

1 - INTRODUÇÃO

1.1 - A História da Irrigação

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 pastejavam. Havia, entretanto, um grave inconveniente: se a cheia era muito alta, causava devastação; se era fraca, restava menos terra fértil 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 surgia 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 milimetricamente 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 conseqüência 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 inabilidade 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.

1.2 - 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 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.

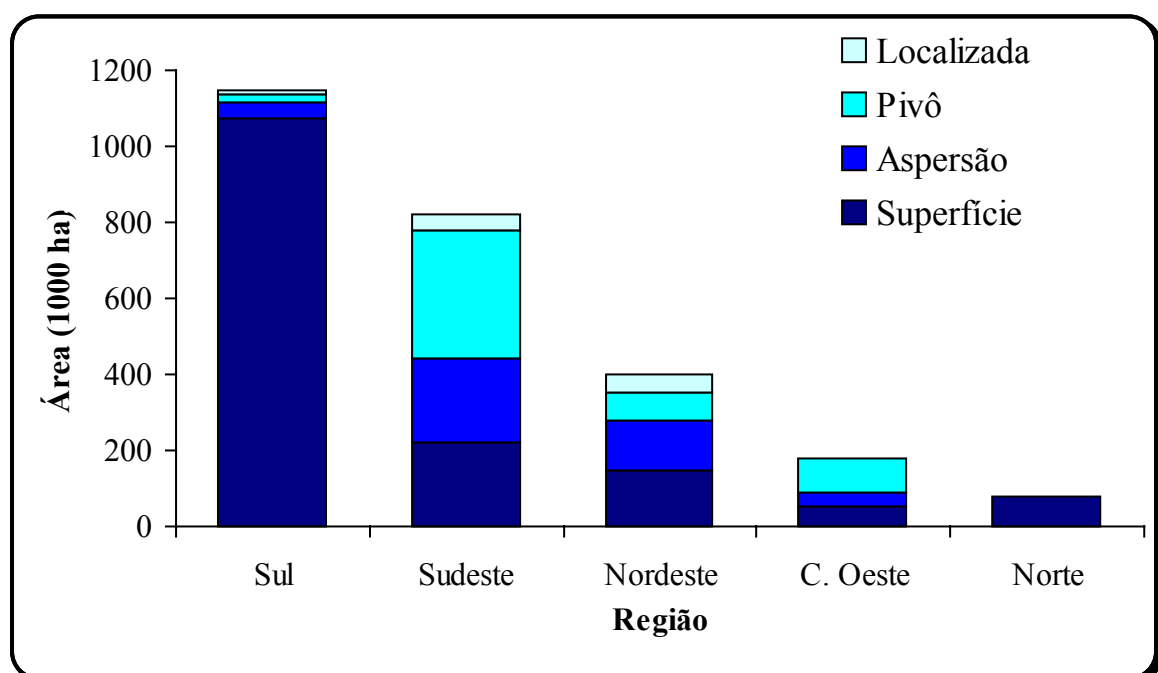


Figura 1 - Métodos de irrigação por região no Brasil.

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/ha), com a seguinte participação regional:

- NORTE 2,4%;
- NORDESTE 26,4%
- CENTRO-OESTE 34,1%
- SUDESTE 25,6%
- 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, em Mossoró (RN), que abastece praticamente todo o país de melão produzido com 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 polo 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 1). A maioria da área irrigada no mundo teve seu desenvolvimento recentemente. Em 1961 a área irrigada no mundo 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 as maiores áreas irrigadas eram a região sudoeste (2,3 milhões de ha), os 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 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.

Tabela 1 - Relação dos vinte primeiros países com maiores áreas irrigadas no mundo.

País	Área (1000 ha)			
China	52.580			
Estados Unidos	21.400			
Iran	7.562			
México	6.500			
Indonésia	4.815			
Tailândia	4.749			
Federação Russa	4.663			
Uzbequistão	4.281			
Turquia	4.200			
Bangladesh	3.844			
Espanha	3.640			
Iraque	3.525			
Egito	3.300			
Romênia	2.880			
Itália	2.698			
Japão	2.679	A Cultivada / A Irrigada	Produção	Divisas
Brasil (17)	2.656	4%	16%	25%
Ucrânia	2.454			
Austrália	2.400			
Afeganistão	2.386			
Mundo	271.432			

Fonte: FAO, 2000. Dados referentes ao ano de 1998

1.2.1 - Área Irrigada e Métodos de Irrigação Utilizados nas Diferentes Regiões do Brasil

A irrigação no Brasil apresenta características diferentes no Nordeste e no Sul. Ainda que tenham surgido nas duas regiões simultaneamente, no início do século, a irrigação desenvolveu-se com características bem diferenciadas. Enquanto no Nordeste as iniciativas nasceram do poder público, no Sul a iniciativa foi predominantemente particular.

Com os dados recebidos de órgãos estaduais, em 1996, a Secretaria de Recursos Hídricos do MMA (SRH/MMA) contabilizou cerca de 2,63 milhões de hectares irrigados no Brasil. A região Sul se destacou como a mais irrigada, com cerca de 1,15 milhões de hectares,

seguida da região Sudeste, com mais de 800 mil hectares. A região Nordeste vem a seguir, com mais de 400 mil, depois a Centro-Oeste, com aproximadamente 200 mil hectares e, finalmente, a região Norte, com 80 mil hectares irrigados, como ser observado na Tabela 2 e Figura 2.

Apesar do esforço da SRH/MMA em obter informações recentes sobre a irrigação no Brasil, o Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE) estima em, aproximadamente, 3 milhões de hectares a extensão da área irrigada no Brasil. Entretanto, isto representa apenas 4% da área cultivada, percentagem considerada muito baixa, frente aos valores médios de 15% fornecidos pela FAO.

Tabela 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).

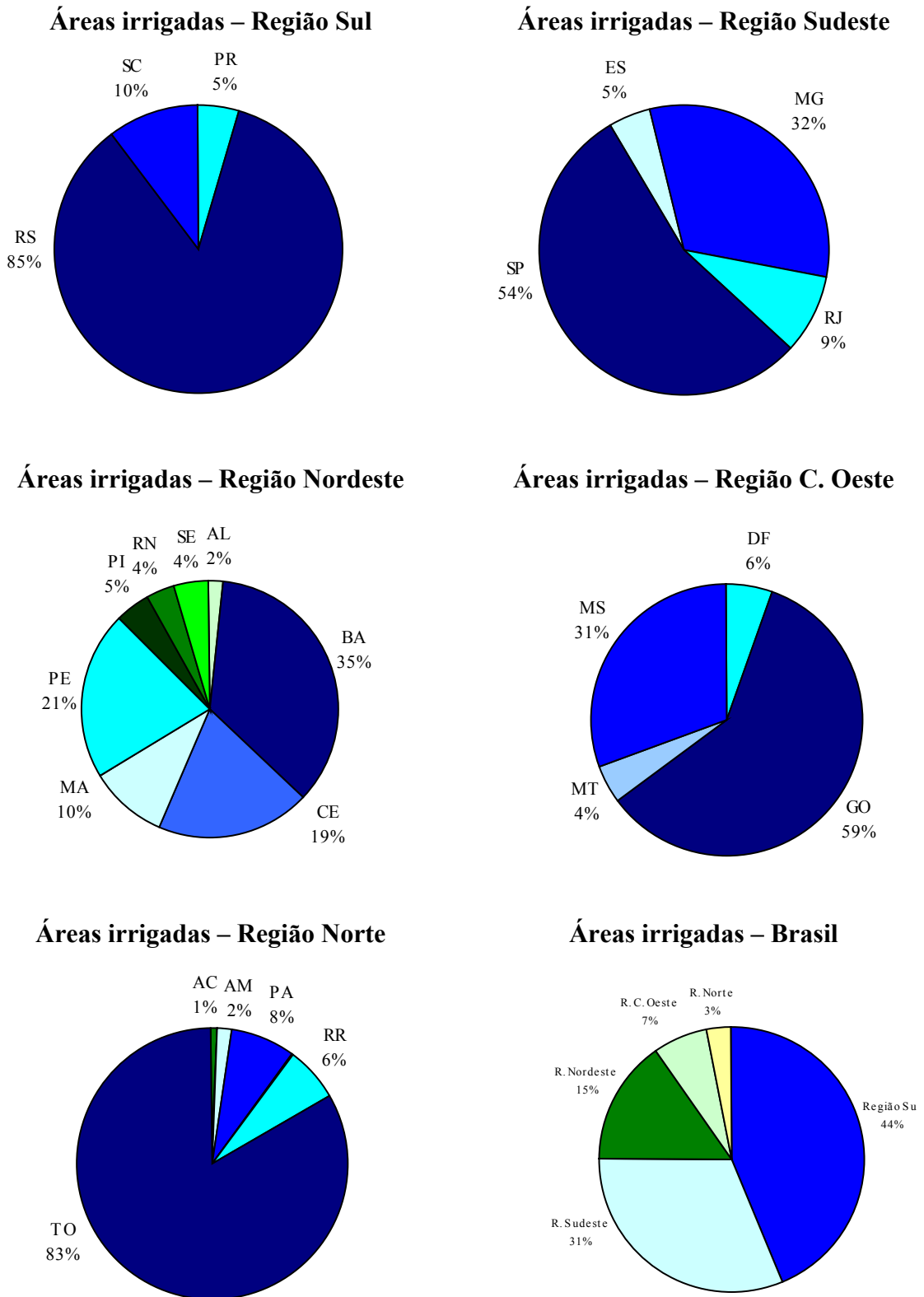


Figura 2 – Distribuição das áreas irrigadas por Estados e Regiões.

1.2.1.1 - Irrigação no Estado de São Paulo

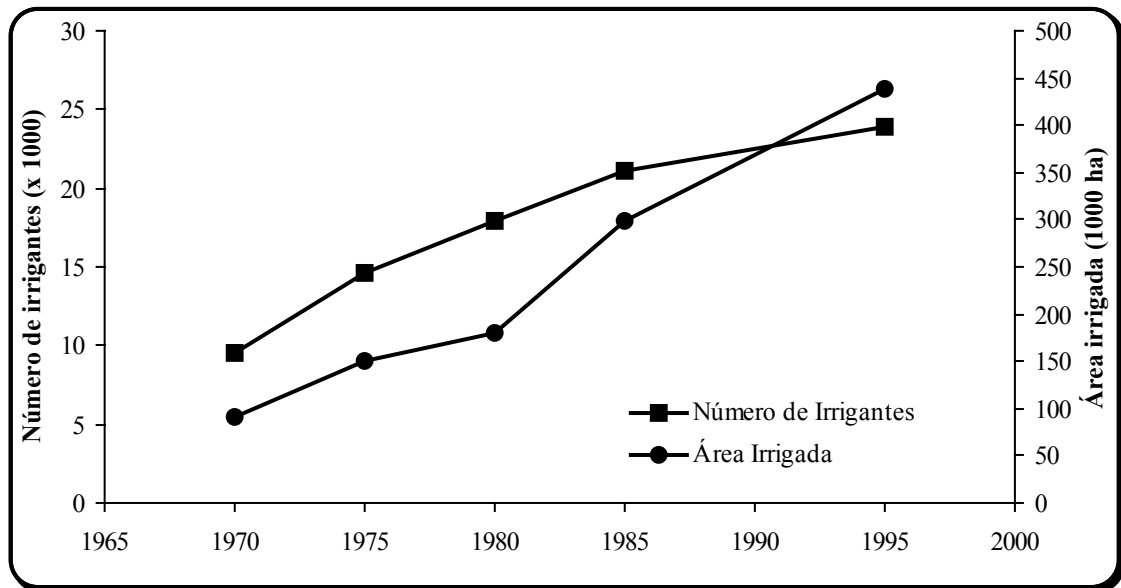
No Estado de São Paulo, o total anual de chuva, em torno dos 1.500 mm, é, à primeira vista, satisfatório para garantir a produção agrícola. Todavia, a sua distribuição durante os meses do ano não é uniforme. A precipitação pluviométrica concentra-se no período de outubro a março, época de desenvolvimento das culturas anuais. Ocorrem, porém, veranicos (alguns dias seguidos sem chuva durante o período chuvoso) e, quando isso acontece, as quebras de safra podem ser grandes ou até totais, com enormes prejuízos para os agricultores e, indiretamente, para a população, gerando escassez e aumento no preço dos alimentos. O uso da irrigação justifica-se nestas condições, garantindo ao agricultor uma safra boa e segura.

Por outro lado, nos meses secos (abril a setembro), a utilização da irrigação cria condições para que seja realizado um ou dois cultivos neste período, resultando em um melhor aproveitamento da área e da infra-estrutura (tratores, máquinas, equipamentos agrícolas etc), que permanecem ociosas durante esta época do ano. Deve-se ressaltar que os preços obtidos pelo produtor nesta época são bem superiores, dada a inexistência de cultivos tradicionais (sem irrigação). Outro fator favorável ao uso da irrigação neste período é a possibilidade de produzir sementes selecionadas, uma vez que as condições climáticas são muito propícias.

No final dos anos 40, houve uma tentativa mal sucedida de introduzir a irrigação no Estado de São Paulo. Diversos fatores contribuíram para o seu insucesso: o interesse apenas comercial dos vendedores de equipamentos, a inadequação do sistema de irrigação escolhido (aspersão convencional em café) e inexistência de tradição do uso da irrigação.

A partir de 1972, o DAEE realizou uma série de estudos e levantamentos visando dinamizar o uso da irrigação. Um deles, o Diagnóstico Básico para o Plano Estadual de Irrigação, detectou a existência de 4,5 milhões de hectares de terras economicamente irrigáveis no Estado de São Paulo. Outros trabalhos foram realizados pelo DAEE, que então lançou o Programa de Implantação de Campos de Demonstração de Irrigação (CDI). O de Guaiúba, o primeiro a ser implantado, levou o agricultor local a conhecer, acreditar e investir na irrigação, promovendo sua rápida expansão e transformando a região em polo de desenvolvimento desta tecnologia em nível nacional. Tiveram também importância marcante no desenvolvimento da irrigação no Estado, os incentivos financeiros e os programas oficiais: Pro-Feijão, Profir e Proni.

A Figura 3 mostra a evolução do número de irrigantes e da área irrigada no Estado de São Paulo.



Fonte: Anuário Estatístico IBGE

Figura 3 - Evolução do número de irrigantes e da área irrigada no Estado de São Paulo entre os anos de 1970 e 1995

Tentando equacionar a distribuição, a localização dos irrigantes e a vazão captada por manancial em São Paulo, o DAEE elaborou em 1990 o cadastro de irrigantes, iniciando pela bacia hidrográfica dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí, estendendo-se, posteriormente, à bacia do Alto Tietê.

O cadastro da bacia do rio Piracicaba, Capivari e Jundiaí, abrangeu 50 municípios, incluindo 4 municípios do Estado de Minas Gerais, totalizando a área de 28.500 ha irrigados, correspondendo a cerca de 90% da área total irrigada e 2718 módulos irrigados. As Tabelas 3 e 4 mostram alguns dados obtidos no cadastro, no que diz respeito às culturas predominantes e suas respectivas áreas plantadas e sistemas de irrigação utilizados.

Tabela 3 - Culturas predominantes e respectivas áreas plantadas, segundo o cadastro de irrigantes da bacia do Piracicaba, Capivari e Jundiá, elaborado pelo DAEE em 1990.

Culturas	Área (ha)	%
Cana de Açúcar	9.997	35
Citrus	3.976	14
Olericultura ¹	3.675	12,9
Batata Inglesa	2.468	8,7
Feijão	1.416	5
Milho	1.397	4,9
Outras Frutas ²	1.227	4,3
Tomate	1.108	3,9
Floricultura	1.042	3,6
Outros Produtos Agrícolas ³	2.194	7,7
Total	28.500	100

¹ Compreende as culturas de alface, couve, escarola, brócolis, rúcula, salsa, repolho, couve flor, nabo, cenoura, rabanete etc;

² Compreende as frutas de morango, ameixa, goiaba, maçã, caqui, pêssego etc;

³ Compreende as culturas de arroz, café, soja, trigo etc.

Tabela 4 - Sistemas de irrigação utilizados na bacia do Piracicaba, Capivari e Jundiá, segundo o cadastro de irrigantes elaborado pelo DAEE em 1990.

Sistema	Quantidade	%
Aspersão convencional	2.251	77,2
Sulcos de infiltração	303	10,4
Mangueira	205	7
Microaspersão	103	3,5
Gotejamento	32	1,1
Outros	22	0,8
Total	2916	100

Propriedades agrícolas com mais de um equipamento de irrigação

O cadastro de áreas irrigadas na bacia do Alto Tietê contabilizou a área de 2.947 hectares irrigados, correspondendo a, aproximadamente, 37% da área total irrigada na bacia, de acordo com dados do Censo Agropecuário 1995/96 do IBGE. O levantamento cadastrou

654 módulos irrigados localizados nos municípios de Biritiba Mirim, Mogi das Cruzes e Salesópolis. Alguns dados obtidos no cadastro são mostrados nas Tabelas 5 e 6.

Tabela 5 - Culturas predominantes na bacia do Alto Tietê segundo o cadastro de irrigantes elaborados pelo DAEE em 1990.

Culturas	Área (ha)	%
Olericultura ¹	2170	62
Batata inglesa	407	12
Milho	375	11
Frutas ²	108	3
Floricultura	68	2
Tomate	26	0.7
Outros produtos agrícolas ³	340	10
Total	34944	100

¹ Compreende as culturas de alface, couve, brócolis, rúcula, salsa, repolho, couve flor, cenoura, rabanete, nabo etc;

² Compreende as culturas de morango, pêssego, caqui, ameixa, uva etc;

³ Compreende as culturas de feijão, cebola, citrus etc.

Tabela 6 - Sistemas de irrigação utilizados na bacia do Alto Tietê segundo o cadastro de irrigantes elaborados pelo DAEE em 1990.

Sistema	Quantidade	%
Aspersão convencional	517	74,4
Mangueira	175	25,2
Gotejamento	3	0,4
Total	695	100

Propriedades agrícolas com mais de um equipamento de irrigação.

A quantidade de água que uma plantação consome (uso consultivo) varia com o tipo de planta, seu estágio de desenvolvimento, clima da região e época de cultivo. As águas das chuvas podem atender, total ou parcialmente, esta demanda de água. Para que não haja perda de produção, o restante da água necessária à cultura deverá ser fornecido pela irrigação.

Outros componentes importantes na determinação das quantidades de água utilizada para uso agrícola são: método de irrigação adotado e sua eficiência na aplicação da água. Em termos médios, observa-se que, nos meses secos, a irrigação utiliza mais de 40% da água consumida no Estado. Nos próximos 20 anos este valor pode chegar a 50%.

Preocupado com o consumo excessivo de água no setor agrícola, o DAEE em convênio com o IPT, elaborou em 1997 o Estudo de Parametrização Agroclimática nos municípios de Piracicaba e Mogi das Cruzes. Este estudo teve o objetivo de determinar os valores de evapotranspiração e dos coeficientes de cultura do feijão e milho em Piracicaba, e alface em Mogi das Cruzes.

É intenção do DAEE estender este projeto de parametrização às demais bacias hidrográficas do estado, determinando o consumo ótimo de água pelas culturas de maior representatividade de exploração pelos produtores rurais e contribuir para a promoção do uso mais racional da água na irrigação.

1.3 - 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;
- 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 d'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 dita.

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 apoiam somente na relação benefício-custo. 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).

1.3.1 - Problemas de Salinização do Solo

O halomorfismo (halos = sal + morfos = forma) desenvolve-se no solo quando as condições do ecossistema são propícias. Altas taxas de evapotranspiração potencial, drenagem deficiente, águas subterrâneas (lençol freático) enriquecidas por sais, entre outros fatores favorecem o halomorfismo tanto em ambientes de climas áridos e semi-áridos, como em

condições de umidade, influenciadas pela água do mar. Portanto, os halobiomas evoluem a partir da interação entre os fatores de formação dos solos (material de origem, clima, relevo, organismos vivos e tempo), tendo como consequência o processo pedogenético da salinização.

A concentração salina da solução do solo antes da ação do homem (ação antrópica), é definida como *salinização primária*. Por outro lado, a salinização pode se estabelecer em ambientes onde, previamente, os teores de sais tóxicos eram abaixo do limite de tolerância das plantas cultivadas. A essa salinização, decorrente quase sempre do manejo inadequado do solo e da água, dá-se o nome de *salinização induzida* ou *salinização secundária*.

Segundo Oliveira (1997) a salinização induzida pelo homem é mais perceptível em ambientes de elevada taxa de evapotranspiração potencial e baixa precipitação pluviométrica no curso do ano. A salinidade induzida se manifesta em decorrência da irrigação praticada nessas áreas, onde o controle da drenagem não é feito ou feito de forma ineficiente. No nordeste semi-árido, as maiores incidências de áreas salinizadas com salinização secundária se concentram nas terras mais intensamente cultivadas com o uso da irrigação nos chamados Perímetros Irrigados. Chapman (1975) estimou em mais de 25.000 hectares de área total salinizada nessa região do Brasil.

A salinidade do solo e da água de irrigação são expressas pela condutividade elétrica (CE), visto que existe uma correlação direta entre a quantidade de sais dissolvidos em uma solução e a capacidade desta solução em conduzir corrente elétrica. A unidade de CE é o deciSiemens por metro (dS.m^{-1}), sendo que uma solução que apresenta uma CE de 1 dS.m^{-1} possui, aproximadamente, 0,64 gramas de sais dissolvidos por litro de solução.

Com isso, pode-se afirmar que a salinização é uma consequência do manejo inadequado da irrigação. Por exemplo, considerando que a lâmina total de irrigação aplicada em um cultivo de milho safrinha seja de 500 mm e que a água de irrigação apresenta uma concentração de sais de $0,4 \text{ g.L}^{-1}$, a qual deve apresentar uma condutividade elétrica de, aproximadamente, $0,6 \text{ dS.m}^{-1}$. Neste caso, a quantidade de sais adicionados ao solo será de 2.000 kg.ha^{-1} para a área irrigada. Supondo que o sistema de irrigação apresenta alta eficiência de aplicação de água e, conseqüentemente, a quantidade de água percolada abaixo da zona radicular da cultura é mínima, o sal se acumularia na superfície do solo devido ao fluxo ascendente de umidade, decorrente da evapotranspiração, criando os chamados solos salinos. Portanto, faz-se necessária a aplicação de uma quantidade de água além daquela

requerida para repor a quantidade de água evapotranspirada para promover a lixiviação do excesso de sais para camadas mais profundas de solo, longe do sistema radicular das plantas.

1.3.2 - 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 aplicado que não é evapotranspirado pelas culturas retorna aos rios e córregos, por meio do escoamento superficial e subsuperficial, ou vai para os depósitos subterrâneos, por percolação profunda, arrastando consigo sais solúveis, fertilizantes (principalmente nitrato), 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 superfície, ou seja, por sulco, faixa e 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 escoar no final dos sulcos. Essa água escoada carrega sedimentos, em virtude da erosão no início do sulco, fertilizantes, defensivos e herbicidas. No final da parcela, esta é coletada pelo dreno que a conduz aos córregos.

A contaminação de rios e córregos também pode ocorrer de um modo pouco 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 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 a água subterrânea 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 da água subterrânea. Assim, torna-se cada vez mais necessário dimensionar e manejar os sistemas de irrigação com maior eficiência, bem como evitar o uso de herbicidas e defensivos 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 retorno de água diretamente no sistema hidrológico da bacia. Contudo, à medida que a área irrigada aumentar, os conflitos sobre o uso de água se gravarão, uma vez que a população está conscientizando sobre a importância da qualidade dos mananciais.

