

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE CIÊNCIAS RURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO**

**TEMPO PARA A OCORRÊNCIA DA RESISTÊNCIA À
PENETRAÇÃO RESTRITIVA AO FEIJOEIRO EM
SOLO COM DIFERENTES ESTADOS DE
COMPACTAÇÃO**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Paulo Ivonir Gubiani

Santa Maria, RS, Brasil

2008

TEMPO PARA A OCORRÊNCIA DA RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO RESTRITIVA AO FEIJOEIRO EM SOLO COM DIFERENTES ESTADOS DE COMPACTAÇÃO

por

Paulo Ivonir Gubiani

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Área de Concentração em Processos Físicos e Morfogenéticos do Solo, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de
Mestre em Ciência do Solo.

Orientador: Dalvan José Reinert

Santa Maria, RS, Brasil

2008

G921t Gubiani, Paulo Ivonir, 1974- Tempo para a ocorrência da resistência à penetração restritiva ao feijoeiro em solo com diferentes estados de compactação / por Paulo Ivonir Gubiani ; orientador Dalvan José Reinert. – Santa Maria, 2008. 108 f. ; il. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, RS, 2008. 1. Ciência do solo 2. Déficit hídrico 3. Armazenamento de água 4. Evapotranspiração 5. Feijoeiro I. Reinert, Dalvan José, orient. II. Título CDU: 631.4:635.652
--

Ficha catalográfica elaborada por
Luiz Marchiotti Fernandes – CRB 10/1160
Biblioteca Setorial do Centro de Ciências Rurais/UFSM

© 2008

Todos os direitos autorais reservados a Paulo Ivonir Gubiani. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita com autorização por escrito do autor.

Endereço: Universidade Federal de Santa Maria/Centro de Ciências Rurais/Departamento de Solos/Av. Roraima, n. 1000, Cidade Universitária, Bairro Camobi, Santa Maria, RS, 97105-900.

Fone/Fax: (055) 3220-8108; End. Eletr: paulogubiani@gmail.com

**Universidade Federal de Santa Maria
Centro de Ciências Rurais
Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova a
Dissertação de Mestrado

**TEMPO PARA A OCORRÊNCIA DA RESISTÊNCIA A PENETRAÇÃO
RESTRITIVA AO FEIJOEIRO EM SOLO COM DIFERENTES
ESTADOS DE COMPACTAÇÃO**

elaborada por
Paulo Ivonir Gubiani

como requisito parcial para obtenção do grau de
Mestre em Ciência do Solo

COMISSÃO EXAMINADORA:

Dalvan José Reinert, PhD.
(Presidente/Orientador)

José Miguel Reichert, PhD. (UFSM)
(Co-orientador)

Álvaro Pires da Silva, PhD. (USP)

Santa Maria, 30 de Outubro de 2008.

*Dedico este trabalho a minha mãe,
Inez Olga Ferigollo Gubiani, pela
motivação e apoio para o retorno
aos estudos!*

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Santa Maria, ao Departamento de Solos e ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, pela possibilidade de realização do curso de mestrado.

À CAPES, pela concessão da bolsa de estudo, em nível de mestrado, e pela aceitação para ingresso no doutorado, com manutenção da bolsa.

Aos professores Dalvan José Reinert, José Miguel Reichert e Leandro Souza da Silva, pela oportunidade, orientação, liberdade de expressar idéias, simplicidade, aprendizagem e profissionalismo.

Ao Flávio Fontinelli ("Fonti"), pela ajuda prestada durante o período de iniciação científica e mestrado.

Ao professor Paulo Augusto Manfron, pelo empréstimo de equipamentos.

Aos colegas de pesquisa da Física do Solo: Adão Leonel Mello Corcini, Luis Eduardo Suzuki, André Brandt, Jackson Albuquerque, Leonir Uhde, Juliana Prevedello, Eracilda Fontanela, Claudia Barros, Leandro Dalbianco, David e Vanderléia da Rosa, Carlos Streck, e Eduardo Vogelmann, especialmente ao Douglas Kaiser, Leandro Dalbianco, Marcelo e Maurício Kunz, Marcelo Mentges, Davi Vieira, Fabiano Braga e Miriam Rodrigues, pela contribuição nos trabalhos de campo e de laboratório.

À minha namorada, Neiva Somavilla Gelain, pelo auxílio nos trabalhos de campo e laboratório e, sobretudo, pela compreensão nas horas de ausência.

Aos meus familiares, Luiz Vitor Gubiani, Inez Olga Ferigollo Gubiani, Nilvio e Alcione Gubiani, Salute, Douglas, Milena e Cecília, pelo incentivo e voto de confiança.

A todos, meu MUITO OBRIGADO!

RESUMO

Dissertação de Mestrado
Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo
Universidade Federal de Santa Maria

TEMPO PARA A OCORRÊNCIA DA RESISTÊNCIA A PENETRAÇÃO RESTRITIVA AO FEIJOEIRO EM SOLO COM DIFERENTES ESTADOS DE COMPACTAÇÃO

AUTOR: PAULO IVONIR GUBIANI

ORIENTADOR: DALVAN JOSÉ REINERT

Local e Data da Defesa: Santa Maria, 30 de outubro de 2008.

A compactação do solo e a disponibilidade de água estão relacionadas com o desempenho das culturas. Seus efeitos individuais são difíceis de mensurar e, possivelmente, inseparáveis em uma condição de campo. Em períodos de escassez de chuvas, o déficit hídrico na planta e a resistência do solo à penetração radicular são os principais fatores causadores de perda de rendimento. O modo como eles afetam processos biológicos nas culturas já é bem compreendido, no entanto quando e com que intensidade são questões difíceis de responder. A hipótese enunciada é que o tempo para um indicador de estresse se manifestar é uma medida do estado de compactação e que tem relação com a resposta das plantas. Valores indicadores de restrição de resistência à penetração, potencial hídrico foliar relativo e evapotranspiração real relativa foram quantificados em diferentes níveis de compactação, com e sem irrigação, e relacionados com medidas da cultura de feijoeiro. O tempo para a resistência à penetração atingir o valor de 2 MPa foi diferente entre os níveis de compactação e esteve diretamente relacionado com o rendimento de grãos, confirmando a hipótese deste trabalho. O rendimento de grãos foi a variável que melhor evidenciou o efeito da compactação, enquanto que o índice de área foliar e altura de plantas, por agregarem pouco o efeito do déficit hídrico, mostraram menor sensibilidade. Houve correlação significativa do tempo para a resistência à penetração atingir o valor de 2 MPa com a altura de plantas e o rendimento de grãos. Quando as plantas cresceram sob irrigação em solo compactado o efeito da compactação foi pouco percebido. Em relação ao solo compactado e sem irrigação, a escarificação proporcionou aumento no rendimento de grãos próximos aos incrementos obtidos com irrigação. Assim, os resultados evidenciaram que o efeito da compactação é intensificado pelo déficit hídrico. Por outro lado, sem déficit hídrico a compactação pode ter pouco impacto sobre a produção das culturas. A análise do tempo para a evolução da resistência à penetração a um valor crítico se mostrou uma estratégia promissora e com potencial preditivo do efeito da compactação do solo sobre as culturas.

Palavras-chave: Déficit hídrico, armazenamento de água, evapotranspiração.

ABSTRACT

Master Dissertation
Graduate Program in Soil Science
Federal University of Santa Maria

TIME TO OCURR RESTRICTIVE SOIL RESISTANCE TO BLACKBEANS IN DIFFERENT SOIL COMPACTION STATES

AUTHOR: PAULO IVONIR GUBIANI

ADVISOR: DALVAN JOSÉ REINERT

Place and date of defense: Santa Maria, October 30, 2008.

Soil compaction and water availability are related to crop performance. Its individual effects are very difficult to be measured and, possibly, they have joint effects in field conditions. In periods of lack of rain the plant water deficit and the soil resistance to root growth are the main factors associated to crop yield losses. How they affect the biological processes in commercial crops is understood, however, when and how intense are questions which are hard to answer. The hypothesis proposed is that the time to a given stress indicator to reach a restrictive state is a measure of the state of compaction and is related with plant response. Values of indicators of penetration resistance, relative leaf hydric potential and relative real evapotranspiration were measured in different states of compaction, with and without irrigation, and related to blackbeans growth and yield components. The time for soil resistance to penetration reaching 2 MPa was different for different levels of compaction and was directly related to grain yield, confirming the hypothesis of this work. Blackbeans grain yield was the variable which better pointed out the compaction effect, whereas leaf area index and plant height, because of its low association with hydric deficit, had lower sensibility to compaction. There was a significant association of time to penetration resistance to reach 2 MPa with plant height and grain yield; however, when plants grew with irrigation in compacted soil, the later was not felt by plants. On the other hand, when compacted soil was not irrigated but chiseled, there was grain yield increase similar to what was gained by irrigation. Thus, the results pointed out that the compaction effects is intensified by hydric deficit, what in the other hand, without hydric deficit, the compaction may have low impact on crop production. The analysis of time for penetration resistance reaching restrictive values may be a promisor strategy and also serve as predictor of soil compaction effects on crop performance.

Key words: hydric deficit, water storage, evapotranspiration

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1– Comportamento diário da umidade e temperatura do ar, no período da semeadura ao enchimento de vagens da cultura do feijoeiro. UR MÁX é a umidade relativa máxima, UR MÍN é a umidade relativa mínima, T MÁX é a temperatura máxima, T MÍN é a Temperatura mínima. Fonte: INMET, Estação Automática de SANTA MARIA (RS), Santa Maria, 2008.	33
FIGURA 2 – Croqui experimental. ESC = escarificado, PD = plantio direto, PDC = plantio direto com compactação adicional. B1, B2, B3 e B4 = Bloco 1, 2, 3 e 4, respectivamente. s= local de instalação das sondas de TDR. Os círculos representam as áreas irrigadas.....	34
FIGURA 3 – Curva de retenção de água no solo nas camadas de 0-0,10 e 0,15-0,25 m. θ é o conteúdo volumétrico de água, ψ é a tensão de água no solo e CC é a capacidade de campo.	36
FIGURA 4 – Precipitações (504 mm de chuva e 128 mm irrigações ao total) durante o período da semeadura ao enchimento dos legumes. * Fonte: INMET, Estação Automática de SANTA MARIA (RS), Santa Maria, 2008.....	38
FIGURA 5 – Relação entre área foliar e o produto do comprimento pela máxima largura do folíolo central do trifólio.	42
FIGURA 6 – Resistência do solo à penetração após o estabelecimento dos níveis de compactação. Barras horizontais representam a DMS calculada pelo teste de Tukey a 0,05 de probabilidade de erro.....	48
FIGURA 7 – Variação temporal do ψ_f medido em WP4. S1 G = Soja dia 1 armazenada em caixa de isopor com gelo; S1 R = Soja dia 1 refrigerada em geladeira; S2 G = Soja dia 2 armazenada em caixa de isopor com gelo; S2 R = Soja dia 2 refrigerada em geladeira; M G = milho armazenado em caixa de isopor com	

gelo. As linhas cheias representam o comportamento do ψ_f quando o material foi armazenado em geladeira.....	50
FIGURA 8 – População de plantas aos 13 e 36 DAS, índice de área foliar (IAF) e altura de plantas aos 21, 27, 38 e 56 DAS da cultura do feijoeiro, em diferentes níveis de compactação, com (IR) e sem (NI) irrigação. (+) significativo para níveis de irrigação, e (**) significativo para níveis de compactação, a 0,05 de probabilidade de erro.....	59
FIGURA 9 – Variação da umidade volumétrica (θ) nas camadas de 0-0,10, 0,15-0,25 e 0,30-0,45 m, no período de 7 a 56 DAS, em diferentes níveis de compactação, com (IR) e sem (NI) irrigação.	62
FIGURA 10 – Resistência do solo à penetração por camadas 0,03 m, de 0-0,40 m de profundidade, medida aos 23, 25, 26, 35 e 36 DAS, em diferentes níveis de compactação. As linhas horizontais representam a diferença mínima significativa do teste de Tukey a 0,05 e comparam as médias dos tratamentos em cada camada...64	64
FIGURA 11 – Resistência do solo à penetração e seus respectivos resíduos na camada de 0-0,10 e 0,15-0,25 m em função da umidade volumétrica (θ), nos diferentes níveis de compactação. LS = limite de confiança superior; LI = limite de confiança inferior da média, a 0,95 de probabilidade, e CV = coeficiente de variação (%).	66
FIGURA 12 – Variação da RP nas camadas de 0-0,10 e 0,15-0,25 m, no período de 7 a 56 DAS, em diferentes níveis de compactação sem irrigação. As setas indicam o momento em que a umidade do solo (Figura 9) decresceu além do domínio das funções de estimativa da RP.....	69
FIGURA 13 – Variação do armazenamento por camada de solo, dos 7 aos 56 DAS, em diferentes níveis de compactação, com e sem irrigação.....	71
FIGURA 14 – Variação do armazenamento total, dos 7 aos 56 DAS, em diferentes níveis de compactação, com e sem irrigação.....	74
FIGURA 15 – Variação temporal do potencial hídrico foliar, em diferentes níveis de compactação, e da temperatura e umidade relativa do ar.	76
FIGURA 16 – Evapotranspiração acumulada dos 35 aos 51 DAS e expansão foliar por unidade de volume de água evapotranspirada*, em diferentes níveis de compactação, com e sem irrigação. *Para o cálculo, foi usado o IAF médio das medidas aos 38 e 56 DAS e a ETR ocorrida dos 38 aos 51 DAS.	80

FIGURA 17 – Rendimento de grão da cultura do feijoeiro em diferentes níveis de compactação, com (IR) e sem (NI) irrigação, e incrementos médios de rendimento (Δ rendimento) obtidos com a irrigação (XXXX) e pela diferença entre ESC e PDC sem irrigação (IIII). Letras maiúsculas comparam os níveis de irrigação, e as letras minúsculas, os níveis de compactação e o Δ rendimento, pelo teste de Tukey a 0,05 de probabilidade de erro.83

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – Momento de aplicação, produto, princípio ativo e respectivas doses recomendadas pelos fabricantes, dos defensivos utilizados na cultura.	41
TABELA 2 – Densidade do solo, porosidade total, macroporosidade e microporosidade, em diferentes níveis de compactação e camadas do solo.....	45
TABELA 3 – Coeficientes de correlação de linear de Pearson (r) entre variáveis de planta e de solo, nas camadas de 0-0,10 e 0,10-0,20 m, em dois níveis de irrigação. IAF = índice de área foliar, AP = altura de plantas, REND = rendimento de grãos, Ds = densidade do solo, Pt = porosidade total, Ma = macroporosidade e Mi = microporosidade.....	88
TABELA 4 – Coeficientes de correlação de linear de Pearson (r) entre variáveis de planta e as medidas temporais e de intensidade da RP. IAF = índice de área foliar, AP = altura de plantas, REND = rendimento de grãos, DiasRP _[RP<2MPa] = dias até a resistência à penetração atingir o valor de 2 MPa, $\Delta RP_{[RP_{m\acute{a}x}-2MPa]}$ = incrementos de RP maiores que 2MPa.	89

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.1 Hipóteses	17
1.2 Objetivo geral	17
1.2.1 Objetivos específicos.....	17
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	18
2.1 Compactação do solo e a produção das culturas	18
2.2 Resistência do solo à penetração indicadora de restrição radicular	22
2.3 Cultura do feijoeiro e o estresse hídrico-mecânico	25
2.4 Potencial hídrico foliar e evapotranspiração como medidas associadas ao estresse hídrico.....	27
3 MATERIAL E MÉTODOS	33
3.1 Local, solo e clima	33
3.2 Tratamentos e delineamento experimental.....	34
3.2.1 Níveis de irrigação.....	35
3.2.2 Níveis de compactação	38
3.3 Implantação e manejo cultural	40
3.4 Determinações e metodologia empregada	42
3.4.1 População, área foliar, índice de área foliar, altura de plantas e rendimento de grãos	42
3.4.2 Densidade, porosidade e condutividade hidráulica do solo saturado.....	43
3.4.3 Umidade volumétrica do solo	45
3.3.4 Resistência do solo à penetração	46

3.4.4 Armazenamento de água no solo.....	48
3.4.6 Evapotranspiração real.....	51
3.5 Análise estatística	54
3.5.1 Índice de área foliar, altura de plantas, potencial hídrico foliar e rendimento de grãos	55
3.5.2 Densidade, porosidades e população de plantas;.....	55
3.5.3 Umidade e resistência do solo à penetração.....	56
3.5.4 Armazenamento de água no solo.....	56
3.5.5 Evapotranspiração real.....	57
3.5.6 Relações entre variáveis de solo e da planta.....	57
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	58
4.1 População, índice de área foliar e altura de plantas	58
4.2 Umidade volumétrica do solo	61
4.3 Resistência do solo à penetração.....	63
4.4 Armazenamento de água no solo	70
4.5 Potencial hídrico foliar.....	75
4.6 Evapotranspiração real.....	79
4.7 Rendimento de grãos.....	82
4.8 Relações entre variáveis de planta e solo.....	87
5 CONCLUSÕES	92
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	93
7 APÊNDICES	104

1 INTRODUÇÃO

Os sistemas agrícolas de produção de grãos incorporaram inúmeras tecnologias nas últimas décadas. Em relação ao manejo do solo, uma das principais mudanças nos últimos anos foi de natureza física, devido à transição do sistema convencional para o sistema plantio direto, ou comumente descrito como plantio direto (PD). A necessidade de maior esforço de tração e a busca de maior rendimento nas operações de cultivo, visando um melhor aproveitamento das janelas climáticas, são argumentos para a fabricação e utilização de equipamentos extremamente pesados, principalmente para as operações de semeadura e colheita. Se os equipamentos tiverem peso superior à capacidade de suporte de carga do solo, que é menor principalmente quando o tráfego acontece em condições de umidade elevada, o resultado é a ocorrência de compactação.

As estratégias de manejo do PD determinam a ocorrência da compactação, a qual modifica as características físicas do solo e altera os fluxos de massa e energia entre o solo e a atmosfera. Essas modificações afetam o crescimento e o desenvolvimento das culturas, em graus que variam conforme a intensidade de alteração, a amplitude de variação das condições climáticas no período em que as plantas permanecem no local e da espécie cultivada.

A intensidade ou o estado de compactação do solo tem sido expresso, preferivelmente por indicadores físicos que afetam o crescimento das culturas. Propriedades como densidade, resistência à penetração e porosidade de aeração são comumente utilizadas para indicar a degradação da qualidade física do solo. A grande dificuldade tem sido estabelecer limites para estes indicadores, que caracterizem um estado de compactação prejudicial às culturas. Muito mais que isso, o desafio maior tem sido descrever relações entre um dado indicador e a resposta da planta, de forma que a relação ou modelo preserve a sensibilidade entre a causa e o efeito em outras situações de sua aplicação.

No Rio Grande do Sul, os baixos rendimentos verificados em muitos anos têm sido atribuídos, principalmente, à ocorrência de déficit hídrico. A severidade dos danos provocados pela falta de água pode ser intensificada pela compactação do solo, pois a restrição ao crescimento das raízes no perfil impede que a planta explore um grande volume de solo e tenha acesso a um maior suprimento de água. Em razão disso, a resistência à penetração deve ser um importante fator envolvido

nas causas responsáveis pelos baixos rendimentos em condições de déficit hídrico, pois à medida que o solo seca a resistência à penetração aumenta, que pode ser de forma exponencial, dependendo da rigidez da estrutura do solo.

Nesse processo, a umidade do solo parece ser um fator preponderante. Plantas crescendo em solo compactado podem completar seu ciclo sem serem prejudicadas pela resistência à penetração, desde que a umidade do solo seja mantida num teor acima do qual a resistência dificultaria o crescimento de raízes. Num outro cenário, a umidade do solo pode aumentar ou diminuir em taxas definidas basicamente pelo regime de chuvas. Concomitantemente, a resistência à penetração acompanha a variação da umidade em sentido inverso. Toda essa dinâmica se processa no tempo, e a intensidade como ela ocorre pode ser uma informação de interesse, pois indica a velocidade com que as plantas estariam sujeitas a estresse hídricos e mecânicos.

A importância relativa dos fatores umidade e resistência à penetração está relacionada ao grau de rigidez da estrutura do solo. Em um dado estado de compactação, as restrições ao crescimento por déficit hídrico e resistência à penetração devem ter início ao mesmo tempo e, possivelmente, se intensificam a taxas semelhantes, à medida que o solo seca. Porém, em solos com estado de compactação elevado, a restrição por resistência à penetração deve ocorrer antes e aumentar a taxas maiores, comparativamente ao momento de ocorrência e evolução do déficit hídrico. Ao contrário, em solo pouco compactado ou revolvido, o déficit hídrico deve ocorrer antes e aumentar a taxas maiores. Assim, o conhecimento de qual o fator se torna efetivamente limitante à medida que o solo seca, só é possível através da observação sistemática da resposta das plantas a campo, monitorando-se simultaneamente a variação da umidade do solo e da resistência à penetração.

Nesse contexto teórico, o tempo para a ocorrência de condição restritiva, seja por deficiência hídrica ou resistência a penetração elevada, pode ser uma informação importante para caracterizar o estado de compactação do solo. Também de grande relevância é a informação de como as culturas respondem a esses tempos diferentes para o nível crítico do fator se expressar, contando que as culturas sejam submetidas por um tempo mínimo ao estado de estresse desse fator, após sua manifestação. Essas informações podem ser obtidas pelo monitoramento da umidade e da resistência à penetração ao longo do ciclo de cultivo. Paralelamente, medidas como o potencial hídrico foliar e a evapotranspiração real podem ser

usadas para auxiliar na identificação do momento que planta exterioriza os sinais do estresse.

Surge, portanto, a necessidade de investigar essas relações temporais da variação da umidade do solo e seu impacto na produtividade das culturas, considerando-se medidas de planta associadas a observações do solo. Essas observações conjuntas proporcionariam uma melhor compreensão sobre a resposta de culturas em solos compactados e os fenômenos envolvidos nesse processo. As informações obtidas podem também auxiliar na definição de estratégias de manejo e orientar a tomada de decisão para as possíveis intervenções no sistema de cultivo.

A inclusão de pelo menos uma espécie de planta nos estudos de compactação é um pré-requisito quando se pretende discutir os efeitos da compactação sobre as culturas. Os dados da pesquisa têm evidenciado que o efeito da compactação do solo sobre as culturas não tem sido explicado satisfatoriamente apenas com informações do solo, mesmo que essas informações tenham sustentação em processos fisiológicos. Somente informações integradas de solo-planta-atmosfera podem informar com mais precisão quais os principais fatores que governam a resposta de uma cultura num dado ciclo de cultivo. Portanto, não é sensato esperar um padrão na resposta das plantas para um mesmo estado de compactação, visto que as variáveis ambientais se comportam de forma completamente diferente de um cultivo para o outro. Além disso, atribuir a resposta das culturas a fatores físicos pode ser um grande equívoco, quando os fatores biológicos que interagem com as plantas não são devidamente controlados num trabalho experimental.

Assim, a proposição deste trabalho procurou reunir, embora de maneira excessivamente simples face à complexidade da interação solo-planta-atmosfera, vários componentes do sistema que interagem de forma inseparável na modulação de uma determinada resposta da planta. Com isso, pretende-se agregar novas informações aos estudos que procuram explicar o efeito da compactação do solo sobre as culturas.

1.1 Hipóteses

Valores indicadores de restrição de resistência à penetração, potencial hídrico foliar relativo e evapotranspiração real relativa ocorrem em momentos e ordem diferente entre os níveis de compactação.

A relação entre as determinações da cultura e o tempo para ela ser submetida a condições restritivas é melhor quando o tempo é indicado pelo potencial hídrico foliar relativo ou evapotranspiração real relativa do que pela resistência à penetração radicular.

1.2 Objetivo geral

Monitorar a variação da umidade do solo e o tempo para a manifestação de condições físico-hídricas indicadoras de restrição ao crescimento de plantas de feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.), em diferentes níveis de compactação, e verificar suas relações com o crescimento e rendimento de grãos.

1.2.1 Objetivos específicos

a) quantificar o período de tempo transcorrido para a umidade no solo diminuir, a partir de uma condição de umidade após chuva ou irrigação, até a condição de umidade na qual a resistência à penetração atinge um valor crítico;

b) quantificar o período de tempo transcorrido para a umidade no solo diminuir, a partir de uma condição de umidade após chuva ou irrigação, até a condição de umidade na qual as plantas expressem redução do potencial hídrico foliar relativo e da evapotranspiração real relativa;

c) relacionar o índice de área foliar, altura de plantas e rendimento de grãos com o período de tempo transcorrido para a resistência à penetração radicular, o potencial hídrico foliar relativo e a evapotranspiração real relativa atingirem valores indicadores de estresse.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Compactação do solo e a produção das culturas

Em áreas sob ação antrópica, a compactação do solo pode ser definida como a diminuição do volume de solo ocasionado por compressão, que implica em redução da porosidade, pelo rearranjo das partículas (CURI et al., 1993), causando alteração nas relações entre aeração, nutrientes, calor e água com a massa do solo (BOWEN, 1981). Estes aspectos têm sido extensivamente abordados, principalmente para solos revolvidos, enquanto que em solos não revolvidos, sobretudo no Brasil, o assunto ainda carece de muitas pesquisas (REICHERT et al., 2007).

A expansão do sistema de plantio direto no Brasil retardou o avanço da degradação das áreas agrícolas, provocada principalmente pela erosão, que causou históricas perdas de solos, com consequentes custos ambientais e econômicos, cuja dimensão pode ser apenas estimada, a exemplo do trabalho de Bertol et al. (2007). No entanto, o uso intenso e continuado de máquinas associado a condições inadequadas de umidade, tem provocando a compactação do solo (RADFORD et al., 2001; COLLARES, 2005), que pode ser cumulativa, visto que o solo não é mais mobilizado nos cultivos sucessivos (STRECK, 2003). Devido a isso, a compactação tem sido considerada uma das principais causas de degradação dos solos agrícolas em sistemas sem mobilização, e sua avaliação tem sido feita por meio de diversos indicadores de qualidade estrutural e de capacidade de suporte de carga (IMHOFF, 2002). Segundo SILVA (2003), a compactação dos solos agrícolas tem aumentado nos últimos anos e vem se tornando um fator limitante ao aumento da produtividade e da sustentabilidade do sistema plantio direto.

Vários são os exemplos de trabalhos que relataram perdas na produção atribuídas à compactação. Em feijoeiro, Streck (2003) relata reduções de rendimento de até 62 %, no maior estado de compactação. Collares (2005) verificou que o maior nível de compactação provocou 54 % de redução no rendimento. Muitos outros trabalhos têm relatado diminuição da produção de diversas culturas (SECCO et al., 2005; LIMA et al., 2006; FREDDI et al., 2007; FREDDI et al., 2008; BEUTLER et al., 2007), devido à compactação do solo.

Por outro lado, as tentativas de diminuir o estado de compactação, por escarificação ou aração nem sempre se mostraram vantajosas, comparadas ao atual estado de compactação do PD. Silva (2003) não verificou diferença significativa no rendimento de grãos de feijoeiro e de soja, porém observou diferença significativa para rendimento de milho. Stone; Silveira (1999) verificaram maior produtividade de feijão no plantio direto. Vários cultivares de soja produziram de forma semelhante no escarificado e PD (SECCO et al., 2004). Durante 12 anos, Marcolan; Anghinoni (2006) também não verificaram diferença significativa na produção de milho. Santos et al. (2006) obtiveram os maiores rendimentos de grãos de soja no plantio direto, tanto contínuo como sob cultivo mínimo no inverno, nos quatro anos de pesquisa.

Os resultados da pesquisa têm mostrado que o efeito da compactação do solo sobre as culturas não pode ser explicado, suficientemente, apenas com informações do solo obtidas num dado momento do ciclo de vida das plantas. As propriedades físicas do solo variam no espaço e no tempo (REICHARDT; TIMM, 2004; LIBARDI, 1998; HILLEL, 1998; REICHERT et al., 2007) e a resposta fisiológica para um mesmo grau de um tipo de estresse físico é diferente entre as espécies de plantas (TAIZ; ZEIGER, 2004; LARCHER, 2006), ou até mesmo entre cultivares de uma mesma espécie, conforme verificado por Beutler et al. (2006), estudando o efeito da compactação na produtividade de cultivares de soja.

Em relação a espécies diferentes, Streck (2003), estudando o efeito da compactação sobre o rendimento das culturas da soja e feijoeiro, ambas submetidas aos mesmos níveis de compactação, verificou que maior nível de compactação reduziu em 38 % o rendimento da soja, enquanto que o feijoeiro sofreu redução de 60 %.

Numa mesma espécie, o efeito da compactação pode afetar outras partes da planta sem aparentemente comprometer o sistema radicular. Avaliando o efeito da compactação na anatomia da raiz e no desenvolvimento de cultivares de soja (IAC - 8 e IAC-14), em vaso, QUEIROZ-VOLTAN et al. (2000) verificaram que a compactação do solo não afetou a estrutura anatômica da raiz, no entanto ambas as cultivares tiveram redução no número de folhas, altura de plantas, massa de matéria seca de raízes e caule.

A relação entre a resposta de plantas e o intervalo hídrico ótimo (IHO) também tem sido variada. Comparando o rendimento de grãos do feijoeiro com o IHO, SILVA (2003) verificou que, nos sistemas de manejo do solo plantio direto e

preparo convencional, embora a umidade do solo tenha permanecido fora do IHO uma semana a mais que no sistema cultivo mínimo, o rendimento de grão não diferiu estatisticamente. Resultados semelhantes foram obtidos por Collares (2004), que verificou que os sistemas de manejo do solo revolvido e compactado, mesmo com a umidade do solo permanecendo, respectivamente 22 e 23 dias fora do IHO, não diferiram estatisticamente do tratamento plantio direto, no qual a umidade do solo permaneceu durante praticamente todo o ciclo dentro do IHO. Em seu trabalho, Klein; Câmara (2007) sugerem, inclusive, que a resistência à penetração de 2 MPa não deva ser assumida como limite crítico para o desenvolvimento de plantas de soja, baseados na ausência de relação entre resposta no rendimento e permanência da umidade do solo dentro ou fora do IHO.

