

**FLÁVIO GONÇALVES OLIVEIRA**

**PRODUÇÃO RELATIVA DO FEJJOEIRO IRRIGADO COM ÁGUA SALINA**

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

**VIÇOSA  
MINAS GERAIS - BRASIL  
2006**

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

T

O48p  
2006

Oliveira, Flávio Gonçalves, 1969-  
Produção relativa do feijoeiro irrigado com água salina  
/ Flávio Gonçalves Oliveira. – Viçosa : UFV, 2006.  
xiii, 61f. : il. ; 29cm.

Orientador: Paulo Afonso Ferreira.  
Tese (doutorado) - Universidade Federal de  
Viçosa.

Referências bibliográficas: f. 54-61.

1. Solos - Salinidade. 2. Fertilidade do solo. 3. Feijão -  
Irrigação. 4. Feijão - Efeito do sal. 5. Feijão - Fisiologia.  
6. Evapotranspiração. I. Universidade Federal de Viçosa.  
II. Título.

CDD 22.ed. 631.587

**FLÁVIO GONÇALVES OLIVEIRA**

**PRODUÇÃO RELATIVA DO FEIJOEIRO IRRIGADO COM ÁGUA SALINA**

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

APROVADA: 08 de maio de 2006.

---

**Prof. Paulo Roberto Cecon**  
(Conselheiro)

---

**Prof. José Eustáquio de S. Carneiro**

---

**Prof. Everardo Chartuni Mantovani**

---

**Prof. Flávio Pimenta de Figueiredo**

---

**Prof. Paulo Afonso Ferreira**  
(Orientador)

*À minha família,*

*Minha esposa Angélica pelo carinho, paciência e companheirismo.*

*Minha filha Ana Alice.*

*Meus pais, em especial minha mãe pelo apoio incondicional.*

DEDICO.

## ***AGRADECIMENTO***

Ao pai celeste, meu Deus.

Ao professor Paulo Afonso Ferreira, pela orientação, confiança e apoio durante o desenvolvimento do trabalho.

Aos professores Paulo Roberto Cecon, Marco Oliva e José Eustáquio, pelas valiosas críticas e sugestões.

Ao professor Everardo Mantovani, pelo apoio.

À Universidade Federal de Viçosa (UFV) e ao Departamento de Engenharia Agrícola pela oportunidade a mim proporcionada.

À Universidade Estadual de Montes Claros (UNIMONTES) pela oportunidade a mim proporcionada, em especial aos colegas do Departamento de Ciências Agrárias.

À Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), por meio do Núcleo de Ciências Agrárias, pelo apoio final.

À equipe do Laboratório de Unidade de Crescimento de Plantas (UCP) da UFV, pelo apoio durante as análises fisiológicas e, em especial, ao laboratorista Rogério e ao estudante de Doutorado Alan Costa.

Ao amigo Delfran, “Delfrango”, pela amizade, apoio e companheirismo.

Ao colega Giovanni, pela colaboração durante a realização do trabalho.

Aos colegas do Curso de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Ambientais, pelo convívio e amizade.

Ao colega de universidade, Flávio Pimenta de Figueiredo, pela sincera amizade, apoio e companheirismo.

A todas as pessoas que, diretamente ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

## **BIOGRAFIA**

FLÁVIO GONÇALVES OLIVEIRA, filho de Francisco de Assis Gonçalves Oliveira e Eloina Gonçalves Oliveira, nasceu em 21 de agosto de 1969, em Montes Claros, Minas Gerais.

Formou-se como Técnico em Agropecuária, em 1987, pelo núcleo de Ciências Agrárias da UFMG (Montes Claros).

Em 1988, ingressou no curso de Engenharia Agrícola na UFV, graduando-se em janeiro de 1993.

Em março de 1993, ingressou no Programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola, em nível de Mestrado, na área de concentração de Irrigação e Drenagem, também na UFV, concluindo-o em setembro de 1995.

Em abril de 2002, ingressou no Programa de Doutorado em Engenharia Agrícola, área de concentração em Recursos Hídricos e Ambientais, na Universidade Federal de Viçosa, submetendo-se à defesa da tese em maio de 2006.

## ÍNDICE

RESUMO.....	x
ABSTRACT.....	xii
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	2
2.1. Considerações gerais.....	2
2.2. Efeito da salinidade nos solos.....	4
2.3. Estresse salino nas plantas.....	4
2.4. Estresses que acompanham o estresse salino.....	7
2.4.1. Estresse osmótico.....	7
2.4.2. Estresse hídrico.....	7
2.4.3. Estresse térmico.....	7
2.4.4. Estresse nutricional.....	8
2.4.5. Estresse por toxidez.....	9
2.5. Seleção de culturas tolerantes à salinidade.....	9
2.6. Salinidade e potenciais de água no solo e na planta.....	12
2.7. Estresses hídrico e salino e a produção das culturas.....	13
2.8. Salinidade e evapotranspiração das culturas.....	17
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	20
3.1. Dimensões e instalação dos lisímetros.....	20
3.2. Caracterização do solo.....	21
3.3. Preenchimento dos lisímetros.....	24
3.4. Caracterização da água de irrigação.....	24

3.5. Delineamento experimental e tratamentos.....	24
3.6. Observações meteorológicas e determinação da ETc.....	25
3.7. Irrigação.....	26
3.8. Condução do experimento.....	27
3.9. Medições fisiológicas.....	28
3.10. Determinação das condutividades elétricas do extrato da pasta do solo saturado (CEes) e da água de drenagem (CEd).....	28
3.11. Determinação da produção relativa da cultura.....	30
3.12. Classificação da cultura do feijoeiro quanto a tolerância à salinidade.....	30
3.12.1. Método proposto por Stewart et al. (1977).....	31
3.12.2. Método proposto por Maas e Hoffman (1977).....	31
3.12.3. Método proposto por Katerji et al. (2000).....	31
3.13. Análise estatística.....	31
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	31
4.1. Dados climáticos.....	31
4.2. Efeito das frações de lixiviação na salinidade do perfil do solo.....	35
4.3. Efeitos das frações de lixiviação sobre a ETc, produção relativa e eficiência de uso de água pelo feijoeiro.....	42
4.4. Determinação do índice diário de estresse hídrico .....	47
5. CONCLUSÕES.....	53
6. BIBLIOGRAFIA.....	54

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Distribuição geográfica dos solos afetados por sal (TANJI, 1990).....	3
Figura 2 - Organograma relacionando o estresse salino com os estresses osmótico, hídrico, tóxico, nutricional e térmico.....	10
Figura 3 - Croqui da área experimental.....	21
Figura 4 - Vista panorâmica da casa de vegetação.....	22
Figura 5 - Curva de retenção de água do solo.....	23
Figura 6 - Vista interna do experimento. ....	25
Figura 7 - Vista da estação meteorológica automática dentro da casa de vegetação.....	26
Figura 8 - Condutividade elétrica do estrato da pasta do solo saturado, em função da solução sobrenadante 1:5. ....	30
Figura 9 - Dados diários de umidades relativas máximas, mínimas e médias (%) no período de 23 de março a dois de julho de 2004.....	33
Figura 10 - Dados diários de temperaturas máximas, mínimas e médias (°C), no período de 23 de março a 02 de julho de 2004.....	33
Figura 11 - Dados diários de radiação solar média ( $W.m^{-2}$ ) no período de 23 de março a 02 de julho de 2004.....	34
Figura 12- Valores diários de evapotranspiração de referência ( $mm\ dia^{-1}$ ) no período de 23 de março a 02 de julho de 2004.....	35
Figura 13- Lâminas totais de irrigação, ETc e de drenagem em cada tratamento.....	35
Figura 14 - Salinidade média no perfil do solo no início e final do experimento, para os sete tratamentos. ....	37
Figura 15 - Comportamento das características do solo (CEes, PST e RAS) em resposta às frações de lixiviação (14, 16, 23, 25, 31 e 40%) com o uso de água salina de $2\ dS\ m^{-1}$ , avaliado nas duas camadas. Os valores observados são	

provenientes da média de três repetições. **significativos a 1% de probabilidade, pelo teste t. ....	40
Figura 16 - Condutividade elétrica do extrato da pasta do solo saturado (CEes) em função das seis frações de lixiviação com água de $2 \text{ dS m}^{-1}$ . ** significativo a 1% de probabilidade pelo teste t. ....	41
Figura 17- Efeito da fração de lixiviação sobre a variação na salinidade média do extrato da pasta do solo saturado, ao longo do experimento.....	41
Figura 18 - Evapotranspiração acumulada da cultura para os sete tratamentos, ao longo do experimento.....	43
Figura 19 - Efeito da salinidade média do perfil do solo sobre a evapotranspiração do feijoeiro.....	44
Figura 20 - Produção relativa do feijoeiro em função da condutividade elétrica do extrato da pasta do solo saturado.....	46
Figura 21 - Redução da produção relativa do feijoeiro, em função do déficit de evapotranspiração relativa.....	47
Figura 22 - Potencial hídrico no período antemanhã, na folha do feijoeiro, determinado ao longo do ciclo fenológico.....	48
Figura 23 - Potencial hídrico médio, no período antemanhã, nas folhas do feijoeiro para os sete tratamentos. ....	49
Figura 24 - Índice diário de estresse hídrico (WSDI) em função da CEes média, ao longo do ciclo da cultura .....	50
Figura 25 - Produção relativa ( $Y_r$ ) de grãos de feijoeiro em função do WSDI.....	51
Figura 26 - Comparação entre produção relativa real ( $Y_{Real}$ ) e a calculada pelo método proposto por Mass e Hoffman (1977) ( $Y_{Hoffman}$ ).....	52
Figura 27 - Comparação entre produção relativa real ( $Y_{Real}$ ) e a calculada pelo método proposto por Katerji et al. (2000) ( $Y_{Katerji}$ ).....	52
Figura 28 - Comparação entre produção relativa real ( $Y_{Real}$ ) e a calculada pelo método proposto por Stewart et al. (1977) ( $Y_{Stewart}$ ).....	53

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Características físico-hídricas do solo.....	22
Quadro 2 - Características químicas das amostras do solo usado no experimento.....	24
Quadro 3 - Características médias da água utilizada na irrigação da cultura do feijão durante o período experimental.....	25
Quadro 4 - Diferenças das médias de características do solo irrigado com água salina (AS) e com água doce (AD), em duas camadas.....	38
Quadro 5 - Efeito da lâmina de lixiviação na variação da CEes média no perfil do solo ( $\Delta$ CEesMédia) e na relação entre a condutividade elétrica do extrato da pasta do solo saturado no início (CEesi) e final do experimento (CEesf).....	42
Quadro 6 - Salinidade média do solo (CEes), lâmina de irrigação (LI), evapotranspiração da cultura (ETc), produtividade do feijão, eficiência de uso de água (EUA) e relação produção/irrigação (P/I).....	44
Quadro 7 - Valores de Ky para os tratamentos irrigados com água doce e salina com frações de lixiviação de 40, 31, 25, 23, 16 e 14%.....	46

## RESUMO

OLIVEIRA, Flávio Gonçalves, D.S., Universidade Federal de Viçosa, maio de 2006.  
**Produção relativa do feijoeiro irrigado com água salina.** Orientador: Paulo Afonso Ferreira. Conselheiros: Marco Antônio Oliva Cano e Paulo Roberto Cecon.

O cultivo do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris L.*) em regiões áridas e semi-áridas, sob condições de salinidade carece de estudos. Portanto, este estudo teve por objetivo: a) determinar o status salino do solo irrigado com água doce ( $0,07 \text{ dS.m}^{-1}$ ) e água salina ( $2 \text{ dS.m}^{-1}$ ); b) determinar parâmetros para predição da produção relativa de grãos do feijoeiro, cv. Talismã, utilizando métodos baseados na salinidade do solo (CEes), no déficit relativo da evapotranspiração da cultura e no potencial hídrico medido no período antemanhã, na folha da planta, por meio do índice diário de estresse hídrico (WSDI). O experimento foi conduzido na estação lisimétrica, sob ambiente protegido, da área experimental de Irrigação e Drenagem, campus da Universidade Federal de Viçosa (UFV), localizada a  $20^{\circ} 45' \text{ S}$  e  $42^{\circ} 45' \text{ W}$ , no Estado de Minas Gerais. Antes do plantio, o solo contido nos lisímetros que iriam receber irrigação com água salina foi, previamente, salinizado até atingir, cerca de  $3,6 \text{ dS m}^{-1}$ , no extrato da pasta do solo saturado, empregando-se água preparada com adição de NaCl e  $\text{CaCl}_2$  nas proporções 3:2, exceto aqueles que foram irrigados com água doce (testemunha), os quais permaneceram com salinidade de  $0,4 \text{ dS m}^{-1}$ . O experimento foi instalado em delineamento inteiramente casualizado, com sete tratamentos e três repetições. Os tratamentos consistiram de sete frações de lixiviação, equivalentes a 3, 14, 16, 23, 25, 31 e 40% da lâmina de água de irrigação, sendo que, para a fração de lixiviação de 3%

usou-se água doce e, para as demais frações, água salina. O feijoeiro cv. Talismã mostrou-se sensível à salinidade, entretanto, a melhor eficiência de uso de água, em condição salina, foi para fração de lixiviação de 31%, sendo que, em geral, a eficiência de uso de água diminuiu com a redução das frações de lixiviação. Pelo método de Stewart o valor de  $K_y$  (declividade da reta ajustada) foi de 1,54. Pelo método de Mass e Hoffman, a salinidade limiar para o feijão, cv. Talismã, foi de  $1,67 \text{ dS.m}^{-1}$  e a redução da produção relativa por acréscimo unitário da CEes, acima da salinidade limiar, foi 15,057% por unidade de CEes. Pelo método de Katerji, o potencial hídrico médio da folha do feijoeiro irrigado com água doce e salina (fração de lixiviação de 14%) foi de -150 KPa e -230 KPa, respectivamente, sendo que a produção relativa do feijoeiro aumenta 3,5% por unidade do WSDI e para valores do WSDI igual a 14,5 KPa a produção relativa é 50%. Encontrou-se que o ajustamento osmótico do feijoeiro, cv. Talismã, limita-se a um valor do potencial hídrico foliar, de -280KPa, medido no período antemanhã. Em geral, os métodos empregados na avaliação da produção relativa do feijoeiro mostraram-se adequados.

## ABSTRACT

OLIVEIRA, Flávio Gonçalves, D.S., Universidade Federal de Viçosa, May, 2006.  
**Relative production of the bean plant irrigated with saline water.** Adviser: Paulo Afonso Ferreira. Committee members: Marco Antônio Oliva Cano and Paulo Roberto Cecon.

There is a need for studies concerning to the bean plant (*Phaseolus vulgaris* L.) cropping in arid and semi-arid regions under salinity conditions. So, this study was carried out with the following objectives: a) to determine the saline status of the soil irrigated with fresh water ( $0.07 \text{ dS.m}^{-1}$ ) and saline water ( $2 \text{ dS.m}^{-1}$ ); b) to determine the parameters for predicting the relative grain production in the bean plant, Talisman cv., by applying methods based on the soil salinity (CEes), as well as on the relative deficit of the crop evapotranspiration and the water potential measured in the leaf at dawn, through the water stress day index (WSDI). The experiment was carried out in lysimeter station under protected environment, at the experimental irrigation and drainage area, in the Universidade Federal de Viçosa, located at 200 45' S and 420 45' W, Minas Gerais State. Before planting, the soil contained in lysimeters that would be irrigated with saline water was previously salinized until reaching, about  $3.6 \text{ dS m}^{-1}$  in the extract of the saturated soil paste, by using water added with NaCl and  $\text{CaCl}_2$  at proportions 3:2, except those irrigated with fresh water (control) which stayed with salinity of  $0.4 \text{ dS m}^{-1}$ . The experiment was set up in entirely randomized design, with seven treatments and three replicates. The treatments consisted of seven leaching fractions corresponding to

3, 14, 16, 23, 25, 31 and 40% irrigation water depth, as using fresh water for the leaching fraction of 3%, but saline water for the other fractions. The Talisman cv. showed to be sensitive to salinity, and the highest efficiency for using water under saline condition was reached with the leaching fraction of 31%. Generally, the efficiency in using water decreased with the reduction in the leaching fractions. For Stewart method, the value of  $K_y$  (slope of the adjusted straight line) was 1.54. For the method by Mass and Hoffman, however, the salinity threshold for the Talisman cv. was  $1,67 \text{ dS.m}^{-1}$  and the reduction in relative production by unit increment in CEes above the salinity threshold of 15.057% by unit CEes. In the Katerji's method, the average water potential in the leaf of the bean plant irrigated with both fresh and salty water (14% leaching fraction) was -150 KPa and -230 KPa, respectively, as the relative production of the bean plant increases 3.5% by unit WSDI, whereas for the WSDI values of 14.5 KPa the productivity is 50%. The osmotic adjustment of the bean plant, Talisman cv., was found to be limited to a value of -280KPa for the leaf water potential measured at dawn. In general, the applied showed to be adequate to the evaluation of the bean plant productivity.

## 1. INTRODUÇÃO

A constante disputa pelo uso da água e a deterioração de sua qualidade tem forçado os irrigantes a buscar alternativas de uso de águas de qualidade inferior, especialmente, no que diz respeito à concentração salina.

O uso de águas salinas na irrigação em regiões áridas e semi-áridas, onde o balanço hídrico é normalmente negativo pode proporcionar, quando o manejo da irrigação é inadequado, o acúmulo gradativo de sais no solo, podendo culminar na esterilização do solo cultivado, a exemplo de regiões como o Paquistão, onde dois milhões de hectares já foram abandonados, em razão da salinização do solo e o Egito cuja evolução da salinização tem sido similar (DE VILLIERS, 2002).

A busca do aumento da produção agrícola mundial tem levado os produtores rurais a intensificar, cada vez mais, a utilização dos recursos naturais, sobretudo solo e água. Em algumas situações, a qualidade desses recursos não é adequada, podendo tanto o solo quanto a água, em condições naturais, apresentarem-se salinos.

O uso de águas com altas concentrações salinas pode levar a conseqüência graves ao solo e às plantas, chegando, em algumas situações, a inviabilizar a utilização de terras produtivas. Registros históricos relatam o desaparecimento de antigas sociedades, cujas economias eram baseadas na agricultura irrigada, devido ao uso inadequado da água e do solo (TANJI, 1990; DAKER, 1988).

Com a crescente demanda por alimentos, tanto o uso da água quanto do solo salino tem se tornado imprescindível à expansão da fronteira agrícola, merecendo especial atenção do agricultor para os efeitos da concentração de sais no solo podendo resultar num fator de estresse salino às plantas.

Sob condições de estresse salino, as plantas respondem diferentemente, conforme sua sensibilidade ou tolerância. A detecção de alterações fisiológicas nas plantas, associada às práticas de engenharia de irrigação e drenagem, são pouco pesquisadas, embora possam ser utilizadas como forma de se entender as causas e os efeitos da salinidade do solo sobre as plantas. Por exemplo, certos sintomas nas plantas como a clorose, queima nas bordas das folhas, raquitismo, dentre outros, podem ser indicativo de lixiviação inadequada dos sais presentes na zona radicular.

As regiões norte de Minas Gerais e nordeste do Brasil apresentam potencialidade para a salinização do solo, em virtude da ocorrência de águas salinas em açudes e subterrâneas, necessitando, portanto, de monitoramento permanente da salinidade da solução do solo a fim de verificar o balanço de sais entre safras consecutivas.

O feijoeiro é considerado uma das culturas mais importantes para o País que figura como o maior produtor mundial com, aproximadamente, 20 % da produção total de grãos, cerca de 3,3 milhões de toneladas por ano, com área cultivada da ordem de 4 milhões de hectares (IBGE, 2006). Cultivado em todo território nacional e, em especial, no semi-árido, o feijoeiro pode ser cultivado em três épocas distintas, ou seja, no período das chuvas, da seca e do inverno, desde que sob regime de irrigação. Em razão de sua sensibilidade à salinidade, é ainda carente de parâmetros confiáveis de manejo de irrigação e drenagem para torná-la sustentável nessa região.

Face ao exposto, este trabalho tem como objetivos:

- determinar o status salino do solo irrigado com água doce e água salina ( $2 \text{ dS.m}^{-1}$ ), para as frações de lixiviação de 40, 31, 25, 23, 16, e 14%; e
- determinar parâmetros para predição da produção relativa de grãos do feijoeiro irrigado com água doce e salina, utilizando métodos baseados na salinidade do solo (CEes), no déficit relativo da evapotranspiração da cultura e no potencial hídrico medido no período antemanhã, na folha da planta, por meio do índice diário de estresse hídrico (WSDI).

## **2. REVISÃO DE LITERATURA**

### **2.1. Considerações gerais**

A área de solo agricultável no globo terrestre é  $7 \times 10^9$  ha, sendo que somente  $1,5 \times 10^9$  ha são cultivados. Das terras cultivadas, cerca de 23% são salinas e 37% são sódicas, estando geograficamente distribuídas conforme Figura 1 (TANJI, 1990).

Com relação à água, a situação não é diferente, com o agravante de ser nas regiões de maior densidade populacional onde a disponibilidade hídrica é, geralmente, mais limitada tanto em quantidade quanto em qualidade.

Portanto, o uso de água contendo sais associada aos solos de classe inadequada à agricultura irrigada, como aqueles com algum problema de drenagem natural e, ainda,

associados ao manejo inadequado, vêm induzindo à salinização de mais e mais áreas, fato este observado desde a antiga Mesopotâmia, hoje Iraque, há 6.000 anos (TANJI, 1990; DAKER, 1988).



Figura 1 - Distribuição geográfica dos solos afetados por sal (TANJI, 1990).

Em termos globais, cerca de 45 a 60 milhões de hectares de terras cultivadas estão salinizadas, representando 20 a 25 % da área total irrigada, mundialmente, conforme Ghassemi et al.(1995).

Matallo (1999) afirma que, aproximadamente, 30 mil hectares das áreas irrigadas no Brasil apresentam problemas de salinidade, sendo necessários em torno de US\$ 60 milhões para recuperar essas áreas.