1.3.3 - Conflito pela Água Envolvendo sua Disponibilidade para Consumo Humano

A humanidade já enfrentou diversas crises envolvendo recursos naturais, como, por exemplo, a crise do petróleo. Com o crescimento exponencial da população mundial e degradação do meio ambiente, há uma forte tendência de que as próximas crises envolvam a falta de energia e disponibilidade de água de boa qualidade.

De acordo com Salati et al. (1999), no futuro, os usuários da água para fins doméstico e industrial vão competir cada vez mais com a agricultura irrigada. Para se produzir uma tonelada de grãos são necessárias mil toneladas de água e, para uma tonelada de arroz, duas mil toneladas de água. De acordo com a FAO, a produção de alimentos está cada vez mais dependente da agricultura irrigada e a necessidade de alimentar uma população crescente deverá pressionar mais os recursos hídricos do que os solos.

As grandes cidades, particularmente as megalópoles e as que estão crescendo rapidamente nos países em desenvolvimento, vão exigir enormes esforços para reduzir o

déficit crônico de abastecimento de água. Muitas, como a Cidade do México, vão necessitar implantar um cuidadoso gerenciamento dos aquíferos subterrâneos.

No Brasil, são ainda raros os casos de disputa pela água com a participação dos irrigantes. Pode-se citar os casos dos conflitos ocorridos em Guaíra (SP), Barreiras (Ba), Maracatu (MG), Rio Verde (BA), Jaguaribe (CE), Barretos (SP), Casa Branca (SP) e Araçatuba (SP). Maiores informações sobre estes conflitos podem ser encontradas em Telles (1999).

No futuro próximo, a água para conservação de ecossistemas receberá mais atenção como tema sócio-político. Será, portanto, imprescindível que os novos projetos para atender a demanda de água sejam planejados e administrados dentro de uma perspectiva de sustentabilidade econômica, social e ambiental. A solução vai exigir tanto a exploração cuidadosa de novas fontes quanto medidas para estimular o uso mais eficiente da água. Uma dessas medidas é estabelecer políticas que considerem a água como um bem escasso com valor econômico, e não como um recurso natural infinito e de uso gratuito.

1.4 - Cobrança pelo Uso da Água para Irrigação

Na irrigação, existe muita perda de água devido, principalmente, à baixa eficiência dos sistemas de irrigação e falta de um monitoramento da quantidade de água necessária e aplicada. Todavia, estas causas não justificam as perdas, visto que estas podem ser evitadas pelo uso de um sistema de irrigação mais eficiente e de técnicas de manejo da irrigação. 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 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 institui 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, a 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.

1.5 - Importância do Manejo da Irrigação

A água é um dos fatores mais importantes para a produção das culturas. Além da sua participação na constituição celular e nos diversos processos fisiológicos na planta, ela está diretamente relacionada aos processos de absorção de nutrientes e resfriamento da superfície

vegetal. A crescente demanda de água para os diversos fins, tem tornado o manejo de água um problema complexo em todo o mundo. Os principais aspectos relacionados à este tema envolvem:

- 1) limitado suprimento de água acompanhado por uma crescente demanda,
- 2) poluição das águas,
- 3) elevado custo das estruturas necessárias à distribuição das águas,
- 4) incerteza no mercado internacional em commodities,
- 5) problemas relacionados a lei das águas,
- 6) mudanças institucionais no que se refere ao manejo das águas.

Um dos aspectos mais importantes da irrigação é a reposição da água ao solo em quantidade adequada e na ocasião oportuna. O excesso de irrigação geralmente reduz a produtividade e a qualidade da produção, pode provocar o crescimento excessivo da planta, o retardamento da maturação dos frutos, a lixiviação de nutrientes solúveis (principalmente nitrogênio), queda de flores, maior ocorrência de doenças de solo e distúrbios fisiológicos, maiores gastos com energia e o desgaste do sistema de irrigação.

As quantidades de água aplicada ao solo através da irrigação, são determinados através de como os sistemas de irrigação são manejados. Usualmente, maiores quantidades de água são aplicadas através de sistemas de irrigação de superfície do que sistemas por aspersão e sistemas de irrigação localizados. A quantidade de água consumida na agricultura irrigada, ou o esgotamento dos recursos hídricos no processo hidrológico, não é afetado significativamente pelo sistema de irrigação empregado, ou seja, o sistema de irrigação conduz e entrega a água, mas as culturas é que impõem a quantidade de água a ser consumida. Em muitos casos, o excesso de água aplicado através dos diferentes métodos de irrigação retornam à superfície e subsuperfície. Uma mudança no sistema de irrigação pode afetar a maneira de distribuição de água, bem como sua qualidade mas, geralmente, não afeta o consumo. Entretanto, a mudança ou aprimoramento dos sistemas de irrigação freqüentemente diminui os custos da irrigação. Os rendimentos devem ser maiores que os custos na agricultura irrigada, como em qualquer outro negócio. A irrigação representa a maior parcela dos custos em qualquer lugar que se pratica a agricultura irrigada.

O aumento dos custos da água está levando, cada vez mais, os agricultores a investirem em melhores sistemas de irrigação que proporcionam maior uniformidade de aplicação de água e melhor manejo da lâmina aplicada. Os agricultores devem considerar todas as variáveis que influenciam os custos e rendimentos, e eles continuarão a irrigar se os

rendimentos em função do aumento de produção e da qualidade do produto agrícola compensarem os custos com a irrigação.

Veamos um exemplo simples de cálculo do gasto adicional com energia elétrica, ocasionado pela aplicação de água em excesso. A equação para o cálculo do gasto com o consumo de energia é:

$$G_{en} = (12 \cdot P_i \cdot C_{dem}) + (30 \cdot M_{op} \cdot T_{op} \cdot C_{cons} \cdot P_i) \cdot \left(1 + \frac{ICMS}{100}\right)$$

sendo:

G_{en} – gasto com energia (US\$.ano⁻¹);

P_i – potência instalada (kW instalado.ha⁻¹);

C_{dem} – custo da demanda de energia (US\$.kW instalado⁻¹);

M_{op} – número de meses de operação do sistema de irrigação (meses.ano⁻¹);

T_{op} – tempo de operação do sistema (horas.dia⁻¹);

C_{cons} – custo do consumo de energia (US\$.kW consumido⁻¹);

ICMS – valor do ICMS (%).

Supondo que o agricultor tenha em mãos um projeto de irrigação por aspersão convencional, o qual possui as seguintes informações:

- necessidade de irrigação = 30 mm
- intensidade de aplicação do sistema = 10 mm.h⁻¹
- número de posições da linha lateral = 5 posições.dia⁻¹
- potência instalada = 2 cv.ha⁻¹ = 1,47 kW.ha⁻¹

Considere, ainda, os seguintes dados:

- Meses de operação por ano = 9 meses
- Custo do consumo de energia = US\$ 0,035.kW consumido⁻¹
- Custo da demanda de energia = US\$ 4,11.kW instalado⁻¹
- ICMS = 15%

Calculando o tempo de irrigação por posição da linha lateral:

$$T = \frac{30 \text{ mm}}{10 \text{ mm.h}^{-1}} = 3 \text{ h.posição}^{-1}$$

Para calcularmos o gasto com energia, necessita-se saber o tempo de operação do sistema por dia:

$$T_{\text{op}} = 3 \text{ h.posição}^{-1} \cdot 5 \text{ posições.dia}^{-1} = 15 \text{ h.dia}^{-1}$$

Portanto, o gasto anual com energia elétrica será:

$$G_{\text{en}} = [(12 \cdot 1,47 \cdot 4,11) + (30 \cdot 9 \cdot 15 \cdot 0,035 \cdot 1,47)] \cdot \left(1 + \frac{15}{100}\right) = \text{US\$ } 323 \cdot \text{ano}^{-1} \cdot \text{ha}^{-1}$$

Supondo que o agricultor, para “garantir” que não faltará água para a cultura, resolva estender o período de irrigação para 3,5 h.posição⁻¹:

$$G_{\text{en}} = [(12 \cdot 1,47 \cdot 4,11) + (30 \cdot 9 \cdot 17,5 \cdot 0,035 \cdot 1,47)] \cdot \left(1 + \frac{15}{100}\right) = \text{US\$ } 363 \cdot \text{ano}^{-1} \cdot \text{ha}^{-1}$$

Isso representa um custo adicional de energia elétrica de 12,4%, além dos outros efeitos causados pela aplicação excessiva de água, conforme exposto acima.

1.6 - Novas Áreas de Pesquisa

O manejo e controle da água aplicada através dos sistemas de irrigação, com base em princípios científicos, estão tornando-se cada vez mais importantes, em função da menor disponibilidade dos recursos hídricos e do crescente custo da água utilizada. Competindo com o setor agrícola, o volume de água utilizado na zona urbana tem aumentado anualmente. Existe um problema crescente do comprometimento da qualidade da água, ou seja, da contaminação dos mananciais de água (principalmente água subterrânea), em função do uso indiscriminado de pesticidas e fertilizantes, associados ao manejo incorreto da água aplicada através da irrigação. Para minimizar o efeito desta contaminação, a agricultura irrigada tem

que ser mais eficiente, aplicando a quantidade correta de água para as culturas, no momento certo, para otimizar a produção e proteger o meio ambiente.

Culturas de alto valor comercial, como as hortícolas e frutíferas, quase sempre implicam na utilização de equipamentos e técnicas que garantam uma maior eficiência do uso da água e maior produtividade, principalmente nas proximidades dos grandes centros urbanos. Estas técnicas utilizam sensores instalados no solo ou próximos às plantas, de forma a se obter dados relativos ao solo, planta e clima para a tomada de decisão de quando. Existem no mercado instrumentos que podem ativar automaticamente o sistema de irrigação para aplicar uma determinada lâmina de água, fertilizantes e, possivelmente, pesticidas (químicos e biológicos).

As culturas cultivadas em grandes áreas, aparentemente, não requerem métodos sofisticados como as culturas de alto valor, mas o manejo da água de maneira correta é necessário de forma a obter a produtividade mais econômica. Neste caso, é necessário que medidas rápidas e frequentes sejam tomadas nestas áreas, de maneira que o agricultor possa saber em que condições as culturas se encontram no campo diariamente ou mesmo ao longo do dia. Num futuro não muito distante, para a obtenção destas informações serão necessários a utilização de sensores remotos em aviões e satélites. Aviões operados por empresas de prestação de serviço sobrevoando grandes áreas agrícolas uma ou duas vezes por semana para coletar dados de radiação refletida e emitida pelas culturas poderão ser uma realidade. Estações meteorológicas ligadas em rede em regiões agrícolas possibilitarão consultores, usando sistema geográfico de informação, integrar todas as informações de maneira que cada agricultor afiliado a este serviço poderá saber em que condições se encontram as diferentes culturas no campo. Consultores informarão os agricultores, discutirão as informações e ajudarão na tomada de decisões. Cada vez mais surgirão algoritmos mais eficientes que traduzem as informações, de modo a permitir fácil interpretação e rápida tomada de decisões. O grande desafio para os cientistas é desenvolver novas técnicas de maneira a distinguir o "status" da água na planta e, além disso, detectar o tipo de estresse a que a planta está submetida, seja devido ao excesso ou escassez de água, salinidade, toxicidade, doenças, pragas ou deficiência mineral.

Os agricultores acessarão computadores em suas propriedades e saberão quando devem irrigar, fertilizar ou controlar determinada praga. Eles serão, ainda, capazes de saber se é economicamente viável fazer determinada operação, uma vez que eles terão acesso a modelos econômicos, informações de mercado em tempo real, tendo acesso a preços reais e

esperados para uma determinada cultura. A tecnologia para se alcançar este futuro está disponível, ou muito próximo da disponibilidade. Caberá aos agricultores, cientistas, administradores e políticos torná-los realidade.

1.7 – Manejo da irrigação em ambiente protegido

1.8 -Fertirrigação

2 – RELAÇÃO SOLO-PLANTA-ATMOSFERA

2.1 – Índices Físicos do Solo

O solo, do ponto de vista físico, pode ser considerado como uma mistura porosa de partículas minerais, orgânicas, ar e água com substâncias em dissolução. Nele, as partículas minerais e orgânicas formam uma matriz sólida do conjunto, enquanto que a solução e o ar ocupam os poros deixados pela porção sólida.

2.1.1 – Relação Massa-Volume dos Constituintes do Solo

Na figura abaixo, tem-se o esquema das três fases dos constituintes de um bloco de solo. Várias relações de massa e de volume dos constituintes do solo podem ser definidas a partir do esquema proposto na figura 5.

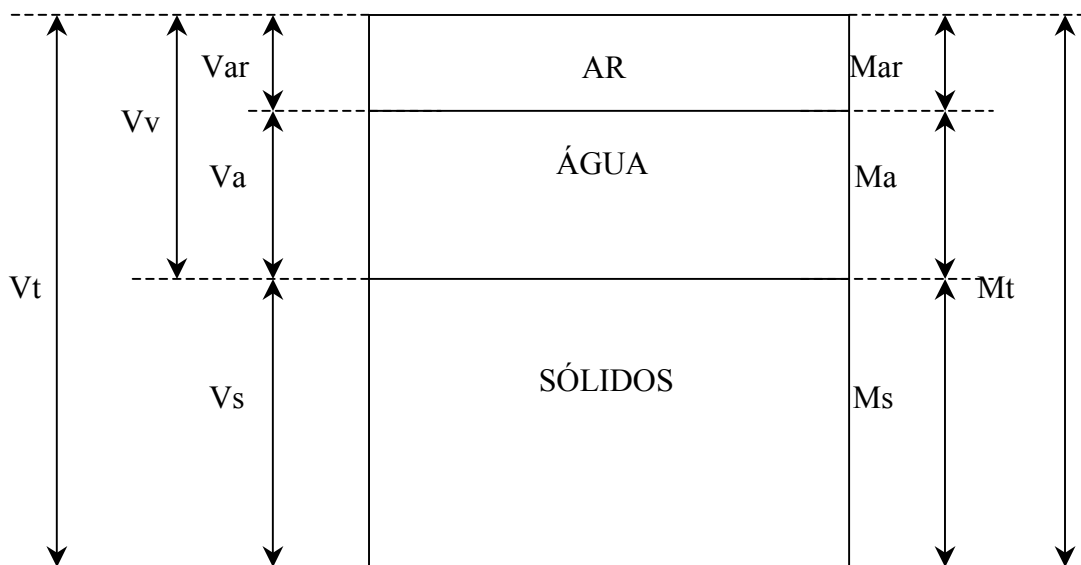


Figura 5 – Representação gráfica da relação massa-volume dos constituintes do solo

em que:

M_{ar} = massa de ar;

M_a = massa de água;

M_s = massa de sólidos;

Mu = massa úmida;

Mt = massa total;

Var = volume de ar;

Va = volume de água;

Vv = volume de poros (vazios);

Vs = volume de sólidos; e

Vt = volume total.

No lado direito da representação gráfica anterior, tem-se a massa de ar (Mar), massa de água (Ma) e massa de sólidos (Ms), sendo que a massa total está representada por (Mt). Desta forma, temos:

$$M_t = M_s + M_a + M_{ar}$$

Entretanto, em comparação com a magnitude de Ms e Ma, a massa do ar torna-se desprezível.

$$M_{ar} = 0 \quad \text{então,} \quad M_t = M_s + M_a$$

O somatório entre a massa de água e a massa de sólidos, é denominada como massa úmida.

$$M_u = M_a + M_s \quad \text{então,} \quad M_t = M_u$$

No lado esquerdo da representação gráfica, tem-se o volume de ar (Var), volume de água (Va), volume de sólidos (Vs) e volume total (Vt). Desta forma temos:

$$V_t = V_s + V_a + V_{ar}$$

O volume de vazios (Vv) ou volume de poros é dado pelo somatório de Var e Va.

$$V_v = V_{ar} + V_a \quad \text{então,} \quad V_t = V_v + V_s$$

Num solo de estrutura rígida, V_v é constante e, portanto, quando V_a aumenta (ou diminui), V_{ar} diminui (ou aumenta) do mesmo valor.

$V_v = \text{constante}$

A massa específica da água ou densidade da água (d_a), é aproximadamente de 1 g.cm^{-3} e é representada pelo quociente entre a massa de água e o volume da água, então tem-se que a massa de água, em gramas, é igual ao volume de água, em cm^3 .

$$d_a = \frac{M_a}{V_a}$$

$$M_a = d_a \cdot V_a$$

$$M_a = 1 \cdot V_a \quad \text{então,} \quad M_a (\text{g}) = V_a (\text{cm}^3)$$

2.1.2 – Densidade dos Sólidos (d_s),

$$d_s = \frac{M_s}{V_s} \quad (\text{g.cm}^{-3})$$

A densidade dos sólidos também é conhecida pelos nomes: densidade de partículas, ou densidade real, ou massa específica dos sólidos.

Esta relação é determinada em laboratório com auxílio de picnômetros. Em função da grande quantidade de quartzo e caulinita, a grande maioria dos solos apresenta valores médios de $2,65 \text{ g.cm}^{-3}$. Este valor aumenta quando o solo contém alta porcentagem de minerais, como dióxido de manganês e dióxido de titânio. A presença de matéria orgânica pode alterar consideravelmente este valor, devido ao seu baixo valor. Para matéria orgânica, d_p é igual a 1,3 a $1,5 \text{ g.cm}^{-3}$.

2.1.3 – Densidade Global do Solo (dg)

$$dg = \frac{Ms}{Vt} \quad (\text{g.cm}^{-3})$$

A densidade global do solo também é conhecida pelos nomes: densidade do solo, ou densidade aparente do solo, ou massa específica do solo.

A densidade global do solo é função da textura, estrutura e grau de compactação do solo. Solos de textura grossa tem seu valor de 1,3 a 1,8 g.cm⁻³, solos de textura fina de 1,0 a 1,4 g.cm⁻³ e orgânicos de 0,2 a 0,6 g.cm⁻³.

Esta relação depende da coleta de amostras indeformadas, a sua determinação normalmente é feito pelo método do torrão ou com a utilização do amostrador de Uhland, que consiste na coleta de amostras em anéis de volume conhecido. Em solos agrícolas este valor está ao redor de 1,3 g.cm⁻³, situação em que ocorre grande restrição ao desenvolvimento radicular.

2.1.4 – Umidade com Base em Massa Seca (U)

$$U = \frac{Mu - Ms}{Ms} \quad \therefore \quad U = \frac{Ma}{Ms} \quad (\text{g de água / g de solo})$$

2.1.5 – Umidade com Base em Volume ou Volumétrica (θ)

$$\theta = \frac{Va}{Vt}$$

Na equação acima, substituindo-se Va e Vt em função de da e dg, e considerando-se da = 1 g.cm⁻³, tem-se:

$$\theta = \frac{\frac{Ma}{Ms}}{dg} \quad \therefore \quad \theta = \frac{Ma}{Ms} \cdot \frac{dg}{da} \quad \therefore \quad \theta = \frac{Ma}{Ms} \cdot \frac{dg}{1} \quad \therefore \quad \theta = \frac{Ma}{Ms} \cdot dg$$

$$\theta = U \cdot dg \quad (\text{cm}^3 \text{ de } \acute{\text{a}}\text{gua} / \text{cm}^3 \text{ de solo})$$

A umidade com base em volume é muito útil nos assuntos relacionados à irrigação, uma vez que permite a visualização da lâmina de água armazenada em uma determinada profundidade de solo. Por exemplo, a umidade volumétrica de 35% a 30 cm de profundidade, corresponde a 35 cm³ de água para cada cm³ de solo, ou seja, neste dado momento existe armazenado no solo uma lâmina de 10,5 cm de água.

2.1.6 – Porosidade do Solo (η)

$$\eta = \frac{V_v}{V_t}$$

Sendo $V_v = V_{ar} + V_a$, tem-se:

$$\eta = \frac{V_{ar} + V_a}{V_t} \quad \therefore \quad \eta = \frac{V_t - V_s}{V_t} \quad \therefore \quad \eta = 1 - \frac{V_s}{V_t}$$

Expressando-se V_s em função de ds , e V_t em função de dg , tem-se:

$$\eta = 1 - \frac{dg}{ds}$$

Considerando-se valores médios de dg e ds iguais a 1,3 e 2,65 g.cm⁻³, indicam porosidade de 0,5; ou seja, o volume ocupado pelo ar e água está ao redor de 50%.

2.1.7 – Porosidade Livre de Água (ϵ)

$$\epsilon = \frac{V_{ar}}{V_t} \quad \therefore \quad \epsilon = \frac{V_v - V_a}{V_t}$$

$$\epsilon = \eta - \theta$$

Esta relação tem grande importância no controle da água em projetos de irrigação e drenagem. No que diz respeito à irrigação, quando se aplica uma determinada lâmina é necessário que se avalie quanto tempo será necessário para que uma porcentagem de poros do solo esteja na condição de não saturação, ou seja, qual a porosidade livre de água. Para a maioria das culturas 6% de porosidade livre de água permite o aproveitamento do oxigênio pelo sistema radicular. Na literatura encontram-se vários trabalhos que relatam os danos causados ao sistema quando sob condições de solo saturado por determinado tempo.

2.1.8 – Porcentagem de Saturação (ps)

$$ps = \frac{V_a}{V_v}$$

$$ps = \frac{\theta}{\eta}$$

A porcentagem de saturação reflete diretamente qual a porcentagem da porosidade do solo ocupado com água.

2.1.9 – Exercícios sobre Relação Solo-Planta-Atmosfera

- 1) Uma amostra de solo de 1000 cm^3 tem massa úmida igual 1460 g e peso seco de 1200 g. sabendo-se que a d_s é $2,65 \text{ g.cm}^{-3}$, calcular:
 - a) umidade com base em massa seca;
 - b) umidade volumétrica;
 - c) densidade global do solo;
 - d) porosidade do solo;
 - e) porosidade livre de água; e
 - f) porcentagem de saturação.

- 2) Um cilindro de solo de 0,10 m de diâmetro e 0,12 de altura tem uma massa de 1,7 kg dos quais 0,26 kg são água. Assumindo que o valor da densidade da água seja de 1 g.cm^{-3} e o da densidade dos sólidos seja $2,65 \text{ g.cm}^{-3}$, calcular:
- a) umidade com base em volume;
 - b) umidade com base em massa;
 - c) densidade global do solo;
 - d) porosidade do solo;
 - e) porosidade livre de água; e
 - f) porcentagem de saturação.
- 3) Foi coletada 210 kg de solo úmido. O valor da umidade do solo foi de $0,19 \text{ g.g}^{-1}$. Calcular o valor da massa de sólidos e da massa de água.
- 4) Um pesquisador necessita de exatamente 0,1 kg de um solo seco e dispõe de uma amostra de solo úmido com $w = 0,25$ e $d_s = 2,65 \text{ g.cm}^{-3}$ e $d_m = 1,2 \text{ g.cm}^{-3}$. Quanto solo úmido ele deve pesar para obter a massa de solo seca desejada?

2.1.10 - Métodos de Determinação da Umidade do Solo

A determinação do conteúdo de água no solo é de fundamental importância para a prática da irrigação, sendo utilizada em estudos de movimento de água no solo, disponibilidade de água no solo, erosão, época e quantidade de água a ser aplicada e muitas outras aplicações.

Existem diferentes métodos que são utilizados para efetuar essa determinação, todos com algumas limitações no que diz respeito à precisão, ao custo, ao tempo e ao grau de dificuldade no processo de execução. A opção por um determinado método varia de acordo com a finalidade, os objetivos e as disponibilidades instrumentais existentes. Dentre os principais destacam-se: método gravimétrico direto (método padrão da estufa); método do forno microondas; método do álcool; método da “frigideira”; método das pesagens; método do balão volumétrico; método do acetileno (speed) e método da moderação de nêutrons.