Possivelmente, o simples enquadramento da umidade do solo em “dentro ou fora” do IHO pode não ser um bom critério para ser relacionado com a resposta das culturas, pois não informa o quão próxima ou afastada a umidade está dos limites críticos e nem a intensidade com que os fatores atuam sobre a cultura. Além disso, a água entre a CC e o PMP, considerada como disponível, ou a água no solo no IHO, considerada numa condição ótima, não informa sobre o sincronismo entre fornecimento e necessidade das plantas, nem quanta dessa água pode ser extraída, dada a complexidade do conceito de água extraível, conforme abordado em revisão por Carlesso (1995).

Além de diminuir a disponibilidade ou a capacidade de extração de água pela planta, o secamento do solo altera as variáveis físicas, de maneira integrada, em sentido e intensidade distintos (FORSYTHE, 1967; LETEY, 1985) e os efeitos dessas alterações são percebidos pela planta, por meio do sistema radicular (REICHERT et al., 2007). Na deficiência de água, o comportamento das plantas varia conforme a espécie e o estágio de desenvolvimento, sendo que o suprimento de água às plantas é determinado pela habilidade da cultura em utilizar a água armazenada no solo e pela ação combinada dos fatores meteorológicos que interagem com o dossel vegetativo das plantas (CARLESSO, 1995). OLIVEIRA et al. (1999), avaliando o efeito de tensões de água no solo sobre o rendimento do algodoeiro herbáceo, verificaram efeito sobre a altura de planta, o índice de área foliar e a produção de algodão em rama. O decréscimo do nível de água no solo até o tratamento 200 kPa não causou efeito sobre o crescimento da cultura, porém, a

partir do tratamento 300 kPa, a altura da planta foi afetada significativamente pelo aumento das tensões de água no solo.

Um fator que pode confundir a constatação do efeito da compactação sobre as perdas de rendimento é a interação entre precipitação (ou irrigação) e rendimento (HAKANSSON et al., 1998). Aliado a isso, a posição da compactação deve ser considerada. Uma zona compactada próxima da superfície é altamente prejudicial para o crescimento e rendimento das plantas, especialmente quando a precipitação não ocorre regularmente, pois as plantas rapidamente esgotam a água disponível acima da zona de restrição e entram em estresse, que pode ser severo, se uma nova precipitação demorar a ocorrer (UNGER; KASPAR, 1994).

No Rio Grande do Sul é comum a ocorrência de estiagens em praticamente todos os anos. Dependendo da intensidade e da abrangência, os prejuízos se estendem além dos limites do setor agrícola, afetando toda a economia do Estado. Porém, a lavoura é sempre a atividade mais prejudicada. Segundo Berlato; Fontana (2001), entre os anos de 1987 a 2000, o prejuízo acumulado em função de seis estiagens que ocorreram foi de 19,1 milhões de toneladas de soja e milho, sendo que esse montante representa bem mais que a produção total de todos os grãos obtida num ano normal no Estado do Rio Grande do Sul. Só nos anos de 1992 a 1997, as estiagens foram responsáveis por cerca de 93% das perdas de safra da soja e 88% das perdas de safra do milho.

Estes efeitos podem ser amenizados por meio de um manejo de solo que melhore o armazenamento de água. De acordo com Hillel (1998), o armazenamento é função do tamanho e volume de poros. Quanto menor o tamanho dos poros mais intenso será o fenômeno de capilaridade e, portanto, maior será a retenção de água no solo (LIBARDI, 1995).

Várias propriedades físicas têm sido relacionadas com a resposta de culturas na tentativa de definir limites físicos críticos. Considerando a produtividade das culturas como referência, Reinert et al. (2001) estabeleceram valores restritivos de densidade do solo em função do teor de argila. Estes níveis vêm sendo refinados com a associação de informações de trabalhos de vários outros pesquisadores que estudaram a qualidade física do solo por meio do IHO (REICHERT et al., 2003) que associa informações de porosidade de aeração e resistência á penetração críticas (SILVA et al., 1994).

Porém, WHITE (sd) cita muitos trabalhos que indicam que modelos físicos simples de interações solo-água-planta não explicam o comportamento observado nas plantas, enfatizando a importância de interações solo-raiz, estado da água no solo, resistência mecânica ao crescimento radicular e aeração. No entanto, a relação entre compactação do solo, densidade, resistência mecânica, conteúdo de água, aeração, crescimento de raízes e rendimento é bastante complexa (UNGER; KASPAR, 1994) e a determinação de níveis ótimos dessas variáveis torna-se difícil dada suas complexas interações e variação no tempo (MARTINO; SHAYKEWICH, 1993). Nesse contexto, a tentativa de explicar as relações de causa e efeito (compactação x plantas) deve ser feita preferivelmente por fatores que diretamente afetam o crescimento das plantas, como concentração de O_2 , estado energético da água, temperatura e impedância mecânica ao crescimento radicular (LETEY, 1985).

O IHO, por integrar resistência do solo à penetração, aeração e disponibilidade de água numa única variável, em função da densidade do solo, significou um grande avanço na compreensão da interação dos fatores diretamente relacionados ao crescimento das plantas e de como o manejo afeta as propriedades do solo (SILVA et al., 1994). No Brasil, os resultados de vários trabalhos relacionando manejo ou estado de compactação com comportamento de plantas, por meio do IHO (TORMENA et al., 1998; SILVA, 2003; COLLARES, 2005; BEUTLER et al., 2006; KLEIN; CÂMARA, 2007) têm demonstrado que alguns aspectos precisam ser considerados no uso desse indicador, sobretudo o valor dos limites críticos (REICHERT et al., 2008) e o monitoramento temporal das variáveis que definem esses limites.

2.2 Resistência do solo à penetração indicadora de restrição radicular

A resistência do solo à penetração (RP) tem sido largamente utilizada como indicadora da compactação do solo, por estar relacionada a importantes atributos do solo e das plantas (REINERT et al., 2007) e por ser uma medida fácil e rápida determinação (TORMENA; ROLOFF, 1996).

Muitos autores relatam que a RP é a medida que mais bem evidencia as diferenças entre ambientes de solo (DE MARIA, 1999; STRECK, 2003; SILVA, 2003; SUZUKI, 2005), sendo comum verificar na literatura relações da RP com densidade

(ROSOLEM et al., 1999; FIDALSKI; TORMENA, 2007), macroporosidade (SECCO et al., 2007), umidade (CUNHA et al., 2002; BUSSCHER et al., 1997), condutividade hidráulica (ROSOLEM et al., 1999; STONE et al., 2002).

O crescimento radicular é negativamente relacionado com a RP (TAYLOR et al., 1966; TAYLOR; RATLIFF, 1969; FOLONI et al., 2003; COLLARES et al., 2006). Resultados experimentais têm evidenciado que a RP é uma das propriedades físicas que freqüentemente restringe o crescimento das raízes e da parte aérea das plantas em solo sob PD (TORMENA et al., 1999; COLLARES, 2005; BEUTLER et al., 2006), dada sua estreita relação com a condição estrutural do solo.

O valor de RP igual a 2 MPa tem sido freqüentemente utilizado como crítico (TAYLOR et al., 1966) para o crescimento das plantas (RICHART et al., 2005; REICHERT et al., 2007), em especial para definir um limite inferior de água no solo na quantificação do intervalo hídrico ótimo (SILVA et al., 1994; TORMENA et al., 1998; COLLARES, 2005).

Entretanto, há vários exemplos na literatura mostrando que as plantas tiveram seu desenvolvimento limitado abaixo do valor de 2 MPa (ROSOLEM et al., 1999; FOLONI et al., 2003), a taxas decrescentes desde 0 a 9 MPa (SILVA et al., 2004) e desenvolvimento normal acima de 2 MPa (MIELNICZUK et al., 1985; BEUTLER et al., 2006; KLEIN; CÂMARA, 2007). Em vista disso, Reichert et al. (2008) sugerem que os valores críticos devem ser ajustados, levando em consideração a condição física do solo e a cultura em estudo.

Alguns trabalhos, porém, consideraram outros valores de RP como limitantes. Leão et al. (2004) consideraram limitante a RP igual a 2,5 MPa em solos sob pastagem. Silva (2003) utilizou os valores de 1, 2 e 3 MPa, em solo sob PD com diferentes estados de compactação. Lapen et al. (2004) consideraram 2,5 MPa como limitante, durante cinco anos de estudos em um Gleissolo do Canadá. Tormena et al. (2007) consideraram 3,5 MPa como limitante em solo cultivado sob plantio direto por longo prazo e com expressiva bioporosidade.

Na verdade todos esses valores não representam a real resistência exercida pelas raízes ao penetrar o solo. São valores que melhor procuram relacionar uma mediada feita por uma haste metálica ao penetrar o solo com a resposta do sistema radicular (VAZ et al., 2001). Martino; Shaykewich (1994) destacam trabalhos que têm demonstrado que a máxima pressão que as raízes podem exercer é de 0,7 a 1,3 MPa na direção axial e 0,4 a 0,6 MPa na direção radial.

Outro aspecto a ser considerado é que nem todas as partes do sistema radicular estão expostas ao mesmo grau de compactação sob condições de campo, e a capacidade compensatória do sistema radicular que não está sob impedimento pode resultar somente numa alteração da distribuição das raízes e não no comprimento total (UNGER; KASPAR, 1994). Em virtude disso, os autores salientam que o efeito da compactação sobre o crescimento das plantas pode ser importante somente quando a alteração na distribuição das raízes limita o suprimento de água ou nutrientes.

A variabilidade da RP também tem sido tema de vários estudos, tanto na dimensão espacial (UTSET; CID, 2001; SILVA, 2003; SOUZA, et al., 2006), como temporal (GENRO JUNIOR et al., 2004; BUSSCHER et al., 2001; LAPEN et al., 2004, SILVA et al., 2004). Utset; Cid (2001) verificaram que a RP variou conforme a condição de umidade do solo, densidade e várias características locais como a microtopografia. O coeficiente de variação da RP foi menor para solo seco (25 %, antes da irrigação) e completamente úmido (7 %, 24 horas após irrigação) e aumentou consideravelmente (80%) 2 horas após a irrigação, quando o solo não estava úmido de forma homogênea. Essa variabilidade pode ser mais bem estudada com a utilização de equipamentos que combinam medidas simultâneas de RP e umidade (VAZ et al., 2001; LAPEN et al., 2004).

Em condições de solo com estrutura estável, nas quais a densidade do solo varia muito pouco durante o ciclo da cultura, toda a variação temporal da RP é devido às diferenças na umidade do solo (MARTINO; SHAYKEWICH, 1993). Os autores relatam ainda que quando a RP varia amplamente tanto no espaço quanto no tempo, é difícil acessar como a as plantas no campo integram tais variações em suas respostas.

Propondo estudos preditivos, Bowen (1981) sugere que seria possível simular uma região de RP que as plantas enfrentariam ao crescer em solos compactados, como a resistência mudaria à medida que o solo ganhasse ou perdesse água ou como as raízes cresceriam dentro de um volume de solo com diferentes teores de água e densidade do solo.

A escala temporal foi explorada por Lapen et al. (2004), que estudaram o comportamento da RP entre os anos de 1996 até 2001 em um Gleissolo do Canadá, e verificaram relação linear estável entre PR e umidade em solo sem revolvimento, enquanto que em solo revolvido a relação se alterou ao longo dos anos, devido à

reconsolidação do solo. Em outro trabalho, usando as equações de RP em função da umidade, Lapen et al. (2004), estimaram o tempo que a RP e a porosidade de aeração permaneceram fora dos limites do IHO ($RP = 2,5 \text{ MPa}$ e concentração de oxigênio $= 0,02 \text{ kg O}_2 \text{ m}^{-3}$), ao longo do ciclo do milho, e correlacionaram essas medidas com o estabelecimento de plantas e rendimento de milho, por meio de métodos multivariados. Os autores verificaram que o estabelecimento de plantas e o rendimento foram mais bem explicados pelos dias acumulados em que a aeração esteve deficiente do que pelo acúmulo de dias da RP acima do limite crítico, o que, segundo os autores, pode ser explicado pela prevalência de boas condições de umidade, característico do tipo de solo.

2.3 Cultura do feijoeiro e o estresse hídrico-mecânico

O feijão é um dos alimentos mais consumidos no Brasil, cuja estimativa de consumo tem se situado em torno de $16 \text{ kg habitante}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ (Embrapa, 2008), o que desperta grande interesse no estudo da cultura. A cultura do feijoeiro é bastante influenciada pelo excesso ou pela falta de água, sendo o período de floração e formação de vagens o momento de maior consumo (NÓBREGA et al., 2001).

A suscetibilidade da cultura ao déficit hídrico se deve à baixa capacidade de recuperação das plantas depois de restabelecida a umidade do solo, principalmente porque o sistema radicular é pouco profundo (GUIMARÃES, 1998). Embora haja relatos na literatura que as raízes de feijão podem alcançar profundidades de 0,60 m ou mais (OLIVEIRA; SILVA, 1990), Pellegrini et al. (2003), Streck (2003) e Collares (2005) verificaram que o crescimento do sistema radicular da cultura do feijoeiro, em Argissolo, ficou concentrado a uma camada de 0,30 m, com poucas raízes ultrapassando esse limite, mesmo nos menores estados de compactação.

Os diferentes sistemas de manejo provocam alterações na quantidade de água disponível para as culturas e modificam propriedades físicas diretamente relacionadas com o crescimento como porosidade, retenção de água e RP de raízes (FORSYTHE, 1967; LETEY, 1985).

A redução da absorção de água e a conseqüente desidratação das células comprometem os processos fisiológicos afetando, assim, todos os componentes de crescimento (LARCHER, 2006). A perda acentuada de água reduz a multiplicação e

o alongamento das células, resultando em plantas menores e, em consequência, na redução da área foliar, resposta considerada com a primeira reação das plantas ao déficit hídrico (TAIZ; ZEIGER, 2004).

A evolução do crescimento foi caracterizada por Nóbrega et al. (2001) em várias fases: lenta, na fase inicial (até 37 DAS), com baixas taxas de absorção de água e nutrientes; rápida na fase a de floração (37-45 DAS), porque estão formados o caule principal, os ramos e as folhas trifoliadas, bem como as tríades de gemas na axila de cada folha; intenso na fase de frutificação (45-59 DAS), e de paralisação da produção de matéria orgânica (a partir dos 59 DAS), cujo processo dominante é a translocação. Os autores verificaram que a competição por água imposta pelas diferentes lâminas de irrigação provocou diferenças na produção de fitomassa, nas taxas da área foliar, índice de área foliar, assimilação líquida e na razão da área foliar.

À medida que a área foliar cresce, o IAF também aumenta, até atingir um valor a partir do qual o auto-sombreamento passa a ser prejudicial, pois aumenta a proporção de superfície foliar que é mantida sob iluminação precária, o que diminui bastante a sua eficiência fotossintética (REIS; MULLER, 1979). A ocorrência de IAF baixo, porém, limita a expressão do rendimento, visto que o mesmo representa o sistema acumulador da comunidade vegetal e pode ser considerado um importante fator da produtividade (MAGALHÃES, 1979).

Nas tensões de água no solo de 0,0125, 0,025 e 0,075 MPa, o índice de área foliar do feijoeiro observado foi de 2,48, 1,91 e 1,60, respectivamente (STONE et al., 1988), e de 2,98; 4,05; 5,00 e 3,62, respectivamente, nas lâminas de irrigação de 80, 160, 320 e 140,2 mm, em todo o ciclo da cultura do feijão (NÓBREGA et al., 2001).

A compactação do solo acima de certos limites também afeta negativamente a cultura do feijoeiro. Guimarães et al. (2002) relataram decréscimo acentuado na área foliar do feijoeiro quando a densidade do solo aumentou para valores maiores que $1,2 \text{ g cm}^{-3}$ que coincidiram com valores de RP de 1 MPa, para um Latossolo Vermelho mantido a um potencial da água entre -35 e -10 kPa (STONE et al., 2002). Em relação à altura de plantas, Pellegrini et al. (2003) verificaram maior porte de plantas no plantio direto comparado ao convencional e escarificado. Collares (2005) observou menor crescimento no maior estado de compactação.

Redução no rendimento de grãos por compactação foi relatada por Streck (2003), Collares (2005) e Lima et al. (2006). Esses autores verificaram que a cultura

do feijoeiro se mostrou bastante sensível à compactação, chegando a reduções de rendimento, relativos ao plantio direto, de 40 e 62 %, respectivamente nos tratamentos com duas e quatro passadas de uma máquina de 10 Mg (STRECK, 2003), e 29 e 54 % nos tratamentos compactados com uma máquina de 10 Mg do experimento 1 e 2, respectivamente (COLLARES, 2005).

Diferentes preparos de solo sob irrigação afetaram a produtividade do feijoeiro, sendo que no plantio direto foi verificado a maior produtividade, atribuída aos menores valores e à menor variação ao longo do ciclo, da tensão matricial da água no solo (STONE; SILVEIRA, 1999).

A interpretação da resposta da cultura a partir de um único fator causal pode não elucidar as reais causas, pois compactação do solo e déficit hídrico atuam sobre o crescimento radicular e parte aérea de maneira integrada, principalmente em solos sob condições de campo, por isso seus efeitos nessa situação não podem ser isolados com aceitável grau de acurácia (UNGER; KASPAR, 1994; CAMARGO; ALLEONE, 1997; HAKANSSON et al., 1998; REICHERT et al., 2007).

2.4 Potencial hídrico foliar e evapotranspiração como medidas associadas ao estresse hídrico

Estresse é em geral definido como um fator externo, biótico ou abiótico, que exerce uma influência desvantajosa sobre a planta (TAIZ; ZEIGER, 2004). De acordo com esses autores, a planta responde ao estresse por meio de eventos integrados em todos os níveis de organização, desde o anatômico e morfológico até o celular, bioquímico e molecular. Larcher (2006) define estresse como um desvio significativo das condições ótimas para a vida, que induz a mudanças e respostas em todos os níveis funcionais do organismo, as quais são reversíveis a princípio, mas podem se tornar permanentes. Por estes conceitos, parece ser possível “medir” o estresse pela intensidade da resposta da planta ao estímulo provocado por um fator que não se encontra na sua condição ótima e/ou pela amplitude do desvio do fator estressante.

A condição hídrica da planta num dado momento pode estar caracterizando um estado de estresse, cujo fator estressante é o déficit hídrico que, segundo Taiz; Zeiger (2004) pode ser definido como todo o conteúdo de água de tecido ou célula

que está abaixo do conteúdo de água mais alto exibido no estado de maior hidratação. Essa definição sugere que o déficit hídrico é uma medida de planta que pode ser obtida diretamente pelo conteúdo de água ou indiretamente pelo estado energético da água nos diferentes órgãos da planta (LARNCHER, 2006).

O potencial hídrico foliar (ψ_f) tem sido usado largamente, principalmente para a compreensão dos mecanismos envolvidos e os processos afetados no controle do déficit hídrico pela própria planta. Quando o conteúdo de água no solo decresce, o potencial da água no solo e na folha também decresce e, como consequência, um déficit hídrico se desenvolve nas folhas e as células guardas perdem turgor, o que causa fechamento estomático (KANEMASU; TANNER, 1969). Segundo esses autores, a pressão de turgor das células guardas é afetada não somente pelo ψ_f , mas também pela temperatura, concentração de luz e CO_2 , e sobre condições de campo, luz e ψ_f são os primeiros fatores controladores do fechamento estomático. Analisando a expansão foliar e taxas metabólicas em milho, soja e girassol, Boyer (1970) verificou que, com o decréscimo da umidade do solo e do ψ_f , a expansão foliar foi inibida mais cedo e mais severamente do que fotossíntese e respiração, e o efeito foi mais pronunciado quando o ψ_f diminuiu para -0,4 MPa.

Exposição de três genótipos de milho à seca causou um substancial decréscimo no ψ_f , conteúdo de água relativo e potencial osmótico que corresponderam a reduções no rendimento de grãos (ATTEYA, 2003). Associado ao ψ_f , o conteúdo de água tem sido considerado uma importante característica fisiológica para melhorar a produtividade e ela pode ser usada como uma ferramenta de seleção para a tolerância ao calor e seca em feijoeiro (KUMAR et al., 2006).

Bergonci; Pereira (2002), estudando o comportamento do potencial de água na folha e da condutância estomática do milho em função da fração de água disponível no solo, concluíram que a condutância estomática é menos sensível à queda da fração de água disponível para a planta do que o ψ_f . Segundo Hsiao (1990) apud Pimentel; Perez (2000), a redução do ψ_f , durante o estresse hídrico, quando comparado ao controle irrigado, pode ser correlacionada com queda de produtividade. Guimarães et al. (2006) relatam que pequenas diferenças no ψ_f podem ser verificadas quando as plantas já passaram por estresses hídricos e acionaram mecanismos de tolerância, o que dificilmente acontece quando o déficit

hídrico ocorre de maneira abrupta. Porém, se o ψ_f decrescer muito pode comprometer a recuperação da cultura. Pimentel; Perez (2000) cita o trabalho de Boyer (1976) que considerou o ψ_f de -1,5 MPa como crítico para a recuperação do feijoeiro.

Alguns trabalhos têm explorado o ψ_f para identificar condições de umidade do solo deficiente para as culturas. Bergonci et al. (2000) verificaram que o ψ_f em milho se correlacionou com o potencial matricial de água no solo a 45 cm de profundidade, e mostrou ser um indicador adequado de déficit hídrico. Jordan; Ritchie (1971) verificaram que o ψ_f e a espessura do pecíolo de girassol decresceram com o decréscimo do conteúdo relativo de água na folha, no entanto o potencial matricial médio do solo (-0,4 MP) foi maior que o esperado (-1 MPa) para um ψ_f de -1,0 MPa a -2,6 MPa, justificado pela baixa condutividade hidráulica do solo, o que dificultou a transmissão de água para a planta. Em condições de solo úmido (potencial matricial estimado de -0,05 a 0,2 Mpa), Tarner; Bagg (1973) verificaram que o ψ_f diminuiu do início do dia até um valor mínimo logo após o meio dia e que se formou um gradiente de potencial nas plantas, sendo que as folhas superiores apresentaram os menores potenciais. Como o ψ_f integra também os efeitos dos fatores atmosféricos, altas temperatura e radiação provocam intensa transpiração e podem produzir ou um grande déficit hídrico foliar, com um conseqüente decréscimo do ψ_f (KUMAR et al., 2007).

Cultivares de feijoeiro que apresentaram maior ψ_f também tiveram maiores taxas fotossintética, e esses dois parâmetros se relacionaram positivamente com o rendimento de grãos (KUMAR et al., 2007).

Estômatos de feijoeiro não foram afetados significativamente por ψ_f maiores em torno de -1 MPa, mas a resistência estomática à difusão do vapor de água e CO₂ aumentou rapidamente à medida que o ψ_f diminuiu a partir desses valores, para prevenir uma maior queda no potencial da água nas folhas (KANEMASU; TANNER, 1969).

A duração do déficit hídrico provocou decréscimos progressivo no ψ_f e heterogeneidade no padrão de assimilação de CO₂ em feijoeiro (GUNASEKERA;

BERKOWITZ, 1982). Em estudos de adaptação do feijoeiro à seca, Guimarães et al. (2006) e Kumar et al. (2007) verificaram que o ψ_f foi sensível à irrigação.

Uma análise temporal da evolução do ψ_f para caracterizar o momento de ocorrência do estresse hídrico em várias hortaliças foi apresentada por Thompson et al. (2007). Em casa de vegetação, os autores mantiveram plantas irrigadas e não irrigadas. O início do estresse hídrico foi definido no momento que o ψ_f das plantas não irrigadas se afastou do ψ_f das plantas irrigadas. Essa estratégia pode ser usada como uma alternativa para diferenciar manejos de solo ou estados de compactação em relação ao tempo para a ocorrência do estresse hídrico, à medida que o solo perde umidade.

A evapotranspiração da cultura em condições naturais de disponibilidade hídrica pode ser usada como indicadora de déficit hídrico, desde que relacionada com a evapotranspiração da mesma cultura crescendo no mesmo ambiente, porém com umidade do solo mantida em condições que não limitem a evapotranspiração. Essa técnica normalmente tem sido descrita como consumo relativo de água ou evapotranspiração real relativa (MATZENAUER et al., 2003; MATZENAUER et al., 2004; CORDEIRO et al., 1998; FREITAS et al., 1999). Berlato (1987), citado por Matzenauer et al. (2003), relataram que o consumo relativo de água explicou 89, 86 e 85 % da variação do rendimento de grãos de soja dos grupos de maturação precoce, médio e tardio, respectivamente. O consumo relativo de água tem sido sugerido como a variável mais eficiente para indicar as variações de rendimento de grãos de milho, entre épocas de semeadura, anos e locais do Estado do Rio Grande do Sul (MATZENAUER et al., 2003). O consumo relativo também foi utilizado para estudos de locais e condições de risco por déficit hídrico para a cultura da soja (MATZENAUER et al., 2003) e feijão (MATZENAUER et al., 2004), no Estado do Rio Grande do Sul.

A necessidade de consumo de água é aproximadamente proporcional à quantidade de fitomassa, no entanto a intensidade de transpiração de uma folha diminui com o aumento da densidade da cobertura vegetal, sobretudo devido à atenuação da radiação e do vento e ao aumento da umidade do ar nas partes inferiores do dossel (LARCHER, 2006). Em feijoeiro, Nóbrega et al. (2001) relataram que a evapotranspiração pode ser reduzida quando o IAF atinge um valor a partir do

qual ocorre o auto-sombreamento, resultando em iluminação precária e decréscimo na eficiência fotossintética das folhas.

O efeito da cobertura do solo também pode afetar as quantidades de água evapotranspiradas. Avaliando o efeito das palhadas de oito diferentes culturas de cobertura na evapotranspiração do feijoeiro irrigado cultivar pérola, Stone et al. (2006) observaram que a evapotranspiração variou de 259,8 a 343,7 mm, e a maior produção de palhada propiciou as menores perdas de água por evapotranspiração.

A evapotranspiração associada com constantes hídricas do solo tem sido relatada como uma informação de grande utilidade em estudos de déficit hídrico. De acordo com Santos; Carlesso (1998), a medida da fração de água evapotranspirada tem sido utilizada para determinar uma imparcial e consistente resposta das plantas ao déficit hídrico ao longo do período de secamento do solo.

Medidas de evapotranspiração são associadas em estudo de compactação do solo. Coelho et al. (2000) relataram que a compactação provocou redução na evapotranspiração (12% em 1996 e 7% em 1997) no comprimento radicular (40% em 1996 e 33% em 1997), no índice de área foliar (26% em 1996 e 12% em 1997) e produção de sementes de algodão (28% em 1996 e 10% em 1997).

A evapotranspiração é importante para estudos da resposta das plantas ao suprimento de água no solo, que pode ser obtida por meio do fator de sensibilidade da cultura, o qual relaciona a redução do rendimento relativo ao déficit de evapotranspiração relativa. Cordeiro et al. (1998) usaram essa estratégia para estudar o efeito do déficit hídrico na cultura do feijão caupi e verificaram que o estágio de enchimento de grãos foi o mais sensível. Com essa mesma estratégia, Freitas et al. (1999) verificaram que a sensibilidade ao déficit hídrico em melancia foi decrescente no sentido dos estádios de floração, desenvolvimento dos frutos e vegetativo.

A evapotranspiração tem importante aplicação no cálculo da eficiência no uso da água, freqüentemente utilizada para comparar sistemas de manejo (SHARRATT, 1998). Estimativas da evapotranspiração acumulada podem ser usadas também para definir o momento e quantidade de água a ser aplicada por irrigação, como tem sido verificado em trabalhos com feijoeiro (JADOSKI et al., 2000; CARLESSO et al., 2007) e milho (PETRY et al., 2007).

Numa situação que se deseja avaliar o balanço hídrico de uma cultura, a evapotranspiração é um dos componentes de saída da água de um volume de solo,

durante um certo período de tempo (LIBARDI, 1985). Sabendo que o tipo de manejo ou o estado de compactação do solo interferem na energia de retenção de água, que por sua vez regula em parte o processo evapotranspiratório, a evapotranspiração pode ser explorada como uma medida para diferenciar sistemas de manejo ou estados de compactação.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Local, solo e clima

Para a execução deste trabalho, foi implantado um experimento na área experimental do Departamento de Solos, da Universidade Federal de Santa Maria. O solo do local é classificado como Argissolo Vermelho Distrófico arênico (EMBRAPA, 2006), de textura superficial franco arenosa, com 150 g kg^{-1} de argila, 238 g kg^{-1} de silte e 612 g kg^{-1} de areia, na camada de 0 a 0,30 m, com pouca variação em profundidade (dados não publicados de um perfil ao lado do experimento).

O clima da região é caracterizado como Cfa (subtropical úmido sem estiagens) de acordo com a classificação de Köppen, sendo a temperatura média do mês mais quente superior a 22°C e a do mês mais frio entre -3°C e 18°C (MORENO, 1961). A Figura 1 ilustra o comportamento da umidade relativa do ar e da temperatura no período desde a semeadura até o enchimento das vagens da cultura do feijoeiro. Os dados foram obtidos da estação meteorológica automática de Santa Maria, RS, interligada com o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), situada a 1 km do experimento.