Historicamente, a salinização das áreas de produção agrícola tem exigido a substituição de culturas mais sensíveis por tolerantes, o que, juntamente com as técnicas de manejo, tem possibilitado aos agricultores não apenas a utilização de áreas com problemas de salinidade, mas, também a obtenção de produções economicamente viáveis e ambientalmente sustentáveis. Glenn e Brown (1999) discorrendo sobre diversos resultados de pesquisas em nível mundial, relatam que mesmo sob condições de cultivo com água do mar, salinidade de aproximadamente  $63 \text{ dS.m}^{-1}$ , as plantas halófilas mais tolerantes podem produzir tanto quanto as culturas convencionais irrigadas com água doce. Contudo, citam que a salinidade limiar para o crescimento da maioria das halófilas mais tolerantes é de  $11,4$  a  $19,4 \text{ g.L}^{-1}$  ( $17,8$  a  $30,3 \text{ dS.m}^{-1}$ ) de sólidos solúveis totais.

## **2.2. Efeito da salinidade nos solos**

A salinidade no solo ocorre devido ao excesso de sais derivados de metais alcalis e alcalinos terrosos, primariamente  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ , e  $\text{Mg}^{2+}$ . Os ânions predominantes são usualmente  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ . O solo salino pode conter concentração salina capaz de comprometer o crescimento e desenvolvimento das plantas. Este excesso de sais pode ser inerente ao próprio solo, advindo da água de irrigação e por elevação do lençol freático ou por intrusão de água do mar (FERREIRA, 2001).

A salinidade da solução do solo pode ser medida por meio da condutividade elétrica, uma vez que esta é proporcional à concentração iônica da solução. Quanto maior a concentração salina da solução, maior é o efeito sobre as plantas. É importante ter em mente, que quanto maior a solubilidade do sal, maior é sua nocividade sobre as plantas, enquanto o sal pouco solúvel geralmente precipita-se antes de alcançar níveis de concentração prejudiciais às plantas (PIZARRO, 1978).

Um solo é considerado salino, quando existe uma elevada concentração de sais solúveis, reduzindo o potencial da água a níveis prejudiciais às plantas. Ele atinge tal classificação quando, em geral, a condutividade elétrica da pasta saturada excede  $4 \text{ dS.m}^{-1}$  (RICHARDS, 1954), sendo que a água é salina quando a condutividade elétrica é maior que  $0,70 \text{ dS.m}^{-1}$  (RHOADES et al., 2000). Quando o valor da condutividade elétrica da água está abaixo de  $0,70 \text{ dS.m}^{-1}$ , não significa que ela possa ser usada indiscriminadamente na irrigação em regiões de baixo índice pluviométrico, sem o emprego de técnicas apropriadas de manejo, principalmente no que diz respeito à aplicação de lâminas de lixiviação, devido ao efeito cumulativo dos sais no solo (FERREIRA, 2001).

Santos (2005) concluiu que, nas condições experimentais estudadas, o uso de uma fração de lixiviação de 25% proporcionou aumento da concentração de nutrientes na solução do solo. Concluiu, ainda, que o aumento das frações de lixiviação com água salina de  $2 \text{ dS.m}^{-1}$  tende a aumentar a disponibilidade de  $\text{H}^+$  no solo e, conseqüentemente, o aumento do pH, provocando redução da saturação por bases e decréscimo na condutividade elétrica no extrato da pasta do solo saturado.

## **2.3. Estresse salino nas plantas**

Os efeitos dos sais nas plantas manifestam-se em razão tanto da diminuição do potencial hídrico da água no solo, tornando-a menos disponível para as plantas, quanto do desequilíbrio nutricional e da toxicidade por íons específicos. A salinidade da água do solo gera o estresse osmótico nas células das plantas, ou seja, um efeito físico,

enquanto concentrações elevadas de certos íons específicos tóxicos, como sódio, boro e cloreto proporcionam um efeito químico (FERREIRA, 2001; AYERS & WESTCOT, 1985; PIZARRO, 1978).

A planta responde ao estresse osmótico associado ao estresse hídrico, com mudanças fisiológicas, devido à necessidade de ajustar-se osmoticamente, de tal forma que o potencial de água nas células seja reduzido a um valor menor do que o do solo a fim de possibilitar a absorção de água. Além disso, a planta tenta manter em valores elevados, o potencial de parede ou pressão de turgescência (TAIZ & ZEIGER, 2004).

Lima (1998) em estudo realizado com o feijoeiro, concluiu que a salinidade da água de irrigação afetou a duração de todos os estádios da cultura, sendo os estádios inicial e final aqueles que apresentaram maiores diferenças. Relata ainda, que quanto maior a fração de lixiviação menores serão essas diferenças. O autor concluiu ainda que a salinidade da água de irrigação e a fração de lixiviação afetaram todas as variáveis de crescimento e os componentes da produção.

Segundo Santos (2005), o potencial osmótico das folhas do feijoeiro cultivado com água salina ( $2 \text{ dS.m}^{-1}$ ) diminuiu, significativamente, sendo o modelo linear o que apresentou o melhor ajuste aos dados. Concluiu, ainda, que o potencial osmótico das folhas reduz  $0,08 \text{ MPa}$  por unidade de  $\text{dS.m}^{-1}$  acrescido na condutividade elétrica do extrato da pasta do solo saturado, mostrando, portanto, que o feijoeiro possui alguma capacidade de ajustamento osmótico, quando cultivado em meio salino embora seja considerado planta sensível.

O estresse hídrico provoca diminuição no conteúdo de água da planta contraindo suas células, o que resulta no afrouxamento das paredes celulares. Este decréscimo do volume celular conduz à menor pressão de turgescência e subsequente concentração de solutos nas células. Por ser a redução da pressão de turgescência o efeito biofísico significativo mais precoce do estresse hídrico, as atividades dela dependentes como a expansão foliar e o alongamento de raízes são as mais prejudicadas (LARCHER, 2000; TAIZ & ZEIGER, 2004).

Segundo Taiz e Zeiger (2004), a expansão foliar depende principalmente da expansão celular e, portanto, sua inibição provoca lentidão do crescimento foliar assim que se estabelece o déficit hídrico. Como consequência, as plantas terão menor desenvolvimento, taxa de transpiração e área exposta à captação de radiação, além da consequente diminuição de seu potencial fotossintético e produtividade.

À medida que o potencial hídrico foliar decresce, a atividade fotossintética diminui podendo este efeito estar relacionado, em parte, à redução da condutância estomática, com conseqüente redução da transpiração e aumento de temperatura (LARCHER, 2000).

Santos (2005) relata, para a cultura do feijoeiro, que o teor de clorofila, a condutância estomática, a transpiração e a taxa fotossintética reduziram, significativamente, de forma não-linear, enquanto a área foliar reduziu, linearmente, com o aumento da salinidade no solo.

A inibição da expansão foliar reduz o consumo de carbono e energia e, por razão, uma maior proporção de assimilados vegetais pode ser distribuída ao sistema radicular, o que possibilita a sustentação do crescimento das raízes. Assim, as plantas exibem um sistema radicular predominantemente superficial, quando todas as camadas do solo estão umedecidas; entretanto, quando a água é esgotada nas camadas superficiais ocorre perda de raízes nesta região e a proliferação de raízes nas camadas mais profundas. Durante a fase reprodutiva e quando ocorre o déficit hídrico, os assimilados são direcionados para os frutos e distanciados das raízes, o que explica o fato de as plantas geralmente serem mais sensíveis ao estresse hídrico durante a reprodução. Quando o estresse hídrico é mais pronunciado ou quando a área foliar plena da planta é atingida, antes do início do estresse ocorre o fechamento estomático como forma de reduzir a perda de água por transpiração (TAIZ & ZEIGER, 2004).

A salinidade excessiva reduz o crescimento da planta, pois causa aumento no dispêndio de energia para absorver água do solo e realizar os ajustes bioquímicos necessários à sua sobrevivência em condições de estresse. Esta energia é desviada dos processos que conduzem ao crescimento e à produção (RHOADES et al., 2000).

Kriedemann (1986) relata que os estádios iniciais de formação de brotos e folhas são governados pela divisão celular e são relativamente insensíveis ao déficit hídrico e à salinidade. No entanto, podem ser afetados pelo suprimento de assimilados. A expansão foliar, no entanto, é sensível tanto ao déficit hídrico quanto à salinidade.

A regulação do balanço de sais nas folhas e a manutenção de um mínimo de área foliar para a realização de fotossíntese e produção de carboidratos parecem cruciais para o crescimento contínuo da planta sob estresse salino (MUNNS & TERMAAT, 1986).

## **2.4. Estresses que acompanham o estresse salino**

Segundo Taiz e Zeiger (2004), os estresses que acompanham o estresse salino são: osmótico, hídrico, térmico, nutricional e por toxidez. Esses estresses são abordados a seguir.

### **2.4.1. Estresse osmótico**

A alta concentração de sais no solo é um fator de estresse para as plantas, pois, o componente osmótico do potencial da água no solo pode torná-la indisponível às plantas. Além disto, em ambientes salinos, o potencial hídrico é baixo, exigindo um maior gasto de energia por parte da planta para absorvê-la do solo. Esta energia é desviada dos processos que conduzem ao crescimento e à produção (RHOADES et al., 2000).

Segundo Tanji (1990), as plantas acumulam sais nos vacúolos como forma de reduzir o potencial de água nas células. Esses sais encontram-se na forma inorgânica, absorvidos do ambiente salino, ou sintetizados pelas próprias plantas, ou ambos (LÄUCHLI & EPSTEIN, 1990).

### **2.4.2. Estresse hídrico**

Conforme Doorenbos e Kassam (1979), quando as necessidades hídricas da planta não são atendidas plenamente, o déficit hídrico desenvolve-se até atingir o nível ao qual seu crescimento e rendimento tornam-se afetados, cujos níveis de magnitude variam de acordo com a espécie e estágio de desenvolvimento.

Quando a planta encontra mais dificuldade para absorver água do solo, o seu potencial hídrico diminui, desencadeando alterações de uma série de funções celulares conforme o valor de potencial atingido (TAIZ & ZEIGER, 2004).

### **2.4.3. Estresse térmico**

O estresse térmico é considerado um estresse secundário ou conseqüente do estresse hídrico, sendo que a planta estressada fecha os estômatos como forma de se defender, a fim de não perder água para o meio e manter a turgidez das células. O fechamento dos estômatos resulta na redução da taxa de transpiração e no conseqüente aumento da temperatura foliar. Segundo Taiz e Zeiger (2004), nas plantas C3 e C4 não irrigadas, a temperatura foliar pode subir de 4 a 5°C acima da temperatura ambiente, sob condições de luz solar plena e, aproximadamente, ao meio-dia.

Santos (2005) observou um aumento de aproximadamente 4,5 °C na temperatura foliar do feijoeiro, quando a salinidade do extrato da pasta do solo saturado passou de 1 para 7 dS.m<sup>-1</sup>.

Sob altas temperaturas, a fotossíntese e a respiração são inibidas, sendo que as taxas fotossintéticas diminuem antes das respiratórias (TAIZ & ZEIGER, 2004).

#### **2.4.4. Estresse nutricional**

O estresse nutricional pode ocorrer tanto devido ao desequilíbrio nutricional, ou seja, quando alguns íons em excesso como Na<sup>+</sup>, Cl<sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> inibem a absorção de outros, quanto pela redução do fluxo de massa conseqüente do fechamento dos estômatos, quando em condições de pressão osmótica elevada e, ou déficit de água no solo. As plantas podem ainda sofrer estresse nutricional, quando ocorrem valores extremos de pH. Em valores muito baixo de pH (≈ 3), o H<sup>+</sup> inibe a absorção dos macronutrientes P, K e Mg, enquanto em valores elevados (> 7,5) os íons OH<sup>-</sup> prejudicam a absorção de P, além da diminuição na disponibilidade de nitrogênio, enxofre e boro (FERREIRA, 2001).

Segundo Pizarro (1978), uma característica universal da salinidade é a presença de alta concentração ou atividade de certas espécies de íons, estando o sódio e o cloreto presentes na maioria dos solos salinizados. A relação desses íons com os outros íons presentes na solução do solo pode ser bastante alta, provocando deficiências nutricionais daqueles que se encontram em baixas concentrações.

Um alto grau de seletividade do mecanismo de transporte de potássio foi demonstrado, em experimento com tecidos excisados de folhas de mangrove (*avicenia marina*), em que mesmo essa espécie sendo resistente pode demonstrar evidências de deficiências de potássio por indução salina (BALL et al., 1987).

Condições salinas podem inibir a absorção de nitrato. Embora em experimentos de curtos períodos (em torno de 12 horas) com plântulas de cevada, Aslam e colaboradores, em 1984, citados por Tanji (1990), verificaram que o SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> e, em maior extensão, o Cl<sup>-</sup> diminuíram a taxa de absorção de NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, sendo o grau de inibição de 83% a 0,2 M NaCl.

Läuchli e Epstein (1990) afirmam que os íons de sódio, em altas concentrações, podem causar distúrbio nutricional nas plantas com relação ao cálcio e que a inadequada concentração de cálcio nas células afeta o funcionamento e o crescimento da membrana, em poucos minutos.

Lahaye e Epstein (1969) colocaram plantas de feijão (*Phaseolus vulgaris L.*) em solução de 50 mM de NaCl e CaSO<sub>4</sub> na concentração de 1mM e observaram que o NaCl diminuiu o crescimento das plantas, durante os sete dias do experimentos. Todavia, ao adicionar Ca<sup>2+</sup> à concentração de 3 a 10 mM, as plantas foram completamente protegidas dos efeitos adversos do NaCl.

Santos (2005) observou redução no pH do solo, ao utilizar água salina, bem como redução nos teores de N e Fe nas folhas do feijoeiro.

#### **2.4.5. Estresse por toxidez**

Segundo Ayers e Westcot (1985), a toxicidade é um problema que ocorre internamente na planta. Os íons tóxicos contidos, comumente, nas águas de irrigação são cloreto, sódio e boro, cujos danos podem ser provocados, individualmente ou em conjunto. Segundo Hanson et al. (1999), a alta concentração de cloro e de sódio pode sinalizar alta salinidade no solo.

Concentrações elevadas de íons tóxicos contribuem tanto para a redução no componente osmótico do potencial da água, quanto na resposta das plantas à salinidade por distúrbios intrínsecos (TANJI, 1990).

O estresse por toxidez pode ocorrer devido à absorção, pelas plantas, de alguns íons em excesso na solução do solo. Bernstein (1965) observou que várias plantas frutíferas têm pouca capacidade para excluir os íons sódio e cloreto de suas folhas e, freqüentemente, sofrem toxicidade mesmo sob condições de baixa salinidade.

Segundo Mass (1990), o efeito de toxicidade nas plantas é diferenciado, conforme as espécies de íons e suas concentrações. Concentrações de cloreto acima de 200 mol.m<sup>-3</sup> podem ser toleradas por algumas espécies de plantas, enquanto uma concentração de 0,2 mol.m<sup>-3</sup> de boro é tóxica à maioria das espécies.

O estresse salino desencadeia um conjunto de estresses, cujo inter-relacionamento pode ser observado no organograma da Figura 2.

#### **2.5. Seleção de culturas tolerantes à salinidade**

Na seleção de plantas tolerantes à salinidade, é necessário um programa de melhoramento genético, o qual deve estar associado a avaliações em nível de campo do desempenho dessas plantas no ambiente salino. Hanson et al. (1999) citam que a tolerância de uma cultura à salinidade é inerente à capacidade da planta em resistir aos

efeitos do excesso de sais na zona radicular, sendo relevante a espécie de sal mais presente.

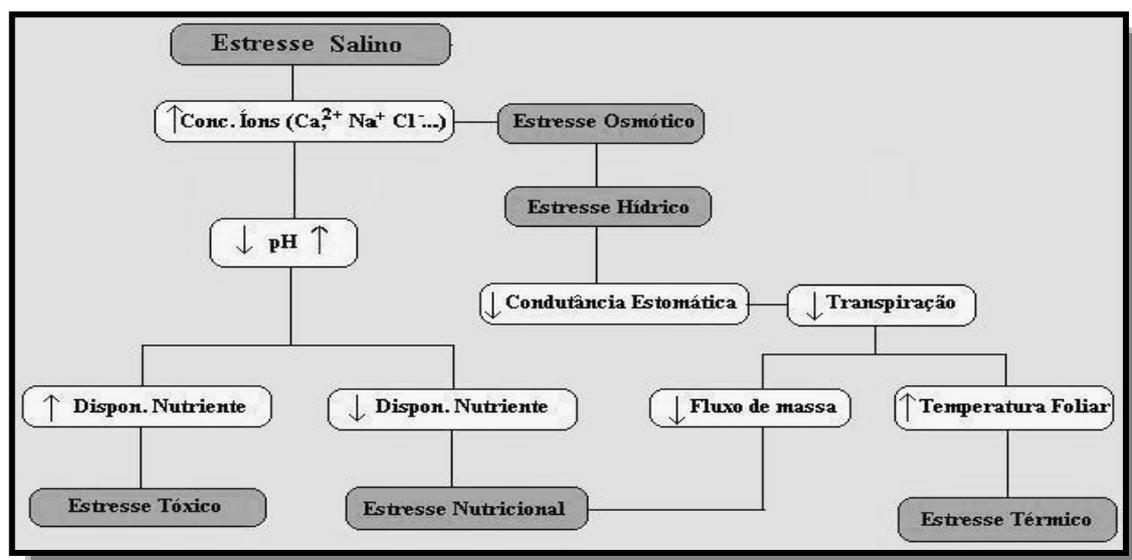


Figura 2 - Organograma relacionando o estresse salino com os estresses osmótico, hídrico, tóxico, nutricional e térmico.

Segundo Ayers e Westcot (1985), a tolerância de uma cultura relativamente às outras é bem conhecida, o que possibilita a determinação de diretrizes técnicas para interpretação da qualidade da água de irrigação. Na tabela de tolerância das culturas à salinidade, apresentada por esses autores, os valores correspondem aos intervalos recomendados para culturas irrigadas em regiões áridas e semi-áridas. Afirmam, ainda, que o conceito de tolerância é muito útil à comparação e seleção de culturas adequadas a determinadas áreas, pois, esses valores variam com as condições de solo, com as práticas culturais e com o clima, sendo esta última condição a que mais influencia.

Fageria e Gheyi (1997) citam que a avaliação da planta fundamenta-se em características morfológicas e fisiológicas. Quanto às características morfológicas os autores relatam que um dos modos de avaliação baseia-se no comportamento das folhas, ou seja, o percentual de folhas mortas. Entretanto, acreditam que a melhor forma de avaliar essas características baseia-se na redução da produção de matéria seca ou de grãos, sob certo nível salino, em relação à testemunha. Este é considerado o melhor critério para a avaliação, devido sua aplicação em condições de campo. Entretanto, a seleção baseada em parâmetros fisiológicos pode resultar em maior sucesso no desenvolvimento de cultivares para tolerância à salinidade. Läuchli e Epstein (1990) mostram que vários mecanismos de tolerância estão envolvidos e que alguns parâmetros

fisiológicos de avaliação, como a acumulação e exclusão de íons e ajustamento osmótico, são mais importantes.

A capacidade de exclusão de sais das plantas é limitada, pois, acima do nível limiar de sal no meio externo esta capacidade torna-se saturada e o mecanismo de exclusão define resultando altas taxas de transporte de  $\text{Na}^+$  ou de  $\text{Cl}^-$ , ou ambos, para as brotações. A alta tolerância aos sais nem sempre corresponde a altas taxas de exclusão de  $\text{Na}^+$  ou  $\text{Cl}^-$  (LÄUCHLI & EPSTEIN, 1990).

Além da produção, é de suma importância o conhecimento da eficiência de uso de água pela cultura, a qual representa a relação entre a produção (de matéria seca total, ou de produto comercial) e o volume de água utilizado para a produção. Em trabalho realizado por Katerji et al. (1996), concluiu-se que a eficiência de uso da água tanto para grãos quanto para matéria seca foi mais afetada pelo tipo de solo do que pela salinidade.

Katerji et al. (1997), em trabalho realizado com beterraba açucareira (*Beta vulgaris*), em condições salinas, concluíram que, para o caso de bom suprimento de água (potencial hídrico no período antemanhã na folha até -0,4 MPa), quanto menor a salinidade do solo, maior a condutância estomática. Entretanto, no caso de estresse hídrico, as plantas que cresciam sob condições salinas foram capazes de manter a condutância estomática com maiores valores do que aquelas sob o tratamento não salino, devido ao ajustamento osmótico que mantém o potencial de turgescência da folha.

Calbo et al. (1997) em trabalho realizado com plantas de buriti (*Mauritia vinifera Mart.*), submetidas ao estresse hídrico pela suspensão da irrigação, concluíram que essas plantas tiveram um ajustamento osmótico de 18,9% na turgescência zero, mediante o estabelecimento do estresse hídrico, evidenciando, também, a importância do ajuste osmótico como parâmetro fisiológico para avaliação da tolerância ao estresse hídrico.

Portanto, considerando-se uma análise agrônômica, a principal característica que uma planta deve apresentar, para ser caracterizada e selecionada como tolerante à salinidade, é a sua resistência a altos valores de salinidade limiar e que a redução de produção não seja alta com o aumento da salinidade acima desse valor limiar.

Com relação às principais propriedades fisiológicas a serem escolhidas para um programa de melhoramento, com vistas a selecionar culturas com maior resistência à

salinidade, pode-se citar a acumulação e a exclusão de íons, o ajustamento osmótico e a eficiência de uso de água.

## 2.6. Salinidade e potenciais de água no solo e na planta

No sistema solo-planta-atmosfera o movimento da água ocorre no sentido do local de maior para o de menor potencial. O potencial da água é caracterizado por seu estado de energia, em suas diferentes formas (REICHARDT, 1996), conforme Equação 1.

$$\Psi_T = \Psi_g + \Psi_m + \Psi_p + \Psi_s \quad (1)$$

em que

$\Psi_T$  = potencial total da água, m;

$\Psi_g$  = potencial gravitacional, m;

$\Psi_m$  = potencial matricial, m;

$\Psi_p$  = potencial de pressão, m; e

$\Psi_s$  = potencial osmótico, m.

