado quando o abastecimento aos tabuleiros é feito por bombeamento.

Alguns trabalhos indicaram que o manejo contínuo apresenta a vantagem de propiciar a renovação permanente de água nos tabuleiros, condicionando menor variação da temperatura da água, situação benéfica à cultura do arroz.

10.7 – Determinação das vazões mobilizadas aos tabuleiros

No planejamento de um sistema de irrigação por inundação, dois casos poderão surgir:

- sabendo-se a área a ser irrigada, determina-se a vazão mínima a ser mobilizada:
- tendo-se a vazão máxima disponível, determina-se a área máxima que poderá ser irrigada.

Para melhor entendimento da determinação das vazões que serão aduzidas para um projeto de irrigação por inundação, analisaremos um caso geral.

Considerando um tabuleiro com uma área **S** qualquer e sobre ele uma lâmina de água **h**. Nessa situação, obteremos os seguintes parâmetros:

- h = altura média de água que se deseja alcançar sobre o tabuleiro [m];
- S = área do tabuleiro [m²];
- $V1$ = volume correspondente área S e a altura h [m³];
- $V2$ = volume de água evapotranspirada [m³];
- $V3$ = volume de água infiltrada [m³];
- VT = volume total de água necessária para encher o tabuleiro [m³];
- QL = vazão necessária para encher o tabuleiro [m³ s⁻¹];
- Vs = volume necessário para manter constante a lâmina h [m³];
- Qs = vazão correspondente a Vs [m³ s⁻¹];
- $T1$ = tempo necessário para encher o tabuleiro [s];
- $T2$ = tempo que dura a inundação [s];
- E = taxa evapotranspirométrica [m s⁻¹];
- Vi = velocidade de infiltração [m s⁻¹].

10.7.1 – Determinação da vazão máxima para encher o tabuleiro (QL)

Sabendo-se que:

$$V1 = S \times h$$

$$V2 = S \times E \times T1$$

$$V3 = S \times Vi \times T1$$

O volume total (VT) será:

$$VT = V1 + V2 + V3$$

$$VT = (S \times h) + (S \times E \times T1) + (S \times Vi \times T1)$$

$$VT = S [h + T1 (E + Vi)]$$

Como: $QL = \frac{VT}{T1}$ tem-se finalmente:

$$QL = \frac{S [h + T1(E + Vi)]}{T1} \quad (X.1)$$

10.7.2 – Determinação da vazão necessária para manter a lâmina constante (Qs)

Sabendo-se que:

$$V2 = (S \times E \times T2) + (S \times Vi \times T2)$$

Como: $Qs = \frac{Vs}{T2}$ tem-se:

$$Qs = \frac{S \times T2 (E + Vi)}{T2}$$

$$Qs = S (E + Vi) \quad (X.2)$$