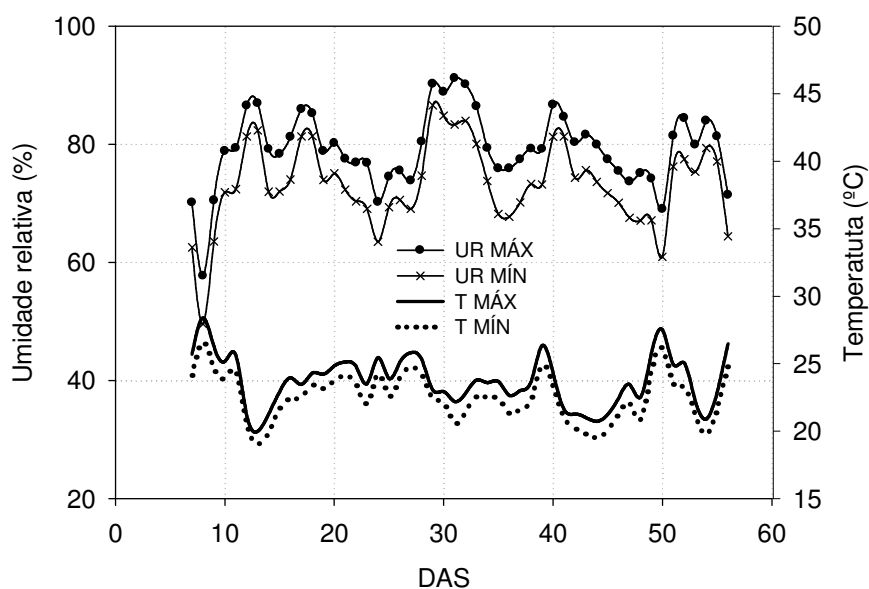


Figura 1– Comportamento diário da umidade e temperatura do ar, no período da semeadura ao enchimento de vagens da cultura do feijoeiro. UR MÁX é a umidade relativa máxima, UR MÍN é a umidade relativa mínima, T MÁX é a temperatura máxima, T MÍN é a Temperatura mínima. Fonte: INMET, Estação Automática de SANTA MARIA (RS), Santa Maria, 2008.

3.2 Tratamentos e delineamento experimental

O delineamento experimental foi em blocos ao acaso com parcelas subdivididas. Os tratamentos constaram da combinação dos níveis dos fatores:

Fator A: irrigação, com dois níveis: (1) irrigado por aspersão (IR) e (2) não irrigado (NI);

Fator B: compactação, com três níveis, definidos em relação à condição atual da área, cultivada sob plantio direto consolidado: (1) plantio direto (PD); (2) plantio direto com compactação adicional (PDC) e; (3) plantio direto escarificado (ESC).

Os tratamentos, em número de seis (2x3) foram repetidos em quatro blocos, totalizando 24 unidades experimentais. Nas parcelas principais (9 x 5 m) foram aleatorizados os níveis de irrigação e nas subparcelas (5 x 3 m) os níveis de compactação.

O croqui da área experimental, mostrando a disposição dos blocos, dimensão das parcelas e subparcelas e distribuição dos tratamentos pode ser visto na Figura 2.

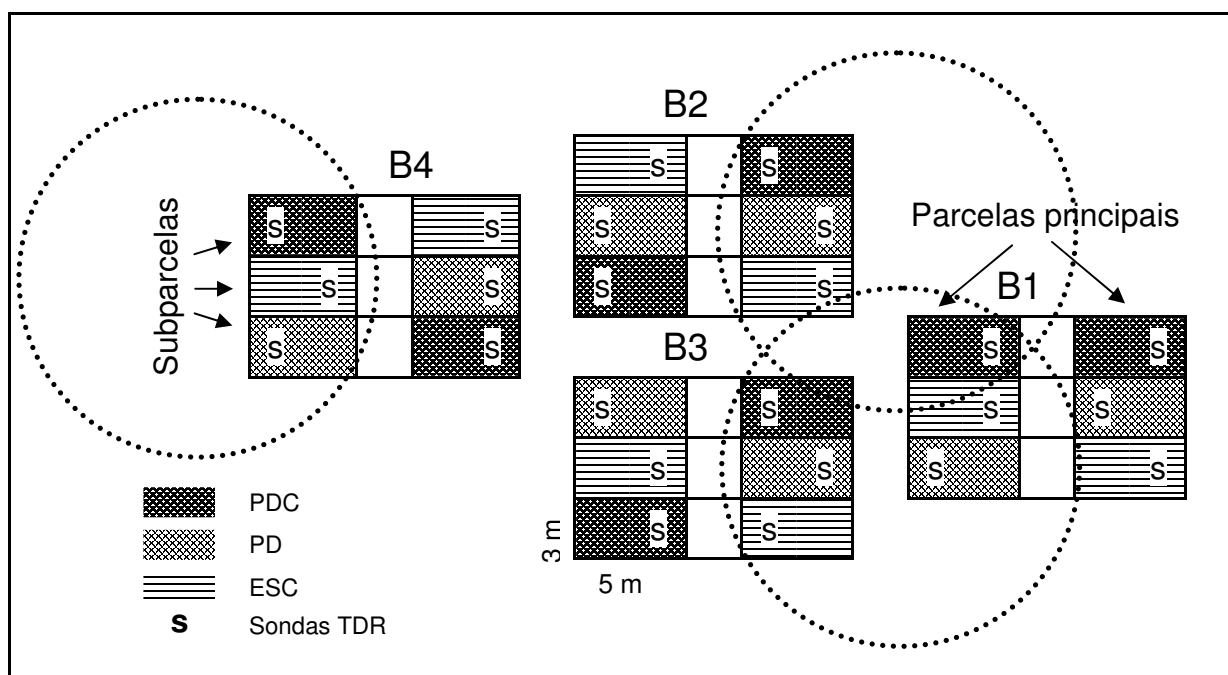


Figura 2 – Croqui experimental. ESC = escarificado, PD = plantio direto, PDC = plantio direto com compactação adicional. B1, B2, B3 e B4 = Bloco 1, 2, 3 e 4, respectivamente. s= local de instalação das sondas de TDR. Os círculos representam as áreas irrigadas.

O significado do termo níveis deve ser entendido como as diferentes alternativas dos fatores em estudo e o seu emprego foi feito para seguir a terminologia usual da experimentação agrícola. Ressalta-se, ainda, que embora possa ser feita alguma relação quantitativa entre os níveis de ambos os fatores, não seria possível definir adequadamente valores numa ordem que permitisse a análise de regressão, seguindo a rigor os pressupostos estatísticos. Além disso, não é objetivo do presente trabalho aplicar a análise de regressão considerando os níveis dos fatores como variáveis independentes ou explicativas. Por essas razões, ambos os fatores foram considerados qualitativos e seus efeitos foram analisados sobre a estimativa da variância e da média dos tratamentos. O detalhamento dos testes estatísticos utilizados é apresentado no final desse capítulo (item 3.5).

3.2.1 Níveis de irrigação

A irrigação foi aplicada por meio de um sistema de irrigação por aspersão, composto de um conjunto moto-bomba (motor a combustão), tubulações de PVC e aspersores. O raio de alcance dos aspersores cobria adequadamente a área das parcelas, conforme ilustrado no croqui experimental (Figura 2). A taxa média de aplicação dos aspersores (mm h^{-1}) foi medida coletando-se água em recipientes de $63,6 \text{ cm}^2$ de área, em dois pontos de cada aspersor (um terço e dois terços do raio do aspersor), durante 30 minutos, em condição de regime de trabalho. A taxa média de aplicação foi de $7,3 \text{ mm h}^{-1}$, valor utilizado para definir o tempo de rega.

A irrigação foi aplicada sempre que a umidade média do solo diminuía para valores projetados para o fim do dia iguais ou menores que 75 % da capacidade de campo. A projeção era feita computando-se, no início de cada dia, a perda de umidade do solo do dia anterior e projetando-se essa mesma perda para o dia atual. A lâmina média de irrigação a ser aplicada foi calculada para que a umidade do solo atingisse a capacidade de campo, a qual foi definida a partir de curvas de retenção de água no solo (Figura 3) e de valores de umidade do solo 24 h após precipitações que ocorreram logo pós a implantação do experimento (Figura 4).

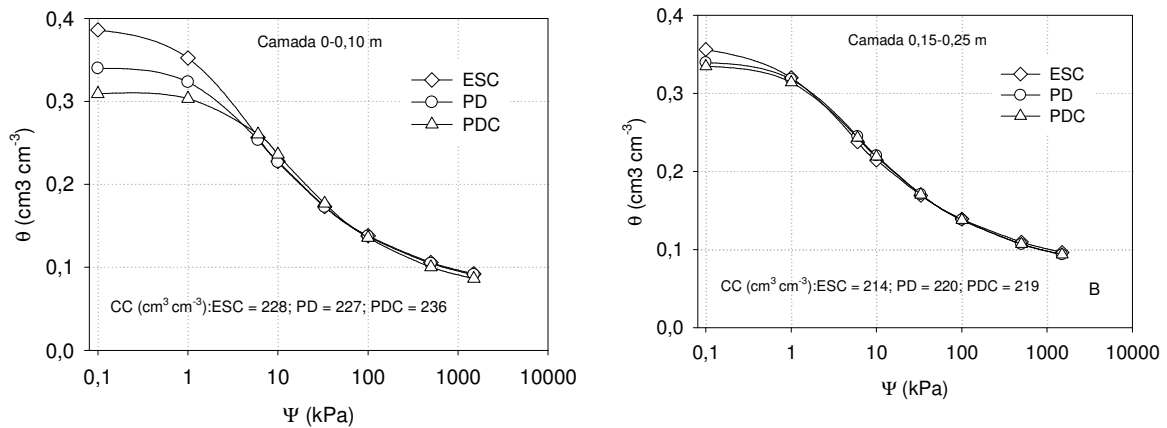


Figura 3 – Curva de retenção de água no solo nas camadas de 0-0,10 e 0,15-0,25 m. θ é o conteúdo volumétrico de água, ψ é a tensão de água no solo e CC é a capacidade de campo.

As curvas de retenção de água no solo foram determinadas associando pares de tensão e umidade obtidos na mesa de tensão (1 e 6 kPa) de amostras com estrutura preservada e pares de tensão e umidade obtidos por meio de um potenciômetro de ponto de orvalho (*dewpoint potentiometer*) – WP4 (10, 30, 100, 500 e 1500 kPa), de amostras com estrutura deformada. As amostras foram coletadas logo após a implantação do experimento (detalhes da coleta serão tratados no item 3.4.2). As curvas foram ajustadas aos pares de tensão e umidade pelo *software Soil Water Retention Curve - SWRC* (DOURADO NETO, 2001), usando o modelo de van Genuchten (VAN GENUCHTEN, 1980), conforme a equação:

$$\theta = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{[1 + (\alpha \psi_m)^n]^m}$$

em que:

θ = umidade volumétrica ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$);

θ_r = umidade volumétrica na tensão de 1.500 kPa ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$);

θ_s = umidade volumétrica do solo saturado ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$);

ψ_m = módulo do potencial mátrico da água no solo (kPa);

α , m , n = coeficientes de ajuste da equação.

Para os pontos de 1 e 6 kPa foram usadas as médias de umidade do respectivo tratamento e camada de solo amostrada (item 3.3.1). Para as demais tensões, em todas as curvas foram usadas as médias de umidade estimadas a partir de três curvas obtidas no WP4. Na Figura 3, foram omitidas as curvas da terceira camada (0,30-0,45 m), na qual a umidade do solo não diminuiu a ponto de necessitar reposição por irrigação.

Pela curva de retenção, a umidade na capacidade de campo foi definida na tensão de 10 kPa, conforme sugerem a maioria dos autores, quando se trata de solos francos a arenosos (REICHERT et al., 2007).

Os valores de umidade do solo 24 horas após as precipitações ocorridas aos 13 DAS (Figura 4) foram de 0,227, 0,240 e 0,240 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$, respectivamente para o ESC, PD e PDC, na camada de 0-0,10 m e de 0,230, 0,235 e 0,228 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$, respectivamente para o ESC, PD e PDC, na camada de 0,15-0,25 m. Pode-se verificar que esses valores foram semelhantes aos obtidos a partir das curvas de retenção de água no solo (Figura 3). Por isso, foi considerado, em cada camada de solo, um valor médio de capacidade de campo para cada nível de compactação. Assim, foram usados os valores de 0,227, 0,233 e 0,238 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$, respectivamente para o ESC, PD e PDC, na camada de 0-0,10 m e de 0,222, 0,228 e 0,224 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$, respectivamente para o ESC, PD E PDC, na camada de 0,15-0,25 m.

Foram efetuadas 12 irrigações durante o ciclo da cultura. Duas delas nos estádios de germinação e estabelecimento inicial da cultura, devido à ausência de precipitação nesse período. As demais irrigações foram realizadas também em períodos de ausência de precipitação, conforme ilustra a Figura 4, até os 56 dias após a semeadura (DAS), momento em que a cultura se encontrava no estágio de enchimento de vagens (APÊNDICE A). Embora o ciclo da cultura se completou aos 103 DAS, por ocasião da colheita, a precipitação está representada até 56 DAS, porque, após este momento, as precipitações normalizaram. Além disso, após a plena frutificação o déficit hídrico tem pouca influência sobre a produção (GUIMARÃES, 1988).

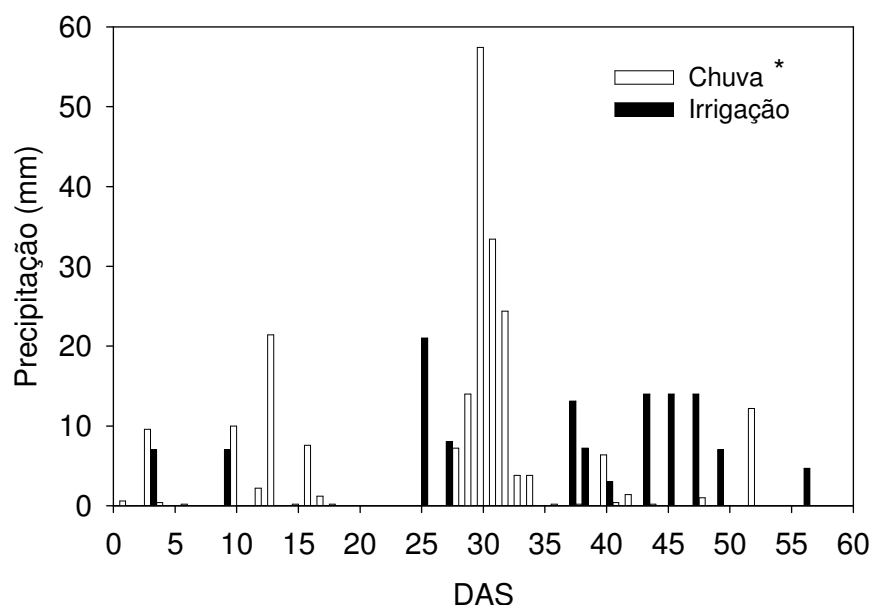


Figura 4 – Precipitações (504 mm de chuva e 128 mm irrigações ao total) durante o período da semeadura ao enchimento dos legumes. * Fonte: INMET, Estação Automática de SANTA MARIA (RS), Santa Maria, 2008.

O objetivo principal da irrigação foi manter uma condição de umidade no solo que não limitasse a evapotranspiração da cultura, regida pelas condições ambientais do período. Dessa forma, os níveis de compactação com irrigação constituíram-se de condição referência para o cálculo do potencial hídrico foliar relativo e da evapotranspiração real relativa (itens 3.4.4 e 3.4.5). Além disso, a inclusão da irrigação possibilitou verificar o comportamento de variáveis da cultura, quando irrigada e não irrigada, sob os três níveis de compactação e, ainda, verificar a relação de variáveis de planta com variáveis de solo, nessas condições distintas de umidade e compactação (item 3.5).

3.2.2 Níveis de compactação

Constituíram os três níveis de compactação as seguintes condições de solo:

1. Plantio direto (PD): nível de compactação definido pela condição atual da área, cultivada sob sistema consolidado de semeadura direta. No inverno de 2007, a área estava sob pousio, sendo o azevém a vegetação predominante, a qual proporcionou uma razoável cobertura de solo (observação visual) após sua senescência natural.

2. Plantio direto compactado (PD): nível de compactação definido por meio de tráfego sucessivo de um trator, modelo MF275, com uma grade aradora acoplada para aumentar a carga sobre o solo. Foram efetuadas quatro seqüências de tráfegos sobre a subparcela, com passadas paralelas, afastadas meia largura da roda traseira do trator. Essa operação foi realizada dia 21/12/07, quando o solo apresentava umidade elevada ($0,14 \text{ kg kg}^{-1}$), permitindo aumentar seu estado de compactação, como pode ser visto na Tabela 2, pela análise da porosidade e densidade do solo.

3. Escarificado (ESC): nível de compactação definido por meio de uma escarificação realizada com um subsolador, com hastes afastadas 0,5 m, até uma profundidade de 0,25 m. A escarificação foi efetuada dia 15/12/07, quando a umidade do solo estava em torno de $0,11 \text{ kg kg}^{-1}$, possibilitando a ruptura de camadas compactadas. Na Tabela 2 também pode ser observado o efeito da escarificação, pela análise da porosidade e densidade do solo.

Embora o equipamento utilizado tenha sido um subsolador, optou-se pelo uso do termo escarificação, baseado na profundidade da operação (0,25 m). A adequação do termo nem sempre é fácil, face às divergências de opiniões de pesquisadores da área. Por isso, o termo escarificado foi empregado para significar um estado menor de compactação, independente do que a profundidade da operação caracteriza (escarificação ou subsolagem).

A compactação e a escarificação foram realizadas após dessecação e senescência da vegetação espontânea presente na área. A dessecação foi feita com o herbicida *glyphosate*, na dose de $1.230 \text{ g.i.a. ha}^{-1}$ (3 L ha^{-1} do produto comercial), aplicado com auxílio de um pulverizador costal.

O uso dos três níveis de compactação, além de permitir explorar a relação do comportamento de variáveis da cultura frente esses níveis de compactação, teve como objetivo principal testar a hipótese enunciada referente ao tempo para ocorrência de condições críticas ao crescimento da cultura e a relação desses tempos com variáveis da cultura. A maneira como estas relações foram testadas e os respectivos testes encontram-se descritos nos itens 3.4 e 3.5.

3.3 Implantação e manejo cultural

A implantação e o manejo da cultura foram realizados de acordo com as indicações técnicas da cultura do feijoeiro no Rio Grande do Sul (COMISSÃO, 2003). A semeadura do feijoeiro, cultivar BRS Valente, foi realizada no dia 30 de janeiro de 2008 (safrinha), numa densidade de 280.000 sementes ha^{-1} . As sementes foram distribuídas manualmente em sulcos espaçados 0,45 m, previamente formados por uma semeadora. As sementes foram tratadas com uma mistura de fungicida + inseticida. O fungicida utilizado foi o produto comercial sistêmico mais contato, Derosal Plus (Carbendazim 30 g i.a kg^{-1} + Thiram 70 g i.a kg^{-1}), na dose recomendada de 200 ml de produto comercial por 100 kg^{-1} de sementes. O inseticida utilizado foi o produto comercial de contato e ingestão, Standak 250 FS (Fipronil 250 g i.a L^{-1}), na dose recomendada de 100 ml de produto comercial por 100 kg^{-1} de sementes.

As linhas de semeadura foram demarcadas com uma semeadora Semeato, 17 linhas, munida de dispositivo sulcador tipo disco e dispositivo distribuidor de sementes tipo disco duplo desencontrado. Na seqüência foi distribuído, manualmente, o fertilizante para a adubação de base, na dose de 243 kg ha^{-1} da fórmula comercial NPK 05-30-10, definido a partir da análise química do solo e seguindo a indicação da recomendação oficial (CQFS, 2004). Posteriormente, foram distribuídas as sementes e cobertas com solo com auxílio de uma enxada. A bordadura do experimento, porém, foi semeada com uma semeadora tipo saraquá, também conhecida por matraca. A emergência das plantas foi verificada dos 6 aos 8 DAS.

Aos 15 DAS foi feito o controle químico de plantas daninhas por meio da aplicação do produto comercial Fusiflex (Fomesafen 125 g i.a L^{-1} + Fluazifop-P-Butil 125 g i.a L^{-1}), na dose recomendada de 1,6 L ha^{-1} . Embora o produto seja classificado como seletivo para a cultura, optou-se por fazer a aplicação em jato dirigido na entrelinha. Também em jato dirigido foi feita uma aplicação de herbicida Gramoxone (Paraquat, 200 g i.a L^{-1}), na dose de 2 L ha^{-1} de produto comercial, em virtude de uma segunda emergência de azevém (*Lolium multiflorum* L.).

A adubação nitrogenada de cobertura na dose de 40 kg N ha^{-1} (uréia 45 % como fonte de N), calculada conforme indicação da recomendação oficial (CQFS,

2004), foi aplicada aos 18 DAS, momento em que as plantas estavam expandindo o terceiro trifólio.

O controle fitossanitário (Tabela 1) teve atenção especial, dadas as características da cultura quanto à ocorrência de pragas e à suscetibilidade a doenças e, sobretudo, ao interesse de manter íntegra a estrutura foliar para se dispor de um material adequado para as medições de área foliar e, principalmente, de potencial hídrico foliar.

Tabela 1 – Momento de aplicação, produto, princípio ativo e respectivas doses recomendadas pelos fabricantes, dos defensivos utilizados na cultura.

DAS*	Produto comercial	Princípio ativo	Dose do produto comercial
20	Karate Zeon	Lambdacialotrina (50 g i.a L ⁻¹)	0,02 L ha ⁻¹
20	Derosal	Cabbendazin (500 g i.a L ⁻¹)	0,5 L ha ⁻¹
25	Karate Zeon	Lambdacialotrina (50 g i.a L ⁻¹)	0,02 L ha ⁻¹
25	Orius	Tebuconazole (250 g i.a L ⁻¹)	0,7 L ha ⁻¹
32	Karate Zeon	Lambdacialotrina (50 g i.a L ⁻¹)	0,02 L ha ⁻¹
32	Orius	Tebuconazole (250 g i.a L ⁻¹)	0,7 L ha ⁻¹
34	Lorsban	Clorpirifós (480 g i.a L ⁻¹)	1 L ha ⁻¹
41	Hokko Suzu	Fentin acetato (200 g i.a kg ⁻¹)	1 kg ha ⁻¹
49	Engeo	Cipermetrina+Tiametoxam (220+110 g i.a kg ⁻¹)	0,25 L ha ⁻¹
49	Orius	Tebuconazole (250 g i.a L ⁻¹)	0,7 L ha ⁻¹

* Dias após a semeadura

As aplicações de inseticidas tiveram como objetivo controlar pragas de maior ocorrência como a vaquinha (*Diabrotica speciosa*), cerotomas (*Cerotoma arcuata* e *C. tingomarianus*), cigarrinha verde (*Empoasca kraemer*) e o Percevejo verde pequeno (*Piezodorus guildini*). A aplicação de Lorsban foi a única feita em jato dirigido às hastes, com a finalidade específica de controlar danos provocados pela lagarta elasma (*Elasmopalpus lignosellus*). Os fungicidas foram aplicados todos de forma preventiva para evitar a ocorrência de patógenos como *Colletotrichum lindemuthianum*, *Uromyces appendiculatus* e *Phaeoisariophis griseola*, causadores das doenças antracnose, ferrugem e mancha angular, respectivamente.

3.4 Determinações e metodologia empregada

3.4.1 População, área foliar, índice de área foliar, altura de plantas e rendimento de grãos

A população de plantas foi determinada aos 13 e 36 DAS, por meio da contagem do total de plantas de uma linha escolhida aleatoriamente em cada subparcela. As duas contagens foram feitas sobre a mesma linha.

A área foliar foi calculada aos 21, 27, 38 e 56 DAS, a partir das medidas do comprimento e da máxima largura do folíolo central, de todos os trifólios de três plantas aleatoriamente escolhidas em cada subparcela. Com essas medidas foi estimada a área foliar pela equação linear $y=1,86x-4,23$ ($r^2=0,98$), obtida por análise de regressão entre a área foliar real de 20 trifólios de diferentes tamanhos (variável dependente) e o produto do comprimento pela largura do folíolo central do trifólio (variável independente) (Figura 5). A área foliar dos 20 trifólios foi medida pela determinação de pares xy do perímetro do limbo foliar fotografado sobre uma grade quadriculada de malha de 5x5 mm, que serviu de plano cartesiano. Com o conjunto total dos pares xy, a área foliar real foi calculada pelo método da poligonal fechada,

pela fórmula de GAUSS, $A = \frac{1}{2} \sum y_i (x_{i-1} - x_{i+1})$

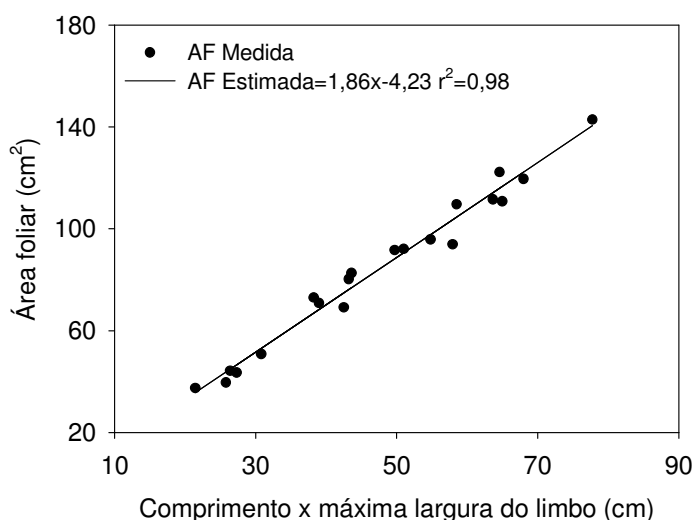


Figura 5 – Relação entre área foliar e o produto do comprimento pela máxima largura do folíolo central do trifólio.

O índice de área foliar (IAF) foi calculado a partir da área foliar estimada e da área superficial de solo ocupada pela planta. A área superficial do solo ocupada pela planta foi calculada considerando a variação da população de plantas. Para a determinação do IAF aos 21 e 27 DAS foi considerada a população de plantas medida aos 13 DAS. O IAF calculado aos 38 e 56 DAS considerou a população de plantas medida aos 36 DAS.

Por ocasião da medida da área foliar foi medida, nas mesmas plantas, a altura das plantas, considerando a distância vertical da superfície do solo até a inserção do trifólio do último nó vegetativo visível na haste principal da planta.

O rendimento de grãos foi quantificado aos 103 DAS. Foram colhidas por arranquio manual e debulhadas mecanicamente, com auxílio de uma bateadeira agrícola, as plantas das cinco linhas centrais da subparcela. As duas linhas laterais e uma faixa de 0,5 m de cada extremidade da subparcela foram descartadas para minimizar um possível efeito interparcelar, restando uma área útil de 9 m². Os grãos foram secos e a umidade foi ajustada para 13 % em base de massa.

3.4.2 Densidade, porosidade e condutividade hidráulica do solo saturado

Para fins de caracterização dos níveis de compactação foram medidas a porosidade e densidade do solo, aos 5 DAS, correspondendo a 20 e 13 dias após as operações de escarificação e compactação, respectivamente. Foram coletadas amostras de solo com estrutura preservada em anéis metálicos de 0,06 m de diâmetro por 0,05 m de altura nas camadas de 0-0,1; 0,1-0,2; 0,2-0,4 m. A partir dessas amostras foram calculadas a microporosidade em mesa de tensão e densidade do solo, conforme descrito em Embrapa (1997). A porosidade total foi calculada pela relação:

$$PT = 1 - \frac{ds}{dp}$$

Sendo: PT = porosidade total em cm³ cm⁻³; ds = densidade do solo em g cm⁻³ e dp = densidade de partículas do solo em g cm⁻³. A densidade de partículas foi calculada pelo método do balão volumétrico modificado (GUBIANI et al., 2006). A macroporosidade foi calculada pela diferença entre porosidade total e

microporosidade. Na Tabela 2 são apresentados os valores de densidade e das porosidades. Observa-se que os níveis de compactação ficaram mais bem definidos na camada de 0-0,10 m, onde diminuíram significativamente, a densidade no ESC e a porosidade total e a macroporosidade no PDC.

A condutividade hidráulica do solo saturado (K_{sat}) foi medida com a finalidade de estimar a condutividade hidráulica do solo não saturado para, a partir desta, estimar a evapotranspiração real (3.4.6)

A K_{sat} foi determinada através do método do permeâmetro de carga decrescente, com tomada de dados por meio do programa computacional “Ksat” (GUBIANI et al., 2008), desenvolvido no Laboratório de Física do Solo da Universidade Federal de Santa Maria. Foram utilizadas as mesmas amostras de solo usadas para o cálculo da densidade e porosidade. A medida da K_{sat} foi feita após as amostras serem retiradas da mesa de tensão. O programa calcula a K_{sat} por meio da equação (Hillel, 1998):

$$K_{sat} = (2,3aL / A\Delta t)(\log H_n - \log H_{n+1})$$

em que:

K_{sat} = condutividade hidráulica do solo saturado (cm h^{-1});

H_n e H_{n+1} = extremos superior e inferior da coluna de água (cm);

Δt = intervalo de tempo de deslocamento da coluna (h);

A = área da seção transversal da amostra de solo (cm^2);

L = comprimento da amostra de solo (cm);

a = área da seção transversal do tubo contendo a coluna de água (cm^2).

Tabela 2 – Densidade do solo, porosidade total, macroporosidade e microporosidade, em diferentes níveis de compactação e camadas do solo.