Com base na Equação 1, no caso das plantas, o potencial gravitacional geralmente é desconsiderado, uma vez que o nível de referência é arbitrário e pode sempre ser considerado no mesmo nível de referência do ponto em estudo, um vacúolo, por exemplo. O componente matricial é também desprezado, sendo importante somente em situações tais como, a água retida pelas paredes celulares, o que não compõem a área de interesse nesse trabalho (REICHARDT, 1996).

O potencial total da água na planta resume-se aos componentes de pressão (turgescência) e ao osmótico, os quais apresentam os valores entre 0,2 a 0,5 MPa e de -0,2 a -1,0 MPa, respectivamente. (REICHARDT, 1996; LARCHER, 2000; TAIZ & ZEIGER, 2004).

A redução do potencial total da água no solo, associada à alta demanda evapotranspirativa, provoca uma maior redução no potencial hídrico da planta em seus diversos órgãos (raiz, folha, etc.), segundo Larcher (2000).

Para sobreviver às altas salinidades do ambiente de cultivo, as plantas precisam se ajustar osmoticamente, ou seja, devem acumular, internamente, altas concentrações de solutos pela absorção de íons da solução do solo ou pela sintetização de compostos orgânicos, ou por ambos. O sal do ambiente celular serve como um osmoticum no vacúolo. No citoplasma, a função de osmorregulação é feita, principalmente, pelos solutos orgânicos sintetizados pela planta. O tonoplasto deve transportar sal para o

interior do vacúolo, consolidando ali uma alta concentração, e prevenindo uma fuga de osmólitos orgânicos do citoplasma para o vacúolo (LÄUCHLI & EPSTEIN, 1990).

Vários autores vêm utilizando o potencial hídrico e o potencial osmótico da folha das plantas para determinar o estresse, obtendo bons resultados (KATERJI et al. 1997; CASTRIGNANÒ et al., 1998; KATERJI et al., 2000; KATERJI et al., 2003; KATERJI et al., 2005a; KATERJI et al., 2005b).

## 2.7. Estresses hídrico e salino e a produção das culturas

Doorenbos e Kassam (1979) determinaram o coeficiente de sensibilidade ao déficit hídrico em 26 culturas, baseando-se no modelo proposto por Stewart et al. (1977), conforme Equação 2. No modelo, somente o déficit da evapotranspiração da cultura ( $ET_c$ ) é considerado, em razão da redução na disponibilidade de água do solo.

$$1 - \frac{Y_c}{Y_m} = K_y \cdot \left(1 - \frac{ET_c}{ET_m}\right) \quad (2)$$

em que

$Y_c$  = produtividade da cultura;

$Y_m$  = produtividade máxima;

$K_y$  = coeficiente de sensibilidade ao déficit hídrico (fator de resposta da cultura);

$ET_c$  = evapotranspiração da cultura;

$ET_m$  = evapotranspiração máxima da cultura.

Os valores de  $K_y$  para a maioria das culturas foram determinados supondo-se que a relação entre a produção relativa ( $Y_c/Y_m$ ) e a evapotranspiração relativa ( $ET_c/ET_m$ ) é linear e válida para déficits hídricos até 50 % em relação à  $ET_m$  (DOORENBOS & KASSAM, 1979; FRIZZONE, 1998).

Vários trabalhos evidenciam, claramente, a redução da produtividade das culturas em função do aumento na salinidade do solo (MASS & HOFFMAN, 1977; MASS, 1990; RHOADES, 1990; RHOADES & LOVEDAY, 1990; AYERS & WESTCOT, 1985; MEDEIROS & GHEYI, 1997; CASTRIGNANÒ et al., 1998; ALLEN et al., 1998; HANSON et al., 1999; GLENN & BROWN, 1999; RHOADES, et al., 2000; FERREIRA, 2001; KATERJI, et al., 1997; KATERJI, et al., 2000; KATERJI, et al., 2001; KATERJI, et al., 2003; KATERJI, et al., 2005a; KATERJI, et al., 2005b).

No ambiente salino, a redução no potencial osmótico do meio de cultivo é a primeira causa, que direta ou indiretamente, provoca efeitos no crescimento das

culturas. A redução no potencial osmótico da solução do solo provoca uma redução na disponibilidade de água para as plantas, que, adicionada ao efeito da redução do potencial matricial do solo, proporciona um potencial total da água do solo ainda menor, conforme encontrado por Santos (2005).

Em condições de salinidade, a proposta elaborada por Doorenbos e Kassam (1979), utilizando-se a Equação 2, não é adequada, pois, o estresse ocorrido no caso da salinidade não é somente o hídrico, dando origem a outros, conforme citam Taiz e Zeiger (2004). Em geral, a partir de um determinado nível salino, as plantas decrescem a produção como resposta à salinidade no solo, com o fechamento estomático e redução do potencial hídrico da folha, reduzindo também a evapotranspiração.

Bresler et al. (1982) citam várias equações que correlacionam a produção relativa e a salinidade no solo, citando a potencial, exponencial e a do platô-linear (Equação 3), sendo a última mais difundida, proposta por Mass e Hoffman (1977).

$$Y_r = 100 - b \cdot (CE_{es} - CE_{esL}) \quad (3)$$

em que

$Y_r$  = produção relativa da cultura ( $Y_c/Y_m$ ), %;

$CE_{es}$  = condutividade elétrica do extrato da pasta do solo saturado,  $dS \cdot m^{-1}$ ;

$CE_{esL}$  = condutividade elétrica limiar do extrato da pasta do solo saturado,  $dS \cdot m^{-1}$ ; e

$b$  = redução da produção relativa por acréscimo unitário na  $CE_{es}$ , acima da  $CE_{esL}$ , %/  $dS \cdot m^{-1}$ .

Os valores de  $b$  e  $CE_{esL}$  são tabelados para muitas culturas. Entretanto, é importante a realização de pesquisas locais envolvendo as variedades utilizadas na região, uma vez que tanto o clima quanto o cultivar influenciam a produção.

Vale ressaltar que, para valores de salinidade menores que o limiar, a produção relativa é 100%, sendo que, para valores iguais ou maiores que a salinidade limiar, a produção relativa decresce linearmente. A partir de valores de produção relativa igual a 50% , a colheita torna-se, em geral, economicamente inviável.

Homaee et al. (2002a, 2002b, 2002c) encontraram, para a alfafa, uma salinidade limiar menor que a proposta por Maas e Hoffman (1977). Entretanto, o coeficiente “ $b$ ” foi praticamente o mesmo, o que sugere ser o valor da salinidade limiar influenciado por diferentes tipos de solo, pela demanda evapotranspirativa, por diferentes tipos de saís e pelo cultivar. Esses mesmos autores afirmaram que a função linear mostrou bons

resultados para estimativa de transpiração e de absorção de água pelas raízes, em condições de estresse hídrico e salino combinados. Concluíram, que o fator de redução não-linear também prevê bons resultados, mas que a melhoria provocada é insignificante em comparação com os dados experimentais, o que, aliado à sua maior dificuldade de utilização, é a razão de sua pouca difusão.

Segundo Rhoades e Loveday (1990), dá-se menos atenção à caracterização da tolerância aos sais das diversas variedades de uma mesma cultura do que ao manejo da irrigação e da drenagem, daí a importância de se conhecer os coeficientes da Equação 3 para os diversos cultivares.

Sadeh e Ravina (2000), em experimento realizado com a cultura do milho, concluíram que mesmo com a condutividade elétrica do extrato da pasta do solo saturado (CEes) elevada, quando a irrigação era realizada com água de salinidade mediana, a produtividade de grãos alcançava valores próximos à máxima. Entretanto, quando a salinidade da água de irrigação era elevada, ou seja, em torno de  $8 \text{ dS.m}^{-1}$ , era necessária uma maior lâmina de irrigação e a produtividade final dificilmente atingia um máximo.

Como a tolerância das culturas à salinidade é dependente do clima, torna-se difícil comparar culturas diferentes, pois os valores de tolerância são baseados em pesquisas e observações práticas, em que cada cultura é avaliada numa condição climática específica (AYERS & WESTCOT, 1985; MAAS, 1990).

Katerji et al. (2001) consideram o fator de resposta da produção relativa, utilizando o modelo de Stewart et al. (1977), que embora sensível às condições climáticas e ao índice de área foliar, é falho quanto à extrapolação dos resultados para outras condições climáticas e cultivares com diferentes índices de área foliar. Assim, propuseram um método de determinação da sensibilidade da cultura, baseado na hipótese de que a tolerância ao déficit hídrico resulta da depleção de água no solo, ou por salinidade e que o decréscimo de produtividade é considerado como resultado do déficit de água imposto à cultura durante a estação de crescimento. Definiram, então, o índice diário de estresse hídrico (WSDI), em que o decréscimo na produção relativa da cultura é calculado em função do potencial de água na folha, medido no período antemanhã (KATERJI et al., 1996).

Katerji et al. (2000) consideram que o uso do WSDI é perfeitamente viável em centros de pesquisa bem equipados, medindo-se simultaneamente o potencial hídrico na folha nos tratamentos com diferentes salinidades e no tratamento não-salino e que, ao

realizar essas medições no período antemanhã, elimina-se o efeito das condições meteorológicas, as quais afetam parâmetros como a condutância estomática e a temperatura foliar. Dessa forma, o cálculo do WSDI dependerá somente da salinidade do solo, excluindo as dependências da demanda evapotranspirométrica, do índice de área foliar e do regime de irrigação.

A relação entre o decréscimo na produção relativa e o déficit de água imposto à cultura é expresso pelas equações 4 e 5.

$$1 - \frac{Y_c}{Y_m} = a + b.WSDI \quad (4)$$

e

$$WSDI = \sum_{i=1}^n \frac{(\Psi_{ci} - \Psi_{si})}{n} \quad (5)$$

em que

WSDI = índice diário de estresse hídrico;

$Y_c$  = produtividade da cultura;

$Y_m$  = produtividade máxima da cultura;

$\Psi_{ci}$  = valor do potencial hídrico diário na folha correspondente ao tratamento controle;

$\Psi_{si}$  = valor do potencial hídrico diário na folha correspondente ao tratamento salino utilizado;

$n$  = número de dias entre o início das medições do potencial hídrico da folha até a sua senescência;

$b$  = perda de rendimento da cultura por aumento unitário no valor do WSDI, e;

$a$  = fator de conversão, próximo de 100, devido ao fato dos valores do potencial hídrico na folha serem negativos e os de WSDI positivos.

Katerji et al. (1996) recomendam o uso do potencial hídrico na folha, por ser um parâmetro fisiológico da planta que, ao ser medido antes do amanhecer, está em equilíbrio estático com o potencial da água do solo.

Katerji et al. (2003), em estudos envolvendo várias culturas e metodologias de classificação das culturas quanto a sua tolerância à salinidade, concluíram que o potencial hídrico na folha, medido antes do amanhecer, é um parâmetro adequado para indicação do estresse hídrico da planta, em razão de sua sensibilidade à salinidade do solo. Também concluíram que, ao aumentar a salinidade no solo, culturas mais tolerantes mostraram uma melhor eficiência de uso da água, enquanto naquelas mais

sensíveis foi menor a eficiência de uso da água, além de reduzirem a produtividade em proporção maior do que a redução na evapotranspiração.

Na Equação 5, observa-se que o valor do WSDI é função dos valores de potencial de água na folha da cultura, decorrente do estresse salino aplicado e que o potencial descreve o estado energético da água, cujos gradientes explicam os fluxos no sistema solo-planta-atmosfera. Embora haja variação ao longo do dia, mesmo em plantas irrigadas, o potencial descreve o estado hídrico da planta e tem sido utilizado em estudos das relações hídricas dos vegetais.

## 2.8. Salinidade e evapotranspiração das culturas

A determinação da evapotranspiração de superfícies vegetadas vem, há muito tempo, sendo objeto de pesquisa. Segundo Allen et al. (1998), só para a determinação da evapotranspiração de referência existem mais de cinquenta equações.

A equação de Penman-Monteith desenvolvida por Monteith desde 1965 (Equação 6), não era utilizada até a década de 1970 devido à sua dificuldade de resolução e à falta de informações disponíveis. Entretanto, a popularização do uso de computadores e o aumento do acervo de pesquisas na área, fizeram com que essa equação se tornasse universalmente usada (McGLINCHEY & INMAN-BAMBER, 1996).

A equação de Penman-Monteith inclui todos os parâmetros que governam a troca de energia e corresponde ao fluxo de calor latente (ET) para uma vegetação uniforme e expansiva. A maioria dos parâmetros podem ser medidos ou calculados a partir de dados meteorológicos (ALLEN et al., 1998).

$$ET = \frac{\frac{\Delta}{\lambda} \cdot (Rn - G) + \frac{86400}{\lambda} \cdot \rho_a \cdot c_p \cdot \frac{(es - ea)}{ra}}{\Delta + \gamma \cdot (1 + \frac{rs}{ra})} \quad (6)$$

em que

$ET$  = evapotranspiração, mm.dia<sup>-1</sup>;

$Rn$  = radiação líquida à superfície de cultura, MJ m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup>;

$G$  = densidade do fluxo de calor do solo, MJ m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup>;

$es$  = pressão do vapor de saturação, kPa;

$ea$  = pressão do vapor atual, kPa;

$es - ea$  = déficit de pressão do vapor de saturação, kPa;

$ra$  = resistência aerodinâmica,  $s\ m^{-1}$ ;  
 $rs$  = resistência da superfície,  $s\ m^{-1}$ ;  
 $cp$  = calor específico à pressão constante,  $MJ\ kg^{-1}\ ^\circ C^{-1}$ ;  
 $\rho a$  = densidade média do ar à pressão constante,  $kg\ m^{-3}$ ;  
 $\Delta$  = declividade da curva de pressão do vapor,  $kPa\ ^\circ C^{-1}$ ; e  
 $\gamma$  = constante psicrométrica,  $kPa\ ^\circ C^{-1}$ .

O boletim FAO 56 (ALLEN et al., 1998) sugere, como forma de padronizar os cálculos da  $ET_o$ , a utilização de uma cultura hipotética semelhante à grama, com os valores de altura da cultura, resistência da superfície ( $r_s$ ) e o albedo ( $\alpha$ ), iguais a 0,12 m,  $70\ s.m^{-1}$  e 0,23, respectivamente. Com esta padronização, os autores acreditam que a comparação de valores de  $ET_o$ , em todas as situações climáticas no mundo, será facilitada. Portanto, após a padronização sugerida, a Equação 6 recebe a denominação de FAO Penman-Monteith, a ser expressa conforme a Equação 7.

$$ET_o = \frac{0,408.\Delta.(Rn - G) + \gamma.\frac{900}{T + 273}.u2.(es - ea)}{\Delta + \gamma.(1 + 0,34.u2)} \quad (7)$$

em que

$ET_o$  = evapotranspiração de referência,  $mm\ dia^{-1}$ ;  
 $T$  = temperatura do ar média diária a 2 m de altura,  $^\circ C$ ; e  
 $u2$  = velocidade do vento a 2 m de altura,  $m\ s^{-1}$ .

Segundo Alves et al. (1996), a Equação 6 possibilita determinar, diretamente, a evapotranspiração da cultura ( $ET_c$ ) sem o uso de  $kc$ .

Bernardo (1996) e Allen et al. (1998) relatam que a evapotranspiração pode ser calculada, utilizando-se as equações 8 e 9, para as condições potenciais e não potenciais, respectivamente.

$$ET_p = ET_o . Kc \quad (8)$$

$$ET_c = ET_p . Ks \quad (9)$$

em que

$ET_p$  = evapotranspiração potencial;  $mm.dia^{-1}$ ;  
 $Kc$  = coeficiente da cultura, adimensional;  
 $ET_c$  = evapotranspiração da cultura,  $mm.dia^{-1}$ ; e  
 $Ks$  = coeficiente de estresse hídrico, adimensional.

Segundo Allen et al. (1998), em condições de salinidade, o coeficiente de estresse hídrico pode ser determinado, segundo a condição existente no ambiente, ou seja, se existe ou não o estresse hídrico adicional. Esses autores recomendam o emprego das equações 10 e 11 nos seguintes casos:

- Para a condição em que não há estresse hídrico, ou seja, o teor de água no solo é maior que o teor de água mínimo desejável:

$$K_s = 1 - \left[ \frac{b}{K_y} \cdot (CEes - CEesL) \right] \quad (10)$$

- Para a condição de estresse hídrico, ou seja, o teor de água no solo é menor que o teor de água mínimo desejável:

$$K_s = \left[ 1 - \left( \frac{b}{K_y} \cdot (CEes - CEesL) \right) \right] \cdot \left[ \frac{(LA - PMP)}{(1 - f) \cdot CTA} \right] \quad (11)$$

em que

*PMP* = lâmina de água no solo, quando em ponto de murcha permanente, mm;

*LA* = lâmina atual de água no solo, mm;

*f* = fator de disponibilidade de água no solo, adimensional; e

*CTA* = capacidade total de água no solo, mm.

Os autores recomendam o emprego das equações 10 e 11, somente, quando *CEes* for menor que  $CEesL + 50/b$ , pois, elas podem não ser válidas para condições de alta salinidade.

Allen et al. (1998) recomendam que a determinação da ET, em condições de salinidade, seja feita somente para toda a estação de crescimento da cultura, uma vez que o impacto da salinidade no crescimento das plantas, na produtividade e na evapotranspiração é um processo integrado no tempo, sendo que um estágio subsequente de desenvolvimento depende do anterior.

A sensibilidade das culturas à salinidade varia conforme o estágio de desenvolvimento, sendo que a maioria delas é tolerante à salinidade durante a germinação e tornam-se sensíveis durante a emergência. Os cereais são, em geral, mais sensíveis no início do estágio reprodutivo, podendo haver uma redução significativa da produtividade, quando as plantas sofrem estresse no estágio de diferenciação da espiga ou da panícula (MAAS, 1990; PIZARRO, 1978; LÄUCHLI & EPSTEIN, 1990).

Letey e Dinar (1986) e Shalhevet (1994) concluíram que os efeitos da salinidade e da depleção de água no solo são, geralmente, aditivos em seus impactos na evapotranspiração das culturas.

Em um modelo para estimativa de evapotranspiração da cultura e da produtividade do milho, em ambiente salino, Castrignanò et al. (1998) observaram uma boa correlação dos resultados encontrados no experimento e a simulação pelo modelo Ceres-Maize, o qual foi modificado utilizando-se o conceito de índice diário de estresse hídrico.

Katerji et al. (1996), em um trabalho realizado com as culturas do milho e girassol cultivados em lisímetro com o uso de águas salinas e lâmina de lixiviação de 20 % afirmam que, com o aumento na salinidade do solo, o potencial hídrico na folha no período antemanhã reduziu a condutância estomática e, conseqüentemente, a evapotranspiração de ambas as culturas decresceu 20%, em média, quando se comparou o tratamento menos salino com o de maior salinidade.

### **3. MATERIAL E MÉTODOS**

O trabalho foi conduzido em lisímetros de drenagem construídos na área experimental do Departamento de Engenharia Agrícola, no campus da Universidade Federal de Viçosa. O clima local é caracterizado por médias anuais de umidade relativa do ar, precipitação pluvial, e temperatura de 81%, 1.221,4 mm e 19,4 °C, respectivamente, sendo fevereiro o mês mais quente e julho o mais frio, com médias de 22,3 °C e 15,4 °C, respectivamente.

#### **3.1. Dimensões e instalação dos lisímetros**

A área experimental compreendia 124,6 m<sup>2</sup>, com dimensões de 7,0 m de largura por 17,8 m de comprimento. Foram construídos 21 lisímetros, usando-se caixas de fibra de vidro com capacidade de 1.120 litros e dimensões de 1,0 m de largura por 1,40 m de comprimento e 0,80 m de profundidade, espaçados de 1m (Figura 3).

As caixas foram enterradas a 0,75 m de profundidade, ficando uma borda de 0,05 m acima da superfície do solo. A rede de drenagem dos lisímetros foi constituída de uma camada de cimento adicionada ao fundo das caixas, cujas declividades transversal e longitudinal eram de 1%, sendo a primeira no sentido das paredes longitudinais para

o centro e a outra no sentido da parede oposta ao orifício de saída da água. Sobre os orifícios de saída das caixas, instalou-se um segmento de tubo perfurado de cerca de 0,70 m serrado diametral e longitudinalmente, a fim de evitar entupimento. O sistema de drenagem constituiu-se de uma camada de brita zero, com espessura de aproximadamente 0,015 m, sobre a qual foi colocada outra camada de areia lavada de igual espessura. Sobre esta camada de areia lavada foi construído, de modo homogêneo, o perfil de solo de 0,70 m. O sistema de drenagem de cada lisímetro foi interligado a uma estação de coleta do efluente, usando-se tubos de PVC com 75 mm de diâmetro.

