

**EFEITOS DA COMPACTAÇÃO DO SOLO E
DA UMIDADE SOBRE A ABSORÇÃO DE N, P,
K, OS COMPONENTES DE PRODUÇÃO E A
PRODUTIVIDADE DE GRÃOS DE ARROZ**

ROBERTO DANTAS DE MEDEIROS

2004

ROBERTO DANTAS DE MEDEIROS

**EFEITOS DA COMPACTAÇÃO DO SOLO E DA UMIDADE SOBRE A
ABSORÇÃO DE N, P, K, OS COMPONENTES DE PRODUÇÃO E A
PRODUTIVIDADE DE GRÃOS DE ARROZ**

Tese apresentada à Universidade Federal de
Lavras, como exigência do Programa de Pós-
graduação em Agronomia, área de concentração
Fitotecnia, para a obtenção do título de
“Doutor”

Orientador
Prof. Dr Antônio Alves Soares

LAVRAS
MINAS GERAIS - BRASIL
2004.

**Ficha Catalográfica Preparada pela Divisão de Processos Técnicos da
Biblioteca Central da UFLA**

Medeiros, Roberto Dantas de

Efeitos da compactação do solo e da umidade sobre a absorção de N, P,
K, os componentes de produção e a produtividade de grãos de arroz /
Roberto Dantas de Medeiros. -- Lavras : UFLA, 2004.

162 p. : il.

Orientador: Antônio Alves Soares

Tese (Doutorado) – UFLA.

Bibliografia.

1. Arroz. 2. Irrigação. 3. Plantio direto. 4. *Orius thyestes*. 5. Densidade
do solo. I. Universidade Federal de Lavras. II. Título.

CDD - 633.1887
- 633.18891

ROBERTO DANTAS DE MEDEIROS

**EFEITOS DA COMPACTAÇÃO DO SOLO E DA UMIDADE SOBRE A
ABSORÇÃO DE N, P, K, OS COMPONENTES DE PRODUÇÃO E A
PRODUTIVIDADE DE GRÃOS DE ARROZ**

Tese apresentada à Universidade Federal de
Lavras, como exigência do Programa de Pós-
graduação em Agronomia, área de concentração
Fitotecnia, para a obtenção do título de
“Doutor”

APROVADA em 7 de junho de 2004.

Dr. Plínio César Soares - EPAMIG

Dr. Moisés de Sousa Reis - EPAMIG

Prof. Dr. Geraldo Magela Pereira - UFLA

Prof. Dr. Renato Mendes Guimarães - UFLA

Prof. Dr. Antônio Alves Soares - UFLA

**Prof. Dr Antônio Alves Soares
UFLA
(Orientador)**

**LAVRAS
MINAS GERAIS - BRASIL.**

Ao meu pai, Auspicio e, sobretudo, à minha mãe, Iria (*in memoriam*) pelo exemplo de vida: honestidade, garra, dedicação, amor, carinho, compreensão e incentivo em todos os momentos da nossa vida.

DEDICO

Aos meus filhos, Victo, Roberto, Kássia e Álisson que me dão forças para continuar lutando na busca de melhores dias.

OFEREÇO

AGRADECIMENTOS

À Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, através da Embrapa Roraima, e à Universidade Federal da Lavras, através do Departamento de Agricultura, pela oportunidade de realizar este curso. Ao Prof. Dr. Antônio Alves Soares pela orientação, apoio e amizade no decorrer do curso e realização deste trabalho.

Aos Drs. Plínio César Soares, Moisés de Sousa Reis e Geraldo Magela Pereira pelas valiosas sugestões durante a defesa da tese.

Ao Prof. Dr. Renato Mendes Guimarães e demais funcionários do Laboratório de Análises de Sementes da UFLA pela colaboração na execução dos trabalhos de laboratório.

Aos colegas da Embrapa Roraima: Dr. José Oscar L. Oliveira Júnior, por ter assumido a execução dos trabalhos por mim desenvolvidos com dedicação e lealdade; e Rita de Cássia, pela realização das análises químicas de plantas.

Aos Técnicos Janir Guedes Carvalho e José Luiz Morais Rodrigues pelo apoio na coleta e análise do solo.

Aos colegas Joadil Gonsalves de Abreu, Sidnei Tavares Reis, Rita de Cássia A. Pereira, Hugo A Mesquita, Vanda M. de O Cornélio e Ramon de Vasconcelos, pela amizade, colaboração e apoio nos momentos difíceis.

Ao estagiário em Agronomia Gilson José T. Ribeiro pela valiosa colaboração durante a execução do experimento.

Enfim, a todos que direta ou indiretamente tenham contribuído para o êxito deste trabalho.

BIOGRAFIA

ROBERTO DANTAS DE MEDEIROS, filho do Agricultor Auspício Medeiros e de Iria Dantas de Medeiros, nasceu em 23 de abril de 1954, no sítio Pedra Branca, município de Caicó, Estado do Rio Grande do Norte. Graduado em Agronomia, em julho de 1982, pela Universidade Federal da Paraíba: Centro de Ciências Agrárias - Areia-Pb.

No período de agosto de 1982 a janeiro de 1983, foi estagiário bolsista do Instituto Interamericano de Cooperação para a Agricultura - IICA, Recife-PE. De março de 1983 a outubro de 1984, foi funcionário da Fundação Northeriogradense de Pesquisa Ciência e Cultura – FUNPEC. De novembro de 1984 a julho de 1998, foi contratado pela Associação Técnico Científica Ernesto Luis de Oliveira Júnior – ATECEL, Recife-PE, trabalhando no Programa “Desenvolvimento da Pequena Irrigação com Base em Açudes” executado pelo convênio SUDENE/ORSTON/Cooperação francesa/ATECEL. De agosto de 1998 a Fevereiro de 1990 foi contratado pelo IICA, Recife-PE, na função de especialista em irrigação, prestando assistência técnica ao Programa de Apoio ao Pequeno Produtor Rural.

Em março de 1990, foi contratado pela Embrapa Roraima com a função de pesquisador em irrigação e drenagem, em Boa Vista-RR. Em agosto de 1992, iniciou o curso de Mestrado em Irrigação e Drenagem na Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” – ESALQ, Piracicaba-SP, concluindo-o em maio de 1995. Em Fevereiro de 2001, iniciou o curso de Doutorado em Agronomia, área de concentração Fitotecnia, na Universidade Federal de Lavras (UFLA), concluindo-o em junho de 2004.

SUMÁRIO

RESUMO	i
ABSTRACT	iii
1 INTRODUÇÃO	1
2 REFERENCIAL TEÓRICO	3
2.1 Considerações gerais sobre relações hídricas do solo com a planta de arroz	3
2.2 Germinação versus umidade do solo	6
2.3 Manejo da irrigação	8
2.4 Compactação do solo.....	13
2.5 Plantio direto.....	22
3 MATERIAL E MÉTODOS	27
3.1 Local	27
3.2 Solos e suas características	27
3.3 Análises preliminares.....	29
3.4 Montagem do experimento	31
3.4.1 Tratamentos	31
3.4.2 Preparo dos vasos.....	32
3.4.3 Adubação	35
3.4.4 Cultivar e semeadura	35
3.4.5 Irrigação.....	35
3.4.6 Delineamento estatístico	36
3.5 Características avaliadas	36
3.5.1 Teores de nitrogênio, fósforo e potássio na parte aérea das plantas	37
3.5.2 Floração	37
3.5.3 Massa seca da parte aérea	37
3.5.4 Massa seca da raiz.....	38
3.5.5 Altura de plantas	38
3.5.6 Número de perfilhos por vaso.....	38
3.5.7 Número de panículas por vaso.....	38
3.5.8 Número de grãos cheios por panícula	39
3.5.9 Esterilidade de espiguetas.....	39
3.5.10 Massa de 1000 grãos.....	39
3.5.11 Produtividade de grãos.....	40
3.6 Análise estatística	40

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	42
4.1 Análise de variância.....	42
4.2 Teor de nitrogênio na parte aérea da planta	44
4.3 Teor de fósforo na parte aérea das plantas.....	54
4.4 Teor de potássio na parte aérea das plantas	63
4.5 Floração	71
4.6 Altura de plantas	73
4.7 Massa seca da raiz.....	80
4.8 Massa seca da parte aérea	89
4.9 Número de perfilhos e de panículas por vaso	97
4.10 Número de grãos cheios por panícula.....	109
4.11 Esterilidade das espiguetas	116
4.12 Massa de 1000 grãos.....	122
4.13 Produtividade de grãos.....	124
4.14 Considerações finais	135
5 CONCLUSÕES.....	140
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	141

RESUMO

MEDEIROS, Roberto Dantas de. **Efeitos da compactação do solo e da umidade sobre a absorção de N, P, K, os componentes de produção e a produtividade de grãos de arroz.** 2004. 162 p. Tese (Doutorado em Fitotecnia) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.¹

O trabalho teve como objetivo estudar os efeitos de diferentes níveis de compactação e de manejos de água sobre a absorção de nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K), o desenvolvimento do sistema radicular e da parte aérea de plantas de arroz, os componentes de produção e produtividade de grãos de arroz cultivados em dois tipos de solo. O experimento foi conduzido em casa de vegetação do Departamento de Agricultura da Universidade Federal de Lavras – UFLA, em Lavras-MG, no período de setembro de 2002 a janeiro de 2003. Os tratamentos constaram de dois solos: Neossolo Flúvico e Latossolo Vermelho-Amarelo, combinados com seis níveis de compactação do solo, 0%, 16%, 32%, 48%, 64% e 80% da amplitude de variação da densidade do solo (Δ s), e três manejos de água no solo, M1 - solo 100% saturado, M2 - irrigação quando eram consumidos de 25% a 30% da água disponível para as plantas (AD) e M3 - irrigação quando eram consumidos de 50% a 60% da AD. Utilizou-se o delineamento inteiramente ao acaso em esquema fatorial 2 x 6 x 3, sendo duas classes de solo, seis níveis de compactação e três manejos de água, com três repetições, totalizando 108 parcelas, as quais foram constituídas por vaso de PVC de 200 mm de diâmetro com 35 cm de altura. Foram avaliados os teores de N, P e K na parte aérea das plantas, a floração, a altura da planta, a massa seca de raízes e da parte aérea das plantas, o número de perfilhos e de panículas por vaso, o número de grãos cheios por panícula, a esterilidade de espiguetas, a massa de 1000 grãos e a produtividade de grãos por vaso. Os resultados mostram que a compactação do solo diminuiu absorção de N, P e K, a altura de planta, a produção de massa seca da raiz e da parte aérea das plantas de arroz, o número de perfilhos e de panículas por vaso e a produtividade de grãos por vaso. Por outro lado, aumentou esterilidade de espiguetas e a massa de 1000 grãos, independentemente do manejo de água e do solo. Dos três manejos de água testados, o com o solo saturado encurtou o número de dias para a floração e, de modo geral, aumentou as médias das demais características avaliadas em ambos os solos, independentemente do nível de compactação. Os resultados obtidos possibilitaram concluir que a compactação “*per si*” não constituiu barreira para

¹ Comitê Orientador: Dr. Antônio Alves Soares – UFLA (Orientador); Dr. Renato Mendes Guimarães – UFLA (Co-orientador).

o desenvolvimento do sistema radicular e que seus efeitos indiretos sobre a disponibilidade de nutrientes, aliados à menor aeração do solo, são mais relevantes do que a resistência física ao crescimento das raízes.

ABSTRACT

MEDEIROS, Roberto Dantas. **Effects of soil compaction and moisture upon the uptake of N, P,K , yield components and rice grain yield.** 2004. 162 p. Thesis (Doctorate in Plant Science) – Federal University of Lavras, Lavras, MG.¹

The work was intended to study the effects of different compaction levels and water management upon the uptake of nitrogen (N), phosphorus (P) and potassium (K), the development of the root system and shoot of rice plants , the yield components and rice grain yields grown in two sorts of soil. The experiment was conducted in greenhouse of the Agriculture Department of the Universidade Federal de Lavras – UFLA in Lavras, MG, over the period of September, 2002 to January, 2003. The treatments consisted of two soils: fluvic Neosol and Yellow-Red Latosol combined with six levels of soil compaction: 0%, 16%, 32%, 48%, 64% and 80% of the range of the variation of soil density (Ads) and three soil water management: M1 –soil 100% saturated, M2 – irrigation when were consumed from 25% to 30% of the available water for plants (AD) and M3 – irrigation when were consumed from 50% to 60% of the AD. The completely randomized design in a 2 x 6 x 3 factorial scheme was utilized, its being two soil classes, six compaction levels and three water management with three replicates, amounting to 108 plots which, were made up of PVC pipe of 200 mm in diameter x 35 cm high. The contents of N, P and K in the shoot of the plants, blooming, plant height, root and shoot dry matter of plants, number of tillers and panicles per pot, the number of filled grains per panicle, sterility of spikes, the 100-grain weight and grain yield per pot were evaluated. The results showed that soil compaction decreased the uptake of N, P and K, plant height, root and shoot dry matter yield of rice plants, number of tillers and panicles per pot and grain yield per pot. On the other hand, it increased spikes' sterility and 100-grain weight regardless water and soil management. Out of the three water managements tested, the one with the saturated soil shortened the number of days to blooming, and in general, increased the means of the other characteristics evaluated in both soils, regardless compaction level. The results obtained enabled to conclude that

¹ Guidance committee: Dr. Antônio Alves Soares – UFLA (Adviser); Dr. Renato Mendes Guimarães – UFLA.

compaction “*per se*” constitute no barrier to the development of the root system and that its indirect effects upon nutrient availability linked to the decreased soil aeration are more relevant than the physical resistance to root growth.

1 INTRODUÇÃO

O arroz é cultivado no Brasil sob diversos sistemas de cultivo, sendo os dois principais o de terras altas (sequeiro e irrigado por aspersão) e o irrigado por inundação. O arroz de terras altas, onde predomina o sistema de sequeiro, caracteriza-se pelo uso de baixa tecnologia, o alto risco, a baixa produtividade e o baixo custo de produção. O irrigado por inundação, ao contrário do sequeiro, utiliza alta tecnologia, é de baixo risco, obtém altas produtividades, mas tem custo de produção elevado.

Uma alternativa que está despontando é o cultivo de arroz de sequeiro em várzea, sem irrigação, associando o baixo custo de produção e o alto potencial dos cultivares modernos do arroz de terras altas com a elevada fertilidade dos solos de várzeas e o baixo risco de estresse hídrico, devido à maior disponibilidade de água nas várzeas. Um dos grandes problemas que se têm observado nessa nova modalidade de cultivo é quando da implantação da lavoura, uma vez que, nesta época, as chuvas ainda são escassas, a germinação e/ ou a emergência das plântulas são difíceis e lentas, prejudicando sensivelmente o estande inicial. Certamente as características dos solos de várzeas são as principais responsáveis por essa situação, podendo-se destacar, entre elas, a textura, o tipo de argila, a capacidade de retenção e a disponibilidade de água.

No caso do arroz de sequeiro cultivado em várzea, tem-se observado que as linhas compactadas pelas rodas do trator, durante a semeadura, apresentam velocidade de emergência mais rápida e um vigor inicial mais elevado, aumentando consideravelmente a produtividade de grãos. Esse fato tem despertado o interesse dos produtores sobre o efeito benéfico da compactação do solo sobre a germinação, o vigor inicial, o perfilhamento e a produção de grãos.

A adoção do sistema de plantio direto vem crescendo rapidamente no Brasil para as principais culturas produtoras de grãos. No caso do arroz irrigado, essa prática já é consolidada, trazendo grandes benefícios aos orizicultores, sobretudo no tocante ao controle de plantas daninhas como o arroz vermelho e o arroz preto. Contudo, para o arroz de terras altas, o sistema de plantio direto ainda não é uma tecnologia vantajosa em relação ao convencional. As explicações apresentadas são as mais variadas possíveis, como a exigência de macroporosidade (Kluthcouski, 1998; Séguy et al., 1999), raízes espessas (Marschner, 1995) e cultivares pouco adaptadas (Moura Neto, 2001), etc.

O paradoxo observado entre o efeito benéfico da compactação do solo pelas rodas do trator sobre as linhas de plantio do arroz e o fato da mesma ser considerada a vilã do “insucesso” do plantio direto do arroz de terras altas vem despertando o interesse da pesquisa em esclarecer tal fato.

Para tanto, implementou-se o presente trabalho com o objetivo de avaliar os efeitos da compactação, associado a diferentes níveis de umidade no solo, sobre a absorção dos macronutrientes N, P, K, os componentes de produção, o desenvolvimento das plantas e a produtividade de grãos, utilizando duas classes de solos (Latosolo Vermelho-Amarelo e Neossolo Flúvico).

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Considerações gerais sobre relações hídricas do solo com a planta de arroz

A planta de arroz caracteriza-se por apresentar três fases distintas de desenvolvimento: **fase vegetativa** que compreende os estádios de germinação, emergência, plântula e afilhamento; **fase reprodutiva** que se inicia com a formação do primórdio floral e vai até a floração, polinização e fertilização e a **fase de maturação** que vai da fecundação à maturação completa do grão (Nedel et al., 1998; Soares, 2001).

A água é um dos mais importantes fatores de produção do arroz, pois influencia nas características da planta, na disponibilidade de nutrientes do solo, na natureza e na extensão do crescimento das plantas daninhas (De Datta et al., 1970).

O arroz é uma planta pertencente à família das poaceas que requer alto teor de água no solo para o seu desenvolvimento normal e, conseqüentemente, sua maior produtividade (Gomide, 1979), podendo ser cultivada sob condições de sequeiro e irrigada por submersão.

Os cultivares de sequeiro diferenciam-se dos irrigados principalmente por apresentarem maior tolerância à seca. Para isso, possuem um sistema radicular extenso para explorar a umidade na superfície e em maior profundidade do solo, e uma menor área foliar exposta à atmosfera para minimizar as perdas de água (Joshi, 1968; citado por Sartori, 1996). Assim, Bois et al. (1984), avaliando o controle estomático em cultivares de arroz de sequeiro e irrigado, observaram que os cultivares de sequeiro fecham seus estômatos a

um potencial hídrico do solo de -60 a -80 kPa, enquanto nos cultivares irrigados, isso ocorre a um potencial hídrico do solo entre -40 e -50 kPa.

Ocorrendo déficit hídrico no solo, próximo às raízes, os estômatos se fecham, ajustando a resistência estomatal para reduzir o fluxo de vapor, reduzindo a transpiração. Em conseqüência, há decréscimo na quantidade de gás carbônico, bem como da absorção de água e nutrientes pelas raízes (Jong van Lier, 2000). Nestas condições, as taxas fotossintética e respiratória são afetadas negativamente (Costa et al., 1997) e, conseqüentemente, reduzem a altura da planta (Rodrigues & ARF, 2002a), a produção de massa seca da parte aérea (Carvalho Júnior, 1987), a massa seca total da planta (Castilho et al., 1992; Pereira et al., 1994; Prasertsak & Fukai, 1997) e a produtividade de grãos (Stone, 1983; Stone, 1985; Crusciol, 2001).

A redução nos teores de nutrientes em plantas desenvolvidas sob baixa disponibilidade hídrica está associada, dentre outros fatores, ao menor contato íon-raiz, tanto pelo processo de fluxo de massa, quanto de difusão (Rosolem, 1995). Por outro lado, a alta disponibilidade de água no solo favorece a taxa fotossintética nas folhas, a acumulação de massa e a produção de carboidratos (Tsutsui, 1972). Propicia também a absorção de nutrientes (Rodrigues, 1998) devido ao aumento do fluxo de massa (Malavolta, 1980) e o fluxo difusivo do P e K no solo (Villani et al., 1993; Costa, 1998 e Ribeiro, 1999), à redução e à solubilização dos óxidos de ferro, incrementando a produção de massa seca da parte aérea, o número de panículas e a produtividade de grãos (Gomes et al., 1985; Stone et al., 1990; Rodrigues & ARF, 2002b e Sorato et al., 2002). Porém, este efeito não depende da presença da lâmina de água sobre a superfície do solo, basta que o mesmo esteja saturado com água (Gomes et al., 1985).

O consumo de água pela cultura é variável, dependendo do ciclo do cultivar, das condições ambientais e do manejo adotado. Estima-se que do total

do consumo de água, 30% ocorrem durante a fase vegetativa, 55% durante a fase reprodutiva e 15% na fase de maturação (Fageria, 1980). Para o arroz irrigado por inundação, a quantidade de água varia de 1,0 a 4,0 L.s⁻¹. ha⁻¹. No Rio Grande do Sul, o consumo varia de 11.500 m³.ha⁻¹. ciclo⁻¹ a 17.000 m³.ha⁻¹. ciclo⁻¹ para os cultivares precoces e tardios, respectivamente, o que corresponde à vazão de 2 a 3,5 L.s⁻¹. ha⁻¹. No norte de Minas Gerais, consomem-se de 15.000 a 20.000 m³.ha⁻¹. ciclo⁻¹, iniciando-se a submersão do solo a partir dos 30 dias da emergência das plântulas (Soares, 2001).

Contudo, os efeitos da disponibilidade de água sobre a planta depende do estágio de desenvolvimento da cultura e do período de ocorrência. Resultados de pesquisas mostram que a deficiência hídrica, durante a fase vegetativa, aumenta o ciclo da cultura (Ingran et al., 1990 e Rodrigues & ARF, 2002a) reduz a altura da planta, o número de perfilhos e de panículas por área (Stone et al., 1979; Pereira et al., 1994; Crusciol et al., 1997b e Rodrigues, 1998). A fase reprodutiva é a que requer maior demanda por água e nela a planta é mais sensível ao déficit hídrico, o qual pode comprometer seriamente a produtividade de grãos (Stone et al., 1986). Nesta fase, o déficit hídrico reduz o número de panículas (Stone & Silva, 1998) por afetar negativamente a transformação da gema vegetativa em reprodutiva, degenerando o primórdio da panícula e, conseqüentemente, a porcentagem de colmos férteis (Crusciol et al., 1997a). Durante os primeiros 20 dias da fase reprodutiva, o déficit hídrico também aumenta a esterilidade de espiguetas, reduz o número total de grãos por panícula e a produtividade de grãos (Yoshida, 1975; Stone, 1985; Oliveira, 1995).

O nível máximo de produtividade de um cultivar de arroz depende, principalmente, da sua constituição genética e do grau de adaptação às condições ambientais de clima, solo, água e manejo adotado (Doorenbos & Kassan, 1994). Logo, as práticas culturais referentes ao manejo do solo e da água crescem em importância.

2.2 Germinação versus umidade

A resposta de germinação das sementes no solo é determinada pela combinação de características da própria semente e das condições do ambiente, como luz, temperatura, água e solo. Dentre elas, a disponibilidade de água é uma das mais importantes, a qual é vista como o principal fator limitante para o cultivo nas regiões tropicais (Gomes, 1982).

O processo de germinação envolve três etapas: a primeira, de embebição, é um processo físico durante o qual a absorção de água é governada pelo conteúdo do endosperma; a segunda consiste de uma ação enzimática dos componentes do endosperma e do início das atividades meristemáticas, quando as sementes praticamente não absorvem água; e a terceira, em que emerge a radícula, através da cutícula e exige alta demanda de água (Bewley & Black, 1985).

Este processo depende da composição química da semente, da permeabilidade do tegumento à água, da disponibilidade de água no estado líquido ou gasoso no solo, da temperatura (Camargo, 1982), da área de contato da semente com o substrato e do teor de água inicial das sementes (Vertucci & Leopoldo, 1983).

Ponkiaia et al. (1993), estudando os efeitos de compactação em um solo argiloso sobre o cultivo de amendoim, constataram que a compactação aumentou a absorção e difusividade de água na semente. Porém, o conteúdo de água necessário para desencadear o processo de germinação da semente aumentou com o acréscimo da compactação do solo. Para a cultura da soja, Santamaría & Gallardo (1992) observaram que a disponibilidade de água influenciou na taxa de germinação, mas a compactação afetou negativamente o desenvolvimento radicular.

Comparando o efeito de profundidades de semeadura e da pressão de compactação sobre a emergência em sementes de *Brachiaria brizanta* em dois tipos de solos, Abreu (1993) constatou que no solo de classe textural franco-argilosa, para as semeaduras efetuadas nas profundidades de 0 e 2,0 cm, houve aumento do índice de emergência à medida que se aumentou a pressão de compactação de 100 a 300 g.cm⁻². Todavia, para as semeaduras mais profundas (4,0 e 6,0 cm), a pressão de compactação superior a 100 g.cm⁻² reduziu a emergência das plântulas. Já no solo de classe textural muito argilosa, a pressão de compactação favoreceu apenas a emergência das sementes semeadas na superfície.

Em estudo sobre o estresse hídrico na germinação de sementes de milho, Hadas (1969) mostra que tanto o estresse de água no meio externo como a taxa de consumo podem afetar o crescimento logo após a embebição. Em condições de baixa disponibilidade de água no solo, suficiente apenas para iniciar o processo de germinação, não havendo água bastante para sua continuidade, ocorre a morte do embrião. Mas em condições de excesso de água, a absorção rápida de água pela semente poderá ocasionar a ruptura de alguns tecidos e afetar negativamente a germinação e o vigor da semente (Dasgupta et al., 1982).

Estudando a influência de diferentes potenciais de água em solo arenoso e um argiloso sobre a germinação de sementes de gramíneas forrageiras, Altuve (1989) constatou aumento do número de dias para a germinação inicial e o número médio de dias para a germinação total, bem como redução da germinação das sementes das diferentes espécies com o decréscimo do potencial hídrico. A partir de - 800 kPa, a germinação das espécies foi muito reduzida e mesmo inibida em solo arenoso, quando comparada à do solo argiloso. Segundo Sturani et al. (1968), a baixa germinação das sementes submetidas a estresse hídrico é conseqüência do bloqueio de proteínas. Outrossim, Hadas & Russo (1974) verificaram que para cada espécie, existe um valor de potencial mátrico,

abaixo do qual não há germinação. Esses valores foram da ordem de -1.250; -800; -700 e -300 kPa para milho, arroz, soja e beterraba, respectivamente.

Comparando os efeitos de diferentes teores de umidade no solo, variando de 45 a 95% do índice de saturação de água em um Neossolo Flúvico, textura argilosa, Medeiros et al. (2003a) verificaram que a umidade na faixa de 60% e 75% do índice de saturação proporcionou a maior taxa de emergência e o desenvolvimento inicial de plântulas de arroz. Nas condições extremas de umidade do solo (45% e 95%), houve redução na germinação das sementes, no índice de velocidade de emergência das plântulas, na altura e na massa seca de plântulas de arroz. Contudo, em pesquisa similar, utilizando um Latossolo Vermelho-Amarelo, observou-se redução apenas na germinação das sementes e no índice de velocidade de emergência das plântulas de arroz, na umidade de 95% (Medeiros et al., 2003b).

2.3 Manejo da irrigação

O manejo da irrigação deve ser fundamentado no princípio de que o sistema agrícola seja visualizado como um todo, considerando a interação das fases (solo, água, planta, atmosfera) entre si e com o meio que os cercam (Dourado Neto et al., 1991).

A cultura do arroz pode ser explorada sob diferentes sistemas de cultivo em terras altas (sequeiro e irrigado por aspersão), várzea úmida ou drenada e irrigado por inundação permanente. A adoção do sistema a ser utilizado é variável em diversas partes do mundo, em função das condições locais de clima, solo, topografia, disponibilidade de água, custos e costumes (Tsutsui, 1972; Gomide, 1979; Caixeta et al., 1983). Entretanto, por ser uma planta hidrófila, adaptada a áreas encharcadas, o arroz tem apresentado maiores produtividades sob irrigação por submersão contínua e em várzeas úmidas, durante a época

chuvosa. Porém, embora a inundação do solo seja benéfica à fisiologia da planta de arroz, praticamente durante todo o ciclo, sua maior influência sobre o aumento na produtividade de grãos é obtida quando o solo é inundado no início da diferenciação dos primórdios florais até o estágio de grãos leitosos (Stone et al., 1979, Fornasieri Filho & Fornasieri, 1993).

Na cultura do arroz, esse manejo compreende um conjunto de procedimentos que deve ser adotado para assegurar o suprimento de água adequado à cultura, durante suas diferentes fases de desenvolvimento (Sousa et al., 1994), de forma eficiente e econômica, reduzindo as perdas de água e nutrientes, porém sem redução do nível de produtividade (Bhuiyan & Palanisami, 1989; Robaina, 1991).

Para a cultura do arroz de terras altas irrigada por aspersão, o manejo da irrigação pode ser feito através de diferentes métodos e critérios. Dentre eles, destacam-se os que levam em consideração o consumo de uma fração da água disponível do solo e o baseado na tensão de água no solo.

Pesquisa conduzida por Del Giudice et al. (1974), em que foram testados diferentes manejos de água, levando em consideração a disponibilidade de água no solo, concluiu que o arroz deve ser irrigado quando forem consumidos de 40 a 60 % da água disponível na camada do solo de 0 a 10 cm, ou 40% da água disponível na camada de 0 a 20 cm, por propiciar o aumento do número de grãos cheios por panícula, redundando em maior produtividade de grãos. O mesmo foi também verificado por Diniz et al. (1976), os quais sugerem que a reposição da água de irrigação seja efetuada quando forem consumidos cerca de 50% da água disponível na camada de 0 a 10 cm. Por outro lado, Coelho et al. (1977) obtiveram maior produtividade de grãos de arroz com a reposição da água no solo quando eram consumidos até 30% da água disponível devido ao aumento do número de grãos cheios por panícula e pela redução da esterilidade de grãos.

Crusciol (1995), utilizando o método da tensão da água no solo para controlar a irrigação por aspersão com o cultivar de arroz IAC 201, em um Latossolo Vermelho Amarelo, obteve a maior produtividade de grãos, irrigando a cultura quando a tensão média da água no solo, nas profundidades de 10 e 20 cm, atingia 35 kPa. Porém, pesquisa conduzida por Oliveira (1997) não constatou diferenças na produtividade de grãos de diversos cultivares de arroz, irrigando-os quando a tensão de água no solo, na profundidade de 15 cm, atingia o valor de 33 kPa no início do primórdio floral ao florescimento e 58 kPa nas demais fase de desenvolvimento da cultura. Por sua vez, Stone et al. (1997) recomendam que para se obter uma produtividade de grãos de arroz satisfatória, a tensão da água no solo, à profundidade de 15 cm, não deve ultrapassar o valor de 25 kPa, o qual corresponde a um consumo em torno de 35% da água disponível.

Pesquisa conduzida por Scalco (1983), onde se testou a cultura do arroz sob diferentes teores de água no solo (de 40 a 100% do volume total de poros preenchidos com água -VTP) e diferentes turnos de rega, mostrou que as médias de matéria seca de raiz, a matéria seca da parte aérea, a altura de plantas e os teores de NPK na parte aérea das plantas aumentaram com a elevação dos teores de água no solo.

Em cultivares irrigados por inundação, quando o teor de água no solo diminui para 80 a 70 % do valor da saturação, isto é, de 20 a 30% dos poros livres de água, a produtividade de grãos começa a cair. Para o teor de água no solo equivalente a 50% da saturação, a redução é de 50 a 70%, e para 30% da saturação não se pode esperar nenhuma produção (Tsutsui, 1972; Doorembos & Kassam, 1994). Contudo, Vahl et al. (1987) admitem que cultivares de porte baixo são mais produtivos quando, durante a fase vegetativa, o solo não está inundado, mas sim com teor de água na faixa entre a capacidade campo e a saturação.

Diversos estudos têm sido conduzidos com o propósito de definir um manejo de água mais racional para a cultura do arroz. Com a irrigação por inundação contínua, obtêm-se altas produtividades de arroz devido aos aumentos significativos do número de panículas por área, número de grãos por panículas e a massa de 1000 grãos (Reddy & Raju, 1987; Dotto et al., 1990). Entretanto, Leite et al. (1984), comparando os efeitos da irrigação por inundação contínua, intermitente e por sulcos sobre a produtividade da cultura do arroz irrigado em solo aluvial-eutrófico de textura média no vale do Rio Gortuba, no norte de Minas Gerais, verificaram que, apesar da excelente produtividade obtida pela inundação contínua, este sistema não é viável para as condições locais, dado o alto consumo e custo da água.

Estudos de Duarte & Costa (1971) demonstram que a modalidade de irrigação por inundação intermitente em várzeas da baixada fluminense fez decrescer a porcentagem de nitrogênio no solo, bem como os teores de cálcio e magnésio, porém, não interferiu na produtividade, no pH, nem tampouco nos teores de carbono, alumínio, fósforo e potássio. Loeb et al. (1987), por sua vez, obtiveram o maior número de panículas e alta produtividade do arroz, quando se manteve o solo constantemente saturado durante todo ciclo da cultura, além da diminuição das perdas de nitrogênio no solo e uma redução no consumo de água em 29%, em relação aos resultados obtidos com a cultura do arroz sob inundação contínua.

Nas Filipinas, pesquisas desenvolvidas pelo International Rice Research Institute - IRRI - (1969) e na Índia, por Jha et al. (1981), confrontando diferentes práticas de manejo de água na cultura do arroz irrigado por inundação contínua ou com o solo saturado, durante todo ciclo da cultura, não detectaram efeito significativo dos diferentes manejos de água sobre a produtividade da cultura. Porém, a maior eficiência do uso da água (1,33 gramas de arroz por litro de água) foi obtida com a saturação do solo durante todo ciclo da cultura.

Experimentos conduzidos na Colômbia por Barreto & Rojas (1987), comparando diferentes práticas de manejo da água e níveis de nitrogênio, aplicado na cultura do arroz irrigado, obtiveram maior produtividade de grãos aplicando 160 kg.ha⁻¹ de N, com a cultura inundada durante a fase vegetativa e com o solo saturado até o final do ciclo. A segunda maior produtividade foi obtida com 120 kg.ha⁻¹ de N, mantendo-se o solo saturado na fase vegetativa e submerso no restante do ciclo da cultura. Porém, a análise econômica indicou maior retorno aplicando a dose de 120 kg.ha⁻¹ de N, mantendo-se o solo saturado durante todo ciclo da cultura. A inundação contínua, durante todo ciclo da cultura, por sua vez, aumentou significativamente a altura da planta.

Alves & Machado (1991) constataram que a submersão do solo no início do perfilhamento resultou em maior produtividade devido ao aumento obtido no número de panículas e grãos por panícula em relação à inundação iniciada na diferenciação dos primórdios florais. Por outro lado, Stone et al. (1990), estudando diferentes formas de manejo de água para as várzeas da região Centro-Oeste, observaram que a combinação da inundação intermitente na fase vegetativa com inundação contínua na fase reprodutiva propicia maior produtividade de arroz por favorecer o perfilhamento e a obtenção de maior número de grãos por panícula e peso de grãos.

Pesquisas realizadas por Mascarenhas (1987) e Medeiros et al. (1995) em várzeas nos Estados do Pará e de Roraima, respectivamente, comparando diversos manejos de água na cultura do arroz irrigado, não verificaram efeitos significativos destas práticas de manejo sobre a produtividade do arroz, nem nos seus componentes de produção. Porém, pesquisa similar conduzida em várzea no município de Piracicaba-SP, mostrou que a inundação contínua iniciada mais cedo, ou seja, aos 18 dias e aos 36 dias após a emergência propiciou aumentos no peso de matéria seca da parte aérea das plantas de arroz, no número de grãos cheios por panícula e na produtividade de grãos (Medeiros et al., 1997).

2.4 Compactação do Solo

A compactação do solo é definida como o processo que causa a alteração do volume de solo, resultante geralmente, da aplicação momentânea de uma carga, causando alteração no arranjo de suas partículas sólidas com a redução do seu espaço poroso (Grohmann, 1975).

Conforme Harris (1971), quando um solo é submetido à ação de uma carga suficiente para causar uma alteração no volume, existem quatro possíveis fatores aos quais a alteração poderia ser atribuída: uma compressão das partículas sólidas; uma compressão das substâncias líquidas e gasosas dentro dos poros; uma alteração dos teores de líquidos e gases nos espaços porosos e um rearranjo das partículas sólidas, influenciando muitas propriedades do solo. A distribuição dos poros é alterada, diminuindo a macroporosidade, a porosidade total, a taxa de infiltração de água, a condutividade hidráulica do solo, o teor de água e ar, a temperatura e a disponibilidade de nutrientes no solo, além de aumentar a resistência do solo à penetração (Alvarenga et al., 1996; Costa, 1998; Stone et al., 2002a).