Camadas (m)	Manejo			CV (%)
	ESC	PD	PDC	
Densidade do solo (g cm ⁻³)				
0,0- 0,1	1,57 b	1,69 a	1,77 a	2,6
0,1-0,2	1,64 a	1,69 a	1,71 a	2,8
0,2-0,4	1,66 a	1,68 a	1,70 a	2,4
Porosidade total (cm ³ cm ⁻³)				
0,0- 0,1	0,39 a	0,34 b	0,31 b	4,9
0,1-0,2	0,36 a	0,34 a	0,34 a	5,4
0,2-0,4	0,35 a	0,33 a	0,34 a	4,3
Macroporosidade (cm ³ cm ⁻³)				
0,0- 0,1	0,12 a	0,08 ab	0,04 b	26,2
0,1-0,2	0,12 a	0,09 a	0,08 a	23,2
0,2-0,4	0,11 a	0,08 a	0,09 a	17,9
Microporosidade (cm ³ cm ⁻³)				
0,0- 0,1	0,28 a	0,26 a	0,27 a	3,8
0,1-0,2	0,24 a	0,25 a	0,25 a	3,0
0,2-0,4	0,25 a	0,25 a	0,25 a	1,7

Médias na linha seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro. CV = coeficiente de variação.

3.4.3 Umidade volumétrica do solo

A umidade volumétrica do solo foi monitorada por meio da técnica da reflectometria de domínio do tempo. Para isso, foi utilizado um TDR Trase portátil da Soil Moisture, que diariamente, no início da manhã, era conectado a sondas, instaladas em três camadas. As sondas metálicas de haste dupla e 19 cm de comprimento foram instaladas nas camadas de 0-0,10 m, 0,15-0,25 m e 0-30, 0,45 m. O objetivo foi contemplar camadas com diferentes resistências à penetração do solo e integrar uma camada de solo de 0,27 m para o cálculo do balanço hídrico, que teve por finalidade estimar a evapotranspiração real (item 3.4.6). A maior profundidade de instalação das sondas foi definida considerando os trabalhos de Pellegrini et al. (2003), Streck (2003) e Collares (2005), nos quais foi verificado que o

crescimento do sistema radicular da cultura do feijoeiro, para o solo do mesmo local deste estudo, ficou concentrado até 0,30 m de profundidade, com poucas raízes ultrapassando esse limite.

As leituras do TDR forneceram o tempo de propagação de uma onda eletromagnética nas sondas metálicas inseridas no solo. Com essa informação foi calculada a constante dielétrica aparente do solo (Ka) por meio da equação fornecida pelo fabricante:

$$Ka = (tc/L)^2$$

em que:

t = tempo de trânsito da onda na haste (s);

L = comprimento da sonda metálica (cm);

c = velocidade da luz (cm s^{-1}).

A umidade volumétrica foi determinada pela equação $\theta = 0,0002 \times Ka^3 - 0,0063 \times Ka^2 + 0,0781 \times Ka - 0,1378$, calibrada para o tipo de solo deste estudo (http://w3.ufsm.br/fisica_e_genese/Fisica/Pratica/Agua/Condutividade_não_saturada.htm).

3.3.4 Resistência do solo à penetração

A resistência do solo à penetração (RP) foi determinada para atender dois objetivos principais. Na instalação do experimento (22/01/08), a RP foi medida para caracterizar os níveis de compactação (medição feita nas subparcelas de uma das parcelas principais de cada bloco). Durante o desenvolvimento da cultura, as determinações tiveram o objetivo de gerar equações de regressão da RP em função da umidade do solo para, a partir dessas equações, estimar a RP diária ao longo do ciclo da cultura (medição feita em todas as subparcelas do experimento). Como a proposta foi estimar a RP em cada nível de compactação, não teve sentido prático incluir a densidade do solo como variável independente, juntamente com a umidade, até porque, por pressuposto estatístico, a densidade deveria ser semelhante em

todas as repetições de um mesmo nível de compactação. Com as estimativas da RP ao longo do ciclo foi calculado o tempo transcorrido até a RP atingir o valor de 2 MPa ($\text{DiasRP}_{[RP < 2\text{MPa}]}$), a partir de uma condição inicial de solo completamente úmido. Também foi quantificada a intensidade da RP, medida pela diferença entre o valor máximo da RP no período analisado menos o valor de 2 MPa ($\Delta\text{RP}_{[RP_{\text{máx}} - 2\text{MPa}]}$). Optou-se por utilizar 2 MPa como valor crítico (TAYLOR, 1966), devido seu emprego ser generalizado pela maioria dos pesquisadores (REICHERT et al., 2007).

As medidas de RP foram feitas aos 23, 25, 26, 35 e 36 DAS, com um penetrômetro manual, modelo Remik CP 20 Ultrasonic Cone Penetrometer, com armazenamento eletrônico dos dados e ponta cônica com semi-ângulo de penetração de 30°. A velocidade de penetração foi de aproximadamente 2 m min⁻¹ e o armazenamento de dados a cada 0,015 m. Devido à característica variável da RP foram efetuadas cinco medidas em cada subparcela, para melhor representar a condição média do solo. As medidas foram feitas até a profundidade de 0,45 m e na entrelinha da cultura para desconsiderar o efeito do sulco de semeadura.

As medidas de caracterização e verificação da distinção dos níveis de compactação aplicados estão representadas na Figura 6, que mostra os valores médios de RP de cada nível de compactação, em estratos de 0,03 m. Semelhantemente à densidade e à porosidade, a RP evidencia que os níveis de compactação ficaram mais bem definidos na camada de 0-0,10 m e parte da camada de 0,15-0,25 m, onde os níveis de compactação diferiram significativamente, pela diferença mínima significativa (DMS), calculada pelo teste de Tukey a 0,05 de probabilidade de erro.

Esse perfil de RP foi um dos fatores que norteou o estabelecimento das camadas para a instalação das sondas de TDR.

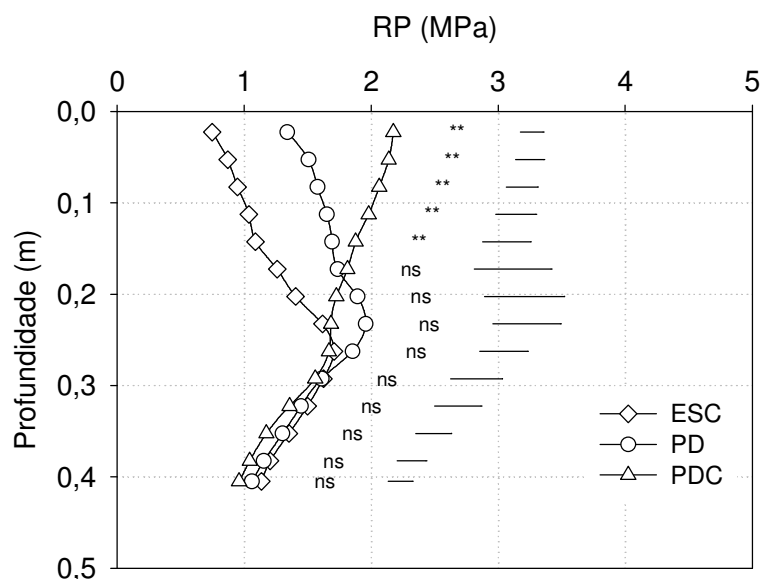


Figura 6 – Resistência do solo à penetração após o estabelecimento dos níveis de compactação. Barras horizontais representam a DMS calculada pelo teste de Tukey a 0,05 de probabilidade de erro.

3.4.4 Armazenamento de água no solo

O armazenamento de água no solo foi calculado a partir das medidas diárias de umidade feitas com o TDR. Para simplicidade dos cálculos e para quantificar o armazenamento em todo o perfil de 0-0,45 m foram consideradas três camadas de solo, diferentes das camadas nas quais estavam instaladas as sondas de TDR (0-0,10, 0,15-0,25 e 0,30-0,45 m). Essas novas camadas incluíram faixas de solo não abrangidas pelas sondas (0,10-0,15 e 0,25-0,30 m). Assim a primeira, segunda e terceira camada ficaram com espessuras de 0-0,125, 0,125-0,275 e 0,275-0,45 m, respectivamente. Para cada camada, o armazenamento foi calculado pela multiplicação da umidade volumétrica obtida a partir do TDR ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) pela espessura da camada (cm). O armazenamento total, na camada de 0-0,45 m, foi calculado pela soma dos armazenamentos de cada camada.

3.4.5 Potencial hídrico foliar

O potencial hídrico foliar (ψ_f) foi medido diariamente dos 37 aos 40 DAS e dos 43 aos 49 DAS, período com ausência de precipitação (Figura 4), no qual as

plantas apresentaram sinais de estresse hídrico (APÊNDICE G). Em cada dia de medição foram coletados, por subparcela, dois trifólios completamente desenvolvidos, a partir do ápice da planta, de plantas aleatoriamente escolhidas. Como medida de padronização da amostragem, tomou-se o cuidado de coletar trifólios sempre em posição semelhante na planta (superior), expostos perpendicularmente à radiação solar e sem injúrias. Os trifólios foram destacados da planta por meio de corte do pecíolo com lâmina de barbear. Imediatamente, foram embalados hermeticamente em embalagem plástica e acondicionados em caixa de isopor com gelo a uma temperatura de ± 11 °C. Posteriormente, o material foi conduzido para o laboratório e mantido em geladeira a uma temperatura de ± 7 °C até o momento da medida do ψ_f , a qual foi feita por meio de uma bomba de pressão do tipo Sholander, modelo 3005. Esse procedimento foi adotado por duas razões principais. A primeira foi porque a medida no campo com apenas um equipamento demoraria muito tempo, o que resultaria em leituras de ψ_f em diferentes condições de ambiente. A segunda porque se precisava evitar alteração do ψ_f desde o início até o final das leituras no laboratório, que demoravam em torno de 2 horas. Essa metodologia foi adotada a partir de informações dos trabalhos de Jiang et al. (2003), Jiang et al. (2004) e Jiang et al. (2005) e de testes de oscilação do ψ_f de folhas de milho armazenadas em ambiente refrigerado (caixa de isopor com gelo (± 11 °C) e geladeira (± 7 °C)), medido em WP4 (Decagon Devices, Pullman, Washington, USA), seguindo as indicações do fabricante.

A Figura 7 mostra o comportamento do ψ_f nos testes efetuados. Percebe-se que o ψ_f diminuiu mais ao longo do tempo quando as folhas foram armazenadas em caixa de isopor com gelo (G), principalmente para soja do dia 1 (S1) e milho (M). Por essa razão, optou-se por manter os trifólios do feijoeiro em geladeira a ± 7 °C, até o momento da leitura do ψ_f . O ψ_f foi medido com a câmara de Scholander devido ao fato de haver pouca informação na literatura sobre medidas feitas com WP4.

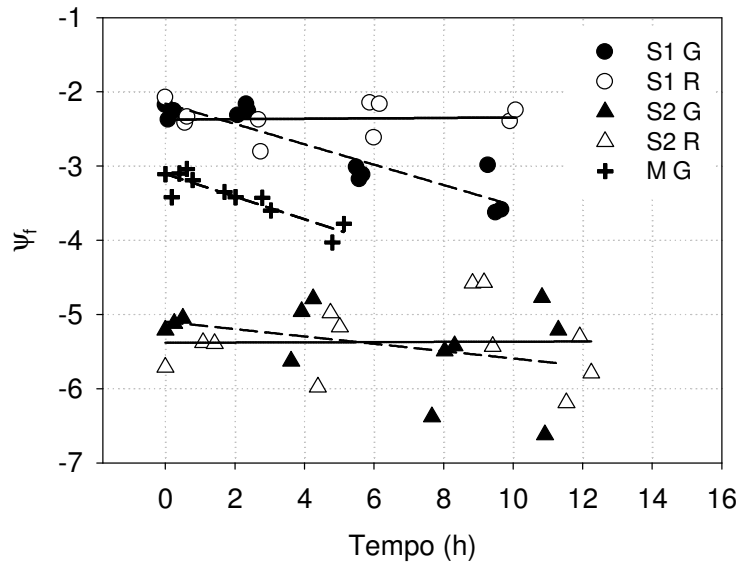


Figura 7 – Variação temporal do ψ_f medido em WP4. S1 G = Soja dia 1 armazenada em caixa de isopor com gelo; S1 R = Soja dia 1 refrigerada em geladeira; S2 G = Soja dia 2 armazenada em caixa de isopor com gelo; S2 R = Soja dia 2 refrigerada em geladeira; M G = milho armazenado em caixa de isopor com gelo. As linhas cheias representam o comportamento do ψ_f quando o material foi armazenado em geladeira.

A determinação do ψ_f teve por objetivo principal comparar os níveis de compactação a partir do potencial hídrico foliar relativo, calculado conforme a equação a seguir (THOMPSON et al., 2007):

$$\psi_{fR} = \psi_{fNI} / \psi_{fIR}$$

em que:

ψ_{fR} = potencial hídrico foliar relativo (MPa);

ψ_{fNI} = potencial hídrico foliar dos níveis de compactação com irrigação (MPa);

ψ_{fIR} = potencial hídrico foliar dos níveis de compactação sem irrigação (MPa).

A intenção foi de acompanhar o ψ_{fR} durante períodos sem ocorrência de precipitação para verificar o momento que o ψ_{fR} de cada nível de compactação apresentasse redução progressiva, sendo essa situação considerada como um indicativo do momento de ocorrência de estresse hídrico. O objetivo foi verificar se,

para essa medida, os níveis de compactação comportar-se-iam de maneira distinta e se haveria alguma relação com esses tempos e o rendimento de grãos.

3.4.6 Evapotranspiração real

A evapotranspiração real (ETR) foi calculada pelo método do balanço hídrico, conforme descrito em Libardi (1995). No cálculo são contabilizadas todas as entradas e saídas de água em um volume de solo, desde a superfície até uma profundidade Z considerada. A equação a seguir demonstra os componentes do balanço.

$$\Delta A_{(0-Z)} = P + I - ES - ET \pm Q_Z$$

em que:

$\Delta A_{[0-Z]}$ = variação do armazenamento (cm) de água no solo, de 0 - Z ;

P = precipitação (mm);

I = irrigação (mm);

ES = escoamento superficial (mm);

ET = evapotranspiração da cultura (mm);

Q_Z = drenagem profunda ou ascensão capilar (mm);

Para os propósitos deste trabalho, a ETR foi calculada somente nos períodos de ausência de precipitações. Dessa forma, os componentes P e ES foram desconsiderados. Assim, a equação ficou simplificada, como mostrado a seguir:

$$\Delta A_{(0-Z)} = I - ET \pm Q_Z$$

Isolando a ET , a equação passou para a forma:

$$ET = I \pm Q_Z - \Delta A_{(0-Z)}$$

O termo I foi obtido a partir das lâminas de irrigação, $\Delta A_{(0-z)}$ foi calculado pela diferença diária do armazenamento de água no solo e Q_z foi estimado a partir da condutividade hidráulica de solo não saturado e dos potenciais da água no solo, obtidos das curvas de retenção de água no solo (Figura 3). A estimativa de Q_z foi feita a 0,275 m de profundidade, sendo esta a posição média entre o centro das camadas de 0,15-25 (0,175 m) e 0,30-0,45 (0,375 m), conforme ilustra a equação abaixo.

$$Q_{z0,275} = -K(\theta)_{0,275} \left[\frac{\psi_{t0,375} - \psi_{t0,175}}{20} \right]$$

em que, para um período de 24 h:

$Q_{z0,275}$ = drenagem profunda ou ascensão capilar (mm);

$K(\theta)_{0,275}$ = condutividade do solo em função da umidade (mm) na profundidade de 0,275 m;

$\left[\frac{\psi_{t0,375} - \psi_{t0,175}}{20} \right]$ = gradiente de potencial total da água no solo entre 0,175 e 0,375 m (mm mm⁻¹).

A $K(\theta)$ foi estimada pela equação que combina os modelos propostos por van Genuchten (1980) e Mualen (1976), conforme citado por Libardi (1995).

$$K(\theta)_{0,275} = K_{sat0,275} \omega_{0,275}^l \left[1 - \left(\omega_{0,275}^{\frac{1}{m}} \right)^m \right]^2$$

em que:

$K(\theta)_{0,275}$ = condutividade do solo em função da umidade (mm dia⁻¹), na profundidade de 0,275 m.

K_{sat} = condutividade hidráulica de solo saturado (mm dia⁻¹), na profundidade de 0,275 m.

ω = saturação efetiva de umidade (mm³ mm⁻³), na profundidade de 0,275 m.

m = parâmetro curva de retenção de água no solo, estimado considerando $m = 1 - \frac{1}{n}$

ℓ = parâmetro empírico que foi estimado por Mualem (1976) como sendo aproximadamente igual a 0,5 para a maioria dos solos.

A determinação da ETR teve por objetivo principal comparar os níveis de compactação a partir da evapotranspiração real relativa, calculada de forma semelhante à descrição de Matzenauer et al. (2004)

$$ETR_R = ETR_{NI} / ETR_{IR}$$

em que, para um período de 24 h:

ETR_R = evapotranspiração real relativa (mm);

ETR_{NI} = evapotranspiração nos níveis de compactação sem irrigação (mm);

ETR_{IR} = evapotranspiração nos níveis de compactação com irrigação (mm).

Semelhantemente ao ψ_{IR} , a ETR_R foi calculada com o propósito de verificar o momento que a ETR_R de cada nível de compactação apresentasse redução progressiva, sendo essa situação considerada como um indicativo do momento de ocorrência de estresse hídrico. O objetivo foi verificar, se para essa medida, os níveis de compactação comportar-se-iam de maneira distinta e se haveria alguma relação com esses tempos e o rendimento de grãos.

Com as medidas de ETR e IAF foi calculada a expansão foliar por unidade de volume de água evapotranspirada, conforme a equação:

$$EF = \frac{IAF}{ETR}$$

em que:

EF = expansão foliar do período por unidade de volume de água evapotranspirada, ($\text{cm}^2 \text{ cm}^{-3}$);

IAF = índice de área foliar médio do período ($\text{cm}^2 \text{ cm}^{-2}$);

ETR = evapotranspiração acumulada no período ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-2}$).

3.5 Análise estatística

O modelo matemático do experimento com os fatores irrigação e compactação, no delineamento blocos ao acaso, com parcelas subdivididas é definido por:

$$Y_{ijk} = m + b_k + a_i + (ba)_{ik} + d_j + (ad)_{ij} + e_{ijk}$$

em que:

Y_{ijk} = observação da variável aleatória Y , referente à unidade experimental (subparcela) que recebeu o nível i do fator irrigação na parcela principal e o nível j do fator compactação na subparcela, situado no k -ésimo bloco (repetição);

m = a média geral do experimento;

b_k = efeito do bloco;

a_i = efeito do nível i do fator irrigação;

$(ba)_{ik}$ = efeito da interação do bloco com o fator irrigação (erro experimental referente à parcela principal);

d_j = efeito do nível j do fator compactação;

$(ad)_{ij}$ = efeito da interação do fator irrigação com o fator compactação;

e_{ijk} = efeito do erro experimental referente à subparcela.

O modelo, na forma como apresentado acima, foi aplicado para as variáveis medidas a partir do momento em que o fator irrigação foi introduzido e nas análises onde se estudou o efeito da interação entre os fatores irrigação e compactação. Para algumas variáveis testou-se apenas o efeito dos fatores individualmente. Nesses casos, o modelo matemático foi ajustado conforme o fator em teste.

O teste de Shapiro-Wilk foi usado para testar a normalidade da distribuição dos dados. As variáveis apresentaram distribuição aproximada à normal em praticamente todos os testes, exceto em dois casos da variável ψ_f . Embora a distribuição se assemelhasse menos com a normal para esses dois casos, foi usada a análise da variância, mesmo sob prejuízo de qualidade do resultado, em razão da menor relevância desse tipo de teste sobre a variável ψ_f .

Tanto para a análise de variância como para os testes de média e regressão foi adotado o nível de significância de 0,05.

3.5.1 Índice de área foliar, altura de plantas, potencial hídrico foliar e rendimento de grãos

O efeito dos fatores irrigação e compactação foi testado sobre o índice de área foliar, a altura de plantas, o potencial hídrico foliar e o rendimento de grãos, pelo modelo descrito acima. A primeira das quatro medidas da variável altura de plantas foi feita antes da inclusão do fator irrigação, no entanto, optou-se por não tratar esses dados de forma distinta, com consciência dos prejuízos da perda de eficiência do teste para níveis de compactação.

3.5.2 Densidade, porosidades e população de plantas;

Para densidade, porosidades e população de plantas foi testado apenas o efeito do fator compactação, sendo que as 12 observações foram representadas pela média das duas subparcelas do nível de compactação de cada bloco. Assim, o modelo matemático foi simplificado para a forma:

$$Y_{jk} = m + b_k + d_j + e_{jk}$$

em que:

Y_{jk} = observação da variável aleatória Y , referente à unidade experimental (subparcela) o nível j do fator compactação, situado no k -ésimo bloco (repetição);

m = média geral do experimento;

b_k = efeito do bloco;

d_j = efeito do nível j do fator compactação;

e_{jk} = efeito do erro experimental.

Quando significativo o teste “F” os fatores foram avaliados pelo teste de médias de Tukey a 0,05 de probabilidade de erro.

3.5.3 Umidade e resistência do solo à penetração

O efeito da umidade sobre a resistência do solo à penetração foi testado por meio da análise de regressão. Em cada nível de compactação e camada de solo foram geradas equações de regressão da RP em função da umidade. O conjunto de dados de cada equação foi composto pelos pares de RP e umidade das 8 subparcelas de cada nível de compactação. Foram feitas cinco medições, totalizando 40 observações. O valor de umidade foi obtido por meio do TDR e a RP foi representada pelo valor médio (LEÃO; SILVA, 2006) de cinco medidas feitas em cada subparcela. O modelo matemático utilizado foi o linear, escolhido pelo critério do maior valor de r^2 dos modelos testados. Assim, a RP foi expressa pela equação:

$$RP = b \cdot \theta + a$$

em que:

RP = resistência do solo à penetração (MPa);

b = coeficiente angular;

θ = umidade volumétrica do solo ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$);

a = coeficiente linear;

Adicionalmente, o efeito do fator compactação foi testado por camadas de 0,03 m, nas datas que a RP foi medida. O modelo matemático foi o mesmo do item 3.5.2, e as 12 observações também foram representadas pela média das duas subparcelas do nível de compactação de cada bloco. Nos casos em que o teste “F” foi significativo, as diferenças mínimas significativas do teste de Tukey (DMS) a 0,05 de probabilidade de erro foram plotadas nos gráficos do perfil de RP.

3.5.4 Armazenamento de água no solo

O efeito do fator compactação foi testado dentro de cada nível de irrigação e camada de solo. Assim, o modelo matemático foi o mesmo do item 3.5.2, com a diferença que as 12 observações representaram uma subparcela individual. Nos casos em que o teste “F” foi significativo, as diferenças mínimas significativas do

teste de Tukey (DMS) a 0,05 de probabilidade de erro foram plotadas nos gráficos de armazenamento.

3.5.5 Evapotranspiração real

A evapotranspiração real foi apresentada em termos de valores acumulados, em cada nível de compactação e irrigação. Sobre as médias representadas em gráfico, foi exibido o desvio padrão. O mesmo procedimento estatístico foi usado para a expansão foliar por unidade de volume de água evapotranspirada.

3.5.6 Relações entre variáveis de solo e da planta

O efeito de $\Delta RP_{[RP < 2MPa]}$ e $\Delta RP_{[RP_{m\acute{a}x} - 2MPa]}$ sobre a altura de plantas, o IAF e o rendimento de grãos foi analisado pela correlação linear de Pearson a 0,05. Da mesma forma, o efeito densidade do solo, da porosidade total, da macro e da microporosidade sobre a altura de plantas, o IAF e o rendimento de grãos foi analisado pela correlação linear de Pearson a 0,05.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 População, índice de área foliar e altura de plantas

A população de plantas aos 13 e 36 DAS não diferiu estatisticamente entre os níveis de compactação (Figura 8). Aos 36 DAS a população média de plantas no ESC, PD e PDC foi, respectivamente de 181.667, 197.778, 184.444 pl ha⁻¹, um pouco abaixo do indicado (200.000 a 250.000 pl ha⁻¹) pela pesquisa (Comissão, 2003). Embora não significativo, houve melhor estabelecimento e desenvolvimento inicial da cultura no PD. Resultados semelhantes foram obtidos por Collares (2005), que verificou diferença significativa entre níveis de compactação em apenas um de três experimentos; no entanto, aos 10 DAS o maior e menor número de plantas emergidas foram verificados no plantio direto e plantio direto compactado, respectivamente, nos três experimentos.

Para o IAF não houve interação significativa entre níveis de compactação e irrigação nem diferença significativa para níveis de irrigação em todas as medições, possivelmente devido à variabilidade dos dados (CV entre 19,3 a 22,3) (APÊNDICE B). Os níveis de compactação ESC e PD apresentaram as maiores médias de IAF (Figura 8) e diferiram do PDC pelo teste de Tukey a 0,05, em todas as épocas. Aos 56 dias após a semeadura, o IAF médio foi de 5,2 e 3,5, respectivamente no ESC e PDC. As diferenças mais marcantes ocorreram a partir dos 38 DAS, coincidindo com o estágio de pré-floração. Ao contrário dos resultados deste estudo, Urchei et al. (2000), estudando crescimento de dois cultivares de feijoeiro sob irrigação, verificaram IAF máximo (5,13 e 4,19) no plantio direto, enquanto que os menores valores foram observados no preparo convencional (3,26 e 1,96), resultado atribuído a uma maior disponibilidade de água no plantio direto em termos quantitativo e temporal. Porém, Collares (2005) não verificou diferença significativa em área foliar das plantas entre plantio direto, escarificado e compactado.

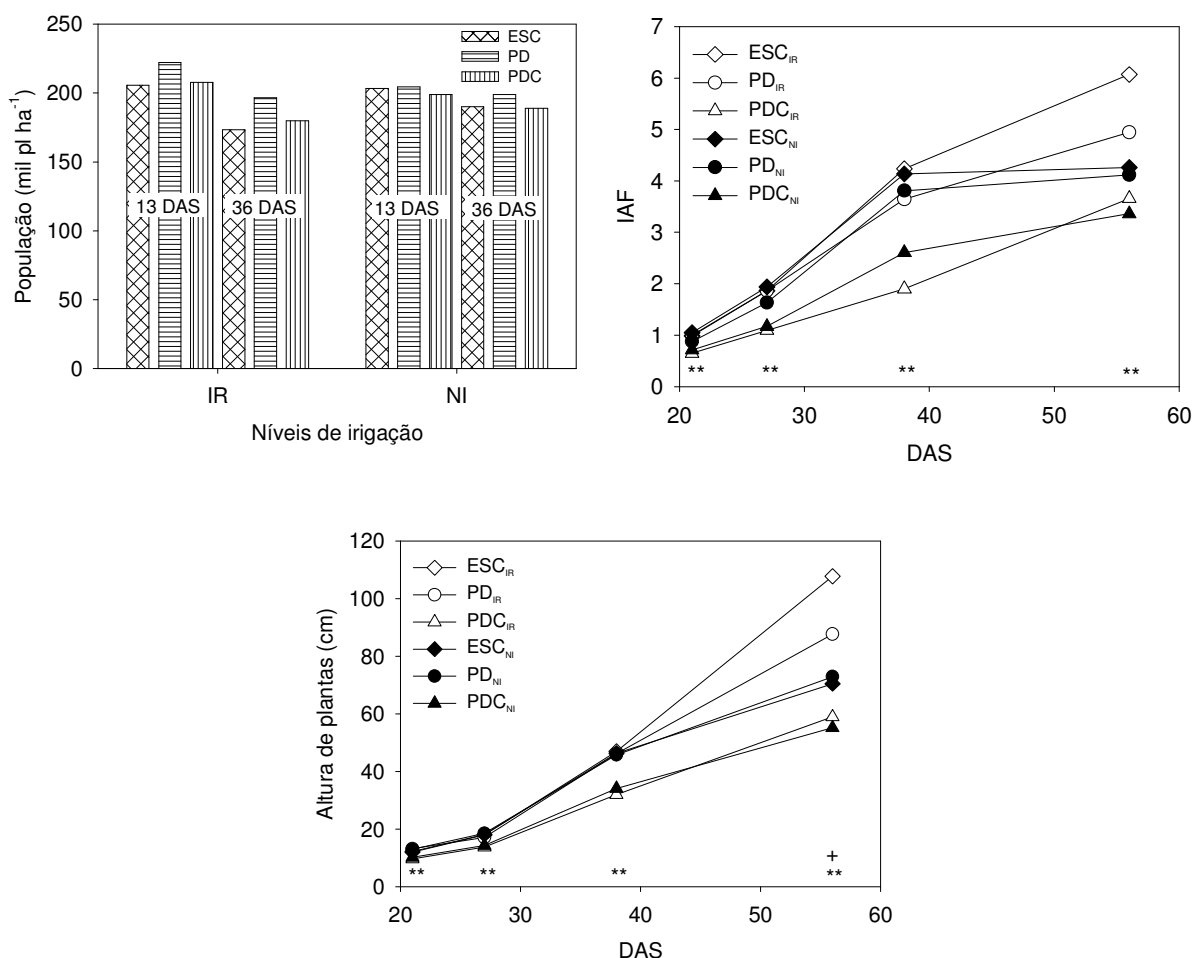


Figura 8 – População de plantas aos 13 e 36 DAS, índice de área foliar (IAF) e altura de plantas aos 21, 27, 38 e 56 DAS da cultura do feijoeiro, em diferentes níveis de compactação, com (IR) e sem (NI) irrigação. (+) significativo para níveis de irrigação, e () significativo para níveis de compactação, a 0,05 de probabilidade de erro.**

Na condição sem irrigação, as plantas foram mais sensíveis ao estresse hídrico no ESC, onde ocorreu o menor incremento no IAF dos 38 aos 56 DAS. Porém, com irrigação, o ESC possibilitou à cultura alcançar um elevado IAF. Essa tendência foi bem menos evidente no PDC, sendo que o PD assumiu uma posição intermediária. Esse comportamento da cultura indica que, no extremo menos compactado (ESC), o principal fator controlador do IAF foi a umidade do solo, pois o IAF praticamente estabilizou a partir dos 38 DAS. Diferentemente, no extremo mais compactado (PDC), o efeito negativo da RP foi dominante, pois mesmo com boas condições de umidade no solo houve um incremento muito pequeno no IAF. Relação entre umidade do solo e IAF foi verificada por Stone et al. (1988), que obtiveram IAF de feijoeiro de 2,48, 1,91 e 1,60, nas tensões de água no solo de 0,0125, 0,025 e

0,075 MPa, respectivamente. Em casa de vegetação, em um Latossolo Vermelho com potencial da água entre -35 e -10 kPa, Guimarães et al. (2002) verificaram que a área foliar do feijoeiro decresceu acentuadamente quando a densidade aumentou para valores maiores que $1,2 \text{ g cm}^{-3}$, que coincidiram com valores de RP de 1 MPa (STONE et al., 2002).