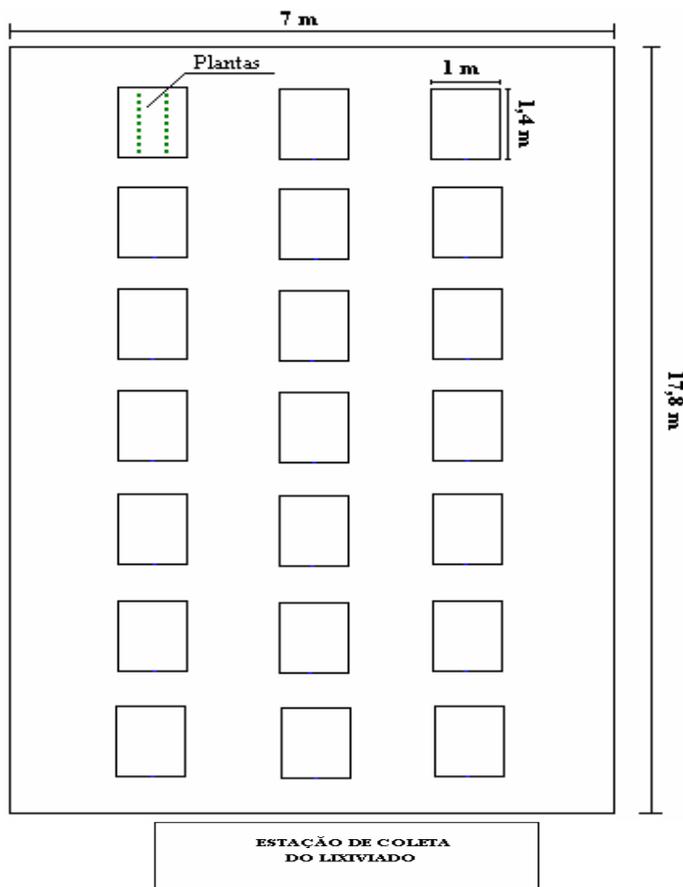


Figura 3 - Croqui da área experimental.

Sobre bateria de lisímetros foi construída uma casa de vegetação de plástico, para evitar precipitações indesejadas ao longo do ciclo da cultura (Figura 4).

### 3.2. Caracterização do solo

O solo utilizado no preenchimento dos lisímetros foi coletado do perfil natural de um Argissolo Vermelho Escuro Eutrófico Tb, localizado na base da serra de São Geraldo, no município de São Geraldo, MG. Foram retiradas, aproximadamente, 35

toneladas de solo, sendo este transportado para a área experimental de irrigação e drenagem.



Figura 4 - Vista panorâmica da casa de vegetação.

Três amostras de solo, foram retiradas no local de origem, para a determinação de suas características físico-hídricas, o que foi realizado nos laboratórios de física do solo do Departamento de Solos e de água e solo do Departamento de Engenharia Agrícola, respectivamente, utilizando metodologia recomendada pela Embrapa (1979). Os resultados da análise estão apresentados no Quadro 1.

Quadro 1 - Características físico-hídricas do solo

Característica	Resultado	Característica	Resultado
Classe textural	Argilosa	Densidade do solo ( $\text{kg dm}^{-3}$ )	1,2
Areia grossa ( $\text{g kg}^{-1}$ )	184,0	Densidade das partículas ( $\text{kg dm}^{-3}$ )	2,63
Areia fina ( $\text{g kg}^{-1}$ )	98,0	Porosidade total ( $\text{dm}^3 \text{dm}^{-3}$ )	0,54
Silte ( $\text{g kg}^{-1}$ )	170,0	Capacidade de campo ( $\text{dm}^3 \text{dm}^{-3}$ )	0,313
Argila ( $\text{g kg}^{-1}$ )	548,0	Ponto de murcha ( $\text{dm}^3 \text{dm}^{-3}$ )	0,204

Na Figura 5, apresenta-se a curva de retenção de água no solo em equilíbrio com as pressões de 10, 30, 100, 300, 1.000 e 1.500 kPa, ajustada conforme o modelo proposto por Van Genuchten (1980), apresentado na Equação 12.

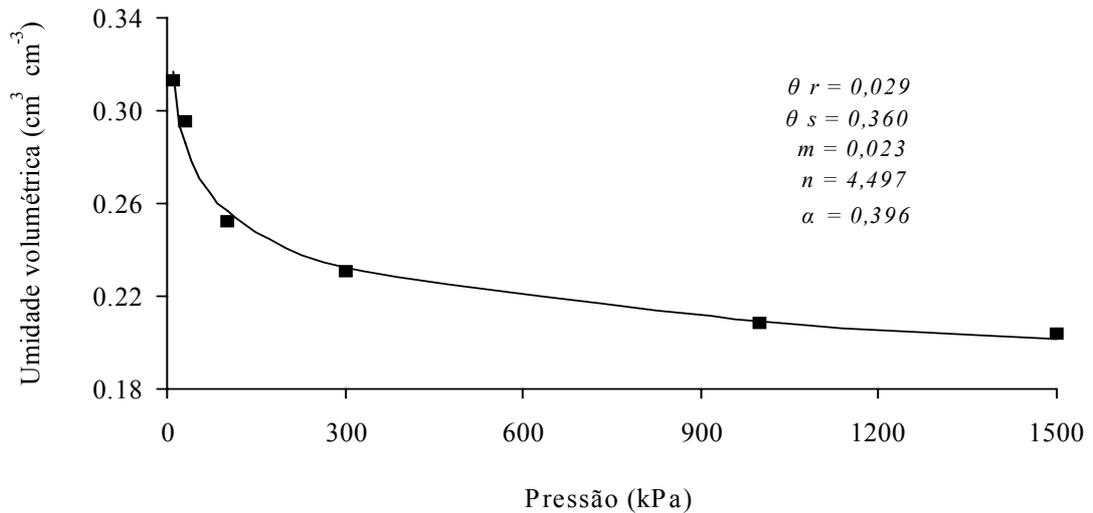


Figura 5 - Curva de retenção de água do solo.

$$\theta(\Psi) = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{(1 + |\alpha\Psi|^n)^m} \quad (12)$$

em que

$\theta(\Psi)$  = teor de água como função do potencial matricial  $\Psi$  (m),  $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ;

$\theta_r$  = teor de água residual do solo,  $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ;

$\theta_s$  = teor de água do solo saturado,  $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ;

$\alpha$  = parâmetro com dimensão igual ao inverso da tensão,  $\text{KPa}^{-1}$ ; e

$n, m$  = parâmetros adimensionais, em que  $m = 1 - 1/n$ .

O solo foi caracterizado quimicamente, mediante a determinação da concentração de cálcio, sódio, potássio, além do potencial hidrogeniônico (pH) em água e a capacidade de troca catiônica (CTC), conforme metodologia da Embrapa (1979) (Quadro 2).

A partir do extrato da pasta do solo saturado, obtido segundo metodologia descrita por Richards (1954), a condutividade elétrica foi medida, diretamente, com o auxílio de um condutímetro (Quadro 2).

Quadro 2 - Características químicas das amostras do solo usado no experimento

pH	P	K	Na	Ca	Mg	Al	H+A	SB	CTC	CEes
H <sub>2</sub> O	mg dm <sup>-3</sup>			mmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>			l	(dS m <sup>-1</sup> )		
5,8	0,98	17,8	0	18,0	8,1	0	9,2	71,0	91,3	0,4

### 3.3. Preenchimento dos lisímetros

O material de solo foi seco ao ar, destorroado, passado em peneira de 5 mm de malha e homogeneizado. Após a homogeneização, foi corrigido quanto à acidez, com a utilização de calcáreo dolomítico, de acordo com a recomendação da Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais (1999).

O preenchimento dos lisímetros foi realizado em camadas de aproximadamente 0,23 m, até atingir a espessura de 0,70 m, procurando-se acomodar o material de solo homogeneamente e com massa específica próxima àquela do local de coleta. Cada camada de solo, colocada no lisímetro, era pesada e o teor de água determinado de forma a permitir a correção da massa de solo mais umidade para solo seco e, dessa forma, permitir que todos os lisímetros recebessem a mesma massa de solo seco.

### 3.4. Caracterização da água de irrigação

A água utilizada nas irrigações foi proveniente da estação de tratamento da UFV.

As características químicas da água de irrigação dos tratamentos salinos, apresentadas no Quadro 3, foram obtidas em laboratório, adicionando-se NaCl e CaCl<sub>2</sub>, até obter a condutividade elétrica da água (Ceai) igual a 2,0 dS.m<sup>-1</sup>. As proporções iônicas entre Na<sup>+</sup> e Cl<sup>-</sup> foram 3:2, proporção esta predominante nas águas salinas usadas nas irrigações, na região nordeste do Brasil, conforme citação de Medeiros (1992).

### 3.5. Delineamento experimental e tratamentos

O experimento foi montado em delineamento inteiramente casualizado, com sete tratamentos e três repetições. Um dos tratamentos constituiu-se de irrigação com água doce com condutividade elétrica de 0,07 dS.m<sup>-1</sup> e fração de lixiviação de 3 %, sendo os demais com água salina, condutividade elétrica de 2,00 dS.m<sup>-1</sup>, e frações de lixiviação de 40, 31, 25, 23, 16 e 14% da lâmina de irrigação aplicada.

Quadro 3 - Características médias da água utilizada na irrigação da cultura do feijão durante o período experimental

Água doce (AD)		Água salina (AS)	
Característica	Resultado	Característica	Resultado
Na <sup>+</sup> (mmol <sub>c</sub> L <sup>-1</sup> )	0,08	Na <sup>+</sup> (mmol <sub>c</sub> L <sup>-1</sup> )	7,07
K <sup>+</sup> (mmol <sub>c</sub> L <sup>-1</sup> )	0,05	K <sup>+</sup> (mmol <sub>c</sub> L <sup>-1</sup> )	0,05
Ca <sup>2+</sup> (mmol <sub>c</sub> L <sup>-1</sup> )	0,07	Ca <sup>2+</sup> (mmol <sub>c</sub> L <sup>-1</sup> )	2,68
Mg <sup>2+</sup> (mmol <sub>c</sub> L <sup>-1</sup> )	0,04	Mg <sup>2+</sup> (mmol <sub>c</sub> L <sup>-1</sup> )	0,05
pH	6,4	pH	6,8
RAS (mmol <sub>c</sub> L <sup>-1</sup> ) <sup>0,5</sup>	0,34	RAS (mmol <sub>c</sub> L <sup>-1</sup> ) <sup>0,5</sup>	6,05
CE (dS m <sup>-1</sup> )	0,07	CE (dS m <sup>-1</sup> )	2,0
		Cl <sup>-</sup> (mmol <sub>c</sub> L <sup>-1</sup> )	12,1
Classificação	C <sub>1</sub> S <sub>3</sub>	Classificação	C <sub>3</sub> S <sub>1</sub>

Na Figura 6, apresentam-se os 21 lisímetros numa vista interna do experimento.



Figura 6 - Vista interna do experimento.

### 3.6. Observações meteorológicas e determinação da ETc

Utilizando-se uma estação meteorológica automática modelo Metos, localizada na área experimental (Figura 7), foram feitas medições de temperatura, umidade relativa do ar, velocidade do vento e radiação solar incidente. O registro dos dados foi feito a cada 12 minutos, a partir do qual extraíram-se os dados médios diários. De posse desses

dados foi calculada a evapotranspiração potencial de referência (ET<sub>o</sub>), pelo método de Penman-Monteith (ALLEN et al., 1998), multiplicando-se esses valores pelos respectivos coeficientes da cultura (k<sub>c</sub>), para todos os estádios fenológicos, conforme as equações 7 e 8, respectivamente (DOORENBOS & PRUITT, 1977; DOORENBOS & KASSAM, 1979; ALLEN et al., 1998).

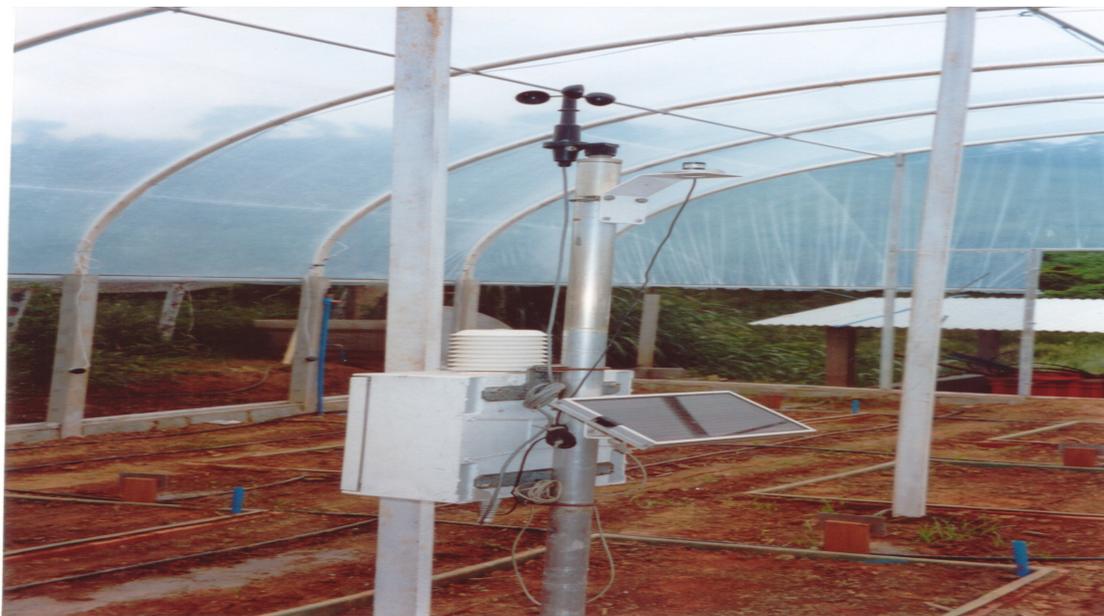


Figura 7 - Vista da estação meteorológica automática dentro da casa de vegetação.

### 3.7. Irrigação

As irrigações foram feitas utilizando-se um sistema manual constituído de mangueira com chuveiro na extremidade, assemelhando-se a um sistema de irrigação por aspersão convencional com alta intensidade de aplicação de água. A fim de permitir um melhor controle da lâmina de água aplicada e uma maior uniformidade de aplicação, o volume de água aplicado era medido com o auxílio de um hidrômetro.

A lâmina de água calculada para cada evento de irrigação, no tratamento não salino, foi definida pelo balanço de água no solo (BERNARDO, 1996), segundo a Equação 13. Inicialmente, definiu-se a ET<sub>o</sub> por meio da equação de Penman-Monteith, e, utilizando-se os valores de K<sub>c</sub> para cada estágio fenológico, conforme Oliveira (1996), calculou-se a ET<sub>c</sub>. Considerou-se o teor de água mínimo desejável no solo correspondente a 50 % da disponibilidade total de água.

$$I = ET_c \pm \Delta U - D \quad (13)$$

em que

$I$  = lâmina de irrigação para a condição não salina, mm;

$ET_c$  = evapotranspiração da cultura, mm;

$\Delta U$  = variação no teor de água no solo, mm; e

$D$  = percolação, mm.

A lâmina aplicada em cada irrigação nos tratamentos com água salina foi calculada utilizando-se a fração de lixiviação do tratamento, conforme a Equação 14 (FERREIRA, 2001).

$$I_s = \frac{I}{1 - FL} \quad (14)$$

em que

$I_s$  = lâmina de irrigação com água salina, mm;

$I$  = lâmina de irrigação para a condição não salina, mm; e

$FL$  = fração de lixiviação do tratamento em questão, adimensional.

A água de drenagem de cada lisímetro foi coletada, sendo medidos o volume e a condutividade elétrica. Quando o volume drenado era superior ao esperado, a lâmina de irrigação seguinte era reduzida, na quantidade correspondente ao volume excedente, e quando o volume drenado era menor, a lâmina da irrigação subsequente era aumentada, de maneira a garantir que as frações de lixiviação médias, durante o ciclo da cultura, fossem aquelas definidas nos tratamentos.

### 3.8. Condução do experimento

O cultivar de feijoeiro utilizada no experimento foi o BRSMG Talismã, desenvolvida pelo convênio UFLA/UFV/EPAMIG/EMBRAPA e recomendada para Minas Gerais. Este cultivar apresenta grãos tipo carioca, crescimento indeterminado com guias longas, porte prostrado e ciclo médio de 85 dias (ABREU et al., 2004).

O plantio foi realizado manualmente no dia 23 de março de 2004, sendo as sementes colocadas a 3 cm de profundidade, numa densidade de semeio de 20 sementes por metro linear, com espaçamento de 50 cm entre linhas, totalizando 56 sementes por lisímetro. Em seis de abril, aos 14 dias após a semeadura, fez-se o desbaste das plantas, deixando 42 plantas por lisímetro.

Para cada linha de plantio que passava pelo interior dos lisímetros, plantou-se outra externa, irrigada por gotejamento, com a função de bordadura. As linhas contendo

as plantas na bordadura foram, entretanto, eliminadas em cinco de maio, aos 43 dias após sementeira, a fim de evitar a competição luminosa com as plantas dos tratamentos, nos lisímetros, uma vez que as da bordadura estavam entrelaçando-se com as plantas dos lisímetros.

A adubação de plantio foi feita de acordo com a recomendação da Comissão de Fertilizante do Solo de Minas Gerais (1999), aplicando-se, em cada lisímetro, o correspondente a 90 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, 40 kg ha<sup>-1</sup> de K<sub>2</sub>O e 20 kg ha<sup>-1</sup> de N. Uma adubação de cobertura com aplicação correspondente a 20 kg ha<sup>-1</sup> de N, foi realizada 20 dias após a emergência das plantas.

Os tratos culturais foram feitos manualmente ao longo do ciclo da cultura, realizando-se uma capina e duas aplicações de inseticida, sendo a primeira realizada na sexta semana após sementeira, com o intuito de combater a vaquinha e a segunda na sétima semana, destinada ao combate do pulgão.

A colheita foi realizada manualmente em 30 de junho de 2004, sendo as vagens expostas ao sol até atingirem um teor de água de 13%. Posteriormente, procedeu-se à debulha e à pesagem dos grãos, com o intuito de determinar a produção de grãos por parcela.

### **3.9. Medições fisiológicas**

Para as medições do potencial hídrico na folha, no período antemanhã, adotou-se a metodologia citada por Scholander et al. (1965), sendo as medições realizadas entre 4h:30 min e 5h:40 min, em uma folha completamente desenvolvida, localizada na parte superior da planta, em uma única planta de cada lisímetro (KATERJI et al., 2000; KATERJI et al., 2001). Nove medições do potencial hídrico foram realizadas durante a fase vegetativa e o enchimento de grãos, com intervalo de três dias entre as medições, em média.

### **3.10. Determinação das condutividades elétricas do extrato da pasta do solo saturado (CEes) e da água de drenagem (CED)**

Antes do plantio, o solo nos lisímetros, que iriam receber irrigações com água salina, foi salinizado até atingir, aproximadamente, 3,6 dS m<sup>-1</sup> no extrato da pasta do

solo saturado, utilizando-se água preparada com adição de NaCl e CaCl<sub>2</sub> à proporção 3:2.

Após cada evento de irrigação coletava-se a água drenada dos lisímetros, media-se o volume drenado e determinava-se a condutividade elétrica (CEd) com o auxílio de um condutivímetro.

Foram retiradas amostras de solo nas faixas de profundidades de 0 a 0,20, 0,20 a 0,40, 0,40 a 0,60 e de 0,60 a 0,80 m, antes do plantio e após a colheita, para determinação da condutividade elétrica do extrato da pasta do solo saturado (CEes). As coletas de amostras de solo foram feitas sempre na véspera das irrigações, ou seja, com o solo estando com teor de água mínimo daquele intervalo de irrigação.

Com a finalidade de reduzir o tempo gasto no preparo do extrato da pasta do solo saturado, para as determinações da condutividade elétrica, utilizou-se o procedimento de análise de regressão dos valores de condutividade elétrica do extrato da pasta do solo saturado com a condutividade elétrica da solução sobrenadante 1:5, determinada em 24 amostras de solo, submetidos a oito níveis diferentes de salinidades, com três repetições.

A condutividade elétrica do extrato da pasta do solo de saturado foi estimada pela Equação 15.

$$CEes = 0,0405 + 7,2812 \cdot CE\ 1:5 \quad (15)$$
$$r^2 = 0,999***$$

em que

*CEes* = condutividade elétrica do extrato da pasta do solo saturado, dSm<sup>-1</sup>; e

*CE1:5* = condutividade elétrica da solução 1:5, dSm<sup>-1</sup>.

Na Figura 8, mostra-se a relação entre a condutividade elétrica do extrato 1:5 e da pasta do solo saturado.

A *CE 1:5* foi determinada colocando-se, 10 g de solo seco ao ar e 50 mL de água destilada, em um béquer, em seguida, agitando-se. A solução foi deixada em repouso por um período de 24 horas, para possibilitar o equilíbrio da condutividade elétrica do solo com a água, e a decantação de partículas do solo. A leitura da condutividade elétrica foi feita usando-se um condutivímetro (SLAVICH & PETERSON, 1993).

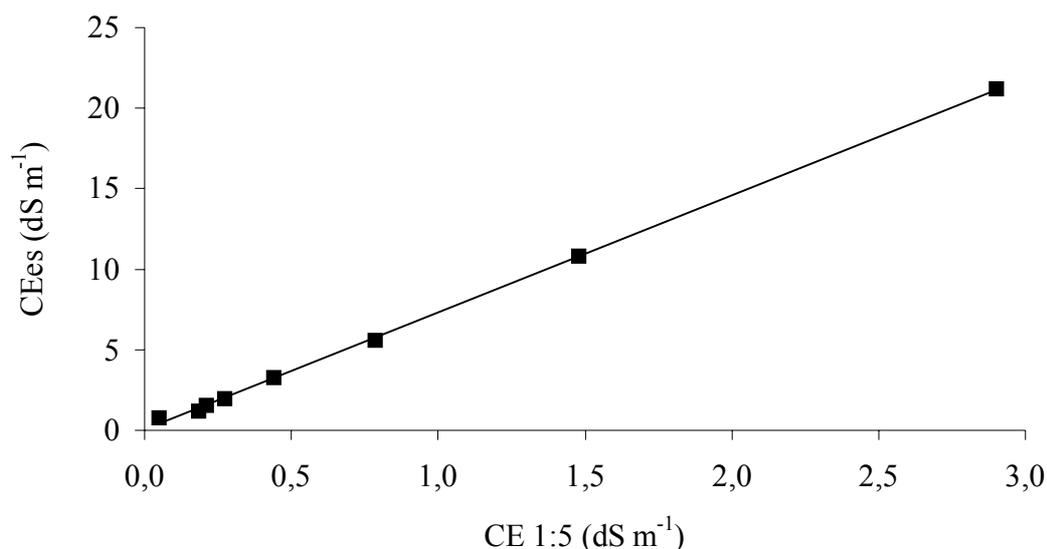


Figura 8 - Condutividade elétrica do extrato da pasta do solo saturado, em função da solução sobrenadante 1:5.