A) Métodos Termogravimétricos

- **Método Gravimétrico Direto**

É um método direto, bastante preciso e consiste em se pesarem amostras de solo úmidas e secas. A secagem da amostra é efetuada em estufa a 105 - 110 °C até peso constante. É conhecido, também, como método padrão da estufa (Bernardo, 1986; Klar, 1988; Klar, 1991).

Material a ser utilizado:

- latinhas de alumínio com capacidade para 50 a 200 g de solo;
- estufa a 105 – 110 °C;
- balança com sensibilidade de 0,01 g; e
- trado amostrador.

Metodologia:

- pesar a latinha de alumínio vazia, obtendo-se a tara;
- retirar amostras do solo com trado, enxadão ou outro instrumento, atentando-se para que as amostras de diferentes horizontes e/ou profundidades não sejam misturadas durante a retirada;
- colocar parte da amostra de solo na latinha, fechando-se bem, para que não haja saída de vapor de água;
- pesar o conjunto, obtendo-se o peso úmido (Mu);
- levar à estufa a 105 – 110 °C por 24 a 48 horas (até peso constante);
- pesar novamente o conjunto, obtendo-se o peso seco (Ms); e
- determinar o conteúdo de água da amostra:

- Com base em peso seco (U):

$$U = \frac{Mu - Ms}{Ms} \quad \therefore \quad U = \frac{Ma}{Ms} \quad (\text{g de água / g de solo})$$

- Com base em volume (θ):

$$\theta = U \cdot dg$$

Apesar de o cálculo da umidade, em peso, ser muito simples, é desejável que o cálculo da umidade seja realizado com base em volume, onde tem-se a quantidade de água em determinado volume de solo, permitindo convertê-la facilmente em altura de lâmina de água, por unidade de profundidade de solo, que é um dado muito usado em irrigação. Este método apresenta um inconveniente para o manejo da irrigação, uma vez que só permite o conhecimento do conteúdo de água do solo cerca de 48 horas após a amostragem.

O método padrão da estufa proporcionou o surgimento de uma série de outros métodos alternativos, que variam entre si em função da fonte de calor utilizada para a eliminação do conteúdo de água da amostra de solo. Dentre eles destacam-se: o método do forno microondas, o método do álcool e o método da frigideira, dentre outros.

- **Método do Forno Microondas**

É o método que utiliza o forno microondas comercial para a secagem das amostras de solo. Apresenta como vantagem principal a redução no tempo de secagem da amostra, o qual varia em função do número de amostras colocadas para secar, do tamanho da amostra, da umidade, do tipo de solo e da potência do forno microondas utilizado. Para fins de manejo de irrigação em uma determinada área, é aconselhável que seja feita um estudo prévio, com os diferentes tipos de solo existentes na propriedade, para a definição dos parâmetros acima mencionados, visando a sua calibração com o método padrão da estufa. Neste contexto, Andrade Júnior et al. (1996) estabeleceram tempos máximos de secagem em torno de 25 minutos para amostras com peso de 200 g e 30% de umidade em solo Areia Quartzosa, Latossolo Amarelo e Aluvial.

Material a ser utilizado:

- a) latinhas de alumínio com capacidade para 50 a 200 g de solo;
- b) beakers de vidro com capacidade para 100 a 200 mL;
- c) forno microondas comercial;

- d) balança com sensibilidade de 0,01 g; e
- e) trado amostrador.

Metodologia:

- a) retirar amostras do solo com trado, enxadão ou outro instrumento, atentando-se para que as amostras de diferentes horizontes e/ou profundidades não sejam misturadas durante a retirada;
- b) colocar parte da amostra de solo na latinha, fechando-se bem, para que não haja saída de vapor de água;
- c) pesar o becker de vidro vazio, obtendo-se a tara;
- d) transferir parte da amostra de solo para o becker de vidro;
- d) pesar o conjunto, obtendo-se o peso úmido (M_u);
- e) levar ao forno microondas (até peso constante);
- f) pesar novamente o conjunto, obtendo-se o peso seco (M_s); e
- g) determinar o conteúdo de água da amostra conforme as equações do método anterior.

- **Método do álcool**

É o método que consiste em se adicionar álcool etílico, metílico ou propílico em excesso à amostra de solo, o qual a seguir é queimado, proporcionando a remoção da água do solo. Apresenta uma precisão que varia de 0,5 a 1% do conteúdo de água da amostra, a qual diminui com o aumento do teor de matéria orgânica. Desde que foi primeiramente proposto por Bouyoucos, tem sido estudado e recomendado como um método rápido, requerendo de 0,5 a 1,0 mL de álcool por grama de solo (Pruski et al., 1986).

Material a ser utilizado:

- a) álcool 96 ° GL;
- b) balança com sensibilidade de 0,01 g;
- c) caixa de fósforo; e
- d) latinha de alumínio.

Metodologia:

- a) coloca-se a amostra de solo úmido na latinha de alumínio, devidamente tarada;
- b) pesa-se o conjunto, determinando-se o peso úmido da amostra (M_u);
- c) adiciona-se álcool à amostra na proporção de 0,2 mL por grama de solo úmido;
- d) faz-se a homogeneização da mistura solo-álcool;
- e) procede-se à queima do álcool; e
- f) repete-se as etapas (c) , (d) e (e) mais duas vezes;
- g) Após o resfriamento da amostra é efetuada pesagem do conjunto, obtendo o peso seco (M_s); e
- h) Faz-se o cálculo do conteúdo de água da amostra através das equações do Método Gravimétrico Direto.

- **Método da frigideira**

Este método consiste em efetuar a secagem do solo utilizando-se como fonte de calor um fogareiro a gás butano e acondicionando-se a amostra em uma frigideira. É um método muito simples e prático de determinação, mas que apresenta limitações quanto à precisão (Pruski et al., 1986).

Material a ser utilizado:

- a) fogareiro a gás butano;
- b) frigideira de cozinha ou outro artefato que a substitua;
- c) balança com sensibilidade de 0,01 g; e
- d) caixa de fósforo ou isqueiro.

Metodologia:

- a) coloca-se a amostra de solo úmido na frigideira e pesa-se o conjunto (M_u);
- b) leva-se a frigideira ao fogareiro, revolvendo-se a amostra cuidadosamente durante a secagem;
- c) o tempo de secagem é controlado pela observação visual de alterações ocorridas na amostra;

- d) após a secagem, espera-se a frigideira esfriar e pesa-se, o conjunto, obtendo-se o peso seco (Ms); e
- e) a determinação do conteúdo de água da amostra é efetuada pelas equações do Método Gravimétrico Direto.

B) Método das Pesagens

É um método que baseia-se na saturação da amostra de solo, contrariamente aos métodos anteriormente, que promovem o secamento da amostra. Foi desenvolvido por Klar et al. (1966) e fundamenta-se na obtenção de um padrão, que servirá de referência às demais determinações. É um método simples e, após obtenção do padrão e da densidade de partículas do solo, necessita apenas de balança com sensibilidade de 1 g, sendo, portanto, barato e, para fins práticos apresenta boa precisão.

Material a ser utilizado:

- a) erlenmeyer ou balão volumétrico de 500 mL;
- b) balança com sensibilidade de 0,1 g;
- c) bomba de vácuo elétrica ou manual;
- d) trado amostrador;
- e) latinhas de alumínio; e
- f) estufa a 105 – 110 °C.

Metodologia:

Obtenção do padrão:

- a) adicionar água até aproximadamente a metade do volume do erlenmeyer ou balão de 500 mL;
- b) colocar 100 g do solo seco em estufa a 105 °C;
- c) agitar bem para garantir uma boa homogeneização da mistura água-solo;
- d) adaptar uma bomba de vácuo elétrica ou manual para facilitar a retirada do ar;
- e) completar o volume do frasco com água até a marca dos 500 mL; e

f) pesar o conjunto (M), considerado como padrão para o solo em questão, o qual é determinado apenas uma vez.

Determinação do conteúdo de água:

a) repete-se com a amostra de solo que se quer determinar a umidade os mesmos passos utilizados para a obtenção do padrão (exceto o item b), obtendo-se o peso M' . O cálculo da umidade com base em peso úmido (U_w) é efetuado por meio da equação abaixo:

$$U_w = (M - M') \cdot \left(\frac{d_s}{d_s - 1} \right)$$

em que:

d_s = densidade de partículas do solo, geralmente, igual a $2,65 \text{ g.cm}^{-3}$.

Para a obtenção do conteúdo de água com base em peso seco ($U\%$) pode ser utilizada a seguinte equação:

$$U (\%) = \frac{100 \cdot U_w}{100 - U_w}$$

C) Método do Balão Volumétrico

É semelhante ao método das pesagens, porém a determinação do conteúdo de água na amostra é efetuado com base na variação de volume medida durante o processo. É um método simples e rápido, mas apresenta baixa precisão.

Material a ser utilizado:

- a) balão volumétrico com capacidade de 100 mL;
- b) proveta graduada de 50 mL;
- c) balança com sensibilidade de 0,01 g; e
- c) tubo graduado.

Metodologia:

- a) coloca-se 20 g da amostra de solo úmido no balão volumétrico;
- b) adiciona-se 50 mL de água no balão;
- c) agita-se o balão para saturar a amostra e eliminar o ar;
- d) coloca-se o tubo graduado no balão volumétrico, ajustando-se bem para não ocorrer vazamentos de água;
- e) adiciona-se mais 50 mL de água no balão;
- f) proceder a leitura no tubo graduado para verificar o aumento de volume que ultrapassa os 100 mL; e
- g) calcula-se o conteúdo de água da amostra por meio da equação abaixo:

$$U_w = \frac{Ma}{20 - Ma} \cdot 100$$

em que:

U_w = conteúdo de água da amostra de solo com base em peso úmido (%); e

Ma = massa de água para 20 g de solo úmido (g), obtida pela seguinte equação.

$$Ma = \frac{\Delta V \cdot ds - Mu}{ds - 1}$$

em que:

ΔV = variação de volume medida no tubo graduado (mL);

ds = densidade de partículas ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$); e

Mu = massa úmida da amostra de solo (20 g).

D) Método do Acetileno

Fundamenta-se na reação da água com o carbureto de cálcio (CaO_2), que colocado em excesso, reage com a água existente na amostra de solo produzindo gás acetileno (C_2H_2): $\text{CaO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CaO} + \text{C}_2\text{H}_2$. Como a amostra se encontra em um recipiente fechado hermeticamente, haverá aumento na pressão (que será lida em um manômetro), a qual será proporcional ao conteúdo de água da amostra de solo.

Normalmente, os aparelhos são acompanhados por uma tabela que relaciona a pressão com o teor de água da amostra para determinadas quantidades fixas de solo. Quanto mais arenoso for o solo, maior deverá ser a massa de solo que deverá ser utilizada, devido ao fato de o manômetro possuir uma pressão limitada.

Caso o aparelho não possua uma tabela que o acompanhe, é necessário elaborá-la usando o método gravimétrico padrão como referência, a partir de solos de diferentes texturas e massas.

Material a ser utilizado:

- a) recipiente hermeticamente ligado a um manômetro;
- b) balança com sensibilidade de 0,1 g;
- c) ampolas de carbureto de cálcio;
- d) esferas metálicas;
- e) tabela de conversão de pressão em conteúdo de água do solo; e
- f) instrumentos para retirada e preparo da amostra (trado, espátula, pincel, etc).

Metodologia:

- a) pesar uma determinada quantidade de solo úmido;
- b) colocá-lo no recipiente, na seguinte ordem: amostra de solo, esferas e ampola de carbureto;
- c) fechar o recipiente e agitá-lo violentamente até a estabilização da pressão no manômetro, para que ocorra reação do carbureto com toda a água da amostra;
- d) fazer a leitura da pressão no manômetro; e
- e) fazer a conversão da pressão em conteúdo de água da amostra através da tabela.

E) Método da Moderação de Nêutrons

Essa metodologia baseia-se na interação entre o conteúdo de água do solo e a dissipação de nêutrons com o meio. Existe uma estreita relação entre esse poder dissipador e o conteúdo de água do solo, pois depende diretamente da quantidade de átomos de hidrogênio, que têm a habilidade de moderar eficientemente a energia cinética dos nêutrons rápidos por possuírem a mesma massa que estes, proporcionando choques elásticos.

O meio moderador recebe os nêutrons rápidos, moderando-os e passando-os a nêutrons térmicos (energia de 0,005 a 0,5 eV) por choques elásticos, principalmente com átomos de hidrogênio. Após choques sucessivos, os nêutrons atingem a velocidade de equilíbrio térmico (0,025 eV). Tem-se então o fenômeno da difusão. Em seguida, o nêutron é absorvido pelo meio havendo dissipação. O processo envolve três etapas: moderação, difusão e absorção de nêutrons.

O equipamento medidor, geralmente denominado “bomba de nêutrons”, consiste em duas partes principais: sonda e contador. A sonda, que contém uma fonte de nêutrons rápidos e um detector de nêutrons lentos, é introduzida em um tubo de alumínio ou PVC, previamente colocado no solo. O detector mais efetivo é um cristal cintilador. Os nêutrons lentos incidem sobre o cristal, originando um fóton luminoso que excita a célula fotomultiplicadora, dando um impulso elétrico que é registrado no contador. Para fins práticos, considera-se um alcance médio de 25 cm, porém, a maior incidência ocorre a uma distância de, aproximadamente, 5 cm em torno da fonte de nêutrons.

As fontes mais comuns de nêutrons rápidos são uma mistura de Rádio-Berílio. O Berílio pulverizado é bombardeado por partículas emitidas pelo Rádio, resultando nêutrons rápidos. Outras fontes existem como o Amerício-Berílio e o Polônio-Berílio.

É um método consagrado para uso no campo, cujas principais limitações são: o preço elevado; pode ser perigoso, se não devidamente manuseado; os resultados podem ser mascarados por outras fontes de hidrogênio (como matéria orgânica) ou mesmo outros elementos como, o cloro, o ferro e o boro. Entretanto, apresenta como vantagens: a precisão dos resultados; o tempo de obtenção do resultado; a possibilidade de repetição da determinação da umidade em um mesmo local rapidamente e sem alterar a estrutura natural do solo.

Salienta-se que é necessário a obtenção prévia de uma curva de calibração da sonda de nêutrons para a condição do solo onde será utilizada. Essa calibração é normalmente

efetuada com amostras de solo retiradas próxima ao tubo de acesso e nas profundidades de interesse, com posterior determinação do conteúdo de água através do método gravimétrico padrão. É recomendável que a calibração seja realizada para cada profundidade de leitura e em uma grande faixa de variação de umidade no solo.

Material a ser utilizado:

- a) sonda de nêutrons;
- b) tubos de acesso de alumínio ou PVC com tapas;
- c) trado de solo; e
- d) curva de calibração da sonda de nêutrons.

Metodologia para obtenção das leituras:

- a) coloca-se a sonda de nêutrons sobre o tubo de acesso;
- b) introduz-se a fonte a nêutrons no tubo de acesso até a profundidade que representa a média da camada desejada para a leitura da umidade. O ajuste da profundidade é feito por meio de presilhas presas no cabo da sonda;
- c) liga-se a sonda de nêutrons, aperta-se o botão para que ocorra a emissão dos nêutrons e espera-se o “bip” sinalizador para que a leitura seja efetuada no mostrador;
- d) divide-se esta leitura atual pela leitura padrão, a qual é obtida com a fonte de nêutrons disposta dentro do corpo da sonda, obtendo-se, assim a chamada razão de contagem;
- e) correlaciona-se a razão de contagem com o conteúdo de água do solo por meio da curva de calibração; e
- f) é aconselhável realizar-se três leituras em cada profundidade para a obtenção da umidade média da camada desejada.

2.2 – Água Disponível

A definição do manejo racional deve ser imprescindível na prática da irrigação, pois possibilita otimizar as produtividades e a eficiência do uso da água e minimizar os custos de investimentos e manutenção dos sistemas de rega, mantendo o solo e a cultura em condições fitossanitárias desejáveis, diminuindo o impacto ambiental.

Devido a sua maior simplicidade, normalmente o manejo da irrigação é estabelecido a partir de constantes estáticas da água no solo envolvidos no conceito de disponibilidade hídrica. Essas constantes são utilizadas como grandezas absolutas e muitas vezes os seus usuários não percebem as limitações desses atributos.

2.2.1 - Capacidade de Campo

A utilização da capacidade de campo, embasada em seu antigo conceito, tem sido intensamente questionada. No passado, capacidade de campo era considerada uma grandeza física que representava a quantidade de água retida no solo, depois que o excesso hídrico gravitante houvesse sido drenado e a taxa de drenagem livre, decrescido acentuadamente (Veihmeyer & Hendrickson, 1931). Atualmente, esse atributo tem sido melhor aceito como comportamento dinâmico do perfil do solo em relação à distribuição de água e não uma característica intrínseca ao mesmo, sendo variável no tempo e no espaço.

A maneira mais precisa de se determinar capacidade de campo é estabelecer “in situ” a umidade do solo, quando a drenagem interna atinge níveis que possam ser considerados desprezíveis. No entanto, existe grande dificuldade em se estabelecer o tempo final da drenagem livre, critério empírico que varia entre os diversos autores. Marshall & Stirk (1949) concluíram que o tempo final da drenagem livre, para solos arenosos e argilosos, foi de um e cinco dias, respectivamente. Segundo Reichardt (1988), esse período é de dois a três dias para solos arenosos e de quatro a sete dias para os argilosos. Em solos arenosos, Borges (1979) verificou não haver tempo fixo para atingir esse período.

Na prática, o usual é associar capacidade de campo à quantidade hídrica retida num potencial mátrico da água no solo preestabelecido, em geral -10 e -33 kPa, para solos de textura grossa e fina, respectivamente (Associação Brasileira de Irrigação e Drenagem, 1978 e Bernardo 1984). No entanto, conforme Van Wanbeke (1974), capacidade de campo tem sido relacionada a tensões que variam de -5 a -33 kPa, sendo freqüente associá-la a -10 kPa, valor adotado em países com Austrália, Canadá e Reino Unido (El-Swaify, 1980). Segundo Reichardt (1988), a tendência atual é considerar como capacidade de campo a umidade do solo no potencial mátrico -10 kPa. Borges (1979), para solos franco-arenosos e franco-argilosos, relacionou capacidade de campo às tensões -10 e -40 kPa. Para Podzólico Vermelho-Amarelo distrófico e Latossolo Roxo distrófico Argiloso, Righes & Veiga (1975) recomendam avaliar capacidade de campo no potencial mátrico -6 kPa. Em Latossolo Roxo

distrófico, Freire (1979) e Ferreira & Marcos (1983) observaram melhor correlação entre capacidade de campo e as tensões -7 e -6 kPa, respectivamente. Para essa mesma classe de solo, Fietz & Hernani, 1992 verificaram que o potencial mátrico -10 kPa foi o que melhor estimou a capacidade de campo, recomendando utilizá-lo como limite superior de água disponível.

Segundo Pizarro (1990), a microporosidade do solo tem maior influência na capacidade de campo que a macroporosidade e, conseqüentemente, esse atributo depende mais da textura que da estrutura, podendo ser estimada pela curva característica através de amostras deformadas. Segundo o mesmo autor, a capacidade de campo é mais facilmente determinada em solos de textura mais grossa, pois nesses solos os macroporos se esvaziam mais rapidamente e o momento de drenagem livre desprezível torna-se mais evidente.

2.2.2 - Ponto de Murcha Permanente

O ponto de murcha permanente é a umidade do solo, na qual as plantas experimentam perdas de turgescência das folhas, da qual não se recuperam quando colocadas num ambiente escuro e saturado. Representa a umidade mínima disponível no solo para o desenvolvimento das plantas (Briggs & Shantz, 1912). De acordo com esse conceito, introduzido no início do século, o ponto de murcha permanente é uma grandeza física de um solo que representa a umidade retida num potencial mátrico de aproximadamente -1,5 MPa. No entanto, vários autores, como Slatyer (1957), têm demonstrado que o ponto de murcha permanente pode variar com as espécies, idade das mesmas e condições ambientais.

De acordo com Israelsen & Hansen (1962), o potencial mátrico no qual o ponto de murcha permanente ocorre pode variar entre -0,7 a -4,0 MPa e depende do uso consuntivo, da cultura, do conteúdo salino e da textura do solo. Segundo esses autores, com aumento da temperatura e do uso consuntivo, o ponto de murcha permanente ocorrerá em tensões significativamente inferiores e, portanto, com maior umidade do solo.

Assim como capacidade de campo, o ponto de murcha permanente representa um estado dinâmico, cujo o equilíbrio é difícil de ser alcançado. Em ambos atributos, este estado de equilíbrio é atingido quando o movimento da água no solo pode ser considerado desprezível.

A determinação do ponto de murcha permanente é mais difícil que a da capacidade de campo, pois envolve a condutividade hidráulica do solo quando o mesmo está muito seco e

o fluxo praticamente inexistente. O método direto ou fisiológico, empregado por Briggs & Shantz (1912), é o padrão para se determinar o ponto de murcha permanente, sendo trabalhoso e exigente em tempo. Nesse método, as amostras de solo, após serem destorroadas e peneiradas, são colocadas em vasos. Em seguida, faz-se a semeadura, geralmente com girassol. O solo deve ser mantido com boas condições de umidade até que a planta tenha dois ou três pares de folhas. Atingida esta condição, o umedecimento é suspenso e a superfície do solo coberta com cartolina parafinada, deixando-se apenas um orifício para a passagem da haste da planta. Quando houver a primeira murcha, a planta deve ser colocada num ambiente úmido e escuro por 12 horas. Esse procedimento tem continuidade até que a planta atinja a sua murcha máxima e irreversível, sendo esta umidade considerada como ponto de murcha permanente.

Sykes (1969), determinou o ponto de murcha permanente de dois solos, utilizando cinco espécies vegetais (Tabela 9). Os resultados variaram entre -0,7 (girassol) e -3,9 MPa (capim-trigo). Somente o tabaco, no solo franco-argilo-siltoso, e o milho, no solo franco, apresentaram resultados relativamente próximos do esperado (-1,5 MPa), evidenciando diferenças altamente significativas entre os solos, as espécies e a adaptação das plantas ao ambiente.

Tabela 9 - Potencial mátrico no ponto de murcha permanente (PMP) de dois solos, determinados com diferentes espécies vegetais.

ESPÉCIE	SOLO	POTENCIAL MÁTRICO NO PMP (MPa)
Girassol (<i>Heliantus annuus</i>)	Franco ¹	-0,70
	Franco-argilo-siltoso ²	-1,10
Tabaco (<i>Nicotiana</i> sp)	Franco	-1,05
	Franco-argilo siltoso	-1,61
Milho (<i>Zea mays</i>)	Franco	-1,45
	Franco-Argilo-siltoso	-2,14
Cassia ³ (<i>Cassia fasciculada</i>)	Franco	-2,30
	Franco-argilo-siltoso	-3,47
Capim-trigo ³ (<i>Agropyron</i> sp)	Franco	-2,05
	Franco-argilo-siltoso	-3,86

Fonte: Sykes (1969)

¹Média condutividade hidráulica

²Alta condutividade hidráulica

³Espécie xerófito

2.2.3 - Estimativa da Disponibilidade Hídrica

Medidas da capacidade de campo “in situ” e do ponto de murcha permanente determinadas pelo método fisiológico são muito trabalhosas e exigentes. Na prática o usual associar esses atributos à umidade retida em certos potenciais mátricos da curva característica da água do solo, normalmente, -100 kPa (capacidade de campo) e -1,5 MPa (ponto de murcha permanente). No entanto, a determinação da curva característica também apresenta dificuldades, pois necessita de equipamentos nem sempre disponíveis em laboratórios de física do solo (funil de placa porosa ou mesa de tensão e câmara de pressão).