A partir dessa interpretação dos dados, o comportamento do IAF parece apontar para duas situações. A primeira é que o efeito negativo do estresse hídrico sobre o crescimento foliar é mais pronunciado em níveis de compactação menores. A segunda é que em níveis elevados de compactação a irrigação pode não atenuar suficientemente o efeito restritivo da resistência ao crescimento radicular, que se reflete em menor expansão foliar. A essa última inferência pode-se acrescentar ainda a observação de que o IAF indicou que, em solos com elevado nível de compactação, pode ser preferível o revolvimento à irrigação.

A altura de plantas mostrou comportamento semelhante ao comportamento do IAF (Figura 8). Também não houve interação significativa entre níveis de compactação e irrigação, mas houve diferença significativa para níveis de irrigação, aos 56 DAS, quando a maior média foi verificada com irrigação (85 cm) e a menor, sem irrigação (66 cm). Os níveis de compactação ESC e PD apresentaram as maiores médias e diferiram do PDC pelo teste de Tukey a 0,05, em todas as épocas. Mais detalhes da análise estatística pode ser visto no APÊNDICE C.

Resultados semelhantes aos deste trabalho foram obtidos por Pellegrini et al. (2003), que verificaram maior altura de plantas de feijoeiro no plantio direto, comparado ao convencional e escarificado. Também em feijoeiro, Collares (2005) observou menor crescimento no tratamento compactado. Silva et al. (2004) verificaram que a taxa diária de crescimento de milho foi maior no plantio direto até um certo valor de porosidade de aeração (próximo de $0,2 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$), a partir do qual o plantio convencional exibiu as maiores taxas. Em relação à RP, esses autores observaram que as plantas cresceram a taxas decrescentes à medida que aumentou a RP (de 0 a 6 MPa), e com taxas sempre menores no convencional e cada vez mais afastadas das taxas do plantio direto, para um mesmo valor de RP. No entanto, neste trabalho, valores semelhantes de RP nos diferentes níveis de compactação ocorrem em tempos bem distanciados, principalmente entre ESC e os demais níveis de compactação, na camada de 0-10 m (item 4.3). Em vista disso, a taxa de

crescimento no ESC, quando a RP for igual a 2 MPa, pode ser reduzida mais pela baixa umidade do solo do que propriamente pelo aumento da RP.

É notável também o predomínio do efeito da irrigação sobre a altura de plantas no ESC. Observando-se a amplitude das medidas aos 56 DAS em cada nível de irrigação (altura das plantas no ESC menos a altura das plantas no PDC), esse efeito fica mais perceptível. A amplitude das medidas foi de 49 e 15 cm na condição irrigada e sem irrigação, respectivamente. Como a altura média das plantas no PDC é bastante semelhante em ambos os níveis de irrigação, a diferença na amplitude das medidas se deve predominantemente ao maior crescimento das plantas no ESC. Em face disso, o comportamento da altura de plantas também conduz às mesmas interpretações feitas para o IAF, nos aspectos estresse hídrico e irrigação, em níveis de compactação distintos. Para o nível elevado de compactação (PDC), a altura de plantas, semelhantemente ao IAF, respondeu mais ao revolvimento que à irrigação.

4.2 Umidade volumétrica do solo

A maior variação da umidade do solo ocorreu dos 32 aos 52 DAS, período no qual praticamente não houve precipitação. Em todo o período (0 a 56 DAS), a variação da umidade foi mais acentuada na camada de 0-0,10 m, tanto dentro quanto entre os níveis de compactação (Figura 9). Por outro lado, na camada de 0,15-0,25 e 0,30-0,45 m, as diferenças mais evidentes foram verificadas entre os níveis de irrigação. Entre os níveis de compactação, a variação da umidade deve estar ligada à modificação estrutural do solo imposta pela aplicação dos níveis de compactação, e foi mais evidente até profundidades onde os efeitos diferenciados dos níveis de compactação foram observados (Tabela 2 e Figura 6). No entanto, a umidade na capacidade de campo não foi sensivelmente afetada pelos níveis de compactação (definição dos valores estabelecidos encontra-se no item 3.2.1).

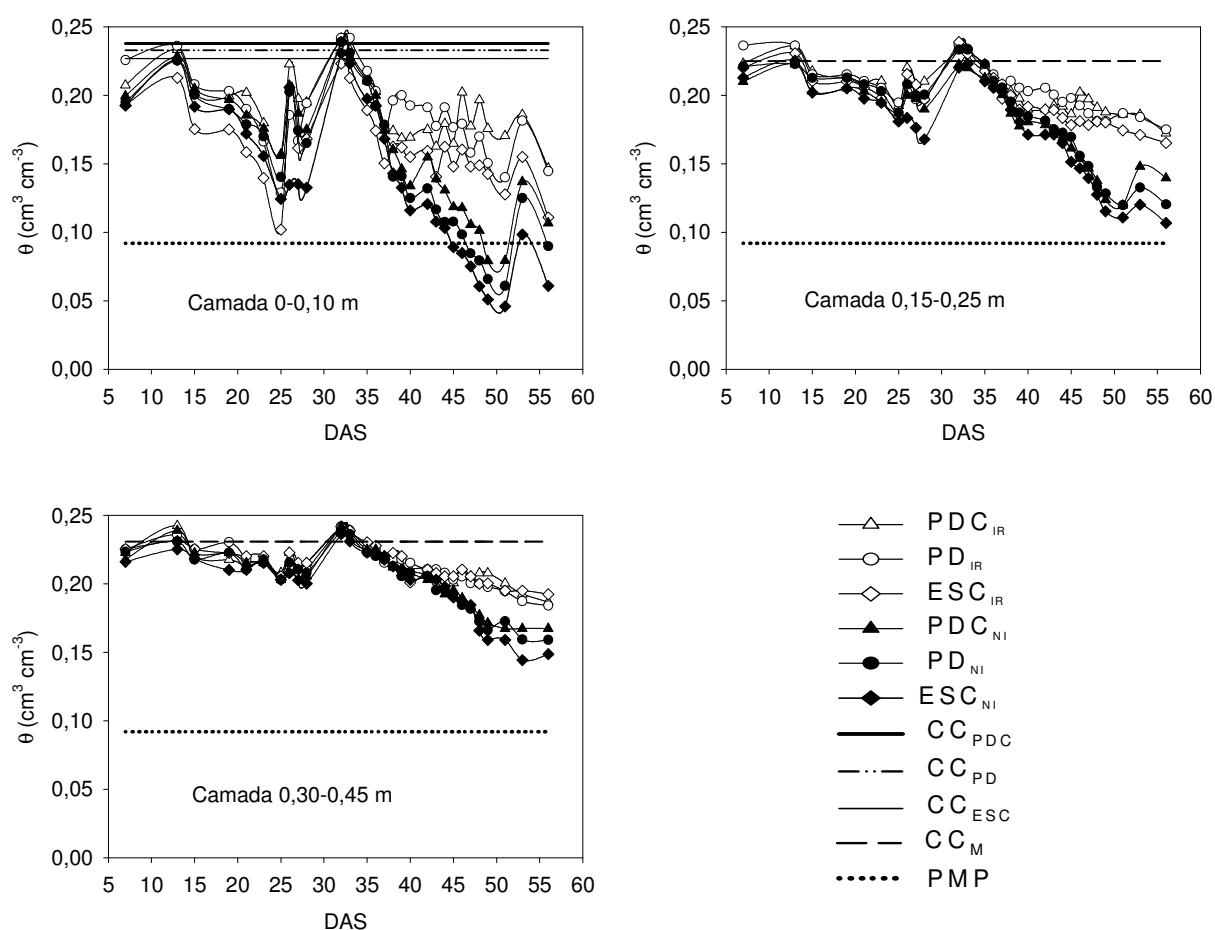


Figura 9 – Variação da umidade volumétrica (θ) nas camadas de 0-0,10, 0,15-0,25 e 0,30-0,45 m, no período de 7 a 56 DAS, em diferentes níveis de compactação, com (IR) e sem (NI) irrigação.

Observa-se que, à medida que se estabelece o déficit hídrico (em torno dos 36 DAS), a umidade do solo no ESC tende a ser sempre menor que nos demais níveis de compactação, principalmente na camada de 0-0,10 m. Como a capacidade de campo foi semelhante nos diferentes níveis de compactação (item 3.2.1), o que confere quantidade de água similar para plantas, a diminuição mais acentuada da umidade do solo no ESC deve estar associada a um maior aprofundamento do sistema radicular da cultura, que possibilitou maior acesso e, conseqüentemente, maior extração de água. Com o avanço do período sem chuvas, o potencial da água e a condutividade hidráulica também decresceram mais acentuadamente no ESC, em resposta à maior diminuição do conteúdo de água. Possivelmente, isso explica os menores incrementos de IAF e altura de plantas no ESC, quando sem irrigação, pois a disponibilidade de água depende tanto do potencial da água no solo quanto

da condutividade hidráulica do solo (JONES, 2007). No entanto, a observação da umidade do solo de forma isolada não explica satisfatoriamente o comportamento do IAF e altura de plantas quando os níveis de compactação foram combinados com a irrigação, pois os maiores IAF e altura de plantas foram observados no ESC e PD, curiosamente onde a umidade do solo foi menor. Porém, no ESC e PD, embora com menor umidade, o efeito da RP deve ter sido ausente no ESC e pouco intenso no PD, não afetando o crescimento da planta. Ao contrário no PDC, mesmo com umidade maior, a RP deve ter sido um fator restritivo. Freddi et al. (2008) verificaram que em solo compactado, mesmo que a umidade do solo ficasse sempre na capacidade de campo haveria restrições severas ao crescimento radicular pela RP elevada. Observando-se o perfil de RP do PDC aos 36 DAS (Figura 10), dois dias após um período de intensa precipitação (Figura 4), e considerando 2 MPa como restritivo, verifica-se claramente que a RP deve ter limitado o crescimento da cultura mesmo em condições de solo com elevada umidade (Figura 9). O perfil de RP do PDC mostra a ocorrência de RP maior que 2 MPa na camada de 0-0,10 e próxima desse valor na camada de 0,10-0,20. Por estas evidências, acredita-se que o IAF e AP no ESC foram afetados mais pela umidade, enquanto no PDC a RP deve ter predominado como fator restritivo. No PD, umidade e RP devem ter atuado conjuntamente, porém, ambas com menor intensidades e com efeitos não aditivos.

4.3 Resistência do solo à penetração

De maneira geral, pode-se observar (Figura 10) em todas as determinações que a RP diferiu significativamente na camada de 0-0,10 m e em boa parte da camada de 0,15-0,25 m, camadas essas onde os níveis de compactação ficaram mais bem caracterizados (Tabela 2 e Figura 6) e a umidade do solo variou mais (Figura 9). A partir de 0,10 a 0,15 m, o PD e o PDC foram bastante semelhantes em termos de RP, e após 0,25 a 0,30 m todos os níveis de compactação foram similares. A RP no PDC esteve acima ou em torno de 2 MPa desde a superfície até 0,20 m de profundidade em todas as medições, chegando próximo de 3 MPa na camada de 0-10 m aos 25 DAS, devido à baixa umidade do solo (Figura 10).

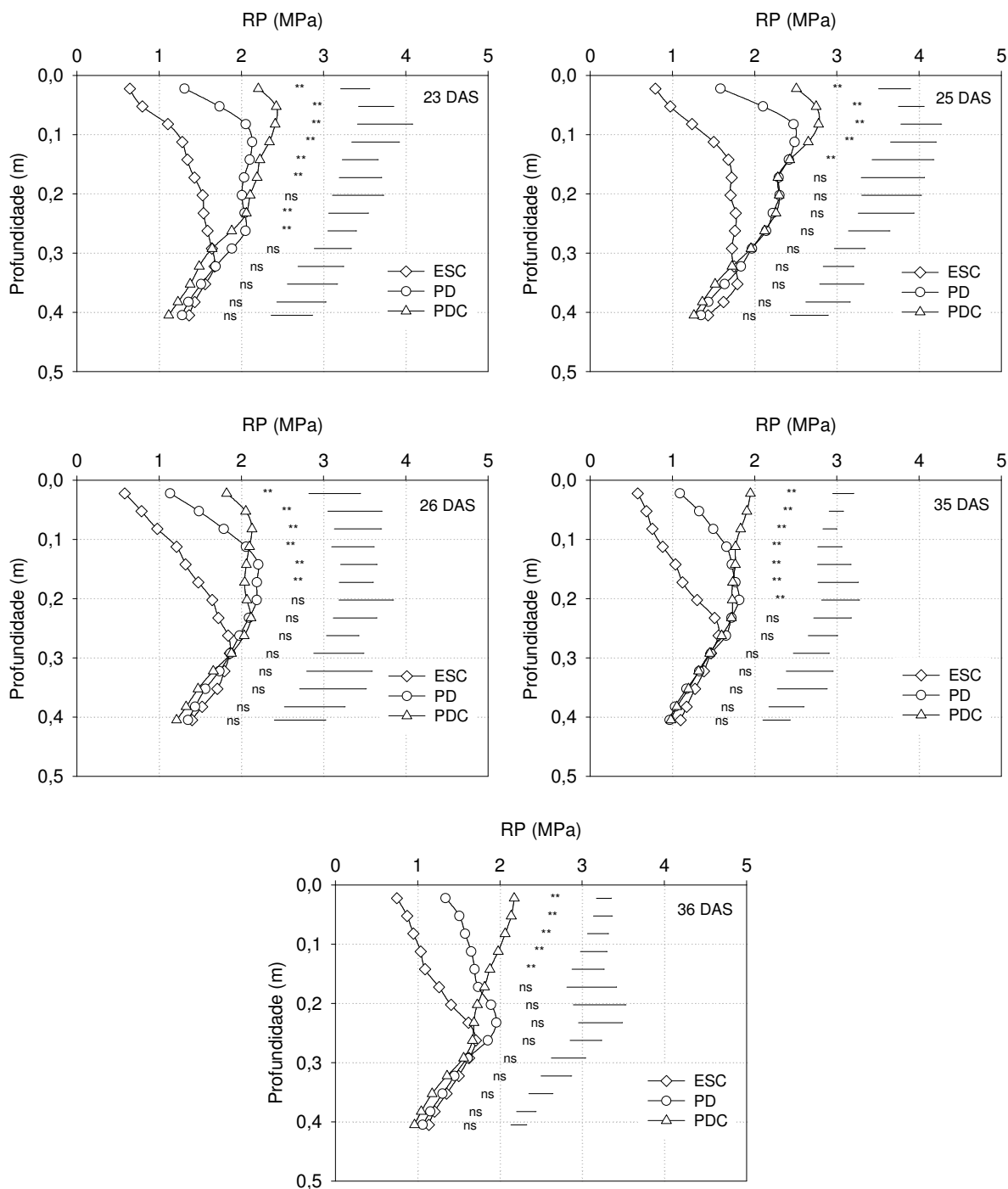


Figura 10 – Resistência do solo à penetração por camadas 0,03 m, de 0-0,40 m de profundidade, medida aos 23, 25, 26, 35 e 36 DAS, em diferentes níveis de compactação. As linhas horizontais representam a diferença mínima significativa do teste de Tukey a 0,05 e comparam as médias dos tratamentos em cada camada.

No PD, na camada de 0-0,10 m, a RP variou entre 1 e 2 MPa em praticamente todas as medições, exceto aos 25 DAS, quando chegou a valores próximos de 2,5 MPa, e na camada de 0,15-0,25 m, permaneceu próxima aos 2 MPa. Ao contrário, no ESC a RP não atingiu valores de 2 MPa em nenhuma

profundidade, predominando valores inferiores a 1,5 MPa desde a superfície até os 0,25 m de profundidade.

O comportamento da RP indica a presença de três ambientes distintos de solo e sugere, para plantas sensíveis a valores de RP iguais ou maiores que 2 MPa, um decréscimo na produção vegetal do ESC para o PDC. O IAF e a altura de plantas evidenciam essa relação. No entanto, embora a medida da RP tenha indicado condições favoráveis e desfavoráveis ao crescimento radicular, não é possível, por essa análise, informar sobre a duração do período em que a cultura permaneceu sob RP acima de 2 MPa e nem qual a intensidade acima dos 2 MPa. Portanto, essa maneira clássica de explorar a RP informa bem as diferenças entre ambientes de solo (DE MARIA, 1999; STRECK, 2003; SILVA, 2003), porém é limitada como um instrumento de decisão de intervenção no sistema para corrigir problemas de compactação do solo (exceto em casos extremos), com vistas a atender critérios de produção.

Como forma de melhorar a relação de causa e efeito entre RP e alguma medida da planta, pesquisadores sugerem que as determinações da RP incluam medidas feitas no período de intenso crescimento radicular, momento que a cultura está mais suscetível aos prejuízos da RP elevada (REICHERT et al., 2007). No entanto, esta estratégia parece ser adequada apenas para o cultivo atual, pois não há nenhuma garantia de coincidência da ocorrência de valores de RP elevados com os períodos de maior crescimento de raízes para cultivos subsequentes.

A abordagem alternativa da RP deste trabalho iniciou com a geração das equações de regressão mostradas na Figura 11. Estas equações descrevem o comportamento da RP em função da umidade do solo e a forma como elas foram geradas foi descrita no item 3.5.3. Estão representadas aqui as equações das camadas de 0-0,10 e 0,15-0,25 m, visto que na camada de 0,30-0,45 m a umidade do solo variou muito pouco entre os níveis de compactação e, por isso, não foi possível estabelecer uma relação da RP com a umidade e que tivesse utilidade para os propósitos deste trabalho.

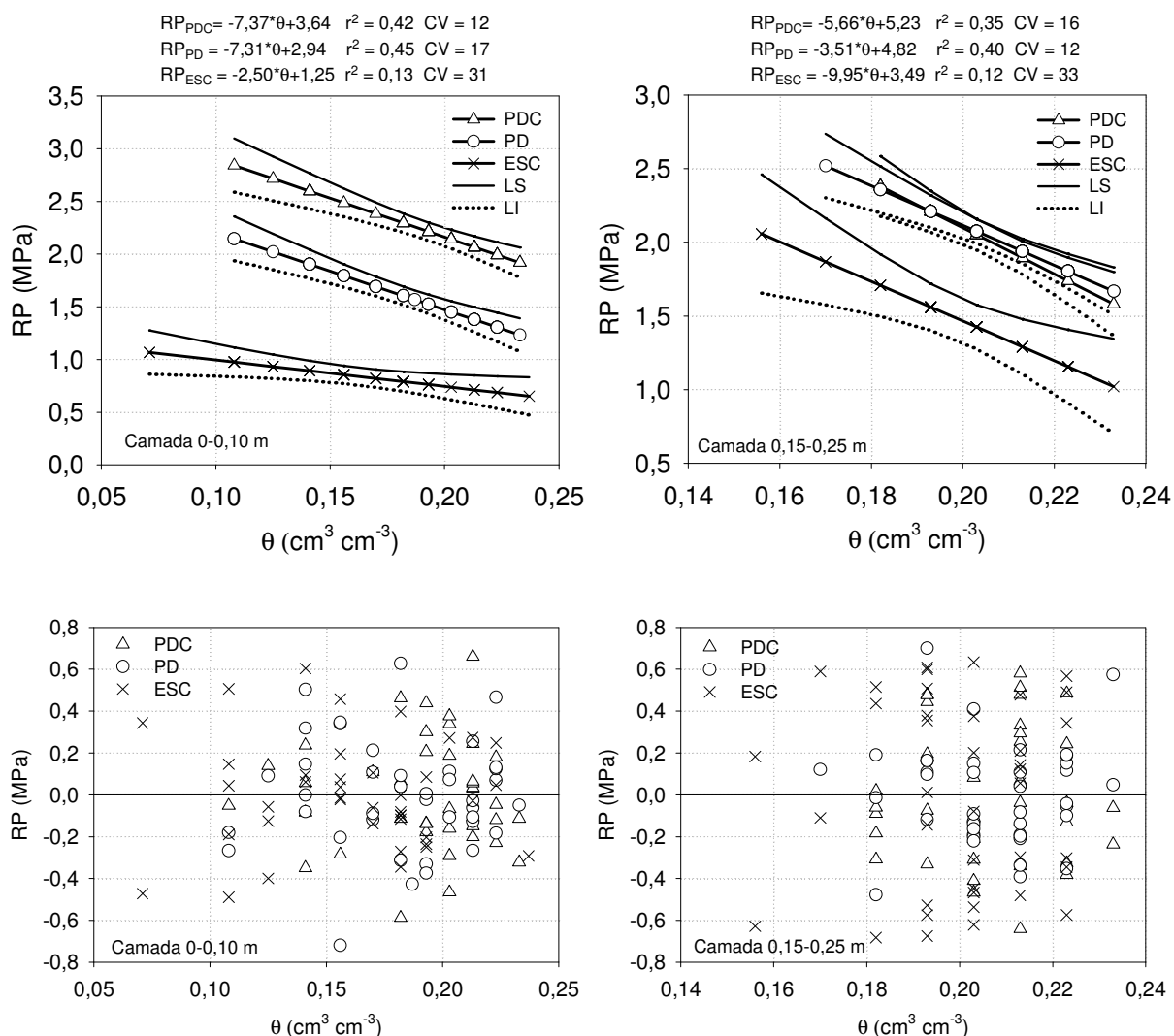


Figura 11 – Resistência do solo à penetração e seus respectivos resíduos na camada de 0-0,10 e 0,15-0,25 m em função da umidade volumétrica (θ), nos diferentes níveis de compactação. LS = limite de confiança superior; LI = limite de confiança inferior da média, a 0,95 de probabilidade, e CV = coeficiente de variação (%).

Nas camadas de 0-0,10 m e 0,15-0,25 m, principalmente no ESC, o coeficiente de determinação (r^2), indicou baixa relação da RP com a umidade (Figura 11). No entanto, o modelo linear foi significativo a 0,05 em todos os casos (APÊNDICE D). Os baixos valores de r^2 podem estar relacionados com a variabilidade natural da RP dentro da mesma unidade experimental (assumida como homogênea), visto que a RP foi medida em vários pontos distribuídos na mesma subparcela, para uma maior representatividade da mesma. Além disso, a umidade foi medida sempre no mesmo local (ponto onde estava instalada a sonda de TDR). Optou-se por essa estratégia, porque a obtenção de medidas de umidade em todos

os pontos em que a RP foi determinada tornaria a pesquisa muito laboriosa (coleta de amostras de solo) ou demandaria muita instrumentação com sondas de TDR.

Em condições de campo, relações da RP com a umidade normalmente apresentam baixo coeficiente de determinação. Comparando solos pouco e bem estruturados, Belbin; Cotching (2004) verificaram valores de r^2 de 0,01 e 0,41, respectivamente. Em solo sob semeadura direta, Genro Junior et al. (2004) obtiveram valores de r^2 de 0,45, 0,61 e 0,44, respectivamente para as camadas 0,03 a 0,06, 0,10 a 0,13 e 0,20 a 0,23 m. Mesmo a estratégia utilizada por Dexter et al. (2007), que estimaram a RP a partir do índice "S" e da saturação efetiva, resultou num valor de r^2 de 0,37. Valores acima de 0,5 normalmente são obtidos para solos homogeneizados em vasos (PABIM et al., 1998) ou no campo (DA CUNHA et al., 2002), incluindo-se outras variáveis além da umidade, ou quando normalizados para um dado conteúdo de água (TORMENA; ROLOFF, 1996; BUSSCHER et al., 1997). Portanto, neste estudo, os valores de r^2 estão compreendidos na faixa normalmente encontrada na literatura. Os menores valores do ESC e PDC estão associados a modificações heterogêneas na estrutura do solo, causadas pelas operações de subsolagem e compactação adicional.

Em ambas as camadas, o coeficiente angular mostrou aumento (em módulo) no sentido ESC-PDC, indicando que a RP é afetada com maior intensidade pela variação da umidade à medida que aumenta o grau de compactação. Na camada de 0-0,10 m, observa-se que uma RP de 2 MPa é obtida no PDC e no PD quando a umidade volumétrica estiver, respectivamente, próxima de 0,22 e 0,12 $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, enquanto no ESC o valor máximo possível seria de 1,25 MPa, na condição de solo completamente seco (coeficiente linear).

Por essa interpretação é possível prever que, no ESC, a significância estatística de correlações entre variáveis da cultura e a estimativa da RP é menos provável de ocorrer e, caso exista, a modificação medida na variável da planta será provocada, possivelmente, muito mais indiretamente por déficit hídrico do que propriamente pela variação da RP. Além disso, em todos os tratamentos e camadas deve ser considerada ainda a confiabilidade das médias estimadas, visto que o intervalo de confiança de 0,95 para a média é relativamente amplo. Dessa forma, o uso de um valor pontual estimado, considerado como crítico (por exemplo, 2 MPa), pode estar um tanto afastado do valor real do parâmetro populacional. No entanto, essas equações mostram a tendência do comportamento da RP com a variação da

umidade, que, para dados oriundos de solo em condições de campo, pode ser considerada razoável.

A distribuição dos resíduos está praticamente toda compreendida numa faixa de $\pm 0,6$ MPa, com maior concentração de pontos entre $\pm 0,4$ MPa (Figura 11). Dessa forma, mesmo com baixos coeficientes de determinação (r^2), a estimativa da RP pode ser considerada satisfatória, pois o erro da estimativa para o valor real medido seria de até no máximo $\pm 0,6$ MPa, com raros casos ultrapassando esse valor e a maioria estaria até $\pm 0,4$ MPa.

A aplicação das equações da Figura 11 sobre a umidade do solo gerou as estimativas da RP em função da umidade, correspondente aos respectivos momentos de determinação, ou seja, DAS (Figura 12). A estratégia alternativa de análise da RP foi realizada entre os 32 e 52 DAS, período que permaneceu praticamente sem chuvas, exceto aos 40 DAS quando choveu 6 mm (Figura 4), o que provocou um leve aumento da umidade do solo (Figura 9). Após aos 52 DAS, as precipitações normalizaram e, além disso, a cultura estava na fase de enchimento de grãos, momento que o crescimento de raízes passa a ser pouco expressivo (OLIVEIRA; SILVA, 1990) e a RP passa a ter pouco sentido como um fator restritivo ao crescimento radicular.

O tempo transcorrido para a RP atingir o valor de 2 MPa, ou o tempo em que ela permaneceu acima desse valor, à medida que a umidade do solo diminuiu, foi diferente entre os níveis de compactação, bem como entre as camadas de solo (Figura 12). O tempo transcorrido até a RP atingir o valor de 2 MPa ($\text{DiasRP}_{[RP < 2\text{MPa}]}$) foi em média 7 e 2 dias, respectivamente, para o PD e o PDC, na camada de 0-0,10 m e de 13, 4 e 3 dias, respectivamente, para o ESC, PD e o PDC, na camada de 0,15-0,25 m. A intensidade da RP medida pela diferença entre o valor máximo da RP no período analisado menos o valor de 2 MPa ($\Delta\text{RP}_{[RP_{\text{máx}} - 2\text{MPa}]}$) foi em média 0,5 e 1,0 MPa, respectivamente, para o PD e o PDC, na camada de 0-0,10 m e de 0,4, 1,2 e 1,4 MPa, respectivamente, para o ESC, PD e o PDC, na camada de 0,15-0,25 m.

No momento em que a RP estimada é igual a 2 MPa, a umidade do solo está no domínio das funções de estimativa da RP (Figura 11). A umidade do solo que corresponde ao limite inferior do domínio das funções ocorreu no tempo sinalizado pelas setas referentes às curvas de cada nível de compactação (Figura 12). Verifica-se, portanto, que o $\Delta\text{RP}_{[RP_{\text{máx}} - 2\text{MPa}]}$ calculado por essas estimativas é o resultado de extrapolações das funções para valores além do intervalo sobre o qual elas foram

geradas. Possivelmente, os valores de $\Delta RP_{[RP_{\text{máx}}-2\text{MPa}]}$ poderiam ser maiores, visto que, em condições de solo mais seco, as funções podem ter comportamento não linear. No entanto, o limite inferior de umidade do domínio da função do PDC, na camada de 0-0,10 m foi $0,108 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ (Figura 11), próximo à umidade do PMP ($0,09 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) e o melhor ajuste da RP em função da umidade foi o linear. Dessa forma, acredita-se que, nos demais casos (principalmente na camada de 0,15-0,25 m), se a umidade do solo utilizada para o ajuste das funções tivesse decrescido como no PDC, na camada de 0-0,10 m, o modelo linear seria o que melhor ajustaria uma função aos dados. Assim, a extrapolação usada neste trabalho pode ser considerada aceitável.