Entretanto, os efeitos do processo da compactação do solo dependem de suas características, principalmente da textura e matéria orgânica, do tipo de argila, do teor de água no solo (Mantovani, 1992; Silva, 1998), do tipo de preparo do solo, relacionando a presença ou não de revolvimento, se houver, do sistema de implemento e número de passagens e, principalmente, do peso por eixo da maquinaria (Mantovani, 1987).

Mantovani (1992), estudando a relação entre o teor de água e a compactação do solo para diferentes classes de Latossolos, verificou que, além de cada solo apresentar uma curva específica de compactação, as máximas densidades tendem a decrescer com o aumento da umidade do solo, bem como a máxima compactação foi obtida quando o solo se encontrava com umidade

próximo à capacidade de campo. Já Tavares & Costa (1993) obtiveram, para o Latossolo Roxo, valores máximos de densidade do solo com umidade na faixa de 23-25%, e para a terra roxa estruturada, na faixa de 29-30%, o que pode ser atribuído ao seu alto teor de argila e à alta atividade coloidal.

A curva característica de retenção da água no solo pode ser afetada por uma série de fatores, que vão desde a distribuição relativa do tamanho, da forma e do arranjo das partículas do solo, até a composição e concentração dos solutos (Salter & Willians, 1974; citados por Moraes et al., 1993) e pela estrutura, principalmente na faixa mais úmida, como no caso da capacidade de campo, mas não para o ponto de murcha permanente. Para baixos teores de água no solo, o potencial matricial praticamente independe de fatores geométricos da amostra, sendo a porosidade e a densidade global do solo de pouca importância na sua determinação (Reichardt, 1993b).

Em condições de saturação, a quantidade de água retida pelo solo diminui com a compactação, bem como a porosidade total, evidenciando que uma amostra compactada, mesmo a baixas tensões, retém menos água que uma não compactada (Camargo, 1983). A caracterização do grau de compactação do solo pode ser medida pelo aumento da densidade global ou pela diminuição da sua porosidade. Conforme Mantovani (1987), o melhor método direto para esta quantificação é através da determinação da densidade do solo, a qual pode ser definida como a massa de solo seco, a 105-110 °C, por unidade de volume total de solo, expressa em kg.dm^{-3} .

Os efeitos prejudiciais da compactação excessiva dos solos consistem, principalmente, em mudanças indesejáveis das características físico-hídricas do solo, afetando os processos de armazenamento e de disponibilidade de água, nutrientes e aeração do solo, bem como o desenvolvimento do sistema radicular das culturas, por impedimento de ordem física (Camargo, 1983; Ripoli, 1992).

De acordo com Primavesi (1990), as espécies variam na capacidade de romper as camadas compactadas; mas, de modo geral, uma densidade de solo entre 1,2 e 1,4 kg.dm⁻³ já pode constituir uma barreira para o crescimento radicular, sendo crítico na densidade de 1,6 kg.dm⁻³. Assim, Grohmann & Queiroz Neto (1966) constataram que para a cultura do arroz de terras altas houve impedimento físico ao desenvolvimento das raízes quando a densidade do solo atingiu valores superiores a 1,38 kg.dm⁻³ no Podzólico Vermelho Amarelo e a 1,42 kg.dm⁻³ no Latossolo Roxo. Por sua vez, Guimarães & Moreira (2001) observaram redução na altura de plantas e na densidade do sistema radicular desta cultura a partir da densidade de 1,2 kg.dm⁻³. Resultado semelhante também foi observado para a cultura do feijoeiro por Guimarães et al. (2002).

Os fatores que mais afetam o desenvolvimento normal das raízes em solos em condições de compactação são: ausência de macroporos e fendas; baixa concentração de oxigênio e, principalmente, a redução da taxa de difusão de oxigênio e de nutrientes para as raízes (Costa, 1998; Ribeiro, 1999); excesso de água durante as chuvas e deficiência nos períodos secos; variação na disponibilidade de nutrientes; presença de substâncias tóxicas, como altas concentrações de manganês, dióxido de carbono e alumínio (Corsini, 1979). Já se observou diminuição de até quatro vezes do teor de N mineralizado com o aumento da densidade global de um solo de textura franco-argilosa (Whisler et al., 1965; citados por Camargo & Alleoni, 1997). Entretanto, Hoffmann & Jungk (1995), estudando o comportamento da beterraba em solo sob diferentes níveis de compactação e teores de água no solo, concluíram que o principal fator de restrição ao desenvolvimento do sistema radicular em solo compactado foi a resistência à penetração e não a aeração. Outrossim, a resistência à penetração diminuiu com o aumento da umidade no solo, atingindo em torno de 50% com a variação do potencial matricial de -30 kPa para -10 kPa.

Contudo, o uso de rolos compactadores melhora consideravelmente a formação de pastagem, principalmente em solos de textura arenosa, ressaltando a importância da compactação na emergência das plântulas (Carvalho & Cruz, 1985). Fato comprovado também por Montti et al. (2001), os quais observaram que a passagem de um rolo compactador antes e/ ou após a semeadura propiciou aumento significativo na emergência de plântulas de cultivares de *Panicum virgotum*, em comparação com as médias obtidas com o preparo de solo convencional, mas não diferiu das médias alcançadas no sistema de plantio direto. Porém, Trein et al. (1991) obtiveram menor população de plantas de milho e produtividade de grãos no sistema de plantio direto, em comparação com as médias do sistema convencional.

Quanto aos efeitos da compactação sobre a disponibilidade e a absorção de nutrientes pelas plantas, há variação dependendo do tipo de solo, da cultura e do sistema de cultivo adotado. Corrêa et al. (1998), testando cultivares de cana-de-açúcar em solos sob diferentes níveis de compactação, constataram que o grau de compactação reduziu a concentração de Zn, B e Fe na parte aérea da cana-de-açúcar e aumentou a de S, K e N, independentemente do cultivar e do tipo de solo. Para o fósforo, houve aumento na concentração no Latossolo Vermelho, textura média e redução no Latossolo Vermelho textura argilosa, independentemente da variedade de cana. Já, no Latossolo Roxo houve efeito benéfico da compactação até a densidade de $1,37 \text{ kg.dm}^{-3}$ para o cultivar RB72454.

Comparando o efeito da compactação sobre o acúmulo de fósforo e na produção de matéria seca de raízes e da parte aérea de plantas de soja e eucalipto em dois Latossolos de textura muito argilosa (LE) e franco arenosa (LV), respectivamente, Ribeiro (1999) observou que a compactação reduziu o acúmulo de P na parte aérea das plantas, bem como da produção de matéria seca das raízes e da parte aérea das plantas de soja e de eucalipto, independentemente do

solo. Contudo, o Latossolo arenoso proporcionou a maior produção da matéria seca de raízes e da parte aérea em ambas as espécies e o acúmulo de P nas plantas de eucalipto.

Segundo Buckman & Brady (1974) os solos arenosos, geralmente favorecem a absorção do P e do K, por apresentarem menor capacidade de adsorção desses elementos devido a maior porosidade e, conseqüentemente, maior taxa de infiltração de água, condutividade hidráulica e aeração, em relação aos solos mais argilosos. Isso favorece a atividade dos micro-organismos no solo, a mineralização da matéria orgânica, os processos de difusão e do fluxo de massa que, de acordo com Baber (1974) e Vargas (1982), são os principais mecanismos de transporte dos íons desses nutrientes na solução do solo para as raízes das plantas.

Villane et al. (1993), estudando a difusão de fósforo em dois Latossolo de texturas média e argilosa, respectivamente, e três níveis de umidade, constataram redução na difusão do fósforo com o decréscimo da umidade, em ambos os solos. Entretanto, a difusão do P no solo de textura média, sob a umidade correspondente à tensão de 10 KPa, foi de duas a três vezes maior do que a observada no solo de textura argilosa. Assim, concluíram que o efeito depressivo da menor disponibilidade de água no solo sobre a difusão de P será bem mais drástico nos solos argilosos do que nos arenosos. Costa (1998) também observaram maior fluxo difusivo do P e do K no solo arenoso com o aumento da umidade do solo e redução com o aumento da compactação, independentemente da classe de solo.

Por outro lado, Pedrotti et al. (1994) avaliaram os teores de N, P e K na parte aérea das culturas do milho, arroz de sequeiro e arroz irrigado, cultivados num Planossolo nas densidades $1,3 \text{ kg.dm}^{-3}$, $1,6 \text{ kg.dm}^{-3}$ e $1,9 \text{ kg.dm}^{-3}$, onde verificaram que, para o arroz irrigado, não houve diferença nos teores de N

acumulados sob as diferentes densidades de solo. Contudo, para o milho e o arroz de sequeiro a absorção destes nutrientes diminuiu à medida que se elevou a densidade do solo.

A compactação aumenta a interação do íon de fosfato e de potássio com a superfície dos colóides, ao longo de sua trajetória de difusão, fazendo com que estes elementos tenham que se difundir cada vez mais próximo de superfícies positivamente carregadas que os adsorvem (Novais & Smyth, 1999; Silva et al., 2002). Assim, Rezende et al. (2003) concluíram que a compactação em solos argilosos dificulta drasticamente a absorção de nutrientes pelas culturas, principalmente quando submetidos a baixos teores de água.

Pesquisas conduzidas por Gross et al. (2003) e Schimidt et al. (2003) mostraram que a compactação do solo reduz o perfilhamento de braquiárias, chegando a 32,9% em relação à média obtida no nível zero de compactação, bem como diminui o peso seco de raiz e da parte aérea de plantas à medida que se elevam os níveis de compactação do solo. Outrossim, Leonel et al. (2003), avaliando diferentes braquiárias num solo argiloso sob diferentes níveis de compactação, observaram que a compactação diminuiu a massa seca de raízes e a massa seca da parte aérea das plantas, mas houve aumento no número de perfilhos com a elevação da compactação para a braquiária decumbens e redução para a braquiária brizanta.

Gris et al. (2003), testando a cultura do milho em um Latossolo Vermelho Distroférrico com compactação de superfície, correspondendo à densidade $1,25 \text{ kg.dm}^{-3}$, observaram reduções na altura de plantas de 29,6%, na altura de espigas de 36,2%, no peso de massa seca de raízes de 33,6% e, no peso de massa seca da parte aérea das plantas, foi 36,8%, em relação as médias obtidas no solo com densidade $1,18 \text{ kg.dm}^{-3}$.

Quanto à cultura do arroz, vários trabalhos demonstraram que a compactação do solo reduz a massa seca de raízes (Leite et al., 2003) e da parte aérea de plantas (Ribeiro et al., 2003) e a produtividade de grãos por diminuir o número de espiguetas férteis, principalmente por causa do déficit hídrico (Hoque & Kobata, 2000). Entretanto, Leite et al. (2003) constataram que a compactação de até $3,0 \text{ kg.dm}^{-2}$ em um Latossolo de textura média aumentou a taxa de germinação das sementes, o peso de panículas e o peso da matéria seca da parte aérea das plantas de arroz.

Outros trabalhos mostram que, quando em magnitude moderada, a compactação tem proporcionado efeitos benéficos, como melhoria do contato solo-semente e raiz, favorecendo a absorção de água e de nutrientes (Smucker & Erickson, 1989; Borges, 1995 e Stirzaker et al., 1996) e aumento da disponibilidade de água em anos secos (Camargo, 1983). Estudos desenvolvidos por Sharma et al. (1995) e Ghildyal (1978), citado por De Datta (1981), por sua vez, mostraram que a compactação do solo reduziu as perdas de nutrientes por lixiviação e aumentou a eficiência de uso da água, a altura de plantas, a produtividade de grãos e o índice de colheita da cultura do arroz em várzea úmida, em relação aos resultados obtidos com “puddling”.

Ogunremi (1991), ao avaliar os efeitos de densidades do solo na faixa de $1,3$ a $1,7 \text{ kg.dm}^{-3}$ e do manejo de água em várzea com a cultura do arroz, verificou que as densidades de $1,6$ e $1,5 \text{ kg.dm}^{-3}$ foram ótimas para o desenvolvimento dos componentes de produção e produtividade da cultura, mantida sob inundação contínua, e/ ou com teor de água no solo contido na tensão de 10 kPa a 100% saturado, respectivamente. A justificativa é de que densidades maiores proporcionaram maior absorção de nutrientes pelas plantas, aumento na massa seca de raízes e da parte aérea das plantas de arroz, bem como o número de panículas e a produtividade de grãos por vaso.

Dias-Zambrana (1994) constatou que solos arenosos compactados limitam mais intensivamente o aprofundamento do sistema radicular de leguminosas do que os de textura mais argilosa, devido à maior alteração observada na sua porosidade total. Entretanto, Santos (2001), estudando os efeitos de diferentes graus de compactação (65 a 95 %) e de níveis de fósforo em três tipos de solo cultivados com a cultura do milho, verificou que o grau de compactação de 75% nos solos não restringiu o desenvolvimento do sistema radicular e proporcionou aumentos na matéria seca total e da parte aérea das plantas, bem como na absorção e no acúmulo de fósforo em plantas de milho. Mas, para graus de compactação superiores a 85%, em geral houve restrições para o desenvolvimento normal das plantas.

Comparando o desempenho de cultura da soja sob diferentes níveis de compactação e manejo da água, Santamaria & Gallardo (1992) observaram que a compactação afetou o desenvolvimento radicular e a disponibilidade de água influenciou na taxa de germinação, no peso de 100 sementes e na produtividade de grãos. Todavia, tanto o manejo quanto a compactação do solo não afetaram a absorção de nutrientes, a altura de plantas e a qualidade das sementes. Já, Santi et al. (2003) e Kaiser et al.(2003), testando o efeito de diferentes sistemas de plantio direto sem compactação adicional, preparo com escarificação, gradagem e plantio direto com compactação adicional imediata sobre a produtividade de grãos do feijoeiro, não encontraram diferenças na produtividade obtida entre os sistemas de plantio direto sem compactação adicional (1.484 kg.ha⁻¹) e com a escarificação e gradagem (1.306 kg.ha⁻¹), mas a compactação adicional com quatro passadas de máquinas proporcionou produtividade de grãos (516,5 kg.ha⁻¹) cerca de 62% inferior à produtividade máxima obtida.

Outrossim, pesquisa desenvolvida por Silveira (2002) mostrou que a densidade de solo de 1,39 kg.dm⁻³ proporcionou aumento de 48% da produção de matéria seca da parte aérea de plantas de arroz, em relação a produção obtida

sob a densidade de $1,12 \text{ kg.dm}^{-3}$. Cruz (1989), em dois experimentos conduzidos em várzea de solo argiloso, verificou que a compactação do solo efetuada com rolo compressor, uma vez antes e outra após a semeadura do arroz, aumentou a densidade de plantas, o número de panículas por metro quadrado, o peso de 1000 grãos e a produtividade de grãos de $5,18 \text{ t. ha}^{-1}$ para $7,93 \text{ t. ha}^{-1}$ no experimento que recebeu pressão de compactação de $2,4 \text{ kg.cm}^{-2}$ e de $5,83 \text{ t. ha}^{-1}$ para $6,8 \text{ t. ha}^{-1}$, no experimento em que a pressão de compactação foi de $4,0 \text{ kg.cm}^{-2}$.

Estudos desenvolvidos por Kluthcouski (1998) com objetivo de avaliar a necessidade de descompactação e/ou a homogeneização da fertilidade de um Latossolo Roxo sob cerrado, cultivado há oito anos no sistema de plantio direto com as culturas de milho, feijão, arroz e soja, concluíram que o plantio direto proporcionou a elevação da densidade do solo na profundidade de 5 a 20cm, provocando restrições significativas ao aprofundamento radicular das culturas do milho e do feijão e não significativas para a soja e o arroz e que houve acúmulo de Mg, P, K, Zn e Mn na camada superficial do solo. O arroz de terras altas mostrou-se pouco adaptado ao sistema de plantio direto devido basicamente ao adensamento do solo e à redução da macroporosidade, devendo para isso, o solo ser revolvido ciclicamente. Porém, para as demais culturas, não foi possível concluir sobre a necessidade de revolvimento cíclico do solo devido ao excesso hídrico ocorrido durante o período de condução dos experimentos.

2.5 Plantio direto

O sistema de plantio direto consiste na semeadura direta efetuada sobre uma cobertura vegetal, previamente dessecada por herbicida de ação total, admitindo-se um revolvimento de até 30% da superfície do solo (Fornasieri Filho & Fornasieri, 1993).

Por não revolver o solo, diversos trabalhos constataram que o sistema de plantio direto proporciona adensamento na camada superficial do solo (Alvarenga et al., 1987; Canalli & Roloff, 1997; Rosa Júnior, 2000; Chassot et al., 2001), maior concentração do sistema radicular em camadas mais superficiais e menor em profundidade em relação ao sistema convencional (Klutchcouski, 1998; Melo Ivo & Melniczuk, 1999). Entretanto, Henklain et al. (1996) admitem que essa compactação vai diminuindo à medida que passa o tempo de uso deste sistema de cultivo, pela ação do aumento da matéria orgânica, principalmente pelas galerias formadas pelo sistema radicular das culturas em rotação, associadas à maior atividade biológica no solo.

Hill et al. (1985) observaram ser necessário um período de três a quatro anos para o solo apresentar uma porosidade mais favorável, na camada de 0 a 15 cm, quando comparado com o convencional. Outrossim, Reeves (1995) acredita que a densidade do solo, no plantio direto, pode vir a diminuir com o passar dos anos, pela ação da matéria orgânica e de substâncias que os microrganismos excretam, agregando as partículas do solo. Assim, Lopes et al. (2003), monitorando a densidade do solo e a porosidade de um Latossolo Bruno, cultivado durante três anos em plantio direto com soja, milho e o consórcio aveia preta com nabo forrageiro, observaram que no final do terceiro ano, houve redução na densidade do solo e aumento da porosidade.

Por outro lado, pesquisa conduzida por Stone et al. (2002b), com a cultura do arroz de terras altas sob os sistemas de preparo de solo com grade

aradora, arado de aiveca e plantio direto, durante quatro anos, não constatou diferenças na densidade do solo nem na porosidade do solo entre os sistemas, à exceção da profundidade de 10 a 20 cm, onde o preparo com grade aradora proporcionou aumento na densidade do solo.

Em solos de várzeas, Gomes et al. (1999), avaliando diferentes sistemas de produção com a cultura do arroz irrigado por inundação, durante três anos, verificaram aumento dos teores de matéria orgânica, P, K e Ca no solo. Outrossim, o plantio direto sobre a cobertura de tremoço azul reduziu os teores de Ca e Mg no solo. Assim, Infeld et al. (1999) verificaram que, efetuando a adubação na pastagem de inverno, não foi necessário a adubação da cultura seguinte do arroz irrigado, ou seja, a adubação residual da pastagem supriu adequadamente a demanda nutricional da cultura do arroz, proporcionando produtividades de grãos iguais às obtidas nas parcelas adubadas no plantio.

Porém, Genro Júnior et al. (2002), em pesquisa com objetivo de avaliar a influência da rotação de cultura na produtividade de grãos de arroz irrigado e a disponibilidade de nutrientes, em uma área no Rio Grande do Sul, após seis anos de rotação de cultura, envolvendo soja/sorgo/milho/pousio/arroz sob diferentes sistemas de cultivo, constataram que as rotações de culturas sob plantio direto e convencional não proporcionaram melhorias nutricionais capazes de aumentar a produtividade das culturas, exceto no milho sob plantio direto.

Quanto à produtividade de grãos, Dias et al. (1995), ao avaliarem o desempenho de arroz irrigado sob diferentes sistemas de cultivo, durante dois anos consecutivos, observaram que, no primeiro ano, não houve diferenças na produtividade de grãos entre os sistemas de plantio. Mas, no segundo ano, o sistema de plantio direto sobre a cobertura de trigo e trevo branco favoreceu um aumento na produtividade de grãos cerca de 15% em relação às médias obtidas sob os sistemas convencional e cultivo mínimo. Verneti Júnior et al. (1995), em

estudo semelhante, observaram aumento na produtividade de grãos propiciado pelo plantio direto, independentemente do cultivar. Todavia, diversos pesquisadores (Gomes et al., 1998; Weber et al., 1999; Macedo et al., 1999), ao avaliarem diferentes sistemas de cultivo, não encontraram diferenças na produtividade de grãos de arroz irrigado sob o sistema convencional e/ ou em plantio direto.

Para a cultura do arroz de terras altas, o plantio direto ainda não é uma tecnologia consolidada, cujos resultados apresentam algumas controvérsias. Desta forma, muitos pesquisadores ainda recomendam o preparo do solo com uso de aração ou escarificação (Pedroso & Corsini, 1983; Embrapa, 1996), considerando que a macroporosidade do solo seja um fator imprescindível para o desenvolvimento e a produtividade da cultura (Kluthcouski, 1998; Séguy et al., 1999).

Na predominância de microporosidade, as raízes do arroz não conseguem reduzir seu diâmetro para penetrar nos microporos, menores que suas extremidades. Assim, elas têm que deslocar as partículas do solo, sendo que a força necessária rapidamente se esgota e o alongamento das raízes é restringido (Marschner, 1995).

Segundo Seguy et al. (1989), citado por Kluthcouski et al. (2002), o arroz de terras altas é pouco adaptado ao sistema de plantio direto devido a sua sensibilidade à qualidade do perfil do solo, em quaisquer que sejam as condições climáticas, indicando alta sensibilidade à porosidade do solo. Além disso, Kluthcouski (1998) justifica a necessidade de preparo do solo, afirmando que o adensamento nas camadas superficiais do solo condiciona o desenvolvimento do sistema radicular na camada superficial (em torno dos 15 cm de profundidade), gerando problemas de nutrição e absorção de água.

Por outro lado, Fageria et al. (1999) admitem que apesar de as plantas cultivadas sob plantio direto geralmente apresentarem raízes mais concentradas na superfície, necessariamente isso não resulta em menor resistência à seca durante veranicos. Algumas raízes podem atingir até profundidades maiores do que no plantio convencional, penetrando através de galerias formadas pela fauna do solo ou oriundas da morte de raízes de culturas anteriores, suprimindo melhor as plantas com água. Além disso, a matéria orgânica retém mais a água no solo, mantendo-o com maior teor de água disponível por um período de déficit hídrico mais longo (Sidras et al., 1983). Já, Bauer & Black (1992) salientam que, em anos de chuvas normais, o adensamento superficial não se evidencia, proporcionando boas produtividades de grãos, porém, em anos com déficit hídrico, se não for quebrada essa camada, podem haver reduções significativas.

Diversos estudos têm sido conduzidos com arroz de terras altas, comparando os efeitos dos sistemas de plantio direto com outros sistemas de preparo do solo, cujos resultados são divergentes. Muitas destas pesquisas mostram que o plantio direto proporcionou menor produtividade de grãos em relação à obtida com o preparo com grade e/ ou com arado (Crufis, 1976; Stone et al., 1980; Santos et al., 1997; Seguy & Bouzinac, 1992a; citados por Moura Neto, 2001 e Kluthcouski et al., 2002), cujas causas foram atribuídas principalmente ao aumento da densidade do solo. Por outro lado, diversos pesquisadores (ARF et al., 2003; Moura Neto, 2001; Stone et al., 2002b; Ogunremi, et al., 1986 e Olofintoye, 1989) não observaram diferenças na produtividade de grãos de arroz obtidas entre os sistemas de plantio direto e/ ou com preparo convencional.

Na tentativa de desvendar o segredo do insucesso do plantio direto no arroz de terras altas, Soares (2004), após um minucioso estudo sobre o assunto e com base em suas observações de campo, sugere que o principal fator limitante ao bom desempenho do arroz de terras altas no sistema de plantio direto está

relacionado à incapacidade de o arroz utilizar, na fase inicial de desenvolvimento, o nitrogênio na forma de nitrato, pois há fortes evidências de que o arroz irrigado ou de terras altas, durante a fase juvenil, não possui e/ ou é carente da enzima redutase do nitrato, a qual é imprescindível no processo de redução do nitrato a amônia. A ausência ou a baixa disponibilidade desta enzima no primeiro mês de vida da planta faz com que o N-NO_3^- não seja aproveitado pelo arroz. Conseqüentemente, a deficiência de N nessa fase de desenvolvimento da planta reduz o crescimento do sistema radicular e da parte aérea, bem como o número de perfilhos. Mas a partir desta fase, a planta passa a produzir a enzima redutase do nitrato em maior quantidade e a deficiência de nitrogênio tende a desaparecer, contudo o prejuízo inicial é praticamente irreversível, comprometendo o potencial produtivo do arroz.

No sistema de plantio direto em terras altas, a mineralização da matéria orgânica é lenta e há um estresse de N amoniacal para a planta de arroz no estágio inicial de desenvolvimento, ao contrário do sistema convencional, em que a mineralização é mais rápida, com maior disponibilidade de N. Contudo, esse sistema não é sustentável por mais de dois a três anos consecutivos (Soares, 2004).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Local

O experimento foi conduzido em casa de vegetação pertencente ao Departamento de Agricultura da Universidade Federal de Lavras – UFLA, em Lavras-MG, situada nas coordenadas geográficas: 21°14'06" latitude sul, 45°00' longitude oeste e 918 m de altitude. O período de condução do trabalho na casa de vegetação foi de setembro de 2002 a janeiro de 2003.

3.2 Solos e suas características

Foram utilizadas amostras da camada de 0 a 20 cm de dois solos, classificados por Curi¹ como Neossolo Flúvico (RU), anteriormente denominado aluvial, coletado em várzea no município de Piumhi-MG e um Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA) originário do município de Lavras-MG. Para simplificar, doravante usar-se-ão as nomenclaturas Neossolo e Latossolo, respectivamente.

De cada solo coletaram-se amostras indeformadas e deformadas. As indeformadas, para a determinação da densidade do solo (ds), e as deformadas para as determinações físicas, químicas e para enchimento e preparo dos vasos. Ambos os solos foram analisados no laboratório de análise física e química de solos do Departamento de Ciência do Solo da UFLA. Os resultados encontram-se na Tabela 1.

¹ Curi, N. Comunicação pessoal.

TABELA 1 - Características químicas e físicas dos solos utilizados no estudo. UFLA, Lavras-MG, 2004.

Características	Neossolo	Latossolo
pH em água (1:2,5)	5,7	6,2
P Mehlich (mg.dm ⁻³)	19,4	14,6
K Mehlich (mg.dm ⁻³)	225	155
Na Mehlich (mg.dm ⁻³)	1,8	1,8
Ca (cmol _c .dm ⁻³)	4,9	2,9
Mg (cmol _c .dm ⁻³)	1,6	1,3
Al (cmol _c .dm ⁻³)	0,1	0,0
H + Al (cmol _c .dm ⁻³)	3,2	2,3
t CTC efetiva (cmol _c .dm ⁻³)	7,2	4,6
T CTC a pH 7,0 (cmol _c .dm ⁻³)	10,3	6,9
Zn (mg.dm ⁻³)	3,7	4,6
Fe (mg.dm ⁻³)	190	74
S (mg.dm ⁻³)	63,2	10,8
Mn (mg.dm ⁻³)	33,0	8,0
Cu (mg.dm ⁻³)	4,7	1,3
B (mg.dm ⁻³)	0,4	0,5
P remanescente (mg.L ⁻¹)	12,9	12,9
Índice de saturação de bases (%)	68,9	66,7
Soma de bases trocáveis (cmol _c .dm ⁻³)	7,1	4,6
Matéria Orgânica (dag.kg ⁻¹)	2,0	1,8
Teor de areia (dag.kg ⁻¹)	8,0	47,0
Teor de silte (dag.kg ⁻¹)	35	10
Teor de argila (dag.kg ⁻¹)	57	43
Densidade de partícula (kg.dm ⁻³)	2,63	2,57
Densidade do solo indeformado (kg.dm ⁻³)*	1,17	1,36
Densidade do solo desestruturado (kg.dm ⁻³)	1,11	1,13

* Densidade média observada no campo na profundidade de 0 a 30 cm em amostras indeformadas.

3.3 Análises preliminares

Foi determinado a capacidade de compactação máxima dos solos através do teste de Procton normal. Utilizaram-se amostras de 5 kg de cada solo previamente secas ao ar e peneiradas em peneiras com malha de 4,76 mm, colocando-as em cilindro de prova com capacidade de 1,0 dm³ de maneira que, após compactados, suas alturas fossem iguais a 1/3 do cilindro. Foram tomadas três amostras que foram submetidas a 25 golpes por camada com um soquete de 2,5 kg. Após compactado, o corpo de prova foi extraído, coletando-se uma amostra do seu centro para a determinação da umidade e da densidade do solo. Foram feitos seis pontos com os solos sob diferentes teores de água até alcançar a densidade máxima dos solos. Para o Neossolo, a densidade máxima foi de 1,36 kg.dm⁻³, e para o Latossolo, de 1,59 kg.dm⁻³, atingidas com os teores de água de 26% e 22% base em peso, respectivamente.

Após a determinação da densidade máxima atingida para cada solo, calculou-se a amplitude de variação da densidade do solo (Δds) para os solos em estudo, necessário, para a definição dos tratamentos de compactação através da expressão:

$$\Delta ds = ds \text{ máxima} - ds \text{ mínima} \quad (1)$$

em que:

Δds : amplitude de variação da densidade do solo (kg.dm⁻³),

ds máxima: densidade máxima do solo atingida pelo teste de Procton,

ds mínima: densidade mínima do solo (“solto” ou desestruturado).

Para o Neossolo a $\Delta ds = 1,36 \text{ kg. dm}^{-3} - 1,11 \text{ kg. dm}^{-3} = 0,25 \text{ kg. dm}^{-3}$; e

para o Latossolo a $\Delta ds = 1,59 \text{ kg. dm}^{-3} - 1,13 \text{ kg. dm}^{-3} = 0,46 \text{ kg. dm}^{-3}$.

Foram utilizados seis níveis de compactação: 0%, 16%, 32%, 48%, 64% e 80% da Δ_{ds} , resultando em seis diferentes densidades do solo para cada classe de solo.

Cálculo das densidades de solo para o Neossolo:

Nível 0: 0% da Δ_{ds} = a densidade mínima do solo sem compactação = 1,11 kg.
 dm^{-3} .

Nível 1: 16% da Δ_{ds} e as demais densidades foram determinadas por regra de três:

$$0,25 - 100, x = (0,25 \times 16)/100 = 0,04 \Delta_{ds} \text{ a } 16\% = 1,11 + 0,04 = 1,15 \text{ kg. dm}^{-3}.$$
$$x - 16$$

$$\text{Nível 2: } 32\% \text{ da } \Delta_{ds}: x = (0,25 \times 32)/100 = 0,08 \Rightarrow 1,11 + 0,08 = 1,19 \text{ kg. dm}^{-3}.$$

$$\text{Nível 3: } 48\% \text{ da } \Delta_{ds}: x = (0,25 \times 48)/100 = 0,12 \Rightarrow 1,11 + 0,12 = 1,23 \text{ kg. dm}^{-3}.$$

$$\text{Nível 4: } 64\% \text{ da } \Delta_{ds}: x = (0,25 \times 64)/100 = 0,16 \Rightarrow 1,11 + 0,16 = 1,27 \text{ kg. dm}^{-3}.$$

$$\text{Nível 5: } 80\% \text{ da } \Delta_{ds}: x = (0,25 \times 80)/100 = 0,20 \Rightarrow 1,11 + 0,20 = 1,31 \text{ kg. dm}^{-3}.$$

Cálculo para as densidades do Latossolo

Nível 0: 0% da Δ_{ds} = a densidade mínima do solo sem compactação = 1,13 kg.
 dm^{-3} .

$$\text{Nível 1: } 16\% \text{ da } \Delta_{ds}: x = (0,46 \times 16)/100 = 0,07 \Rightarrow 1,13 + 0,07 = 1,20 \text{ kg. dm}^{-3}.$$

$$\text{Nível 2: } 32\% \text{ da } \Delta_{ds}: x = (0,46 \times 32)/100 = 0,14 \Rightarrow 1,13 + 0,15 = 1,28 \text{ kg. dm}^{-3}.$$

$$\text{Nível 3: } 48\% \text{ da } \Delta_{ds}; x = (0,46 \times 48)/100 = 0,22 \Rightarrow 1,13 + 0,22 = 1,35 \text{ kg. dm}^{-3}$$

$$\text{Nível 4: } 64\% \text{ da } \Delta_{ds}; x = (0,46 \times 64)/100 = 0,29 \Rightarrow 1,13 + 0,29 = 1,42 \text{ kg. dm}^{-3}.$$

$$\text{Nível 5: } 80\% \text{ da } \Delta_{ds}: x = (0,46 \times 80)/100 = 0,37 \Rightarrow 1,13 + 0,37 = 1,50 \text{ kg. dm}^{-3}.$$

3.4 Montagem do experimento

3.4.1 Tratamentos

- **Duas classes de solos:** Neossolo e Latossolo.

- **Seis níveis de compactação dos solos:**

N0 = 0%; N1 = 16%; N2 = 32%; N3 = 48%; N4 = 64% e N5 = 80%, da amplitude de variação da densidade do solo, respectivamente, equivalentes às seguintes densidades: para o Neossolo - 1,11 kg.dm⁻³; 1,15 kg.dm⁻³; 1,19 kg.dm⁻³; 1,23 kg.dm⁻³; 1,27 kg.dm⁻³ e 1,31 kg. dm⁻³, e para o Latossolo - 1,13 kg.dm⁻³; 1,2 kg.dm⁻³; 1,27 kg.dm⁻³; 1,35 kg.dm⁻³; 1,42 kg.dm⁻³ e 1,50 kg.dm⁻³.

- **Três manejos de água:**

M1: Solo saturado com água, isto é, 100% do volume de poros ocupados com água, durante todo ciclo da cultura.

M2: Irrigação do solo quando eram consumidos de 25 a 30% da água disponível total para as plantas (AD) durante todo ciclo da cultura.

M3: Irrigação do solo quando eram consumidos de 50 a 60% da AD, durante todo ciclo da cultura.

Considerou-se água disponível total (AD) como sendo a quantidade de água resultante da diferença entre a umidade (% base em peso) retida no solo na tensão de 6 kPa (“capacidade de campo”) e o teor de água (% base em peso) retido no solo na tensão de 1.500 kPa (“ponto de murcha permanente”), conforme recomendado por Reichardt (1993a).

3.4.2 Preparo dos vasos

As parcelas foram constituídas por vasos confeccionados em vasos de PVC, com diâmetro de 200 mm por 35 cm de altura com uma coluna de solo de 7,018 dm³. Para evitar que houvesse perda de água por drenagem, vedou-se a extremidade inferior dos vasos, utilizando-se anéis de borracha de câmara de ar. Como o manejo da água foi efetuado por meio de pesagem, foi necessário tomar o peso de todos os vasos vazios, bem como o peso dos anéis de borracha, para se obter o peso bruto de cada parcela.

Os solos foram secados à sombra e peneirados em malha de 4,76 mm. Determinou-se a umidade dos mesmos e pesaram-se as quantidades suficientes para cada solo atingir 7,018 dm³, correspondente ao volume de solo em cada vaso a ser testados sob diferentes níveis de densidade do solo.

Para cada quantidade dessas de solo, foram adicionados 18% a 26% de água para que ele atingisse a umidade adequada para se proceder a compactação, até atingir os níveis de densidades pré-estabelecidos nos tratamentos. Estes foram homogeneizados manualmente, divididos em três partes iguais e acondicionados em sacos plásticos até serem compactados.

A compactação do solo em cada vaso foi realizada por meio de uma prensa hidráulica. O procedimento da compactação foi o seguinte: tomou-se cada uma das três partes de cada vaso, que foram compactadas em três camadas para que a compactação ficasse uniforme.

Para que não houvesse deformação dos vasos durante a compactação dos solos, utilizou-se uma abraçadeira confeccionada em chapa de ferro com 35 cm de altura e diâmetro regulável, com quatro parafusos e porcas tipo borboleta, para envolver o vaso durante a compactação do solo. Utilizaram-se também duas chapas de ferro: uma com o diâmetro igual ao diâmetro externo dos vasos para vedar o fundo dos mesmos, impedindo que o solo, quando compactado, não

extravasasse, e outra chapa de ferro com guia de 5 cm de altura e com diâmetro de 190 mm, necessária para ser colocada na extremidade superior do vaso, apoiar o corpo da prensa e efetuar a compactação dos solos até atingir a densidade desejada. O equipamento auxiliar à compactação é mostrado na Figura 1.