Essas dificuldades têm levado ao uso indiscriminado de recomendações genéricas de disponibilidade hídrica, normalmente baseadas em solos de regiões de clima temperado, tais como as apresentadas por Israelsen & Hansen (1962), Doorenbos & Pruitt (1979), Bernardo (1984) e Reichardt (1987).

Metodologias simplificadas de determinação desses parâmetros podem fornecer estimativas razoáveis desses atributos, normalmente mais próximos da realidade do que o simples uso de tabelas de recomendações, e atenuar este problema. Arruda (1987), relacionou a disponibilidade hídrica de oito classes de solos, determinados na curva de retenção, com a textura do solo. O autor sugere duas equações para estimar esses atributos a partir da granulometria, ou seja:

$$CC = 3,1 - 0,629 \cdot X - 0,0034 \cdot X^2 \quad (R^2 = 0,908)$$

$$PMP = 398,9 \cdot X / (1308,1 + X) \quad (R^2 = 0,961)$$

em que:

CC = capacidade de campo (% massa);

PMP = ponto de murcha permanente (% massa);

X = teor de silte mais argila (%).

2.2.4 - Umidade Crítica

Segundo Hillel (1970), o conceito de disponibilidade hídrica no solo foi durante muitos anos motivo de controvérsia entre os seguidores de diferentes escolas (Figura 6). Uma

primeira escola afirmava que a água está igualmente disponível entre a capacidade de campo e o ponto de murcha permanente e as funções da planta prosseguem normalmente enquanto a umidade do solo permanecer acima desse ponto. Uma segunda escola defendia a idéia de que a disponibilidade hídrica diminui gradualmente com o decréscimo do teor de água e que as plantas passam a sofrer déficit hídrico muito antes de começar a murchar. Uma terceira escola, introduzindo o conceito de umidade crítica, afirmava que a disponibilidade de água no solo é igual desde a capacidade de campo até uma certa umidade, a partir da qual as plantas começam a sofrer déficit hídrico, reduzindo o seu potencial produtivo.

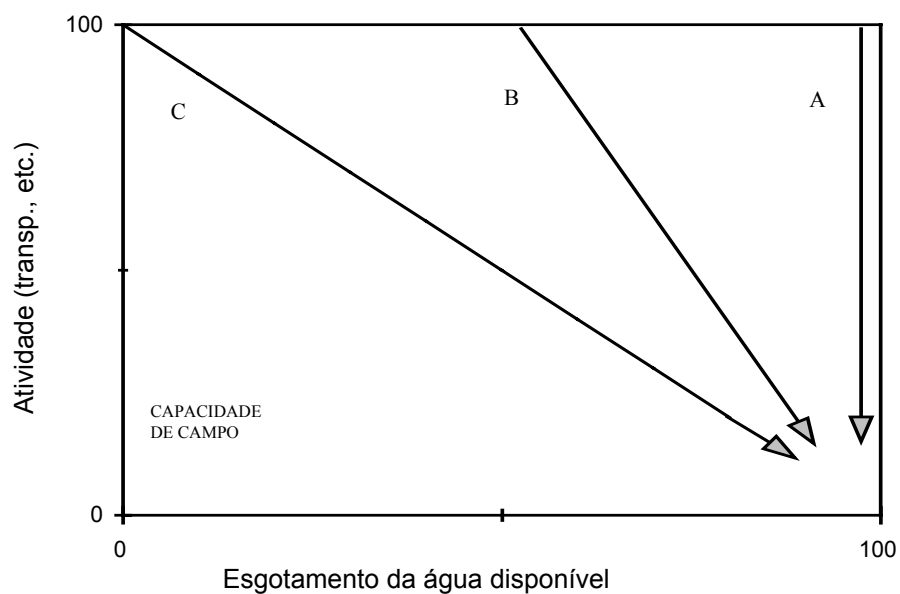


Figura 6 - Três hipóteses clássicas da disponibilidade de água para as plantas

Portanto, umidade crítica pode ser entendida como o nível mínimo de umidade que um solo deve atingir para que se possa obter a máxima produtividade de uma cultura. O seu conhecimento é de extrema importância no manejo da irrigação, pois possibilita definir quando e quanto irrigar.

Existem duas maneiras clássicas para se estabelecer a umidade crítica e, conseqüentemente, o momento da irrigação: (1) através do fator de disponibilidade hídrica e (2), de forma indireta, através do potencial mátrico crítico.

A) Fator de Disponibilidade Hídrica

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 ou a evapotranspiração real (ET_a) torna-se inferior à ET_m. A fração da água total disponível que pode ser utilizada sem que a ET_a seja inferior à ET_m, é definida como **fator de disponibilidade hídrica (p)**. Assim, quando a evapotranspiração é pouca, a água do solo pode estar disponível a níveis bem baixos de umidade. Inversamente, a 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.

O valor de p 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 ET_a seja inferior à ET_m. As culturas podem ser agrupadas de acordo com o fator p (Tabela 10). 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 p pode variar com o período vegetativo e geralmente é maior na fase de maturação devido à baixa evapotranspiração (ET_m).

Para condições de elevada ET_m, p é menor e o solo está relativamente úmido quando ET_a torna-se inferior à ET_m. Quando comparado na situação oposta, ou seja, baixos níveis de ET_m. Portanto o valor de p varia com a magnitude de ET_m (Tabela 11).

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 p são maiores nos solos de textura mais grossa do que nos de textura mais fina.

Tabela 10 - Grupos de culturas de acordo com a utilização da água do solo.

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

Fonte: Doorenbos & Kassam (1979b)

Tabela 11 - Fator de disponibilidade hídrica (p) para grupos de cultura e evapotranspiração máxima (ETm).

GRUPO	ETm (mm.dia ⁻¹)							
	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0,50	0,42	0,35	0,30	0,25	0,22	0,20	0,20
2	0,67	0,57	0,47	0,40	0,35	0,32	0,27	0,25
3	0,80	0,70	0,60	0,50	0,45	0,42	0,37	0,35
4	0,87	0,80	0,70	0,60	0,55	0,50	0,45	0,42

Fonte: Doorenbos & Kassam (1979a)

Bailey (1990), comenta que a umidade crítica dos solos tem sido estabelecida para grupos de culturas e descreve duas metodologias de determinação para culturas isoladas. A primeira, consiste de uma série de tratamentos irrigados a diferentes níveis de déficit hídrico. Esses experimentos, quando bem conduzidos, proporcionam informações precisas da umidade crítica. No entanto, são muito suscetíveis às condições climáticas, principalmente à chuva. Num segundo tipo de experimento, tratamentos irrigados e sem irrigação são conduzidos em condições de umidade controlada. A redução do crescimento das culturas irrigadas é considerada como o ponto de início da umidade crítica no solo.

De acordo com Pizarro (1990), era muito comum definir como momento de irrigação quando a umidade do solo representava uma determinada fração de água disponível na zona radicular da cultura, normalmente 1/3 da água disponibilidade hídrica total. O autor faz algumas considerações a respeito desse manejo simplificado da irrigação. Primeiro, não se

considerava o tipo de cultura. As culturas respondem maneira diferente aos níveis de umidade compreendidos entre a capacidade de campo e o ponto de murcha permanente. Ao se irrigar com 1/3 da água disponível, supunha-se que todas as culturas estavam com o mesmo estado de umidade no solo, ignorando suas diferentes tolerâncias ao déficit hídrico. Em segundo lugar, mesmo que todas as culturas tivessem a igual tolerância ao déficit hídrico, deve-se considerar que na mesma umidade, os solos retêm a água com diferentes potenciais mátricos. Finalmente, deve se considerada a salinidade dos solos: pois quanto maior o conteúdo de sais na solução do solo, menos deve-se permitir a redução da umidade a fim de evitar a redução do potencial osmótico que exigiria esforços adicionais no mecanismo de absorção de água pelas raízes. O autor conclui que o momento da irrigação deve ser definido em termos do potencial da água do solo e não a partir do conteúdo de umidade no solo.

B) Potencial Mátrico Crítico

Uma outra forma de se estabelecer a umidade crítica do solo é por meio do potencial mátrico crítico, ou seja, o potencial mátrico do solo na umidade crítica (Tabelas 12 e 13).

Tabela 12 - Potencial mátrico crítico de algumas culturas.

Cultura	Potencial mátrico crítico (kPa)
Alface	-40 a -60
Alho	-40 a -60
Banana	-30 a -150
Batata	-50 a -100
Cebola	-10
Cenoura	-24
Feijão	-90
Tabaco	-30 a -80
Citrus	-20 a -100
Milho	-50 a -100
Tomate	-100
Trigo	-35 a -70

Fonte: Arruda (1987)

Tabela 13 - Potencial mátrico ótimo para irrigação (kPa)

Cultura	Potencial mátrico (kPa)
Abacate	-50
Alfalfa	-80 a -150 ¹
Algodão	-100 a -300 ²
Banana	-30 a -150 ¹
Cana-de-açúcar	-80 a -150 ¹
Cebola	-50 a -65
Couve	-60 a -70
Flores ornamentais.	-10 a -50
Morango	- 20 a 30
Uva	-40 a -100
Cenoura	-55 a -65
Limão	-40
Milho	-50 a -150 ¹
Melão	-35 a -40
Laranja	-20 a -100
Batata	-30 a -50
Pepino	-100 a -300
Beterrava	-60 a -80
Soja	-50 a -150
Sorgo	-60 a -130 ¹
Tabaco	-30 a -250
Trigo	-80 a -150

Fonte: Pizarro (1990).

¹ Valores superiores referem-se à fase de maturação.

² Os valores menores e maiores referem-se a condições de alta e baixa Etm, respectivamente.

Pode-se observar que para algumas culturas o intervalo de potencial é demasiado grande. Apesar disso, Pizarro (1990), considera este critério mais indicado para se estabelecer o ponto ótimo de irrigação do que uma fração empírica.

2.2.5 – Cálculo da Água Disponível

O cálculo da água disponível de um solo, utiliza-se os conceitos vistos anteriormente no item 2.2, em conjunto com propriedades físicas do solo.

A água disponível às culturas é função de vários fatores: demanda atmosférica, culturas sob baixa demanda hídrica ($2,0 \text{ mm.dia}^{-1}$) conseguem aproveitar uma percentagem maior da água disponível total do solo do que as culturas sob alta demanda (6 mm.dia^{-1}). Neste último caso ressalta-se a condição de murcha temporária observada em culturas mesmo logo após terem sido irrigadas nas horas mais quentes do dia; nesta situação existe água armazenada no solo a potenciais elevados, pelo menos macroscopicamente; mas com certeza existem um ponto do sistema solo, planta, atmosfera que está limitando a transpiração.

$$ADt = (U_{cc} - U_{pmp}) \cdot d_g$$

A maioria das culturas não conseguem retirar água a tensões elevadas sem que haja prejuízo na produção. Sendo necessário definir uma percentagem de ADt, que é útil para as plantas sem perdas na produção.

$$ADu = (U_{cc} - U_{pmp}) \cdot d_g \cdot p$$

em que:

ADt = água disponível total, em cm;

ADu = água disponível útil, em cm;

U_{cc} = umidade do solo com base em massa seca na capacidade de campo, em %;

U_{pmp} = umidade do solo com base em massa seca no ponto de murcha permanente, em %;

d_g = densidade global do solo, em g.cm^{-3} ; e

p = fator de disponibilidade, adimensional.

2.3 – Cálculo da Lâmina de Irrigação

No cálculo da lâmina de irrigação, tem-se que considerar os fatores: solo, planta e atmosfera; bem como suas relações.

A lâmina de irrigação é a quantidade real de água necessária, que se deve aplicar por meio da irrigação.

$$L_{bi} = Adu \cdot z$$

em que:

L_{bi} = lâmina bruta de irrigação, em cm; e

z = profundidade efetiva do sistema radicular, em cm.

$$L_{li} = \frac{L_{bi}}{10 \cdot E_a}$$

em que:

L_{li} = lâmina líquida de irrigação, em mm; e

E_a = eficiência de aplicação da irrigação, em decimal.

2.4 - Evapotranspiração

O clima é um dos fatores mais importantes que determina as necessidades hídricas de uma cultura para crescimento e rendimento ótimos, sem qualquer limitações (Doorenbos & Kassam, 1994). As necessidades hídricas da cultura são normalmente expressas mediante a taxa de evapotranspiração da cultura (E_{Tc}), também conhecida como evapotranspiração máxima (E_{Tm}), a qual está relacionada à demanda evaporativa do ar, que por sua vez pode ser expressa pela evapotranspiração de referência (E_{To}), por meio do coeficiente de cultura (K_c) (Pereira et al., 1997).

2.4.1 - Definições e Conceitos de Evapotranspiração

Doorenbos & Pruitt (1977), definiram ETo como aquela que ocorre em uma extensa área de grama com altura de 0,08 a 0,15 m, em crescimento ativo, cobrindo totalmente o solo e sem deficiência de água. Essa definição vai de encontro à definição de evapotranspiração potencial postulada por Thornthwaite (1946) e por Penman (1948). Já de acordo com Smith (1991), a ETo pode ser definida como a evapotranspiração que ocorre de uma cultura hipotética, com altura fixa de 0,12 m, albedo igual a 0,23, e resistência da cobertura ao transporte de vapor d'água igual a 69 s.m^{-1} , que representaria a evapotranspiração de um gramado verde, de altura uniforme, em crescimento ativo, cobrindo totalmente a superfície do solo e sem falta de água (Pereira et al., 1997).

A evapotranspiração da cultura (ETc) ou máxima (ETm), é definida como aquela que ocorre de uma superfície vegetada com a cultura em qualquer fase de seu desenvolvimento e sem restrição hídrica. O conhecimento da ETc é fundamental em projetos de irrigação, pois ela representa a quantidade de água que deve ser reposta ao solo para manter o crescimento e a produção em condições ideais. No entanto, sua estimativa é difícil e sujeita a muitos erros (Pereira et al., 1997). Para contornar essas dificuldades, utilizam-se estimativas da ETo corrigidas por um coeficiente de cultura (Kc), proposto por Jensen (1968), o qual é obtido pela relação entre ETc e ETo, determinados experimentalmente. O Kc varia com a cultura e com seu estágio de desenvolvimento. Valores de Kc podem ser obtidos em tabelas (Doorenbos & Pruitt, 1977; Doorenbos & Kassam, 1994; Alfonsi et al., 1990; Pereira et al., 1997). No entanto, os valores de Kc também variam em função do método de estimativa de ETo (Santos et al., 1994; Caseiro et al., 1997). De acordo com Doorenbos & Kassam (1994), a ETc pode ser estimada por esse método com erros da ordem de 10 a 20%.

De acordo com Villa Nova et al. (1996) e Albuquerque et al. (1997), os coeficientes adotados para a estimativa da ETc não levam a resultados satisfatórios, em razão das diferentes condições climáticas, da cultura e do método de estimativa de ETo, e além disso, pelo fato da metodologia proposta pela FAO assumir valores constantes de Kc para determinada fase, ao passo que trabalho realizado por Ritchie & Burnett (1971), mostra que essa variação obedece uma função curvilínea em relação ao índice de área foliar (IAF). Baseado nessas considerações Pereira et al. (1995) e Villa Nova et al. (1996) propuseram um método de estimativa da ETc baseado na evaporação do tanque Classe A e no IAF, através de regressão linear múltipla, para as culturas da batata, cana-de-açúcar, milho e alface. A

metodologia foi empregada por Albuquerque et al. (1997) mostrando ótimo ajuste para a cultura do feijão.

2.4.2 - Métodos de Estimativa da Evapotranspiração de Referência (ET_o)

Vários são os métodos de estimativa da ET_o 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 ET_o, 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 ET_o 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 ET_o. 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). Os métodos de estimativa da ET_o dividem-se em empíricos, de balanço de energia e combinados.

A) Métodos Empíricos

De acordo com Pereira et al. (1997), empiricismo não é sinônimo de falta de qualidade, pois muitos métodos desenvolvidos e calibrados localmente produzem melhores resultados do que aqueles mais genéricos e com base física. Métodos dessa natureza são resultados de correlações entre a evapotranspiração de referência medida em condições padrões e os elementos meteorológicos medidos em postos meteorológicos, sendo que alguns deles tem aplicação quase que universal.

- **Método do Tanque Classe A**

Baseia-se na proporcionalidade existente entre a evaporação do tanque Classe A (ECA) e a evapotranspiração de referência (ET_o). Essa proporcionalidade leva em consideração um coeficiente de ajuste, denominado coeficiente do tanque Classe A, o que resulta na seguinte expressão:

$$ET_o = K_p \cdot ECA$$

O K_p 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, sendo apresentado na forma de tabela (Tabela 14) por Doorenbos & Pruitt (1977), ou na forma de equação por Snyder (1992):

$$K_p = 0,482 + 0,024 \cdot \ln(L) - 0,000376 \cdot U + 0,0045 \cdot UR$$

Pereira et al. (1995), utilizando o método de Penman-Monteith, aplicando-o a um gramado e ao tanque Classe A, propuseram um modelo alternativo para K_p que é o seguinte:

$$K_p = K_{pmax} \cdot \frac{s + \gamma}{s + \gamma \cdot \left(1 + \frac{rc}{ra}\right)}$$

em que:

K_{pmax} = valor máximo de K_p , igual a 0,85;

rc = resistência do dossel (gramado), igual a 69 sm⁻¹;

ra = resistência aerodinâmica ao transporte de vapor d'água, dado pela expressão empírica:

$$ra = \frac{208}{U} \quad (\text{s.m}^{-1})$$

s = declinação da curva de pressão de vapor, em kPa.°C⁻¹, dada pela seguinte equação;

$$s = \frac{4098 \cdot e_s}{(T + 237,3)^2}$$

γ = constante psicrométrica, igual a 0,0622 kPa °C⁻¹.

Sendo que e_s pode ser calculado pela fórmula de Tetens.

$$e_s = 0,6108 \cdot 10^{\left(\frac{7,5 \cdot T}{237,3 + T}\right)}$$

Tabela 14 - Coeficiente do tanque (Kp) para Tanque Classe A para diferentes bordaduras e níveis de umidade relativa e velocidade do vento em 24 horas, para tanques instalados em áreas cultivadas com vegetação baixa. Fonte: Doorenbos & Kassam (1994).

Vento (km/dia)	Bordadura (m)	Umidade Relativa do Ar		
		< 40%	40% a 70%	> 70%
	1	0.55	0.65	0.75
Leve	10	0.65	0.75	0.85
< 175	100	0.70	0.80	0.85
	1000	0.75	0.85	0.85
	1	0.50	0.60	0.65
Moderado	10	0.60	0.70	0.75
175 a 425	100	0.65	0.75	0.80
	1000	0.70	0.80	0.80
	1	0.45	0.50	0.60
Forte	10	0.55	0.60	0.65
425 a 700	100	0.60	0.65	0.70
	1000	0.65	0.70	0.75
	1	0.40	0.45	0.50
Muito Forte	10	0.45	0.55	0.60
> 100	100	0.50	0.60	0.65
	1000	0.55	0.60	0.65

Esse método de estimativa de ETo 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: para a obtenção dos valores de Kp são necessários dados de velocidade do vento na altura do tanque e umidade relativa; a leitura do nível da água é dificultada quando a aquisição dos dados não é automatizada; o tanque deve estar protegido quanto ao acesso de animais na área; o local de instalação em área irrigadas é problemático (dentro ou fora?); além de normalmente apresentar superestimativas de ETo em comparação a outros métodos e medidas.

- **Exemplo de aplicação do método do tanque Classe A**

Local: Piracicaba, SP

Dia: 14/04/98

Dados:

$$ECA = 5,84 \text{ mm.d}^{-1}$$

$$UR = 78\%$$

$$U = 122,4 \text{ Km.d}^{-1}$$

$$T = 25,7 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$L = 20 \text{ m}$$

Determinação do Kp:

a) Kp da Tabela

$$Kp = 0,85$$

$$ETo = 5,84 \cdot 0,85$$

$$ETo = 4,96 \text{ mm.d}^{-1}$$

b) Kp da Equação(Snyder):

$$Kp = 0,482 + 0,024 \cdot \ln(20) - 0,000376 \cdot 122,4 + 0,0045 \cdot 78 = 0,86$$

$$ETo = 5,84 \cdot 0,86$$

$$ETo = 5,02 \text{ mm.d}^{-1}$$

c) K_p da Equação(Pereira):

$$e_s = 0,6108 \cdot 10^{(7,5 \cdot 25,7)/(237,3 + 25,7)} = 3,30 \text{ kPa} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$$

$$s = (4098 \cdot 3,3) / (237,3 + 25,7)^2 = 0,1955 \text{ kPa} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$$

$$r_a = 208 / 1,42 = 146,48 \text{ s} \cdot \text{m}^{-1}$$

$$K_p = 0,85 \cdot (0,1955 + 0,0622) / (0,1955 + 0,0622 \cdot (1 + 69 / 146,48)) = 0,76$$

$$E_{To} = 5,84 \cdot 0,76$$

$$E_{To} = 4,44 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$$

- **Método de Thornthwaite**

Este método foi proposto por Thornthwaite (1948) para estimativa da evapotranspiração potencial (ETP), ou de referência (E_{To}), 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 por limitado, haja visto que a irrigação é utilizada em locais e períodos que fogem das 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 (ETP_p), de 30 dias, sendo todos os dias com fotoperíodo igual a 12 horas:

$$ETP_p = 16 \left(10 \frac{T_i}{I} \right)^a \quad T_i > 0 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$a = 6,75 \cdot 10^{-7} \cdot I^3 - 7,71 \cdot 10^{-5} \cdot I^2 + 1,7912 \cdot 10^{-2} \cdot I + 0,49239$$

$$I = \sum_{i=1}^{12} (0,2 \cdot T_i)^{1,514} \quad T_i > 0 \text{ } ^\circ\text{C}$$

em que:

T_i é a temperatura média mensal ($^\circ\text{C}$).

Para a conversão da ETPp em ETP, procede-se a correção para dias do mês e fotoperíodo:

$$ETP = ETPp \cdot \frac{N}{12} \cdot \frac{ND}{30}$$

em que:

N = fotoperíodo, em horas; e

ND = número de dias do mês.

Esse vem sendo largamente empregado em várias partes do mundo e do Brasil, sendo, no entanto, sua utilização mais aplicada 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 do método de Thornthwaite**

Local: Piracicaba, SP

Dia: 14/04/98

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 $^\circ\text{C}$

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

Cálculo de I:

$$I = (0,2 \cdot 24,0)^{1,514} + (0,2 \cdot 24,7)^{1,514} + \dots + (0,2 \cdot 22,9)^{1,514} + (0,2 \cdot 23,8)^{1,514}$$

$$I = 106,9928$$

Cálculo de a:

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

$$a = 2,353$$

Cálculo da ETPp:

$$T_i = 25,7 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\text{ETPp} = 16 \cdot (10 \cdot 25,7 / 106,9928)^{2,353}$$

$$\text{ETPp} = 125,78$$

Cálculo as ETP:

$$\text{ETP} = 125,78 \cdot 11,6 / 12 \cdot 1/30$$

$$\text{ETP} = 4,05 \text{ mm.d}^{-1}$$

- **Método de Hargreaves & Samani**

Método desenvolvido para clima árido. Propostos por Hargreaves (1974, 1976). Esse método elaborado por Hargreaves & Samani (1985), requer somente a temperatura do ar como variável, sendo a equação a seguinte:

$$E_{To} = 0,0023 \cdot Q_o \cdot (T_{\text{max}} - T_{\text{min}})^{0,5} \cdot (T + 17,8)$$

em que:

Q_o = radiação solar no topo da atmosfera, em mm.d^{-1} ;

T_{max} a temperatura máxima do ar, em $^{\circ}\text{C}$;

T_{min} a temperatura mínima do ar, em $^{\circ}\text{C}$; e

T a temperatura média diária, em $^{\circ}\text{C}$.