A pasta de saturação foi preparada segundo o método-padrão de Richards (1954), em que utiliza 400 g de solo seco ao ar e adiciona-se água destilada aos poucos, até atingir o ponto de saturação. Essa pasta foi mantida em repouso por 24 horas, sendo então obtido o extrato, por filtração, com o auxílio bomba de vácuo. A seguir, as leituras de condutividade elétrica eram realizadas com o auxílio de um condutivímetro.

### 3.11. Determinação da produção relativa da cultura

Por ocasião da colheita, foi avaliada a produção de grãos secos, ou seja, com teor de água, base seca, de 13%, para cada tratamento estudado, obtendo-se, assim, a produtividade da parte comercial. A partir dos dados de produtividade determinou-se a produção relativa de cada tratamento, tendo como referência a produtividade do tratamento que recebeu água doce.

### 3.12. Classificação da cultura do feijoeiro quanto a tolerância à salinidade

A tolerância de uma cultura à salinidade corresponde à sua capacidade de resistir aos efeitos do excesso de sais na zona radicular. Em nível de produtividade comercial, essa tolerância diz respeito à capacidade da planta em não reduzir significativamente a produção, quando em ambiente salino, em comparação com a produção obtida sob condições não salinas.

Para determinação da tolerância do feijoeiro foram utilizados três métodos, ou seja, Stewart et al. (1977), Maas e Hoffman (1977) e Katerji et al. (2000).

#### **3.12.1. Método proposto por Stewart et. al (1977)**

Neste modelo, freqüentemente utilizado, pressupõe-se que o decréscimo na produção relativa das culturas é função linear do déficit da evapotranspiração relativa, conforme Equação 2.

#### **3.12.2. Método proposto por Maas e Hoffman (1977)**

Este método consiste em determinar a relação entre a condutividade elétrica do extrato da pasta do solo saturado, na região da zona radicular da cultura, com a produção relativa da cultura, conforme Equação 3.

#### **3.12.3. Método proposto por Katerji et al.(2000)**

Este método consiste em determinar a diminuição da produção relativa da cultura em função do índice diário de estresse hídrico (WSDI) a que a cultura fica exposta durante a estação de cultivo, conforme equações 4 e 5.

### **3.13. Análise estatística**

Os dados foram analisados por meio de análise de regressão, cujos modelos foram escolhidos com base na significância dos coeficientes de regressão pelo teste t, adotando-se o nível  $\alpha$  de até 10 %, no coeficiente de determinação e no fenômeno em estudo. Além disto, utilizou-se o teste t ao nível  $\alpha$  de até 5%, no contraste entre as diferenças das médias das características do solo irrigado com água salina e com água doce, em duas camadas.

## **4. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **4.1. Dados climáticos**

O crescimento e desenvolvimento das culturas dependem de condições climáticas ao longo do ciclo de crescimento e desenvolvimento, sendo de fundamental importância a caracterização das variáveis meteorológicas. Por esta razão, foram coletados os dados de umidade relativa, temperatura do ar, velocidade do vento e radiação solar ao longo do período experimental, iniciado em 23 de março de 2004 e finalizado em 02 de julho, totalizando 100 (cem) dias.

A velocidade do vento e a precipitação não foram consideradas, em razão de o cultivo ter sido realizado sob ambiente protegido.

A umidade relativa oscilou entre 36 e 99%, sendo a média ao longo do ciclo da cultura de 91%, conforme Figura 9. Estes valores mostram que, ao longo do experimento, a umidade relativa esteve sempre alta, havendo, portanto, condições propícias para o aparecimento de doenças, principalmente as fúngicas, o que ocorreu principalmente no início do experimento.

As temperaturas máximas, médias e mínimas, apresentadas na Figura 10, oscilaram bastante ao longo do período experimental, sendo os valores médios de 28, 19 e 13°C, respectivamente. Observa-se uma tendência de redução nas temperaturas caracterizando o período do inverno ao final do ciclo da cultura. As baixas temperaturas ocorridas, principalmente, a partir da metade do ciclo da cultura em diante, provocaram um aumento no ciclo total, devido à baixa atividade fisiológica das plantas, ocasionando um desenvolvimento mais lento.

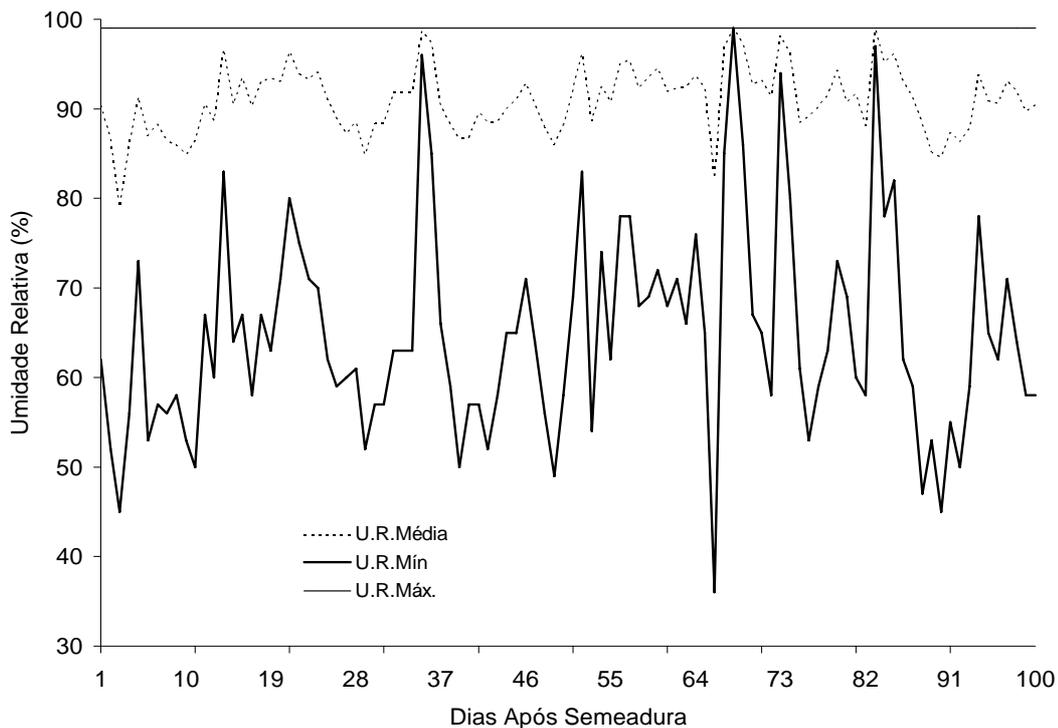


Figura 9 – Dados diários de umidades relativas máximas, mínimas e médias (%) no período de 23 de março a 02 de julho de 2004.

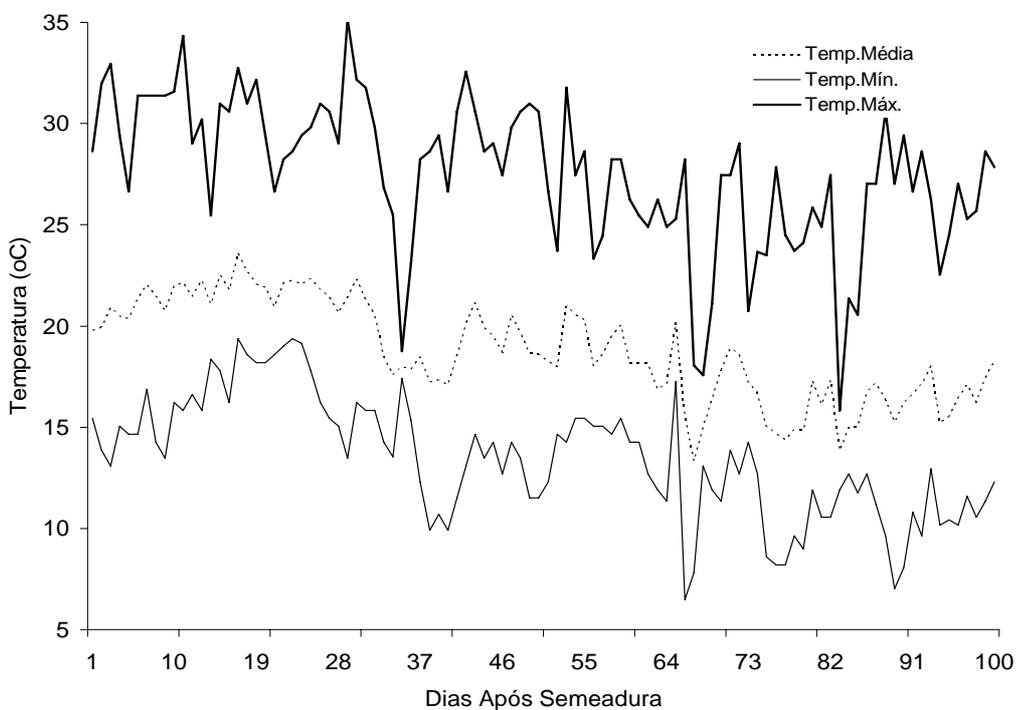


Figura 10 - Dados diários de temperaturas máximas, mínimas e médias (°C) no período de 23 de março a 02 de julho de 2004.

A radiação solar média diária (Figura 11) também sofreu grandes oscilações, variando de 278 a 22  $\text{W.m}^{-2}$ , com valor médio de 150  $\text{W.m}^{-2}$ . No início do ciclo a radiação solar foi intensa apresentando variações bruscas ao longo do experimento e baixos valores a partir da metade do ciclo, ou seja, a partir do final de maio, sendo que, aliado à proximidade do inverno, ocorreram dias nublados e até chuvosos.

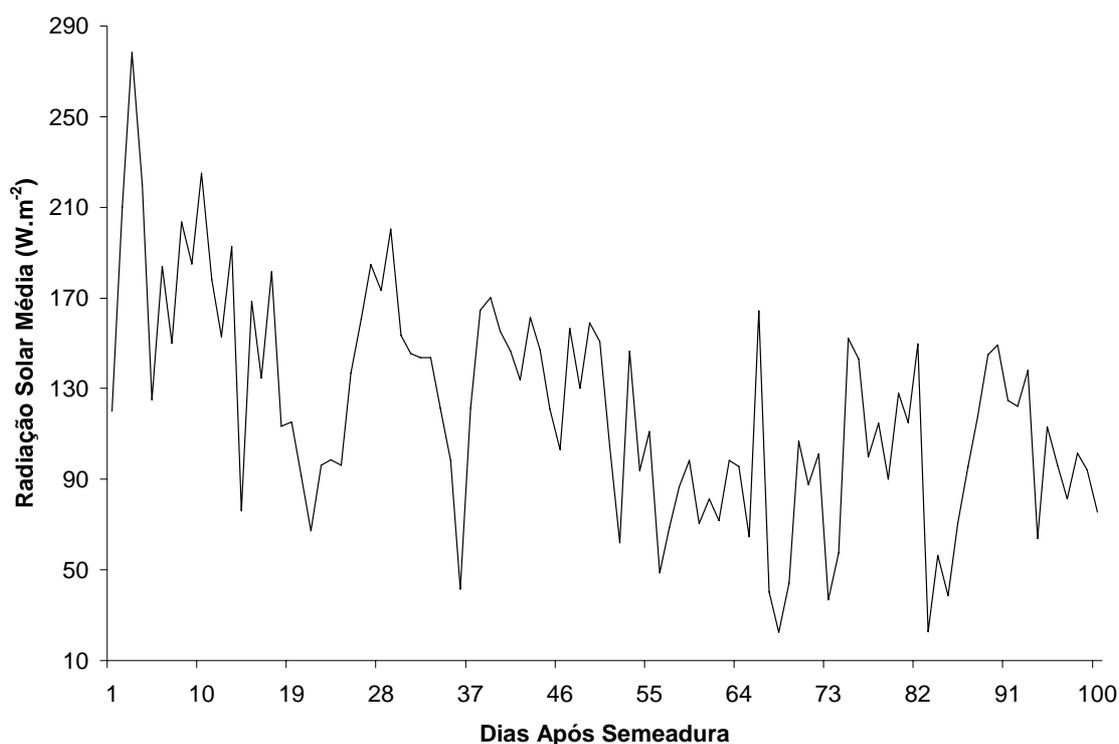


Figura 11 - Dados diários de radiação solar média ( $\text{W.m}^{-2}$ ) no período de 23 de março a 02 de julho de 2004.

A Figura 12 apresenta os valores diários da evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>), calculados conforme Equação 7. Observa-se que os valores foram baixos, variando de aproximadamente 4 a menos de 1  $\text{mm dia}^{-1}$ . O valor médio de ET<sub>o</sub> no período em estudo foi de 1,77  $\text{mm dia}^{-1}$ , confirmando, assim, a baixa demanda evapotranspirométrica durante a condução do experimento. Comparando as Figuras 11 e 12, observa-se que a ET<sub>o</sub> acompanha as variações diárias de radiação solar, sendo esta última bastante representativa da demanda atmosférica do local.

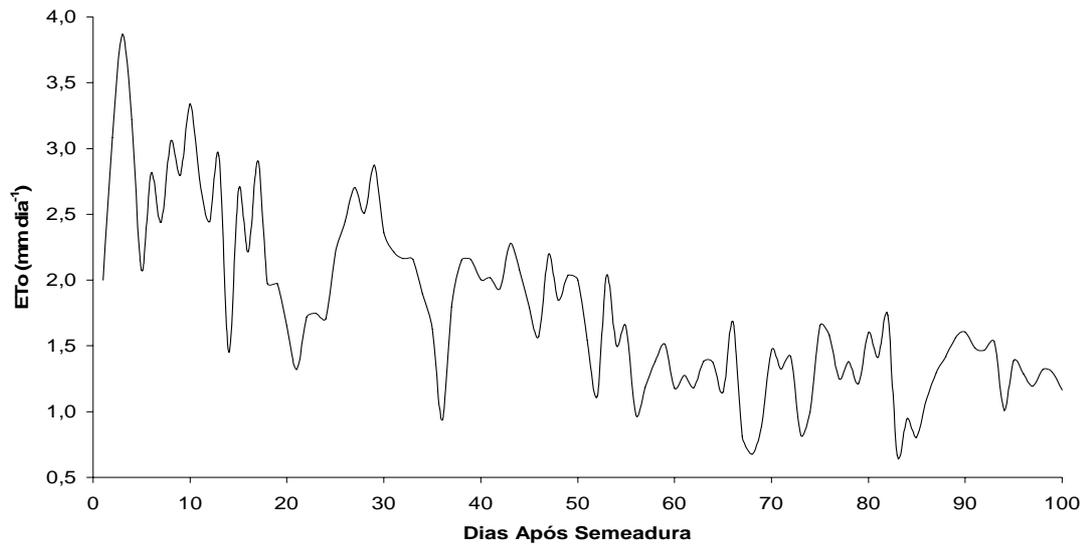


Figura 12 - Valores diários de evapotranspiração de referência ( $\text{mm dia}^{-1}$ ) no período de 23 de março a 02 de julho de 2004.

#### 4.2. Efeito das frações de lixiviação na salinidade do perfil do solo

Na Figura 13, apresentam-se os componentes do balanço de água no solo (lâminas de irrigação, evapotranspiração e drenagem). Nos tratamentos com água salina, observa-se o aumento nas lâminas de drenagem com as frações de lixiviação; entretanto, a  $ET_c$  não apresenta diferenças significativas com os tratamentos.

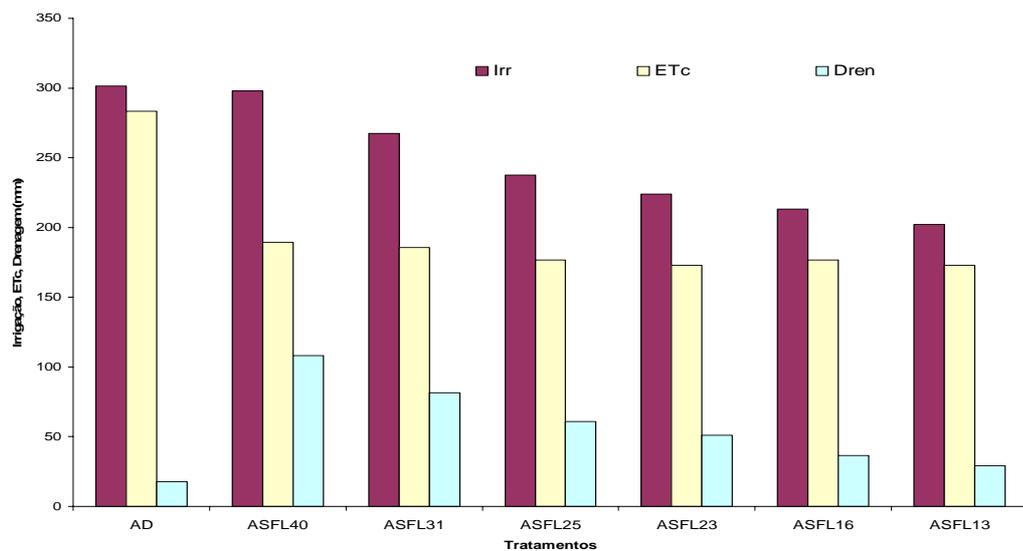


Figura 13 - Lâminas totais de irrigação,  $ET_c$  e de drenagem em cada tratamento.

Na Figura 14, apresentam-se os gráficos da salinidade média no perfil do solo, no início e fim do experimento, para os sete tratamentos. Pode-se observar que a salinidade do solo aumentou do início para o final do experimento, em todo o perfil. Mesmo na condição de irrigação com água doce, esta constatação é válida, certamente, devido ao uso de fertilizantes.

Observa-se também que, para uma mesma data, ocorre redução da salinidade com a profundidade do solo, evidenciando o acúmulo de sais na camada mais superficial, independentemente, do tratamento. Isto ocorreu porque as amostragens de solo foram retiradas na véspera das irrigações, quando havia o menor teor de água e, conseqüentemente, com o perfil de salinidade apresentando maior concentração à superfície.

Observa-se, ainda, que para o tratamento com a fração de lixiviação de 40%, ao final do experimento, existia uma relativa uniformidade da salinidade no perfil do solo, variando de 7,0 dS m<sup>-1</sup> a 5,5 dS m<sup>-1</sup>, às profundidades de 0 a 0,20 e de 0,60 a 0,80 m, respectivamente. Isto se deve à intensa lixiviação provocada por esse tratamento, proporcionando o carreamento dos sais para maiores profundidades, confirmando, a tendência de equilíbrio da salinidade da água de irrigação e do extrato da pasta do solo saturado, com o tempo, conforme diversas citações (AYERS & WESTCOT, 1985; MEDEIROS & GHEYI, 1997; HANSON et al., 1999; RHOADES, 1990; RHOADES et al., 2000).

Tanto a fração de lixiviação de 40 quanto a de 31% foram eficientes no deslocamento dos sais, devido à grande lâmina de água que atravessa as camadas superficiais do solo (0 a 0,40 m), fazendo com que a maior parte dos sais ali contidos fosse deslocada para a profundidade de 0,40 a 0,80 m. A fração de lixiviação de 14% resultou maior aumento da salinidade no perfil do solo, devido à menor lâmina de

lixiviação. Estas constatações confirmam resultados encontrados por (MASS & HOFFMAN, 1977; AYERS & WESTCOT, 1985; HANSON et al., 1999; RHOADES, 1990; RHOADES et al., 2000).

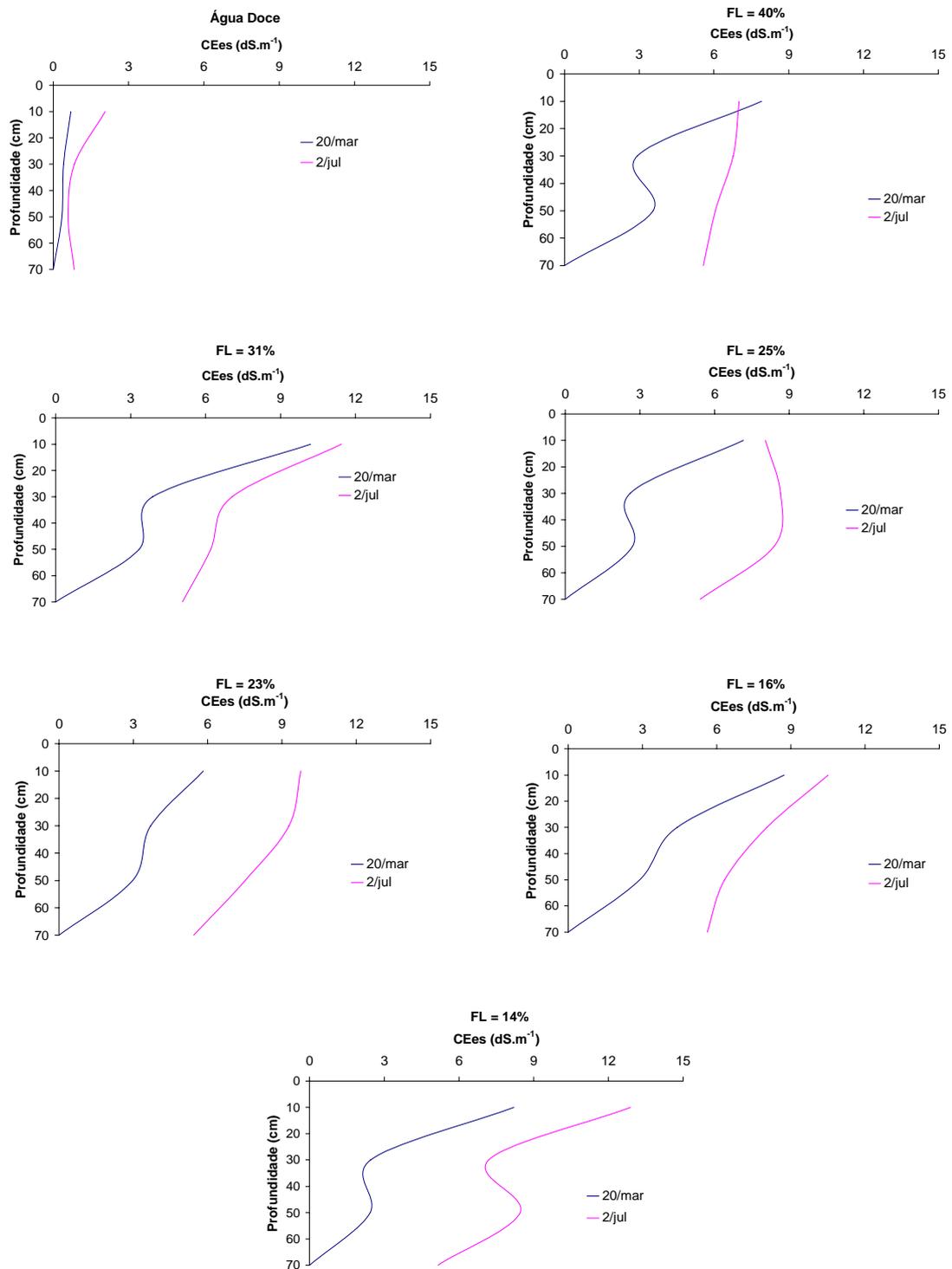


Figura 14 - Salinidade média no perfil do solo no início e final do experimento, para os sete tratamentos.