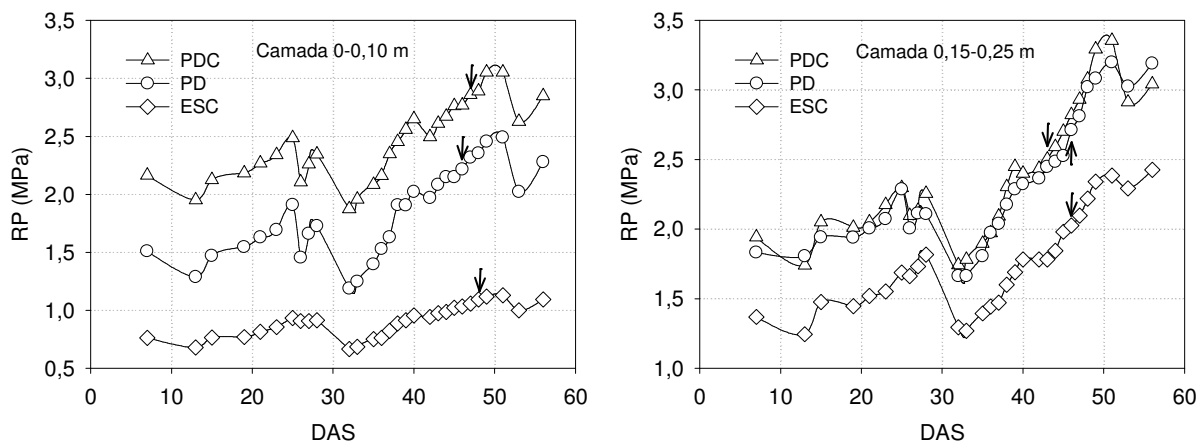


Figura 12 – Variação da RP nas camadas de 0-0,10 e 0,15-0,25 m, no período de 7 a 56 DAS, em diferentes níveis de compactação sem irrigação. As setas indicam o momento em que a umidade do solo (Figura 9) decresceu além do domínio das funções de estimativa da RP.

A comparação dos valores de $\text{Dias}RP_{[RP < 2\text{MPa}]}$ com o perfil de RP aos 36 DAS (Figura 10), dois dias após um período de intensa precipitação (Figura 4), demonstra que a RP no PDC já tinha atingido o valor de 2 MPa, enquanto que no PD levaria alguns dias, porém não seria possível prever quantos dias demoraria. Para a camada de 0,15-0,25 m, também se esperaria que o valor de 2 MPa fosse atingido primeiro no PDC e PD e depois no ESC (Figura 10). Pela Figura 10, a impressão é de que a RP de 2 MPa seria observada primeiro no PD, pois neste a RP é maior em quase toda a espessura da camada de 0,15-0,25 m e já estava próxima de 2 MPa.

No entanto, devido à maior declividade da equação do PDC (coeficiente angular = - 5,66), verifica-se que a RP no PDC aumentou com maior intensidade à medida que diminuiu a umidade do solo. Devido a isso, o efeito restritivo da RP ocorreu primeiro no PDC.

Esta alternativa de representar a RP, ao contrário da maneira clássica, é bem menos importante para a diferenciação de ambientes físicos do solo, mas constitui-se numa estratégia preditiva da RP, podendo vir a ser um bom instrumento orientador para a tomada de decisão quanto ao manejo físico do solo. Conhecendo-se a relação da RP com a umidade para uma determinada condição de solo, é possível simular a variação da umidade do solo para diversas condições de clima e cultura e prever o tempo para a RP atingir um valor crítico ou um dado estado. Esta estratégia parece ser de grande importância, pois integra tanto o efeito do solo como do ambiente sobre uma dada cultura, com base em seu valor crítico de RP. Dessa forma, a análise temporal da RP contempla a complexidade das relações entre os diversos fatores que regulam seu comportamento num dado solo e ambiente. Esta abordagem precisa, porém, ser complementada com a informação de como as culturas respondem à variação do tempo para a RP atingir o valor crítico e à intensidade da RP acima do valor crítico. Além disso, o ajuste de valores críticos levando em consideração, cultura, sistema de manejo e textura do solo é outro aspecto importante a ser considerado (REICHERT et al., 2008).

A relação das estimativas de $DiasRP_{[RP < 2MPa]}$ e $\Delta RP_{[RP_{m\acute{a}x} - 2MPa]}$ com variáveis da cultura são abordados em item específico (item 4.8), após a discussão dos resultados de rendimento de grãos.

4.4 Armazenamento de água no solo

A variação média do armazenamento por camada, dos 7 aos 56 DAS, nos diferentes níveis de compactação e irrigação é mostrada na Figura 13. Entre os níveis de irrigação, as diferenças no armazenamento são verificadas de maneira mais evidente após as precipitações (136 mm) ocorridas entre os 28 e 34 DAS (Figura 4), quando a irrigação passou a ser aplicada sucessivamente para manter a umidade no solo igual ou superior a 75 % da CC, devido à ausência de precipitações expressivas nos 19 dias subseqüentes.

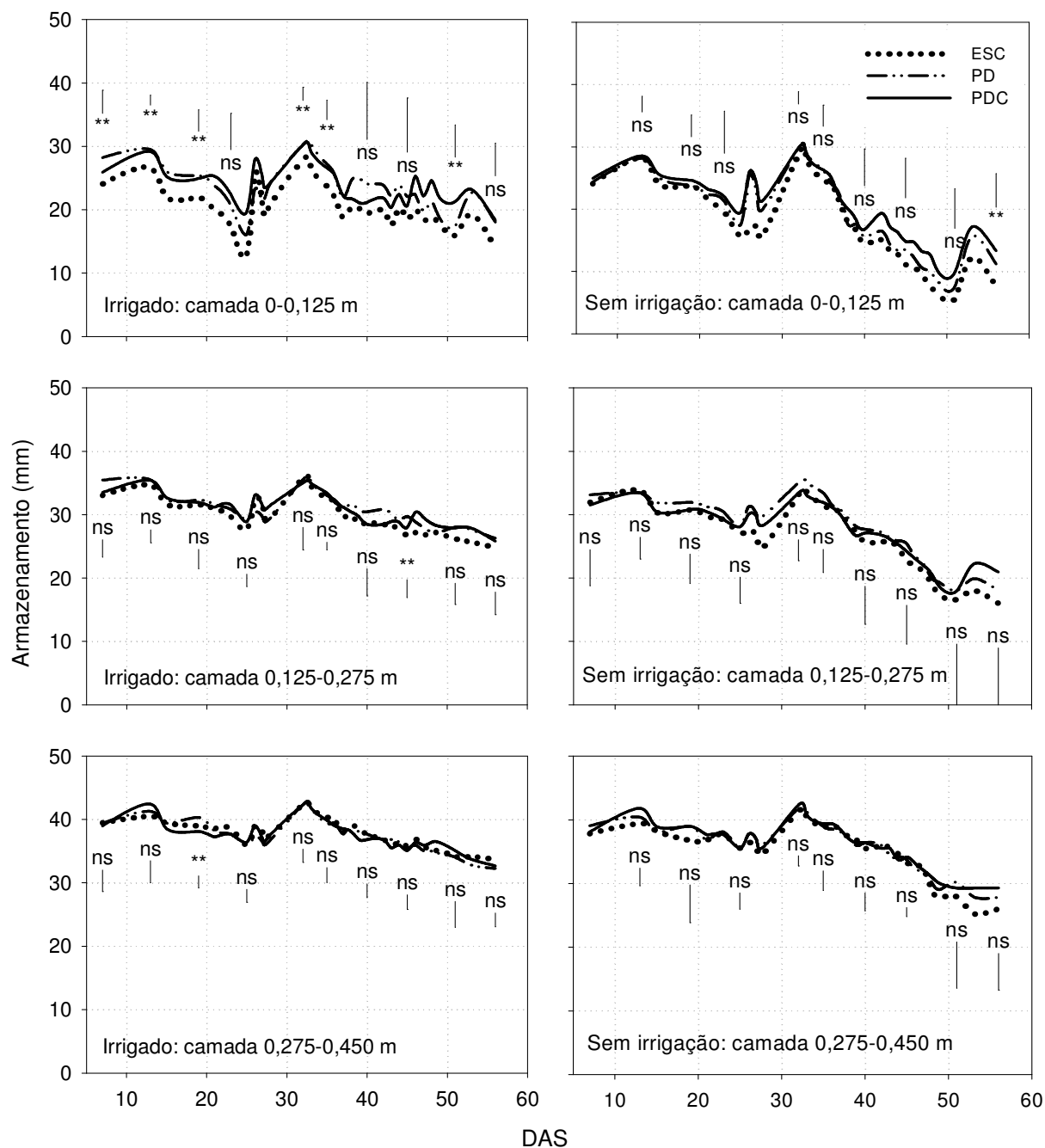


Figura 13 – Variação do armazenamento por camada de solo, dos 7 aos 56 DAS, em diferentes níveis de compactação, com e sem irrigação.

A análise de variância, comparando os níveis de compactação em cada nível de irrigação, mostrou diferenças significativas predominantemente na primeira camada. Observa-se que o DMS de Tukey a 0,05 (barras verticais) na maioria dos dias está acima de 5 mm, chegando em alguns casos a 10 mm, exigindo assim uma diferença relativamente grande (dadas as constantes hídricas deste solo) para que haja significância estatística na comparação das médias dos níveis de compactação.

Como essa medida é influenciada pelo quadrado médio do erro experimental, salienta-se que ela representa na verdade a dificuldade de se estabelecer unidades experimentais homogêneas quando se trata de ambiente físico do solo, sobretudo quando se intervém na estrutura do solo (ESC e PDC) e, portanto, não deve ser entendida como resultado de um controle experimental inadequado.

De acordo com os valores de CC ($0,227$, $0,233$ e $0,238 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, respectivamente para o ESC, PD e PDC, na camada de $0-0,10 \text{ m}$ e de $0,222$, $0,228$ e $0,224 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, respectivamente para o ESC, PD e PDC, na camada de $0,15-0,25 \text{ m}$), o armazenamento na CC seria de 28 , 29 e 30 mm , respectivamente para o ESC, PD e PDC na camada de $0-0,125$ e de 39 , 40 , e 40 mm , respectivamente para o ESC, PD e PDC na camada de $0,125-0,275 \text{ m}$. Observa-se, pela Figura 13, que, aos 32 DAS, nas referidas camadas de solo, o armazenamento esteve na condição de CC e foi bastante semelhante entre os níveis de compactação. A partir desse momento, o armazenamento decresceu gradativamente à medida que aumentou o período sem chuvas, a taxas maiores nos níveis de compactação sem irrigação. A semelhança do armazenamento na condição de CC entre diferentes preparos do solo (revolvido, escarificado e semeadura direta) também foi verificada por Silva (2005) em um Argissolo, enquanto que Rojas; Van Lier (1999), também em Argissolo, observaram maior retenção de água, na camada de $0-20 \text{ cm}$, em preparo convencional em relação à semeadura direta, atribuída a um aumento da microporosidade do solo no preparo convencional. Neste estudo, porém, não houve diferença significativa na microporosidade do solo entre níveis de compactação (Tabela 2), o que pode ter ocasionado semelhança no armazenamento na condição de CC.

Nos níveis de compactação com irrigação, embora tenha havido decréscimo progressivo no armazenamento ao longo do período, os menores valores ficaram em torno de 75% do armazenamento na condição de CC (média de 22 e 30 mm , respectivamente para as camadas de $0-0,125$ e $0,125-0,275$), ao final do período sem chuvas (51 DAS). Assim, as lâminas de água aplicadas via irrigação garantiram a manutenção da umidade do solo próxima ou superior a 75% da umidade na CC, que era o propósito do manejo da irrigação.

Nos níveis de compactação sem irrigação, o armazenamento chegou a valores de 6 , 7 , e 9 mm , respectivamente para o ESC, PD e PDC, na camada de $0-0,125 \text{ m}$ e 17 , 18 e 19 mm , respectivamente para o ESC, PD e PDC, na camada de

0,125-0,275 m, aos 51 DAS. Em razão disso, o armazenamento médio sem irrigação foi reduzido para 25 e 45 % do armazenamento na CC, respectivamente nas camadas de 0-0,125 e 0,125-0,275 m. Como o armazenamento no PMP foi de 11 mm (39 % sobre CC) e 16 mm (40 % sobre CC), respectivamente para a camada de 0-0,125 e 0,125-0,275, verifica-se que de fato ocorreu déficit hídrico, considerando-se as duas primeiras camadas de solo, ao ponto de afetar a produção da cultura. Verifica-se, também, que no ESC o armazenamento se situou em uma posição inferior, independente da irrigação. Essa diferença, embora estatisticamente não significativa, pode ser notada inclusive na camada de 0,275-0,450, ao final do período sem chuvas.

Na camada de 0,275-0,450 m, a variação do armazenamento não foi tão expressiva, quando comparada às camadas suprajacentes, e entre os níveis de compactação essas diferenças são ainda menos marcantes.

O armazenamento total, na condição de umidade do solo na CC, em todas as camadas (35 DAS) foi em média 98 mm. Aos 51 DAS, o armazenamento foi reduzido para valores médios em torno de 80 e 54 mm, respectivamente nos níveis de compactação com e sem irrigação (Figura 14). Assumindo que a partir dos 35 DAS (24 h após cessar a chuva) a perda de água ocorreu somente por evapotranspiração, e sendo a lâmina de irrigação aplicada nesse período de 72 mm, a lâmina de água evapotranspirada nos níveis de compactação com irrigação foi de $98 \text{ mm} - 80 \text{ mm} + 72 \text{ mm} = 90 \text{ mm}$, que corresponde a uma evapotranspiração média diária de $4,7 \text{ mm dia}^{-1}$. Nos níveis de compactação sem irrigação, a lâmina de água evapotranspirada foi de $98 \text{ mm} - 54 \text{ mm} = 42 \text{ mm}$, que corresponde a uma evapotranspiração média diária de $2,2 \text{ mm dia}^{-1}$. Assim, o déficit hídrico no período pode ser considerado como a diferença entre a lâmina evapotranspirada dos níveis de compactação com e sem irrigação, resultando num déficit hídrico de 48 mm.

Do ponto de vista do conteúdo de água no solo, a primeira interpretação do gráfico do armazenamento total, dos níveis de compactação sem irrigação (Figura 13), seria que a deficiência de água para a cultura foi maior no ESC, porque a umidade do solo chegou a níveis mais baixos no final do período. Por outro lado, se fosse feito o cálculo do déficit hídrico em cada nível de compactação, da mesma forma descrita acima, a interpretação é de que a restrição de água para a cultura foi menor no ESC, pois neste a lâmina evapotranspirada foi maior; assim, o solo disponibilizou mais água para as plantas. Essas inferências não explicam

satisfatoriamente as causas reguladoras dos fluxos hídricos no solo e, além disso, permitiriam apenas inferir sobre o efeito dos níveis de compactação sobre as culturas. A associação de informações da cultura é imprescindível, visto que a quantidade de água que circulou no sistema solo-planta-atmosfera foi função da dimensão das estruturas da planta que interagiram com as demais partes do sistema, ou seja, raízes com o solo e folhas com a atmosfera.

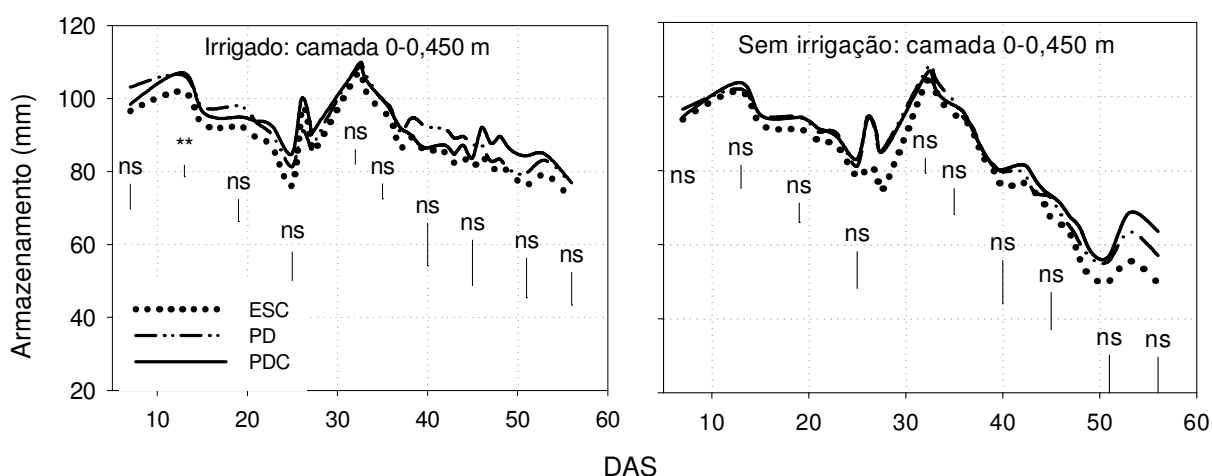


Figura 14 – Variação do armazenamento total, dos 7 aos 56 DAS, em diferentes níveis de compactação, com e sem irrigação.

Quando a zona de restrição é deslocada para maiores profundidades (ESC), o crescimento das raízes é favorecido, e essas podem acessar uma maior quantidade de água (UNGER; KASPAR, 1994). Com isso, ocorre um maior avanço da frente de extração de água no solo (CARLESSO, 1995), o que pode explicar o menor armazenamento no ESC. Como as diferenças na capacidade de armazenamento (considerando a umidade na CC) foram pequenas entre os níveis de compactação, o maior aprofundamento das raízes, possível de ter ocorrido no ESC (PELLEGRINI et al., 2003; COLLARES, 2005), contabilizou muito mais água disponível para as plantas, comparativamente ao que as diferenças entre os níveis de compactação poderiam contabilizar.

Quanto à parte aérea, Santos; Carlesso (1999) sugerem uma relação indireta entre armazenamento e extração de água do solo pela cultura, ao verificarem que o maior desenvolvimento do dossel vegetativo das plantas de milho ocorreu em solo

onde o armazenamento decresceu mais. Os autores verificaram também que as plantas foram submetidas antes ao estresse hídrico, medido pelo enrolamento das folhas, nos solos onde o dossel vegetativo era maior. Os resultados obtidos por Santos; Carlesso (1999) foram semelhantes aos verificados neste trabalho, pois no ESC o armazenamento sofreu a maior redução e as plantas tiveram uma maior produção de área foliar (expressa pelo IAF), porém houve menor incremento do IAF, a partir do início do déficit hídrico (Figura 8). Isso reforça o exposto anteriormente de que o IAF e AP no ESC foram afetados mais pela umidade, enquanto no PDC a RP deve ter predominado como fator restritivo.

4.5 Potencial hídrico foliar

O comportamento do ψ_f durante o período de 37 aos 49 DAS está representado na Figura 15. As medidas foram iniciadas 3 dias após um período de intensa precipitação (136 mm) ocorrida entre os 28 e 34 DAS (Figura 4). As linhas do ψ_f foram representadas de forma contínua, mas as medições foram realizadas em dois subperíodos (37 aos 40 DAS e 43 aos 49 DAS) separados por um intervalo de 3 dias, no qual houve ocorrência de precipitações leves (8 mm). Os detalhes da análise da variância entre níveis de irrigação aos 39, 40, 44, 45 e 49 DAS são apresentados no APÊNDICE E.

O objetivo principal da análise do ψ_f era comparar os níveis de compactação por meio do potencial hídrico foliar relativo, conforme descrito na metodologia. No entanto, essa medida mostrou comportamento semelhante para todos os níveis de compactação, não sendo possível diferenciar os mesmos de forma consistente.

As causas disso podem ser inerentes à planta ou devido à metodologia utilizada. Dos mecanismos de tolerância ao estresse hídrico, o fechamento estomático parece ser o mais importante para controlar as perdas de água por transpiração e, por consequência, regula o ψ_f , enquanto que a indução do crescimento radicular tem por função suprir as necessidades de água da planta (TAIZ; ZEIGER, 2004).

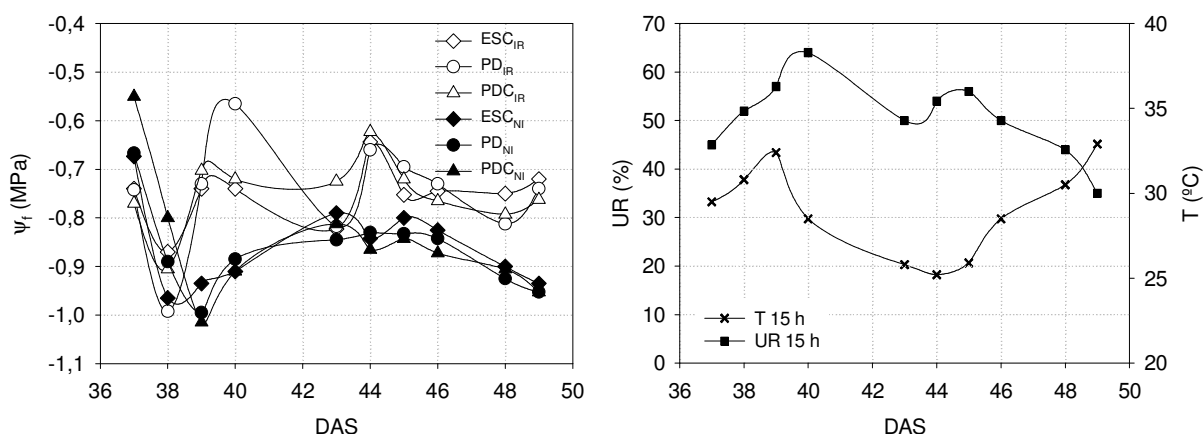


Figura 15 – Variação temporal do potencial hídrico foliar, em diferentes níveis de compactação, e da temperatura e umidade relativa do ar.

Em relação ao equipamento, dados na literatura demonstram que as medidas de ψ_f pela câmara de pressão refletem bem mais o estado de energia da água no pecíolo e nervuras das folhas do que no tecido do parênquima, devido à resistência ao fluxo de água entre estes tecidos (BOYER, 1966; TURNER et al., 1984).

Entretanto, Coelho et al. (2000), avaliando o efeito da compactação sobre a cultura do algodoeiro, observaram menor ψ_f no tratamento compactado, porém em apenas um dos dois cultivos. Comparando o efeito de níveis de irrigação em ambiente protegido sobre o ψ_f de hortaliças, Thompson et al. (2007) conseguiram identificar o momento de divergência do ψ_f de plantas não irrigadas em relação ao ψ_f de plantas irrigadas, e definiram esse momento como o início do estresse hídrico. Neste trabalho, o início de divergência do ψ_f ocorreu aos 38 DAS, havendo uma ligeira convergência aos 43 DAS, devido às precipitações de 8 mm ocorridas aos 41 e 42 DAS. Entre níveis de compactação, a divergência do ψ_f não se mostrou de forma clara e consistente.

Porém, mesmo não tendo sido possível distinguir momentos diferentes para o início da redução progressiva do ψ_f que indicasse o início de ocorrência de estresse hídrico, o comportamento do ψ_f indica que a cultura esteve realmente submetida à falta de água nos níveis de compactação sem irrigação. Isso indica que houve prejuízos em processos integrados como divisão e expansão celular e fotossíntese, que são afetados pelo déficit hídrico foliar (KANEMASU; TANNER, 1969) e

controlam o crescimento das plantas. Cultivares de feijoeiro que apresentaram maior ψ_f tiveram maior taxa fotossintética e estes dois parâmetros se relacionaram positivamente com o rendimento de grãos (KUMAR et al., 2007). Na formação de vagens de plantas de feijoeiro, estômatos abaxiais (sete vezes mais numerosos que os adaxiais) e adaxiais não foram afetados significativamente por ψ_f maiores que -1,1 e -0,8 MPa, respectivamente, mas a resistência estomática à difusão do vapor de água e CO₂ aumentou rapidamente a medida que o ψ_f diminui a partir desses valores, para prevenir uma maior queda no potencial da água nas folhas (KANEMASU; TANNER, 1969). Os autores verificaram ainda que 50 % dos estômatos abaxiais estavam abertos em ψ_f próximo de -0,9 MPa e quase totalmente fechados a -1,1 a -1,2 MPa. Um déficit hídrico durante 4 dias provocou um decréscimo no potencial hídrico para -1,1 MPa e causou heterogeneidade no padrão de assimilação de CO₂ em feijoeiro (GUNASEKERA; BERKOWITZ, 1982). Guimarães et al. (2006), estudando a adaptação do feijoeiro à seca, verificaram, na fase de floração, ψ_f mínimo de -0,97 e -1,07 MPa nas variedades não irrigadas e de -0,88 MPa em ambas variedades, quando irrigadas. Também estudando o comportamento de vários cultivares sob estresse hídrico, Kumar et al. (2007) observaram valores médios de ψ_f na fase de floração de -1,08 e -1,28 MPa, respectivamente para plantas irrigadas e não irrigadas, e, na fase de formação de vagens, obtiveram valores de -1,25 e -1,5 MP, respectivamente para plantas irrigadas e não irrigadas.

Pela Figura 15 verifica-se que, exceto aos 37 DAS, o ψ_f nos níveis de compactação sem irrigação ficou compreendido numa faixa entre -0,8 a -1,0 MPa, enquanto que, com irrigação, o ψ_f permaneceu a maior parte do tempo acima de -0,8 MPa. Esses valores de ψ_f , comparados os valores citados por Kanemasu; Tanner (1969), evidenciam a ocorrência do estresse hídrico e ajudam a explicar as menores taxas de evolução do IAF e altura de plantas, principalmente no ESC, a partir das 36 DAS (Figura 8). Porém o valor de -1,0 MPa indica um estresse hídrico não severo, comparado ao valor crítico de -1,5 MPa para feijoeiro (BOYER, 1973) apud Pimentel et al. (2000).

Observa-se pelos valores citados que a amplitude do ψ_f entre condições com e sem restrição hídrica não é muito grande. Em virtude disso, a diferenciação de

manejos em solo numa condição hídrica semelhante pode ser dificultada, sobretudo em condições de campo onde a variabilidade dos dados tende a ser maior. Com o objetivo de diferenciar sistemas de manejo de solo, Al-Darbi et al. (1987) observaram que o ψ_f de plantas de milho no período de polinização foi significativamente menor em solos mobilizados, comparado a solos sem mobilização, tanto nas medidas feitas pela manhã quanto à tarde, e nos dois solos, siltoso e arenoso. Os autores associaram os maiores potenciais com o maior armazenamento de água, verificados quando o solo não foi mobilizado. Com isso, concluíram que nos solos mobilizados as plantas com potenciais em torno de -1,35 MPa foram submetidas a um alto grau de estresse hídrico, comparadas às plantas com potenciais em torno de -1,25 MPa, em solo não mobilizado

O comportamento do ψ_f mostrou relação clara com o armazenamento, ao serem comparados os níveis de irrigação (Figura 14). No entanto, entre níveis de compactação, a relação não foi bem definida, embora as plantas apresentassem aspecto visual de turgidez bastante diferenciado entre os níveis de compactação sem irrigação (APENDICE G). O esperado era que o ψ_f indicasse a ocorrência de estresse hídrico primeiro no ESC e depois no PD, sob a hipótese de que o armazenamento de água seria maior no último, e que o crescimento radicular não apresentasse diferenças marcantes em ambos os níveis de compactação. Porém, como discutido no item 4.4, a capacidade de armazenamento de água do solo (umidade na capacidade de campo) diferiu pouco entre os níveis de compactação (Figura 14). Como o crescimento radicular e parte aérea das culturas mantêm um certo equilíbrio, acredita-se que a maior evapotranspiração no ESC – em razão da maior área foliar, expressa em termos de IAF (Figura 8), que causaria evapotranspiração a taxas maiores, decrescendo mais rapidamente as reservas de água no solo – foi compensada pela expansão do sistema radicular, que por sua vez permitiu às plantas explorar um maior volume de solo, garantindo maior suprimento de água. Essa interpretação parece estar coerente com o comportamento do armazenamento total de água no solo no ESC. Além disso, os mecanismos fisiológicos das plantas, como o fechamento estomático (TAIZ; ZEIGER, 2004), reguladores da turgescência foliar impediram a ocorrência de diferenças expressivas no ψ_f , para a intensidade de déficit hídrico ocorrido no período, visto que os valores

mínimos de ψ_f (-1,0) estiveram bem acima do considerado crítico (-1,5) por Boyer (1973) apud Pimentel et al. (2000).

Em relação ao ambiente percebe-se que o ψ_f esteve bastante relacionado com a temperatura e a umidade relativa do ar. Possivelmente, o efeito do ambiente tenha se sobreposto ao efeito do déficit hídrico estabelecido nos diferentes níveis de compactação, dificultando, assim, a distinção destes. Observa-se que, mesmo com irrigação, o ψ_f manteve tendência decrescente a partir dos 44 DAS, coincidindo com a elevação da temperatura e a queda da umidade relativa. Esses resultados concordam com os verificados por Guimarães et al. (2006) em feijoeiro, Bergonci et al. (2000) em milho, Manfron et al. (1996) em trigo e Pereira; Vila Nova (2002) em batata. Dessa forma, em condição de campo, o ψ_f refletiu bem o ambiente hídrico e térmico dos componentes solo e atmosfera, porém não mostrou clareza suficiente para diferenciar níveis de compactação. No entanto, foi uma medida confirmadora de que a condição hídrica do solo foi insuficiente para suprir a demanda da cultura, contribuindo, assim, na interpretação do efeito dos níveis de compactação sobre variáveis da planta, em condições de estresse hídrico e sem estresse. Essa abordagem foi feita por meio da análise de correlação e está descrita no item 4.8.

4.6 Evapotranspiração real

O cálculo da *ETR* foi efetuado para o período de 35 a 51 DAS e seu comportamento está representado na Figura 16. Na data correspondente a 41 DAS não foi feita leitura de umidade no solo por ocorrência de chuva, por isso a *ETR* não foi calculada para este dia. Em razão disso a Figura 16 não mostra incremento acumulado aos 42 DAS.