Esse método foi testado por Sentelhas & Camargo (1996) no Estado de São Paulo, apresentando superestimativa quando comparados a medidas de lisímetros de drenagem.

- **Exemplo da aplicação do método de Hargreaves & Samani**

Local: Piracicaba, SP

Dia: 14/04/98

Dados:

$$Q_o = 12,6 \text{ mm.d}^{-1}$$

$$T = 25,7 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T_{\text{max}} = 32,8 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T_{\text{min}} = 18,4 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Cálculo da ETP:

$$ET_o = 0,0023 \cdot 12,6 \cdot (32,8 - 18,4)^{0,5} \cdot (25,7 + 17,8)$$

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

- **Método de Blaney & Criddle**

Método bastante antigo, desenvolvido para regiões de clima semi-árido. Existem várias versões e modificações deste método em várias parte do mundo. A versão mais conhecida é a apresentada por Doorenbos & Pruitt (1977) modificada por Frevert et al. (1983), como segue:

$$ET_o = a + b \cdot p \cdot (0,46 \cdot T + 8,13)$$

$$a = 0,0043 \cdot UR_{\text{min}} - n / N - 1,41$$

$$b = 0,81917 - 0,0041 \cdot UR_{\text{min}} + 1,0705 \cdot n/N + 0,06565 \cdot U - 0,00597 \cdot UR_{\text{min}} \cdot n/N - 0,000597 \cdot UR_{\text{min}} \cdot U$$

em que:

p = fator de correção função da latitude e época do ano (Tabela 15);

T = temperatura média do período, em $^{\circ}\text{C}$;

URmin = umidade relativa mínima do período, em %;

n = insolação do período, em horas;

N = fotoperíodo, em horas; e

U = velocidade do vento a 2m, em m/s.

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

Tabela 15 - Fator p de Blaney & Criddle para a latitude do Estado de São Paulo (20°S)

Mês	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
p	0,30	0,29	0,28	0,26	0,25	0,25	0,25	0,26	0,27	0,28	0,29	0,30

- **Exemplo de aplicação do método de Blaney & Criddle**

Local: Piracicaba, SP

Dia: 14/04/98

Dados:

T = 25,7 °C

URmin = 46 %

U = 1,41 m.s⁻¹

n = 9,3 horas

N = 11,6 horas

Determinação do fator p:

p = 0,26

Cálculo de a:

a = 0,0043 . 46 - 0,8 - 1,41

a = -2,01

Cálculo de b:

b = 0,81917 - 0,0041 . 46 + 1,0705 . 0,8 + 0,06565 . 1,41 - 0,00597 . 46 . 0,8 - 0,000597 . 46 . 1,41

$$b = 1,321$$

Cálculo da ETo:

$$E_{To} = -2,01 + 1,321 \cdot 0,26 \cdot (0,46 \cdot 25,7 + 8,13)$$

$$E_{To} = 4,84 \text{ mm.d}^{-1}$$

B) Métodos de Balanço de Energia

De acordo com Pereira et al. (1997), o balanço de energia representa a contabilidade das interações dos diversos tipos de energia com a superfície. Essa contabilidade entre a energia que entra no sistema através da radiação solar, ondas curtas, e a energia que sai, tanto por ondas curtas (no processo de reflexão) como de ondas longas (no processo de emissão de energia), resultara num saldo de energia conhecida como radiação líquida (R_n), a qual será distribuída entre os diversos processos físicos, como calor sensível (aquecimento do ar - H), calor latente (evapotranspiração - LE) e fluxo de calor no solo (aquecimento do solo - G), resultando na expressão:

$$R_n \approx H + LE + G$$

Essa R_n pode ser medida através de saldo radiômetros, ou ainda estimada a partir de elementos observados em estações meteorológicas, pelas equações de estimativa de Q_g , do balanço de curtas (BOC) e do balanço de ondas longas (BOL), como segue:

$$R_n = BOC + BOL$$

$$BOC = Q_g (1 - r)$$

$$Q_g = (a + b \cdot n/N) \cdot Q_o$$

$$BOL = - [4,903 \cdot 10^{-9} \cdot T^4 \cdot (0,56 - 0,246(ea)^{0,5}) \cdot (0,1 + 0,9 \cdot n/N)] \quad (\text{MJ.m}^{-2}.\text{d}^{-1})$$

em que:

r = coeficiente de reflexão (grama = 0,23); e

T = temperatura média, em K.

A R_n pode ainda ser estimada através de relações empíricas com Q_g obtida em estações automáticas, como mostra Pereira et al. (1998), para as condições de Piracicaba, SP:

$$R_n = 0,574 \cdot Q_g$$

- **Método do Balanço de Energia**

Fundamenta-se na partição da energia líquida (R_n) entre os processos de fluxo de calor sensível (H); fluxo de calor no solo (G) e fluxo de calor latente (LE), o qual representa a energia destinada à evapotranspiração. De acordo com vários autores, entre eles Pereira et al. (1997), mencionam que em condições de evapotranspiração potencial na escala diária, o valor de G é desprezível e o fluxo de calor latente representa em média 70 a 80% da radiação líquida. Assim, pode-se utilizar esse referencial para determinação da ETP, da seguinte forma:

$$ETP = 0,75 \cdot R_n$$

- **Exemplo de aplicação do método do Balanço de Energia**

Local: Piracicaba, SP

Dia: 14/04/98

Dados:

$$Q_g = 8,04 \text{ mm.d}^{-1}$$

Cálculo da R_n :

$$R_n = 0,574 \cdot 8,04$$

$$R_n = 4,61 \text{ mm.d}^{-1}$$

Cálculo da ETP:

$$ETP = 0,75 \cdot 4,61$$

$$ETP = 3,46 \text{ mm.d}^{-1}$$

- **Método de Priestley & Taylor**

Esse método foi proposto por Priestley & Taylor (1972), como uma simplificação do método de Penman, que será tratado mais adiante. Esse método parte da premissa de que o termo advectivo da equação original de Penman, permanece entre um limite de 8 a 34% do termo energético, com uma média de 26%. Assim, os autores propuseram a seguinte expressão para a estimativa da ETP:

$$ETP = \alpha \cdot W \cdot (R_n - G)$$

em que:

α = parâmetro de Priestley & Taylor, cujo valor é de 1,26, para condições de ETP; e

W = é dado pelas equações abaixo.

$$W \approx 0,407 + 0,0145 \cdot T \quad 0 < T < 16 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$W \approx 0,483 + 0,01 \cdot T \quad 16,1 < T < 32 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Variações no valor de α vem sendo observado por vários autores. Pereira (1990) obteve α variando de 1 a 1,26 para estimativa da ETP mensal.

- **Exemplo de aplicação do método de Priestley & Taylor**

Local: Piracicaba, SP

Dia: 14/04/98

Dados:

$$R_n = 4,61 \text{ mm.d}^{-1}$$

$$G = 0,05 \cdot R_n = 0,23 \text{ mm.d}^{-1}$$

$$W = 0,74$$

$$\alpha = 1,26$$

Cálculo de ETP:

$$ETP = 1,26 \cdot 0,74 \cdot (4,61 - 0,23)$$

$$ETP = 4,08 \text{ mm.d}^{-1}$$

C) Métodos Combinados

Os métodos listados a seguir recebem essa denominação de combinados pois combinam os efeitos do balanço de energia com aqueles do poder evaporante do ar (Pereira et al., 1997). Esses métodos são baseados em princípios físicos do processo de evapotranspiração, porém, envolvem algumas variáveis empíricas. Por levar em consideração os processos físicos envolvidos, sua aplicação torna-se universal.

- **Método de Penman**

Esse método foi o primeiro dessa categoria, sendo proposto por Penman (1948). Considera que o processo de ET se divide em um termo energético e outro aerodinâmico, que considera o poder evaporante do ar. Sua formulação é complexa, envolvendo a necessidade de medidas micrometeorológicas, nem sempre disponíveis em áreas agrícolas o que acaba limitando em parte sua utilização. A formula de Penman pode ser expressa da seguinte forma:

$$ETP = W \cdot \left(\frac{Rn - G}{\lambda} \right) + (1 - W) \cdot 86400 \cdot \rho \cdot C_p \cdot \frac{\Delta e}{\gamma \cdot \lambda \cdot r_a}$$

em que:

W = é dado pelas equações abaixo;

$$W \approx 0,407 + 0,0145 \cdot T \quad 0 < T < 16 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$W \approx 0,483 + 0,01 \cdot T \quad 16,1 < T < 32 \text{ } ^\circ\text{C}$$

λ = calor latente de evaporação, aproximadamente igual a 2,45 MJ/kg;

ρ = densidade do ar, igual a 1,13 kg/m³;

C_p = calor específico do ar 0,001013 MJ/kg. °C;

γ = constante psicrométrica, igual a 0,0622 kPa °C⁻¹;

Δe = déficit de saturação do ar, em kPa; e

r_a = resistência aerodinâmica ao transporte de vapor, s/m, dada pela função:

$$r_a = \frac{250}{1 + 0,526 \cdot U_{2m}}$$

em que:

U_{2m} = velocidade do vento a 2 metros de altura.

A constante 86400 é utilizada para a conversão de segundo para dia. Vários autores no mundo inteiro vem empregando o método de Penman, verificando de um modo geral que ele superestima a ETP (Sediyama, 1996).

- **Exemplo de aplicação do método de Penman:**

Local: Piracicaba, SP

Dia: 14/04/98

Dados:

$$R_n = 11,2945 \text{ MJ.m}^{-2}\text{d}^{-1}$$

$$T_{med} = 25,7 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$U_{med} = 78 \%$$

$$U_{2m} = 1,41 \text{ m.s}^{-1}$$

$$W = 0,74$$

$$G = 0,5647 \text{ MJ.m}^{-2}\text{d}^{-1}$$

Cálculo de r_a :

$$r_a = 250 / (1 + 0,526 \cdot 1,41)$$

$$r_a = 143,54 \text{ s.m}^{-1}$$

Cálculo de Δe :

$$e_s = 3,30 \text{ kPa}$$

$$e_a = 2,574 \text{ kPa}$$

$$\Delta e = 0,726 \text{ kPa}$$

Cálculo da ETP:

$$ETP = 0,74(11,2945 - 0,5647)/2,45 + (1 - 0,74) \cdot 86400 \cdot 1,13 \cdot 0,001013 \cdot 0,726/0,0622 \cdot 2,45 \cdot 143,54$$

$$ETP = 3,24 + 0,85$$

$$ETP = 4,09 \text{ mm.d}^{-1}$$

- **Método de Penman-Monteith**

Esse método é o próprio método de Penman (1948), porém com modificações apresentadas por Monteith (1965), teoria da “big leaf”, sendo assim denominado Penman-Monteith. Essas modificações incluem na formulação proposta por Penman a resistência do dossel à difusão do vapor d’água. Esse método é recomendado pela FAO, como padrão de estimativa da ETP, e para tanto parametrizou sua determinação (Smith, 1991) da seguinte forma:

$$ETP = \frac{s}{s + \gamma^*} (Rn - G) \frac{1}{\lambda} + \frac{\gamma}{s + \gamma^*} \cdot \frac{900}{(T + 275)} \cdot U_{2m} \cdot (e_a - e_d)$$

$$s = \frac{4098 \cdot e_s}{(T + 237,3)^2} \quad (\text{kPa} \cdot ^\circ\text{C}^{-1})$$

$$e_s = 0,6108 \cdot 10^{\left(\frac{7,5 \cdot T}{237,3 + T}\right)} \quad (\text{kPa})$$

$$e_a = 0,01 \cdot e_s \cdot UR \quad (\text{kPa})$$

$$\gamma^* = \gamma \cdot (1 + 0,33 \cdot U_{2m}) \quad (\text{kPa} \cdot ^\circ\text{C}^{-1})$$

- **Exemplo de aplicação do método de Penman-Monteith:**

Local: Piracicaba, SP

Dia: 14/04/98

Dados:

$$Rn = 11,2945 \text{ MJ.m}^{-2}\text{d}^{-1}$$

$$T_{med} = 25,7 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$U_{med} = 78 \%$$

$$U_{2m} = 1,41 \text{ m.s}^{-1}$$

$$G = 0,5647 \text{ MJ.m}^{-2}\text{d}^{-1}$$

Cálculo de γ^* :

$$\gamma^* = 0,0622 \cdot (1 + 0,33 \cdot 1,41)$$

$$\gamma^* = 0,0911 \text{ kPa.}^{\circ}\text{C}^{-1}$$

Cálculo de Δe :

$$e_s = 3,30 \text{ kPa}$$

$$e_a = 2,574 \text{ kPa}$$

$$\Delta e = 0,726 \text{ kPa}$$

Cálculo de s :

$$s = 4098 \cdot 3,3 / (237,3 + 25,7)^2$$

$$s = 0,1955 \text{ kPa.}^{\circ}\text{C}^{-1}$$

Cálculo da ETP:

$$\text{ETP} = (0,1955/0,2866)(11,2945-0,5647)/2,45 + 0,0622 \cdot 900 \cdot 1,41 \cdot 0,726 / (0,2866) \cdot (25,7+275)$$

$$\text{ETP} = 3,00 + 0,66$$

$$\text{ETP} = 3,66 \text{ mm.d}^{-1}$$

2.4.3 - Comparação dos Principais Métodos de Estimativa da Evapotranspiração de Referência

Vários autores vem se preocupando em testar e avaliar métodos de estimativa da evapotranspiração potencial ou de referências, buscando identificar o que melhor se adapta às condições climáticas de sua região.

Stanhill (1961) comparou para as condições de Israel oito métodos de estimativa de ETo e verificou que na escala mensal os métodos de Penman e do tanque de evaporação (área 3,24m², 60cm de profundidade e enterrado), foram os que apresentaram as melhores estimativas quando comparadas às medidas realizadas em lisímetro de drenagem. Os demais

métodos analisados pelo autor: Thornthwaite; Blaney & Criddle; Makkink; tanque Classe A; Evaporímetro de Piche e Radiação Solar, apresentaram em alguns casos alta dispersão e outros baixa exatidão, levando a erros elevados. Essa constatação do autor, se justifica em razão das condições climáticas de Israel, em que os métodos que levam em consideração o poder evaporante do ar se ajustam melhor.

No Brasil, na mesma década, Camargo (1966) realizou medidas em lisímetros de drenagem em três locais do Estado de São Paulo, utilizando-as para avaliar os métodos de Thornthwaite, Penman-Bavel e Blaney & Criddle, na escala mensal. O autor verificou, para as três localidades, que o método que mostrou os melhores ajustes foi o de Thornthwaite e o de Blaney & Criddle modificado para as condições do planalto paulista. O método de Blaney & Criddle original, por ser desenvolvido para regiões áridas apresentou acentuada superestimativa da ETo, enquanto que o método de Penman com modificações propostas por Bavel apresentou elevada dispersão, mostrando uma tendência de subestimativa nos meses de maior demanda evaporativa. Esses resultados mostram que mesmo sendo empírico, o método de Thornthwaite pode ser empregado de forma satisfatória para estimar a ETo em regiões de clima sub-úmido e úmido, semelhantes àquela na qual ele foi desenvolvido.

Já na década de 80, Samani & Pessarakli (1986) avaliaram sete métodos de estimativa da ETo, para alfafa, para as condições de clima árido do Arizona, EUA. Os autores verificaram ao comparar as estimativas com dados de ETo, obtidas pelo método do balanço de água do solo, que as melhores foram as obtidas pelos métodos Hargreaves, Hargreaves & Samani e tanque Classe A, com a relação entre a ETo estimada e medida igual a 1,00 (CV=7,87%), 1,07 (CV=6,72%) e 1,06 (CV=7,09%), respectivamente. Os métodos de Jensen & Haise original e Jensen & Haise modificado apresentaram superestimativas da ordem de 13 e 22%, respectivamente, enquanto que os de Penman e Blaney & Criddle subestimativas da ordem de 20%. Isso mostra mais uma vez que empiricismo não pode ser utilizado como critério de rejeição de um método de estimativa de ETo (Pereira et al., 1997). No entanto, Sentelhas & Camargo (1996) utilizaram várias versões do método de Hargreaves e verificaram, para as condições do Estado de São Paulo, que esse método superestima a ETo acentuadamente. Isso evidencia que os métodos empíricos, apesar de muitas vezes precisos, somente são aplicáveis para as condições nas quais eles foram desenvolvidos.

Trabalho realizado por Soriano & Pereira (1993) comparou as estimativas da ETo por diversos métodos e concluiu que para a sub-região de Nhecolândia, MS, não houve supremacia dos métodos baseados no balanço de energia sobre aqueles que utilizam apenas a

temperatura do ar ou a radiação solar como variável independente. Já Santos et al. (1994), verificaram, ao analisar a estimativa da ETo, para alfafa, por diferentes métodos, que o melhor método foi o de Penman original, porém com a radiação líquida medida sobre a cultura.

Ainda na década de 90, Camargo & Sentelhas (1997), aproveitando os dados obtidos por Camargo (1966), avaliaram 21 diferentes métodos de estimativa da ETo, desenvolvidos nas mais diferentes regiões do mundo. Os resultados obtidos pelos autores para as condições do planalto paulista são apresentados na Tabela 16, onde observa-se que mais uma vez os métodos empíricos ajustados para a condição climática em questão mostraram bons resultados a nível mensal, seguidos dos métodos de aplicação universal, como os de Priestley & Taylor e Penman-Monteith.

Tabela 16 - Desempenho dos métodos de estimativa de ETo obtidos por Camargo & Sentelhas (1997) para as condições climáticas do planalto paulista. Em que r é o coeficiente de correlação, d o índice de Willmott, e c o índice de concordância.

Método	c = r * d	Método	c = r * d
Camargo	0,81	Blaney & Criddle modific.	0,70
Thornthwaite	0,79	Tanner & Pelton	0,62
Thornthwaite índice T	0,79	Turk	0,62
Priestley & Taylor	0,78	Blaney & Criddle	0,59
Penman-Monteith	0,73	Hargreaves 74	0,58
Penman-Frère	0,71	Hargreaves 76	0,58
Penman-VNova&Ometto	0,71	Jensen & Haise	0,58
Hargreaves modificado	0,71	Radiação Solar	0,46
Penman	0,70	Linacre	0,46
Makkink	0,70	Ivanov	0,25

Os resultados aqui relatados confirmam a observação de Pereira et al. (1997), sobre o fato de que muitos métodos empíricos, pela sua simplicidade e facilidade de aplicação, não devem ser descartados, sendo muitas vezes os únicos com potencial de utilização. Entretanto, suas estimativas são confiáveis somente para períodos longos e sua aplicação fica limitada às condições climáticas nas quais eles foram desenvolvidos (Sediyama, 1996). As contribuições

de Penman, sem dúvida nenhuma, tem sido as de maior relevância, sendo o método de Penman-Monteith recomendado pela FAO como padrão de estimativa de ETo, fazendo parte obrigatória de currículos que abordam estudos de manejo de água e projetos de irrigação.

2.4.5 - Recomendação de Métodos de Estimativa da Evapotranspiração de Referência para projetos e para o Manejo da Irrigação

Em razão da existência de diversos métodos de estimativa de ETo, especialmente os empíricos, a recomendação ou adoção de um deles visando sua aplicação em projetos ou mesmo no manejo da irrigação, deve atentar para alguns aspectos, sendo os mais importantes a disponibilidade de dados na região ou local de interesse e se o método escolhido se ajusta às condições climáticas em questão. Esses dois aspectos estão ligados ao fato de que um método somente é utilizável no caso da região dispor de dados meteorológicos necessários, e de que nem todos os métodos se ajustam à condição climática em questão. Esse último aspecto fica claro se verificarmos que métodos desenvolvidos para regiões áridas superestimam a ETo em regiões de clima úmido, como é o caso do método de Hargreaves aplicado às condições paulistas (Sentelhas & Camargo, 1996), e que métodos desenvolvidos para regiões de clima úmido subestimam a ETo em regiões áridas, como é o caso do método de Thornthwaite aplicado para as condições de Israel (Stanhill, 1961). Dentre os métodos empíricos, o que apresenta uma aplicação mais universal, apesar de sua utilização implicar em alguns problemas de ordem operacional, é o método do tanque Classe A, o qual é bastante aceito no manejo da irrigação (Pereira et al., 1997).

Portanto, a escolha do método de estimativa de ETo fica restrita ao conhecimento das limitações de cada método (Pereira et al., 1997) e ao número de variáveis que serão necessárias.

- **Métodos de estimativa da ETo para utilização em projetos de irrigação**

Os projetos de irrigação visam o dimensionamento dos equipamentos que serão instalados no campo, seja qual for o sistema empregado. Para esse dimensionamento é necessário se conhecer a lâmina média de água a ser aplicada na cultura e o intervalo entre as aplicações. Para tanto, o técnico deve conhecer a necessidade hídrica da cultura, ou seja, a evapotranspiração da cultura (máxima - E_{Tc} ou E_{Tm}), a qual é função da evapotranspiração

de referência (ET_o ou ETP) e do coeficiente de cultura (K_c). Assim, é necessário se estimar a ET_c adequadamente, porém, o nível de precisão desejado não torna a escolha do método limitante, ou seja, o dimensionamento deverá ser feito para atender à condição crítica, a qual se dará durante os sub-períodos críticos da cultura quando o K_c será maior do que um. Nessa situação, o único cuidado a ser tomado na escolha do método de estimativa de ET_o, é se o mesmo se adapta às condições climáticas em questão, para que não ocorra nem um super nem sub-dimensionamento do projeto, o que seria altamente prejudicial. Outro aspecto que deve ser levado em consideração é a disponibilidade de dados necessários para atender o método empregado, os quais devem corresponder à condição média da região. Isso, no entanto, pode ser contornado haja visto que existem diversas formas de estimativa da temperatura do ar (valores médios) a partir de fatores geográficos, como a latitude, longitude e altitude (Pedro Jr. et al., 1991).

- **Métodos de estimativa da ET_o para utilização no manejo da irrigação**

O objetivo do manejo da irrigação é proporcionar à cultura água disponível no solo entre a capacidade de campo e a umidade crítica, de forma que as plantas evapotranspirem na taxa máxima (ET_c ou ET_m). Para tanto é necessário que o técnico ligado ao manejo de água saiba determinar com a maior precisão e exatidão possível o consumo de água da cultura, o qual, com já visto, é função da ET_o e do K_c.

A escolha do método mais adequado para a estimativa da ET_o visando sua utilização no manejo de água da cultura, irá depender dos mesmo aspectos relatados no item correspondente aos projetos de irrigação, devendo-se dar ênfase igualmente para os dois aspectos: adaptação do método às condições climáticas da região e disponibilidade de dados para aplicar o método escolhido. Este último, torna-se mais crítico no caso do manejo, pois haverá necessidade de se dispor de dados meteorológicos na propriedade. Isso acaba limitando drasticamente o emprego de métodos universais, especialmente Penman-Monteith, devido à necessidade de grande número de variáveis meteorológicas. Em função disso, os métodos empíricos acabam se destacando, especialmente, os baseados na temperatura do ar, elemento de fácil obtenção numa propriedade, e o do tanque Classe A. Esses métodos ficam restritos, no entanto, ao primeiro aspecto mencionado. Assim para regiões de clima árido, semi-árido ou mesmo nos meses de seca em regiões sub-úmidas, os métodos mais convenientes para o manejo de água nas culturas irrigadas são especialmente o do tanque

Classe A e o de Hargreaves, este último largamente testado para as condições do nordeste brasileiro (Hargreaves, 1976 e 1977). Já para climas sub-úmidos e úmidos, os métodos empíricos recomendados são aqueles desenvolvidos em tais condições como os de Thornthwaite e Camargo, também largamente testados sob tais condições (Camargo & Sentelhas, 1997).