Na Figura 14, observa-se, para todos os tratamentos com água salina, que as camadas mais profundas do solo tiveram maior aumento da salinidade, em razão do maior transporte de sais da camada superficial, onde se encontra a maior densidade radicular do feijoeiro. Assim, o sistema radicular da cultura sofre menor estresse devido à salinidade do solo. Isto confirma a importância do uso da fração de lixiviação nas irrigações com água salina, sendo que, para as condições experimentais, as frações de lixiviação de 40 e de 31% foram mais eficazes.

O Quadro 4 apresenta os contrastes entre as médias de cada característica do solo, nos lisímetros irrigados com água salina, assim como as médias dessas características nos lisímetros irrigados com água doce, nas camadas de 0 - 0,20 e 0,20 - 0,40 m.

Quadro 4 - Diferenças das médias de características do solo irrigado com água salina (AS) e com água doce (AD), em duas camadas

Característica	Unidade	Camadas (m)			
		0 – 0,20		0,20 – 0,40	
Na	cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>	179,09	**	151,49	**
Ca	cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>	2,60	**	0,81	*
CEes	dS m <sup>-1</sup>	3,40	**	3,98	**
ISNa	%	9,09	**	12,47	**
PST	%	6,536	**	9,085	**
RAS	(cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> ) <sup>0,5</sup>	0,431	**	0,461	**

\*\* significativos a 1 % de probabilidade pelo teste t.

\* significativo a 5% de probabilidade pelo teste t.

O índice de saturação de sódio (ISNa), a percentagem de sódio trocável (PST) e a relação de adsorção de sódio (RAS) da solução do solo aumentaram com a aplicação de água salina nas duas camadas (Quadro 4), sendo este incremento devido ao aumento na concentração do íon sódio no perfil. Essas características estão diretamente relacionadas aos problemas de infiltração de água no solo, ou seja, à medida que os valores dessas características aumentam, o risco de dispersão dos colóides do solo também aumentam, com conseqüente redução na taxa de infiltração de água. Entretanto, de acordo com Ferreira (2001), o cálcio presente na solução do solo contrapõe o efeito adverso causado pelo íon sódio (dispersão dos colóides do solo), devido ao Ca<sup>2+</sup> possuir maior

energia de adsorção, fazendo com que a dupla camada difusa comprima-se, evitando a dispersão dos colóides do solo.

A Figura 15 apresenta os modelos de regressão, ajustados aos dados observados, possibilitando visualizar, para as profundidades de 0 - 0,20 e 0,20 - 0,40 m, o comportamento das características do solo, condutividade elétrica média do extrato da pasta do solo saturado (CEes), porcentagem de sódio trocável (PST) e razão de adsorção de sódio (RAS), aos 72 dias após o plantio, em resposta às frações de lixiviação (14, 16, 23, 25, 31 e 40%), com o uso de água salina de 2 dS m<sup>-1</sup>.

A CEes decresceu, significativamente, e de forma linear com o aumento das frações de lixiviação, nas duas camadas do solo. Portanto, pode-se inferir que, em geral, o aumento das frações de lixiviação com água salina reduz a CEes do solo, o que mostra ser a lixiviação uma prática eficaz para diminuir o excesso de sais solúveis na zona radicular das culturas.

As características do solo PST e RAS não apresentaram efeito significativo nas duas camadas avaliadas em função da variação das frações de lixiviação com água salina, confirmando resultados encontrados por Santos (2005), relativamente à CTC e ao sódio adsorvido, uma vez que a PST é uma relação entre ambos.

A Figura 16 apresenta o efeito das frações de lixiviação com água de 2 dS.m<sup>-1</sup> na salinidade média do perfil do solo, ao longo do experimento, expressa em condutividade elétrica do extrato da pasta do solo saturado. Observa-se que o aumento da fração de lixiviação proporciona redução na salinidade média do solo, resultado que evidencia a importância da utilização de uma fração de lixiviação adequada, com o objetivo de reduzir a salinidade média do solo na região da zona radicular e, conseqüentemente, proporcionar maiores produtividades.

A escolha da fração de lixiviação mais adequada dependerá, portanto, de análise econômica, em que o excedente de água aplicado para proporcionar a lixiviação dos sais, deverá ter o custo coberto pelo aumento da receita proporcionada pela maior produtividade alcançada pela cultura. É importante também, levar em consideração a questão ambiental, utilizando-se a água da forma mais racional possível, evitando-se, assim, conflitos com outros usuários e com os órgãos ambientais.

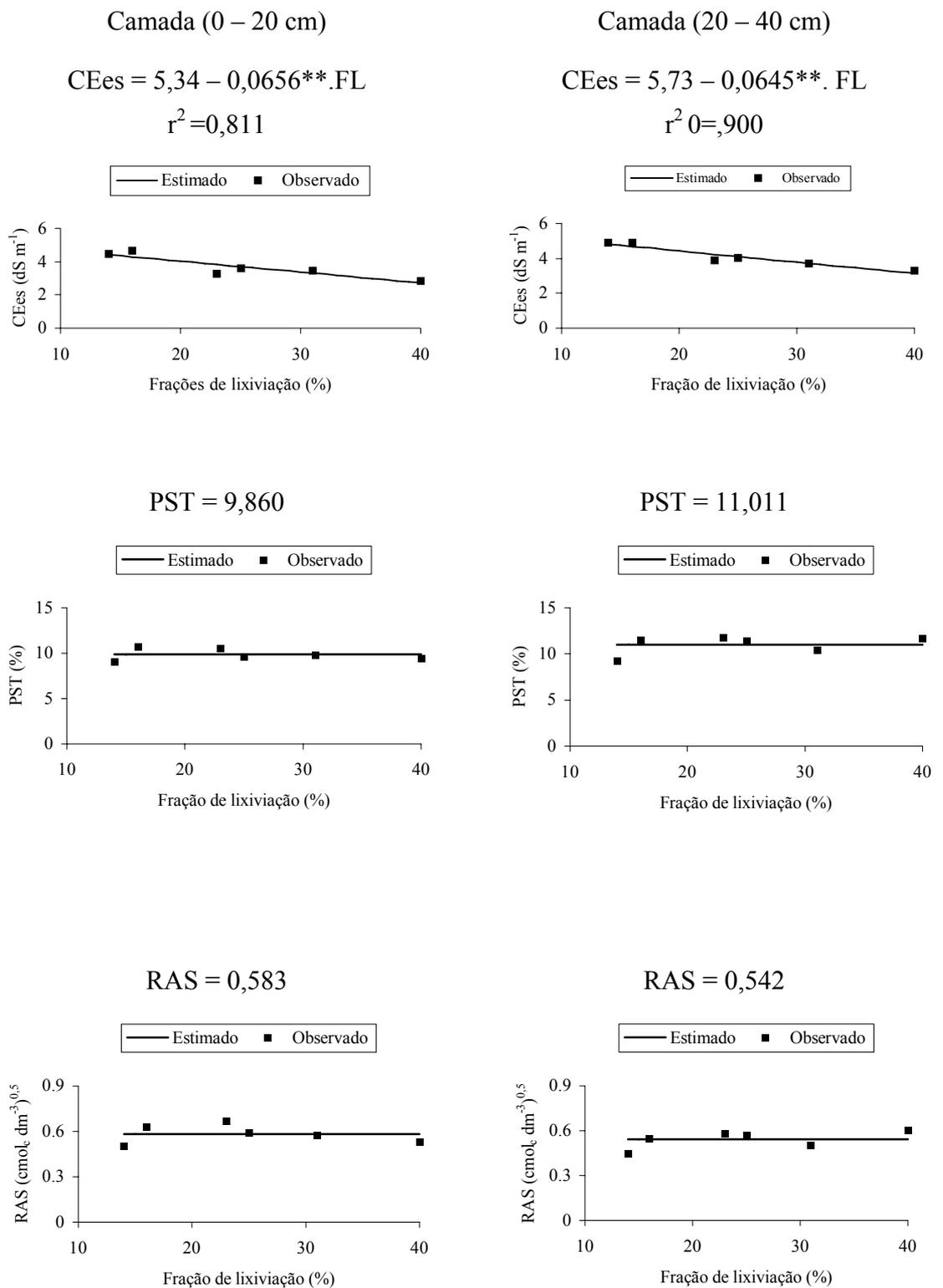


Figura 15 – Comportamento das características do solo (CEes, PST e RAS) em resposta às frações de lixiviação (14, 16, 23, 25, 31 e 40%) com o uso de água salina de 2 dS m<sup>-1</sup>, avaliado nas duas camadas. Os valores observados são provenientes da média de três repetições. \*\*significativos a 1% de probabilidade, pelo teste t.

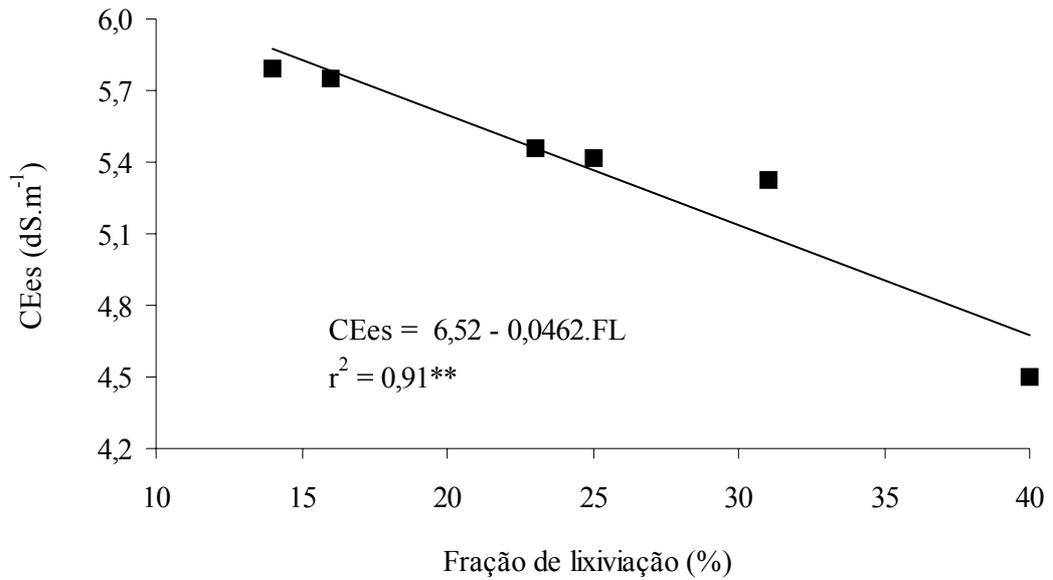


Figura 16 - Condutividade elétrica do extrato da pasta do solo saturado (CEes) em função das seis frações de lixiviação com água de 2 dS m<sup>-1</sup>. \*\*significativo a 1% de probabilidade pelo teste t.

Na Figura 17, apresenta-se a salinidade média no perfil do solo, para o início e final do experimento. Observa-se que a salinidade média no início do experimento, estava entre 3 e 4 dS.m<sup>-1</sup>. No entanto, o aumento da salinidade média no perfil do solo foi menor no tratamento com fração de lixiviação de 40%, sendo que a salinidade média tende a diminuir com as frações de lixiviação.

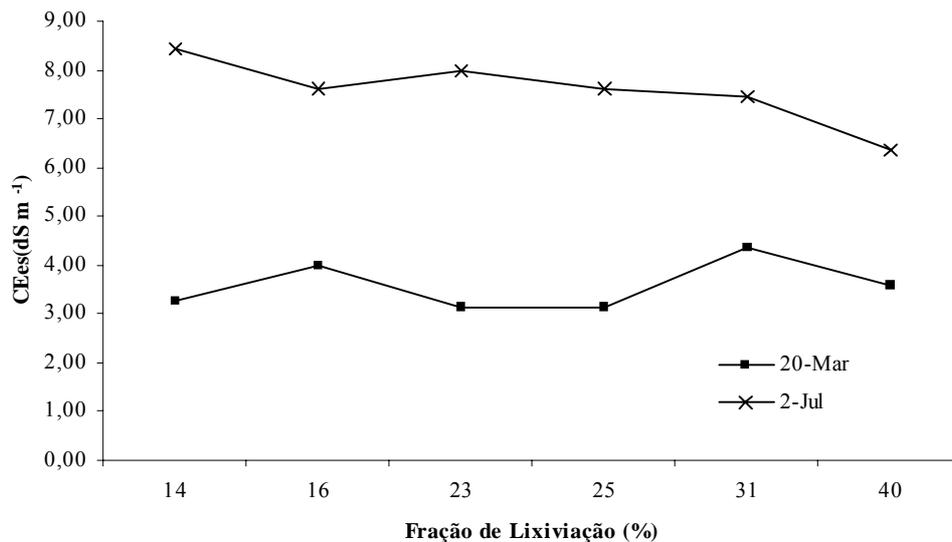


Figura 17- Efeito da fração de lixiviação sobre a variação na salinidade média da pasta do extrato da pasta do solo saturado, ao longo do experimento.

No Quadro 5, apresenta-se o efeito da lâmina de lixiviação na variação da condutividade elétrica média do extrato da pasta do solo saturado, bem como a relação entre a condutividade elétrica no final e início do experimento. Observa-se, como complemento à Figura 15, que com a redução da fração de lixiviação, em geral ocorre maior acréscimo da salinidade média no perfil do solo.

Quadro 5 - Efeito da lâmina de lixiviação na variação da CEes média no perfil do solo ( $\Delta$  CEesMédia) e na relação entre a condutividade elétrica do extrato da pasta do solo saturado no início (CEesi) e final do experimento (CEesf).

Fração de lixiviação (%)	$\Delta$ CEesMédia (dS m <sup>-1</sup> )	CEesf/CEesi
40	2,76	1,77
31	3,09	1,71
25	4,51	2,44
23	4,88	2,56
16	3,62	1,90
14	5,15	2,57

#### **4.3. Efeitos das frações de lixiviação sobre a ETc, produção relativa e eficiência de uso de água pelo feijoeiro**

Na Figura 18, apresenta-se a ETc acumulada do feijoeiro, ao longo do ciclo da cultura. O tratamento com água doce apresentou os maiores valores de ETc, principalmente, entre os dias 77 e 100, provavelmente, em razão da maior lâmina de irrigação da última aplicação com vistas ao ajuste da fração de lixiviação, ao final do experimento. Nos tratamentos com fração de lixiviação de 40 e 31%, os valores de ETc foram maiores que aqueles com menor fração, mostrando a tendência natural de valores mais altos de ETc para os tratamentos com maior fração de lixiviação.

Na Figura 19, apresenta-se o efeito da salinidade média do perfil do solo sobre a evapotranspiração da cultura. A evapotranspiração da cultura diminuiu com a condutividade elétrica do extrato da pasta do solo saturado, sendo que o modelo quadrático ajustou-se adequadamente aos dados observados, conforme o coeficiente de

determinação ( $r^2$ ). Estes resultados corroboram aqueles encontrados por Santos (2005) que, sob as mesmas condições experimentais, observou redução significativa nos parâmetros fisiológicos do feijoeiro (condutância estomática, transpiração e fotossíntese) com o aumento da CEs do solo. O autor observou, ainda, um aumento de aproximadamente 4,5°C na temperatura foliar do feijoeiro, entre os tratamentos com água doce e o mais salino. Como o aumento da temperatura é conseqüente ao fechamento estomático, em condições de estresse, este fato explica o porquê da redução na evapotranspiração do feijoeiro.

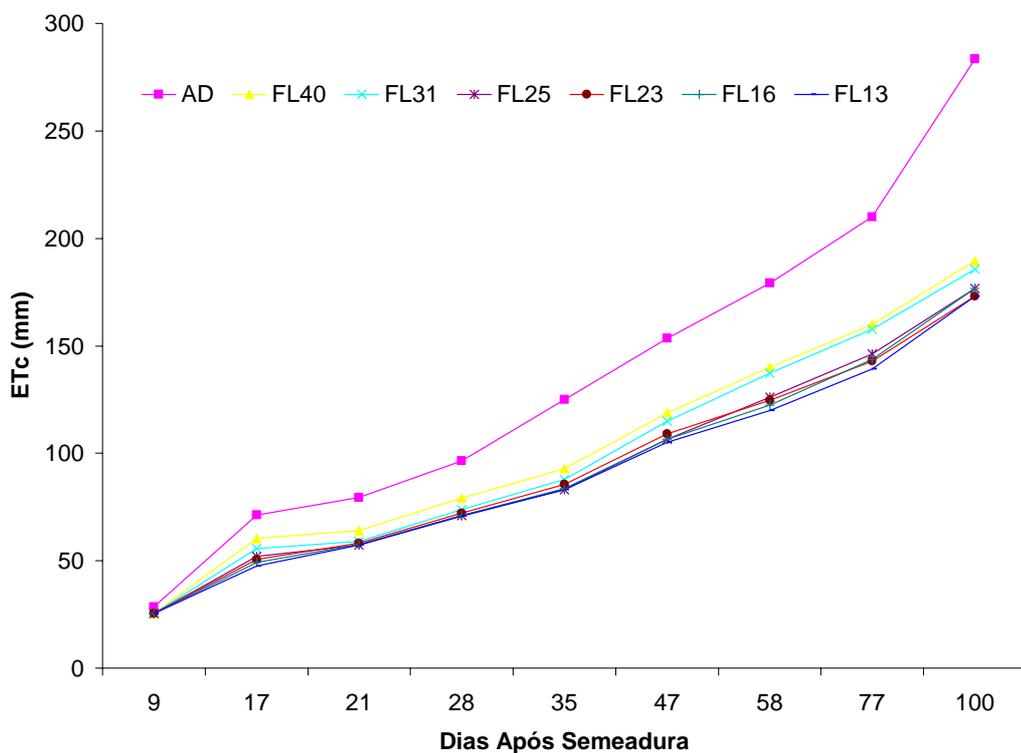


Figura 18 - Evapotranspiração acumulada da cultura para os sete tratamentos, ao longo do experimento.

No Quadro 6, apresentam-se os dados da salinidade média no perfil do solo ao longo do experimento, a lâmina de irrigação total ao longo do ciclo, a evapotranspiração da cultura, a produtividade de grãos do feijoeiro, a eficiência de uso da água do feijoeiro (dada em quilograma de grãos produzidos por volume de água evapotranspirada) e a relação entre a produtividade de grãos e a lâmina de irrigação aplicada, para cada tratamento.

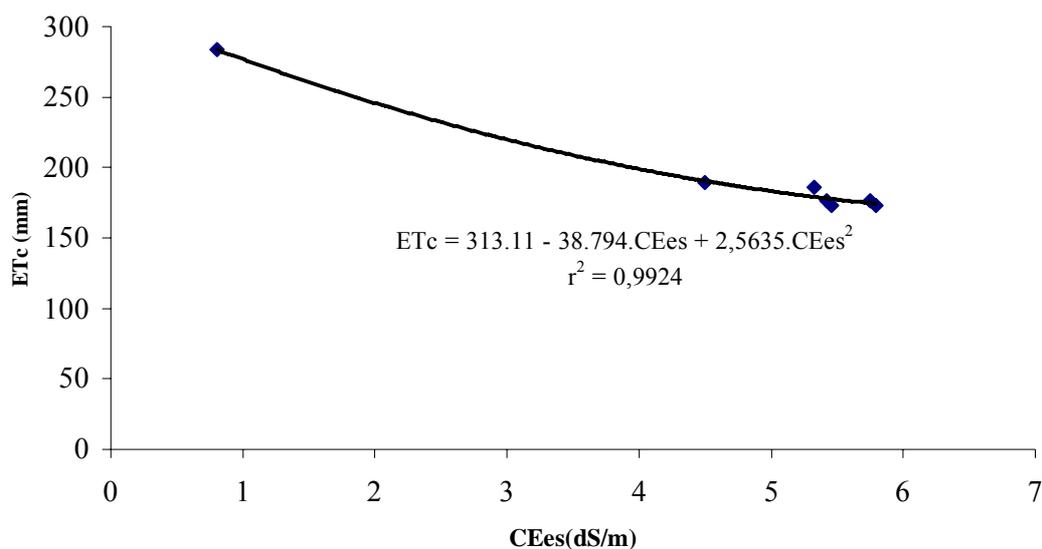


Figura 19 - Efeito da salinidade média do perfil do solo sobre a evapotranspiração do feijoeiro.