Da mesma forma que para o ψ_f , o objetivo principal da análise da *ETR* era comparar os níveis de compactação por meio da *ETR* relativa, conforme descrito na metodologia. No entanto, essa medida mostrou comportamento semelhante para todos os níveis de compactação, não sendo possível diferenciar os mesmos de forma consistente. Porém, López; Arrué (1997) verificaram menor evapotranspiração no sistema de semeadura direta, comparado ao cultivo mínimo e convencional, na maioria dos quatro locais onde a cultura da cevada foi avaliada por dois cultivos,

numa região semi-árida da Espanha. Os autores associaram a redução da evapotranspiração com o menor crescimento das plantas, e relatam trabalhos nos quais níveis de RP acima de 2 MPa também estiveram relacionados com menor evapotranspiração. Relatam, ainda, que a evaporação teve uma participação de 30 a 60 % da quantidade de água evapotranspirada, e esteve relacionada tanto com a cobertura da cultura quanto com a quantidade de resíduos na superfície do solo.

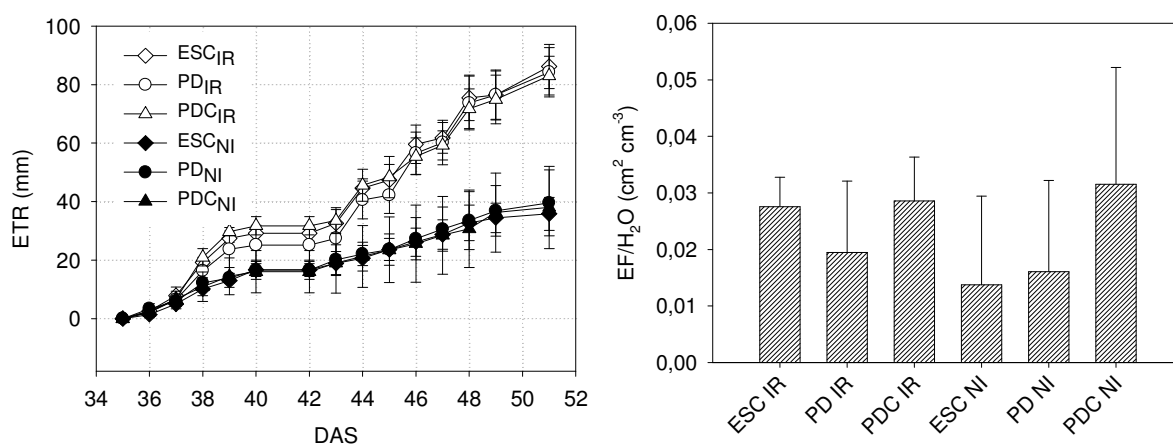


Figura 16 – Evapotranspiração acumulada dos 35 aos 51 DAS e expansão foliar por unidade de volume de água evapotranspirada*, em diferentes níveis de compactação, com e sem irrigação. *Para o cálculo, foi usado o IAF médio das medidas aos 38 e 56 DAS e a ETR ocorrida dos 38 aos 51 DAS.

Neste trabalho, o maior dossel da cultura (dados os maiores IAF e altura de plantas) deve ter causado maior transpiração na ordem ESC>PD>PDC. Ao contrário, a contribuição da evaporação deve ter sido decrescente na sequência PDC>PD>ESC, inversamente proporcional à cobertura do solo promovida pelo dossel da cultura. Estudando o crescimento da cultivar de feijão pérola em quatro densidades de semeadura, Jauer et al. (2003) verificaram que a completa cobertura do solo pela superfície foliar coincidiu com o IAF de 6,7, o qual foi o valor máximo observado. O valor máximo de IAF, neste estudo, foi de 6,1 no ESC com irrigação, o que indica que, nos demais casos, o solo esteve descoberto em níveis inversos à superfície vegetal da cultura, em cada nível de compactação e irrigação. Em vista disso, a evaporação deve ter participado com uma parcela expressiva no total de água evapotranspirada, principalmente no PDC, enquanto que no ESC a

transpiração deve ter predominado. A combinação desses dois processos simultâneos pode ter sido a causa das semelhanças na *ETR* entre os níveis de compactação, o que dificulta a comparação entre eles, pois a evatranspiração foi controlada não apenas por um efeito simples do solo, mas sim por efeitos combinados do conjunto solo-planta.

Embora tenha havido semelhança na quantidade de água evapotranspirada, as plantas fizeram uso da água de maneira distinta. O gráfico em colunas da Figura 16 mostra a expansão da área foliar em relação à água evapotranspirada no período de 38 a 51 DAS. É importante salientar que o cálculo não considera apenas a água transpirada, mas sim a soma da transpiração mais evaporação. Caso fosse considerada apenas a parcela de água transpirada, as diferenças seriam ainda mais marcantes, pois a transpiração deve ter sido decrescente no sentido ESC>PD>PDC, como discutido acima. De qualquer forma, o gráfico mostra como as plantas converteram a água evapotranspirada em área foliar, ou priorizaram certos processos fisiológicos que competem pelo uso da água, como expansão e controle da temperatura foliar (TAIZ; ZEIGER, 2004). Essa informação é importante, porque integra os efeitos das várias partes do sistema solo-planta-atmosfera, do qual o solo com suas peculiaridades do manejo é apenas uma delas.

No PDC sem irrigação, as plantas produziram mais área foliar por unidade de água, enquanto que no ESC e PD foram priorizados os processos fisiológicos de controle da temperatura foliar, restando menos água disponível para a expansão e multiplicação celular, que decresce à medida que as células perdem sua turgidez (TAIZ; ZEIGER, 2004). Nos níveis de compactação com irrigação, embora com maior dossel, o que demandaria um consumo maior de água para controle da temperatura, as plantas tiveram suprimento de água que permitiu tanto o controle da temperatura quanto expansão foliar. Dessa forma, o comportamento da *ETR*, à semelhança do ψ_f , informa de maneira geral que os níveis de compactação sem irrigação estiveram sob déficit hídrico, enquanto que a expansão foliar por unidade de água evapotranspirada, à semelhança do IAF, indica que no ESC e PD o efeito do déficit hídrico foi mais acentuado. A evapotranspiração média acumulada aos 51 DAS foi de 84 e 37 mm, respectivamente para os níveis de compactação com e sem irrigação, resultando num déficit transpiratório de 47 mm. Verifica-se que esses valores são bem próximos aos valores calculados anteriormente, considerando-se apenas a variação do armazenamento. Portanto, a contribuição dos fluxos por

ascensão capilar ou drenagem profunda foi pouco expressiva e a variação do armazenamento por si só forneceu uma boa estimativa da evapotranspiração. Ressalta-se ainda que o cálculo da evapotranspiração a partir do balanço hídrico envolveu muitas estimativas, conforme descrito na metodologia, e pode não ter reproduzido tão bem a verdadeira evapotranspiração ocorrida. De qualquer forma, o valor médio foi semelhante (48 e 47 mm), com a única diferença que a aproximação da *ETR* pela variação do armazenamento mostrou melhor a diferença entre níveis de compactação.

4.7 Rendimento de grãos

A Figura 17 mostra o rendimento de grãos em cada nível de compactação e irrigação. Não houve interação significativa entre níveis de compactação e irrigação a 0,05 de probabilidade de erro (APÊNDICE F). No entanto, verifica-se que houve comportamento distinto do rendimento de grãos nos níveis de compactação ESC e PD que possivelmente tenha importância biológica e sobretudo econômica do ponto de vista do manejo da irrigação. Possivelmente, a não significância se deve ao fato de a subdivisão de parcelas retirar graus de liberdade do erro experimental, aumentando o quadrado médio do erro, com conseqüente redução do valor de “F” calculado. Além disso, a não significância para blocos (APÊNDICE F) indica que seu uso (para a variável rendimento) não foi eficiente para reduzir o erro experimental e aumentar a possibilidade de significância no teste de interação. Interação entre sistema de preparo, lâmina de água e cultivar foi verificada por Stone; Moreira (2000), e o plantio direto com cobertura morta adicional (8 t ha⁻¹ de acículas de pinus) foi o tratamento com maiores rendimentos em todas as lâminas de água, chegando ao rendimento máximo de 2.500 kg. Os autores atribuíram esse resultado a diferenças na evaporação da água em relação aos tratamentos revolvidos e plantio direto, o que, em termos de eficiência no uso da água, proporcionou 14 e 30 % de economia de água, respectivamente para a cultivar Aporé e Safira.

Em relação aos níveis de irrigação houve diferença significativa (Figura 17). A maior média (3.106 kg ha⁻¹) foi obtida com irrigação e a menor (2.128 kg ha⁻¹) sem irrigação. Com irrigação, o rendimento de grãos foi maior no PD o que pode estar relacionado a maior eficiência no uso da água, conforme verificado por Stone;

Moreira (2000). Relacionando preparos de solo com e sem mobilização sob irrigação, Stone; Silveira (1999) verificaram maior produtividade no plantio direto, atribuindo esse resultado aos menores valores e à menor variação ao longo do ciclo, da tensão matricial da água no solo.

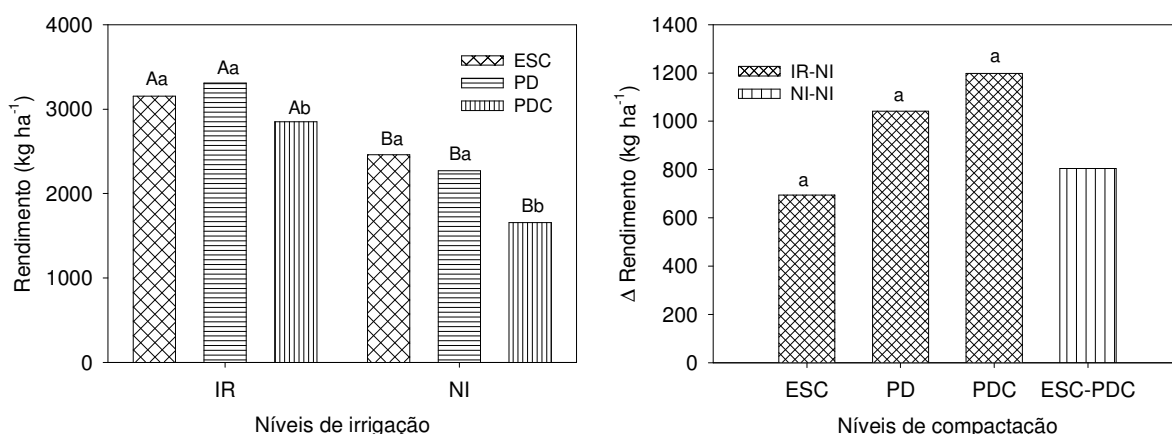


Figura 17 – Rendimento de grão da cultura do feijoeiro em diferentes níveis de compactação, com (IR) e sem (NI) irrigação, e incrementos médios de rendimento (Δ rendimento) obtidos com a irrigação (▨) e pela diferença entre ESC e PDC sem irrigação (▤). Letras maiúsculas comparam os níveis de irrigação, e as letras minúsculas, os níveis de compactação e o Δ rendimento, pelo teste de Tukey a 0,05 de probabilidade de erro.

Nos níveis de compactação, o rendimento de grãos também diferiu significativamente, sendo que o ESC e o PD apresentaram as maiores médias (2.807 e 2.791 kg ha⁻¹, respectivamente) e diferiram do PDC (2.254 kg ha⁻¹), pelo teste de Tukey a 0,05. Os resultados verificados no PD e PDC corroboram os obtidos por Streck (2003), Collares (2005) e Lima et al. (2006). Esses autores verificaram que a cultura do feijoeiro se mostrou bastante sensível à compactação, chegando a reduções de rendimento, relativos ao plantio direto, de 40 e 62 %, respectivamente nos tratamentos com duas e quatro passadas de uma máquina de 10 Mg (STRECK, 2003), e 29 e 54 % nos tratamentos compactados com uma máquina de 10 Mg do experimento 1 e 2, respectivamente (COLLARES, 2005). Neste trabalho, a redução no rendimento de grãos do PDC foi de 27 e 33 % relativo, respectivamente ao PD e ESC – apenas entre os níveis de compactação sem irrigação, condição de manejo dos autores citados acima.

Muitos trabalhos têm evidenciado que, quando a compactação é induzida por tráfego intenso, as culturas diminuem a produção em relação ao plantio direto (STRECK, 2003; SECCO et al., 2005; COLLARES, 2005; LIMA et al., 2006; FREDDI et al., 2007; FREDDI et al., 2008; BEUTLER et al., 2007). Porém, quando se compara plantio direto com mobilização do solo, seja por escarificação, aração ou gradagem, a resposta das culturas tem sido variada. Silva (2003) não verificou diferença significativa no rendimento de grãos de feijoeiro em plantio direto, preparo convencional e preparo reduzido. O autor também não observou diferença significativa no rendimento da soja entre escarificado e distintos estados de compactação, porém observou diferença significativa para rendimento de milho, sendo que o maior rendimento foi obtido no escarificado. Stone; Silveira (1999) verificaram maior produtividade no plantio direto e menor nos tratamentos com solo mobilizado. Secco et al. (2004) obtiveram rendimentos semelhantes de vários cultivares de soja, cultivados em plantio direto e escarificado. Marcolan; Anghinoni (2006) não verificaram diferença significativa na produção de milho após 12 anos de sistema plantio direto e convencional. Comparando sistemas de manejo de solo e de rotação de culturas, durante quatro anos (1986 a 2002), dos Santos et al. (2006) obtiveram os maiores rendimentos de grãos de soja, em todos os anos, no plantio direto, tanto contínuo como sobre cultivo mínimo no inverno, enquanto que os menores rendimentos foram observados nos tratamentos que receberam preparo convencional no inverno (arado de discos e de aivecas), e semeadura direta, no verão.

Observa-se que o rendimento de grãos no PDC sem irrigação foi bem inferior ao melhores rendimentos obtidos nesse experimento. Da mesma forma, o IAF e a altura de plantas foram sensivelmente afetados. No entanto, a magnitude como a compactação adicional afetou o IAF, a altura de plantas e o rendimento foi diferente, quando comparado o PDC com e sem irrigação. O IAF e a altura de plantas foram semelhantes no PDC com e sem irrigação (Figura 8), enquanto que o rendimento teve uma diferença de 804 kg ha^{-1} . Isso se deve ao fato de o déficit hídrico ter ocorrido de forma mais intensa (43 aos 49 DAS) quando as plantas já haviam entrado no período reprodutivo, momento a partir do qual a emissão e expansão de folhas e a altura das plantas é menos intensa, comparado às fases anteriores. Nessa circunstância, o efeito da compactação teria sido subestimado pela simples interpretação do IAF e altura de plantas. Contudo, o rendimento de grãos parece ter

expressado melhor os efeitos combinados da compactação e déficit hídrico. Verifica-se, portanto, que a existência de compactação pode não ser sinônimo de baixos rendimentos (PDC_{IR}), e que seu efeito sobre as plantas pode não ser claramente identificado e mensurado se não forem feitas várias determinações, envolvendo um grande período do ciclo da cultura, e analisadas conjuntamente.

Baseado nos valores de densidade do solo das camadas de 0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,40 m (1,77, 1,71 e 1,70 g cm⁻³, respectivamente) do PDC (Tabela 2) verifica-se que o estado de compactação é elevado, considerando como referência os valores críticos de densidade do solo, sugeridos por Reichert et al. (2007). De acordo com a relação da densidade crítica com o teor de argila do solo, apresentada pelos autores, para o solo deste experimento (150 g kg⁻¹ de argila em média de 0-0,30 m) os valores críticos de densidade do solo são iguais a 1,69 e 1,76 g cm⁻³, quando considerados, respectivamente, critérios fisiológicos ou a partir do intervalo hídrico ótimo igual a zero. Parece não haver dúvida de que um solo que apresente estado de compactação semelhante ao do PDC deve sofrer alguma medida imediata de alívio da compactação, caso contrário a produção estaria na dependência de irrigação ou normalidade das precipitações.

Em relação ao PD, os valores de densidade do solo das camadas de 0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,40 m (1,69, 1,69 e 1,68 g cm⁻³, respectivamente) (Tabela 2), dependendo do critério utilizado podem ser considerados iguais ou superiores aos limites críticos (REICHERT et al., 2007). Verifica-se que, para o caso do PD, a intervenção no sistema com mobilização do solo não foi uma opção vantajosa significativamente, mesmo com a ocorrência de déficit hídrico (Figura 17). Como alertam Reinert et al. (2001), o uso de um fator isolado pode não ter significado nenhum, dada a inter-relação e complexidade como os atributos do solo atuam sobre os fatores de crescimento. Possivelmente, os vários anos de plantio direto possibilitaram a construção de um ambiente favorável ao crescimento radicular, e mesmo com valores relativamente altos de densidade e RP o crescimento das plantas não foi prejudicado (MARTINO; SHAYKEWICH, 1993).

Pela análise dos incrementos médios de rendimento obtidos com a irrigação (Δ rendimento), observa-se que o efeito da irrigação é mais pronunciado nos maiores níveis de compactação (Figura 17). Embora não significativo a 0,05 de probabilidade de erro e significativo a 0,10 (APÊNDICE F), percebe-se que as diferenças são importantes em termos de rendimento de grãos. Estes resultados estão de acordo

com a afirmação de Reichert et al. (2007) de que os efeitos da compactação são percebidos de forma mais clara em anos de déficit hídrico. Avaliando o efeito de níveis de compactação sobre o rendimento de soja, Beutler (2007) concluiu que, em cultivo irrigado, a soja tolera maior compactação. O autor verificou reduções no rendimento de 19 e 12 % nos maiores níveis de compactação com e sem irrigação, respectivamente, em relação ao menor nível de compactação. Lowery; Schuler (1991) alertam que o efeito da compactação pode se estender por vários anos. Pode não afetar as culturas em anos normais, mas reaparece em condições climáticas adversas. Unguer; Kaspar (1994) sugerem que o efeito prejudicial da compactação sobre o crescimento de raízes pode ser atenuado ao se coincidir o período de crescimento das culturas com boas condições de umidade do solo, possibilitando às raízes penetrarem na camada compactada. Além desse benefício imediato, a cultura subsequente pode ser menos prejudicada, pois encontrará caminhos preferências para o crescimento radicular (MARTINO; SHAYKEWICH, 1993).

Outra observação importante na análise do Δ rendimento, e tomando como referência o rendimento no PDC sem irrigação, é que a inclusão da irrigação proporcionou um incremento de 1.200 kg ha⁻¹, enquanto que a escarificação sem irrigação proporcionou um incremento de 804 kg ha⁻¹. Não é objetivo deste trabalho fazer uma análise de custo-benefício, muito menos sugerir que irrigação ou escarificação devem ser empregadas separadamente. Porém, os resultados deste estudo parecem indicar que, em um solo fisicamente bom para o crescimento das culturas, a demanda por irrigação deve ser menor, diminuindo assim os custos de produção. Nesse sentido, verifica-se que a escarificação pode ser uma alternativa imediata para solucionar problemas de baixo rendimento das culturas, ocasionado por compactação do solo.

Considerando conjuntamente o IAF, altura de plantas e rendimento de grãos verifica-se que o menor armazenamento no ESC sem irrigação, embora tenha reduzido as taxas de evolução do IAF e da altura de plantas, não comprometeu o rendimento de grãos. Em vista disso, o menor armazenamento de água no ESC parece ter sido relacionado mais com uma maior disponibilidade de água ou maior exploração pelo sistema radicular do que com menor capacidade de armazenamento do solo.

4.8 Relações entre variáveis de planta e solo

As relações entre variáveis de planta e solo foram efetuadas considerando-se a primeira e a segunda camada de solo (espessuras depende da variável medida), porque nessas camadas os níveis de compactação ficaram mais bem definidos. A Tabela 3 mostra os resultados da correlação de variáveis de planta com a densidade e porosidades.

Com irrigação houve apenas correlação entre altura de plantas e macroporosidade na camada de 0-0,10 m, porém com grau de associação não muito elevado ($r=0,58$). Ao contrário, sem irrigação houve correlação significativa entre rendimento de grãos e todas as variáveis de solo, nas duas camadas. Na camada de 0-0,10 m, os maiores graus de associação do rendimento de grãos foram obtidos com a macroporosidade ($r=0,62$) e microporosidade ($r=-0,78$). E considerando todas as variáveis de solo, a camada de 0-0,10 m foi a que apresentou os maiores coeficientes de correlação com o rendimento, devido a melhor diferenciação dos níveis de compactação nessa camada.

Por estes resultados verifica-se que o efeito da compactação do solo sobre as culturas está associado à condição hídrica. Isso ficou comprovado pela ausência de correlação significativa entre o rendimento e os indicadores da compactação, como densidade e macroporosidade, quando a cultura foi mantida irrigada. Diferentemente, quando as plantas estiveram sob déficit hídrico, as correlações entre o rendimento e os indicadores da compactação foram significativas. Por causa dessa dependência, o uso isolado de indicadores da compactação pode não ter sentido prático (REINERT et al., 2001). Além disso, estas correlações expressam um efeito indireto de fatores que são diretamente relacionados com a produção dos cultivos, como a umidade e RP (LETEY, 1985). Esses últimos, portanto, devem representar melhor o efeito da compactação sobre as culturas. Mesmo assim, as correlações entre rendimento e variáveis de solo foram importantes. Elas sugerem cautela ao se inferir sobre os efeitos da compactação sobre as culturas, quando são considerados somente indicadores de solo, como densidade e porosidade, visto que a resposta das plantas dependeu da condição hídrica do solo.

A Tabela 4 mostra os resultados da correlação linear de Pearson entre variáveis de planta e as medidas temporais e de intensidade da RP. Houve correlação do tempo transcorrido até a RP atingir o valor de 2 MPa ($\text{DiasRP}_{\text{RP}<2\text{MPa}}$)

com altura de plantas e rendimento de grãos, na camada 0-0,10 m. Também na camada 0-0,10 m houve correlação entre a intensidade da RP, medida pela diferença entre o valor máximo da RP no período analisado menos o valor de 2 MPa ($\Delta RP_{[RP_{\text{máx}}-2\text{MPa}]}$), e o rendimento de grãos.

Tabela 3 – Coeficientes de correlação de linear de Pearson (r) entre variáveis de planta e de solo, nas camadas de 0-0,10 e 0,10-0,20 m, em dois níveis de irrigação. IAF = índice de área foliar, AP = altura de plantas, REND = rendimento de grãos, Ds = densidade do solo, Pt = porosidade total, Ma = macroporosidade e Mi = microporosidade.

		AP*	IAF*	REND
		Com irrigação		
Camada 0-0,10 m	Ds	-0,55 ns	-0,50 ns	0,08 ns
	Pt	0,56 ns	0,50 ns	-0,07 ns
	Ma	0,58 **	0,51 ns	-0,36 ns
	Mi	-0,15 ns	-0,05 ns	-0,16 ns
	Sem irrigação			
	Ds	-0,23 ns	-0,07 ns	-0,59 **
	Pt	0,21 ns	0,04 ns	0,59 **
	Ma	0,13 ns	0,17 ns	0,62 **
Camada 0,10-0,20 m	Mi	0,16 ns	-0,27 ns	-0,78 **
	Com irrigação			
	Ds	-0,33 ns	-0,28 ns	-0,21 ns
	Pt	0,32 ns	0,25 ns	0,18 ns
	Ma	0,16 ns	0,20 ns	0,04 ns
	Mi	0,36 ns	0,08 ns	0,32 ns
	Sem irrigação			
	Ds	0,23 ns	0,33 ns	-0,40 **
	Pt	-0,20 ns	-0,30 ns	0,36 **
	Ma	-0,18 ns	-0,21 ns	0,45 **
	Mi	0,06 ns	-0,16 ns	-0,51 **

* Determinações aos 56 DAS (26/03). ** significativo a 0,05, ns = não significativo.

Para as correlações significativas, o grau de associação entre as variáveis foi acima de 70 %. Além disso, essas correlações representam uma relação direta de causa e efeito entre fatores físicos do solo e processos da planta e devem, portanto, ser prioritárias no estudo do efeito da compactação do solo sobre as culturas (LETEY, 1985).

Tabela 4 – Coeficientes de correlação de linear de Pearson (r) entre variáveis de planta e as medidas temporais e de intensidade da RP. IAF = índice de área foliar, AP = altura de plantas, REND = rendimento de grãos, DiasRP_[RP<2MPa] = dias até a resistência à penetração atingir o valor de 2 MPa, $\Delta RP_{[RP\acute{m}ax-2MPa]}$ = incrementos de RP maiores que 2MPa.

	AP*	IAF*	REND
Camada 0-0,10 m			
$\Delta RP_{[RP\acute{m}ax-2MPa]}$	-0,51 ns	-0,16 ns	-0,72 **
DiasRP _[RP<2MPa]	0,90 **	0,53 ns	0,77 **
Camada de 0,15-0,25 m			
$\Delta RP_{[RP\acute{m}ax-2MPa]}$	0,06 ns	0,06 ns	-0,52 ns
DiasRP _[RP<2MPa]	0,02 ns	0,18 ns	0,56 ns

* Determinações aos 56 DAS (26/03). ** = significativo a 5 %, ns = não significativo.

Na segunda camada não foram verificadas correlações significativas. A explicação mais provável é porque PD e PDC, principalmente, mostraram pouca diferença tanto na densidade como na porosidade e RP (Tabela 2 e Figura 6) e, por causa disso, as equações de estimativa da RP em função da umidade não mostraram diferença entre si (Figura 11). Por consequência, a RP estimada pelas equações foi semelhante e pode-se dizer coerente com as similaridades da camada, em ambos os níveis de compactação. Além disso, no ESC a RP deve ter afetado pouco o rendimento de grãos comparada com o déficit hídrico.

Conforme o enunciado das hipóteses, verifica-se que valores indicadores de restrição de resistência à penetração (2 MPa) ocorreram em momentos diferentes entre os níveis de compactação (Figura 12). A RP de 2 MPa ocorreu aos 33 e 40 DAS, respectivamente no PDC e PD (camada 0-0,10 m) e aos 37 DAS no PDC e PD e aos 47 DAS, no ESC (camada 0,15-0,25 m). A mesma afirmação não é possível

de ser feita em relação ao potencial hídrico foliar relativo e evapotranspiração real relativa, o que não significa que eles não são diferentes, apenas não se diferenciaram suficientemente para separar os efeitos dos níveis de compactação. Por essas razões, as determinações da cultura puderam ser testadas apenas com o tempo para a RP atingir o valor de 2 MPa e com a intensidade acima desse valor.

Contudo, observa-se que o ψ_f e a ETR indicaram o início de déficit hídrico aos 38 DAS (Figuras 15 e 16) que ocorreu relativamente próximo ao momento em que a RP atingiu 2 MPa no PD e PDC. No entanto, na camada 0-0,10 m, a RP de 2 MPa foi verificada aos 33 DAS, 5 dias antes da indicação do início do déficit hídrico no PDC, enquanto que no PD a RP de 2 MPa foi verificada aos 40 DAS, 2 dias após a indicação do déficit hídrico, e no ESC a RP não chegou a 2 MPa. Na camada 0,15-0,25 m, a RP de 2 MPa foi verificada aos 37 DAS no PD e PDC e aos 47 DAS no ESC. Portanto, parece haver uma clara indicação que no PDC as plantas sofreram antes, e, possivelmente, mais à restrição ao crescimento radicular do que ao déficit hídrico. Ao contrário, no ESC a resistência à penetração parece ter sido bem menos importante que o déficit hídrico. No PD, os efeitos da RP e déficit hídrico parecem ter ocorrido ao mesmo tempo.

Enfim, essa estratégia alternativa de representar a relação da RP com a resposta das culturas parece ser mais adequada para solos que já apresentem um certo estado de compactação, a partir do qual a RP passa a ser efetivamente um fator restritivo ao crescimento das plantas. Essa informação é importante, pois é para tais situações que o presente trabalho se propôs a encontrar medidas complementares para auxiliar o entendimento do efeito da compactação do solo sobre as culturas.

Reitera-se, aqui, que a alternativa de representar a RP, proposta neste trabalho, não teve como finalidade principal diferenciar ambientes físicos do solo. Isso pode ser feito com apenas algumas medidas da RP, principalmente quando o solo estiver com umidade baixa. As informações de maior interesse foram o tempo para a RP atingir um valor assumido como restritivo (2 MPa) e a relação da cultura com esse tempo. Os resultados deste trabalho mostraram uma boa relação causa-efeito entre o tempo para a RP atingir 2 MPa e o rendimento de grãos, o que demonstra que a análise temporal da RP pode ser uma boa estratégia de estudo do efeito da compactação do solo sobre as culturas. Além disso, essa estratégia apresenta potencial preditivo da RP, podendo vir a ser um bom instrumento

orientador para a tomada de decisão quanto ao manejo físico do solo. Ressalta-se, também, que esta abordagem deve ser complementada com informações de como as culturas se relacionam com essas medidas.

5 CONCLUSÕES

O tempo para a resistência à penetração atingir o valor de 2 MPa foi diferente entre os níveis de compactação, confirmando a hipótese deste trabalho. Semelhantemente, a existência de correlação entre o rendimento de grãos e o tempo para a resistência à penetração atingir o valor de 2 MPa também foi confirmada. Porém, não foi possível testar as hipóteses referentes ao déficit hídrico.

Reduções significativas na produção das culturas podem não ser detectadas em solo compactado se o mesmo for mantido em boas condições de umidade para o crescimento das plantas. Por conseguinte, correlações significativas entre rendimentos das culturas e atributos físicos do solo indicadores de compactação dificilmente serão verificadas.

A existência de compactação pode não ser sinônimo de baixos rendimentos, mesmo quando os indicadores da compactação estiverem acima (densidade) ou abaixo (porosidade de aeração) do seu valor crítico. Por isso, o efeito da compactação sobre as culturas pode não ser claramente identificado e mensurado sem várias determinações de solo e planta, envolvendo um grande período do ciclo da cultura e analisadas conjuntamente.