Efetuiu-se um ensaio para aferir a densidade dos solos e suas respectivas capacidades de retenção de água. Para isso, após a compactação dos solos em cada vaso, foram coletadas amostras de solo através de anéis volumétricos (45 mm de diâmetro x 11 mm de altura), introduzidos junto com o solo solto antes de sofrerem a compactação. Após o solo ter sido compactado, os anéis foram retirados, contendo as amostras de solo indeformadas, as quais foram utilizadas para conferir as respectivas densidades do solo alcançadas, bem como para a determinação de capacidade de retenção de água destes solos nas diferentes densidades.



FIGURA 1 - Equipamento auxiliar utilizado para a compactação dos solos nos vasos, UFLA, Lavras-MG, 2004.

Os valores da retenção de água no solo nas tensões de 6 e 10 kPa foram determinados em mesa de tensão. Para as demais tensões, os valores foram determinados através do método de membranas de Richard (1947), efetuado no Laboratório de Física de Solos do Departamento de Ciência do Solo da UFLA. Os resultados se encontram na Tabela 2.

TABELA 2 – Teores de água nos solos e sua disponibilidade (% base em peso) em função de diferentes níveis de compactação e tensão (kPa). UFLA, Lavras-MG, 2004.

Compactação (% Δ s)	Tensão (kPa)							Água disponível ²
	0 ¹	6	10	33	100	500	1.500	
Neossolo								
0	53,0	36,4	32,3	31,2	26,3	25,1	23,1	13,3
16	51,4	37,5	33,9	32,0	26,0	25,8	23,4	14,1
32	50,1	37,2	34,6	31,9	26,1	25,2	24,0	13,2
48	48,6	36,9	34,9	32,4	26,2	25,8	24,2	12,7
64	45,8	34,3	33,1	31,4	26,6	25,9	24,2	10,1
80	43,0	33,2	32,2	31,5	26,5	24,9	24,3	8,9
Latossolo								
0	54,0	28,2	24,6	21,6	19,0	16,1	15,1	13,1
16	46,2	30,0	26,8	22,3	20,0	17,7	15,3	14,7
32	38,3	31,3	27,1	22,8	19,8	17,5	16,2	15,1
48	35,4	30,6	26,0	22,1	19,5	17,8	16,7	13,9
64	32,6	29,2	26,4	21,9	19,6	17,8	17,5	12,0
80	29,0	26,3	25,4	21,8	19,4	18,0	17,6	8,7

¹- solo saturado, isto é, 100% do volume de poros ocupados com água. ²- Água disponível é a diferença entre a umidade (% base em peso) retida no solo na tensão de 6 kPa e o teor de água (% base em peso) retido no solo na tensão de 1.500 kPa .

3.4.3 Adubação

A adubação foi efetuada conforme recomendação de Faquim². Constatou-se de uma aplicação no plantio, realizada antes da compactação do solo, colocando-se, por vaso, 2,41 g de fosfato monobásico de potássio + 7,31 g de MAP + 2,15 g de sulfato de magnésio + 2,47 g de nitrato de cálcio e 0,50 mg de FTE BR 13. Em cobertura, foram efetuadas três adubações: a primeira aos 25 dias após a emergência (d.a.e.), aplicando-se 0,97 g de nitrato de potássio + 1,74 g de nitrato de amônia por vaso; a segunda e a terceira foram efetuadas aos 50 e 70 d.a.e., aplicando-se 2,20 g de nitrato de amônia por vaso.

3.4.4 Cultivar e semeadura

Foi utilizado o cultivar de arroz de terras altas “BRS Liderança”, semeado na profundidade de 2,5 cm, utilizando-se oito sementes por vaso. A semeadura foi efetuada no dia 13 de setembro de 2002. Dez dias após a emergência das plântulas, efetuou-se o desbaste, deixando-se duas plantas por vaso. A partir dessa data, estabeleceram-se os tratamentos com manejo da água que foram mantidos até a colheita.

3.4.5 Irrigação

Foram determinadas as quantidades de água a serem aplicadas, em cada irrigação, correspondentes a cada manejo de água no solo, com base nos valores dos teores de água apresentados na Tabela 2. O monitoramento do teor de água no solo foi efetuado através de pesagem. No manejo de irrigação com o solo

² Faquim, V. Comunicação pessoal

saturado (M1), a reposição de água era feita duas vezes ao dia, durante todo ciclo da cultura. No manejo de irrigação com a reposição de água realizada, quando eram consumidos de 25 a 30% da água disponível (M2), a reposição da água era efetuada, em média, a cada dois dias durante a fase vegetativa. Durante a fase de maior demanda, a partir da diferenciação dos primórdios florais, a reposição da água foi realizada até duas vezes ao dia. No manejo de irrigação, quando eram consumido de 50 a 60% da água disponível (M3), a reposição da água foi realizada em turnos que variaram de quatro dias, durante a fase vegetativa, e a um dia, durante a fase de maior demanda.

Durante o desenvolvimento das plantas, foram feitas duas correções do peso dos vasos, aos 55 e 75 dias após a semeadura (d.a.s), estimada através da pesagem da parte aérea de uma planta de arroz com todos os perfilhos (“touceira”). Para isso, foram colocados 12 vasos a mais com esta finalidade. Aos 55 d.a.s., coletou-se, às 8:00 horas da manhã, uma das touceiras e determinou-se o peso verde da mesma, deixando-se a outra touceira para que, aos 75 d.a.s. fosse efetuada a sua pesagem, utilizando o mesmo procedimento.

3.4.6 Delineamento estatístico

Utilizou-se o delineamento inteiramente ao acaso em esquema fatorial 2 x 6 x 3, sendo dois solos, seis níveis de compactação do solo e três manejos de água com três repetições, totalizando 108 parcelas.

3.5 Características avaliadas

Foram avaliados os teores de N, P e K na parte aérea das plantas, o número de dias para a floração, a massa seca da parte aérea e das raízes, a altura de planta, o número de perfilhos e de panículas por vaso, o número de grãos

cheios por panícula, a esterilidade de espiguetas, a massa de 1000 grãos e a produtividade de grãos por vaso.

3.5.1 Teores de nitrogênio, fósforo e potássio na parte aérea das plantas

Após a pesagem da massa seca da parte aérea, efetuada após a colheita dos grãos, o material foi passado em moinho tipo Wiley, provido de facas e peneiras de aço inoxidável. O material foi acondicionado em sacos plástico etiquetado e enviado para o laboratório de análises físicas e químicas de solo e plantas da Embrapa Roraima, onde se realizou a determinação destes elementos, utilizando-se os métodos de análises descritos por Tedesco et al. (1995).

3.5.2 Floração

A floração foi avaliada pelo número de dias contados da semeadura ao florescimento médio, considerado quando aproximadamente 50% das plantas de cada parcela se encontravam floridas.

3.5.3 Massa seca da parte aérea

Foi avaliada logo após a colheita, utilizando-se toda a parte aérea das plantas de cada vaso, exceto a panícula. As plantas foram cortadas rente ao solo e o material, levado para secar em estufa de circulação forçada com temperatura de 70 °C, durante 72 horas, quando se atingiu o peso constante, e pesado em balança de precisão.

3.5.4 Massa seca de raiz

Após o corte das plantas, as raízes foram separadas do solo através de lavagem com jato de água de torneira e peneiras de malha de 4,0 mm. Foram colocadas em sacos de papel, levadas para secar em estufa de circulação forçada com temperatura de 70 °C até atingir peso constante e pesadas em balança de precisão.

3.5.5 Altura de plantas

A altura de plantas foi obtida pela média de altura de cinco plantas de arroz, tomadas ao acaso em cada vaso, cinco dias antes da colheita. Foi efetuada com uma régua graduada, medindo-se o comprimento, em centímetros, da base da planta até a extremidade apical da panícula.

3.5.6 Número de perfilhos por vaso

Foi determinado dez dias antes da colheita do arroz, contando-se todos os colmos existentes em cada vaso, cujos dados foram expressos em número de perfilhos por vaso.

3.5.7 Número de panículas por vaso

Essa característica foi avaliada com a finalidade de se obter o número de colmos férteis. As contagens foram efetuadas na ocasião da colheita, em todos os vasos, cujos dados referem-se ao número de panículas por vaso.

3.5.8 Número de grãos cheios por panícula

Refere-se ao número médio de grãos formados obtidos pela contagem do número de grãos de cinco panículas, tomadas ao acaso, em cada vaso por ocasião da colheita.

3.5.9 Esterilidade de espiguetas

Refere-se ao número médio de espiguetas chochas obtidos através da contagem do número de grãos em cinco panículas, tomadas ao acaso, em cada vaso, por ocasião da colheita e convertidos em porcentagem, ou seja, a esterilidade = (número de espiguetas chochas x 100) / número total de grãos por panícula.

3.5.10 Massa de 1000 grãos

Foi determinada em oito subamostras de 100 sementes, seguindo-se as prescrições das regras para Análise de Sementes (Brasil, 1992). As pesagens foram efetuadas em balança eletrônica com precisão de 0,1 g e o peso, corrigido para 13% de umidade, de acordo com a Equação 2:

$$M.g.c. = \{ [M.g.o. \times (100 - U)] / (100 - U.p) \} \quad (2)$$

em que:

M.g.c.: massa de grãos corrigida (g);

M.g.o.: massa de grãos observada (g);

U: umidade observada na amostra (% base em peso);

U.p.: umidade padrão (13%).

3.5.11 Produtividade de grãos

Para avaliar a produtividade de grãos foram colhidas todas as panículas contidas em cada vaso. Os grãos foram pesados em balança eletrônica com precisão de 0,1 g e a massa obtida foi ajustada a 13% de umidade, utilizando-se Equação 2. Os resultados foram expressos em g.vaso^{-1} .

3.6 Análise estatística

Todos os dados foram submetidos à análise de variância com aplicação do teste F a 5% (Tabela 3) e as médias referentes aos efeitos do solo e do manejo de água foram comparadas através do Teste de Tukey a 5%. Para os níveis de compactação e para o desdobramento da interação níveis de compactação dentro de solo x manejos de água, utilizou-se a análise de regressão polinomial.

TABELA 3 - Esquema da análise de variância para as características avaliadas. UFLA, Lavras-MG, , 2004.

Fontes de variação	GL
Solos	1
Compactação	5
Manejo de água	2
Solos x Compactação	5
Solo x manejo de água	2
Compactação x manejo de água	10
Solos x compactação x manejos de água	10
Erro experimental	72
TOTAL	107

Modelo estatístico:

$$Y_{ijkl} = \mu + S_i + C_j + M_k + SC_{ij} + SM_{ik} + CM_{jk} + SCM_{ijk} + e_{ijk} \quad (3)$$

em que:

Y_{ijkl} : o valor observado correspondente ao nível i do fator solo, com o nível j do fator compactação, com o nível k do fator manejo de água, na repetição l ;

μ : a média do experimento;

S_i : efeito do nível i do solo, com $i = 1$ e 2 ;

C_j : efeito de nível j da compactação, com $j = 1, 2, 3, 4, 5$ e 6 ;

M_k : efeito de nível k do manejo de água, com $k = 1, 2$ e 3 ;

SC_{ij} : efeito da interação solos x compactação;

SM_{ik} : efeito da interação solos x manejo de água;

CM_{jk} : efeito da interação compactação x manejo de água;

SCM_{ijk} : efeito da interação solo x compactação x manejo de água;

e_{ijkl} : erro experimental associado à observação Y_{ijkl} , considerados independentes e normalmente distribuídos com média zero e variância constante.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Análise de variância

Todas as características avaliadas foram submetidas à análise de variância, cujos resultados são mostrados na Tabela 4.

TABELA 4 - Resumo das análises de variância para as características teor de N, P e K na parte aérea das plantas de arroz, floração (dia); altura de plantas (cm); massa seca de raiz (g.vaso⁻¹); massa seca da parte aérea (g.vaso⁻¹); número de perfilhos.vaso⁻¹; número de panículas.vaso⁻¹; número de grãos por panícula; esterilidade de espiguetas (%); massa de 1000 grãos (g); e produtividade de grãos (g.vaso⁻¹), envolvendo os tratamentos: solos (S), níveis de compactação (C), manejos de água (A) e interações. UFLA, Lavras-MG, 2004.

Características	Média geral	CV (%)	Quadrado médio						
			Solo (S)	Comp. (C)	Água (A)	S x C	S x A	C x A	S x C x A
Teor de N	707,0	7,0	3385208**	271669**	56577**	6456*	40082**	12213**	1643
Teor de P	57,5	6,3	15267**	1747**	3674**	369**	330**	30,5**	64,8**
Teor de K	1769	5,6	574656**	660762**	1097510**	21721*	202019**	17286	9522
Floração	86,5	0,7	4,9	0,3	145,4**	0,5	0,2	0,3	0,4
Altura da planta	108,7	1,0	58,5**	70**	899**	1,9	40,3**	8,2**	7,5**
Massa seca de raiz	18,3	6,6	99,5**	39,1**	7,4**	4,4**	1,7	0,8	4,0**
Massa seca parte aérea	68,0	6,4	413,7**	1793**	4027**	83,76**	4,8	85,4**	51,4**
Número de perfilhos	24,3	5,7	159,8**	128,4**	115,1**	7,9**	10,2**	2,8	4,5**
Número de panículas	22,5	5,7	20,0**	77,2**	275,3**	14,3**	2,7	2,0	5,8**
Grão panícula ⁻¹	162,1	4,8	75,0	224,3**	990,7**	117,8	569,3**	125,9*	345,9**
Esterilidade de grãos	7,7	9,8	74,8**	6,4**	1,47	3,5**	3,4**	1,6**	2,3**
Massa 1000 grãos	25,1	0,9	0,1	0,4**	0,1	0,1	0,01	0,03	0,06
Produtividade grãos	90,8	5,8	202,2**	1751,9**	4556,3**	117,7**	203,4**	72,7**	55,9**

** Significativos a 1% e a * 5% de probabilidade, respectivamente pelo teste F

Os teores de N, P e K na parte aérea das plantas foram influenciados estatisticamente pelos diferentes solos (S), níveis de compactação (C), manejos

de água (A) e respectivas interações, à exceção de S x C x A para N e K e C x A para K.

O número de dias necessários para a floração foi influenciado estatisticamente apenas pelo manejo de água e a massa de 1000 grãos teve suas médias diferenciadas ($P \leq 0,01$) somente pelos níveis de compactação. Já a altura de plantas apresentou diferenças significativas ($P \leq 0,01$) entre pelo menos uma de suas médias proporcionadas por todos os tratamentos testados, isoladamente, e para as interações entre os mesmos, exceto para a interação solos x níveis de compactação.

A massa seca da parte aérea e a de raízes responderam de modo diferente ($P \leq 0,01$) aos efeitos de solo, níveis de compactação e manejos de água, bem como para todas as interações, exceto solo x manejos de água e compactação x manejos de água para massa seca de raízes .

As médias do número de perfilhos por vaso foram influenciadas estatisticamente ($P \leq 0,01$) pelos efeitos do solo, níveis de compactação e manejo de água, bem como pelas interações solos x compactação, solo x manejo de água e solo x compactação x manejo de água.

Para o número de panículas.vaso⁻¹, os resultados foram idênticos aos observados para o número de perfilhos.vaso⁻¹, exceto para a interação solos x manejos de água, cujos efeitos não foram significativos ($P \leq 0,05$).

O número de grãos cheios por panícula apresentou diferenças significativas ($P \leq 0,01$) em função dos níveis de compactação e manejo de água e para todas as interações, exceto para solo x compactação, enquanto a esterilidade de espiguetas apresentou médias distintas ($P \leq 0,01$) em função dos efeitos do solo e da compactação e para todas as interações. Já, a produtividade de grãos apresentou diferenças significativas ($P \leq 0,01$) em função de todos os tratamentos e suas interações.

4.2 Teor de nitrogênio na parte aérea da planta

Os valores médios dos teores de N em função dos diferentes solos e manejo de água encontram-se na Tabela 5 e os dos níveis de compactação, na Figura 2.

Quanto ao efeito dos solos, observa-se que o Latossolo propiciou maior acúmulo de N do que o Neossolo, cuja média foi 15,5 inferior (Tabela 5). Isso se deve, presumivelmente, às características físico-hídricas do Latossolo, por possuir maior teor de areia, apresentar maior macroporosidade, taxa de infiltração de água, condutividade hidráulica e a taxa de difusão de O₂, as quais favorecem a absorção do N por aumentarem o contato do íon com o sistema radicular das plantas, que ocorre predominantemente por fluxo de massa (Malavolta, 1980). Além disso, certamente no Neossolo ocorreu menor disponibilidade de N devido à mineralização mais lenta da matéria orgânica e a possíveis perdas de N por desnitrificação em função dos maiores teores de silte e argila, que reduziram a aeração e, conseqüentemente, a atividade dos microrganismos do solo.

TABELA 5 - Médias de teor de nitrogênio acumulado na parte aérea das plantas de arroz (mg. vaso⁻¹) cultivadas sob diferentes solos e manejos de água. UFLA, Lavras-MG, 2004.

Solos	Teor de N (mg. vaso ⁻¹) ²
Neossolo	647,2 b
Latossolo	766,2 a
Manejo de água ¹	
M1	735,1 a
M2	724,1 a
M3	661,7 b

¹ M1: solo 100% saturado; M2: irrigação quando eram consumidos de 25 a 30% da água disponível; M3: irrigação quando eram consumidos de 50 a 60% da água disponível. ²Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade

Com relação aos efeitos de manejo de água sobre o acúmulo de N, verifica-se que os manejos M1 e M2 proporcionaram maiores teores de N, cujas médias (735,1 e 724,1 mg.vaso⁻¹) foram estatisticamente iguais e superiores à obtida com o manejo M3 (661,7 mg.vaso⁻¹). A maior absorção de nitrogênio no solo com alto teor de umidade ocorreu devido à planta apresentar maior eficiência fotossintética e taxa de transpiração, favorecendo o contato do íon-raízes, resultando em maior desenvolvimento do sistema radicular e da parte aérea das plantas, pois a quantidade de nitrogênio na planta varia em função da parte da planta considerada, da disponibilidade de nitrogênio no solo e da massa seca da planta (Stone, 1983). Por outro lado, a maior umidade, principalmente com o solo saturado (M1), geralmente ocorrem menor perda por desnitrificação devido à ausência de alternância aerobiose-anaerobiose. Esses resultados são semelhantes aos obtidos por Scalco (1983), Carvalho Júnior (1987) e por Crusciol (2001), que também constataram aumento nos teores de N em plantas de arroz cultivadas em solos com maior disponibilidade de água.

Quanto aos níveis de compactação do solo (Figura 2), constata-se que houve diferenças no acúmulo de N com a variação dos níveis de compactação. Os dados se ajustaram a uma equação de regressão quadrática decrescente com o coeficiente de determinação, indicando alto ajustamento (99,8%). O teor de N diminuiu à medida que se aumentou o nível de compactação do solo, atingindo, no nível máximo de compactação, uma redução de 38,2% em relação ao maior valor (852,4 mg.vaso⁻¹) acumulado no nível zero de compactação.

Isto era esperado, tendo em vista que a compactação reduz a porosidade total do solo e, conseqüentemente, a taxa de infiltração, a condutividade hidráulica e o fluxo de água no solo, que são essenciais para a absorção de água e nutrientes pelas raízes (Reichardt, 1993b), principalmente no caso do N, em que o contato íon-raiz ocorre predominantemente por fluxo de massa (Malavolta, 1980). Além disso, a compactação diminui a taxa de mineralização

do N no solo e, conseqüentemente, afeta a disponibilidade deste elemento, resultando em menor desenvolvimento da planta.

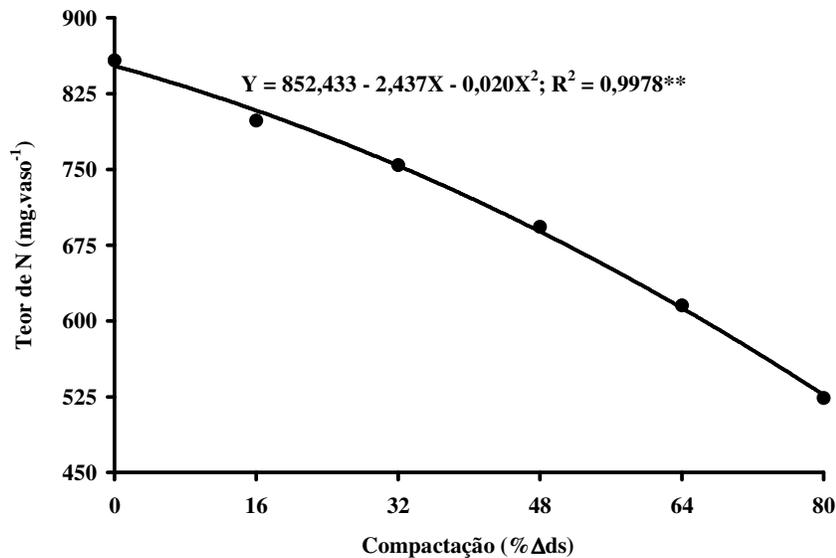


FIGURA 2 - Efeito de níveis de compactação do solo sobre o teor de nitrogênio na matéria seca da parte aérea de plantas de arroz, considerando-se dois tipos de solo e três manejos de água. UFLA, Lavras-MG, 2004.

Esses resultados corroboram com os obtidos por Whisler et al. (1964), citados por Camargo & Alleoni (1997), em um solo de textura argilo-arenosa, segundo os quais houve redução do teor de N mineralizado de até quatro vezes com o aumento da compactação.

Como houve efeito significativo para as interações solos x compactação, solos x manejos de água e compactação x manejos de água sobre os teores de N,

indicando que os efeitos foram dependentes das inter-relações ocorridas entre eles, efetuou-se o desdobramento destas interações.

Os teores de N obtidos em função destas interações foram analisados, efetuando-se o desdobramento dos efeitos de solos dentro de compactação, de solos dentro de manejos de água e dos manejos de água dentro de cada nível de compactação. Os resultados estão apresentados nas Tabelas 6, 7 e 8, respectivamente.

Pela Tabela 6, constata-se que o Latossolo propiciou maior acúmulo de N na parte aérea das plantas do que o Neossolo, independentemente do nível de compactação. Isto se deve, entre outros fatores, às características físico-hídricas do Latossolo, já mencionadas, propiciando a difusão do elemento e o fluxo de massa, imprescindíveis no processo de absorção deste nutriente, bem como, presumivelmente, a menores perdas por desnitrificação, em função do maior teor de areia. O Latossolo possibilitou também maior aeração, o que certamente favoreceu a atividade dos microorganismos do solo, contribuindo, dessa forma, para a mineralização mais rápida do nitrogênio orgânico nesse solo.

TABELA 6 - Médias de teor de nitrogênio (mg. vaso⁻¹) acumulado na parte aérea das plantas de arroz obtidas do desdobramento da interação solos x níveis de compactação. UFLA, Lavras-MG, 2004.

Solos	Níveis de compactação (% Δ s)					
	0	16	32	48	64	80
Latossolo	933,8 a ¹	880,9 a	806,4 a	760,8 a	661,0 a	557,3 a
Neossolo	781,8 b	715,5 b	701,5 b	625,0 b	569,6 b	490,2 b

¹Médias seguidas pela mesma letra, nas colunas, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

TABELA 7 - Médias de teor de nitrogênio (mg. vaso⁻¹) acumulado na parte aérea de plantas de arroz em função do desdobramento da interação solos x manejos de água. UFLA, Lavras-MG, 2004.

Solos	Manejo de água ¹		
	M1	M2	M3
Latossolo	831,8 a A ²	755,9 a B	712,4 a C
Neossolo	638,5 b B	692,4 b A	610,9 b B

¹ M1: solo 100% saturado com água; M2: irrigação quando eram consumidos de 25 a 30% da água disponível; M3: irrigação quando eram consumidos de 50 a 60% da água disponível. ²Médias seguidas pela mesma letra minúscula nas colunas e por mesma letra maiúscula nas linhas, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

TABELA 8 - Médias de teor de nitrogênio (mg. vaso⁻¹) acumulado na parte aérea de plantas de arroz em função do desdobramento da interação: manejos de água x níveis de compactação. UFLA, Lavras-MG, 2004.

Manejo de água ¹	Níveis de compactação (% Δds)					
	0	16	32	48	64	80
M1	856,5 ab ²	796,3 ab	755,7 ab	697,7 a	663,2 a	641,7 a
M2	913,3 a	834,3 a	797,2 a	722,2 a	606,7 ab	471,6 b
M3	803,7 b	764,3 b	709,2 b	658,8 a	576,0 b	458,0 b

¹ M1: solo 100% saturado com água; M2: irrigação quando eram consumidos de 25 a 30% da água disponível; M3: irrigação quando eram consumidos de 50 a 60% da água disponível. ²Médias seguidas pela mesma letra, nas colunas, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Quanto aos efeitos dos solos dentro de cada manejo de água sobre o acúmulo de N (Tabela 7), os resultados foram semelhantes aos obtidos com o solo dentro de compactação. O Latossolo favoreceu a absorção de N em todos os

manejos de água, proporcionando valores superiores aos atingidos no Neossolo. Este apresenta menores taxas de infiltração de água e condutividade hidráulica, e conseqüentemente propicia menor fluxo de água e menor taxa de difusão de O₂, fundamentais no processo de absorção de água e nutrientes pelas plantas, como já relatado. Além disso, vale salientar que como as plantas foram cultivadas em vasos vedados no fundo para evitar perdas de água por drenagem e/ ou por percolação, isso evitou que houvesse possíveis perdas de N por lixiviação, principalmente no Latossolo, por possuir maior percentual de areia, favorecendo-o quanto a disponibilidade e absorção desse elemento para as plantas.

Contudo, analisando os efeitos do manejo de água dentro de cada solo (Tabela 7), nota-se que, no Latossolo, o M1 proporcionou o maior acúmulo de N (831,8 mg.vaso⁻¹), superando em 9,1% a média do M2 (755,9 mg.vaso⁻¹), a qual, por sua vez, foi superior à alcançada com o M3 (712,4 mg.vaso⁻¹); ou seja, o acúmulo de N foi “proporcional” à disponibilidade de água no solo. Certamente, a menor desnitrificação nos manejos com maior disponibilidade de água favoreceu o acúmulo de N na parte aérea da planta, associando-se ao fato de que não houve perdas de N por lixiviação.

No Neossolo, o teor de N no M2 (692,4 mg.vaso⁻¹) foi superior aos obtidos pelo M1 (638,5 mg.vaso⁻¹) e M3 (610,9 mg.vaso⁻¹), os quais, por sua vez, não diferiram entre si. Apesar da maior disponibilidade de água no solo, geralmente favorecer a absorção do N, conforme observado por Scalco (1983) e Carvalho Júnior (1987) em experimentos conduzidos em casa de vegetação com a cultura do arroz, no Neossolo isso não ocorreu, presumivelmente, devido à lenta mineralização da matéria orgânica e/ ou a perdas de N causada por desnitrificação, favorecida no manejo com o solo saturado (M1) porque utilizou-se nitrato de amônia na adubação de plantio e em cobertura. Os sintomas de

deficiência no Neossolo foram observados um dia antes da segunda aplicação de N em cobertura, corroborando as inferências realizadas.

Com relação aos efeitos dos manejos de água dentro de níveis de compactação sobre os teores de N (Tabela 8), observa-se que nos níveis de compactação 0, 16 e 32% da Δds , os teores de N na parte aérea das plantas por vaso apresentaram um comportamento semelhante, ou seja, as médias obtidas sob o M2 foram superiores às do M3, mas não diferiram das alcançadas sob o M1. No nível de 48% da Δds , não houve diferenças dos teores de N entre os manejos de água; a 64% da Δds , o M1 favoreceu o acúmulo de N, cuja média ($663,2 \text{ mg.vaso}^{-1}$) foi estatisticamente igual à atingida sob o M2 ($606,7 \text{ mg.vaso}^{-1}$) e maior que a obtida sob o M3 ($576,0 \text{ mg.vaso}^{-1}$), a qual, por sua vez, não diferiu dos valores alcançados sob o M2. No nível máximo de compactação (80% da Δds), o M1 proporcionou o acúmulo de N superior aos obtidos sob os demais manejos, cujas médias não diferiram entre si.

Isso indica que, independentemente do nível de compactação do solo, a reposição da água efetuada, quando eram consumidos de 50 a 60 % da água disponível (M3), afetou negativamente a absorção de N na parte aérea das plantas. Por outro lado, estes resultados evidenciam a importância do solo saturado, aliviando os efeitos da compactação por favorecer o desenvolvimento do sistema radicular e a absorção de N e de outros nutrientes (Biwas & Mahapatra, 1980), mesmo nos níveis mais elevados de compactação, onde a absorção de N foi substancialmente reduzida com a redução dos teores de água disponível no solo.

Os resultados referentes aos efeitos dos desdobramentos das interações níveis de compactação dentro de solo e da compactação dentro de cada manejo de água estão apresentados nas Figuras 3 e 4, respectivamente. Em ambos os

solos (Figura 3), ocorreu redução no acúmulo de N à medida que se aumentaram os níveis de compactação.

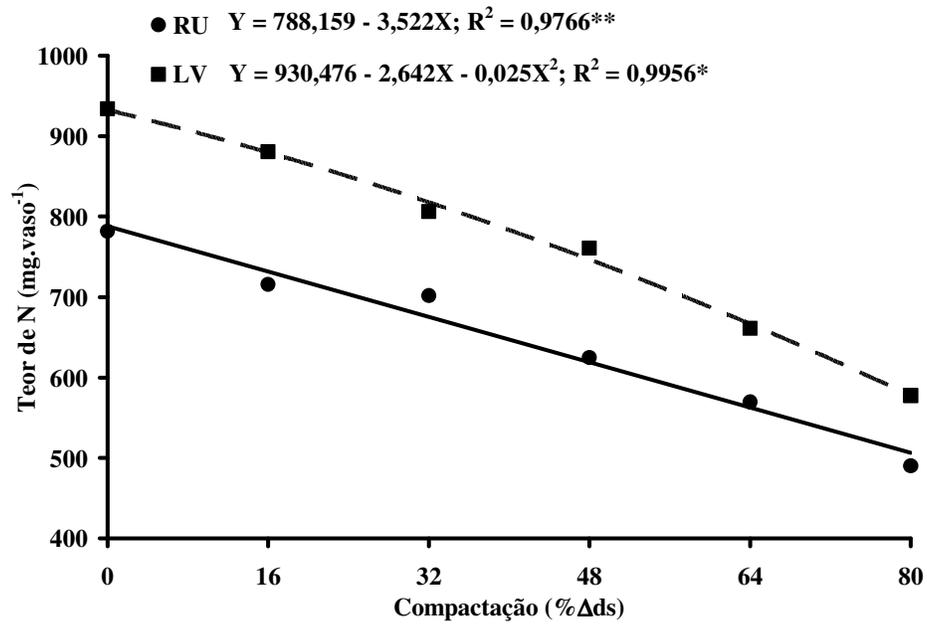


FIGURA 3 - Teor de nitrogênio na matéria seca da parte aérea de plantas de arroz em função da interação compactação dentro do Neossolo (RU) e no Latossolo (LV). UFLA, Lavras-MG, 2004.

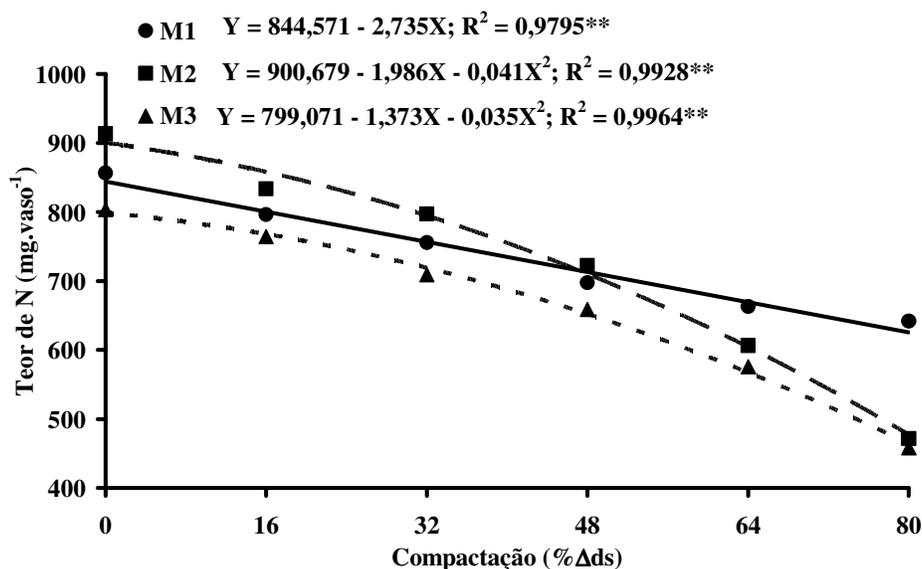


FIGURA 4 - Teor de nitrogênio na matéria seca da parte aérea de plantas de arroz em função do desdobramento da interação compactação dentro de manejos de água. UFLA, Lavras-MG, 2004.

No Neossolo (Figura 3), os valores se ajustaram a uma equação de regressão linear decrescente com coeficiente de determinação estimado em 97,7%. Para cada 1% de aumento na amplitude de variação da densidade do solo, houve uma redução de 3,522 mg de N.vaso⁻¹, correspondendo a uma redução de 35,7% no nível máximo de compactação em relação ao teor (788,16 g.vaso⁻¹) acumulado sob o solo não compactado. Para o Latossolo (Figura 3), os valores se ajustaram a uma equação de regressão quadrática decrescente com coeficiente de determinação estimado em 99,6%, proporcionando, no nível máximo de compactação, uma redução nos teores de N de 39,8 % em relação ao valor atingido no nível zero de compactação (930,47 mg.vaso⁻¹).

Estes resultados corroboram os obtidos por Pedrotti et al. (1994), que constataram redução na absorção de N em plantas de arroz cultivadas sob condições de sequeiro, em um Planossolo, à medida que se elevou a densidade do solo. De modo geral, esse decréscimo dos teores de N com o aumento da compactação do solo pode ser atribuído, dentre outras possibilidades, à redução das taxas de difusão de água e O₂ no solo (Alvarenga et al, 1996), limitando o fluxo de massa, que é o principal mecanismo de contato do íon-raiz (Malavolta, 1980), a lenta mineralização da matéria orgânica no solo e o aumento da resistência à penetração das raízes (Hoffmann & Jungk, 1995 e Stone et al. 2002a), os quais, conseqüentemente, reduziram o desenvolvimento do sistema radicular e da parte aérea das plantas.

Com relação aos efeitos da compactação dentro de cada manejo de água (Figura 4), observa-se que, sob o manejo M1, os valores se ajustaram a uma equação de regressão linear decrescente com coeficiente de determinação igual a 98,0%. Nos manejos M2 e M3, os teores de N se ajustaram a uma equação de regressão quadrática decrescente, apresentando coeficientes de determinação estimados em 99,3% e 99,6%, respectivamente. Assim, os modelos explicam 98,0%, 99,3% e 99,6%, respectivamente, do comportamento esperado das médias dos teores de N acumulados na parte aérea de plantas de arroz em função da variação dos níveis de compactação do solo. Portanto, independentemente do manejo de água, houve redução dos teores de N acumulados com o aumento da compactação dos solos. Entretanto, o M1 foi o manejo que proporcionou a menor redução, estimada em 26%; nos regimes M2 e M3, essa redução chegou a 47% e 42%, respectivamente, em relação ao acúmulo máximo alcançado no nível zero de compactação. Observa-se também que até o nível de compactação 48% da Δds , a redução nos manejos M2 e M3 foi, respectivamente, de 21,1% e 18,4%, a partir deste nível até 80% da Δds , esse decréscimo foi de 25,6% e de 23,5%.

Isso evidencia o efeito danoso do alto nível de compactação, inibindo o fluxo de água, a difusão do elemento e o fluxo de massa (Corsini, 1979; Silva et al., 2002). No entanto, com o solo saturado esse problema foi atenuado, presumivelmente por propiciar menor resistência à penetração de raízes e, conseqüentemente, favorecer o desenvolvimento do sistema radicular e o fluxo de massa, aumentando a absorção do nutriente pelas plantas.