Já nos grandes projetos de irrigação, onde há disponibilidade de dados meteorológicos, os métodos universais devem ser utilizados em razão da sua aplicabilidade em uma grande gama de condições climáticas. Dentre esses métodos, o de Penman-Monteith parametrizado pela FAO é o que tem proporcionado melhores resultados, apesar de Sedyama (1996) sugerir que este método ainda deva ser objeto de pesquisas nas regiões de clima ameno e sub-úmido, para uma avaliação mais rigorosa dos termos de resistência da equação, visando a melhor compreensão dos mecanismos físicos e biológicos envolvidos na evapotranspiração.

Esse método, com o acesso cada vez maior e mais barato às estações meteorológicas automáticas, deverá se tornar uma grande unanimidade, sendo futuramente utilizado na estimativa direta da E_{Tc} , sendo necessário para isso pesquisas para se determinar a resistência do dossel relativo a cada cultura.

2.4.3 - Métodos de Determinação Direta da Evapotranspiração de Referência (E_{To})

Os Lisímetros são tanques enterrados no solo, dentro dos quais medimos a evapotranspiração. É o procedimento mais preciso para a determinação de evapotranspiração real, desde que sejam bem instalados e operados corretamente. Pontos básicos na instalação de um lisímetro:

- deve ser largo para reduzir o efeito de sua parede interna e ter tamanho significativo ;
- deve ser suficientemente profundo para não restringir o desenvolvimento do sistema radicular; e
- ter solo e cultura nas mesmas condições do solo externo.

Existem dois tipos de lisímetros: de pesagem (de pesagem mecânica, flutuante e hidráulico) e de não-pesagem (drenagem ou percolação e de lençol freático a nível constante).

a) Lisímetro de percolação

Consiste em um tanque enterrada com as dimensões mínimas de 1,5 m de diâmetro por 1,0 m de altura, no solo, com a sua borda superior 5 cm acima da superfície do solo. Do fundo do tanque sai um cano que conduzirá a água drenada até um recipiente, o tanque tem que ser cheio com o solo do local onde será instalado o lisímetro, mantendo a mesma ordem dos horizontes. No fundo do tanque, coloca-se uma camada de mais ou menos 10 cm de brita coberta com uma camada de areia grossa. Esta camada de brita tem a finalidade de facilitar a drenagem d'água que percolou através do tanque. Após instalado, planta-se grama no tanque e na sua área externa.

A evapotranspiração de referência em um período qualquer é dada pela equação:

$$ET_o = \frac{I + P - D}{S}$$

em que:

ET_o = evapotranspiração de referência, em mm;

I = irrigação do tanque, em L;

P = precipitação pluviométrica no tanque, em L;

D = água drenada do tanque, em L; e

S = área do tanque, em m².

Sendo o movimento d'água no solo um processo relativamente lento, os lisímetros de percolação somente têm precisão para períodos mais ou menos longos, A evapotranspiração de referência por eles determinada deve ser em termos de médias semanais, quinzenais ou mensais. Eles precisam ser irrigados a cada quatro ou cinco dias, e com uma quantidade d'água tal, que a água percolada seja em torno de 10% do total aplicado nas irrigações.

b) Lisímetro de pesagem mecânica

Permite a determinação da ET_0 em períodos curtos horária ou diária, o que não acontece com os lisímetros não pesáveis, ele é imprescindível em centros de pesquisas, de modo que possamos calcular os coeficientes de correção, para os métodos indiretos ou empíricos de determinação da ET_0 . São mais precisos que os lisímetros de percolação e os de lençol freático constante.

2.4 – Balanço Hídrico

Na figura abaixo tem-se esquematizado em corte um sistema solo-planta-atmosfera, considerando-se um volume de controle para a caracterização dos componentes do balanço hídrico.

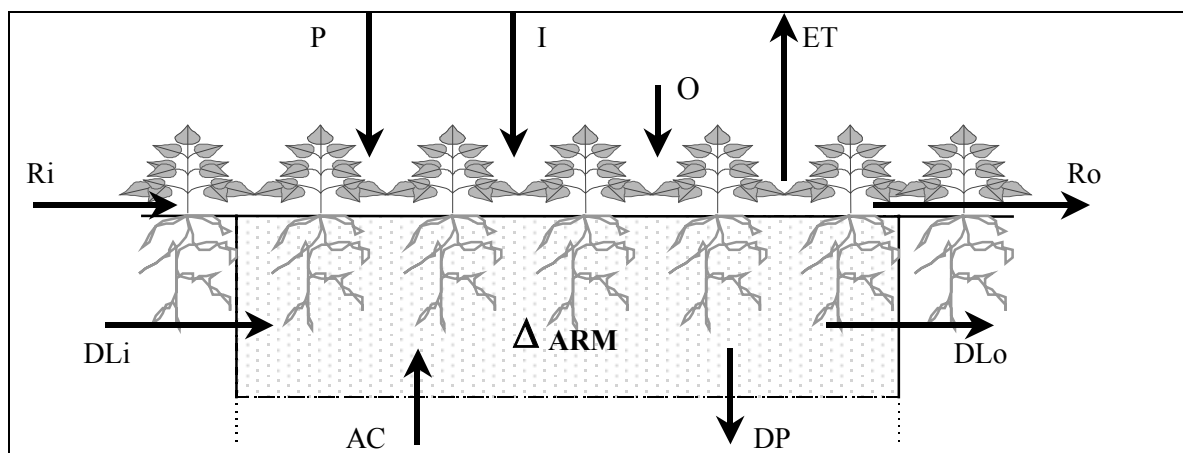


Figura 7- Esquema gráfico de um sistema e os componentes do dos balanço hídrico

Na figura 7 tem-se componentes de entrada no volume de controle: (P) precipitação, (I) irrigação, (O) orvalho, (Ri) escoamento superficial que entra (Run in), (DLi) drenagem lateral que entra, e (AC) ascensão capilar; e os que deixam o volume de controle: (ET) evapotranspiração, (Ro) escoamento superficial que sai (Run off), (Dlo) drenagem lateral que sai, e (DP) drenagem profunda.

Os escoamentos superficiais e as drenagens laterais de entrada e saída, tendem a se compensarem; e o orvalho pode ser desprezado na quantificação do balanço hídrico, que pode ser descrito assim:

$$\Delta \text{ARM} = P + I + AC - ET - DP$$

em que:

ΔARM = variação do armazenamento de água no solo.

2.4.1 – Balanço Hídrico Climatológico (Thornthwaite & Mather, 1955)

Existem várias maneiras de calcular o balanço hídrico, e uma dessas maneiras é o balanço hídrico climático proposto por Thornthwaite & Mather em 1955. Este balanço hídrico envolve alguns conceitos, que estão envolvidos diretamente com uma produção agrícola, permitindo com isso quantificar a variação do armazenamento de água no solo.

Os fatores envolvidos neste balanço se relacionam intimamente, sendo que a modificação de um fator gera um efeito em algum outro.

Segundo o princípio da conservação de massa, pode-se contabilizar a variação do armazenamento de água do solo. Esta contabilização pode ser diária, semanal, mensal etc.

2.4.1.1 – Determinação da Capacidade de Água Disponível (CAD)

A CAD pode ser conceituada como a lâmina de água, entre a umidade do solo a capacidade de campo e o ponto de murcha permanente. O início do balanço hídrico é a seleção da CAD, que pode ser calculada da seguinte maneira.

$$\text{CAD} = 0,01 \cdot (U_{cc} - U_{pmp}) \cdot d_g \cdot z$$

em que:

CAD = capacidade de água disponível, em mm;

U_{cc} = umidade do solo com base em massa seca na capacidade de campo, em %;

U_{pmp} = umidade do solo com base em massa seca no ponto de murcha permanente, em %;

d_g = densidade global do solo, em $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$; e

z = profundidade efetiva do sistema radicular, em cm.

2.4.1.2 – Elaboração do Balanço Hídrico Climático

Na elaboração do balanço hídrico climático, deve-se seguir o seguinte roteiro de preenchimento:

Coluna 1 (T): preencher com a **temperatura** média mensal do ar do local;

Coluna 2 (ETt): determinar mensalmente a **evapotranspiração tabular** diária não corrigida, obtida por meio da tabela 17;

Coluna 3 (COR): preencher com os valores obtidas por meio de tabela 18, os valores da **correção da ETt** são função da latitude local;

A partir desta coluna, usar números inteiros fazendo-se aproximações nos cálculos;

Coluna 4 (ETp): determinar mensalmente a **evapotranspiração potencial**, os valores serão obtidos multiplicando-se a coluna 2 (ETt), com a coluna 3 (COR) e com o número de dias do mês;

Coluna 5 (P): preencher com as **precipitações** totais mensais;

Coluna 6 (P - ETp): os valores são obtidos pela diferença da coluna 5 (P) pela coluna 4 (ETp), os valores negativos indicam chuva em excesso e o valor positivo representa armazenamento restrito de água do solo;

Coluna 7 (NEG ACUM) e coluna 8 (ARM): o preenchimento destas colunas deve ser simultâneos. Iniciando-se pela coluna 7 (NEG ACUM), que representa o **negativo acumulado**. Verificar na coluna 6 (P - ETp), após um período de valores positivos, o primeiro mês que aparece um valor negativo, então repita-o na coluna 7 (NEG ACUM) e com esse valor calcula-se o valor da coluna 8 (ARM), que representa o **armazenamento de água do solo**, utilizando a equação abaixo :

$$ARM = CAD \cdot \exp\left(\frac{NEG \text{ ACUM}}{CAD}\right)$$

Se no próximo mês também apresentar valor negativo na coluna 6 (P - ETp), acumula-se este com o valor do mês anterior e utiliza-se esse valor para o cálculo da coluna 8 (ARM). Esse procedimento deve ser repetido enquanto o valor da coluna 6 (P - ETp) for negativo.

Quando o valor da coluna 6 (P – Etp) for positivo, após uma seqüência de valores negativos, deve-se proceder da seguinte forma:

- Soma-se o valor positivo da coluna 6 (P – Etp) ao valor da coluna 8 (ARM) do mês anterior, obtendo-se o ARM do mês em questão, que não deve ultrapassar o valor da CAD:
- Com esse valor da coluna 8 (ARM) obtém-se o valor da coluna 7 (NEG ACUM) do mês por meio da equação abaixo;

$$\text{NEG ACUM} = \text{CAD} \cdot \text{LN} \left(\frac{\text{ARM}}{\text{CAD}} \right)$$

Após o preenchimento dessas duas colunas, prossegue-se com as demais, uma de cada vez;

Coluna 9 (ALT): representa a **alteração no armazenamento**, e é obtido pela diferença entre o ARM do mês em questão e o ARM do mês anterior;

Coluna 10 (ETR): representa a **evapotranspiração real**, ou seja, a evapotranspiração que ocorre em função da umidade do solo, e é obtida da seguinte maneira:

- quando a coluna 6 (P – Etp) ≥ 0 , então faz-se:
coluna 10 (ETR) = coluna 4 (ETp)
- quando a coluna 9 (ALT) ≤ 0 , então faz-se:
coluna 10 (ETR) = coluna 5 (P) + |coluna 9 (ALT)|

Coluna 11 (DEF): representa a **deficiência hídrica**, os valores são obtidos por meio da subtração do valor da coluna 4 (ETp) pelo valor da coluna 10 (ETR); e

Coluna 12 (EXC): representa o **excedente hídrico**, pode ser obtido das seguintes maneiras:

- quando coluna 8 (ARM) $< \text{CAD}$, então tem-se:
coluna 12 (EXC) = 0

- quando coluna 8 (ARM) = CAD, então tem-se:
coluna 12 (EXC) = coluna 4 (P – ETp) – coluna 9 (ALT)

Após o preenchimento completo deve-se fazer as aferições para validar o balanço hídrico, utilizando as seguintes equações:

$$\sum P = \sum ETp + \sum (P - ETp)$$

$$\sum ETp = \sum ER + \sum DEF$$

$$\sum P = \sum ER + \sum EXC$$

$$\sum ALT = 0$$

Tabela 17 – Evapotranspiração tabular diária (ETt, mm.d⁻¹), em função das temperaturas médias anual (Ta) e mensal (Tm) (ou diária – Td).

Tm	Temperatura média anual (Ta, °C)												
	(Td)	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
14	1,8	1,7	1,6	1,5	1,4	1,2	1,1	1,0	0,9	0,7	0,6	0,5	0,4
15	2,0	1,9	1,8	1,7	1,6	1,5	1,3	1,2	1,1	1,0	0,8	0,7	0,6
16	2,2	2,1	2,0	1,9	1,8	1,7	1,6	1,4	1,3	1,2	1,0	0,9	0,8
17	2,4	2,3	2,2	2,1	2,0	1,9	1,8	1,7	1,5	1,3	1,2	1,0	0,9
18	2,6	2,5	2,4	2,3	2,2	2,1	2,0	1,9	1,8	1,6	1,5	1,3	1,1
19	2,8	2,7	2,6	2,5	2,5	2,4	2,3	2,1	1,9	1,8	1,7	1,5	1,4
20	3,0	3,0	2,8	2,8	2,8	2,6	2,5	2,3	2,2	2,1	2,0	1,9	1,7
21	3,3	3,2	3,1	3,0	3,0	2,9	2,8	2,7	2,6	2,4	2,3	2,2	2,1
22	3,5	3,4	3,3	3,3	3,2	3,1	3,1	3,0	2,9	2,7	2,6	2,5	2,4
23	3,7	3,6	3,6	3,6	3,6	3,5	3,4	3,3	3,2	3,1	3,0	2,9	2,8
24	3,9	3,9	3,9	3,8	3,8	3,7	3,7	3,6	3,5	3,4	3,3	3,3	3,2
25	4,1	4,1	4,1	4,0	4,0	4,0	4,0	3,9	3,9	3,8	3,8	3,8	3,7
26	4,4	4,4	4,2	4,2	4,2	4,2	4,2	4,1	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0

Para T_m ou $T_d \geq 26,0$ °C, a ET_p é:

	Tm ou Td									
	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35
,0	4,3	4,6	4,9	5,2	5,4	5,6	5,8	5,9	6,0	6,1
,5	4,5	4,8	5,1	5,3	5,5	5,7	5,8	6,0	6,1	6,1

Camargo 1962

Tabela 18 – Fator de correção (COR) da evapotranspiração em função do fotoperíodo e do número de dias do mês.

Lat S	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
0	1,04	0,94	1,04	1,01	1,04	1,01	1,04	1,04	1,01	1,04	1,01	1,04
5	1,06	0,95	1,04	1,00	1,02	0,99	1,02	1,03	1,00	1,05	1,03	1,06
10	1,08	0,97	1,05	0,99	1,01	0,96	1,00	1,01	1,00	1,06	1,05	1,10
15	1,12	0,98	1,05	0,98	0,98	0,94	0,97	1,00	1,00	1,07	1,07	1,12
20	1,14	1,00	1,05	0,97	0,96	0,91	0,95	0,99	1,00	1,08	1,09	1,15
22	1,14	1,00	1,05	0,97	0,95	0,90	0,94	0,99	1,00	1,09	1,10	1,16
23	1,15	1,00	1,05	0,97	0,95	0,89	0,94	0,98	1,00	1,09	1,10	1,17
24	1,16	1,01	1,05	0,96	0,94	0,89	0,93	0,98	1,00	1,10	1,11	1,17
25	1,17	1,01	1,05	0,96	0,94	0,88	0,93	0,98	1,00	1,10	1,11	1,18
26	1,17	1,01	1,05	0,96	0,94	0,87	0,92	0,98	1,00	1,10	1,11	1,18
27	1,18	1,02	1,05	0,96	0,93	0,87	0,92	0,97	1,00	1,11	1,12	1,19
28	1,19	1,02	1,06	0,95	0,93	0,86	0,91	0,97	1,00	1,11	1,13	1,20
29	1,19	1,03	1,06	0,95	0,92	0,86	0,90	0,96	1,00	1,12	1,13	1,20
30	1,20	1,03	1,06	0,95	0,92	0,85	0,90	0,96	1,00	1,12	1,14	1,21
31	1,20	1,03	1,06	0,95	0,91	0,84	0,89	0,96	1,00	1,12	1,14	1,22
32	1,12	1,03	1,06	0,95	0,91	0,84	0,89	0,95	1,00	1,12	1,15	1,23

Thornthwaite (1948)

- **Exemplo de Balanço Hídrico Mensal**

Local: Ribeirão Preto - SP Latitude: 21° 11' S Período: 1 ano CADmax = 100 mm

Normais Climatológicas (média de 30 anos)

Janeiro: T = 23,6 °C, P = 268 mm

Julho: T = 18,7 °C, P = 28 mm

Fevereiro: T = 23,6 °C, P = 218 mm

Agosto: T = 20,9 °C, P = 25 mm

Março: T = 23,4 °C, P = 159 mm

Setembro: T = 22,5 °C, P = 58 mm

Abril: T = 22,0 °C, P = 81 mm

Outubro: T = 23,3 °C, P = 139 mm

Maior: T = 19,7 °C, P = 55 mm

Novembro: T = 23,5 °C, P = 174 mm

Junho: T = 18,7 °C, P = 51 mm

Dezembro: T = 23,3 °C, P = 298 mm

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
MÊS	T °C	ETt mm	COR	Etp mm	P mm	P - Etp mm	NEG ACUM mm	ARM mm	ALT mm	ER mm	DEF mm	EXC mm
JAN	23,6	3,5	1,11	120	268	+148	0	100	0	120	0	148
FEV	23,6	3,5	1,07	105	218	+113	0	100	0	105	0	113
MAR	23,4	3,2	1,02	101	159	+58	0	100	0	101	0	58
ABR	22,0	2,9	0,97	84	81	-3	-3	97	-3	84	0	0
MAI	19,7	2,2	0,92	63	55	-8	-11	90	-7	62	1	0
JUN	18,7	1,9	0,90	51	31	-20	-31	73	-17	48	3	0
JUL	18,7	1,9	0,91	54	28	-26	-57	57	-16	44	10	0
AGO	20,9	2,6	0,95	77	25	-52	-109	34	-23	48	29	0
SET	22,5	3,2	1,00	96	58	-38	-147	23	-11	69	27	0
OUT	23,3	3,2	1,05	104	139	+35	-54	58	+35	104	0	0
NOV	23,5	3,5	1,10	116	174	+58	0	100	+42	116	0	16
DEZ	23,3	3,2	1,12	111	298	+187	0	100	0	111	0	187
ANO	21,9			1082	1534	452			0	1012	70	522

Aferições:

$$\sum P = \sum ETp + \sum (P - ETp)$$

$$1534 = 1082 + 452 = 1534$$

$$\sum ET_p = \sum ER + \sum DEF$$

$$1082 = 1012 + 70 = 1082$$

$$\sum P = \sum ER + \sum EXC$$

$$1534 = 1012 + 522 = 1534$$

$$\sum ALT = 0$$

$$-77 + 77 = 0$$

2.5 – Métodos de Controle da Irrigação

2.5.1 - Medição da Deficiência de Água na Planta

É o método mais direto e preciso, para determinar o momento em que a planta está com deficiência de água. Porém é um método que requer equipamentos sofisticados e custosos, fator que limita o uso atualmente em irrigação.

Pode ser realizada por meio de medição da turgescência ou teor de umidade em uma parte do vegetal, da abertura estomatal, da intensidade de transpiração do vegetal, da concentração osmótica do suco celular, e também do fluxo de seiva no xilema, este último vem se desenvolvendo muito nos últimos anos e utilizado em agricultura de precisão.

2.5.2 - Sintomas de Deficiência de Água na Planta

Os sintomas característicos de deficiência hídrica nas plantas, tais como: enrolamento das folhas, encurvamento de entrenós, coloração das folhas, ângulo de inserção das folhas etc., são indicadores de deficiência hídrica, porém quando esses sintomas aparecem a planta já se encontra sob essa deficiência há algum tempo, prejudicando a produção.

É um método ainda pouco estudado, que pode auxiliar no controle de aplicação de água às culturas.

2.5.3 - Método da Umidade do Solo

É um método bastante utilizado e consiste em determinar frequentemente a umidade do solo, e quando esta umidade atingir um valor limite preestabelecido, faz-se a irrigação.

Este método é bastante preciso, pois é função da demanda evapotranspirométrica da cultura.

2.5.4 - Método do Turno de Rega

É o método onde calculam-se, previamente os turnos de rega ou intervalos entre as irrigações consecutivas, para cada estágio de desenvolvimento da cultura, os quais dependem das características físicas do solo, das condições climáticas regionais e do tipo de estágio de desenvolvimento da cultura. É atualmente o método mais utilizado no manejo da irrigação.

2.5.5 - Método da Tensão de Água no Solo

Consiste em determinar a tensão de água no solo diariamente, por meio de tensiômetros, ou da curva característica da água no solo, via umidade do solo.

O tensiômetro é um tubo cheio de água, onde o ar não entra, constituído em uma de suas extremidades por uma cápsula porosa e em outra por um tampão de borracha, onde se encontra instalado um instrumento que mede o vácuo que se forma dentro do tubo. O aparelho medidor da tensão ou potencial matricial responsável pela retenção da água do solo, serve para avaliar a umidade. Tensiometria é o processo de utilização de tensiômetros para a avaliação da umidade do solo.

Os tensiômetros podem ter vacuômetros de mercúrio ou aneróide, sendo o funcionamento de ambos igual. O vacuômetro de mercúrio propicia maior precisão nas leituras mas é mais sujeito a danos e exige maior regulagem. Há os tensímetros digitais, que substituem o vacuômetro, 1 só tensímetro digital lê vários tensiômetros.

O tensiômetro com vacuômetro tipo aneróide, com ponteiro e visor, indica diretamente a tensão atual do solo. Alguns aparelhos indicam por meio da coloração do visor o estado de umidade do solo:

- Verde - umidade adequada, não é necessário irrigar;
- Amarelo - Umidade do solo próxima do limite crítico, prepare-se para irrigar;

Vermelho - umidade do solo abaixo do limite crítico, irrigar.

Outro tipo de tensiômetro foi desenvolvido no Instituto Agrônomo de Campinas. É o chamado "tensiômetro de bolha", que consiste em um pequeno tubo de PVC conectado a uma ponta porosa. Na outra extremidade há um tubo de vidro graduado: a leitura do aparelho é feita por meio de uma bolha de ar que desloca no tubo de vidro. Este tipo de tensiômetro é mais simples e mais barato que os demais.

- **Preparação do Tensiômetro**

Cada aparelho deve ser testado e preparado antes de ser levado ao campo. O aparelho é preenchido com água limpa, tomando-se o cuidado de retirar todo o ar presente no seu interior e na porosidade da porcelana. A fim de facilitar esse trabalho, pode-se promover uma sucção na abertura, usando-se uma seringa hipodérmica e uma rolha de borracha. Isso é feito após preencher o aparelho com água e deixando a ponta porosa num recipiente também com água limpa. Por causa da sucção, as bolhas de ar presentes no tubo ou na porcelana se soltam e vão para a seringa. Em seguida, completa-se o volume com água e coloca-se a tampa hermética. O aparelho está pronto para ser levado para o campo. Essa operação deve ser feita com cuidado, enrolando-se a tampa porosa com algodão embebido em água e colocando depois um saquinho plástico para envolver o algodão; para prendê-lo ao aparelho utiliza-se um elástico.