Quadro 6 - Salinidade média do solo (CEes), lâmina de irrigação (LI), evapotranspiração da cultura (ETc), produtividade do feijão, eficiência de uso de água (EUA) e relação produção/irrigação (P/I)

	CEes	LI	ETc	Produtiv.	EUA*	P/I
Tratamento	(dS.m <sup>-1</sup> )	(mm)	(mm)	(kg.ha <sup>-1</sup> )	(Kg. m <sup>-3</sup> )	(kg.mm <sup>-1</sup> .ha <sup>-1</sup> )
Água Doce	0,81	293,1	283,52	3.449,0	1,216	11,77
FL 40%	4,50	312,3	189,54	1933,0	1,02	6,19
FL 31%	5,32	267,5	185,75	1861,0	1,02	6,95
FL 25%	5,42	237,2	176,73	1448,0	0,819	6,10
FL 23%	5,45	224,05	173,09	1394,3	0,806	6,22
FL 16%	5,75	211,3	176,65	1267,8	0,718	6,00
FL 14%	5,79	201,8	173,05	1262,0	0,729	6,25

\*Kg de grão por metro cúbico de água evapotranspirada.

O aumento da fração de lixiviação proporcionou redução na salinidade média do solo, semelhantemente ao relatado por Rhoades e Loveday (1990), Ayers e Westcot (1985) e Hanson et al. (1999).

A redução da evapotranspiração do tratamento mais salino (FL de 14%) em relação ao tratamento com água doce foi de 39%, enquanto a redução da produtividade de grãos foi da ordem de 63%, demonstrando que o feijoeiro é altamente sensível ao déficit hídrico em ambiente salino, onde a amplitude dos problemas é geralmente aumentada.

No Quadro 6 observa-se, ainda, que a eficiência de uso da água reduziu com o aumento da salinidade do solo, apresentando valores semelhantes àqueles encontrados por Katerji et al. (2001) para as culturas de lentilha e grão-de-bico. Todavia, os valores de eficiência de uso de água encontrados no presente estudo, são maiores que os indicados por Doorenbos e Kassam (1979), possivelmente em razão da constituição genética do cultivar Talismã, que se mostra mais eficiente na utilização da água.

Observa-se, também, que o tratamento com água doce apresentou a maior eficiência de uso de água, bem como maior produção por lâmina de irrigação. É também evidente que, para as condições do estudo, a fração de lixiviação de 31 % resultou em maior produção por milímetro de água aplicada, mesmo tendo praticamente a mesma eficiência de uso de água que o tratamento com fração de lixiviação de 40%, pois, uma menor quantidade de água foi utilizada a fim de lixiviar os sais. Por meio dessas relações, torna-se possível definir, em função da expectativa de preço do feijão na época da colheita e do custo da irrigação (água e energia), a melhor opção de trabalho, baseado na rentabilidade da atividade.

Na Figura 20, apresenta-se o efeito da salinidade média, por tratamento, no perfil do solo ao longo do experimento sobre a produção relativa do feijoeiro, empregando-se o método proposto por Mass e Hoffman (1977), segundo a qual a salinidade limiar do feijoeiro, cultivar Talismã, foi  $1,67 \text{ dS m}^{-1}$ , e o decréscimo da produção relativa, para cada unidade de CEes foi 15,057%. Estes valores diferem daqueles encontrados por esses autores, que citam  $1,0 \text{ dS m}^{-1}$  e 19% para a salinidade limiar e para o decréscimo da produção relativa, respectivamente. Tais resultados demonstram que o cultivar Talismã mostra-se mais tolerante do que os cultivares estudados por aqueles autores, provavelmente devido ao melhor ajustamento osmótico do cultivar Talismã.

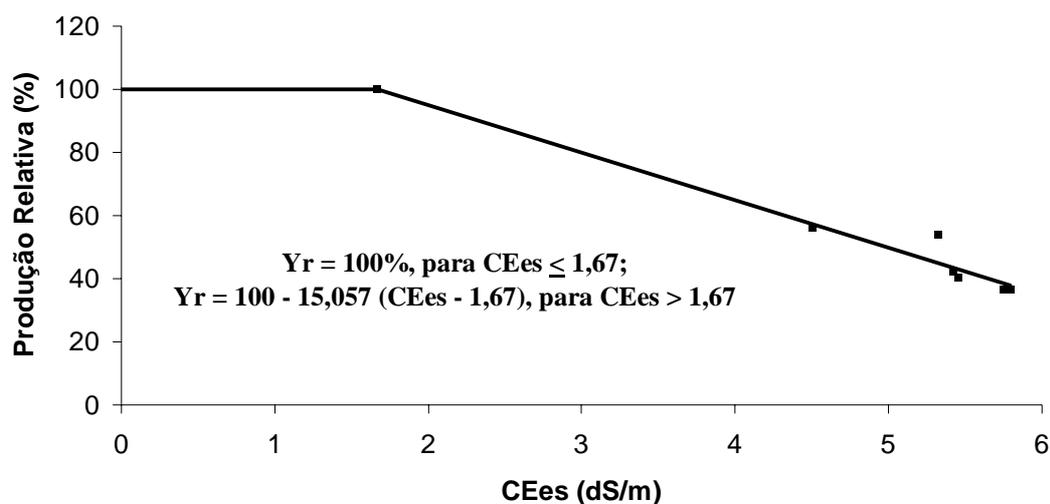


Figura 20 - Produção relativa do feijoeiro em função da condutividade elétrica do extrato da pasta do solo saturado.

O Quadro 7 apresenta os valores de  $K_y$  encontrados para cada tratamento, empregando-se a Equação 20, segundo metodologia proposta por Stewart et al. (1977). Observa-se uma tendência de aumento do  $K_y$  com a redução da fração de lixiviação. Portanto, pode-se inferir que o aumento da salinidade média no perfil do solo provoca o déficit hídrico nas plantas, que por sua vez intensifica os estresses hídrico, osmótico, térmico e nutricional.

Os valores de  $K_y$  variaram de 1,33 a 1,68, sendo maiores que o valor de 1,15 proposto por Doorenbos e Kassam (1979). Esta diferença é devida, provavelmente, ao cultivar e, também, à salinidade existente na condição de cultivo, proporcionando maior redução da evapotranspiração da cultura.

Quadro 7 - Valores de  $K_y$  para os tratamentos irrigados com água doce e salina com frações de lixiviação de 40, 31, 25, 23, 16 e 14%

Tratamento	$K_y$	Tratamento	$K_y$
FL 40%	1,33	FL 23%	1,53
FL 31%	1,34	FL 16%	1,68
FL 25%	1,54	FL 14%	1,63

Na Figura 21, apresenta-se o efeito do déficit de produção relativa em função do déficit da evapotranspiração relativa do feijoeiro, destacando-se o valor de  $K_y$  igual a 1,54 (coeficiente angular da reta ajustada aos dados). A partir do valor de  $K_y$ , é possível determinar a redução na produção relativa do feijoeiro, cultivar Talismã, quando cultivada em condições salinas.

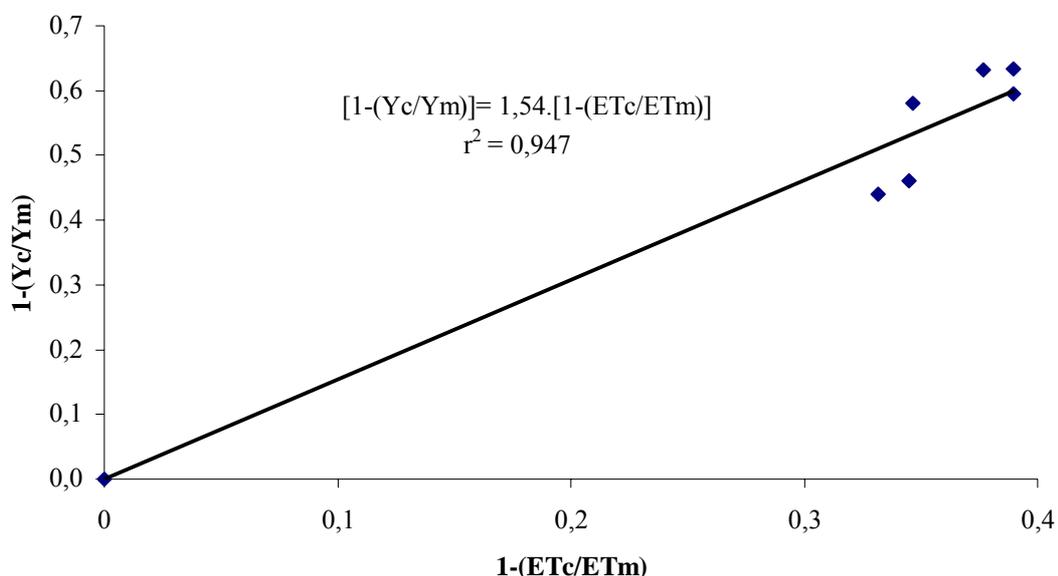


Figura 21 - Redução da produção relativa do feijoeiro, em função do déficit de evapotranspiração relativa.

#### 4.4. Determinação do índice diário de estresse hídrico

Na Figura 22, observa-se que o tratamento irrigado com água doce apresenta os maiores valores de potencial hídrico foliar, determinados no período antemanhã, enquanto nos tratamentos irrigados com água salina houve redução desses valores com o decréscimo na fração de lixiviação, ou seja, com o aumento na salinidade média do solo. Os resultados evidenciam uma resposta da cultura ao estresse salino, com relação à redução de seu potencial hídrico foliar, como forma de garantir a absorção de água do solo. Observa-se também que, logo após as irrigações, nos dias 47, 60 e 79, após a semeadura, ocorre aumento no potencial hídrico foliar em todos os tratamentos, caracterizando maior disponibilidade hídrica no solo. Este comportamento da cultura, apresentado na Figura 22, foi também verificado por Katerji et al. (1996), Katerji et al. (1997) e Katerji et al. (2001) para as culturas de milho, girassol, beterraba açucareira e lentilha.

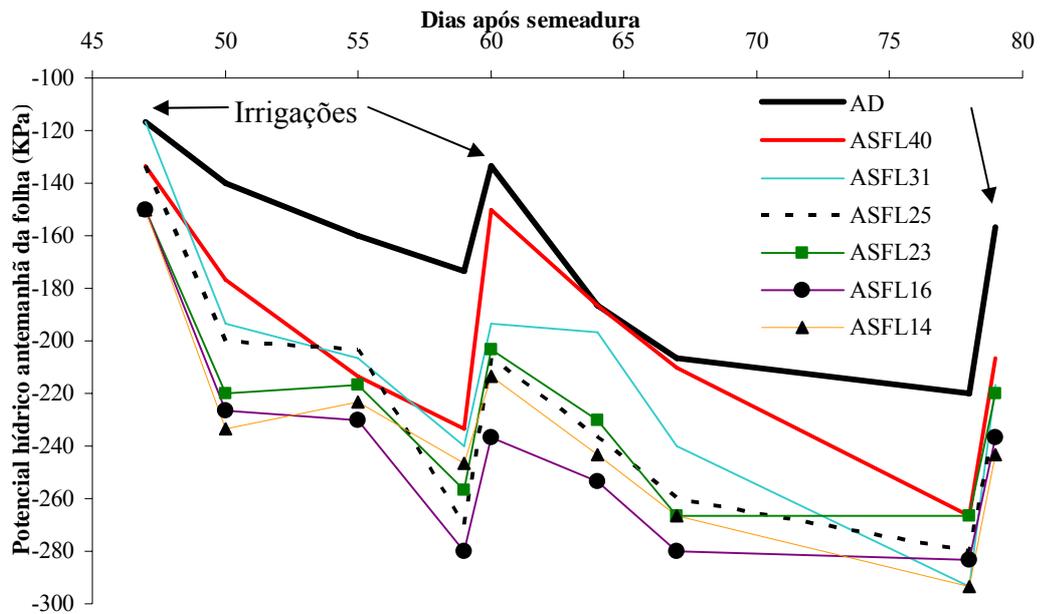


Figura 22 - Potencial hídrico no período antemanhã, na folha do feijoeiro, determinado ao longo do ciclo fenológico.

Na Figura 22, observa-se também que, em geral, ocorre uma redução do potencial hídrico no período antemanhã ao longo do tempo, caracterizando aumento do estresse salino, devido ao aumento da salinidade do solo, com a aplicação das irrigações.

Observa-se ainda que, embora o feijoeiro seja uma planta sensível à salinidade do solo, ao comparar o comportamento das plantas submetidas ao tratamento com água salina e fração de lixiviação de 40% (ASFL40) com o daquelas submetidas ao tratamento com água salina e fração de lixiviação de 16% (ASFL16), torna-se evidente que para o tratamento ASFL16, a partir dos 60 dias após a sementeira, as plantas não mais conseguiram reduzir o potencial hídrico nas folhas, ou seja, o valor de -280 KPa parece ser, para o cultivar Talismã, o limite de ajustamento osmótico. Por outro lado, as plantas submetidas ao tratamento ASFL40 tiveram o potencial hídrico nas folhas sempre acima deste limite. O ponto aos 77 dias após a sementeira para os tratamentos ASFL31 e ASFL14, em torno de -290KPa pode ser conseqüente a erros de leitura, uma vez que o comportamento mostrado na linha representativa do ASFL31 não é, fisicamente, esperado.

A Figura 23 apresenta o potencial hídrico médio, medido no período antemanhã nas folhas do feijoeiro para os sete tratamentos. Observa-se tendência de redução nos potenciais com o aumento da salinidade do solo, ou seja, maiores valores

(aproximadamente -150 KPa) para o cultivo irrigado com água doce e menores valores (aproximadamente -230 KPa) para o cultivo irrigado com água salina e frações de lixiviação a partir de 25%.

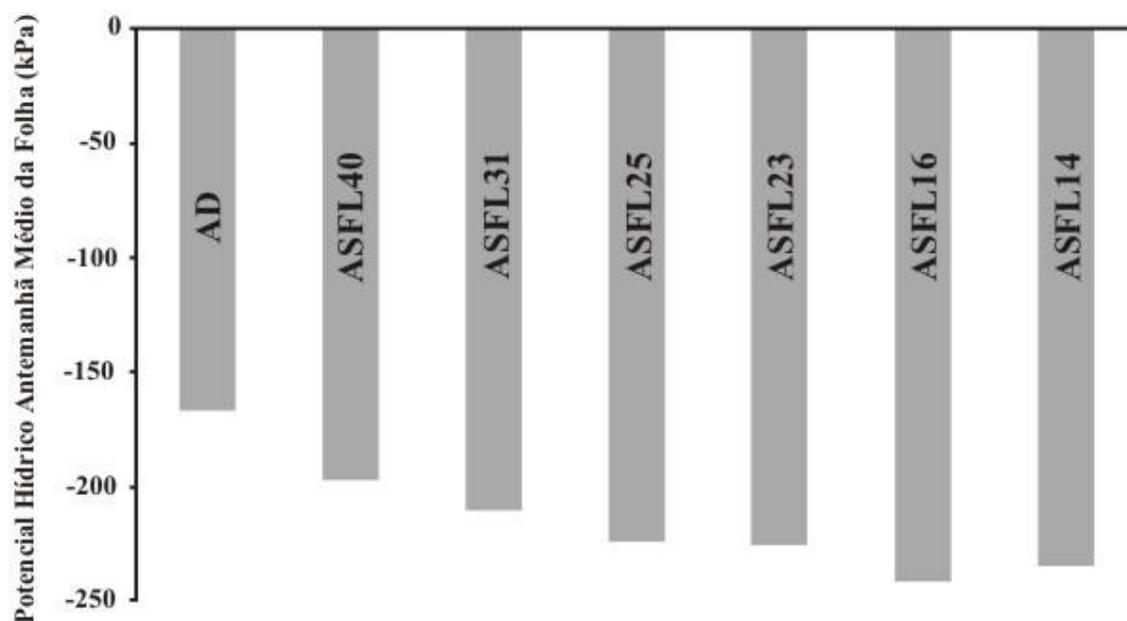


Figura 23 - Potencial hídrico médio, no período antemanhã, nas folhas do feijoeiro para os sete tratamentos.

Na Figura 24, apresenta-se o valor de WSDI em função da CEes média do ciclo, mostrando uma tendência de aumento do WSDI com a CEes, confirmando os resultados encontrados por Katerji et al. (1997), Katerji et al. (2003), Katerji et al. (2005a), Katerji et al. (2005 b), Katerji et al. (2000) e Katerji et al. (2001).

Na Figura 25, apresenta-se a produção relativa de grãos em função do WSDI do feijoeiro, ajustada à função linear com, aproximadamente,  $r^2 = 90\%$ . A equação ajustada aos dados observados, mostra um decréscimo da produção relativa com o aumento do WSDI e está de acordo com os resultados apresentados por Katerji et al. (2003) para diversas culturas.

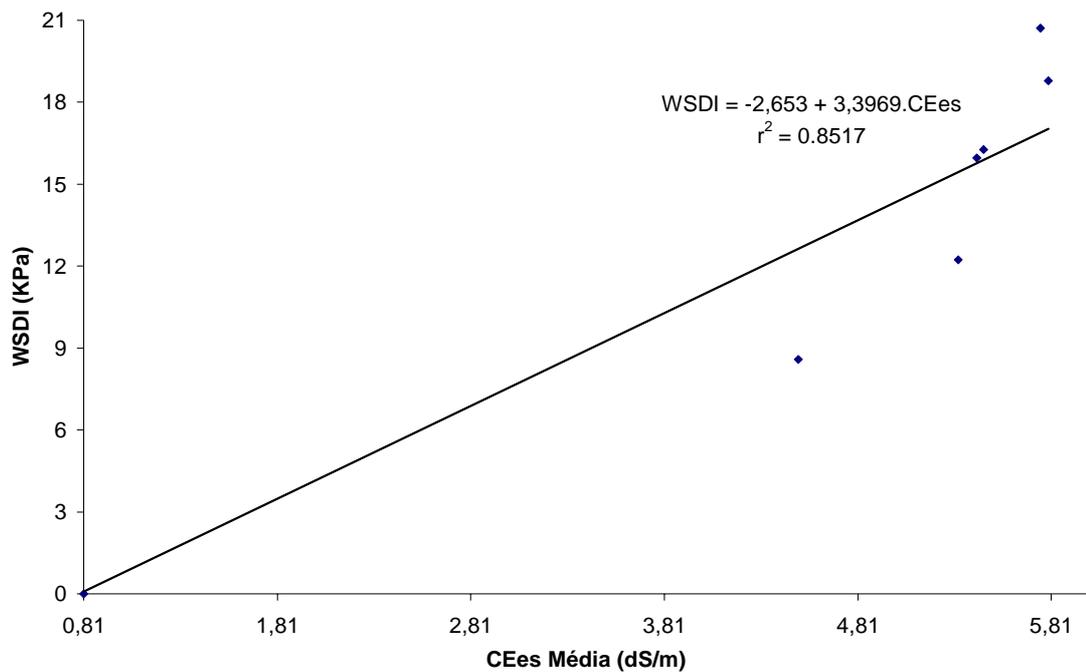


Figura 24 - Índice diário de estresse hídrico (WSDI) em função da CEes média ao longo do ciclo da cultura .

Observa-se, ainda, que o aumento de 1,0 KPa no WSDI proporciona um decréscimo de 3,501% na produção relativa e que, para um valor de WSDI igual a 14,5 KPa a produção relativa do feijoeiro é de 50 %.

O método do WSDI mostra-se adequado para determinação da produção relativa do feijoeiro, em razão de sua sensibilidade e por possibilitar a comparação de dados de pesquisa sobre tolerância das culturas à salinidade, por usar o parâmetro fisiológico, potencial hídrico da folha no período antemanhã, isto é, quando o potencial de água na planta está em equilíbrio com o da água no solo, eliminando, assim, o efeito de condição meteorológica local, do regime de irrigação e do índice de área foliar conforme citação de Katerji et al. (2000) e Katerji et al. (2001).

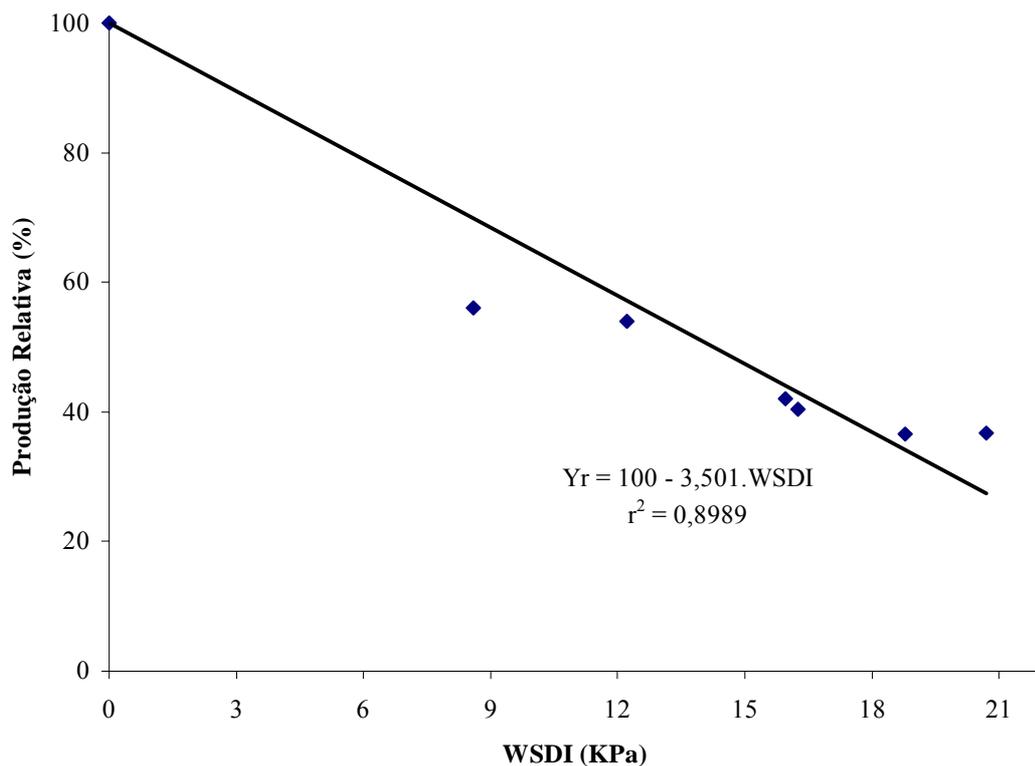


Figura 25 - Produção relativa ( $Y_r$ ) de grãos de feijoeiro em função do WSDI.