Estes resultados corroboram com os obtidos por Pedrotti et al. (1994), que ao avaliarem a cultura do arroz sob condições de sequeiro e irrigado por submersão num Planossolo com diferentes densidades, observaram que, nas condições de sequeiro, a absorção de N diminuiu com o aumento da densidade do solo. Contudo, para o irrigado os níveis de densidade do solo não afetaram os teores de N acumulados na parte aérea das plantas.

4.3 Teor de fósforo na parte aérea das plantas

Os valores médios de fósforo acumulados na parte aérea das plantas, quando submetidas a diferentes solos e manejos de água, encontram-se na Tabela 9, e sob os níveis de compactação, na Figura 5. O teor de P foi significativamente maior nas plantas cultivadas no Latossolo (69,4 mg.vaso⁻¹) em comparação com o Neossolo (45,6 mg.vaso⁻¹), superando, assim, em 52,2% a média desse último. Como no caso do N, isso pode ser atribuído às características físico-hídricas do Neossolo, que contem maiores teores de silte e argila, e, conseqüentemente, proporcionam maior energia de retenção de água no solo, menor fluxo de água e maior adsorção do P no solo, conforme verificado por Costa (1998). Além do mais, o maior desenvolvimento das plantas no Latossolo, ocasionado pelo incremento da absorção de N, certamente influenciou no teor de P.

TABELA 9 - Médias do teor de fósforo na parte aérea de plantas de arroz (mg. vaso⁻¹) obtidas sob diferentes solos e manejo de água. UFLA, Lavras-MG, 2004.

Solos	Teores de P (mg. vaso ⁻¹) ²
Neossolo	45,6 b
Latossolo	69,4 a
Manejo de água ¹	
M1	68,4 a
M2	55,7 b
M3	48,4 c

¹ M1: solo 100% saturado com água; M2: irrigação quando eram consumidos de 25 a 30% da água disponível; M3: irrigação quando eram consumidos de 50 a 60% da água disponível. ²Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade

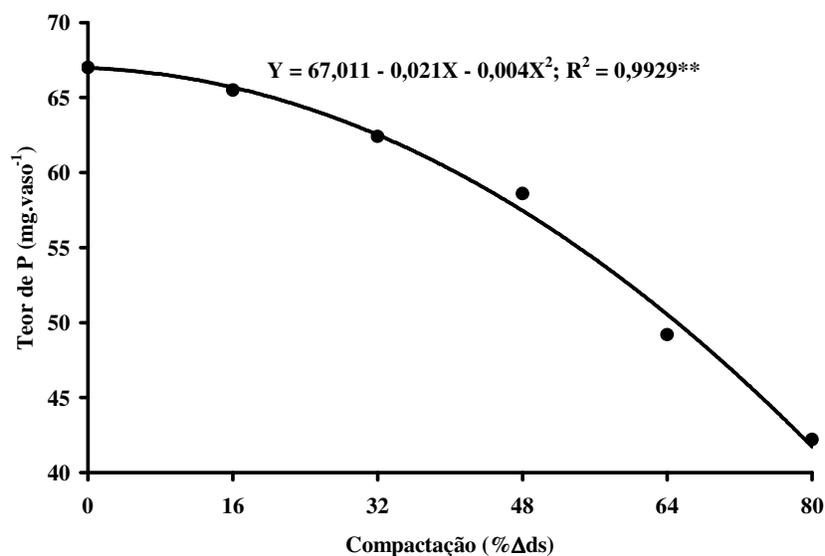


FIGURA 5 - Efeito de níveis de compactação do solo sobre o teor de fósforo na matéria seca da parte aérea de plantas de arroz, considerando-se dois tipos de solo sob três manejos de água. UFLA, Lavras-MG, 2004.

Quanto aos efeitos dos manejos de água sobre o teor médio de P acumulado na parte aérea das plantas em mg. vaso⁻¹ (Tabela 9) considerando os dois solos, o M1 proporcionou maior acúmulo de P, cuja média (68,4 mg.vaso⁻¹) superou em 22,8% a obtida sob o manejo M2 (55,7 mg.vaso⁻¹), a qual, por sua vez, superou em 15,1% a do M3 (48,4 mg.vaso⁻¹), ou seja, o acúmulo de fósforo aumentou conforme o incremento da disponibilidade de água no solo.

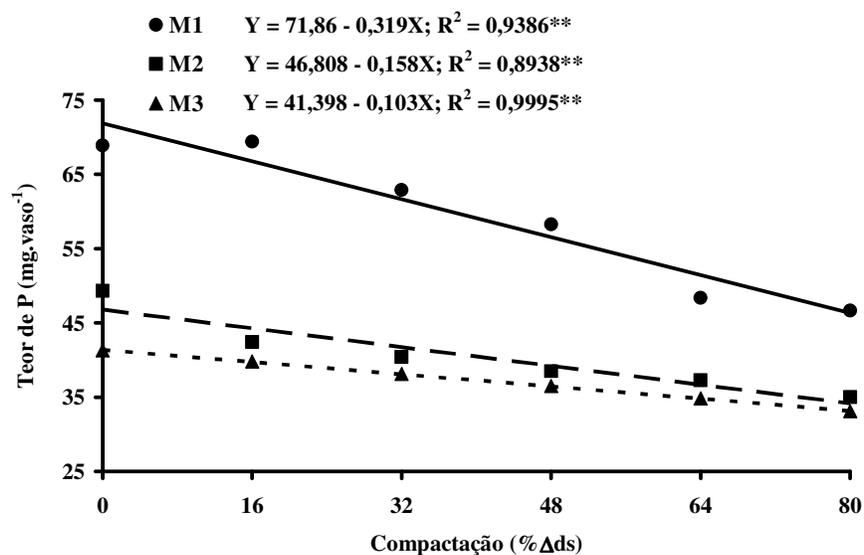
Conforme Jong van Lier (2000), ocorrendo déficit hídrico no solo próximo às raízes, os estômatos se fecham, ajustando a resistência estomatal para reduzir o fluxo de vapor, diminuindo a transpiração. Em consequência, há decréscimo na quantidade de gás carbônico, bem como na absorção de água e nutrientes pelas raízes. Por outro lado, a alta disponibilidade de água no solo favorece a taxa fotossintética nas folhas, a acumulação de massa e a produção de carboidratos, bem como a absorção de P devido à redução e solubilização dos óxidos de ferro (Tsutsui, 1972; Gomes et al., 1985). Além do mais, a saturação do solo, além de elevar o pH, aumenta a disponibilidade de P na solução do solo.

Com relação à compactação do solo (Figura 5), verifica-se que a mesma afetou negativamente o acúmulo de P na massa seca da parte aérea das plantas de arroz. Os valores apresentaram uma tendência de decréscimo e são descritos por uma equação de regressão quadrática, com coeficiente de determinação estimado em 99,3%. Assim, os teores de P decresceram à medida que se aumentaram os níveis de compactação do solo, chegando, no nível máximo de compactação, a uma redução de 37,7% em relação ao teor máximo (67,0 mg de P.vaso⁻¹), alcançado no nível zero de compactação.

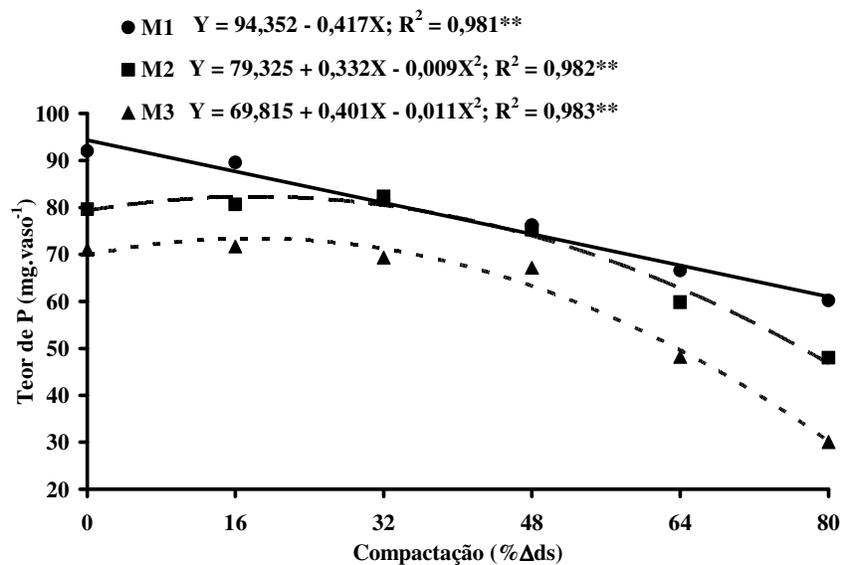
Esse resultado está de acordo com os encontrados por Pedrotti et al. (1994), os quais observaram também redução na absorção P pelas plantas de milho, arroz de sequeiro e irrigado, cultivados num Planossolo, à medida que se

elevaram os níveis de compactação do solo. Isso ocorreu devido, entre outras possibilidades, à redução da taxa de difusão causada pela compactação, aumentando a interação do íon com a superfície dos colóides, ao longo de sua trajetória de difusão, conforme observaram Silva et al. (2002), bem como à redução do sistema radicular da planta provocado pela compactação.

Os resultados referentes aos efeitos do desdobramento da interação níveis de compactação dentro de cada solo x manejos de água sobre o acúmulo de P estão apresentados nas Figuras 6a e 6b. No Neossolo (Figura 6a), verificase que a compactação do solo reduziu consideravelmente o acúmulo de P, independentemente do manejo da água. Os valores médios de P acumulados na matéria seca da parte aérea das plantas se ajustaram a modelos de regressão linear decrescente, apresentando coeficientes de determinação que explicam 93,9%, 89,3% e 99,9% das variações ocorridas nos teores de P em função da variação dos níveis de compactação do solo sob os regimes de água M1, M2 e M3, respectivamente.



(a)



(b)

FIGURA 6 - Teores de fósforo na matéria seca da parte aérea de plantas de arroz em função dos níveis de compactação no Neossolo (a) e no Latossolo (b). UFLA, Lavras-MG, 2004.

Estes resultados revelam a grande vulnerabilidade do Neossolo quanto aos efeitos maléficos da compactação na disponibilidade de P para as plantas, proporcionada por suas características físico-hídricas já mencionadas. Assim, estes resultados corroboram as observações de Rezende et al. (2003), os quais concluíram que a compactação nesse tipo de solo dificulta drasticamente a absorção de nutrientes pela cultura, principalmente quando submetido a baixos teores de umidade.

No Latossolo (Figura 6b), sob o manejo M1, o resultado foi semelhante ao do Neossolo, ou seja, os valores dos teores de P se ajustaram a uma equação de regressão linear decrescente, com coeficiente de determinação estimado em 98,1%. Os teores de P diminuíram à medida que se aumentou a compactação do solo, atingindo no nível máximo de compactação, uma redução de 33 mg de P.vaso⁻¹, equivalente a 36% do teor máximo. Isso ocorreu devido às alterações nas características físico-hídricas do solo, reduzindo a condutividade hidráulica, o fluxo de água e a difusão do íon no solo, principal meio de contato do íon-raiz.

Nos manejos M2 e M3, os valores de P se ajustaram a uma equação de regressão quadrática, apresentando os pontos de máximo acúmulo de P nos níveis de compactação em torno de 18% da Δds ($ds = 1,21 \text{ kg.dm}^{-3}$) em ambos os manejos, correspondendo às médias dos teores de P estimadas em 82,4 e 73,5 mg de P vaso⁻¹, alcançadas sob os regimes M2 e M3, respectivamente. Isto é, a compactação até 18% da Δds favoreceu a absorção de P, apresentando pouca variação até o nível de 48% da Δds ($ds = 1,35 \text{ kg.dm}^{-3}$), possivelmente devido ao maior contato solo-raiz, favorecendo a absorção de água e nutrientes sem afetar severamente o desenvolvimento do sistema radicular (Borges, 1995). A partir deste ponto ocorreu uma acentuada redução na absorção deste elemento em relação aos valores atingidos com o M1, principalmente nos dois últimos níveis de compactação.

Esta redução acentuada do P pode ser explicada pelo fato de que solos com maior teor de areia, com menos umidade ou mais compactados apresentam maior tortuosidade e, conseqüentemente, menor taxa de difusão, conforme relatado por Vale et al. (1997); citado por Santos (2001). Além disso, os altos níveis de compactação aumentam a microporosidade e a energia de retenção de água no solo, elevando a viscosidade da água, a interação de íons de fosfato e a superfície dos colóides ao longo de sua trajetória de difusão, fazendo com que o fosfato tenha que se movimentar cada vez mais próximo de superfícies positivamente carregadas (Novais & Smyth, 1999).

As médias dos teores de P acumulados na massa seca da parte aérea de plantas de arroz provenientes do efeito do desdobramento da interação entre manejos de água dentro de cada nível de compactação para os dois solos encontram-se na Tabela 10.

TABELA 10 - Teores de fósforo na parte aérea de plantas de arroz (mg.vaso⁻¹) obtidos em função do desdobramento da interação: manejo de água x níveis de compactação x solos. UFLA, Lavras-MG, 2004.

Compactação do solo (% Δ s)	Manejo de água ¹	Teor de fósforo (mg.vaso ⁻¹) ²	
		Neossolo	Latossolo
0	M1	68,9 a	92,0 a
	M2	49,3 b	79,6 b
	M3	41,3 c	71,0 c
16	M1	69,4 a	89,6 a
	M2	42,4 b	80,6 b
	M3	39,8 b	71,7 c
32	M1	62,9 a	81,6 a
	M2	40,4 b	82,3 a
	M3	38,1 b	69,3 b
48	M1	58,3 a	76,2 a
	M2	38,5 b	75,1 a
	M3	36,6 b	67,2 b
64	M1	48,4 a	66,5 a
	M2	37,3 b	59,8 b
	M3	34,7 b	48,2 c
80	M1	46,7 a	60,2 a
	M2	35,1 b	48,0 b
	M3	33,1 b	30,1 c

¹M1: solo 100% saturado com água; M2: irrigação quando eram consumidos de 25 a 30% da água disponível; M3: irrigação quando eram consumidos de 50 a 60% da água disponível. ²Médias seguidas pela mesma letra nas colunas não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Para o Neossolo, observa-se que no nível 0 ($d_s = 1,11 \text{ kg.dm}^{-3}$) houve diferenças significativas dos teores de P acumulados entre os manejos de água. O M1 propiciou maior acúmulo de P ($68,9 \text{ mg.vaso}^{-1}$); o segundo maior acúmulo foi obtido com o M2 ($49,3 \text{ mg.vaso}^{-1}$), e este foi superior às médias alcançadas sob o M3 ($41,3 \text{ mg.vaso}^{-1}$), ou seja, os teores de P diminuíram com a redução dos teores de água no solo, evidenciando uma relação direta entre a umidade no solo e a disponibilidade de P. Nos demais níveis de compactação, 16, 32, 48, 64 e 80% da Δd_s , o solo saturado (M1) também favoreceu o acúmulo de P, cujos teores foram superiores aos obtidos sob os manejos M2 e M3, os quais, por sua vez, não diferiram entre si. Isso pode ser atribuído ao aumento da microporosidade e à energia de retenção de água no solo, ocasionada pelos níveis de compactação, que diminuem a disponibilidade de água no solo, elevando sua viscosidade, a interação de íons de fosfato e a superfície dos colóides ao longo de sua trajetória de difusão (Novais & Smyth, 1999). Assim, de modo geral estes resultados revelam a importância da saturação neste tipo de solo para a disponibilidade e absorção deste elemento pelas plantas, conforme as razões já mencionadas (Jong van Lier, 2000; Tsutsui, 1972; Gomes et al., 1985 e Costa, 1998).

Para o Latossolo, sob os níveis de compactação 0, 16, 64 e 80% da Δd_s , os manejos de água afetaram diferentemente os teores de P. O manejo com o solo saturado (M1) favoreceu a absorção deste elemento, superando, respectivamente, em 13,1%, 11,1%, 11,2 e 25,4% os valores alcançados com o M2, os quais, por sua vez, foram estatisticamente superiores aos do M3. Nos níveis de compactação 32% e 48% da Δd_s , não houve diferenças nos teores de P acumulados sob os manejos M1 ($81,6$ e $76,2 \text{ mg de P.vaso}^{-1}$) e M2 ($82,3$ e $75,1 \text{ mg de P.vaso}^{-1}$), respectivamente, os quais foram estatisticamente iguais mas superiores aos do manejo M3 ($69,3$ e $67,2 \text{ mg de P. vaso}^{-1}$).

Estes resultados evidenciam que nesse tipo de solo, um moderado nível de compactação, de 32% a 48% da Δds ($ds = 1,28$ a $1,35 \text{ kg.dm}^{-3}$), não restringe a absorção de P pela planta, desde que o mesmo se mantenha com alta umidade (de 100% saturado a no mínimo 70% de água disponível para a planta), uma vez que a difusão do fósforo está diretamente relacionada ao conteúdo de água no solo (Villani et al., 1993; Costa, 1998). Por outro lado, o manejo M3 restringiu a absorção desse elemento independentemente do nível de compactação, sendo a maior restrição observada no nível máximo de compactação ($ds = 1,50 \text{ kg.dm}^{-3}$), cuja média ($30,1 \text{ mg.vaso}^{-1}$) foi 50% inferior à obtida com o M1 ($60,2 \text{ mg.vaso}^{-1}$). Isso pode ser atribuído às restrições na disponibilidade do P causadas pela compactação associada ao baixo teor de água no solo conforme já relatado.

4.4 Teor de Potássio na parte aérea das plantas

Os teores de K acumulados sob os diferentes solos e manejos de água encontram-se na Tabela 11. Já para os diferentes níveis de compactação, são mostrados na Figura 7. O teor de K foi significativamente maior nas plantas cultivadas no Latossolo, com diferença de 8,5% em relação ao teor acumulado sob o Neossolo.

TABELA 11 - Médias de teores de potássio encontradas na parte aérea das plantas de arroz (mg.vaso^{-1}) obtidas sob diferentes solos e manejo de água. UFLA, Lavras-MG, 2004.

Solos	Teor de potássio (mg.vaso^{-1}) ²
Neossolo	1696,6 b
Latossolo	1842,5 a
Manejo de água ¹	
M1	1969,9 a
M2	1688,5 b
M3	1650,2 b

¹M1: solo 100% saturado com água; M2: irrigação quando eram consumidos de 25 a 30% da água disponível; M3: irrigação quando eram consumidos de 50 a 60% da água disponível. ²Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

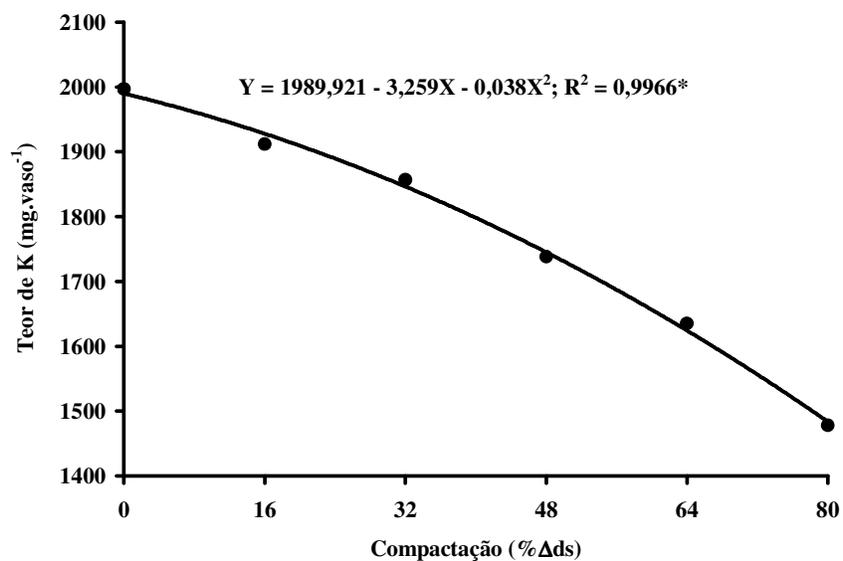


FIGURA 7 - Efeito de níveis de compactação do solo sobre o teor de potássio na matéria seca da parte aérea de plantas de arroz, considerando-se dois solos (Neossolo e Latossolo) e três manejos de água. UFLA, Lavras-MG, 2004.

O maior teor obtido no Latossolo deve-se às suas características físico-hídricas, como já relatadas, as quais favoreceram a absorção de K, pois o contato do íon-raiz ocorre predominantemente pelos mecanismos de difusão e por fluxo de massa (Barber, 1974 e Vargas, 1982). Por outro lado, a menor absorção de K na parte aérea das plantas cultivadas no Neossolo pode estar relacionada, além do maior percentual de argila, ao tipo de argila predominante nesse solo. Pois, os solos constituídos por argilas de reticulado do tipo 2:1, como a montmorilonita e a illita, têm alto poder de fixação de K em grandes quantidades. Ao passo que os solos com maior percentual de areia e/ ou em que predominam a caulinita como mineral de argila apresentam baixo poder de fixação desse elemento e, conseqüentemente, maior disponibilidade para as plantas (Buckman & Brady, 1974).

Com relação aos efeitos dos manejos de água sobre os teores de K, nota-se que o manejo M1 foi mais favorável ao acúmulo deste nutriente, cuja média superou em 14,3% e 16,2% as obtidas pelos manejos M2 e M3, respectivamente, as quais, por sua vez, não diferiram entre si. Esse resultado corrobora os encontrados por Scalco (1983) e Carvalho Júnior (1987), que também obtiveram aumento da absorção de K na parte aérea de plantas de arroz à medida que se elevaram os teores de água no solo, e com os mostrados por Crusciol (2001), que observou maior absorção do K na parte aérea nas plantas irrigadas por aspersão em relação às não irrigadas.

Isso é explicado pela maior disponibilidade do nutriente, influenciado pelo incremento do fluxo difusivo do K, que ocorre com o aumento da umidade do solo (Costa, 1998). Além disso, a alta disponibilidade de água no solo aumenta a eficiência fotossintética e as taxas de respiração e transpiração da planta, resultando na maior absorção desse e de outros nutrientes pela planta, que favoreceram o desenvolvimento do seu sistema radicular e da parte aérea.

Na Figura 7 observa-se que os níveis de compactação afetaram significativamente os teores de K na matéria seca da parte aérea das plantas. Os valores se ajustaram a uma equação de regressão quadrática decrescente com o coeficiente de determinação igual a 99,7%. Assim, o acúmulo de K diminuiu à medida que se aumentou o nível de compactação do solo, atingindo 25,4% de redução em relação ao nível zero de compactação.

Esse resultado foi bastante semelhante aos dos teores de N e P, cujas causas são atribuídas às alterações nas propriedades físico-hídricas do solo, proporcionadas pela compactação (Camargo, 1983; Ripoli, 1992 e Alvarenga et al., 1996). As principais causas são a redução das taxas de difusão da água e do K, bem como do fluxo de massa no solo, que são determinantes para absorção deste nutriente pelo sistema radicular das plantas (Vargas, 1982 e Costa, 1998). Esse resultado concorda com Pedrotti et al. (1994), que também obtiveram redução dos teores de K na parte aérea de plantas de milho, soja, arroz de sequeiro e irrigado, cultivados num Planossolo, à medida que se aumentou a densidade do solo.

Os efeitos significativos para as interações solos x níveis de compactação e solos x manejos de água para os teores de K, mostrados na Tabela 4, indicam que os mesmos foram dependentes das inter-relações ocorridas entre estes fatores. Por isso, efetuou-se o desdobramento dessas interações.

Os teores de K acumulados na parte aérea da plantas em função de solo dentro dos níveis de compactação estão relatados na Tabela 12. À semelhança dos resultados obtidos com o N, o Latossolo foi mais favorável do que o Neossolo para o acúmulo de K na parte aérea da plantas, cujas médias foram, estatisticamente, superiores em todos os níveis de compactação.

TABELA 12 - Médias de teores de potássio (mg.vaso^{-1}) acumulado na parte aérea de plantas de arroz obtidas em função do desdobramento da interação solos x níveis de compactação. UFLA, Lavras-MG, 2004.

Solos	Níveis de compactação (% Δ s)					
	0	16	32	48	64	80
Latossolo	2118 a ¹	1965 a	1928 a	1835 a	1709 a	1498 a
Neossolo	1876 b	1857 b	1785 b	1641 b	1560 b	1458 b

¹Médias seguidas pela mesma letra nas colunas não diferem entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

Essa redução no acúmulo de K na parte aérea de plantas de arroz cultivadas no Neossolo, independentemente do nível de compactação, apesar de o mesmo ser mais rico em K do que o Latossolo (Tabela 1), deve-se à menor disponibilidade do nutriente nesse solo, proporcionada por sua maior fixação em função do maior porcentual de argila e, possivelmente, do tipo de argila predominante no Neossolo, que são determinantes na absorção do K pelas plantas, conforme já comentado.

Os teores de K acumulados em função do desdobramento da interação solos x manejos de água se encontram na Tabela 13. Observando os solos dentro de manejos de água, constatou-se que, no M1, os solos não diferiram na absorção de K, enquanto no M2 e M3, os valores de K acumulados com o Latossolo foram significativamente superiores aos do Neossolo. Portanto, esses resultados evidenciam claramente a importância de se manter o Neossolo saturado (M1) para aumentar a disponibilidade e a absorção do K pelas plantas de arroz. Uma explicação para a menor fixação do nutriente, devido ao incremento do fluxo da água, é relatado por Reichardt (1993a); e do fluxo

difusivo do íon no solo e diminuição da resistência à penetração das raízes, por Costa (1998), aliviando assim, os efeitos depressivos ocasionados pela compactação, independentemente da classe de solo (Ribeiro, 1999). Nota-se que, independentemente do solo, o M1 favoreceu o acúmulo de K, cujas médias foram significativamente superiores às obtidas sob o M2 e M3, as quais, por sua vez, foram estatisticamente iguais, evidenciando, assim, o papel da saturação do solo para a disponibilidade e a absorção deste nutriente, como já discutido. A saturação do solo eleva o pH, aumentando a disponibilidade de N,P e K. Esse fato, por si só, já explica o maior teor de P e K no M1. No caso do N, outras variáveis interferem na disponibilidade, como a desnitrificação, por exemplo.

TABELA 13 - Médias de teores de potássio acumulados na parte aérea de plantas (mg.vaso⁻¹) obtidas em função do desdobramento da interação solos x manejos de água. UFLA, Lavras-MG, 2004.

Solos	Manejo de água ¹		
	M1	M2	M3
Latossolo	1957 a A ²	1814 a B	1755 a B
Neossolo	1982 a A	1562 b B	1545 b B

¹ M1: solo 100% saturado com água; M2: irrigação quando eram consumidos de 25 a 30% da água disponível; M3: irrigação quando eram consumidos de 50 a 60% da água disponível. ² Médias seguidas pela mesma letra minúscula nas colunas, e pela mesma letra maiúscula nas linhas, não diferem entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

Os resultados referentes aos efeitos da interação entre os níveis de compactação dentro de solo encontram-se na Figura 8. Para ambos os solos, a compactação afetou negativamente o acúmulo de K na parte aérea das plantas de arroz. Os teores de K diminuíram à medida que se aumentou a compactação do

solo. No Neossolo, os valores se ajustaram a uma equação de regressão linear decrescente com coeficiente de determinação estimado em 96,6%. Cada um por cento de variação na amplitude da densidade do solo propiciou uma redução de 5,585 mg de K.vaso⁻¹, que corresponde a uma redução de até 23,4% no nível máximo de compactação.

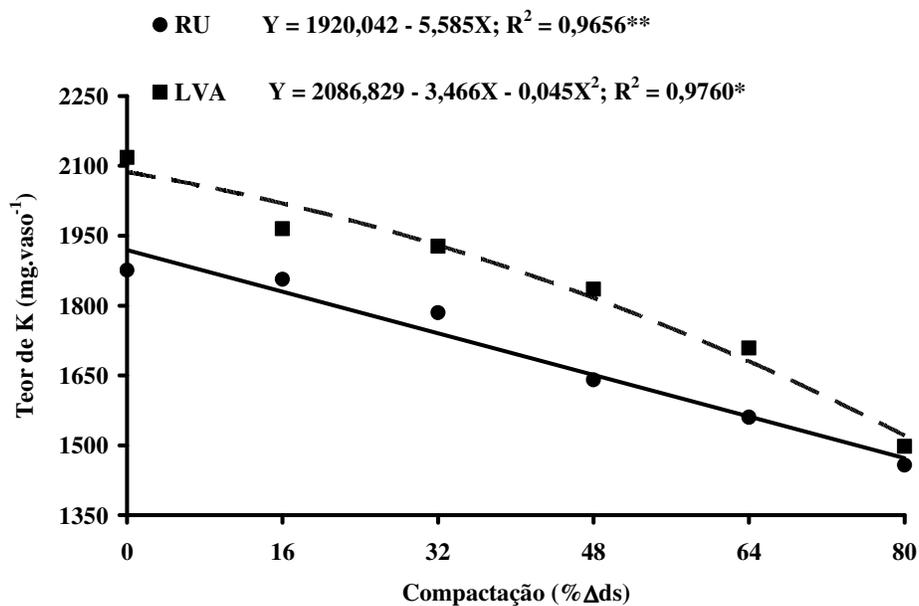


FIGURA 8 - Teores de Potássio na matéria seca na parte aérea das plantas de arroz em função da compactação dentro do Neossolo (RU) e do Latossolo (LVA). UFLA,Lavras-MG, 2004.

Para o Latossolo, os valores se ajustaram a uma equação de regressão quadrática decrescente com coeficiente de determinação estimado em 97,6%, atingindo, no último nível de compactação, uma redução de 27% em relação ao teor máximo acumulado no solo sem compactação.

Como no caso do N e do P, a redução dos teores de K na parte aérea das plantas, proporcionada pela compactação nestes solos, é justificada pelas mudanças nas propriedades físico-hídricas dos solos, tais como redução dos macroporos e aumento dos microporos, resultando em menor porosidade total do solo, o que, conseqüentemente, diminui a aeração; menores taxas de infiltração da água; menor condutividade hidráulica e redução do fluxo de água e de O₂ no solo (Alvarenga et al., 1996 e Reichardt, 1993b). Além do mais, há aumento da resistência à penetração de raízes (Stone et al., 2002a), resultando em menor desenvolvimento do sistema radicular, principalmente pela redução do fluxo de massa e do fluxo difusivo do potássio no solo (Costa, 1998), que são imprescindíveis para a absorção de água e nutrientes pelas raízes das plantas, especialmente no caso do K, em que o contato íon-raiz ocorre predominantemente pelos processos de difusão e por fluxo de massa.

Entretanto, vale salientar que como as plantas foram cultivadas em vaso vedado na sua extremidade inferior, impedindo as perdas de água por percolação, evitou-se que houvesse possíveis perdas de N e K por lixiviação, principalmente no Latossolo, por possuir maior percentual de areia. Contudo, em condições de campo, admite-se que o Neossolo apresente condições mais favoráveis para a absorção de N, P e K pelas plantas, favorecido pela alta disponibilidade de água nesse solo. As várzeas, de modo geral, são mal drenadas, com o lençol freático próximo da superfície do solo, mantendo-se saturadas ou muito próximas da saturação durante a maior parte do ciclo da cultura, ao contrário do Latossolo em terras altas, que geralmente apresenta boa drenagem e baixa disponibilidade de água para as plantas. Assim, para o cultivo de arroz em terras altas nesse solo, a disponibilidade de água para as plantas depende apenas da frequência e das quantidades das precipitações pluviais, ocorridas durante todo o ciclo da cultura, com possibilidades de se manter saturado por curto período de tempo, ficando susceptível aos efeitos dos

veranicos, causando déficit hídrico à cultura, o que, conseqüentemente, reduz a disponibilidade dos nutrientes no solo e sua absorção pelas plantas de arroz.

4.5 Floração

O número de dias para a floração do arroz, obtido em função dos efeitos dos manejos de água, dos solos e dos níveis de compactação está apresentado na Tabela 14. Não se detectou efeito de solo e de níveis de compactação sobre o número de dias para as plantas atingirem a floração. Por outro lado, o manejo de água M1 reduziu significativamente o número de dias para as plantas florescerem, sendo 3,6 dias inferior ao observado sob o M3, cuja média não diferiu da obtida sob o M2. O resultado foi semelhante aos obtidos por Yoshida (1975); Stone et al. (1984); Carvalho Junior (1987); Rodrigues (1998) e Crusciol (2001), que também mostram redução no período para o florescimento do arroz com o aumento da disponibilidade da água no solo.

TABELA 14 - Médias de dias para floração de arroz sob diferentes solos, níveis de compactação do solo e manejo de água. UFLA, Lavras-MG, 2004

Solo	Floração ²
Neossolo	86,6 a
Latossolo	87,1 a
Níveis de compactação (% Δds) ^{ns}	
0	86,7
16	86,9
32	86,7
48	87,0
64	86,7
80	86,8
Manejo de água ¹	
M1	84,5 a
M2	87,8 b
M3	88,1 b

¹M1: solo 100% saturado com água; M2: irrigação quando eram consumidos de 25 a 30% da água disponível; M3: irrigação quando eram consumidos de 50 a 60% da água disponível.²Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

Essa redução no período para as plantas florescerem proporcionada pelo solo saturado deve-se, dentre outras possibilidades, à ausência de estresse hídrico, à maior eficiência fotossintética e à maior absorção de água e nutrientes pelas plantas cultivadas nessa condição (M1). Por outro lado, a menor disponibilidade de água no solo, irrigando-o quando eram consumidos de 25 a 30% e de 50 a 60% da água disponível no solo, manejos M2 e M3, respectivamente, pode ter ocasionado déficit hídrico, propiciando menor

eficiência fotossintética e um atraso no alongamento dos entrenós devido à redução na taxa de alongamento do colmo. Isto retarda a emissão das panículas, as quais, às vezes, nem emergem para fora da bainha das folhas, resultando no atraso do florescimento e, conseqüentemente, do ciclo da cultura (Senewiratne & Mikkelsen 1961; citados por Stone, 1983). Conforme Ingran et al. (1990), o atraso no florescimento de plantas em resposta ao déficit hídrico é uma característica de escape à seca que pode levar a menores perdas na produtividade de grãos, nos casos em que seja possível o restabelecimento das condições favoráveis.

4.6 Altura de plantas

As médias de altura das plantas obtidas em função dos efeitos de solos e manejo de água se encontram na Tabela 15, e da compactação, na Figura 9. A altura da planta no Latossolo superou estatisticamente (1,6 cm) à do Neossolo, indicando que esse solo foi mais favorável ao desenvolvimento de plantas. Esse aumento na altura de plantas, proporcionada pelo Latossolo, é atribuído às características físico-hídricas do mesmo, como textura, porosidade, aeração e o tipo de argila, e por ser mais favorável à disponibilidade e absorção de água e dos nutrientes N, P e K pelas plantas, entre os quais destaca-se o N, que é fundamental para melhorar a eficiência fotossintética, pois promove o crescimento mais rápido de plantas, o aumento do tamanho das folhas e do sistema radicular das plantas de arroz (Soares, 2001).

TABELA 15 - Média geral de altura de plantas de arroz obtidas sob diferentes solos e manejo de água. UFLA, Lavras-MG, 2004.

Solos	Altura de plantas (cm)²
Neossolo	107,9 b
Latossolo	109,5 a
Manejo de água¹	
M1	113,9 a
M2	108,3 b
M3	103,9 c

¹M1: solo 100% saturado com água; M2: irrigação quando eram consumidos de 25 a 30% da água disponível; M3: irrigação quando eram consumidos de 50 a 60% da água disponível. ² Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

Com relação aos efeitos dos manejos de água sobre a altura das plantas (Tabela 15), constata-se que essa característica variou conforme a disponibilidade de água no solo. Assim, a maior altura de planta foi proporcionada pelo manejo M1, seguido do M2 e M3, respectivamente; ou seja, quanto maiores forem os teores de água no solo, maior será a altura alcançada pelas plantas.

Esse resultado está de acordo com Scalco (1983), o qual mostra que o manejo, mantendo o solo saturado, diariamente, propiciou aumentos na absorção de nitrogênio, potássio, ferro e na estatura das plantas, em relação aos valores observados nas plantas cultivadas no solo saturado a cada quatro dias. Resultado semelhante foi encontrado por outros pesquisadores (Coelho et al., 1977; Rodrigues, 1998; Rodrigues & Arf, 2002a). Por outro lado, a menor altura de plantas observada com a diminuição da disponibilidade de água no solo justifica-se pela redução da absorção de água e nutrientes, bem como, segundo

Hsiao (1973), pela diminuição da turgescência das células, propiciando uma redução da expansão celular, o que, conseqüentemente, reduz o alongamento do colmo e da folha.