Um instrumento com vazamento indicara um valor zero e, através da bomba de vácuo, pode-se ver a entrada de ar, se o tubo for transparente. O vazamento geralmente ocorre pelo manômetro ou pela inserção da cerâmica ao tubo. A cápsula pode ser testada através da pressão de borbulhamento, definida como a pressão mínima em que o ar borbulha através da capsula previamente saturada com água. Considerando-se a capsula saturada, impermeável ao ar, é necessário vencer a tensão superficial da água (a) no poro capilar de raio (r), para que ela se torne permeável ao ar. A pressão (P) mínima necessária para esvaziar o poro é: $P = 2a/r$. Faz-se o teste conectando-se a capsula a uma fonte de pressão regulável, em seguida, coloca-se a capsula na água, aumentando-se a pressão com incrementos de 0,1 bar até saírem bolhas que é a pressão de borbulhamento.

- **Instalação e Funcionamento do Tensiômetro**

Com o auxílio de um trado é aberto um buraco no solo, no qual é introduzido o aparelho, via ponta porosa, ficando de fora somente o vacuômetro. A colocação deve ser feita de tal forma que a ponta porosa fique na profundidade adequada, devendo-se também providenciar um bom acabamento de forma que o solo fique bem unido ao aparelho. Este, para ser instalado, é retirado do saquinho plástico e da proteção de algodão úmido, tendo-se o cuidado de completar o nível de água logo após a colocação, se for o caso, fechando-o a seguir hermeticamente. Para que o tensiômetro funcione direito, a cápsula tem de ficar em contato com o solo que a envolve, para isso, empurre com as mãos até o fundo do buraco, tomando o cuidado de não se apoiar no tensiômetro, pressione o solo ao redor do tubo na superfície, para evitar que a água da chuva ou da irrigação escorra pelas paredes do tensiômetro, atingindo a cápsula e mascarando as leituras (Figura 8). Em seguida a instalação, pela ponta de porcelana porosa, a água do aparelho começa a passar para o solo, entrando em equilíbrio com o mesmo. Como a tampa é fechada hermeticamente, forma-se vácuo no interior do aparelho, o que é registrado no vacuômetro. Quanto menor a umidade do solo, mais água passa do aparelho para o mesmo, e maior é o valor registrado no vacuômetro. Por outro lado, quando a umidade do solo aumenta em virtude da ocorrência de chuva ou irrigação, ocorre o fluxo inverso, isto é, passa água do solo para o interior do aparelho, reduzindo o valor registrado no vacuômetro. Os tensiômetros são construídos com diferentes precisões, a fim de permitir que a ponta porosa seja posicionada na profundidade desejada.

Quanto a quantidade de tensiômetros a ser instalado em uma área, não existe um número definido, porque as condições variam muito de área para área, porém recomenda-se: a) escolher um lugar vegetado com a cultura de interesse, de fácil acesso e representativo da área a ser irrigada; b) instalar os tensiômetros nas entre linhas entrelinhas das culturas de porte baixo ou na projeção da copa das árvores; c) instalar pelo menos uma bateria de tensiômetros (o melhor seria duas) em cada área que apresente diferenças na textura, na profundidade do solo, no tipo de cultura, na declividade ou no método de irrigação.

No caso da profundidade das raízes, o critério é o seguinte: a) geralmente instala-se apenas um tensiômetro na metade da profundidade efetiva das raízes das plantas com sistema radicular até 40 cm; b) em plantas jovens, instala-se o tensiômetro superficialmente e vai se aprofundando o equipamento a medida que as raízes vão se desenvolvendo; c) para plantas com raízes mais profundas (de 50 cm a 1 m e 30 cm), instalar um aparelho a 25% da

profundidade efetiva das raízes e outra a 75%, a leitura do primeiro tensiômetro indica a hora certa de começar a irrigação e a leitura do tensiômetro mais profundo indica as condições de infiltração da água no perfil do solo.

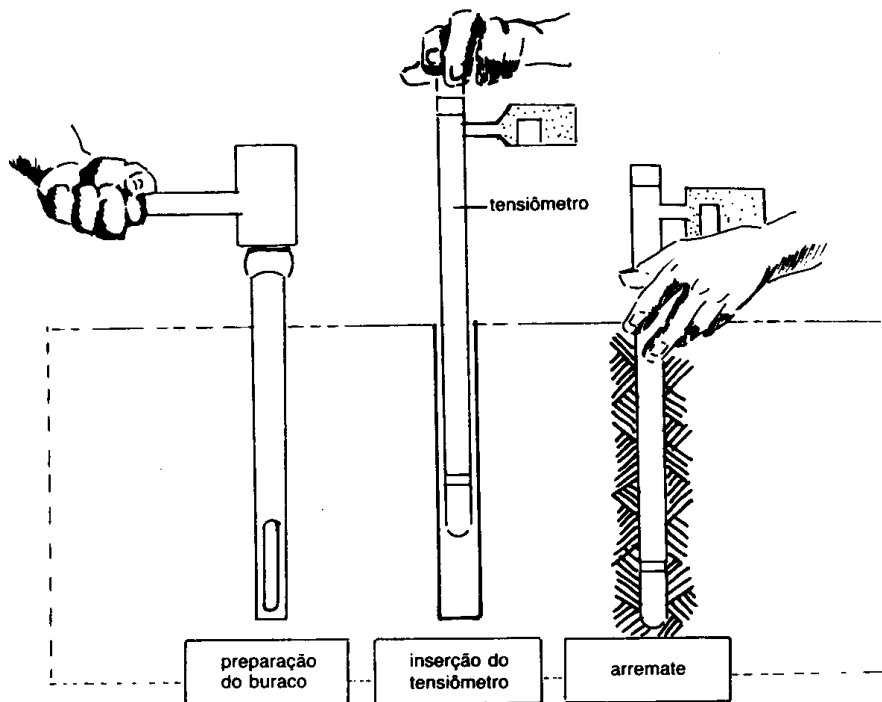


Figura 8 - Esquema da instalação de um tensiômetro.

- **Problemas e Cuidados com os Tensiômetros**

A ponta porosa permite a passagem dos sais do solo, não registrando o potencial osmótico, que nos solos salinos é muito grande;

Ocorre geralmente uma defasagem entre as alterações da umidade do solo e as variações de tensão registradas no aparelho, em virtude da resistência hidráulica da cápsula porosa e do solo adjacente;

Em geral há muita desuniformidade no fornecimento de dados, havendo necessidade da instalação de baterias de tensiômetros a fim de se obter um resultado médio confiável. Isso onera a instalação e a mão-de-obra de leitura.

Um tensiômetro instalado em solos de textura grosseira, devido ao contacto menos intenso com a superfície da ponta cerâmica, perde, em precisão, pois a distribuição das raízes

e a movimentação da água nestes solos é menos intensa. Com todas as condições de instalação (solo, etc.) favoráveis, obtém-se uma leitura correta após 15-30 minutos, quando não, pode-se esperar até 24 horas. Com o uso, a cerâmica perde porosidade, pela deposição de sais cristalizados e partículas outras.

Outra fonte de erro provém do crescimento preferencial das raízes em torno da capsula de cerâmica, por ser a água do tensiômetro mais facilmente retirada que a da massa de solo.

2.5.6 - Método da Estimativa da Evapotranspiração da Cultura

Qualquer planejamento e operação de um projeto de irrigação em que se visem a máxima produção e boa qualidade do produto, usando de maneira eficiente a água, requer conhecimentos das interrelações entre as diversas fases do sistema solo-planta-atmosfera (Bernardo, 1987).

A irrigação é, basicamente, uma operação agrícola para atendimento das necessidades de água das culturas, sendo fundamental nos sistemas de produção de regiões com ocorrências de secas regulares, onde torna-se operação fundamental, mais importante que a fertilização, controle de pragas e doenças e tratos culturais, provendo um importante grau de estabilidade para a produção de alimentos. A possibilidade de estimar corretamente a evapotranspiração e dessas estimativas determinar a quantidade de água a ser suprida ao solo é de considerável importância para o monitoramento da irrigação, pois tanto sub-irrigações como irrigações excessivas resultam em baixas produções (Camargo & Pereira, 1990). Além disso, o custo cada vez maior de energia de bombeamento e a eminente cobrança pela água, tem levado técnicos que trabalham nessa atividade a buscar alternativas que racionalizem o manejo da água, visando a redução nos custos da irrigação.

Desse modo, a determinação da necessidade hídrica da cultura, ou seja, da evapotranspiração da cultura, torna-se um dos dados básicos que se precisa conhecer tanto a nível de planejamento como a nível de manejo da irrigação, haja visto que o objetivo da irrigação é manter a água facilmente disponível no solo para as plantas, entre as umidades de capacidade de campo e crítica, intervalo no qual a planta evapotranspira na sua taxa máxima.

A evapotranspiração da cultura, varia de acordo com as condições atmosféricas, com a cultura em questão e seu estágio de desenvolvimento, variáveis que irão indiretamente condicionar a frequência de irrigação, juntamente com a chuva e a água disponível no solo.

Vários trabalhos vem demonstrando a importância e a necessidade de se estimar corretamente a ET_c , visando o manejo da irrigação (Jensen & Wright, 1978; Shih, 1986; Fuchs et al., 1987; Mohammad & Al-Amoud, 1993), especialmente onde a água é um recurso pouco disponível, como nas regiões de clima árido de várias partes do mundo.

A estimativa mais empregada é a que se utiliza da ET_o e do K_c , metodologia preconizada pela FAO (Doorenbos & Pruitt, 1977; Doorenbos & Kassam, 1994), haja visto que outros métodos como o apresentado por Pereira et al. (1995) e Villa Nova et al. (1996), exigem o conhecimento do índice de área foliar, variável que normalmente não está disponível para os agricultores, não havendo também determinação dos coeficientes estatísticos necessários para todos os tipos de cultura. Assim, a estimativa da ET_c fica sendo dependente da estimativa da ET_o , a qual pode ser obtida por diferentes métodos, que serão discutidos a seguir.

2.5.2 – Utilização de Coeficiente de Cultivo (K_c) para a Determinação de ET_c

A evapotranspiração da cultura (ET_c) considera o estágio de desenvolvimento da cultura específica e a evapotranspiração de referência.

$$ET_c = K_c \cdot ET_o$$

em que:

K_c – coeficiente de cultura.

O coeficiente cultural (K_c) é de suma importância para a avaliação da evapotranspiração real, necessária ao planejamento, projeto e controle da irrigação. O coeficiente K_c varia de cultura para cultura e ainda com: época de cultivo, estágio de desenvolvimento da cultura, condições climáticas e frequência de chuva ou irrigação na fase inicial do ciclo vegetativo.

O procedimento para a fixação do valor do coeficiente cultural deve ser utilizada a seguinte sequência:

- 1) obter dados culturais locais ou de zonas com condições climáticas semelhantes, relativas ao ciclo vegetativo da cultura;
- 2) determinar o comprimento total do ciclo vegetativo e de cada um dos seus estágios (dados locais) ;

3) K_c para o estágio inicial - estimar a frequência de irrigação (ou de chuva) durante este período. Com o valor da evaporação do tanque (E) médio desse período, entrar no gráfico da figura 10, obtendo-se o valor de K_c para o estágio inicial;

4) K_c para o estágio intermediário - com valores de umidade relativa do ar e velocidade do vento obtém-se na tabela 19 o valor de K_c para este período. Caso haja dados de pesquisa para a região, relativos a cultura em questão devem ser preferidos. Na figura 9 lança-se este valor, e traça-se uma linha reta;

5) K_c para estágio final - utilizar dados da tabela A ou de pesquisas locais, lançando o valor da figura 9 no final do período. Ligar esse ponto ao valor de K_c no final do período anterior, os valores de K_c nesse estágio vão se reduzindo, devendo-se adotá-los de acordo com a evolução da maturação; e

6) K_c para o estágio de desenvolvimento - unir com uma reta os valores de K_c o estágio inicial ao início do estágio intermediário, na figura 9 o valor de K_c na ordenada. O valor de k_c cresce com o desenvolvimento da cultura.

Tabela 19 – Valores de K_c para diversas culturas

Cultura	Estádio	URmin		URmin	
		> 70 %		< 20 %	
		Vento (m.s ⁻¹)		Vento (m.s ⁻¹)	
		0 a 5	5 a 8	0 a 5	5 a 8
Todas as culturas	(Inicial) 1	Use a figura 10		Use a figura 10	
Todas as culturas	(Intermediário) 2	Interpolação		Interpolação	
Feijão (vagem)	3	0,95	0,95	1,00	1,05
	4	0,85	0,85	0,90	0,90
Feijão (grão)	3	1,05	1,10	1,15	1,20
	4	0,30	0,30	0,25	0,25
Cenoura	3	1,00	1,05	1,10	1,15
	4	0,70	0,75	0,80	0,85
Milho (verde)	3	1,05	1,10	1,15	1,20
	4	0,95	1,00	1,05	1,10

Milho (grão)	3	1,05	1,10	1,15	1,20
	4	0,55	0,55	0,60	0,60
Algodão	3	1,05	1,15	1,20	1,25
	4	0,65	0,65	0,65	0,70
Repolho, Couve- Flor, Brócoli	3	0,95	1,00	1,05	1,10
	4	0,80	0,85	0,90	0,95
Pepino	3	0,90	0,90	0,95	1,00
	4	0,70	0,90	0,75	0,80
Grãos	3	1,05	1,10	1,15	1,20
	4	0,30	0,30	0,25	0,25
Lentilha	3	1,05	1,10	1,15	1,20
	4	0,30	0,30	0,25	0,25
Alface	3	0,95	0,95	1,00	1,05
	4	0,90	0,90	0,90	1,00
Melão	3	0,95	0,95	1,00	1,05
	4	0,65	0,65	0,75	0,75
Cebola	3	0,95	0,95	1,05	1,10
	4	0,75	0,75	0,80	0,85
Amendoim	3	0,95	1,00	1,05	1,10
	4	0,75	0,75	0,80	0,85
Batatinha	3	1,05	1,10	1,15	1,20
	4	0,70	0,70	0,75	0,75
Sorgo	3	1,00	1,05	1,10	1,15
	4	0,50	0,50	0,55	0,55
Soja	3	1,00	1,05	1,10	1,15
	4	0,45	0,45	0,45	0,45
Tomate	3	1,05	1,10	1,20	1,25
	4	0,60	0,60	0,65	0,65
Trigo	3	1,05	1,10	1,15	1,20
	4	0,25	0,25	0,20	0,20

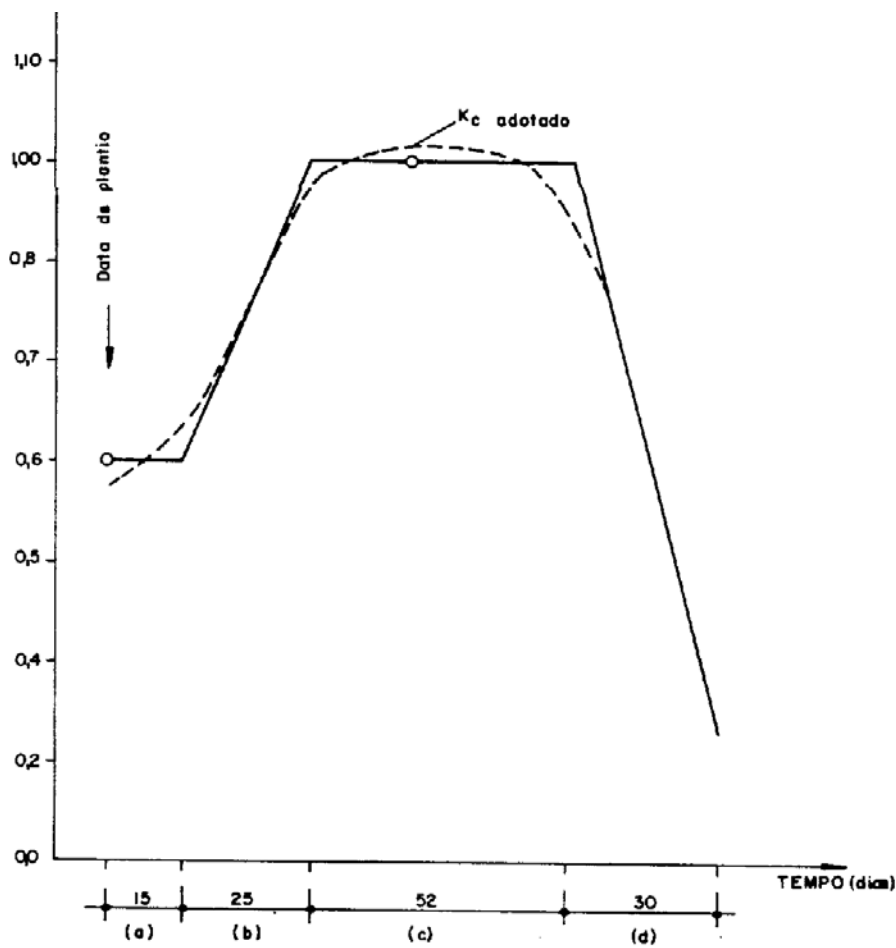


Figura 9 - Curva do coeficiente da cultura para diferentes estágios de desenvolvimento.

A evapotranspiração real (E_{Tr}) considera a evapotranspiração da cultura e a umidade do solo.

$$E_{Tr} = K_s \cdot E_{Tc}$$

em que:

K_s – coeficiente que depende da umidade do solo.

$$K_s = \frac{\ln(1 + (U_a - U_{pmp}))}{\ln(1 + (U_{cc} - U_{pmp}))}$$

em que:

U_a = umidade atual do solo com base em massa seca, em %;

U_{cc} = umidade do solo com base em massa seca na capacidade de campo, em %; e

U_{pmp} = umidade do solo com base em massa seca no ponto de murcha permanente, em %.

Muitos métodos foram idealizados pelos especialistas no assunto, para calcular a estimativa da evapotranspiração potencial a partir de dados meteorológicos normalmente medidos nas estações. Isto é muito importante para a irrigação pois proporciona condições para facilmente proceder-se ao controle das aplicações de água, bem como subsídios, para o técnico elaborar o projeto de irrigação.

3 - INFILTRAÇÃO DA ÁGUA NO SOLO

A infiltração é definida como sendo o processo de penetração da água no solo, através de sua superfície, no sentido vertical descendente. A velocidade de infiltração de água no solo (VI) é uma informação de grande importância para o projeto e o manejo da irrigação, visto que dela dependem o tempo que se deve manter a lâmina d'água sobre o solo na irrigação por superfície e a seleção dos aspersores a serem utilizados na irrigação por aspersão.

Geralmente, a VI é expressa em termos de lâmina de água infiltrada por unidade de tempo (mm.h^{-1}). Também pode ser expressa em cm.h^{-1} , L.s^{-1} , $\text{m}^3.\text{m}^{-1}$, esta última geralmente utilizada na irrigação por sulcos.

A equação para expressar a VI foi definida por Kostiakov (1932), como demonstrado a seguir:

$$I = K \cdot T^m$$

sendo I a infiltração acumulada (cm), T o tempo de infiltração acumulado (min), K e m coeficientes que dependem do tipo de solo, com m variando de 0 a 1.

Existem diferentes maneiras para se definir os parâmetros da equação da infiltração. Uma delas é pelo método da regressão linear, pelo qual utiliza-se a transformação logarítmica da equação da infiltração. Sendo $I = K \cdot T^m$, então $\log I = \log K + m \cdot \log T$, a qual corresponde à equação da reta $Y = A + B \cdot X$, onde:

$$Y = \log I$$

$$A = \log K$$

$$B = m$$

$$X = \log T$$

O coeficiente angular (B) e a interseção (A) da reta são dados por:

$$B = \frac{\sum X \cdot Y - \frac{\sum X \cdot \sum Y}{N}}{\sum X^2 - \frac{(\sum X)^2}{N}}$$

$$A = \bar{Y} - B \cdot \bar{X}$$

sendo N o número de leituras realizadas na régua durante o teste de infiltração, desconsiderando a leitura inicial, no tempo zero.

A equação da velocidade de infiltração é obtida derivando-se a equação da infiltração no tempo. Fazendo-se:

$$\frac{dI}{dT} = VI$$

tem-se:

$$VI = m \cdot K \cdot T^{m-1} \quad \therefore \quad VI = m \cdot K \cdot T^n, \text{ em cm} \cdot \text{min}^{-1}$$

$$\text{ou } VI = 60 \cdot m \cdot K \cdot T^n, \text{ em cm} \cdot \text{h}^{-1}$$

$$n = m - 1$$

3.1 - Métodos de Determinação da Infiltração

3.1.1 - Método do Infiltrômetro de Anel

Este método consiste em dois anéis metálicos, sendo o primeiro com diâmetro de 50 cm e o segundo com 25 cm, que é instalado no centro do maior anel, conforme a Figura 10. Os anéis devem ser instalados na vertical e enterrados até 15 cm de profundidade com o auxílio de uma marreta. Na parte interna do anel central é colocada uma régua, presa com fita adesiva na parede do anel. O anel externo tem a função de bordadura, ou seja, para garantir

que a infiltração de água do anel central ocorra apenas no sentido vertical, não havendo distribuição lateral de água no solo.

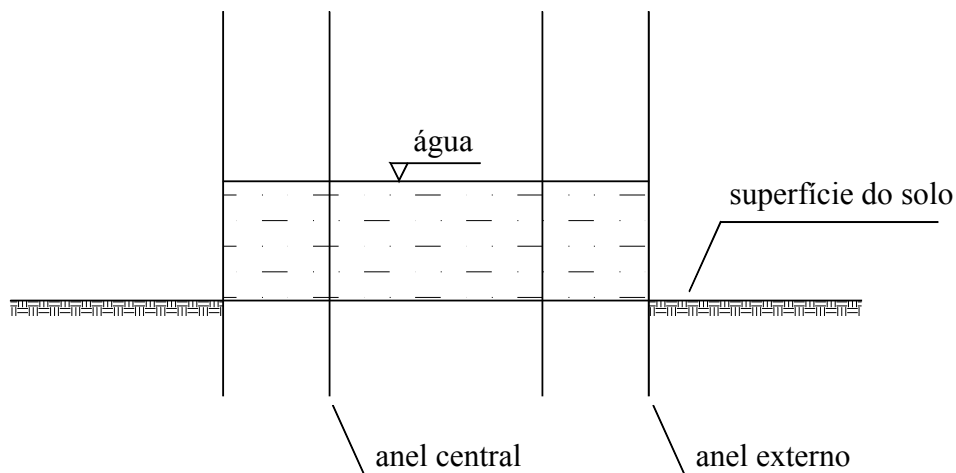


Figura 10 - Esquema do método do infiltrômetro de anéis para medir a velocidade de infiltração de água no solo.

O procedimento consiste em adicionar água nos dois anéis simultaneamente e, em intervalos de tempo preestabelecidos, realiza-se a leitura da altura do nível da água. É importante salientar que a carga hidráulica resultante da existência de uma coluna de água sobre o solo pode “forçar” a entrada da água no solo. Portanto, deve-se adicionar água constantemente para que a variação da coluna d’água não seja maior que 5 cm, o que deve ser feito logo após a realização de uma leitura.

A quantidade e a frequência de leituras varia com o tipo de solo. No início do teste, as leituras devem ser realizadas com maior frequência (1 a 5 min) do que no final (20 a 60 min). Deve-se ficar atento para que o nível da água no interior dos anéis não abaixe demais, podendo, em alguns casos (solos com VI muito alta), esgotar a água do interior dos anéis, o que pode invalidar o teste.

Vejamos a seguir um exemplo da determinação das equações de infiltração (I) e velocidade de infiltração (VI). Os dados de um ensaio realizado em campo estão apresentados na Tabela 21.

Tabela 21 - Dados obtidos em um ensaio para determinação da infiltração de água no solo pelo método do infiltrômetro de anel.