Nas Figuras 26, 27 e 28, apresentam-se comparações entre a produção relativa real obtida com o feijoeiro, e as produções relativas calculadas pelas equações ajustadas, segundo os métodos propostos por Mass e Hoffman (1977), Katerji et al. (2000) e Stewart et al. (1977), respectivamente.

Comparando-se as retas geradas pelas equações de ajuste dos três métodos com as retas de 45° de inclinação, observam-se ajustes muito bons em todos os casos, demonstrando que os três modelos são adequados para estimar a produção relativa, a partir de parâmetros como salinidade do solo (CEes), potencial hídrico nas folhas, WSDI e o déficit da evapotranspiração da cultura.

Entre os três modelos, o de Mass e Hoffman (1977) apresentou o melhor ajuste aos dados, o que pode ser verificado pela menor dispersão dos dados em relação à reta de 45°.

O uso do WSDI superestimou, ligeiramente, a produção relativa do feijoeiro, enquanto o uso da evapotranspiração relativa subestimou.

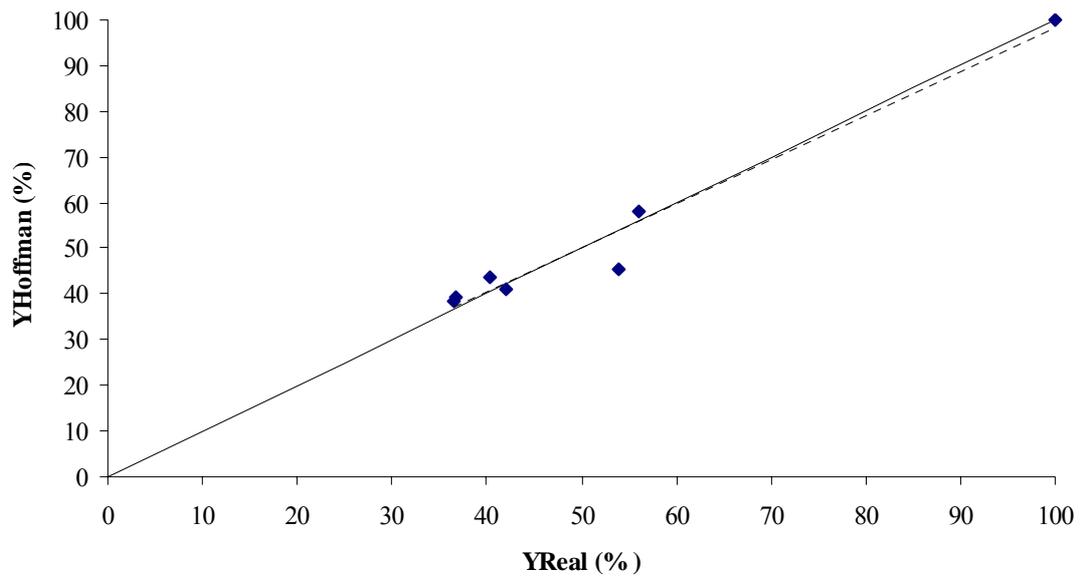


Figura 26 - Comparação entre produção relativa real (YReal) e a calculada pelo método proposto por Mass e Hoffman (1977) (YHoffman).

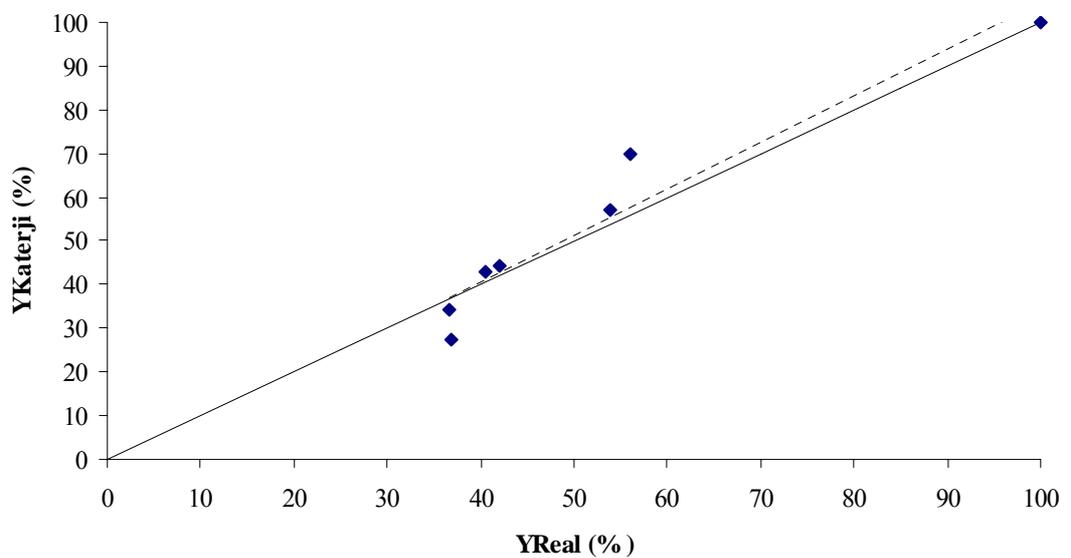


Figura 27 - Comparação entre produção relativa real (YReal) e a calculada pelo método proposto por Katerji et al. (2000) (YKaterji).

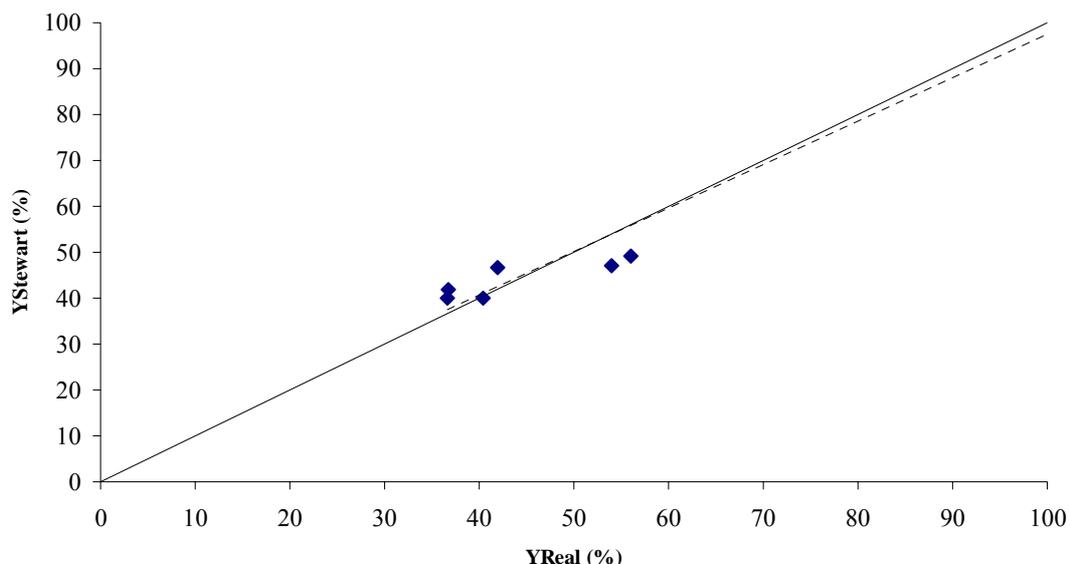


Figura 28 - Comparação entre produção relativa real (YReal) e a calculada pelo método proposto por Stewart et al. (1977) (YStewart).

## 5. CONCLUSÕES

- 1 - As irrigações com água salina promovem elevação da salinidade do solo sendo que, os níveis de salinidade mais elevados ocorrem para as menores frações de lixiviação.
- 2 - Nos tratamentos com água salina de  $2 \text{ dS m}^{-1}$ , a melhor produtividade de grãos de feijão, por lâmina de irrigação aplicada, é com fração de lixiviação de 31%.
- 3 - A salinidade limiar para o feijão, cultivar Talismã, é  $1,67 \text{ dS.m}^{-1}$  e a redução da produção relativa por acréscimo unitário da CEes, acima da salinidade limiar, é 15,057% por unidade de CEes.
- 4 - O valor de  $K_y$  (declividade da reta ajustada) é 1,54.
- 5 - O potencial hídrico médio da folha do feijoeiro irrigado com água doce e salina (fração de lixiviação de 14%) é -150 KPa e -230 KPa, respectivamente.
- 6 - A produção relativa do feijoeiro aumenta 3,5%, por unidade do WSDI e para valores do WSDI igual a 14,5 KPa, a produção relativa é 50%.

- 7 - Os métodos empregados na avaliação da produção relativa do feijoeiro mostram-se adequados.
- 8 - O ajustamento osmótico do feijoeiro, cultivar Talismã, limita-se a um valor do potencial hídrico foliar, medido no período antemanhã, igual a -280KPa.

## 6. BIBLIOGRAFIA

ABREU, A.F.B.; RAMALHO, M.A.P.; CARNEIRO, J.E.S. BRMS Talismã: common bean cultivar with carioca grain type. **Crop breeding and applied biotechnology**. Brasil: v.4, nº 3, p. 372-374. 2004.

ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. Roma: FAO, 1998. (Irrigation and drainage) 300p. Paper nº 56.

ALVES, I.; PERRIER, A.; PEREIRA, L.S. Penman-Monteith: how good is the big leaf?. IN: Evapotranspiration and irrigation scheduling. **Proceedings of international conference**. San Antonio, Texas, 1996. p.599-605.

AYERS, R.S.; WESTCOT, D.W. **Water quality for agriculture**. Rome: FAO, 1985. (Irrigation and drainage) 174p. Paper nº29.

BALL, M.C.; CHOW, W.S.; ANDERSON, J.M. Salinity-induced potassium deficiency causes loss of functional photosystem II in leaves of the grey mangrove (*avicenia marina*), through depletion of atrazine-binding polypeptide. **Australian journal plant physiology**. v. 14, p.351-361, 1987.

BERNSTEIN, L. **Salt tolerance of fruit crops**. United States department of agriculture, Agriculture information bulletin nº 292. 1965.

BERNARDO, S. **Manual de irrigação**. 6ª ed. Viçosa: UFV/Imprensa Universitária, 1996. 657p.

BRESLER, E.; McNEAL, B.L.; CARTER, D.L. **Saline and sodic soils: principles-dynamics-modeling**. New York, 1982. 236p.

CALBO, M.E.R.; MORAES, J.A.P.V. Fotossíntese, condutância estomática, transpiração e ajustamento osmótico de plantas de buriti submetidas a estresse hídrico. **Revista brasileira de fisiologia vegetal**, nº 9, p.117-123, 1997.

CASTRIGNANÒ, A.; KATERJI, N.; KARAM,F.; MASTRORILLI, M.; HAMDY, A. A modified version of CERES-Maize model for predicting crop response to salinity stress. **Ecological modeling**, nº 111, p.107-120, 1998.

Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais. **Recomendações para uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais – 5ª aproximação**. Viçosa: UFV, 1999. 359p.

DAKER, A. **Irrigação e drenagem**. A água na agricultura. Rio de Janeiro: Livraria Freitas Bastos S.A. 1988. 543p.

DE VILLIERS, M. **Água**. Tradução de José Kocerginsky. Rio de Janeiro, RJ: Ediouro, 2002. 457 p.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A.H. **Yield response to water**. Rome, FAO, 1979. (Irrigation and drainage) 193p. Paper nº33.

DOORENBOS, J.; PRUITT, W. O. **Guidelines for prediction crop water requirements**. Rome, FAO, 1977. (Irrigation and drainage) 144 p. Paper nº 24.

EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Serviço nacional de levantamento e conservação de solos. **Manual de métodos de análises do solo**. Rio de Janeiro: EMBRAPA, 1979. 60p.

FAGERIA, N.K.; GHEYI, H.R. **Melhoramento genético das culturas e seleção de cultivares.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA. Campina Grande: UFPB, 1997. Anais ..., Campina Grande, 1997. 383 p.

FERREIRA, P.A. **Qualidade de água e manejo água-plantas em solos salinos.** Brasília, DF: ABEAS, Viçosa, MG, UFV, Departamento de Engenharia Agrícola, 2001. 111p. (ABEAS: Curso de engenharia e manejo de irrigação. Módulo 10).

FRIZZONE, J.A. **Função de Produção.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA. Poços de Caldas: UFLA, 1998. Anais ..., Poços de Caldas, 1998. 368 p.

GHASSEMI, F.; JAKEMAN, A.J.; NIX, H.A. **Salinization of Land and Water Resources: Human Causes, Extent, Management and Case Studies,** CAB International, 1995. 526 p.

GLENN, E.P.; BROWN, J.J. Salt tolerance and crop potential of halophytes. **Critical reviews in plant sciences**, nº 18, p.227-255, 1999.

HANSON, B.; GRATTAN, S.R.; FULTON, A. **Agricultural salinity and drainage.** Davis: University of Califórnia. 1999. 159p.

HOMAEE, M.; DIRKSEN, C.; FEDDES, R.A. Simulation of root water uptake. I- Non-uniform transient salinity using different macroscopic reduction functions. **Agricultural water management**, nº 57, p.89-109, 2002a.

HOMAEE, M.; FEDDES, R.A. ; DIRKSEN, C Simulation of root water uptake. II- Non-uniform transient water stress using different reduction functions. **Agricultural water management**, nº 57, p.111-126, 2002b.

HOMAE, M.; FEDDES, R.A. ; DIRKSEN, C Simulation of root water uptake. III- Non-uniform transient combined salinity and water stress. **Agricultural water management**, nº 57, p.127-144, 2002c.

IBGE. **Produção agrícola municipal**. 2006. Disponível em <http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/indicadores/agropecuaria/lspa/defaulttab.shtm?c=1>. Acesso em: 11 de maio de 2006.

McGLINCHEY, M.G.; INMAN-BAMBER, N.G. Predicting sugarcane water use with the Penman-Monteith equation. IN: Evapotranspiration and irrigation scheduling. Proceedings of international conference. San Antonio, Texas, 1996. p.592-598.

KATERJI, N.; van HORN, J.W.; HAMDY, A.; KARAM, F.; MASTRORILLI, M. Effect of salinity on water stress, growth and yield of maize and sunflower. **Agricultural water management**, nº 30, p.237-249, 1996.

KATERJI, N.; van HOORN, J.W.; HAMDY, A.; MASTRORILLI, M.; KARZEL, E.M. Osmotic adjustment of sugar beets in response to soil salinity and its influence on stomatal conductance, growth and yield. **Agricultural Water Management**, nº 34, 57-69, 1997.

KATERJI, N.; van HORN, J.W.; HAMDY, A.; MASTRORILLI, M. Salt tolerance classification of crops according to soil and to water stress day index. **Agricultural water management**, nº 47, p.99-109, 2000.

KATERJI, N.; van HORN, J.W.; HAMDY, A.; MASTRORILLI, M.; OWEIS, T.; MALHOTRA, R.S. Response to soil salinity of two chickpea varieties differing in drought tolerance. **Agricultural water management**, nº 50, p.83-96, 2001.

KATERJI, N.; van HORN, J.W.; HAMDY, A.; MASTRORILLI, M. Salinity effect on crop development and yield, analysis of salt tolerance according to several classification methods. **Agricultural water management**, nº 1815, p.1-30, 2003.

KATERJI, N.; van HORN, J.W.; HAMDY, A.; MASTRORILLI, M.; OWEIS, T. Salt tolerance analysis of chickpea, faba bean and durum wheat varieties. I- Chickpea and faba bean. **Agricultural water management**, nº 72, p.177-194, 2005a.

KATERJI, N.; van HORN, J.W.; HAMDY, A.; MASTRORILLI, M.; NACHIT, M.M.; OWEIS, T. Salt tolerance analysis of chickpea, faba bean and durum wheat varieties. II- Durum wheat. **Agricultural water management**, nº 72, p.195-205, 2005b.

KRIEDEMANN, P.E. Stomatal and photosynthetic limitations to leaf growth. **Australian Journal Plant Physiology**, nº 13, p.15-31, 1986.

LARCHER, W. **Ecofisiologia Vegetal**. São Carlos: RiMa Artes e Textos, 531p. 2000.

LÄUCHLI, A.; EPSTEIN, E. Plant responses to saline and sodic conditions in: Agricultural salinity assessment and management. Ed. K.K. Tanji. ASAE. **Manual and reports on engineering practice**, nº 71, p.113-137, 1990.

LAHAYE, P.A.; EPSTEIN, E. Salt toleration by plants: enhancement with calcium. **Science**, nº 166, p.395-396, 1969.

LETEY, J.; DINAR, A. Simulated crop-water production functions for several crops when irrigated with saline waters. **Hilgardia**, nº 54, p.1-32, 1986.

LIMA, V.L.A. de. **Efeitos da qualidade da água de irrigação e da fração de lixiviação sobre a cultura do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris*) em condições de lisímetro de drenagem**. Viçosa: UFV, 1998. 87p. Tese de Doutorado.

MASS, E. V.; HOFFMAN, G. J. Crop salt tolerance – Current assessment. **J. Irrigation and Drainage Division**, ASCE 103: p.115-134, 1977.

MAAS, E.V. Crop salt tolerance in: Agricultural salinity assessment and management. Ed. K.K. Tanji. ASAE. **Manual and reports on engineering practice**, nº 71, p.262-304, 1990.

MATALLO, H. Jr. **Desertificação e sustentabilidade**. Recife – PE. *Jornal do Comércio*, 1999. Disponível em: [http://www2.uol.com.br/JC/\\_1999/2604/cm2504a.htm](http://www2.uol.com.br/JC/_1999/2604/cm2504a.htm). Acesso em: 18 de maio de 2003.

McGLINCHEY, M.G. e INMAN-BAMBER, N.G. Predicting sugarcane water use with the Penman-Monteith equation. In: Evapotranspiration and irrigation scheduling. **Proceedings of international conference**. San Antonio, Texas, p.592-598, 1996.

MEDEIROS, J.F. **Qualidade da água de irrigação e evolução da salinidade nas propriedades assistidas pelo gat, nos estados do RN, PB e CE**. Campina Grande: UFPB, 1992. 137p. Tese de Mestrado.

MEDEIROS, J.F.; GHEYI, H.R. Manejo do sistema solo-água-planta em solos afetados por sais. **In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA**. Campina Grande: UFPB, 1997. Anais ..., Campina Grande, 1997. 383 p.

MUNNS, R.; TERMAAT, A. Whole plant responses to salinity. **Australian Journal of Plant physiology**, nº 13, p.143-160, 1986.

OLIVEIRA, F.G. **Avaliação de métodos de estimativa da evapotranspiração do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris L.*) irrigado por pivô central**. Viçosa: UFV, 1996. 73 p. Tese de Mestrado.

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

PIZARRO, F. **Drenaje agrícola y recuperación de suelos salinos**. Ed. Agrícola española s.a. 1978. 521 p.

REICHARDT, K. **Dinâmica da material e da energia em ecossistemas**. Piracicaba, SP: USP/ESALQ, 1996. 505p.

RHOADES, J. D. Overview: diagnosis of salinity problems and selection of control practices. In : Agricultural salinity assessment and management. Ed. K.K. Tanji. ASAE. **Manual and reports on engineering practice**, nº 71, p.18 – 41, 1990.

RHOADES, J. D.; KANDIAH, A.; MASHALI, A. M. **O uso de águas salinas para produção agrícola**. Tradução por H. R. Gheyi, J. R. de Souza, J.E. Queiroz. Campina Grande: UFPB, 2000. (Irrigação e drenagem) 117p. Paper nº 48.

RHOADES, J.D.; LOVEDAY, J. Salinity in irrigated agriculture. In: **Irrigation of agriculture crops**. Madison: B.A. Stewart and D.R. Nielsen. 1990. p.1089-1142.

RICHARDS, L.A. **Diagnosis and improvement of saline and alkali soils**. Washington D.C.: US Department of agriculture, 1954. 160p.

SADEH, A.; RAVINA, I. Relationships between yield and transpiration with low-quality water – a system approach. **Agricultural systems**, nº 64, p.99-113, 2000.

SANTOS, D.B dos. **Efeitos da salinidade sobre características químicas do solo, aspectos nutricionais, fisiológicos e de produção no feijoeiro irrigado.** Viçosa: UFV, 2005. 78p. Tese de Doutorado.

SCHOLANDER, P.F.; HAMMEL, H.T.; HEMINGSSEN, E.E.; BRADSTREET, E.D. Hydrostatic pressure and osmotic potentials in leaves of mangroves and some other plants. **Proceedings of National Academy Science.** New York: v.51, 1965. p.119-125.

SHALHEVET, J. Using water of marginal quality for crop production: major issues. **Agricultural water management**, nº 25, p.233-269, 1994.

SLAVICH, P.G.; PETERSON, G.H. Estimating a electrical conductivity of saturated paste extracts from 1:5 soil:water suspensions and texture. **Australian J. Soil Res.**, v.31, nº 1, p.73-81, 1993.

STEWART, J.L.; DANIELSON, R.E.; HANKS, R.J.; JACKSON, E.B.; HAGON, R.M.; PRUITT, W.O.; FRANKLIN, W.T.; RILEY, J.P. **Optimizing crop production through control of water and salinity levels in the soil.** Utah. 1977. 191p.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia Vegetal.** 3 ed., Porto Alegre: Artmed. 2004. 719p.

TANJI, K.K. Nature and extend of agricultural salinity in: Agricultural salinity assessment and management. New York: K.K. Tanji. ASAE. **Manual and reports on engineering practice**, nº71, 1990. p.1-17.

VAN GENUCHTEN, M.Th. A closed-form solution for predicting the conductivity of insaturated soils. **Soils Sci. Soc. Am. J.**, nº 44, p.892-898, 1980.