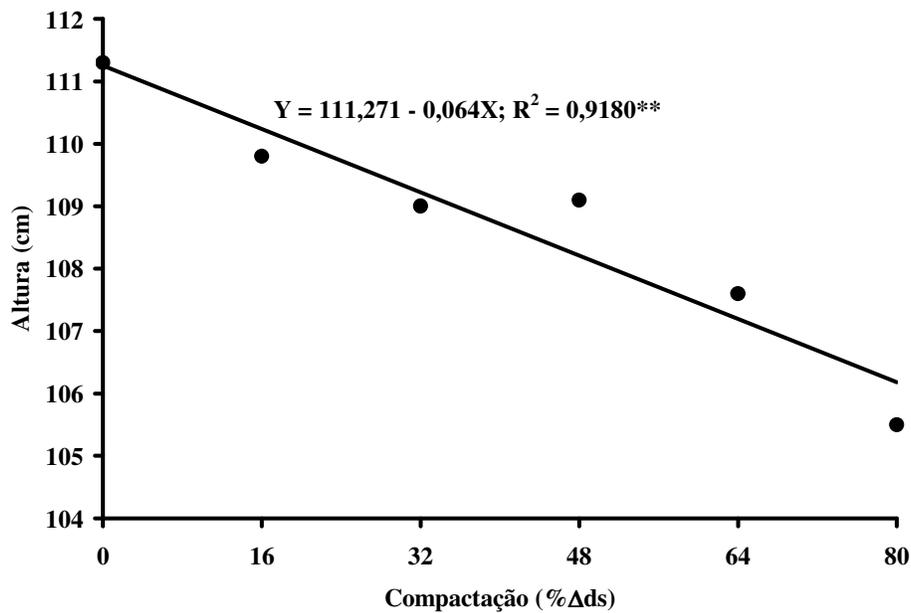


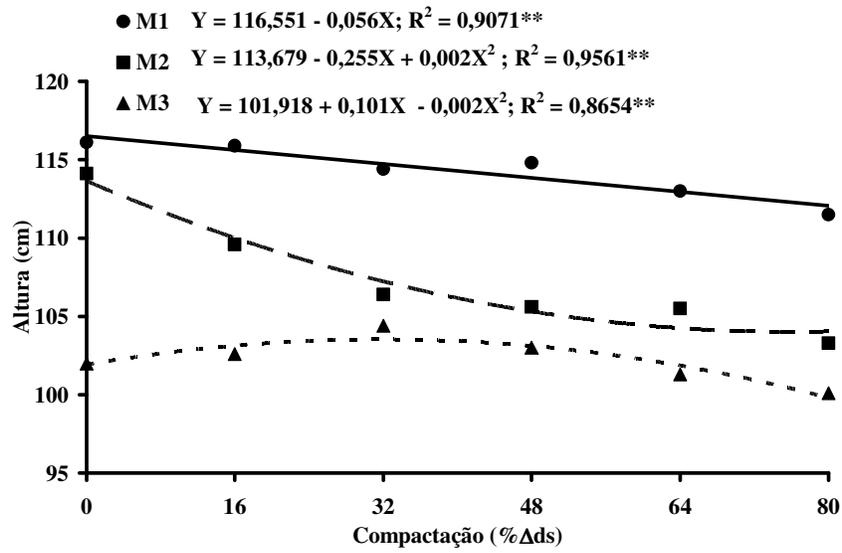
FIGURA 9 - Efeito dos níveis de compactação do solo sobre altura de plantas de arroz considerando-se dois tipos de solo e três manejos de água. UFLA, Lavras-MG, 2004.

Quanto à compactação do solo, esta afetou negativamente a altura de plantas, cujos valores se ajustaram a uma equação de regressão linear decrescente, atingindo, no nível máximo de compactação, uma redução de 5,0 cm em relação à ausência de compactação (Figura 9). Essa redução na altura de plantas deve-se às alterações nas propriedades físico-hídricas dos solos proporcionadas pela compactação, como já mencionado (Camargo, 1983; Ripoli,

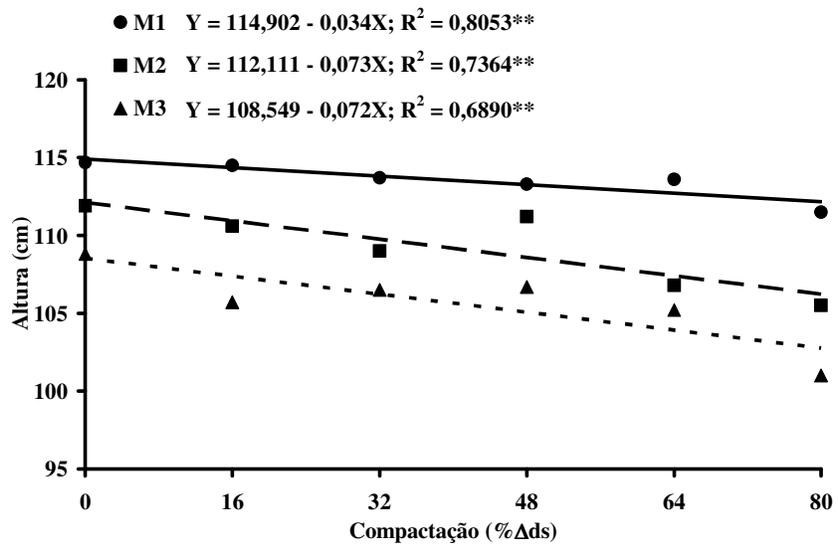
1992 e Alvarenga et al., 1996, Stone et al., 2002a); ao aumento da resistência à penetração das raízes e, principalmente, à redução das taxas de difusão da água e de nutrientes como P e K e do fluxo de massa no solo, reduzindo o desenvolvimento do sistema radicular; à disponibilidade e absorção de água e nutriente pelo sistema radicular das plantas (Vargas, 1982 e Costa, 1998); bem como à diminuição da taxa de acúmulo de carbono pela fotossíntese, conforme observado por Tubeileh et al. (2003) em plantas de milho.

As médias de altura de plantas obtidas em função dos desdobramentos da interação níveis de compactação dentro de cada solo x manejos de água são apresentadas nas Figuras 10a e 10b.

Pelas Figuras 10a e 10b, observa-se que em ambos os solos, a altura da planta diminuiu com o aumento da compactação do solo, independentemente do manejo da água, à exceção do Neossolo, sob o M3, em que se obteve um ligeiro aumento na altura da planta, possivelmente devido ao maior teor de água até o nível de compactação de 25,5% da variação da amplitude da densidade do solo (Δds), correspondendo à altura máxima de 103,3 cm. A partir deste ponto, a compactação passou a reduzir a altura das plantas, sendo que a mínima foi de 98,8 cm no nível máximo de compactação. Todavia, observa-se, em ambos os solos, aumento na altura das plantas com os maiores teores de água disponível, independentemente do nível de compactação, devido às razões já discutidas.



(a)



(b)

FIGURA 10 - Altura de plantas de arroz obtidas em função do desdobramento da interação: níveis de compactação dentro do Neossolo (a) e Latossolo (b) x manejo de água. UFLA, Lavras-MG, 2004.

As médias de altura de planta obtidas em função do desdobramento da interação manejo de água dentro de cada nível de compactação no Neossolo e no Latossolo estão relatadas na Tabela 16. De modo geral, as alturas médias das plantas foram influenciadas pelos diferentes manejos de água, com tendência de a maior umidade favorecer o desenvolvimento das plantas.

No Neossolo, sem compactação (nível 0), as maiores altura de plantas foram obtidas sob os manejos M1(116,2 cm) e M2 (114,2 cm), as quais foram estatisticamente iguais e superiores à obtida sob o manejo M3 (102,0 cm), que foi 12,2% inferior a altura alcançada sob o M1 e 10,7%, sob o M2. Nos níveis de compactação 16%, 64% e 80% da Δds , houve diferenças estatísticas entre os três manejos de água, sendo que as médias de altura de plantas observadas sob o manejo M1 foram maiores que às obtidas sob o manejo M2 e estas, superiores às do manejo M3. Todavia, nos níveis de compactação 32% e 48% Δds , o manejo M1 proporcionou altura de plantas superior às observadas sob os manejos M2 e M3, as quais, por sua vez, foram estatisticamente iguais.

No Latossolo, sob os níveis de compactação 0%, 16%, 32% e 80% da Δds , houve diferenças significativas nas médias da altura de plantas proporcionadas pelos três manejos de água. A altura das plantas foi significativamente maior no M1, seguida pela média do M2, que foi superior à obtida sob o M3; ou seja, a altura da planta diminuiu com o decréscimo dos teores de água no solo. No nível de compactação 48% da Δds , as médias da altura de plantas obtidas sob os manejos M1 (113,3 cm) e M2 (111,2 cm) foram estatisticamente iguais e superiores às obtidas sob o manejo M3 (106,7 cm). No nível de compactação 64% da Δds , o M1 propiciou a maior altura de plantas (113,6 cm), superando em 7,9% a alcançada sob M3 (105,2 cm), a qual, por sua vez, não diferiu da obtida com M2 (106,8 cm).

TABELA 16 - Altura de plantas de arroz (cm) obtidas em função da interação: manejo de água dentro de cada nível de compactação dos solos (Neossolo e Latossolo). UFLA, Lavras-MG, 2004.

Compactação(% Δds)	Manejo de água ¹	Medias da altura de plantas (cm) ²	
		Neossolo	Latossolo
0	M1	116,2 a	114,7 a
	M2	114,2 a	111,9 b
	M3	102,0 b	108,8 c
16	M1	115,8 a	114,4 a
	M2	109,6 b	110,6 b
	M3	102,5 c	105,7 c
32	M1	114,5 a	113,7 a
	M2	106,4 b	109,0 b
	M3	104,4 b	106,5 c
48	M1	114,8 a	113,3 a
	M2	105,6 b	111,2 a
	M3	103,0 b	106,7 b
64	M1	113,0 a	113,6 a
	M2	105,5 b	106,8 b
	M3	101,3 c	105,2 b
80	M1	111,5 a	111,5 a
	M2	103,3 b	105,5 b
	M3	100,1 c	100,0 c

¹M1: solo 100% saturado com água; M2: irrigação quando eram consumidos de 25 a 30% da água disponível; M3: irrigação quando eram consumidos de 50 a 60% da água disponível. ²Médias seguidas pela mesma letra nas colunas não diferem entre si pelo teste de Tukey no nível de 5% de probabilidade.

Esses resultados, de modo geral, são semelhantes aos obtidos para os teores de nitrogênio, fósforo e potássio na parte aérea da planta, evidenciando os

efeitos depressivos da compactação do solo, reduzindo a absorção destes nutrientes e o crescimento das plantas, independentemente do tipo de solo e do seu teor de umidade. Por outro lado, revelam a importância da alta disponibilidade de água no solo, propiciando o aumento da absorção dos nutrientes, interferindo diretamente na divisão e no crescimento celular (Crusciol, 2001), principalmente nos níveis mais elevados de compactação, onde a altura das plantas, em geral foi mais afetada com a redução dos teores de água, em ambos os solos. Isso é atribuído às mudanças proporcionadas pela compactação do solo, pelos teores de água disponível e pelas características dos solos, como já mencionado, as quais, isoladamente ou integradas, propiciaram essa redução na estatura das plantas.

A maior altura de plantas de arroz, devido ao aumento da disponibilidade de água no solo, também foi observada por Rodrigues (1998); Crusciol (2001) e Rodrigues & Arf (2002a) ao avaliarem diferentes cultivares de arroz de terras altas irrigadas por aspersão sob diferentes lâminas de água. Resultado semelhante foi constatado por Barreto & Rojas (1987); Alves & Machado (1991); Silveira Filho (1992) e Medeiros et al. (1997) com arroz irrigado. Os autores atribuíram esse aumento na altura das plantas à maior disponibilidade de nutrientes no solo inundado.

4.7 Massa seca de raiz

As médias de massa seca de raiz (g.vaso^{-1}) obtidas em diferentes solos e sob os três manejos de água encontram-se na Tabela 17, e com os diferentes níveis de compactação, na Figura 11. A massa seca de raízes das plantas cultivadas no Latossolo foi estatisticamente superior à das plantas cultivadas no Neossolo, superando essa última em $2,0 \text{ g.vaso}^{-1}$.

A redução no Neossolo deve-se à menor aeração, à disponibilidade e absorção de nutrientes pelas plantas desenvolvidas nesse solo, como já discutido. Resultado semelhante foi obtido por Rosolém et al. (1999), os quais também observaram maior redução no sistema radicular de plantas de milho no solo mais argiloso, devido à maior resistência à elongação das raízes, ocasionada pela compactação.

TABELA 17 - Média geral da massa seca de raízes (g.vaso^{-1}) obtidas com diferentes solos e manejos de água. UFLA, Lavras-MG, 2004.

Solos	Massa seca de raiz (g.vaso^{-1})²
Neossolo	17,3 b
Latossolo	19,3 a
Manejo de água¹	
M1	18,8 a
M2	18,2 ab
M3	17,9 b

¹M1: solo 100% saturado com água; M2: irrigação quando eram consumidos de 25 a 30% da água disponível; M3: irrigação quando eram consumidos de 50 a 60% da água disponível. ² Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

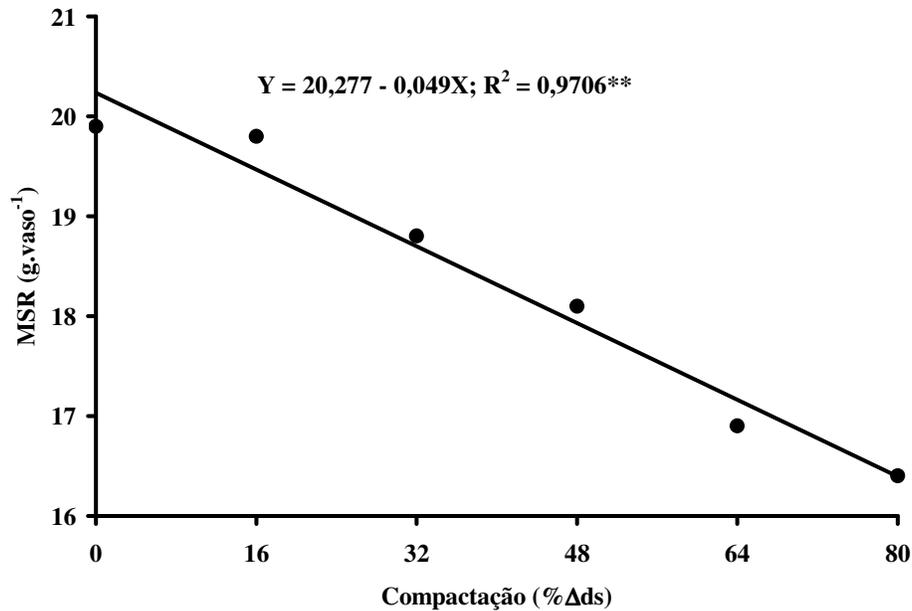


FIGURA 11 - Efeito dos níveis de compactação do solo sobre a massa seca de raízes de arroz (MSR), considerando-se dois tipos de solo e três manejos de água. UFLA, Lavras-MG, 2004.

Com relação ao manejo de água, o solo saturado (M1) favoreceu o desenvolvimento do sistema radicular das plantas, contudo não diferiu estatisticamente do M2, ou seja, apenas do M3. Apesar de o volume de solos dos vasos ser relativamente pequeno, o manejo de água foi importante para o desenvolvimento das raízes. O maior desenvolvimento de raízes pode ser explicado pela maior absorção de nutrientes como N e P, além da menor resistência à penetração de raízes propiciada pela maior umidade no solo saturado, também relatado por Hoffmann & Jungk (1995) e Stone et al. (2002a).

Esse resultado discorda dos mostrados por Stone (1983) e Mambany & Lal (1983), que observaram aumento na massa seca de raízes de plantas de arroz

de sequeiro com a menor disponibilidade de água no solo, por favorecer o crescimento radicular em maior profundidade. Por outro lado, corrobora os observados por Scalco (1983) e Pereira et al. (1994), que, ao avaliarem cultivares de arroz de sequeiro sob diferentes teores de água no solo, também obtiveram aumento na produção de massa seca do sistema radicular dos cultivares com a maior disponibilidade de água no solo, devido à maior absorção de nutrientes pelas plantas.

Quanto aos níveis de compactação, considerando a média geral dos dois solos (Figura 11), os mesmos afetaram negativamente o desenvolvimento do sistema radicular da cultura, ou seja, à medida que se aumentou o nível de compactação houve uma redução linear na massa seca de raízes, atingindo 19,3% no nível máximo de compactação, em relação à média (20,3 g.vaso⁻¹) alcançada na ausência de compactação. Essa redução deve-se, entre outras possibilidades, às alterações nas propriedades físico-hídricas e químicas do solo já mencionadas, reduzindo a disponibilidade de nutrientes e o perfilhamento das plantas, pois a massa seca de raízes depende do número de raízes, o qual, por sua vez, correlaciona-se com o número de perfilhos, além do comprimento das raízes, o qual é reduzido, principalmente com o aumento da resistência à penetração das raízes provocado pela compactação, conforme observado por Hoffmann & Jungk, (1995) em plantas de beterraba e por Stone et al. (2002a) em plantas de feijão.

Para a cultura do arroz de terras altas, Grohmann & Queiroz Neto (1966) constataram que houve impedimento físico ao desenvolvimento das raízes quando a densidade do solo atingiu valores superiores a 1,38 kg.dm⁻³ no Podzólico Vermelho Amarelo e a 1,42 kg.dm⁻³ no Latossolo Roxo. Por sua vez, Guimarães & Moreira (2001) observaram redução na densidade do sistema radicular desta cultura a partir da densidade de 1,2 kg.dm⁻³. Resultado

semelhante também foi observado para a cultura do feijoeiro por Guimarães et al. (2002).

A massa seca de raiz obtida em função do manejo da água dentro dos níveis de compactação no Neossolo e no Latossolo encontra-se na Tabela 18. No Neossolo, sob os níveis de compactação 0, 16, 64 e 80 % da Δds , não houve influência dos manejos de água sobre o desenvolvimento do sistema radicular da cultura, cujas médias não diferem entre si. Todavia, nos níveis de compactação 32% e 48% da Δds , o M1 favoreceu o desenvolvimento do sistema radicular, cujas médias superaram às alcançadas sob os regimes M2 e M3, impulsionadas, possivelmente, pela maior absorção de P e pela menor resistência à penetração das raízes no M1.

No Latossolo sem compactação (0% Δds), o M1 favoreceu o desenvolvimento do sistema radicular, cuja média de massa seca das raízes (22,2 g.vaso⁻¹) foi superior à observada sob o manejo M2 (19,5 g.vaso⁻¹), mas não diferiu do M3 (20,6 g.vaso⁻¹). Neste caso, não se observou consistência do resultado. Já para os demais níveis de compactação não houve interferência dos diferentes regimes de água sobre o desenvolvimento do sistema radicular, cujos valores foram estaticamente iguais.

TABELA 18 - Médias de massa seca de raiz (g.vaso⁻¹) obtidas em função do desdobramento da interação: manejo de água x níveis de compactação no Neossolo e no Latossolo. UFLA, Lavras-MG, 2004.

Compactação do solo (% Δds)	Manejo de água ¹	Massa seca de raiz (g.vaso ⁻¹) ²	
		Neossolo	Latossolo
0	M1	19,4 a	22,2 a
	M2	19,8 a	19,5 b
	M3	18,1 a	20,6 ab
16	M1	17,7 a	22,8 a
	M2	17,6 a	21,3 a
	M3	18,4 a	20,8 a
32	M1	19,6 a	19,5 a
	M2	16,7 b	19,8 a
	M3	17,1 b	20,0 a
48	M1	19,0 a	18,3 a
	M2	16,5 b	19,3 a
	M3	15,9 b	19,7 a
64	M1	17,0 a	18,0 a
	M2	16,9 a	17,1 a
	M3	15,3 a	17,1 a
80	M1	15,3 a	17,1 a
	M2	16,4 a	16,9 a
	M3	15,6 a	16,7 a

¹ M1: solo 100% saturado com água; M2: irrigação quando eram consumidos de 25 a 30% da água disponível; M3: irrigação quando eram consumidos de 50 a 60% da água disponível. ² Médias seguidas pela mesma letra nas colunas não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

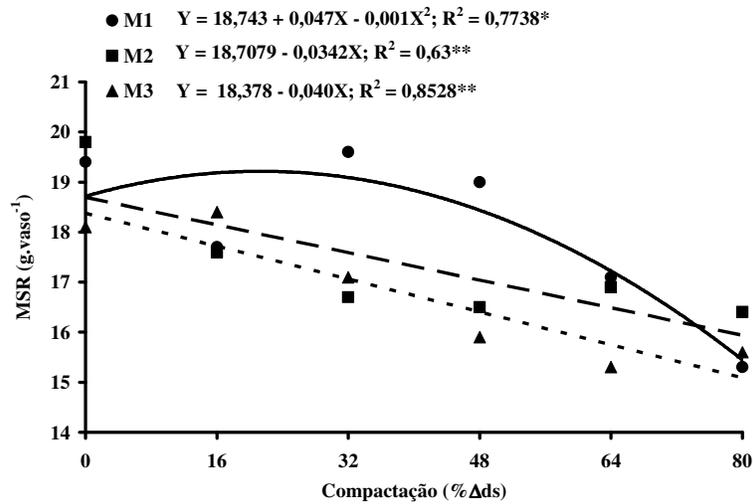
De modo geral, pode-se considerar que dentro dos níveis de compactação, o manejo de água pouco afetou o desenvolvimento radicular, possivelmente devido ao reduzido volume de solo ocupado por vaso, limitando o

desenvolvimento do sistema radicular. Além do mais, a pequena frequência da reposição de água no solo (de um a dois dias), associada à baixa taxa de infiltração de água nos solos sob os níveis mais elevados de compactação, fez com que os vasos permanecessem com lâmina de água sobre a superfície do solo por um período que variava de duas a seis horas, até ser infiltrada, diminuindo, assim, a diferença no comportamento do sistema radicular entre os manejos de água.

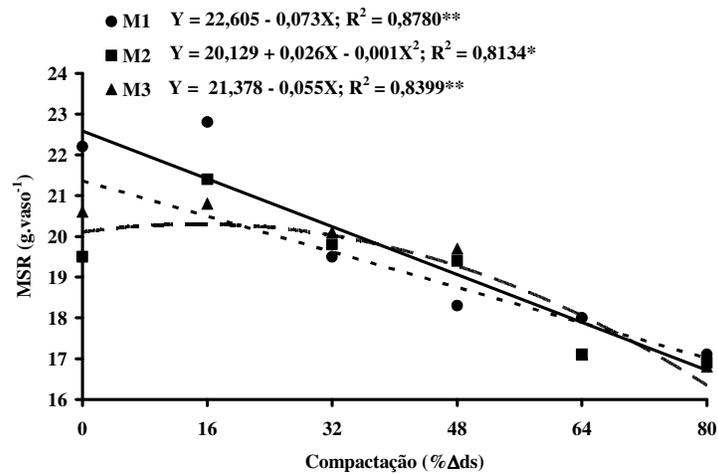
A produção de massa seca de raízes provenientes do desdobramento dos efeitos dos níveis de compactação do solo dentro de cada solo x manejos de água encontra-se nas Figuras 12a e 12b. Esses resultados foram semelhantes aos observados para a média dos dois solos (Figura 11), em que os níveis de compactação reduziram significativamente a massa seca de raízes, à medida que a mesma foi aumentada, diferindo apenas no comportamento, em alguns casos, em função do solo e do manejo de água.

No Neossolo (Figura 12a), sob o solo saturado (M1), os dados se ajustaram a um modelo de regressão quadrática com coeficiente de determinação estimado em 77,4%. Observou-se um moderado aumento na massa de raízes, atingindo a produção máxima de 19,8 g.vaso⁻¹ no nível de compactação 23,5% da Δds equivalente à densidade de 1,17 kg.dm⁻³, mantendo-se praticamente estável até o nível de 48% da Δds (densidade 1,23 kg.dm⁻³). Isso pode ser explicado pela maior disponibilidade de água e de nutrientes, ocasionada pela saturação do solo, atenuando os efeitos depressivos da compactação sobre o desenvolvimento do sistema radicular até o nível de 48% da Δds . A partir desse ponto, houve uma acentuada redução com o aumento da compactação, tendo em vista as restrições na disponibilidade de nutrientes e o aumento da resistência à penetração das raízes ocorrido nos níveis mais elevados de compactação. Nos manejos M2 e M3 a massa de raízes decresceu linearmente com o incremento da compactação, cujos valores se ajustaram a um modelo de regressão linear

decrecente. Para cada um por cento de variação da amplitude da densidade do solo, a redução média da MSR foi de 0,037 g de raiz.vaso⁻¹.



(a)



(b)

FIGURA 12 - Massa seca de raiz (MSR) em função dos níveis de compactação do solo dentro de manejos de água no Neossolo (a) e no Latossolo (b). UFLA, Lavras-MG, 2004.

No Latossolo, com os manejos M1 e M3, a produção de raízes diminuiu com o incremento da compactação. Os valores se ajustaram a modelos de regressão linear decrescente com coeficientes de determinação que explicam 87,8% e 84%, respectivamente. Já, no M2, houve ajuste a um modelo de regressão quadrática com coeficiente de determinação estimado em 81,3% (Figura 12b); ou seja, o incremento da compactação até 13% da Δds , correspondendo à densidade em torno de $1,2 \text{ kg.dm}^{-3}$, propiciou um ligeiro aumento na massa seca de raízes, atingindo, nesse ponto, a produção máxima de $20,3 \text{ g.vaso}^{-1}$. A partir deste ponto, houve uma redução na produção de MSR à medida que se aumentou a compactação, alcançando, no nível máximo de compactação, 22% da MSR máxima obtida.

Contudo, observa-se que, mesmo com algumas variações quanto ao comportamento da massa seca de raízes, dependendo da classe de solo e do manejo de água, de modo geral a compactação do solo reduziu a massa seca de raízes das plantas, em ambos os solos, independentemente dos teores de água no solo. Entretanto, vale ressaltar que em nenhum dos solos observou-se impedimento total do desenvolvimento do sistema radicular das plantas que atingiram a profundidade máxima de 24,0 cm no fundo dos vasos, à exceção do Latossolo, no último nível de compactação, correspondente à densidade $1,5 \text{ kg.dm}^{-3}$, onde as raízes se desenvolveram mais superficialmente, atingindo uma profundidade média em torno de 18,0 cm, independentemente dos teores de água no solo.

Esses resultados concordam com o de Diaz-Zambrana (1994), o qual concluiu que solos arenosos sob alto nível de compactação limitam mais intensivamente o aprofundamento do sistema radicular de leguminosas do que os de textura mais argilosa, devido à maior alteração observada na sua porosidade total. Também corroboram com os obtidos por Leite et al. (2003) e Ribeiro et al. (2003), que mostraram redução na massa seca de raiz de plantas de arroz com o

incremento da densidade do solo, independentemente da classe de solo e de sua textura. Para cada incremento de 1% no grau de compactação, Ribeiro et al. (2003) observaram uma redução em tona de 0,06 g na produção de massa seca de raízes por vaso. Pesquisa conduzida por Ribeiro (1999) também mostra redução na massa seca de raízes de plantas de soja e de eucalipto cultivadas em dois Latossolos com o aumento da densidade, tanto no Latossolo de textura argilosa quanto no de textura franco arenosa.

4.8 Massa seca da parte aérea das plantas

As médias de massa seca da parte aérea (MSPA) obtidas em diferentes solos e manejos de água encontram-se na Tabela 19, e dos diferentes níveis de compactação, na Figura 13. Pela Tabela 19, nota-se que o Latossolo foi mais favorável à produção de massa seca da parte aérea ($70,1 \text{ g.vaso}^{-1}$), superando à do Neossolo ($66,2 \text{ g.vaso}^{-1}$) em 5,9%. Resultados semelhantes foram encontrados por Ribeiro (1999), que obteve aumento de 67% na média de matéria seca da parte aérea de plantas de eucalipto cultivados no Latossolo Vermelho de textura franco-arenosa em relação às médias observadas no Latossolo Escuro de textura argilosa, a qual foi atribuída à maior disponibilidade e a absorção dos nutrientes pelas plantas no Latossolo de textura franco-arenosa.

TABELA 19 - Médias de produção de massa seca da parte aérea de arroz (g.vaso⁻¹) obtidas em diferentes solos e manejos da água. UFLA, Lavras-MG, 2004.

Solos	Massa seca da parte aérea (g.vaso⁻¹)²
Neossolo	66,2 b
Latossolo	70,1 a
Manejo de água¹	
M1	80,1 a
M2	65,7 b
M3	58,7 c

¹M1: solo 100% saturado com água; M2: irrigação quando eram consumidos de 25 a 30% da água disponível; M3: irrigação quando eram consumidos de 50 a 60% da água disponível. ²Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

Quanto aos efeitos do manejo de água sobre a produção de massa seca da parte aérea (Tabela 19), observa-se que houve diferenças significativas entre as médias proporcionadas pelos diferentes manejos. Com o solo saturado (M1), obteve-se a maior produção de massa seca (80,1 g.vaso⁻¹), que foi 21,9 % superior à obtida sob o M2 (65,7 g.vaso⁻¹), a qual, por sua vez, superou em 11,9 % o valor alcançado pelo manejo M3 (58,7 g.vaso⁻¹). Esse aumento na massa seca da parte aérea das plantas (MSPA) com o incremento de água no solo justifica-se pela redução da resistência à penetração das raízes no solo e pela maior disponibilidade e absorção de nutrientes (De Datta et al., 1970), principalmente de N e P, proporcionando maior eficiência fotossintética; que conseqüentemente, incrementou o desenvolvimento do sistema radicular e da parte aérea das plantas. Esse resultado assemelha-se aos obtidos por Crusciol et al. (1997b), Stone & Silva (1998) e Crusciol (2001), os quais observaram

aumento da produção de MSPA em arroz de terras altas com a maior disponibilidade de água no solo.

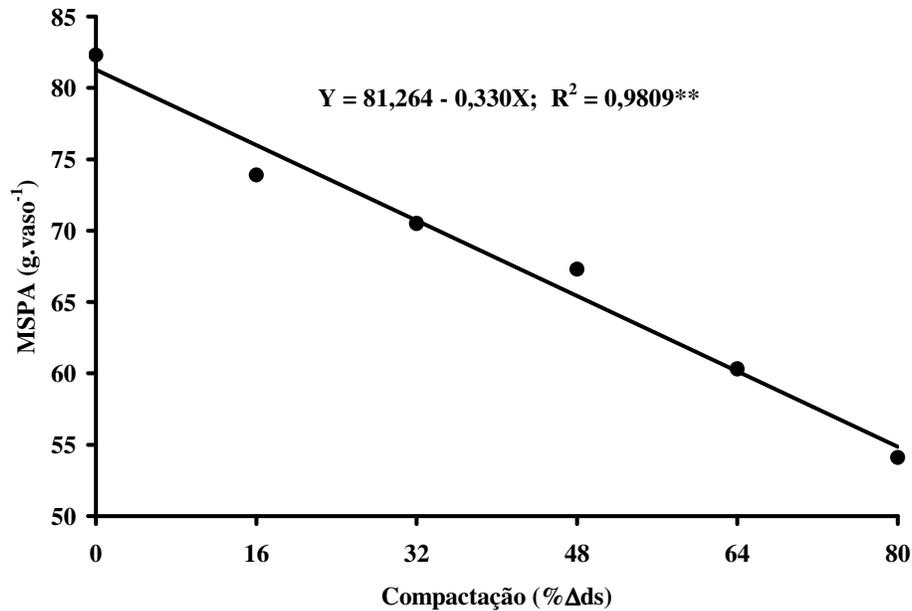


FIGURA 13 - Efeito de níveis de compactação do solo sobre massa seca da parte aérea (MSPA) de plantas de arroz, considerando-se dois tipos de solo e três manejos de água. UFLA, Lavras-MG, 2004.

Com relação aos efeitos de níveis da compactação (Figura 13), nota-se que à medida que se aumentou a compactação, houve uma redução linear na produção de matéria seca da parte aérea das plantas (MSPA), chegando no nível máximo de compactação a 26,4% da produção (81,26 g.vaso⁻¹), obtida no solo sem compactação. Essa redução na MSPA é atribuída às alterações nas propriedades físico-hídricas dos solos, proporcionadas pela compactação (Camargo, 1983; Ripoli, 1992 e Alvarenga et al., 1996), e à elevação da

resistência à penetração das raízes no solo, reduzindo a disponibilidade e a absorção dos nutrientes pelo sistema radicular das plantas (Vargas, 1982; Costa, 1998 e Ribeiro, 1999), resultando em menor acúmulo de carbono pela fotossíntese (Tubieleh et al., 2003) e, conseqüentemente, redução na elongação do sistema radicular, da parte aérea das plantas e do número de perfilhos por vaso.

Esse resultado está de acordo com os obtidos por Ribeiro et al. (2003), que encontraram redução linear e decrescente da MSPA de plantas de arroz à medida que se elevou o grau de compactação em dois Latossolos de textura média e argilosa. Resultado semelhante foi obtido por Gris et al. (2003) com a cultura do milho sob plantio direto no solo sob diferentes densidades e por Oberhauser et al. (2003), segundo os quais o aumento do volume de solo compactado reduziu a produção de MSPA na cultura do feijoeiro, porém divergem dos encontrados por Leite et al. (2003), que mostram aumento linear e crescente da MSPA de plantas de arroz com o incremento da compactação em um solo de textura média.

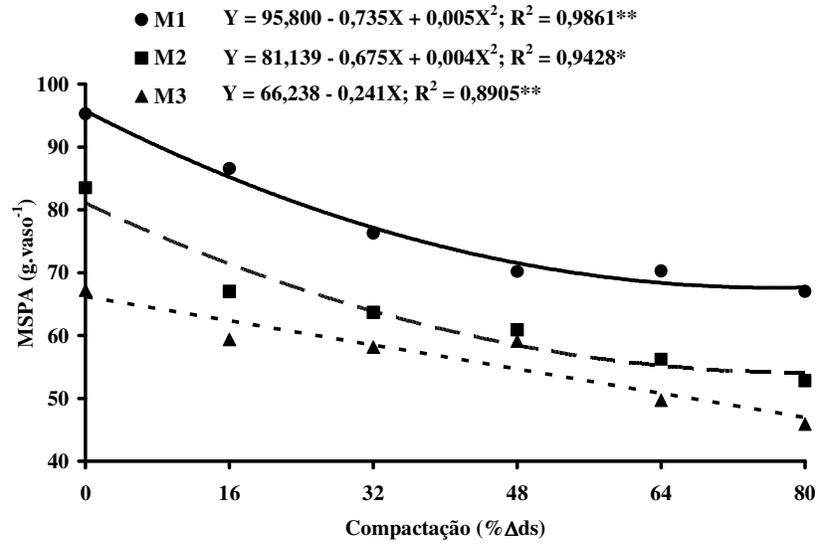
A produção de massa seca da parte aérea (g.vaso^{-1}) em função dos níveis de compactação do solo dentro de manejos de água no Neossolo e no Latossolo está apresentada nas Figuras 14a e 14b.