Hora	Tempo (min)	Tempo acumulado (min)	Leitura da régua (cm)	Reposição (cm)	Infiltração (cm)	Infiltração Acumulada (cm)
08:00	0	0	10,5		0	0
08:01	1	1	7,9		2,6	2,6
08:02	1	2	6,4		1,5	4,1
08:04	2	4	5,3	10,7	1,1	5,2
08:06	2	6	9,9		0,8	6,0
08:11	5	11	7,3	10,5	2,6	8,6
08:16	5	16	8		2,5	11,1
08:26	10	26	5,3	10,6	2,7	13,8
08:36	10	36	8,7		1,9	15,7
08:51	15	51	6,2	10,4	2,5	18,2
09:06	15	66	7,4	10,5	3,0	21,2
09:36	30	96	6,1	10,4	4,4	25,6
10:06	30	126	6,1	10,6	4,3	29,9
10:36	30	156	7,9		2,7	32,6
11:06	30	186	5,3	10,7	2,6	35,2
11:36	30	216	7,5		3,2	38,4

Primeiramente, determinamos os valores de X, Y, XY e X² (Tabela 22).

Tabela 22 - Valores de X, Y, XY e X² do ensaio de infiltração de água no solo pelo método do infiltrômetro de anel.

Tempo acumulado (min)	X	Y	XY	X ²
1	0	0,415	0	0
2	0,301	0,613	0,184	0,091
4	0,602	0,716	0,431	0,362
6	0,778	0,778	0,606	0,606
11	1,041	0,934	0,973	1,084
16	1,204	1,045	1,259	1,450
26	1,415	1,140	1,613	2,002
36	1,556	1,196	1,861	2,422
51	1,708	1,260	2,152	2,916
66	1,820	1,326	2,413	3,311
96	1,982	1,408	2,792	3,929
126	2,100	1,476	3,099	4,412
156	2,193	1,513	3,319	4,810
186	2,270	1,547	3,510	5,151
216	2,334	1,584	3,699	5,450
Soma	21,305	16,952	27,910	37,995
Média	1,420	1,130	1,861	2,533

O próximo passo consiste em calcular os parâmetros da equação:

$$B = \frac{27,910 - \frac{21,305 \cdot 16,952}{15}}{37,995 - \frac{(21,305)^2}{15}} \Rightarrow B = 0,4955$$

$$m = B = 0,4955$$

$$A = 1,13 - 0,4955 \cdot 1,42 \Rightarrow A = 0,4264$$

$$K = \text{ant log } A = 10^{0,4264} = 2,67$$

Com isso, tem-se a equação de infiltração de água no solo:

$$I = 2,67 \cdot T^{0,4955} \quad \begin{cases} I = \text{cm} \\ T = \text{min} \end{cases}$$

Derivando-se a equação de I, obtém-se:

$$VI = 1,323 \cdot T^{-0,5045} \quad \begin{cases} VI = \text{cm} \cdot \text{min}^{-1} \\ T = \text{min} \end{cases}$$

ou

$$VI = 79,38 \cdot T^{-0,5045} \quad \begin{cases} VI = \text{cm} \cdot \text{h}^{-1} \\ T = \text{h} \end{cases}$$

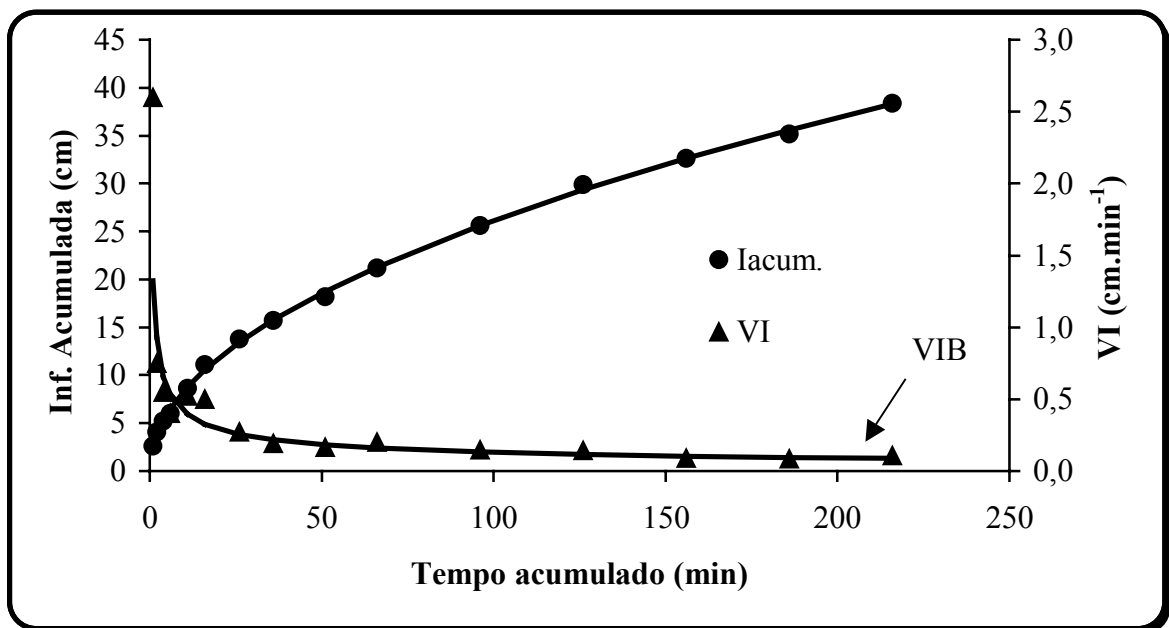


Figura 11 - Infiltração acumulada e velocidade de infiltração de água no solo e suas respectivas curvas, ajustadas pelo método da regressão linear.

Pela Figura 11, pode-se verificar que a VI reduz rapidamente após o início da aplicação de água e permanece praticamente constante após um determinado tempo. A esta VI constante dá-se o nome de Velocidade de Infiltração Básica (VIB). O conhecimento da VIB

de um solo é de fundamental importância para a elaboração de um projeto de irrigação, pois dela depende o método de irrigação mais adequado para aquele solo e a intensidade máxima de aplicação de água.

No exemplo acima, a VIB foi de $0,1 \text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$, ou $60 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$, que é considerado um valor bastante alto. A partir desta informação, pode-se dizer que, provavelmente, trata-se de um solo arenoso, com baixa aptidão para irrigação por sulcos, uma vez que as perdas de água por percolação seriam excessivamente altas. De acordo com o a VIB, os solos podem ser classificados em:

Solo de VIB muito alta	$> 30 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$
Solo de VIB alta	$15 - 30 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$
Solo de VIB média	$5 - 15 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$
Solo de VIB baixa	$< 5 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$

Como exemplo: solo arenoso com VIB igual $120 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ e terra roxa estruturada com VIB igual $20 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$.

Uma outra classificação utilizada para caracterizar a VIB do solo é:

Solo de VIB alta	$> 50 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$
Solo de VIB média	$20 - 50 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$
Solo de VIB baixa.....	$< 20 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$

Desenvolvendo-se a equação de VI, tem-se:

$$VI = m \cdot K \cdot T^{m-1} \quad \therefore \quad VI = m \cdot K \cdot T^m \cdot T^{-1} \quad \therefore \quad VI = m \cdot K \cdot \frac{T^m}{T}$$

Com isso, quando maior for tempo de aplicação de água durante o teste de infiltração, maior será o denominador da equação e, conseqüentemente, a VI tenderá a zero. Porém, sabe-se que, em solos que não possuem uma camada de impedimento físico à infiltração, a VI nunca é zero. Portanto, o valor de VI tenderá à VIB.

3.1.2 - Método da Entrada e Saída de Água no Sulco

Este método é o recomendado para determinar a VI do solo a ser irrigado por sulcos. O princípio é bastante simples, sendo baseado na medição da vazão de entrada (Q_e) e de saída (Q_s) de água no sulco. Para isso, são instalados dois medidores de vazão, chamados de “calhas”, no sulco, com uma distância entre si de 40-50 m para solos arenosos e 80-100 m para solos argilosos.

O medidor deve ser instalado dentro do sulco, de modo que o seu fundo permaneça na horizontal, tanto longitudinal quanto transversalmente. Para a medição da vazão, faz-se a leitura da altura da lâmina d'água na calha, o que é feito utilizando-se uma régua graduada que se encontra inserida na parede interna do medidor. A leitura (em cm) é convertida em vazão ($L.s^{-1}$), utilizando-se a equação:

$$Q = 0,0054 \cdot H^{2,5485}$$

sendo H a altura da lâmina d'água lida na régua (cm) e Q a vazão ($L.s^{-1}$). Para realização do ensaio em campo, necessita-se de, pelo menos, duas pessoas, visto que as leituras de vazão nos dois medidores devem ser realizadas em um mesmo instante (Figura 12).

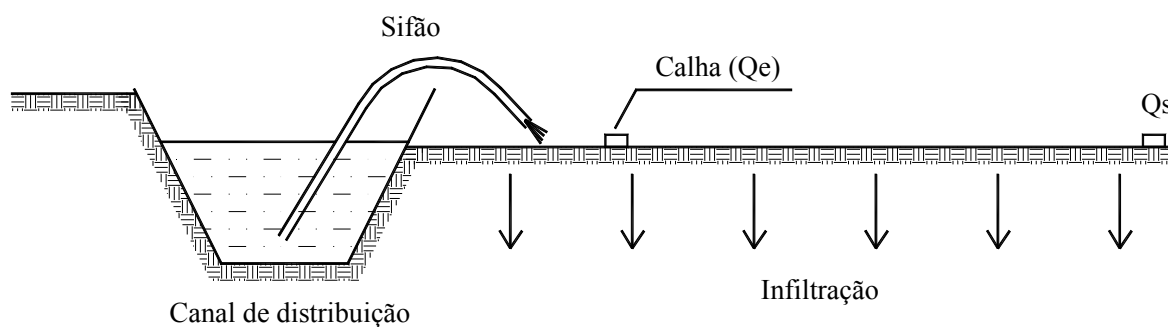


Figura 12 - Esquema do método da entrada e saída de água no sulco para medir a velocidade de infiltração de água no solo.

O ensaio só tem início quando a frente de avanço de água no sulco atingir a segunda calha, o que contribui para um erro na determinação da velocidade de infiltração, uma vez que no trajeto percorrido pela água entre o primeiro e o segundo medidor ocorre a infiltração de

água no solo, o que reduz drasticamente a VI, conforme demonstrado no item 3.1.1. Portanto, quanto maior a distância entre os medidores, maior é o erro cometido. Por outro lado, se as calhas forem instaladas muito próximas, a infiltração que ocorre no trecho de sulco não é suficiente para promover uma diferença perceptível na régua.

Por este método, pode-se determinar a VI por metro linear de sulco e, dessa forma, calcular o tempo necessário para manter a água escoando em um sulco de irrigação para se aplicar a lâmina desejada de água.

Para a condução do ensaio, deve-se fornecer água para três sulcos vizinhos, sendo as medições de vazão realizadas apenas no sulco central. Os sulcos laterais servem como uma bordadura, simulando as condições que ocorrem em uma irrigação quando todos os sulcos estiverem recebendo água.

Na Tabela 23 tem-se os resultados obtidos em um ensaio de infiltração de água no solo em um sulco, sendo a distância entre as calhas A e B igual a 60 m.

Tabela 23 - Dados obtidos em um ensaio para determinação da infiltração de água no solo pelo método da entrada e saída de água no sulco. Trecho A-B = 60 m.

Hora	Tempo acumulado (min)	Calha A (Qe) (cm)	Calha B (Qs) (cm)	Qe (L.s ⁻¹)	Qs (L.s ⁻¹)
10:06	0				
10:12*	6	7,76		60,0	
10:23*	17	8,14	4,00	67,8	11,1
10:24	18	8,20	4,36	69,0	13,8
10:26	20	8,20	5,96	69,0	30,6
10:29	23	8,20	5,52	69,0	25,2
10:34	28	8,20	5,88	69,0	29,6
10:39	33	8,20	6,10	69,0	32,5
10:44	38	8,20	6,21	69,0	34,0
10:49	43	8,20	6,29	69,0	35,1
10:54	48	8,20	6,31	69,0	35,5
10:59	53	8,20	6,31	69,0	35,5
11:04	58	8,20	6,31	69,0	35,5
11:09	63	8,20	6,31	69,0	35,5

* Leituras realizadas 1 min após a água ter atingido as calhas A e B.

Subtraindo-se a vazão de entrada da vazão de saída de água no sulco, teremos a vazão com que a água infiltra no trecho A-B para cada tempo. Para o melhor ajuste da

equação, deve-se desprezar os valores constantes obtidos no final do ensaio, utilizando-se apenas os dois primeiros. Portanto, serão considerados apenas os dados coletados até 10:59 h.

Na Tabela 24 encontram-se calculados os valores da velocidade de infiltração correspondente a cada leitura realizada no ensaio, bem como os valores de X, Y, XY e X² para o cálculo dos parâmetros da curva de regressão.

Tabela 24 - Valores da velocidade de infiltração, X, Y, XY e X² do ensaio de infiltração de água no solo pelo método da entrada e saída de água no sulco.

Hora	Tempo acumulado (min)	VI Qe-Qs (L.min ⁻¹ .m ⁻¹)	X (Tacum)	Y (VI)	XY	X ²
10:23	1	0,945	0	-0,025	0	0
10:24	2	0,920	0,301	-0,036	-0,011	0,091
10:26	4	0,807	0,602	-0,093	-0,056	0,362
10:29	7	0,730	0,845	-0,137	-0,116	0,714
10:34	12	0,657	1,079	-0,183	-0,197	1,165
10:39	17	0,608	1,230	-0,216	-0,266	1,514
10:44	22	0,583	1,342	-0,234	-0,314	1,802
10:49	27	0,565	1,431	-0,248	-0,355	2,049
10:54	32	0,558	1,505	-0,253	-0,381	2,265
10:59	37	0,558	1,568	-0,253	-0,397	2,459
Soma			9,905	-1,678	-2,092	12,422
Média			0,990	-0,168	-0,209	1,242

Note que o valor de X foi obtido com os dados da velocidade de infiltração e não com a infiltração acumulada, como foi feito no método do infiltrômetro de anel, pois a diferença de vazão entre A e B resulta, obviamente, em uma vazão, dada em L.min⁻¹.m⁻¹, que corresponde à VI. Portanto, a equação de regressão que será obtida corresponderá à equação de VI, sendo I obtida pela integral de VI da seguinte maneira:

$$B = m = -0,165$$

$$A = -4,327 \cdot 10^{-3}$$

$$K = \text{ant log } A = 0,99$$

$$VI = 0,99 \cdot T^{-0,165} \begin{cases} VI = L \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{m}^{-1} \\ T = \text{min} \end{cases}$$

$$I = \int VI = \int_0^T 0,99 \cdot T^{-0,165} dt \Rightarrow \frac{0,99}{-0,165+1} \cdot T^{-0,165+1}$$

$$I = 1,186 \cdot T^{0,835} \begin{cases} I = L \cdot \text{m}^{-1} \\ T = \text{min} \end{cases}$$

3.2 - Fatores que Influenciam na Infiltração de Água no Solo

A seguir, são apresentados alguns fatores que podem aumentar ou diminuir a velocidade de infiltração de água no solo.

- **Textura e estrutura do solo:** estes fatores alteram a porosidade do solo e, conseqüentemente, a velocidade de infiltração. Solos de textura mais grosseira (arenosa) podem apresentar VI superiores a 250 mm.h⁻¹, enquanto que em solos de textura fina (argilosos) a VI pode ser próxima a zero, no caso de solos desestruturados. A presença de altas concentrações de sódio no solo promovem a desfloculação das argilas, desestruturando o solo e reduzindo a VI.
- **Umidade inicial do solo:** como foi visto, a VI do solo decresce com o tempo após o início do teste de infiltração, pois quanto maior a quantidade de água no solo, menor é a diferença de potencial entre a zona de saturação e a de molhamento, diminuindo a força provocada pelo gradiente de potencial.
- **Matéria orgânica:** a presença de matéria orgânica favorece a infiltração de água no solo. A presença de raízes também tendem a aumentar a velocidade de infiltração.

- **Camada de impedimento:** alguns solos possuem uma camada de impedimento, composta por rochas, argila ou camada de solo compactada, que podem reduzir drasticamente, ou até mesmo impedir, a infiltração de água. Esta camada pode estar localizada a poucos centímetros ou a alguns metros de profundidade.
- **Variabilidade espacial:** em uma mesma área podem ocorrer grandes variações na velocidade de infiltração, devido à ocorrência de diferentes horizontes de solo, em espessura e constituição, como também a outros fatores (presença de raízes, rachaduras internas etc). Por isso, deve-se realizar várias repetições do teste de infiltração, sendo o número necessário de repetições proporcional às variações encontradas (quanto mais variação, mais repetições) para se obter um valor médio mais próximo da realidade.

4 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRADE JÚNIOR, A. S.; BASTOS, E. A.; MELO, F. B.; RODRIGUES, B. H. N. Determinação do teor de água em amostras de solo utilizando forno microondas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 25, 1996, Bauru. **Resumos** . . . Bauru: SBEA/UNESP/ALIA, 1996. p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM, Brasília, DF. **Dicionário de termos técnicos de irrigação e drenagem**. Viçosa, UFV, 1978, 615.

ARRUDA, F. B. Uso da água na Agricultura. In: **Anais Simpósio sobre o manejo de água na agricultura**. Campinas, 1987, p. 177-97

BAILEY, R. Irrigation planning. In: Bailey. R. **Irrigated Crops and their Management**, Edit. Farming Press., 1990. p. 5-28.

BERNARDO, S. **Manual de irrigação**. 5^a edição. Viçosa, UFV: Imprensa Universitária, p. 3 – 27, 1989.

BLANCO, F.F.; MACHADO, C.C. & COELHO, R.D. Avaliação econômica da irrigação na cultura da manga (*Mangifera indica* L.) para a região nordeste do Brasil. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 28, Pelotas, 1999. **CD-ROM**. Pelotas: 1999.

BORGES, E.A. **Correlação entre capacidade de campo determinada in “in situ” e através de métodos de laboratório**. Areia, Universidade Federal da Paraíba, 1979. 80p. Tese Mestrado.

BRIGGS & SHANTZ estimating irrigation water requirements. In: **Advances in Irrigation**, 1912.

- CHAPMAN, V.J. The salinity problem in general: its importance, and distribution with special reference to natural halophytes. In: POLJAKOF-MAYBER, A.; GALE, J. **Plants in saline environments**. New York: Springer-Verlag, 1975. p.6-24.
- CHRISTOFIDIS, D. A água e a crise alimentar. In: ENCONTRO DAS ÁGUAS, 1, Fortaleza, 1997. **Trabalhos apresentados**. Fortaleza: IICA, 1997. p.14. (<http://www.iica.org.br/novo/op8.htm>)
- DOOREMBUS, J. & KASSAN, A.H. Evaluation des quantités d'eau nécessaires aux irrigations: **Collection Techniques Rurales en Afrique, Ministère de la Coopération**, France, 1979a..p. 204.
- DOOREMBOS, J. & KASSAM, A.H.. **Efeito da água no rendimento as culturas, Estudos FAO Irrigação e Drenagem** . Série n.33 , p. 42-53. 1979b.
- EL SWAIFY, S.A Physical and mechanical properties of oxisols. In. B.K.G Theng, Ed. **Soil with variable charge**. New Zealand Soc. Soil Sci.. 1980. 448p.
- FAO. **FAOSTAT**. <http://apps.fao.org>. (19/07/2000).
- FERREIRA, M.M. & MARCOS, Z.Z. Estimativa da capacidade de campo de latossolo roxo distrófico e regossolo através do ponto de inflexão da curva característica de umidade. **Ciência Prática**, Lavras, n. 7, v. 1, p. 96-101, 1983.
- FIETZ, C.R. & HERNANI, L.C.Determinação da capacidade de campo de Latossolo Roxo distrófico argiloso por diferentes métodos. In: CONGRESSO NACIONAL DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM, 9, 1991, Natal. **Anais**. Fortaleza: ABID,1992. p.665-682. v.1, t.2.
- FOLEGATTI, M.V. Manejo da irrigação e o meio ambiente. **Notessalq**, v.4, n.7, p.1, 1996.
- FREIRE, J. C.Condutividade hidráulica e capacidade de campo de latossolo roxo distrófico não saturado. **R. bras. Ci. Solo**, Campinas, v. 3, v. 2, p. 73-7. 1979

ISRAELSEN, O. W. & HANSEN, V.E. **Irrigation principles and practices**. 3^a edição, John Wiley and Sons, Inc. Logan, Utah, 1962, 447p.

HILLEL, D. **Solo e água. Fenômenos e princípios físicos**. Porto Alegre, UFRGS, 1970. 231p.

KLAR, A. E. **Determinação da umidade do solo pelo método das pesagens**. Anais da ESALQ, v. 23, p. 15 – 30, 1966.

KLAR, A. E. **A água no sistema solo-planta-atmosfera**. 2^a edição. São Paulo: Nobel, p. 57 – 81, 1988.

KLAR, A. E. **Irrigação: frequência e quantidade de aplicação**. São Paulo: Nobel, p. 29 – 61, 1991.

MARSHALL T.J. & STIRK, G. B. Pressure potential of water moving downward into soil. **Soil Science**, Madison, n.68, v. 5, p. 359-70, 1949.

OLIVEIRA, M. Gênese, classificação e extensão de solos afetados por sais. In: GUEYI, H.R.; QUEIROZ, J.E.; MEDEIROS, J.F. (Ed.) **Manejo e controle da salinidade na agricultura irrigada**. Campina Grande: UFPB, 1997. cap.1, p.1-35.

PIZARRO, F. **Riegos localizados de alta frecuencia: goteo, microaspersión y exudación**, segunda Edición, Edit. Mundi-Prensa, Madrid, 1990, p. 55-63.

PRUSKI, F. F.; LOURENÇO, A. J.; OLIVEIRA, M. J. C. Estudo comparativo entre métodos para medição da umidade do solo. In: CONGRESSO NACIONAL DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM, 7, 1986, Brasília. **Anais . . .** Brasília: ABID, 1986. p. 169 – 183.

REICHARDT, K. **A água em sistemas agrícolas**. Ed. Manole. São Paulo, 1987, 188p.

- REICHARDT, K. Capacidade de Campo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.12, p. 211-6, 1988.
- RIGHES, A. A. & VEIGA, C.L. Capacidade de campo e retenção de água no solo a baixas tensões com estrutura deformada e não deformada. In: III SEMINÁRIO NACIONAL DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM, 3 Fortaleza, 1975. **Anais**, DNOCS, 1975. v.3, p.8-15.
- SALATI, E.; LEMOS, H.M.; SALATI, E. Água e o desenvolvimento sustentável. In: REBOUÇAS, A.C.; BRAGA, B.; TUNDISI, J.G. (org.) **Águas doces no Brasil: capital ecológico, uso e conservação**. São Paulo: Escrituras, 1999. cap.2, p.39-64.
- SLATYER, R.O. The significance of the permanent wilting percentage in studies of plant and soil water relations. **Botanical Review**. v. 23, n. 10 , p. 585-636. 1957.
- SYKES, D.J. Reconsideração do conceito da umidade de murchamento permanente. **Turrialba**, v.19, n. 4, p.525-30, 1969.
- TELLES, D.A. Água na agricultura e pecuária. In: REBOUÇAS, A.C.; BRAGA, B.; TUNDISI, J.G. (org.) **Águas doces no Brasil: capital ecológico, uso e conservação**. São Paulo: Escrituras, 1999. cap.9, p.305-338.
- VAN WANBEKE, A. **Management properties of ferrasols**. Roma, FAO, 1974. 129p. (FAO Soils Bulletin, 23).
- VEIHMEYER, F.J. & HENDRICKSON, H. The moisture equivalent as a measure of the field capacity of soils. **Soil Science**, v. 32, n. 3, p. 181-93, 1931.