Em solos com elevado estado de compactação, as plantas sofrem antes e com maior intensidade a restrição ao crescimento por resistência à penetração radicular do que por déficit hídrico. Ao contrário, solos mobilizados ou pouco compactados, a resistência à penetração é bem menos importante que o déficit hídrico. Assim, práticas como a escarificação e a irrigação promovem incremento no rendimento das culturas em solo compactado.

A análise do tempo para a evolução da resistência à penetração a um valor crítico se mostrou uma estratégia promissora e com potencial preditivo do efeito da compactação do solo sobre as culturas. Outros estudos devem ser conduzidos para melhor compreensão do potencial de aplicação dessa metodologia. As conclusões de trabalhos futuros serão válidas para esta estratégia se as plantas forem submetidas a um tempo mínimo à resistência à penetração acima do valor crítico. Além disso, deve-se usar, de preferência, o rendimento de grãos nas correlações, pois ele é a medida que melhor integra o somatório das restrições ocorridas no ciclo de cultivo.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ATTEYA, A. M. Alteration of water relations and yield of corn genotypes in response to drought stress. **Bulgarian Journal of Plant Physiology**, Sofia, v. 29, n. 1-2, p. 63-76, 2003.

BELBIN, K; COTCHING, B. **Soil strength/soil wetness relationships on red ferrosols with visually assessed soil structure differences in North-West Tasmânia**. 2004. Disponível em: <http://www.regional.org.au/au/asssi/supersoil2004/s14/poster/1385_cotchingb.htm>, Acesso: 12 set. 2007.

BERGONCI, J. I.; PEREIRA, P. G. Comportamento do potencial da água na folha e da condutância estomática do milho em função da fração de água disponível no solo. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 10, n. 2, p. 229-235, 2002.

BERGONCI, J. I. et al. Potencial de água na folha como um indicador de estresse hídrico em milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 35, n. 8, p. 1531-1540, ago. 2000.

BERLATO, M. A.; FONTANA, D. C. Previsão climática e sua aplicação na agricultura. In: CARLESSO, R. et al. eds. **Irrigação por aspersão no Rio Grande do Sul**. Santa Maria, RS, 2001, 165 p.

BERTOL, I. et al. Aspectos financeiros relacionados às perdas de nutrientes por erosão hídrica em diferentes sistemas de manejo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, n.1, p.133-142, jan./fev., 2007.

BEUTLER, A. N. et al. Efeito da compactação na produtividade de cultivares de soja em Latossolo Vermelho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, n. 5, p. 787-794, set./out., 2006.

BEUTLER, A. N. et al. Intervalo hídrico ótimo e produtividade de cultivares de soja. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 10, n. 3, p. 639-645, jul./set., 2006.

BEUTLER, A. N. et al. Intervalo hídrico ótimo no monitoramento da compactação e da qualidade física de um latossolo vermelho cultivado com soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, n. 6, p. 1223-1232, nov./dez., 2007.

BEUTLER, A. N. et al. Traffic soil compaction of an oxisol related to soybean development and yield. **Scientia Agricola**, v. 64, n. 6, p. 608-615, nov./dez., 2007.

BOWEN, H. D. Alleviating mechanical impedance. In: ARKIN, G. F; TAYLOR, D. **Modifying the root environment to reduce crop stress**. St. Joseph: ASAE, 1981. p. 21-57.

BOYER, J. S. Leaf enlargement and metabolic rates in corn, soybean, and sunflower at various leaf water potentials. **Plant Physiology**, v. 46, p. 233-235, 1970.

BOYER, J. S. Leaf water potentials measured with a pressure chamber. **Plant Physiology**, v. 42, p. 133-137, 1976.

BUSSCHER, W. J. et al. Correction of cone index for soil water content differences in a coastal plain soil. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 43, n. 3-4, p. 205-217, nov., 1997.

CAMARGO, O. A. de; ALLEONI, L. R. F. **Compactação do solo e o desenvolvimento das plantas**. Piracicaba: Degaspari, 1997. 132 p.

CARLESSO, R. et al. Efeito da lâmina de irrigação na senescência foliar do feijoeiro. **Irriga**, Botucatu, v. 12, n. 4, p. 545-556, out./dez., 2007.

CARLESSO, R. Absorção de água pelas plantas: água disponível versus extraível e a produtividade das culturas. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 25, p. 183-188, 1995.

COEDEIRO, L. G. Fator de sensibilidade ao déficit hídrico da cultura do feijão caupi (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.). **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 2, n. 2, p.153-157, mai./ago, 1998.

COELHO, M. B.; MATEOS, L. E; VLLALOBOS, F. J. Influence of a compacted loam subsoil layer on growth and yield of irrigated cotton in Southern Spain. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 57, n.3, p. 129-142, nov., 2000.

COLLARES, G. L. **Compactação em Latossolos e Argissolo e relação com parâmetros de solo e de plantas**. 2005. 106 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo), Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO. **Manual de adubação e de calagem para os estados do RS e SC**. 10. ed. Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo - Núcleo Regional Sul, 2004. 394 p.

COMISSÃO ESTADUAL DE PESQUISA DE FEIJÃO. **Indicações técnicas para a cultura do feijão no Rio Grande do Sul 2003/2004**. Comissão Estadual de Pesquisa do Feijão – Passo Fundo: UPF, 2003. 149 p.

CURI, N.; LARACH, J. O. I.; KÄMPF, N.; MONIZ, A. C.; FONTES, L. E. F. **Vocabulário da ciência do solo**. Campinas: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1993. 90 p.

DECAGON DEVICES. **Measurement of leaf water potential using the wp4**. USA: Decagon devices, 2000. 70 p. Disponível em: <http://www.decagon.com/ag_research/literature/app_notes.php>. Acesso em: 12 jun. 2007.

DEXTER, A. R.; CZYZ, E. A.; GATE, O. P. A method for prediction of soil penetration resistance. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 93, n. 2, p. 412-419, apr., 2007.

DOURADO NETO, D. et al. Programa computacional para modelagem de curvas de retenção de água no solo (SWRC, versão 2.00). **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 57, n. 1, p. 191-192, jan./mar., 2000.

EMBRAPA/CNPAF. Centro Nacional de Pesquisa de Arroz e Feijão. **Sócioeconomia**. Disponível em: <<http://www.cnpaf.embrapa.br>>, Acesso: 23 dez. 2008.

EMBRAPA/CNPS. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 2.ed. Brasília: Embrapa, 2006, 306.

EMBRAPA. 1997. Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Rio de Janeiro, RJ). **Manual de métodos de análise de solo**. 2. ed. rev. atual. Rio de Janeiro, 212p.

FIDALSKI, J; TORMENA, C. A. Funções de pedotransferência para as curvas de retenção de água e de resistência do solo à penetração em sistemas de manejo com plantas de cobertura permanente em citros. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 37, n. 5, p. 1316-1322, set./out., 2007.

FOLONI, J. S. S. et al. Efeito da compactação do solo no desenvolvimento aéreo e radicular de cultivares de milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 38, n. 8, p. 947-953, ago. 2003.

FREDDI, O. S. da et al. Compactação do solo e intervalo hídrico ótimo no crescimento e na produtividade da cultura do milho. **Bragantia**, Campinas, v. 66, n. 3, p. 477-486, 2007.

FREDDI, O. S. da. et al. Compactação do solo e intervalo hídrico ótimo no crescimento da parte aérea e produtividade da cultura do milho. **Irriga**, Botucatu, v. 13, n. 2, p. 272-287, abr./jun., 2008.

FREITAS, A. A. de. Determinação da evapotranspiração máxima e real e do fator de sensibilidade ao déficit hídrico da melancia em canindé, CE. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 3, n. 3, p. 298-303, set./dez, 1999.

GENRO JUNIOR, S. A.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Variabilidade temporal da resistência à penetração de um latossolo argiloso sob semeadura direta com rotação de culturas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, n. 3, p. 477-484, mai./jun., 2004.

GUBIANI, P. I. et al. Ksat 2008 - Programa computacional auxiliar na determinação da condutividade hidráulica de solo saturado pelo método do permeâmetro de carga decrescente. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA, 2008, 17. Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2008. 1 CD-ROM.

GUBIANI, P. I.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Método alternativo para a determinação da densidade de partículas do solo - exatidão, precisão e tempo de processamento. **Ciência Rural**, Santa Maria, v 36, n. 2, p. 664-668, mar./abr., 2006.

GUIMARÃES, C. M., STONE, L. F.; BRUNINI, O. Adaptação do feijoeiro comum (*Phaseolus vulgaris* L.) à seca. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 10, n. 1, p. 70-75, jan./mar., 2006.

GUIMARÃES, C. M., STONE, L. F.; MOREIRA, J. A. A. Compactação do solo na cultura do feijoeiro. II: efeito sobre o desenvolvimento radicular e da parte aérea. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 6, n. 2, p. 213-218, mai./ago, 2002.

GUIMARÃES, C. M. Fatores fisiológicos do estresse hídrico. In: ZIMMERMANN, M.J. O.; ROCHA, M.; YAMADA, T.; **Cultura do Feijoeiro: Fatores que Afetam a Produtividade**. Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fósforo, Piracicaba, Brasil. p. 157-174, 1988.

GUNASEKERA, D.; BERKOWITZ, G. A. Heterogenous stomatal closure in response to leaf water deficits is not a universal phenomenon. **Plant Physiology**, v. 98, p. 660-665, 1992.

HAKANSSON, I.; VOORHEES, W. B.; RILEY, H. Vehicle and wheel factors influencing soil compaction and crop responses in different traffic regimes. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 11, n. 3-4, p. 239-282, jun., 1988.

HILLEL, D. **Environmental soil physics**. San Diego: Academic Press, 1998. 771p.

IMHOFF, S. D. C. **Indicadores de qualidade estrutural e trafegabilidade de Latossolos e Argissolos Vermelhos**. 2002. 1. Tese (Doutorado em Agronomia – Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.

JADOSKI, S. O. et al. População de plantas e espaçamento entre linhas do feijoeiro irrigado. II: rendimento de grãos e componentes do rendimento. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 30, n. 4, p. 567-573, jul./ago. 2000.

JAUER, A. et al. Análise de crescimento da cultivar de feijão pérola em quatro densidades de semeadura. **Revista da FZVA**, Uruguaiana, v. 10, n. 1, p. 1-12, 2003.

JONES, H. G. Monitoring plant and soil water status: established and novel methods revisited and their relevance to studies of drought tolerance. **Journal of Experimental Botany**, vol. 58, n. 2, p. 119-130, jan., 2007.

JORDAN, W. R.; RITCHIE, J. T. Influence of Soil Water Stress on Evaporation, Root Absorption, and Internal Water Status of Cotton. **Plant Physiology**, v. 48, p. 783-788, 1971.

KANEMASU, E. T.; TANNER, C. B. Stomatal Diffusion Resistance of Snap Beans. I. Influence of Leaf-Water Potential. **Plant Physiology**, v. 44, p. 1547-1552, 1969.

KARLEN, D. L. et al. Soil quality: a concept, definition, and framework for evaluation. **Soil Science Society of American Journal**, v. 61 p.4-10, 1997.

KLEIN, V. A.; CÂMARA, R. K. Rendimento da soja e intervalo hídrico ótimo em Latossolo Vermelho sob plantio direto escarificado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, n. 2, p. 221-227, mar./abr., 2007.

KUMAR, A. et al. Adaptation to heat and drought stresses in snap bean (*phaseolus vulgaris*) during the reproductive stage of development. **Japan Agricultural Research Quarterly**, v. 41 n. 3, p. 213-216, 2006. Disponível em: <<http://www.jircas.affrc.go.jp>>. Acesso em: 15 ago. 2007.

KUMAR, A. et al. Influence of irrigation level, growth stages and cultivars on leaf gas exchange characteristics in snap bean (*phaseolus vulgaris*) under subtropical environment. **Japan Agricultural Research Quarterly**, v. 41 n. 3, p. 201-206, 2007. Disponível em: <<http://www.jircas.affrc.go.jp>>. Acesso em: 15 ago. 2007.

LAPEN, D. R. et al. Combination cone penetration resistance/water content instrumentation to evaluate cone penetration–water content relationships in tillage research. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 79, n. 1, p. 51-62, sep., 2004.

LAPEN, D. R. et al. Least limiting water range indicators of soil quality and corn production, eastern Ontario, Canada. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 78, n. 2, p. 151-170, out., 2004.

LARCHER, W. **Ecofisiologia vegetal**. São Carlos: Rima, 2006. 531 p

LEÃO, T. P.; SILVA, A. P. da. A statistical basis for selecting parameters for the evaluation of soil penetration resistance. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 63, n. 6, p. 552-557, nov./dez., 2006.

LEÃO, T. P. et al. Intervalo hídrico ótimo na avaliação de sistemas de pastejo contínuo e rotacionado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, p. n. 3, p. 415-423, mai./jun., 2004.

LETEY, J. Relationship between soil physical properties and crop productions. **Advances in Soil Science**, v.1, p.277-294, 1985.

LIBARDI, P. L. **Dinâmica da água no solo**. 2. ed. Piracicaba, 2000. 509 p.

LÓPEZ, M. V.; ARRHE, J. L. Growth, yield and water use efficiency of winter barley in response to conservation tillage in a semi-arid region of Spain. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 44, n. 1-2, p. 35-54, dec., 1997.

LOWERY B.; SCHULER, R. T. Temporal effects of subsoil compaction on soil strength and plant-growth. **Soil Science Society of America Journal**, v. 55, p. 216-223, 1991.

MANFRON, P. A. et al. Influência da deficiência hídrica no crescimento e produtividade do trigo (*Triticum aestivum* (L.) thell). **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 4, n. 2, p. 39-47, 1996.

MARCOLAN, A. L.; ANGHINONI, I. Atributos físicos de um Argissolo e rendimento de culturas de acordo com o revolvimento do solo em plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, n. 1, p. 163-170, jan./fev., 2006.

MARTINO, D.; SHAYKEWICH, C. F. Root penetration profiles of wheat and barley as affected by soil penetration resistance in field conditions. **Canadian Journal of Soil Science**, v. 74, p. 193-200, 1994.

MATZENAUER, R. B.; NÍDIO, A.; MALUF, J. R. T. Estimativa do consumo relativo de água para a cultura do feijoeiro na região do planalto médio do rio grande do sul, **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 34, n. 5 p. 1363-1369, set./out., 2004.

MATZENAUER, R. B.; NÍDIO, A.; MALUF, J. R. T. Estimativa do consumo relativo de água para a cultura da soja no estado do rio grande do sul. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 33, n. 6, p. 1013-1019, nov./dec., 2003.

MIELNICZUK, J. et al. Desenvolvimento de raízes em solos compactados. **Lavoura Arrozeira**, v. 38, p. 42-43, 1985.

NIU, S. L. et al. Diurnal gas Exchange and superior resources use efficiency of typical C4 species in Hunshandak Sandland, China. **Photosynthetica**, v. 41, n. 2, p. 221-226, jun., 2003.

NIU, S. L. et al. Ecophysiological acclimation to different soil moistures in plants from a semi-arid sandland. **Journal of Arid Enviroments**, v. 63, p. 353-365, 2005.

NIU, S. L. et al. Gas exchange and chlorophyll fluorescence response to simulated rainfall in *Hedysarum fruticosum* var. *mongolicum*. **Photosynthetica**, v. 42, n. 1, p. 1-6, mar., 2004.

NÓBREGA, J. Q. et al. Análise de crescimento do feijoeiro submetido a quatro níveis de umidade do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 5, n. 3, p. 437-443, set./dez, 2001.

OLIVEIRA, F. A. de; SILVA, T. G. da; OLIVEIRA, C. B. C. Efeito de tensões de água no solo sobre o rendimento do algodoeiro herbáceo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 34, n. 10, p. 1905-1911, out., 1999.

PELLEGRINI, A. et al. Crescimento e produtividade da cultura do feijoeiro sob diferentes sistemas de manejo do solo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 2003, 29. Ribeirão Preto-SP. **Anais...** Ribeirão Preto: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2003. 1 CD-ROM.

PEREIRA, A. B.; VILA NOVA, N. A. Parâmetros fisiológicos e produtividade da batateira (*Solanum tuberosum* L.) submetida a três níveis de irrigação. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 22, n. 1, p. 127-134, jan., 2002.

PETRY, M. T. et al. Disponibilidade de água do solo ao milho cultivado sob sistemas de semeadura direta e preparo convencional. **Revista Brasileira de Ciência de Solo**, mai./jun., v. 31, n. 3, p. 531-539, 2007.

QUEIROZ-VOLTAN, R. B.; NOGUEIRA, S. S. S.; MIRANDA, M. A. C. de. Aspectos da estrutura da raiz e do desenvolvimento de plantas de soja em solos compactados. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 35, n. 5, p. 929-938, mai., 2000.

RADFORD, B. J. et al. Crop responses to applied soil compaction and to compaction repair treatments. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 61. n. 3-4, p. 157-166; sep., 2001.

REICHARDT, R.; TIMM, L. C. **Solo Planta Atmosfera**: conceitos, processos e aplicações. Barueri, São Paulo. Manole, 2004. 478 p.

REICHERT, J. M.; SUZUKI, L. E. A. S.; REINERT, D. J. Compactação do solo em sistemas agropecuários e florestais: identificação, efeitos, limites críticos e mitigação. In: CERETTA, C. A.; SILVA, L. S.; REICHERT, J. M. **Tópicos em Ciência do Solo**. Viçosa: SBCS, v. 5, p. 49-134, 2007.

REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; BRAIDA, J. A. Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. **Revista Ciência & Ambiente**, edição 27, Santa Maria, p. 29-48, 2003.

REICHERT, J. M., et al., Reference bulk density and critical degree-of-compactness for no-till crop. production in subtropical highly weathered soils. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, (2008), doi:10.1016/j.still.2008.07.002.

REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; SILVA, V. R. Propriedades físicas de solos em sistema de plantio direto irrigado. In: CARLESSO, R; PETRY, M.T.; ROSA, G.M., CERETTA, C.A. ed. **Irrigação por aspersão no Rio Grande do Sul**. Santa Maria, p. 114-133, 2001.

REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Coluna de areia para medir a retenção de água no solo – protótipos e teste. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 36, n. 6, p. 1931-1935, nov./dez., 2006.

RICHART, A. et al. Compactação do solo: causas e efeitos. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 26, n. 3, p. 321-344, jul./set. 2005.

ROJAS, C. A. L.; VAN LIER, Q. J. Alterações físicas e hídricas de um Podzólico em função de sistemas de preparo. **Pesquisa Agropecuária Gaúcha**, Porto Alegre, v. 5, n. 1, p. 105-115, 1999.

ROSOLEM, C. A. et al. Crescimento radicular de plântulas de milho afetado pela resistência do solo à penetração. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 34, n. 5, p. 821-828, mai., 1999.

SANTOS, H. P. dos; LHAMBY, J. C. B.; SPERA, S. T. Rendimento de grãos de soja em função de diferentes sistemas de manejo de solo e de rotação de culturas. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 36, n. 1, p. 21-29, jan./fev., 2006.

SANTOS, R. F.; CARLESSO, R. Déficit hídrico e os processos morfológico e fisiológico das plantas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 2, n. 3, p. 287-294, set./dez., 1998.

SANTOS, R. F.; CARLESSO, R. Enrolamento e expansão das folhas de milho submetidas a déficit hídrico em diferentes solos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 3, n. 1, p. 1-6, jan./abr., 1999.

SECCO, D. et al. Produtividade de soja e propriedades físicas de um latossolo submetido a sistemas de manejo e compactação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, n. 5, p. 797-804, set./out., 2004.

SHARRATT, B. S. Barley yield and evapotranspiration governed by tillage practices in interior Alaska. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 46, n. 3-4, p. 225-229, jun., 1998.

SILVA, A. P. da; IMHOFF, S.; KAY, K. Plant response to mechanical resistance and air-filled porosity of soils under conventional and no-tillage system. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 61, n. 4, p. 451-456, jul./ago., 2004.

SILVA, A. P. da; KAY, B. D. Linking process capability analysis and least limiting water range for assessing soil physical quality. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 79, n. 2, p. 167-174, dec., 2004.

SILVA, M. A. S. da et al. Atributos físicos do solo relacionados ao armazenamento de água em um Argissolo Vermelho sob diferentes sistemas de preparo. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 35, n. 3, mai./jun., 2005.

SILVA, V. R. da. **Propriedades físicas e hídricas em solos sob diferentes estados de compactação**. 2003. 171 f. Tese (Doutorado em Agronomia – Biodinâmica do solo) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

STONE, L. F et al. Evapotranspiração do feijoeiro irrigado em plantio direto sobre diferentes palhadas de culturas de cobertura. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 41, n. 4, p. 577-582, abr., 2006.

STONE, L. F.; MOREIRA, J. A. A. Efeitos de sistema de preparos no uso da água e na produtividade do feijoeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 35, n. 4, p. 835-841, abr. 2000.

STONE, L. F.; GUIMARAES, C. M.; MOREIRA, J. A. A. Compactação do solo na cultura do feijoeiro. I: efeitos nas propriedades físico-hídricas do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 6, n. 2, p. 207-212, mai./ago, 2002.

STONE, L. F.; SILVEIRA, P. M. da. Efeitos do sistema de preparo na compactação do solo, disponibilidade hídrica e comportamento do feijoeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 34, n. 1, p.83-91, jan. 1999.

STONE, L. F.; PEREIRA, A. L. Sucessão arroz-feijão irrigados por aspersão: efeitos de espaçamento entre linhas, adubação e cultivar no crescimento, desenvolvimento radicular e consumo d'água do feijoeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 29, n. 6, p. 939-954, jun. 1994.

STRECK, C. A. **Compactação do solo e seus efeitos no desenvolvimento radicular da cultura do feijoeiro e da soja**. 2003. 83 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia - Biodinâmica de Solos) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa

Maria.

STRECK, E. V. et al. **Solos do Rio Grande do Sul**. EMATER/RS; UFRGS, Porto Alegre, 2002.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. Fisiologia do estresse. In: **Fisiologia vegetal**. 3ª edição, Porto Alegre: Artmed Editora, p. 613-687, 2004.

THOMPSON, R. B. et al. Using plant water status to define threshold values for irrigation management of vegetable crops using soil moisture sensors. **Agricultural Water Management**, v. 88, n.1-3, p. 147-158, mar., 2007.

TORMENA, C. A. et al. Variação temporal do intervalo hídrico ótimo de um latossolo vermelho distroférrico sob sistemas de plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, n. 2, p. 211-219, mar./abr., 2007.

TORMENA, C. A.; ROLOFF, G. Dinâmica da resistência à penetração de um solo sobre plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 20, p. 333-339, 1996.

TURNER, N. C.; BEGG, J. E. Stomatal Behavior and Water Status of Maize, Sorghum, and Tobacco under Field Conditions. **Plant Physiology**, v. 51, p. 31-36, 1973.

TURNER, N. C.; SPURWAY, R. A.; SCHULZE, E. D. Comparison of water potentials measured by in situ psychrometry and pressure chamber in morphologically different species. **Plant Physiology**, v. 74, p. 316-319, 1984.

UNGER, P. W.; KASPAR, T. C. Soil compaction and root growth: A review. **Agronomy Journal**, v. 86, p. 759-766, 1994.

URCHEI, M. A.; RODRIGUES, J. D.; STONE, L. F. Análise de crescimento de duas cultivares de feijoeiro sob irrigação, em plantio direto e preparo convencional. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 35, n. 3, p. 497-506, mar., 2000.

UTSET, A.; CID, G. Soil penetrometer resistance spatial variability in a Ferrosol at several soil moisture conditions. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 61, n. 3-4, p. 193-202, sep., 2001.

VAN GENUCHTEN, M. Th. A closed form equation for predicting hydraulic

conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 44, p. 892-898, 1980.

VAZ, C. M. P.; BASSOI, L. H.; HOPMANS, J. W. Contribution of water content and bulk density to field soil penetration resistance as measured by a combined cone penetrometer-TDR probe. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 60, n. 1-2, p. 35-42, jun., 2001.

7 APÊNDICES

APÊNDICE A – Estádios de desenvolvimento da cultura do feijoeiro comum tipo II, sua duração e correspondência com as datas do período no qual o experimento foi conduzido. (Adaptado de Comissão, 2003).

Germinação ⁽¹⁾	Emergência	Folhas primárias	1ª folha trifoliada	3ª folha trifoliada	Pré-floração	Floração	Formação de vagens	Enchimento de vagens	Maturação
V0 ⁽²⁾	V1	V2	V2	V4	R5	R6	R7	R8	R9
FASE VEGETATIVA					FASE REPRODUTIVA				
Semeadura				1º botão floral ou 1º rácemo			Maturação de colheita		
0-5 ⁽³⁾	5-8	8-12	12-20	20-27	27-38	38-42	42-50	50-69	69-83
30/01-07/02 ⁽⁴⁾		07/02-19/02		19/02-08/03		08/03-20/03		20/03-22/04	

⁽¹⁾ Descrição dos estádios de desenvolvimento, ⁽²⁾ Estádio de desenvolvimento, ⁽³⁾ Dias após a semeadura para os respectivos estádios de desenvolvimento, ⁽⁴⁾ Dias do ano onde estiveram compreendidos os estádios de desenvolvimento.

APÊNDICE B – Nível mínimo de significância (nms) dos testes F e de Shapiro-Wilk e coeficiente de variação para IAF, em diferentes DAS.

	Dias após a semeadura (DAS)			
	37	38	39	40
Fonte de variação	----- nms do teste F -----			
B	0,726	0,588	0,561	0,809
I	0,974	0,825	0,447	0,258
B x I	0,531	0,567	0,397	0,009
C	0,012	0,002	0,000	0,002
I x C	0,560	0,593	0,522	0,127
	Coeficiente de variação e nms de Shapiro-Wilk			
CV	22,3	21,5	20,6	15,7
Shapiro-Wilk	0,264	0,357	0,405	0,725

B = bloco; I = fator irrigação; B x I = interação bloco irrigação; C = fator compactação; I x C = interação irrigação x compactação; CV = coeficiente de variação.

APÊNDICE C – Nível mínimo de significância (nms) dos testes F e de Shapiro-Wilk e coeficiente de variação para altura de plantas, em diferentes DAS.

	Dias após a semeadura (DAS)			
	37	38	39	40
Fonte de variação	----- nms do teste F -----			
B	0,569	0,732	0,529	0,493
I	0,471	0,583	0,890	0,018
B x I	0,756	0,231	0,489	0,716
C	<,0001	0,006	0,001	0,002
I x C	0,748	0,849	0,886	0,091
	Coeficiente de variação e nms de Shapiro-Wilk			
CV	8,0	13,3	14,7	18,8
Shapiro-Wilk	0,061	0,820	0,179	0,243

B = bloco; I = fator irrigação; B x I = interação bloco irrigação; C = fator compactação; I x C = interação irrigação x compactação; CV = coeficiente de variação.

APÊNDICE D – Estatísticas da análise de regressão da RP em função da umidade volumétrica do solo.

Nível de compactação	n	nms	r^2	CV	nms-SW
Camada 0-0,10 m					
ESC	40	0,020	0,13	31	0,118
PD	40	<0,0001	0,46	17	0,102
PDC	40	<0,0001	0,42	12	0,259
Camada 0,15-0,25 m					
ESC	40	0,003	0,21	31	0,094
PD	40	<0,0001	0,40	12	0,148
PDC	40	<0,0001	0,34	16	0,507
Camada 0,30-0,45 m					
ESC	40	0,059	0,09	26	0,013
PD	40	0,002	0,23	21	0,002
PDC	40	0,008	0,17	25	0,018

n = número de observações; nms = nível mínimo de significância do teste F; r^2 = coeficiente de determinação; CV = coeficiente de variação; nms-SW = nível mínimo de significância do teste de Shapiro-Wilk.

APÊNDICE E – Nível mínimo de significância (nms) dos testes F e de Shapiro-Wilk e coeficiente de variação para ψ_f , em diferentes DAS.

Fonte de variação	Dias após a semeadura (DAS)									
	37	38	39	40	43	44	45	46	48	49
	----- nms do teste F -----									
B	0,903	0,673	0,767	0,253	0,833	0,958	0,769	0,278	0,122	0,888
I	0,443	0,750	0,037	0,002	0,726	0,008	0,017	0,059	0,544	0,011
B x I	0,010	0,547	0,385	0,766	0,002	0,141	0,384	0,210	0,317	0,374
C	0,460	0,641	0,950	0,085	0,141	0,997	0,772	0,491	0,258	0,768
I x C	0,686	0,462	0,784	0,230	0,165	0,408	0,194	0,856	0,354	0,946
Coeficiente de variação e nms de Shapiro-Wilk										
CV	12,3	20,3	19,7	11,3	7,3	7,1	6,4	7,8	11,4	9,8
Shapiro-Wilk	0,196	0,015	0,139	0,017	0,216	0,081	0,183	0,680	0,067	0,554

B = bloco; I = fator irrigação; B x I = interação bloco irrigação; C = fator compactação; I x C = interação irrigação x compactação; CV = coeficiente de variação.

APÊNDICE F – Nível mínimo de significância (nms) dos testes F e de Shapiro-Wilk e coeficiente de variação para rendimento de grãos e Δ rendimento.

Fonte de variação	Rendimento	Δ rendimento
	----- nms do teste F -----	
B	0,424	0,016
I	0,022	---
B x I	0,015	---
C	0,0008	0,098
I x C	0,142	---
Coeficiente de variação e nms de Shapiro-Wilk		
CV	9,2	28,13
Shapiro-Wilk	0,678	0,433

B = bloco; I = fator irrigação; B x I = interação bloco irrigação; C = fator compactação; I x C = interação irrigação x compactação; CV = coeficiente de variação.



APÊNDICE G – Murcha de plantas de feijoeiro em resposta ao déficit hídrico ocorrido no estágio de enchimento de vagens.