Pela Figura 14a, observa-se que no Neossolo a produção de MSPA apresentou tendência semelhante à obtida com a média dos dois solos (Figura 13), isto é, houve um decréscimo na produção de massa seca da parte aérea da plantas, à medida que se aumentou o nível de compactação, independentemente do manejo da água. Os maiores valores da MSPA ocorreram no nível compactação 0% da Δds ou $ds = 1,11 \text{ kg.dm}^{-3}$, ou seja, 95,8; 81,1 e 66,2 g.vaso^{-1} nos manejos M1, M2 e M3, respectivamente, e os menores valores, no nível máximo de compactação (80% da Δds ou $ds = 1,31 \text{ kg.dm}^{-3}$), que corresponde a

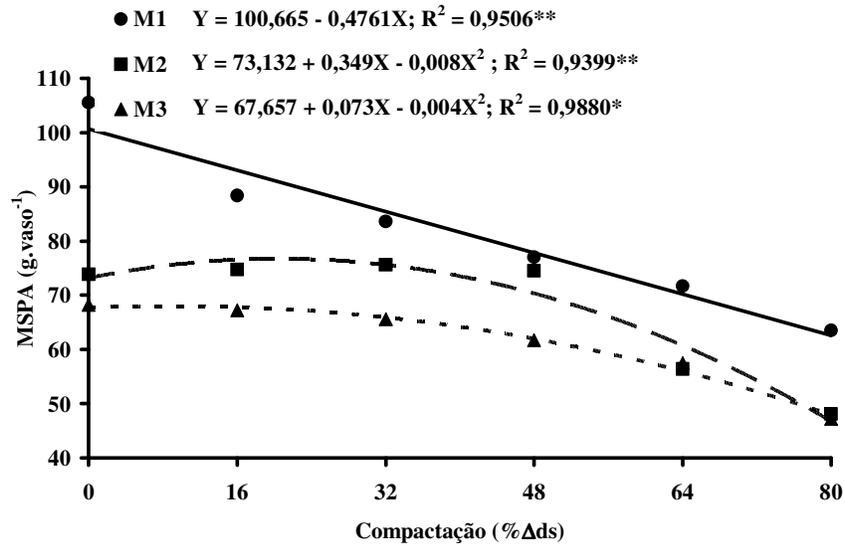
69,0; 52,7 e 46,9 g.vaso⁻¹, respectivamente. Isto corresponde a decréscimos de 28%, 35% e 29% da produção da MSPA, ocorridos nos manejos M1, M2 e M3, respectivamente, devido às razões já discutidas.

No Latossolo (Figura 14b), os valores da MSPA foram semelhantes aos observados para os teores de P, massa seca de raiz, altura de plantas e número de perfilhos por vaso. No solo saturado (M1), a massa seca da parte aérea das plantas decresceu linearmente com o aumento do nível de compactação, cuja redução alcançou, no nível de máximo de compactação (80% da Δds ou $ds = 1,50 \text{ kg.dm}^{-3}$), 37,8% da produção máxima, presumivelmente causada principalmente pela redução na absorção de N.

Nos manejos M2 e M3, houve ajuste a um modelo de regressão quadrática com moderado aumento da produção até os níveis de compactação de 21,8 e 9,2 % da Δds , respectivamente. A partir deste ponto, ocorreu redução na produção de massa seca à medida que se aumentou o nível de compactação. Portanto, para esse solo, sob os manejos com a reposição de água, quando consumidos de 25 a 30% e de 50 a 60% da água disponível para as plantas (M2 e M3), respectivamente, um moderado nível de compactação foi benéfico para a cultura, propiciando aumento na produção de massa seca de raízes, na absorção de P, na altura de plantas, no perfilhamento e, conseqüentemente, na produção de massa seca da parte aérea das plantas.



(a)



(b)

FIGURA 14 – Matéria seca da parte aérea (MSPA) de plantas de arroz em função de níveis de compactação do solo dentro de manejos de água no Neossolo (a) e no Latossolo (b). UFLA, Lavras-MG, 2004.

Esses resultados corroboram os obtidos por Silveira (2002), que obteve aumento de 48% na massa seca da parte aérea de plantas de arroz na densidade do solo de $1,39 \text{ kg.dm}^{-3}$ em relação à produção obtida na densidade de $1,12 \text{ kg.dm}^{-3}$; bem como por Leite et al. (2003), que observaram efeito benéfico da compactação sobre a MSPA de plantas de arroz, ajustando-se a um modelo de regressão quadrática. Santos (2001) também verificou que um moderado nível de compactação no Latossolo Vermelho favoreceu a absorção de P e a produção da MSPA de plantas de milho. Muller et al. (2001), ao avaliarem o comportamento de diferentes culturas num Latossolo Vermelho Amarelo textura média com densidade variando de $1,31 \text{ kg.dm}^{-3}$ a $1,70 \text{ kg.dm}^{-3}$, também alcançaram as maiores médias de MSPA das plantas de nabo forrageiro, aveia preta e aveia branca na densidade de $1,43 \text{ kg.dm}^{-3}$. Os autores atribuíram esse aumento ao maior contato solo-raiz, resultando em melhores condições para absorção de água e nutrientes, sem prejudicar de forma drástica o crescimento das raízes.

As produções de massa seca da parte aérea do arroz obtidas em função dos efeitos dos manejos da água dentro dos níveis de compactação nos dois solos (Neossolo e Latossolo) são mostradas na Tabela 20. Observa-se que as produções de MSPA foram influenciadas significativamente pelos regimes de água, obtendo-se, geralmente, as maiores médias com o solo saturado, seguido dos menores níveis de compactação.

No Neossolo sem compactação (nível 0), as produções de massa seca da parte aérea foram, em ordem decrescente, obtidas pelos manejos M1, M2 e M3, em que a média do M1 superou estatisticamente a do M2 em 14,1% e a do M3 em 41,6%. A média do M2, por sua vez, superou estatisticamente a do M3 em 24,1%. Para os demais níveis de compactação, os resultados foram semelhantes, ou seja, as médias obtidas com o M1 foram estatisticamente superiores às

alcançadas com os manejos M2 e M3, as quais, por sua vez, não diferiram entre si.

TABELA 20 - Médias de produção de massa seca da parte aérea de plantas de arroz (g.vaso⁻¹) obtidas em função do desdobramento da interação manejo de água x níveis de compactação x solos (Neossolo e Latossolo). UFLA, Lavras-MG, 2004.

Compactação do solo (% Δds)	Manejos de água ¹	Massa seca da parte aérea (g.vaso ⁻¹) ²	
		Neossolo	Latossolo
0	M1	95,3 a	105,5 a
	M2	83,5 b	73,8 b
	M3	67,3 c	68,2 b
16	M1	86,6 a	88,4 a
	M2	67,1 b	74,6 b
	M3	59,4 b	67,2 b
32	M1	76,3 a	83,6 a
	M2	63,7 b	75,6 a
	M3	58,2 b	65,5 b
48	M1	70,2 a	77,0 a
	M2	60,9 b	74,5 a
	M3	59,1 b	61,7 b
64	M1	70,3 a	71,7 a
	M2	56,1 b	56,4 b
	M3	49,7 b	57,5 b
80	M1	67,0 a	63,5 a
	M2	52,8 b	48,1 b
	M3	45,9 b	47,1 b

¹ M1: solo 100% saturado com água; M2: irrigação quando eram consumidos de 25 a 30% da água disponível; M3: irrigação quando eram consumidos de 50 a 60% da água disponível. ² Médias seguidas pela mesma letra nas colunas não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

No caso do Latossolo, para todos os níveis de compactação, a produção MSPA também foi significativamente maior no M1, diferindo das obtidas sob os demais regimes de água, cujas médias não diferiram entre si. Exceções são feitas aos níveis de compactação 32% e 48% da Δds ($ds = 1,28$ e $1,35 \text{ kg.dm}^{-3}$), respectivamente, em que as médias do M1 e M2 foram estatisticamente iguais e superiores às do manejo M3. Isso ocorreu devido, entre outras possibilidades, à maior absorção de nutrientes propiciada pelos manejos com maior disponibilidade de água no solo.

Portanto, de modo geral, a maior disponibilidade de água para as plantas, principalmente com o solo saturado, aumentou a MSPA das plantas, independentemente da classe de solo e do nível compactação, devido ao aumento da disponibilidade e absorção de água e nutrientes; à maior eficiência fotossintética, otimizando a divisão e alongação celular, a estatura das plantas e à emissão de perfilhos. Esses resultados concordam com os obtidos por Scalco (1983); Carvalho Júnior (1987); Crusciol et al. (1997b); Stone & Silva (1998); Crusciol (2001), que também constataram acréscimo na MSPA em plantas de arroz de terras altas cultivadas em solo com maior disponibilidade de água para as plantas.

4.9 Número de perfilhos e de panículas por vaso

Os resultados do número de perfilhos e de panículas por vaso, obtidos sob os diferentes solos e manejos de água, encontram-se na Tabela 21, e as médias alcançadas sob os diferentes níveis de compactação, nas Figuras 16a e 16b. Pela Tabela 21, observa-se que o Latossolo propiciou maior número de perfilhos e de panículas, diferindo em 8,3% e 4,3%, respectivamente, dos valores obtidos no Neossolo. Esse aumento no Latossolo justifica-se pela maior disponibilidade e absorção de nutrientes, principalmente de N, durante a fase

vegetativa, que é fundamental para estimular o perfilhamento e, conseqüentemente, o número de panículas por vaso.

TABELA 21 - Número de perfilhos e de panículas por vaso obtidos em dois solos sob três manejos de água. UFLA, Lavras-MG, 2004.

Solo	Número de perfilhos²	Número de panículas²
Neossolo	23,1 b	22,0 b
Latossolo	25,2 a	23,0 a
Manejo de água		
M1	26,3 a	25,6 a
M2	23,5 b	21,4 b
M3	23,1 b	20,4 c

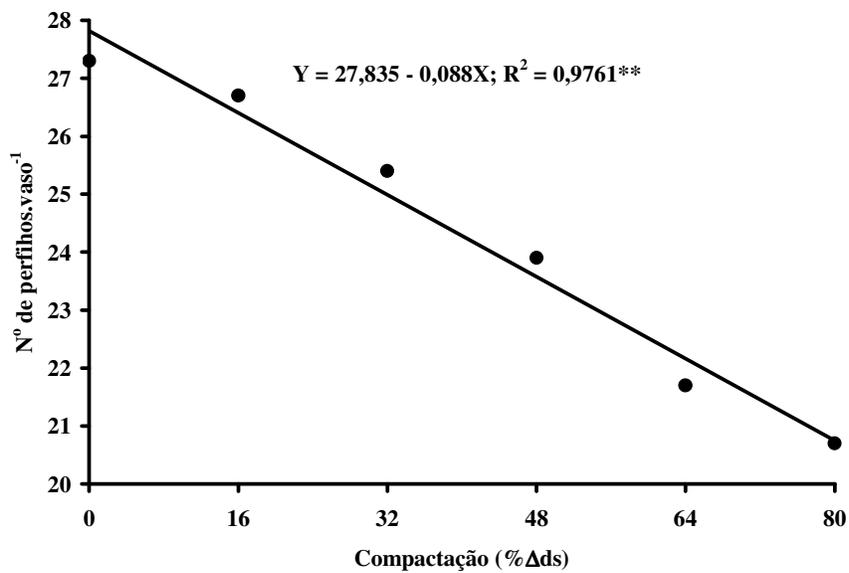
¹M1: solo 100% saturado com água; M2: irrigação quando eram consumidos de 25 a 30% da água disponível; M3: irrigação quando eram consumidos de 50 a 60% da água disponível. ²Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Quanto aos manejos de água, o M1 favoreceu o perfilhamento das plantas, cuja média (26,3 perfilhos por vaso) foi 11,9% superior à obtida sob o manejo M2 (23,5 perfilhos por vaso) o qual, por sua vez, não diferiu do M3 (23,1 perfilhos por vaso). Para o número de panículas, encontrou-se diferença entre os três manejos de água, ou seja, a média do solo saturado (25,6 panículas por vaso) superou em 19,6% a do manejo M2 (21,4 panículas por vaso), a qual, por sua vez, foi 5,0% superior ao número de panículas obtido no M3 (20,4 panículas por vaso).

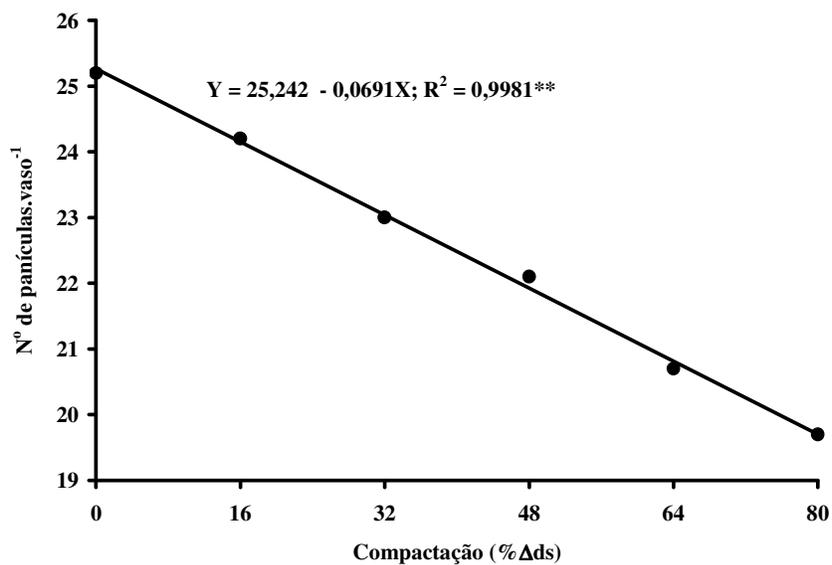
Isso mostra que a baixa disponibilidade de água no solo (M3) afetou mais negativamente a emissão das panículas do que o perfilhamento, produzindo perfilhos inférteis. Resultados semelhantes foram obtidos por Stone (1983);

Stone & Silva (1998); Crusciol et al. (1997a) e Rodrigues (1998), segundo os quais o déficit hídrico ocorrido durante o estágio da diferenciação do primórdio floral, afetou negativamente o número de panículas de diferentes cultivares de arroz de terras altas, por afetar negativamente a transformação das gemas vegetativas em reprodutivas.

Com relação aos níveis de compactação, os mesmos afetaram negativamente o perfilhamento e o número de panículas das plantas em ambos os solos (Figuras 16a e 16b). À medida que se aumentou o nível de compactação houve decréscimo de 7,0 e 5,5 perfilhos e de panículas por vaso, no nível máximo de compactação, correspondendo a uma redução de 25,2% e 21,5%, respectivamente. Esses resultados são coerentes com os obtidos por Ribeiro et al. (2003), que também constataram redução linear no número de perfilhos de arroz com o aumento da compactação em dois Latossolos de textura argilosa e média; e com os observados por Gross et al. (2003) e Schmidt et al. (2003), que obtiveram redução linear no perfilhamento de braquiária com o acréscimo da compactação até o nível máximo, diferindo em 33% do número de perfilhos obtido no nível zero de compactação. Essa redução é explicada pelas alterações nas propriedades químicas e físico-hídricas do solo proporcionadas pela compactação, como já discutido. Provavelmente, a mineralização mais lenta nos solos compactados reduziu a disponibilidade de nutrientes, sobretudo de N, que é o elemento que mais contribui para o perfilhamento.



(a)

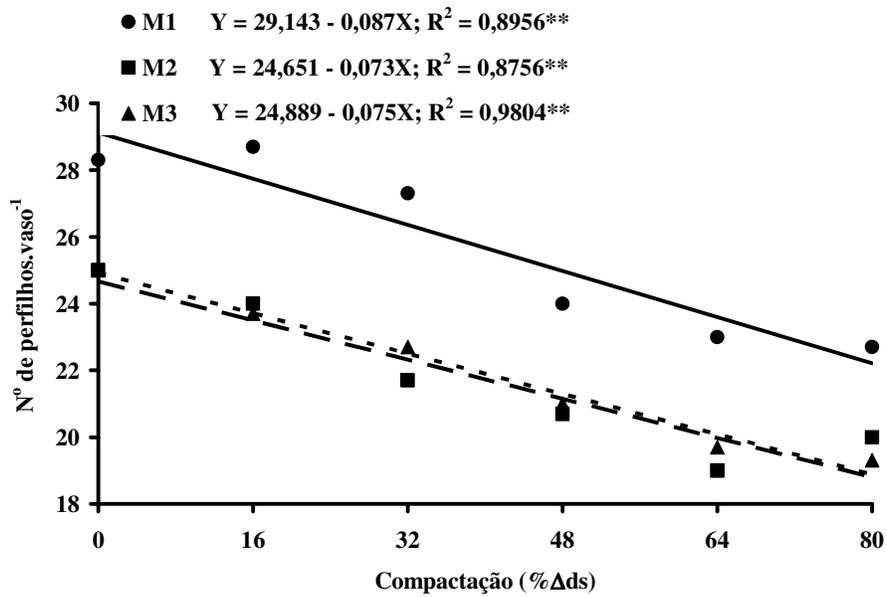


(b)

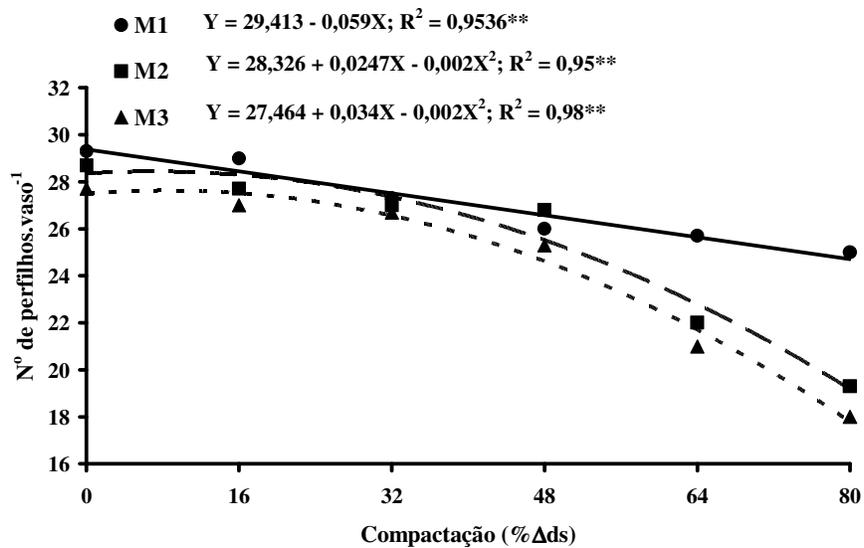
FIGURA 16 - Efeito dos níveis de compactação do solo sobre o número de perfilhos (a) e de panículas de arroz.vaso⁻¹ (b), considerando-se a média de dois solos (Neossolo e Latossolo) e três manejos de água. UFLA, Lavras-MG, 2004.

Os resultados referentes aos efeitos da interação níveis de compactação dentro de cada solo x manejos de água sobre o número de perfilhos por vaso estão apresentados nas Figuras 17a e 17b, e sobre o número de panículas, encontram-se nas Figuras 18a e 18b.

Pelas Figuras 17a e 18a, observa-se que no Neossolo sob todos os manejos de água, os resultados foram semelhantes ao da média dos solos (Figura 16), ou seja, a compactação do solo reduziu significativamente o perfilhamento e o número de panículas de arroz com o aumento do nível de compactação. Os valores do número de perfilhos se ajustaram a um modelo de regressão linear decrescente, com coeficientes de determinação estimados em 89%, 87% e 98% para os manejos M1, M2 e M3, respectivamente (Figura 17a). Portanto, à medida que se aumentou o nível de compactação houve decréscimo linear no número de perfilhos.vaso⁻¹, atingindo no nível máximo ($d_s = 1,31 \text{ kg.dm}^{-3}$), uma redução de 23,8% sob o M1 e M2 e a 24% sob o M3, respectivamente.

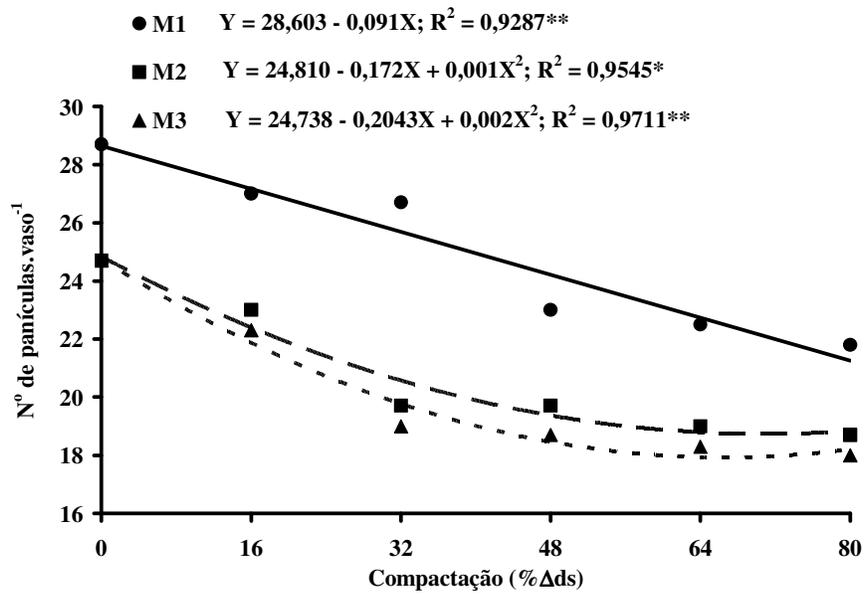


(a)

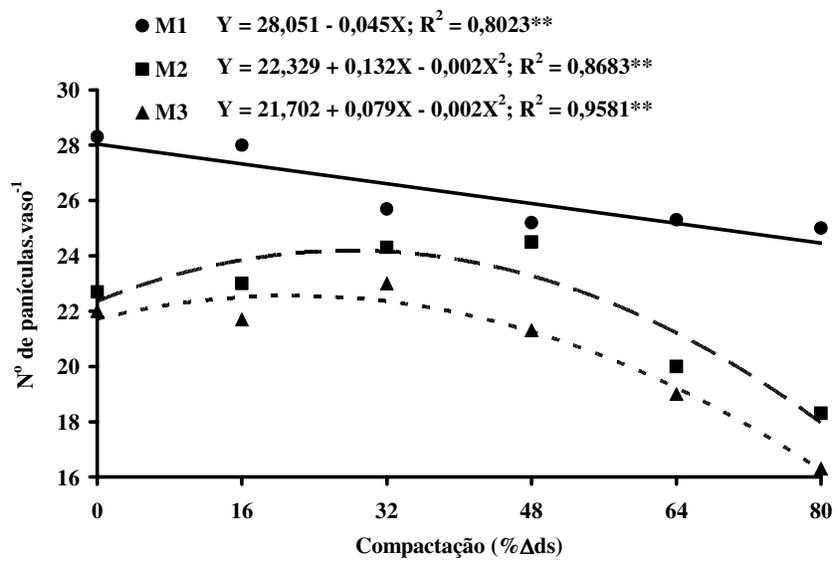


(b)

FIGURA 17 - Número de perfílos.vaso⁻¹ em função da compactação no Neossolo (a) e no Latossolo (b) sob diferentes manejos de água. UFLA, Lavras-MG, 2004.



(a)



(b)

FIGURA 18 - Número de panículas.vaso⁻¹, em função da compactação no Neossolo (a) e no Latossolo (b) sob diferentes manejos de água. UFLA, Lavras-MG, 2004.

Para o número de panículas no M1 (Figura 18a), houve ajuste a uma equação de regressão linear decrescente, reduzindo o número de panículas em 25,4% no último nível de compactação. Nos manejos M2 e M3, os dados apresentaram uma tendência de decréscimo, descrito por uma equação de regressão quadrática, diminuindo o número de panículas até o nível máximo de compactação, em 24,2% no M2 e 26,0% no M3. Essa redução no perfilhamento e no número de panículas, pode ser explicada pela redução da disponibilidade e absorção de N, P e K à medida que se elevaram os níveis de compactação, independentemente do manejo de água, como já abordado.

No Latossolo, à semelhança do observado no Neossolo, a compactação do solo também reduziu o perfilhamento e o número de panículas em todos os manejos de água, mas apresentou comportamento diferente entre os mesmos (Figuras 17b e 18b). No manejo M1 a compactação reduziu linearmente o número de perfilhos e de panículas com o aumento dos níveis de compactação em torno de 15%, no nível máximo. Os dados se ajustaram a um modelo de regressão linear, apresentando um coeficiente de determinação estimado em 95% e 80%, respectivamente. Nos manejos M2 e M3, houve ajuste a um modelo de regressão quadrática, com coeficientes de determinação que explicam 95% e 98%, para o número de perfilhos e 86% e 95% para o número de panículas, respectivamente. Houve um ligeiro aumento do número de perfilhos até os níveis de compactação de 6,0% e 8,5% da Δds , e do número de panículas até os níveis de compactação de 33% e 20% da Δds , respectivamente. A partir destes pontos, ocorreu uma redução de 24% e 28% no número de perfilhos e de 23,2% e 23,4% no número de panículas, respectivamente.

Esse aumento no número de perfilhos e de panículas com moderado nível de compactação sob o M2 e M3 deve-se, entre outros fatores, ao incremento da absorção de P (Figura 6b), propiciada pela maior disponibilidade de água nesse solo no nível de 32% da Δds (Tabela 2), favorecendo o

desenvolvimento do sistema radicular e da parte aérea das plantas, o perfilhamento e o número de panículas por vaso.

Portanto, fica claro que os efeitos dos níveis de compactação sobre o perfilhamento e o número de panículas do arroz variam em função do tipo de solo e do manejo de água adotado. No Neossolo, a cultura mostrou-se mais susceptível aos efeitos da compactação, reduzindo a emissão de perfilhos e de panículas, independentemente do manejo de água, enquanto no Latossolo, sob os manejos M2 e M3, um moderado nível de compactação foi benéfico para o aumento destas características, mantendo suas médias praticamente estáveis até o nível de 48% da Δds , correspondendo a $ds = 1,35 \text{ kg.dm}^{-3}$.

Assim, esses resultados evidenciam que, para o Latossolo cultivado com arroz de sequeiro em campo, se a reposição de água ocorre, quando consumidos de 25% a 30% ou de 50 a 60% da água disponível no solo, dependendo da frequência das precipitações pluviais, um moderado nível de compactação é benéfico para a cultura por propiciar maior disponibilidade de água no solo, e não afetar negativamente a absorção de fósforo, o perfilhamento e o número de panículas.

Os números de perfilhos e de panículas por vaso obtidos em função da interação entre manejos de água, dentro de cada nível de compactação x solos, encontram-se na Tabela 22, através da qual se verifica que o número de perfilhos e de panículas.vaso⁻¹ foram influenciados significativamente pelos regimes de água nos diferentes níveis de compactação em ambos os solos.

No Neossolo, o manejo M1 favoreceu o perfilhamento e o número de panículas em todos os níveis de compactação, cujas médias foram superiores às obtidas sob os outros dois manejos de água, os quais não diferiram estatisticamente entre si. Exceção ocorreu no nível de compactação de 80% da Δds ($ds = 1,31 \text{ kg.dm}^{-3}$), para os quais M1 e M2 foram estatisticamente

semelhantes. Isso mostra a importância de se manter o solo saturado por favorecer a maior disponibilidade e a absorção de nutrientes pelas plantas, como já discutido, incrementando o perfilhamento e o número de panículas, independentemente do nível de compactação.

Por outro lado, esses resultados evidenciam que a reposição da água quando eram consumidos de 25 a 30% e de 50 a 60% da água disponível causou algum desequilíbrio nutricional à planta durante as fases vegetativa e reprodutiva, provavelmente menor disponibilidade de N, reduzindo a eficiência fotossintética, o perfilhamento e o número de panículas por afetar negativamente a transformação das gemas vegetativas em reprodutivas (Crusciol et al., 1997a).

No Latossolo (Tabela 22), até o nível de compactação de 48% da Δds , não houve diferenças entre as médias do número de perfilhos obtidos sob os diferentes manejos de água, enquanto, nos níveis de compactação de 64% e 80% da Δds , a média do número de perfilhos, no manejo M1, foi significativamente maior em relação às obtidas no M2 e M3, cujos valores não diferiram entre si. Isso sugere que até o nível de compactação de 48% da Δds , no Latossolo, ao contrário do observado no Neossolo, os manejos de água não causaram estresse à planta durante a fase vegetativa o suficiente para afetar seu perfilhamento. Entretanto, nos níveis mais elevados de compactação, os manejos com reposição da água efetuada quando eram consumidos de 25% a 30% (M2) e de 50% a 60% da água disponível (M3) também reduziram o perfilhamento, sendo as causas já mencionadas.

TABELA 22 - Médias do número de perfilhos e de panículas por vaso obtidas em função da interação: manejo de água dentro dos níveis de compactação do Neossolo e do Latossolo. UFLA, Lavras-MG, 2004.

Compactação do solo (% Δds)	Manejos de água ¹	Número de perfilhos		Número de panículas	
		Neossolo	Latossolo	Neossolo	Latossolo
0	M1	28,3 a	29,3 a	28,2 a	28,3 a
	M2	25,0 b	28,7 a	24,7 b	22,7 b
	M3	25,0 b	27,6 a	24,7 b	22,0 b
16	M1	28,7 a	29,0 a	27,0 a	28,0 a
	M2	24,0 b	27,6 a	23,0 b	23,0 b
	M3	23,7 b	27,0 a	22,3 b	21,7 b
32	M1	27,3 a	27,3 a	26,7 a	25,7 a
	M2	22,7 b	27,0 a	19,7 b	24,3 ab
	M3	21,7 b	26,7 a	19,0 b	23,3 b
48	M1	24,0 a	26,0 a	23,0 a	25,2 a
	M2	20,7 b	26,8 a	19,7 b	24,5 a
	M3	21,7 b	25,3 a	18,3 b	21,3 b
64	M1	23,0 a	25,7 a	22,5 a	25,3 a
	M2	19,7 b	22,0 b	19,0 b	20,0 b
	M3	19,0 b	21,0 b	18,3 b	19,0 b
80	M1	22,7 a	25,0 a	21,9 a	25,0 a
	M2	20,0 ab	19,3 b	18,7 b	18,3 b
	M3	19,3 b	18,0 b	18,0 b	16,3 b

¹M1: solo 100% saturado com água; M2: irrigação quando eram consumidos de 25 a 30% da água disponível; M3: irrigação quando eram consumidos de 50 a 60% da água disponível. ²Médias seguidas pela mesma letra nas colunas não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Com relação ao número de panículas (Tabela 22), observa-se que nos níveis de compactação 0, 16, 64 e 80% da Δds , os resultados obtidos com o Neossolo e o Latossolo são semelhantes, ou seja, o M1 proporcionou o maior número de panículas.vaso⁻¹. Isso sugere que os manejos M2 e M3, para esses níveis de compactação, não atenderam adequadamente a demanda das plantas em água e nutrientes, durante a fase vegetativa e na diferenciação do primórdio floral. O estresse afetou negativamente a transformação das gemas vegetativas em reprodutiva, degenerando o primórdio da panícula e conseqüentemente a porcentagem dos colmos inférteis, que foram maiores no Latossolo do que no Neossolo.

Nos níveis de 32% e 48 % da Δds , no Latossolo, não houve diferenças no número de panículas obtidas no M1 e M2, cujos valores foram estatisticamente iguais e superiores aos do M3, à exceção do nível 32% da Δds , para o qual não houve diferenças entre as médias do M2 e M3 (24,3 e 23,3 panículas.vaso⁻¹), respectivamente.

Isso evidencia que sob os níveis de compactação de 32% e 48% da Δds , respectivamente, o manejo de água com reposição quando eram consumidos de 25 a 30% da água disponível (M2) supriu adequadamente a demanda hídrica da cultura, durante todo ciclo, favorecendo a absorção de nutrientes, a atividade fotossintética das plantas e, conseqüentemente, o número de panículas.vaso⁻¹. Outrossim, infere-se que nestas densidades, o manejo M3 não supriu satisfatoriamente a demanda hídrica e/ ou nutricional das plantas, principalmente durante a diferenciação do primórdio floral, limitando a diferenciação da gema vegetativa em reprodutiva; pode ter ocorrido uma degeneração do primórdio da panícula.

4.10 Número de grãos cheios por panícula

Os valores médios do número de grãos cheios por panícula obtidos sob os diferentes solos e manejos de água encontram-se na Tabela 23, e sob diferentes níveis de compactação, na Figura 19. Observa-se que não houve diferenças entre as médias do número de grãos cheios por panícula obtidos sob os dois tipos de solo, cujos valores ficaram dentro do esperado para o cultivar Liderança.

O manejo de água M2 favoreceu o número de grãos cheios por panícula, cuja média (168,2 grãos.panícula⁻¹) foi superior às obtidas sob os regimes M1 (159,3) e M3 (159,0 grãos.panícula⁻¹), os quais, por sua vez, não diferem entre si.

O menor número de grãos cheios por panícula no manejo M3 ocorreu, presumivelmente, devido à menor absorção de N, P e K, associado a uma possível ocorrência de déficit hídrico durante a fase reprodutiva, reduzindo o número de grãos formados por panículas. Yoshida (1975); Stone (1983); Oliveira (1995) e Crusciol (2001) também obtiveram redução do número de espiguetas formadas por panícula, causado por déficit hídrico ocorrido durante o estágio da diferenciação da panícula. Com relação ao manejo M1, não houve restrições quanto à disponibilidade de água, todavia, ocorreu redução no número de grãos por panícula. Isso pode ser atribuído ao maior número de panículas por vaso obtido nesse manejo. Assim, o menor número de grãos cheios por panícula é uma forma de compensação, conforme observado por Stone et al. (1990) e Medeiros et al. (1998).

TABELA 23 - Médias do número de grãos cheios por panícula obtidas sob diferentes solos e manejo de água. UFLA, Lavras-MG, 2004.

Solos	Grãos cheios por panícula ²
Neossolo	163,0 a
Latossolo	161,3 a
Manejos de água ¹	
M1	159,3 b
M2	168,2 a
M3	159,0 b

¹M1: solo 100% saturado com água; M2: irrigação quando eram consumidos de 25 a 30% da água disponível; M3: irrigação quando eram consumidos de 50 a 60% da água disponível. ² Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

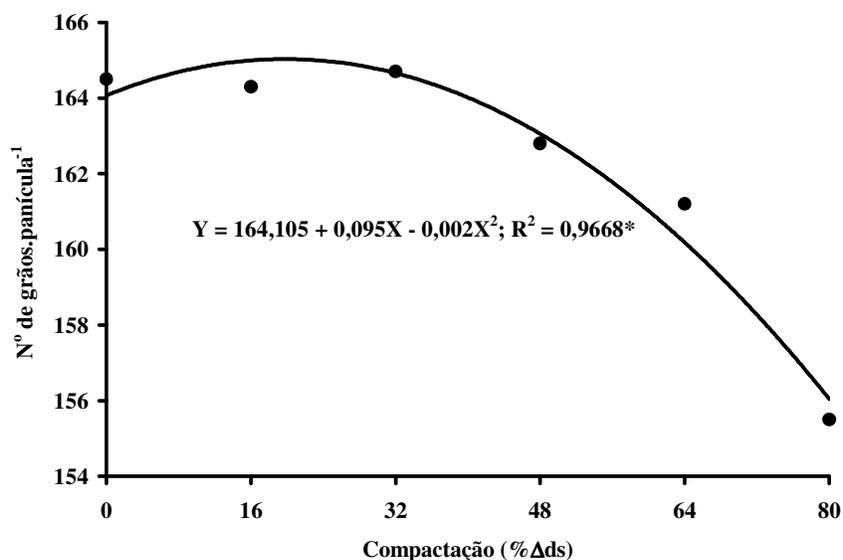
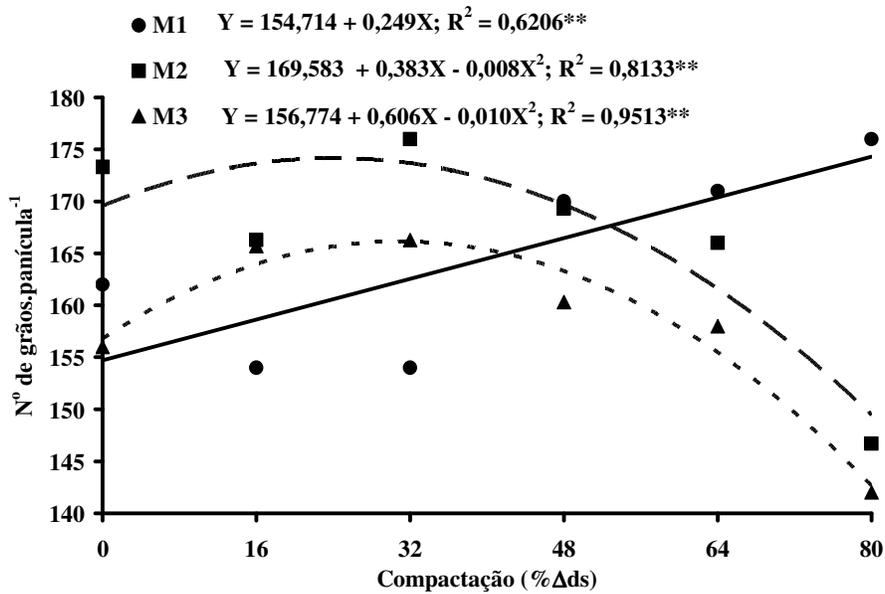


FIGURA 19 - Efeito dos níveis de compactação do solo sobre o número de grãos cheios. panícula⁻¹, considerando-se a média de dois solos sob três manejos de água. UFLA, Lavras-MG, 2004.

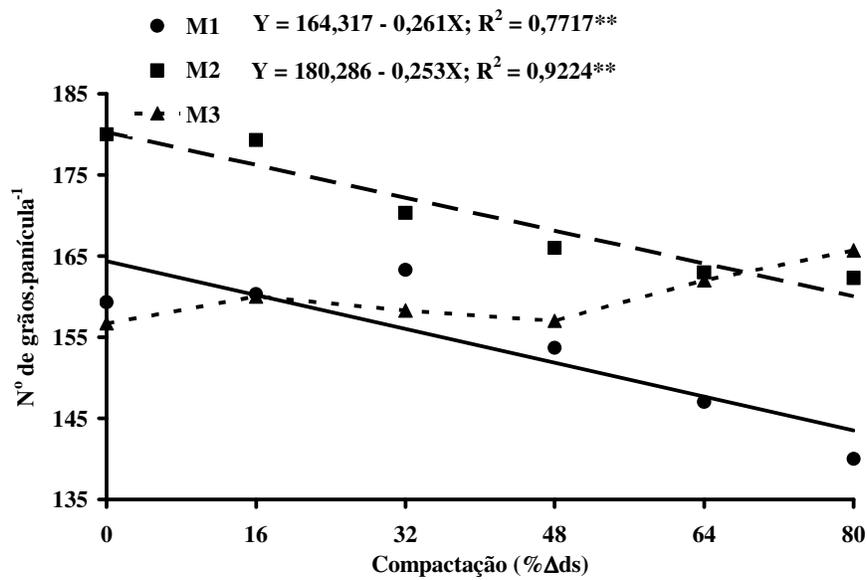
Com relação aos níveis de compactação, os mesmos afetaram o número de grãos cheios por panícula, cujas médias se ajustaram a um modelo de regressão quadrática com um ligeiro aumento, até o nível de compactação de 24% da Δds . A partir deste nível, o número de grãos cheios por panícula decresceu com a elevação dos níveis de compactação, atingindo cerca de 5% no nível máximo de compactação. Esse resultado foi semelhante ao constatado por Ribeiro et al. (2003), que também observaram redução no peso de panículas de arroz com o aumento da compactação, independentemente da classe de solo. Essa redução na fertilidade das espiguetas é explicada pela diminuição da disponibilidade de água e absorção dos nutrientes N, P e K, principalmente do N, cuja deficiência na fase reprodutiva afeta negativamente o número de grãos.panicula⁻¹.

Os números de grãos cheios.panicula⁻¹ em função dos efeitos da interação níveis de compactação dentro de solos x manejos de água estão apresentados nas Figuras 20a e 20b.

No Neossolo (Figura 20a), sob o M1, a compactação aumentou o número de grãos por panícula, cujos efeitos se ajustaram a um modelo de regressão linear crescente. Cada incremento de 10% na amplitude de variação da densidade do solo (Δds) correspondeu ao acréscimo de 2,49 grãos por panícula. Esse aumento está relacionado a um efeito de compensação, uma vez que a compactação reduziu o número de perfilhos e de panículas por vaso, considerando que não houve restrições de água e a mesma favoreceu a disponibilidade e a absorção de nutrientes.



(a)



(b)

FIGURA 20 - Número de grãos cheios por panículas em função da compactação dos solos: Neossolo (a) e Latossolo (b) sob diferentes manejos de água. UFLA, Lavras-MG, 2004.

Nos manejos M2 e M3, os valores se ajustaram a um modelo de regressão quadrática, apresentando coeficientes de determinação de 81,3% e 95,1%. A compactação aumentou o número de grãos cheios por panícula, até os níveis de 24% e 30% da Δds , atingindo o máximo de 174 e 166 grãos.panícula⁻¹ nos manejos M2 e M3, respectivamente. A partir destes níveis, o número de grãos por panícula diminuiu à medida que se aumentou a compactação, alcançando, no nível máximo, uma redução de cerca de 14,1% para ambos os manejos. Essa redução se deve a ocorrência de estresse hídrico com a redução da água disponível e à menor absorção de nutrientes à medida que se aumentou a densidade do solo, como já discutido.

No Latossolo, Figura 20b, tanto no M1 como no M2, a compactação afetou negativamente o número de grãos cheios por panícula. Em ambos os manejos, os valores se ajustaram a um modelo de regressão linear decrescente, apresentando coeficientes de determinação estimado em 77,2% no M1 e 92,2% no M2. Para cada 10% de incremento na Δds , houve uma redução de 2,61 e 2,53 grãos.panícula⁻¹ no M1 e M2, respectivamente. Entretanto, no manejo M3, em razão do comportamento irregular no número de grãos por panícula não foi possível ajustar um modelo de regressão que permitisse analisar esse comportamento. Portanto, a compactação do solo reduziu o número de grãos formados por panícula, indiferentemente de o solo manter-se saturado (M1) ou quando a reposição da água era efetuada após consumidos de 25% a 30% da água disponível. O resultado foi idêntico ao mostrado por Silveira et al. (2003), o qual pode ser atribuído às alterações nas características químicas e físico-hídricas do solo já discutidas.

O número de grãos cheios por panícula obtido em função do efeito do manejo de água dentro de cada nível de compactação para cada solo encontram-se na Tabela 24. No Neossolo, sem compactação, o M2 proporcionou a maior média (173,3 grãos cheios.panícula⁻¹), não diferindo do número (162,0

grão.panícula⁻¹) obtido sob o M1 o qual, por sua vez, foi estatisticamente igual ao do M3 (156,0 grão.panícula⁻¹). Nos níveis 16%, 48% e 64% da Δds , não houve diferenças estatísticas entre as médias dos três manejos de água sobre o número de grãos cheios.panícula⁻¹.

TABELA 24 - Médias do número de grãos cheios.panícula⁻¹ em função da interação: níveis de compactação x manejo de água no Neossolo e Latossolo. UFLA, Lavras-MG, 2004.

Compactação do solo (% Δds)	Manejos de água ¹	Número de grãos cheios.panícula ⁻¹	
		Neossolo	Latossolo
0	M1	162,0 ab ²	159,3 b
	M2	173,3 a	180,0 a
	M3	156,0 b	156,7 b
16	M1	154,0 a	160,3 b
	M2	166,3 a	179,3 a
	M3	165,7 a	160,0 b
32	M1	154,0 b	163,0 a
	M2	176,0 a	170,3 a
	M3	166,3 ab	158,3 a
48	M1	170,7 a	153,7 a
	M2	169,3 a	166,0 a
	M3	160,3 a	157,0 a
64	M1	171,0 a	147,0 b
	M2	166,0 a	163,0 a
	M3	158,0 a	162,0 ab
80	M1	176,3 a	140,0 b
	M2	146,7 b	162,3 a
	M3	142,0 b	165,7 a

¹M1: solo 100% saturado com água; M2: irrigação quando eram consumidos de 25 a 30% da água disponível; M3: irrigação quando eram consumidos de 50 a 60% da água disponível. ² Médias seguidas pela mesma letra nas colunas não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

No nível 32% da Δds , o M2 proporcionou a maior média (176,0 grãos), mas não diferiu do valor atingido sob o M3 (166,3), a qual, por sua vez, foi estatisticamente igual à do M1 (154,0 grãos.panicula⁻¹). Já no nível de 80% da Δds ($ds = 1,31 \text{ kg.dm}^{-3}$), o número de grãos cheios.panicula⁻¹ no M1 (176,3) superou em 24,5% o valor alcançado sob o M3 (142,0), o qual, por sua vez, não diferiu do M2 (146,7 grãos por panicula). Esse aumento no M1 se deve à ausência de estresse hídrico e à maior disponibilidade e absorção de nutrientes, proporcionada pela saturação do solo, em relação ao M2 e M3, os quais, no geral, apresentaram os menores teores de N, P e K na parte aérea das plantas, ocasionando, em algumas densidades a ocorrência de estresse hídrico durante a fase reprodutiva das plantas.

No Latossolo, nos níveis 0% e 16% da Δds , o M2 proporcionou o maior número de grãos cheios.panicula⁻¹ (180,0 e 179,3), superando em 14,8 % e 11,8 os valores do M3 (156,7 e 160,0), os quais, por sua vez, não diferiu dos obtidos sob o M1 (159,3 e 163,0), respectivamente. Nos níveis de compactação de 32% e 48% da Δds , não houve interferência dos manejos de água sobre o número de grãos por panicula, cujas médias não diferiram entre si. No nível 64% da Δds , o valor obtido no M1 (147,0 grãos.panicula⁻¹) foi 9,6% inferior ao do M2 (163,0 grãos.panicula⁻¹), o qual, por sua vez, não diferiu do M3 (162,0 grãos por panicula). Entretanto, no nível de 80% Δds ($ds = 1,50 \text{ kg.dm}^{-3}$), a média do M1 (140,0 grãos.panicula⁻¹) foi 15,1% inferior a do M3 (165,7), a qual, por sua vez, não diferiu do M2 (162,3 grãos.panicula⁻¹).

O menor número de grãos cheios.panicula⁻¹ observado no M1, justifica-se pelo elevado número de panículas por vaso proporcionado por esse manejo, pois normalmente à medida que se aumenta o número de panículas por área ocorre uma redução do número de grãos.panicula⁻¹. O mesmo foi observado por Stone et al. (1990) e Medeiros et al. (1998).

4.11 Esterilidade das espiguetas

As médias de esterilidade das espiguetas alcançadas sob os dois solos e três manejos de água encontram-se na Tabela 25, e sob diferentes níveis de compactação, na Figura 21. A esterilidade de grãos foi significativamente maior no Latossolo, diferindo em 1,7% dos valores obtidos no Neossolo, possivelmente devido ao maior número de panículas obtidas sob o Latossolo. Os manejos de água, por sua vez, não interferiram significativamente sobre o percentual de espiguetas estéreis, cujos valores obtidos entre os diferentes regimes de água foram estatisticamente iguais.

TABELA 25 - Médias de esterilidade de espiguetas (%) obtidas sob diferentes solos e manejos de água no solo. UFLA, Lavras-MG, 2004.

Solos	Esterilidade (%)²
Neossolo	6,9 b
Latossolo	8,6 a
Manejos de água¹	
M1	7,9 a
M2	7,6 a
M3	7.6 a

¹M1: solo 100% saturado com água; M2: irrigação quando eram consumidos de 25 a 30% da água disponível; M3: irrigação quando eram consumidos de 50 a 60% da água disponível. ²Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

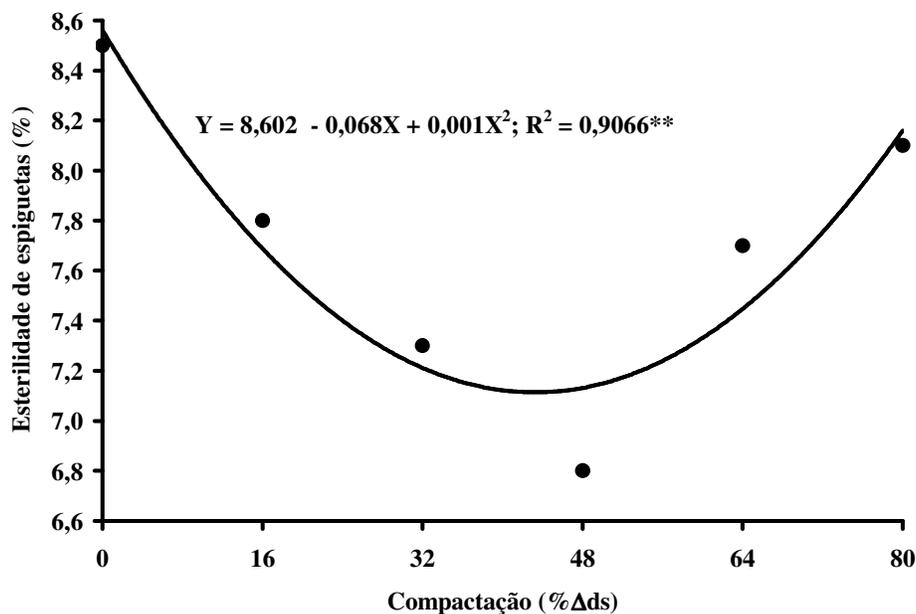
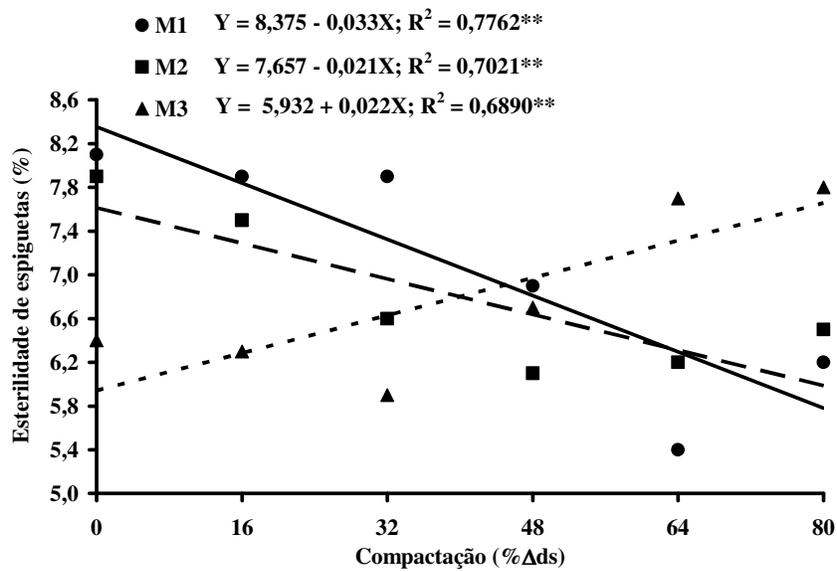


FIGURA 21 - Efeito dos níveis de compactação do solo sobre a esterilidade de espiguetas, considerando-se dois tipos de solo e três manejos de água. UFLA, Lavras-MG, 2004.

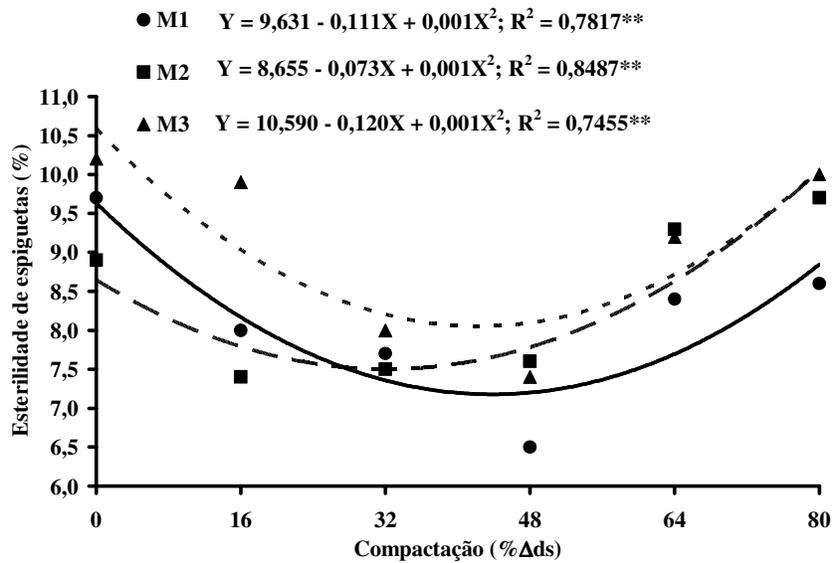
Pela Figura 21, constata-se que os níveis de compactação afetaram, significativamente a esterilidade de espiguetas. Os valores se ajustaram a um modelo de regressão quadrática, com coeficiente de determinação de 90,7%. Ocorreu redução da esterilidade das espiguetas com o aumento da compactação até o nível de 34% da Δds , atingindo a média mínima igual a 7,45%. A partir deste nível, a esterilidade se elevou à medida que houve aumento da compactação, certamente, devido as restrições na disponibilidade de água e de nutrientes ocorridas, nos níveis mais altos de compactação, durante o estágio reprodutivo da cultura. Por outro lado, o maior número de panículas nos menores níveis de compactação contribuiu para a maior esterilidade. À medida

que se aumentou a compactação até determinado nível, as panículas foram ficando menores e, como consequência, menos espiguetas estéreis. Todavia, altas compactações afetaram tanto o número de espiguetas (Figura 19) como a esterilidade.

As esterilidades de espiguetas, obtidas em função dos efeitos da interação níveis de compactação dentro de cada solo x manejos de água, encontram-se nas Figuras 22a e 22b. Pela Figura 22a, observa-se que, no Neossolo, os níveis de compactação afetaram distintamente o comportamento da esterilidade de espiguetas, dependendo do manejo da água. No M1 e M2, ocorreram decréscimos da esterilidade com o aumento dos níveis de compactação. Os valores de esterilidade se ajustaram a um modelo de regressão linear decrescente, com coeficientes de determinação estimados em 77,6% no M1 e 70,2% no M2, promovendo uma redução de 5,8% e 7,0% no M1 e M2, respectivamente. No M3, a esterilidade das espiguetas aumentou à medida que se elevaram os níveis de compactação, cujos valores se ajustaram a um modelo de regressão linear crescente com coeficiente de determinação estimado em 68,9%.



(a)



(b)

FIGURA 22 - Esterilidade de espiguetas (%) em função da compactação dos solos Neossolo (a) e Latossolo (b) sob diferentes manejos de água. UFLA, Lavras-MG, 2004.

A redução na esterilidade de espiguetas no M1 e no M2 deve-se a maior disponibilidade de água e de nutrientes, propiciada por esses manejos durante todo ciclo da cultura. O aumento da esterilidade das espiguetas verificado no M3 evidencia a ocorrência de estresse hídrico às plantas, durante a fase reprodutiva (na meiose ou na antese), agravando-se à medida que se elevaram os níveis de compactação. O aumento da esterilidade de espiguetas de arroz decorrente de déficit hídrico também foi observado por Stone (1983); Carvalho Junior (1987); Rodrigues (1998) e Crusciol (2001).

No Latossolo (Figura 22b), verifica-se que a compactação do solo interferiu de modo semelhante na porcentagem de espiguetas estéreis, independentemente do manejo da água. Os dados se ajustaram a modelos de regressão quadrática, com coeficientes de determinação estimados em 78,2%, 85,0% e 74,6%, respectivamente para M1, M2 e M3. A compactação do solo até os níveis de 55,5% da Δds no M1; 36,5% no M2 e 60% no M3 reduziu a esterilidade das espiguetas, atingindo os menores valores (6,6% sob o M1, 7,3% sob M2 e 7,0 sob o M3). A partir destes níveis, houve aumento da esterilidade à medida que se elevaram os níveis de compactação, a qual pode ser atribuída às restrições da disponibilidade de água e absorção de nutrientes, durante a fase reprodutiva da cultura, agravados nos níveis mais elevados de compactação.

As esterilidades de espiguetas obtidas em função do efeito dos manejos de água dentro de cada nível de compactação para os solos encontram-se na Tabela 26. No Neossolo, para alguns níveis de compactação (0%, 16% e 32% da Δds), a maior umidade tendeu a aumentar a esterilidade das espiguetas, enquanto, para outros (64% e 80% da Δds), ocorreu o contrário. Para o nível de 48% da Δds , os manejos de água não interferiram nessa característica

No Latossolo (Tabela 26), observa-se que nos níveis de compactação 0%, 32%, 48% e 64% da Δds , não houve interferência dos manejos de água

sobre a esterilidade das espiguetas, cujas médias não diferiram entre si. Já, no nível de compactação 16% da Δds , os manejos M1 e M2 proporcionaram menor esterilidade do que a obtida sob o M3. No nível 80% da Δds , o M3 incrementou, significativamente o percentual de espiguetas estéreis, mas não diferiu do valor atingido sob o M2, o qual, por sua vez, não diferiu do M1.

TABELA 26 - Médias da percentagem de espiguetas estéreis obtidas em função do manejo de água dentro de cada nível de compactação no Neossolo e no Latossolo. UFLA, Lavras-MG, 2004.

Compactação do solo (% Δds)	Manejos de água ¹	Esterilidade de espiguetas (%) ²	
		Neossolo	Latossolo
0	M1	8,1 a	9,7 a
	M2	7,9 a	8,9 a
	M3	6,4 b	10,2 a
16	M1	7,9 a	8,0 b
	M2	7,5 ab	7,4 b
	M3	6,3 b	9,9 a
32	M1	7,9 a	7,7 a
	M2	6,6 ab	7,5 a
	M3	5,9 b	8,0 a
48	M1	6,9 a	6,5 a
	M2	6,1 a	7,6 a
	M3	6,7 a	7,4 a
64	M1	5,4 b	8,4 a
	M2	6,2 b	9,3 a
	M3	7,7 a	9,2 a
80	M1	6,2 b	8,5 b
	M2	6,5 ab	9,7 ab
	M3	7,8 a	10,0 a

¹M1: solo 100% saturado com água; M2: irrigação quando eram consumidos de 25 a 30% da água disponível; M3: irrigação quando eram consumidos de 50 a 60% da água disponível.

²Médias seguidas pela mesma letra nas colunas não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Assim, de modo geral, a maior esterilidade de espiguetas obtida no solo com reposição de água efetuada quando eram consumidos de 50 a 60% da água disponível em ambos os solos deve-se, possivelmente, ao estresse hídrico proporcionado pelo M3 durante a fase reprodutiva da cultura, acarretando aumento do percentual de espiguetas estéreis. O mesmo foi também constatado por diversos pesquisadores (Stone, 1983; Carvalho Júnior, 1987; Rodrigues, 1998 e Crusciol, 2001).

4.12 Massa de 1000 grãos

Os resultados referentes à massa de 1000 grãos, obtidos sob os manejos de água e solos encontram-se na Tabela 27, e os provenientes dos efeitos dos níveis de compactação estão apresentados na Figura 23. Pela Tabela 27, verifica-se que não houve efeitos significativos dos solos nem dos manejos de água sobre a massa de 1000 grãos, tendo a mesma se mantido estável sob os diferentes solos e manejos de água. Resultados semelhantes foram obtidos por Jha et al. (1981), Barreto & Rojas (1987), Mascarenhas (1987) e Medeiros et al. (1997), que ao avaliarem o comportamento do arroz sob diferentes manejos de água, também não constataram diferenças na massa de 1000 grãos obtidas entre os manejos. A massa de 1000 grãos é uma característica varietal estável, pois é mais dependente do tamanho da casca do que qualquer outro fator (Yoshida, 1981).

TABELA 27 - Médias da massa de 1000 grãos obtidas sob diferentes tipos de solo, níveis de compactação e manejos de água. UFLA, Lavras-MG, 2004.

Solos	Massa de 1000 grãos (g)
Neossolo	25,2
Latossolo	25,1
Manejos de água ¹	
M1	25,2
M2	25,1
M3	25,1

¹M1: solo 100% saturado com água; M2: irrigação quando eram consumidos de 25 a 30% da água disponível; M3: irrigação quando eram consumidos de 50 a 60% da água disponível.

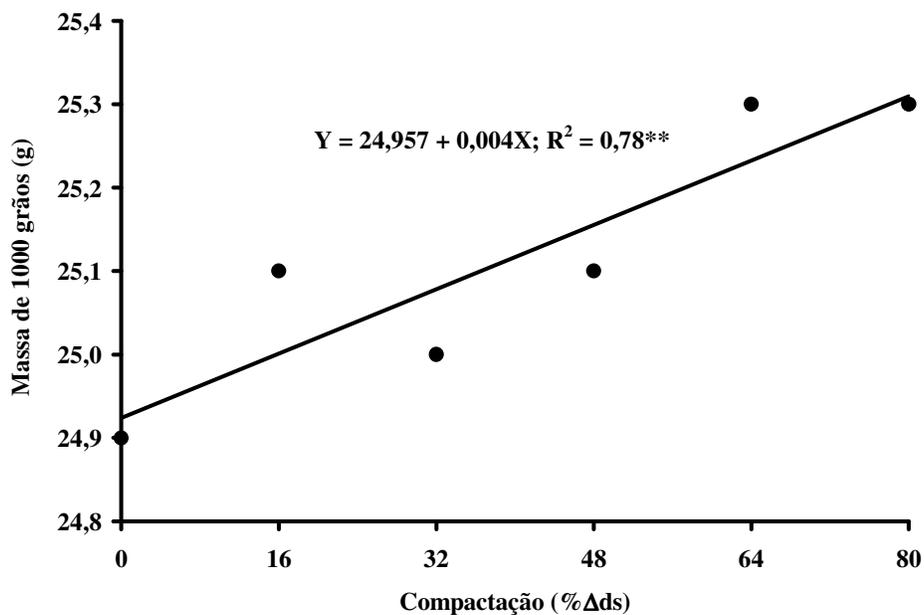


FIGURA 23 - Efeito dos níveis de compactação do solo sobre a massa de 1000 grãos, considerando-se dois tipos de solo e três manejos de água. UFLA, Lavras-MG, 2004.

Entretanto, pela Figura 23, observa-se aumento no peso de 1000 grãos à medida que se elevou o nível de compactação. O mesmo se ajustou a um modelo de regressão linear crescente, com coeficiente de determinação estimado em 78,0%. Este acréscimo pode estar relacionado à redução do número de panículas por vaso, associado à redução do número de grãos formados por panícula, com o aumento da compactação. Assim, a diminuição do tamanho do dreno receptor dos assimilados favoreceu a massa de 1000 grãos, cuja amplitude de aumento foi de 0,32 g. Pois, conforme Yoshida (1981), embora a massa de 1000 grãos seja considerado uma característica varietal muito estável, a mesma pode apresentar pequenas variações em função do tamanho da casca que limita o tamanho do grão e é muito afetado pela atividade fotossintética da planta durante os 14 dias que antecedem o florescimento.

4.13 Produtividade de grãos

Os resultados das médias de produtividade de grãos (g.vaso^{-1}) obtidos no Neossolo e Latossolo, utilizando três manejos de água, são apresentados na Tabela 28, e os alcançados em função dos seis níveis de compactação são mostrados na Figura 24.

O Latossolo foi mais favorável à produtividade de grãos ($92,1 \text{ g.vaso}^{-1}$) do que o Neossolo ($89,4 \text{ g.vaso}^{-1}$), superando-o em 3,0%. Essa diferença de produtividade de grãos no Latossolo, embora seja pequena, deve-se à maior disponibilidade e absorção de nutrientes pelas plantas cultivadas nesse solo, proporcionando o incremento na altura de plantas, massa seca da parte aérea e número de panículas.vaso⁻¹. Contudo, em condições de campo, admite-se que o Neossolo proporcione produtividade de grãos superior ao do Latossolo, devido a maior CTC e a maior disponibilidade de água nas várzeas, com lençol freático raso, com possibilidade de manter-se saturado durante a maior parte do ciclo da

cultura. O Latossolo, por sua vez, encontra-se em condições de terras altas, onde o solo é bem drenado, a disponibilidade de água para as plantas depende apenas da quantidade e freqüência das precipitações pluviais e, portanto, está vulnerável à ocorrência de veranicos, causando déficit hídrico à cultura, o que, conseqüentemente, afeta negativamente a produtividade de grãos.

TABELA 28 - Médias da produtividade de grãos (g.vaso⁻¹) obtidas sob diferentes tipos de solo e manejos de água. UFPA, Lavras-MG, 2004.

Solos	Produtividade de grãos (g.vaso⁻¹)²
Neossolo	89,4 b
Latossolo	92,1 a
Manejo de água¹	
M1	101,6 a
M2	91,4 b
M3	79,4 c

¹M1: solo 100% saturado com água; M2: irrigação quando eram consumidos de 25 a 30% da água disponível; M3: irrigação quando eram consumidos de 50 a 60% da água disponível. ²Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Sobre os efeitos dos manejos de água na produtividade de grãos (Tabela 28), verifica-se que houve diferenças significativas entre as médias proporcionadas pelos diferentes manejos. Com o solo saturado (M1), a produtividade de grãos (101,6 g.vaso⁻¹) foi 11,2% superior a obtida sob o M2 (91,4 g.vaso⁻¹), e este, por sua vez, superou em 15,4 % a média alcançada sob o M3 (79,4 g.vaso⁻¹). A maior produtividade de grãos obtida nos manejos com maior disponibilidade de água no solo justifica-se pelo incremento do número de

panículas.vaso⁻¹, cuja média do M1 (25,6) superou em 19,6% a do M2 (21,4) e em 25,5% a do M3 (20,4), considerando que não houve diferenças no peso de 1000 grãos, embora o número de grão cheios por panícula no M2 (168,2) tenha superado em 5,6% as médias do M1(159,3) e 5,8% a do M3 (159,0), respectivamente.

Esse resultado corrobora os obtidos por Stone (1983); Barreto & Rojas (1987); Loeb et al. (1987); Rodrigues (1998); Crusciol (2001) e Sorato et al. (2002), que constataram aumento da produtividade de arroz com a maior disponibilidade de água no solo. Entretanto, divergem dos obtidos por Del Giudice (1974) e Coelho et al. (1977), que mostram maior produtividade de grãos de arroz com a reposição da água realizada após terem sido consumidos cerca de 30% da água disponível.

A Figura 24 mostra o efeito de seis níveis de compactação sobre a produtividade de grãos de arroz, cujos valores apresentaram tendência de decréscimo descrito por uma equação de regressão quadrática ($R^2 = 99,7\%$). Os resultados são incontestáveis, ou seja, quanto maior for a compactação, maior será a redução da produtividade de grãos. Essa redução variou de 102,0 g.vaso⁻¹ no nível zero de compactação a 75,9 g.vaso⁻¹ no nível máximo de compactação (80% da Δds), correspondendo a uma redução de 25,6%. A compactação promoveu uma menor disponibilidade de água e absorção de nutrientes, reduzindo, principalmente, o número de panículas por vaso e o número de grãos cheios por panícula.

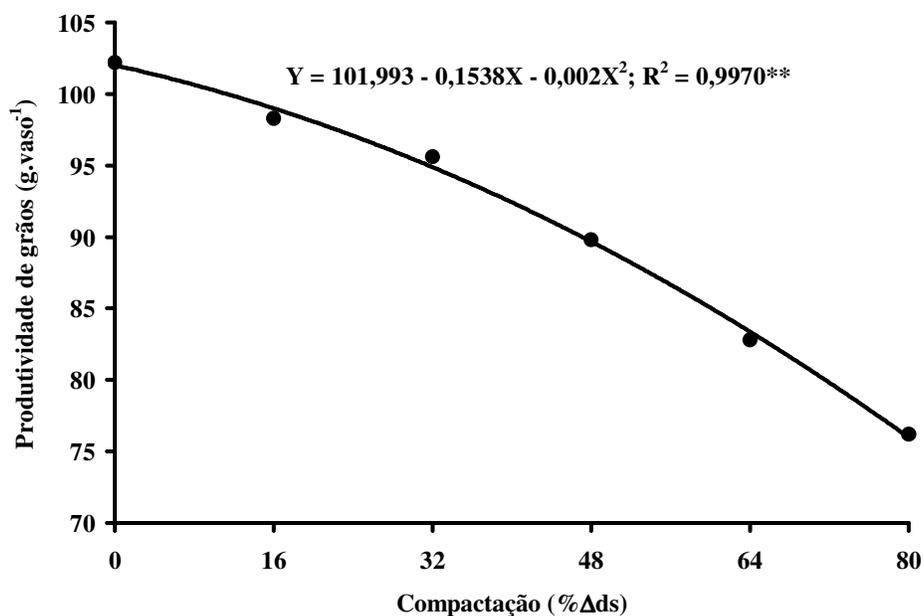
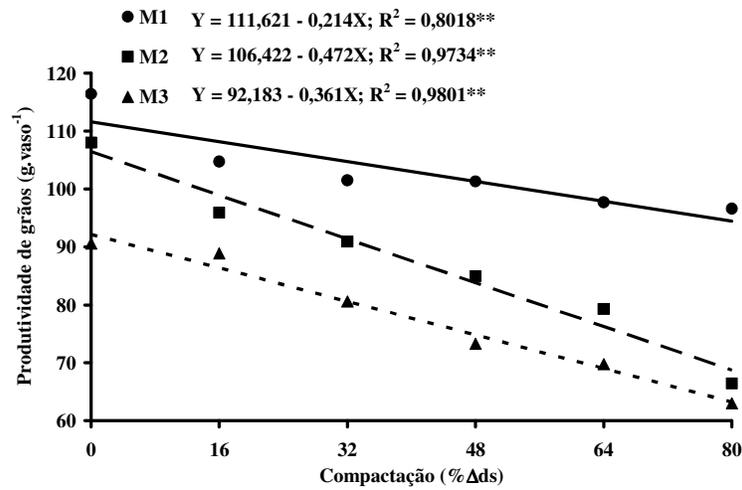


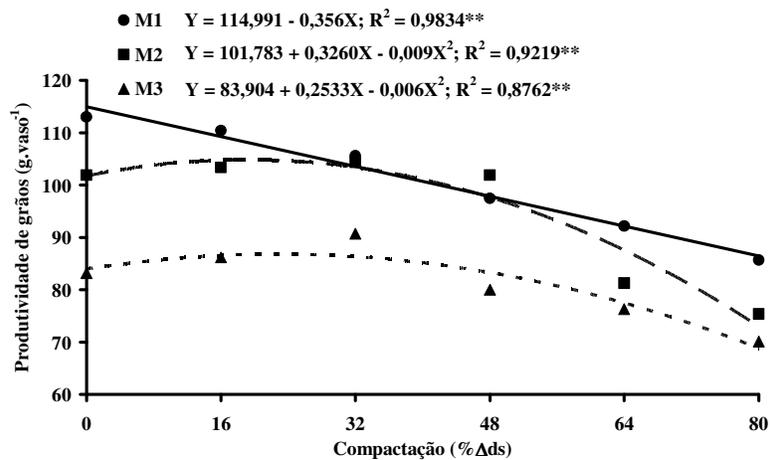
FIGURA 24 - Efeito dos níveis de compactação do solo sobre a produtividade de grãos de arroz, considerando-se dois tipos de solo e três manejos de água. UFLA, Lavras-MG, 2004.

Resultado semelhante foi obtido por Ribeiro et al. (2003), os quais também obtiveram redução na produtividade de grãos de arroz com a compactação do solo devido à redução do peso das panículas em três classes de Latossolos. O mesmo foi observado por Kaiser et al. (2003) com a cultura do feijoeiro sob plantio direto, em que o estado de compactação imposto por duas e quatro passadas adicionais de máquinas de 10 t reduziu a produtividade de grãos em 42% e 62%, respectivamente, comparado ao tratamento sem compactação adicional. Contudo, não houve diferenças na produtividade de grãos, obtida com o plantio direto sem compactação adicional e com a escarificação do solo (Santi et al., 2003).

Os resultados referentes aos efeitos da interação níveis de compactação dentro de cada solo x manejos de água sobre a produtividade de grãos (g.vaso^{-1}) estão apresentados nas Figuras 25a e 25b.



(a)



(b)

FIGURA 25 - Produtividade de grãos obtida em função de seis níveis de compactação dentro de três manejos de água em dois solos: Neossolo (a) e Latossolo (b). UFLA, Lavras-MG, 2004.

Pela Figura 25a, observa-se que, no Neossolo, para todos os manejos de água, a produtividade de grãos reduziu com o aumento da compactação. Portanto, houve uma associação inversa entre os níveis de compactação e a produtividade de grãos. Os efeitos da compactação sobre a produtividade de grãos se ajustaram a um modelo de regressão linear decrescente, apresentando coeficientes de determinação estimados em 80,2%, 97,3% e 98,0% para os manejos M1, M2 e M3, respectivamente. Assim, para cada aumento de um por cento de variação na amplitude da densidade do solo, ocorreu uma redução na produtividade de grãos de 0,214 g vaso⁻¹ no M1, 0,472 g. vaso⁻¹ no M2 e 0,361 g. vaso⁻¹ no M3.

Considerando o nível de compactação de 24% da Δds , que corresponde a uma $ds = 1,17 \text{ kg.dm}^{-3}$, ou seja, à densidade do Neossolo semelhante a que ocorre no campo sob o plantio direto, ocorreria uma redução na produtividade de grãos de 4,6% no M1, 10,6% no M2 e 9,4% sob o M3, respectivamente. Essa redução deve-se, dentre outros fatores, à diminuição do número de panículas.vaso⁻¹, pois foi o componente de produção mais afetado pelos níveis de compactação. Por outro lado, a menor variação na produtividade de grãos, entre os diversos níveis de compactação proporcionada pelo M1, justifica-se pelas menores restrições na disponibilidade e absorção de nutrientes, devido ao maior desenvolvimento do sistema radicular, atenuando a redução do número de panículas.vaso⁻¹, pelo incremento do número de grãos cheios.panícula⁻¹, a massa de 1000 grãos e pela redução da esterilidade de espiguetas.

Portanto, isso indica que, para o sistema do arroz irrigado por inundação e/ ou com o solo saturado, a compactação do solo tem menor influência sobre a produtividade de grãos. Esse resultado corrobora com os obtidos por Gomes et al. (1998); Weber et al. (1999) e Macedo et al. (1999), que não constataram diferenças significativas na produtividade de grãos de arroz no sistema de preparo do solo convencional e em plantio direto. Por outro lado, Dias et al.

(1995) e Verneti Júnior (1995) obtiveram aumento na produtividade de grãos no plantio direto em relação ao convencional.

No Latossolo (Figura 25b), à semelhança do observado no Neossolo, a compactação do solo também reduziu a produtividade de grãos para todos os manejos de água, mas apresentou comportamento diferente entre os mesmos. No manejo M1, a compactação reduziu linearmente a produtividade de grãos com a elevação dos níveis de compactação, chegando a 24,8% no nível máximo. Os dados se ajustaram a um modelo de regressão linear, apresentando um coeficiente de determinação estimado em 98,3%.

Nos manejos M2 e M3, houve ajuste ao modelo de regressão quadrática, com coeficientes de determinação estimados em 92,2% e 87,6%, respectivamente. Nesses dois manejos, houve aumento da produtividade de grãos com a elevação da compactação até os níveis de 18% e 21% da Δds , respectivamente, alcançando-se a máxima de 104,4 g.vaso⁻¹ com o M2 e 86,6 g.vaso⁻¹ com o M3. A partir deste ponto, as produtividades diminuíram à medida que se aumentou a compactação, atingindo na compactação máxima ($ds = 1,50 \text{ kg.dm}^{-3}$), uma redução de 24,8% no M2 e 18,1% sob o M3, respectivamente, em relação às médias de produtividade de grãos por vaso, obtidas no solo não compactado ($ds = 1,13 \text{ kg.dm}^{-3}$).

Assim, para esse solo, sob os manejos com reposição de água no solo, quando eram consumidos de 25 a 30% e de 50 a 60% de água disponível (M2 e M3), respectivamente, um moderado nível de compactação favoreceu a produtividade de grãos, com uma variação relativamente pequena até o nível de 48% da Δds ($ds = 1,35 \text{ kg.dm}^{-3}$), correspondendo à densidade média do solo observada no campo ($1,36 \text{ kg.dm}^{-3}$). Isso ocorreu devido, entre outros fatores, ao incremento na absorção de fósforo e ao aumento do número de panículas por vaso, além da redução na esterilidade de grãos. Esse resultado corrobora, em

parte, os obtidos por Cruz (1989), que também mostram aumento da produtividade de grãos de arroz de 5,18 t. ha⁻¹ para 7,93 t. ha⁻¹ no experimento que recebeu pressão de compactação de 2,4 kg.cm⁻² e de 5,83 t. ha⁻¹ para 6,8 t. ha⁻¹, no experimento em que a pressão de compactação foi de 4,0 kg.cm⁻², devido o acréscimo do número de panículas.m⁻² e no peso de 1000 grãos.

Entretanto, considerando o nível de compactação de 48% da Δ ds, correspondendo à densidade 1,35 kg.dm⁻³, a qual possivelmente se aproxima da densidade do solo sob plantio direto, a produtividade relativa de grãos em relação à obtida no nível zero de compactação, estimada pelas equações de regressão, seria de 85,2% no M1; 95,8% no M2 e de 99,0% sob o M3, respectivamente, correspondendo a uma redução de 14,8% no M1, de apenas 4,2% no M2 e de 1,0% no M3.

Assim, esse resultado discorda do ponto de vista de Seguy et al. (1989), citado por Kluthcouski et al. (2002), os quais afirmam que o arroz de terras altas é pouco adaptado ao sistema de plantio direto devido a sua sensibilidade à qualidade do perfil do solo, em quaisquer que sejam as condições climáticas, com base no pressuposto de que a macroporosidade do solo seja um fator imprescindível para o desenvolvimento e a produtividade de grãos do arroz de sequeiro (Kluthcouski, 1998); porém está de acordo com os resultados relatados por Olofintoye (1998); Ogunremi et al. (1986); Moura Neto (2001); Stone et al. (2002b) e Arf et al. (2003), que não constataram diferenças nas produtividades de grãos do arroz de terras altas obtidas entre os sistemas de plantio direto e, ou com o preparo convencional. Bauer & Black (1992) salientam que, não havendo déficit hídrico, o adensamento superficial do solo não se evidencia, proporcionando boas produtividades de grãos.

Considerando-se que o Latossolo representa a grande maioria dos solos onde se cultiva arroz de terras altas no país e que a umidade do solo

predominante nesse sistema oscila entre os manejos M2 e M3, pode-se inferir que uma moderada compactação é benéfica ao cultivo de arroz de terras altas. Assim, a compactação que é a causa, até hoje, atribuída ao insucesso da prática do plantio direto, não é totalmente verdadeira, a não ser nos casos extremos de compactação, que dificilmente ocorre em nível de campo. A Figura 25b evidencia claramente o benefício de uma moderada compactação sobre a produtividade de grãos. Os efeitos indiretos da compactação do solo, limitando a aeração, e por conseguinte, a mineralização da matéria orgânica, reduzindo sobretudo a disponibilidade de N, certamente é a principal causa do insucesso do plantio direto no arroz de terras altas. Portanto, as evidências desse trabalho abrem caminho para a utilização do sistema de plantio direto no cultivo do arroz de terras altas.

Com relação aos efeitos sobre a produtividade de grãos da interação entre manejos de água dentro de cada nível de compactação x solos (Tabela 29), verifica-se que as mesmas foram influenciadas significativamente pelos manejos de água, dependendo do nível de compactação e do tipo de solo.

No Neossolo, sem compactação ($d_s = 1,11 \text{ kg.dm}^{-3}$), não houve diferenças nas produtividades obtidas sob o M1 e M2, que foram significativamente superiores às do M3. No nível de 48 % da Δd_s ($d_s = 1,23 \text{ kg.dm}^{-3}$), as maiores produtividades foram obtidas, em ordem decrescente, pelos M1, M2 e M3, em que o M1 superou em 16,2% e 27,5% as médias atingidas pelos regimes M2 e M3, respectivamente. Nos demais níveis de compactação, os resultados foram idênticos, destacando-se as médias alcançadas sob o M1, que foram significativamente superiores às obtidas sob os demais manejos, os quais, por sua vez, não diferiram entre si.

TABELA 29 - Médias da produtividade de grãos (g.vaso⁻¹) obtidas em função da interação: manejo de água dentro de cada nível de densidade envolvendo dois solos (Neossolo e Latossolo). UFLA, Lavras-MG, 2004.

Compactação do solo (% Δds)	Manejos de água ¹	Produtividade de grãos (g.vaso ⁻¹) ²	
		Neossolo	Latossolo
0	M1	116,4 a	113,1 a
	M2	108,0 a	101,9 b
	M3	90,5 b	83,2 c
16	M1	104,7 a	110,4 a
	M2	95,9 ab	103,4 a
	M3	88,9 b	86,2 b
32	M1	101,5 a	105,6 a
	M2	90,9 b	104,3 a
	M3	80,6 b	90,7 b
48	M1	101,3 a	97,5 a
	M2	84,9 b	101,9 a
	M3	73,4 c	80,0 b
64	M1	97,7 a	92,2 a
	M2	79,3 b	81,4 b
	M3	69,8 b	76,4 b
80	M1	96,6 a	85,8 a
	M2	66,3 b	75,4 b
	M3	63,0 b	70,1 b

¹M1: solo 100% saturado com água; M2: irrigação quando eram consumidos de 25 a 30% da água disponível; M3: irrigação quando eram consumidos de 50 a 60% da água disponível. ²Médias seguidas pela mesma letra nas colunas, em cada nível de compactação, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

O acréscimo da produtividade de grãos obtido com a maior quantidade de água no solo, justifica-se pelo aumento da disponibilidade e absorção de nutrientes pelas plantas, maiores eficiência fotossintética, desenvolvimento do sistema radicular e da parte aérea das plantas, resultando no maior número de panículas por vaso, independentemente do nível de compactação, bem como do número de grãos por panícula, nos níveis mais elevados de compactação. Resultados semelhantes foram obtidos por diversos pesquisadores (Stone, 1983; Barreto & Rojas, 1987; Loeb et al., 1987; Rodrigues, 1998; Crusciol, 2001; Rodrigues & ARF, 2002b e Sorato et al., 2002).

No Latossolo, sem compactação ($ds = 1,13 \text{ kg.dm}^{-3}$), os maiores valores foram obtidos em ordem decrescente pelos M1, M2 e M3, cuja média do M1 superou em 9,9% e 26,4% às alcançadas com os regimes M2 e M3, respectivamente. Isso se deve ao maior número de panículas por vaso obtidas no M1 (28,3), contra 22,7 no M2 e 22,0 no M3, respectivamente. O maior número de grãos cheios por panícula observado no M2 em relação ao M3 também contribuiu para favorecer a produtividade de grãos nesse manejo.

Nos níveis de compactação de 16%, 32% e 48% da Δds ($ds = 1,20, 1,28$ e $1,35 \text{ kg.dm}^{-3}$, respectivamente) não houve diferenças entre as médias obtidas sob M1 e M2 e ambas foram significativamente superiores às do M3. Portanto, nessas três densidades, o manejo com reposição da água efetuado quando consumido de 25 a 30% da água disponível (M2), supriu adequadamente a demanda da cultura, proporcionando incremento da absorção de N e P pelas plantas, aumento da massa seca da parte aérea das plantas e do número de panícula.vaso⁻¹, o que resultou na produtividade de grãos semelhante à obtida com o solo saturado. Entretanto, a menor produtividade obtida no M3 pode ser atribuída ao déficit hídrico durante a fase reprodutiva, reduzindo a absorção de nutrientes e o número de panículas.vaso⁻¹. Portanto, para esses níveis de compactação, os resultados corroboram com os de Del Giudice et al. (1974);

Coelho et al. (1977) e Stone et al. (1997), os quais também obtiveram maiores produtividade de grãos de arroz de terras altas, quando o teor mínimo de água situa-se acima de 70% de sua capacidade de água disponível para as plantas.

Nos níveis de compactação de 64 e 80% da Δds ($ds = 1,42$ e $1,50$ $kg.dm^{-3}$, respectivamente), os resultados foram semelhantes, destacando-se as médias obtidas sob o M1, que superaram significativamente às alcançadas sob os demais manejos, as quais não diferiram entre si devido às causas já discutidas. Contudo, essa redução na produtividade de grãos, observada sob os manejos M2 e M3, justifica-se pelas restrições da disponibilidade de água e nutrientes, pelo aumento da resistência à penetração de raízes, à medida que se reduz o teor de água no solo, resultando em menor absorção de nutrientes, principalmente de N e P, baixa eficiência da atividade fotossintética e diminuição do número de panículas.vaso⁻¹. Redução na produtividade de arroz devido à baixa disponibilidade de água no solo tem sido relatado por diversos pesquisadores (Tsutsui, 1972; Del Giudice et al., 1974; Stone, 1983; Yoshida, 1975; Carvalho Júnior, 1987; Oliveira, 1995; Rodrigues, 1998 e Crusciol, 2001). As causas da redução na produção de grãos deve-se aos efeitos adversos do estresse hídrico no solo sobre os componentes de produção, como já foi discutido.

4.14 Considerações finais

Trabalhos de pesquisa dessa natureza são muito complexos, sobretudo quando são realizados em vasos na casa de vegetação. São muitas as variáveis que interferem direta e indiretamente nos resultados, e em alguns casos, reduzem a coerência dos dados. Apesar dessas dificuldades, acredita-se que os resultados obtidos nesse trabalho sejam de grande importância para desmistificar a principal causa atribuída ao insucesso do plantio direto (PD) do arroz de terras

altas, que é a compactação do solo, por inibir o desenvolvimento do sistema radicular.

Ficou evidente que a compactação excessiva é prejudicial ao desenvolvimento das plantas, entretanto, compactações brandas, em determinados manejos de água, são até benéficas. Por isso recomenda-se antes de iniciar o PD, que se faça a descompactação do solo. Os resultados obtidos mostram também que em arroz irrigado por inundação, ou mesmo em várzea úmida (solo saturado), a compactação é menos prejudicial à produção de grãos. Aliás, o PD já está sendo utilizado em grande escala no Rio Grande do Sul, sob essa modalidade de cultivo.

Esse trabalho mostrou que a compactação *per si* não é barreira para se utilizar o sistema de plantio direto para o arroz de terras altas, principalmente se considerar que a compactação de um solo cultivado, em geral não é tão alta como a utilizada. No caso específico desse trabalho, na área do Neossolo onde se coletaram as amostras para análise, a densidade do solo foi de apenas 1,17 kg.dm⁻³, correspondendo a 24% da Δds , a qual contribuiu para a redução média na produtividade de grãos de apenas 9,4%, considerando os três manejos de água. Deve-se considerar que esse solo já vinha sendo cultivado há vários anos através de aração e gradagem, configurando o que os agricultores chamam de “terra cansada”, o que não é próprio para o arroz, uma vez que o mesmo tem preferência por “terra nova ou descansada”.

No caso do Latossolo, que representa a maior área dos solos em que se cultiva arroz de terras altas no Brasil, as amostras foram coletadas em uma área sob cultivo de milho há vários anos consecutivos, utilizando no preparo do solo aração e gradagem antes da semeadura. Na entressafra, a área era utilizada para pastejo de gado bovino, contribuindo acentuadamente para compactação do solo.

A densidade do solo indeformado, no caso do Latossolo, foi de 1,36 kg.dm⁻³, correspondendo a aproximadamente 48% da Δds . Para esse nível de compactação a redução média na produtividade de grãos foi 7,3% em relação ao solo solto desestruturado. Contudo, se forem considerados apenas o M2 e o M3, que mais se aproximam das condições de sequeiro, a redução na produtividade de grãos foi de 5% e 2%, respectivamente. Esse resultado comprova mais uma vez que a compactação *per si* não limita o uso do PD em arroz de terras altas. Cabe ressaltar que se esse solo tivesse sido descompactado para adotar o PD e essa prática já viesse sendo adotada a alguns anos, possivelmente seu nível de compactação ficaria bem abaixo dos 48% da Δds e a diferença de produtividade de grãos em relação ao solo solto teria sido ainda menor.

O teor de N no solo certamente foi o fator que mais influenciou os componentes de produção, principalmente o perfilhamento e, por conseguinte, o número de panículas por vaso. Além do mais, o N é o elemento que mais favorece o desenvolvimento vegetativo das plantas, contribuindo, assim, para incrementar a absorção de outros nutrientes do solo. Portanto, fica difícil concluir se a menor absorção de P e K, com o aumento dos níveis de compactação, é função dessa ou do menor desenvolvimento vegetativo das plantas.

A disponibilidade de N no solo é função principalmente da adubação realizada e das reservas do solo. A quantidade de N aplicada na adubação foi idêntica para todos os tratamentos e as reservas do solo também foram semelhantes, uma vez que se utilizou o mesmo volume para cada solo. Dessa forma, pode-se inferir que os três manejos de água e os diferentes níveis de compactação é que determinaram a maior ou menor disponibilidade de N para o arroz.

O solo saturado reduz a mineralização da matéria orgânica (M.O.) e por consequência, a disponibilidade de N. Por outro lado, evita perdas por desnitrificação. Nos manejos que proporcionaram aeração do solo (M2 e M3), certamente, ocorreu maior mineralização da M.O., mas, ao mesmo tempo, propiciou a desnitrificação e perdas de N. A compactação também interfere na mineralização da M.O. e na desnitrificação através da maior ou menor aeração. Portanto, a combinação de fatores , que proporcionou maior disponibilidade de N para o arroz, foi a que mais influenciou as características avaliadas, sobretudo a produtividade de grãos.

A disponibilidade de P também é fortemente influenciada pelo manejo de água. No solo saturado, ocorre elevação natural do pH e dissociação de fosfato de ferro, entre outros, aumentando a taxa de difusão e sua disponibilidade na solução do solo. Entretanto, o maior teor de P observado na parte aérea das plantas cultivadas sob o M1 pode ser devido a sua maior disponibilidade ou ao maior desenvolvimento vegetativo proporcionado pelo N ou pela combinação de ambos.

O potássio foi o elemento que menos influenciou as características avaliadas, uma vez que não ocorreu lixiviação, e também por sua disponibilidade ser a menos afetada pelo manejo de água.

Em suma, o N é, provavelmente, o fator mais determinante do sucesso ou insucesso do sistema de plantio direto (SPD) do arroz. O aumento do teor de M.O. no solo, através de sucessivos cultivos no SPD, poderá ser fundamental para o cultivo sustentável do arroz de terras altas.

Outra especulação que pode ser feita é com relação ao prejuízo indireto da compactação sobre a disponibilidade de N e a produtividade de grãos. Se for levado em consideração que na média dos dois solos, no nível máximo de compactação (80% da Δds), a redução do teor de N na massa seca da parte aérea

das plantas foi de 38,2% e o da produtividade de grãos, de 25,6%, o efeito direto da compactação não é tão grave como se apregoa, mesmo porque, em nível de campo, esse nível de compactação dificilmente poderá ser atingido. Nesse contexto, pode-se supor que os efeitos indiretos da compactação sobre a disponibilidade de água e dos nutrientes, sobretudo do N, são mais limitantes à obtenção de altas produtividades do que a barreira física propriamente dita. Assim, pode-se inferir que quanto mais compactado for o solo, maior será a dependência de fertilizantes para se alcançarem altas produtividades, uma vez que o solo tende a dispor de menos nutrientes, principalmente de N, que é dependente da aeração para acelerar a mineralização da M.O.

Uma questão que pode estar surpreendendo os leitores é a de que o Latossolo foi mais favorável a maioria das características avaliadas do que o Neossolo, uma vez que, em nível de lavoura, esse último possibilita a obtenção de maiores produtividades. Uma hipótese que pode ser aventada é a de que o Neossolo, por ser constituído por maior teor de argila e silte possibilitou maior perda de N por desnitrificação. Como o volume de solo utilizado foi pequeno, o mesmo não foi capaz de suprir as plantas adequadamente de N. O alto teor de silte e argila proporciona a diminuição da aeração e, conseqüentemente, a mineralização e a disponibilidade de N. Isso pôde ser comprovado pela deficiência de N ocorrida no M1, primeiro no Neossolo, nos níveis mais elevados de compactação, ou seja, devido à predominância do N mineral ser na forma de nitrato, boa parte foi perdido por desnitrificação após a saturação do solo. Como havia pouca aeração, a mineralização da M.O. foi lenta, causando a deficiência de N no referido tratamento.

5 CONCLUSÕES

- A absorção de N, P e K, os componentes de produção de grãos e a produtividade de grãos são influenciadas pelo tipo de solo, manejos de água e níveis de compactação do solo,
- Níveis moderados de compactação favorecem a produtividade de grãos de arroz cultivado em condições de terras altas, em Latossolo Vermelho-Amarelo,
- Para o cultivar de arroz Liderança, as maiores produtividades de grãos são obtidas em condições de solo saturado ou com o teor de água no solo superior ou igual a 70% de água disponível,
- O manejo de água com reposição, efetuado quando eram consumidos de 50 a 60% da água disponível para as plantas, afeta negativamente a absorção de nutrientes, reduz a altura das plantas, a massa seca da parte aérea das plantas, os componentes de produção e a produtividade de grãos por vaso.
- A compactação do solo *per si* não constitui barreira para se adotar o sistema de plantio direto para o arroz de terras altas,
- Os efeitos indiretos da compactação do solo sobre a disponibilidade de nutrientes, aliados à menor aeração do solo, são mais relevantes do que a resistência física ao desenvolvimento radicular,
- O manejo de água tem efeito mais limitante sobre a produtividade de grãos do que a compactação do solo.
- Para o Neossolo saturado, a compactação do solo reduz o número de perfilhos e de panícula por vaso, mas aumenta o número de grãos cheios por panícula, influenciando muito pouco a produtividade de grãos de arroz.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, J. C. **Influência da profundidade de semeadura e da pressão de compactação no solo sobre a emergência de *Brachiaria brizanta* Stapf cv. Marandu**. 1993. 65 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de viçosa, viçosa, MG.

ALTUVE, S. A. **Efeito do potencial hídrico na germinação de sementes de três gramíneas forrageiras de clima tropical**. 1989. 51 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de viçosa, viçosa, MG.

ALVARENGA, R. C.; COSTA, L. M.; MOURA FILHO, W.; REGAZZI, A. J. Crescimento de leguminosas em camadas de solo compactadas artificialmente. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 20, n. 2, p. 319-326, maio/ago. 1996.

ALVARENGA, R. C.; FERNANDES, B.; SILVA, T. C. A. Densidade aparente, porosidade total e distribuição de poros de um Latossolo Roxo com diferentes métodos de preparo e manejo dos restos culturais do milho. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 34, n. 196, p. 569-577, nov./dez. 1987.

ALVES, M. C.; MACHADO, R. C. Efeito do manejo da água na cultura do arroz (*Oryza sativa* L) irrigado por inundação. **Lavoura Arrozeira**, Porto Alegre, v. 44, n. 399. p. 14-17, nov./dez. 1991.

ARF, O.; RODRIGUES, R. A. F.; CRUSCIOL, C. A. C.; SÁ, M. E. de; BUZETTI, S. Soil Management and nitrogen fertilization for sprinkler-irrigated upland rice cultivars. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 60, n. 2, p. 345-352, abr./jun. 2003.

BARBER, S. A. Influence of the plant root on ion movement in soil. In: CARSON, E. W. (Ed). **The plant root and its environment**. Charlottesville: University Press of Virginia, 1974. p. 525-564.

BARRETO, J. R. R.; ROJAS, P. Manejo de água y nitrogeno en arroz riego en el valle del cuaca. **Acta Agronomica**, Palmira, v. 37, n. 1, p. 22-34, ene./mar. 1987.

BAUER, A.; BLACK, A. L. Organic carbon effect on available water capacity of three soil textural groups. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, V. 56, n. 1, p. 248-254, jan./Feb. 1992.

BEWLEY E, J. D.; BLACK, M. **Seeds: Phisyology of development and germination**. 1. Storage imbibition, and germination. New York: Plenum press, 1985. 367 p.

BHUIYAN, S. I.; PALANISAMI, K. Increasing water-use efficiency on irrigated rice farms. In: INTERNATIONAL RICE RESEARCH INSTITUTE. **Progress in irrigated rice research**. Manila, 1989. p. 202.

BIWAS, B. C.; MAHAPATRA, I. Uptake of plant nutrients by direct seeded rice (pusa 2-21) under well-drained and water logged conditions. **Indian journal Agronomy**, New Delhi, v. 25, n. 3, p. 471-478, Sept. 1980.

BOIS, J. F.; COUCHAT, P. H.; MOUTONNET, P. Etude de la response à un stress hydrique de quelques variétés de riz pluvial e de riz irrigué. I. Incidence sur la transpiration. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 80, n. 2, p. 227-236, 1984.

BORGES, E. N. **Efeito de doses de gesso + massa seca de crotalária e de níveis de compactação em atributos físicos de um Latossolo Vermelho-Escuro**. 1995. 136 p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, SP.

BRASIL. Ministério da Agricultura e Reforma Agrária. **Regras para análise de sementes**. Brasília, 1992. 220p.

BUCKMAN, H. O.; BRADY, N. C. **Natureza e propriedades dos solos dos solos; compêndio universitário sobre edafologia**. 3. ed. Rio de Janeiro: Freitas Bastos, 1974. 594 p.

CAIXETA, T. J.; PURCINO, J. R. C.; SILVA, L. Irrigação de algumas culturas. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 9, n. 100, p. 65-8, abr. 1983.

CAMARGO, C. P. **Some genotypic variation in sorghum (*Sorghum bicolor* L.) seed related to germination temperature and water absorption**. Mississippi, 1982. 74 p. Thesis (PhD) – Mississippi State University, Mississippi.

CAMARGO, O. A. **Compactação do solo e desenvolvimento de plantas.** Campinas: Fundação Cargil, 1983. 44 p.

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

CANALLI, L. B.; ROLOFF, G. Influencia do preparo e da correção do solo na condição hídrica de um Latossolo Vermelho-escuro sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 21, n. 1, p. 99-104, jan./mar. 1997.

CARVALHO, M. M.; CRUZ FILHO, A. B. **Estabelecimento de pastagens.** Coronel Pacheco-MG: EMBRAPA-CNPGL, 1985. 46 p. (Circular Técnica, 26).

CARVALHO JUNIOR, A. C. de. **Efeito da adubação potássica em cultivares do arroz (*Oryza sativa* L.) de sequeiro sob déficit hídrico, em solo sob cerrado.** 1987. 160 p. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura de Lavras, Lavras, MG.

CASTILHO, E. G.; BURESH, R. J.; INGRAM, K. T. Lowland rice yield as affected by timing of water deficit and nitrogen fertilization. **Agronomy Journal**, Madison, v. 48, n. 2, p. 152-159, Mar./Apr. 1992.

CHASSOT, A.; STAMP, P.; RICHNER, W. Root distribution and morphology of maize seedlings as affected by tillage and fertilizer placement. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 231, n. 1, p. 123-135, Apr. 2001.

COELHO, M. B.; BERNARDO, S.; BRANDÃO, S. S.; CONDE, A. R. Efeito da água disponível no solo e de níveis de nitrogênio sobre duas variedades de arroz. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 24, n. 135, p. 461-483, set./out. 1977.

CORRÊA, J. B. D.; ANDRADE, L. A.; DIAS JÚNIOR, M. de S.; ALVES, V. G. Efeito da compactação na concentração foliar de nutrientes na cana-de-açúcar em três tipos de solos. In: FERTBIO'98, Lavras. **Anais...** Lavras: UFLA/SBCS/SBM, 1998. p. 91.

CORSINI, P. C. **Sistemas de cultivo:** efeitos na planta e no solo. Jaboticabal, UNESP, 1979. 19 p. (Boletim Técnico).

COSTA, J. P. V. da. **Fluxo de difusivo de fósforo e de potássio em Latossolos.** Viçosa: UFV. 1998. 67p.

COSTA, L. C.; MORISON, J.; DENENETT, N. Efecters of water stress on photosynthesis, respiration and growth of Faba Been (*Vicia faba* L) growing under field conditions. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 5, n. 1, p. 9-16, jan./jun. 1997.

CRUFIS, H. P. F. **System development in agricultural mechanizatoin with special reference to soil tillage and weed control.** Wageningen: Agriculture University of Wageningen, 1976. 179 p. Report.

CRUSCIOL, C. A. C. **Crescimento radicular, nutrição e produção de cultivares de arroz de terras altas em função da disponibilidade hídrica e de fósforo.** 2001. 111 p. Tese (Livre docência) - Universidade Estadual Paulista, Botucatu, SP.

CRUSCIOL, C. A. C. **Espaçamento e densidade de semeadura do arroz cv. IAC 201, sob condições de sequeiro e irrigado por aspersão.** 1995. 104 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Estadual Paulista, Botucatu, SP.

CRUSCIOL, C. A. C.; MACHADO, J. R.; ANDREOTTI, M.; ARF, O. RODRIGUES, R. A. F. Desenvolvimento das plantas de arroz irrigado por aspersão em função do manejo da água. In: REUNIÃO DA CULTURA DO ARROZ IRRIGADO, 22., 1997, Balneário de Camboriú. **Anais...** Balneário de Camboriú, 1997a. p. 262-264.

CRUSCIOL, C. A. C.; MACHADO, J. R.; ARF, O. RODRIGUES, R. A. F. Produtividade arroz cv. IAC 201 em função de níveis de água e do espaçamento entre fileiras sob irrigação por aspersão. In: REUNIÃO DA CULTURA DO ARROZ IRRIGADO, 22., 1997, Balneário de Camboriú. **Anais...** Balneário de Camboriú, 1997b. p. 269-271.

CRUZ, E. F. Efecto de la compactacion com rodillo en la preparacion del suelo para el cultivo del arroz. **Ciencias y Tecnica en la Agricultura, Arroz.** Havana, v. 12, n. 1, p. 39-47, 1989.

DASGUPTA, J.; BEWLEY E, J. D.; YEUNG, E. C. Desiccation-tolerant and desiccation-intolerant stages during the development and germination of *phaseolus vulgaris* seeds. **Journal of Experimental Botany**, Cambridge, v. 33, n. 136, p. 1045-64, Nov. 1982.

DE DATTA, S. K. **Principles and practices of rice production**. Los baños: Wiley, 1981. 618 p.

DE DATTA, S. K.; LEVINE, G.; WILLIAMS, A. Water management practices and irrigation requirements for rice. In: INTERNATIONAL RICE RESEARCH INSTITUTE. **Rice production manual**. Los Baños, 1970. p. 89-95.

Del GIUDICE, R. M.; BRANDÃO, S. S.; GALVÃO, J. D.; GOMES, R. J. Irrigação do arroz por aspersão; profundidade de rega e limite de água disponível. **Experientiae**, Viçosa, v. 18, n. 5, p. 103-123, set. 1974.

DIAS, A. D.; GOMES A. da S.; PENA, Y. A.; SOUSA, R. O. Desempenho de Arroz irrigado em plantio Direto sob diferentes coberturas vegetais. In: REUNIÃO DA CULTURA DO ARROZ IRRIGADO, 21., 1995, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre: IRGA, 1995. p. 146-148.

DIAZ-ZAMBRANA, M. O. Efeito da compactação sobre propriedades físicas em três materiais de solo sobre o crescimento das raízes de soja e caupi. **1994. 59 p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.**

DINIZ, J. A.; BRANDÃO, S. S.; DEL GUIDICE, R. M.; SEDYAMA, G. S.; LOUREIRO, B. T. Comportamento de variedades de arroz em terras altas, sob regime de irrigação por aspersão em diferentes níveis de adubação nitrogenada. **Experientiae**, Viçosa, v. 22, n. 10, p. 235-262, nov. 1976.

DOORENBOS, J.; KASSAN, A. H. **Efeito da água no rendimento das culturas**. Campina Grande: UFPb, 1994. 306 p. (Estudos FAO: Irrigação e Drenagem, 33).

DOTTO, C. R. D.; RICHES, A. A.; CARLESSO, R. Consumo de água e produtividade da cultura do arroz sob três sistemas de irrigação. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 19., 1990, Piracicaba. **Anais...** Piracicaba: SBEA, 1990. p. 396-409.

DOURADO NETO, D.; SAAD, A. M.; VANLIER, Q. J. Métodos de controle de irrigação. In: CURSO DE AGRICULTURA IRRIGADA, 1991, Piracicaba. Piracicaba: ESALQ/Departamento de Agricultura, 1991. p. 85-92.

DUARTE, E. F.; COSTA, F. A. Estudos das modalidades de irrigação por inundação contínua ou permanente e periódica ou intermitente com nove cultivares de arroz (*Oryza sativa*), na Baixada Fluminense. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 6, p. 253-64, 1971.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisa de Arroz e Feijão (Goiânia-GO). **Recomendações técnicas para o cultivo do arroz de sequeiro**. Brasília: EMBRAPA/SPI, 1996. 31 p.

FAGERIA, N. K. Deficiência hídrica em arroz de cerrado e resposta ao fósforo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 15, n. 3, p. 259-265, 1980.

FAGERIA, N. K.; STONE, L. F.; SANTOS, A. B. **Maximização da eficiência de produção das culturas**. Brasília: Embrapa Comunicação para Transferência de Tecnologia. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 1999. 294 p.

FORNASIERI, F. D.; FORNASIERI, J. L. **Manual da cultura do arroz**. Jaboticabal: FUNEP, 1993. 221 p.

GENRO JÚNIOR, S. A.; MACEDO, V. R. M.; MARCOLIN, E.; BOHNEN, H.; SOUSA, L. da S. Rotação de culturas e sistemas de cultivo no rendimento de grãos de arroz irrigado e disponibilidade de nutrientes. In: CONGRESSO DA CADEIA PRODUTIVA DE ARROZ, 1.; REUNIÃO NACIONAL DE PESQUISA DE ARROZ – RENAPA, 7., 2002, Santo Antônio de Goiás. **Anais...** Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2002. p. 411-414.

GOMES, A. da S.; MACHADO, M. O.; VERNETTI, JR. F. de J.; GONSALVES, G. K.; GOMES, D. N.; FERREIRA, L. H. G. Nível nutricional do arroz irrigado cultivado em três sistemas de cultivo: convencional, mínimo e direto. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ARROZ IRRIGADO, 1.; REUNIÃO DA CULTURA DO ARROZ IRRIGADO, 23., 1999, Pelotas. **Anais...** Pelota: Embrapa Clima Temperado, 1999. p. 217-224.

GOMES, A. da S.; PETRINE, J. A.; VERNETTI, JR. F. de J. Sistemas de cultivo de arroz em várzeas na região sul. In: REUNIÃO NACIONAL DE PESQUISA DE ARROZ – RENAPA, 6., 1998, Goiânia. (Mesa redonda IV)

GOMES, A. da S.; SOUSA, R. O.; LERIPIO, A. A. Produtividade do arroz irrigado em diferentes sistemas de cultivo. In: REUNIÃO DA CULTURA DO ARROZ IRRIGADO, 20., 1993, Pelotas, RS. **Anais...** Pelotas: EMBRAPA-CPACT, 1993. p. 135-137. (EMBRAPA-CPACT. Documentos, 1)

GOMES, A. da S.; VAHL, L. C.; PAULETTO, A. E.; PORTO, V. H. da F.; GONZALES, B. D. Fundamentos para a cultura do arroz irrigado. In: EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro de Pesquisa Agropecuária de Terras Baixas de Clima Temperado. **Fundamentos para a cultura do arroz irrigado**. Campinas: Fundação Cargill, 1985. p. 251-274.

GOMES, J. Parâmetros ambientais e épocas de semeadura. In: FUNDAÇÃO INSTITUTO AGRONÔMICO DO PARANÁ. **O milho no Paraná**. Londrina, 1982. p. 51-56

GOMIDE, R. L. Irrigação do arroz. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 5, n. 55, p. 51-60, jul. 1979.

GRIS, C. F.; GOMES, L. L.; CORRÊA, J. B. D.; MELASIPO, G. M. V. Efeitos da compactação do solo em um Latossolo Vermelho Distroférico Típico na cultura do milho. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 29., 2003, Ribeirão Preto-SP. **Anais...** Ribeirão Preto: UNESP, 2003. 3 p. CD-ROM.

GROHMANN, F. I. Compacidade. In: MONIZ, A. C. **Elementos de pedologia**. São Paulo: Polígono, 1975. p. 93-99.

GROHMANN, F.; QUEIROZ NETO, J. P. Efeito da compactação artificial de dois solos limo-argilosos sobre a penetração das raízes de algodão. **Bragantia**, Campinas, v. 25, n. 38, p. 421-432, dez. 1966.

GROSS, M. R.; RIBEIRO, G. J. T.; SCHMIDT, P. A.; CORRÊA, J. B. D.; LEITE, G. M. V.; SILVEIRA, T. Comportamento do rendimento de forrageiras em função da compactação em latossolo vermelho distroférico típico. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 29., 2003, Ribeirão Preto-SP. **Anais...** Ribeirão Preto: UNESP, 2003. 4 p. CD-ROM.

GUIMARÃES, C. M.; MOREIRA, J. A. A. Compactação do solo na cultura do arroz de terras altas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 36, n. 4, p. 703-707, abr. 2001.

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, maio/ago. 2002.

HADAS, A. Effects of soil moisture stress on seed germination. **Agronomy Journal**, Madison, v. 61, n. 2, p. 325-327, Mar./Apr. 1969.

HADAS, A.; RUSSO, D. Water uptake by seeds as affected by water stress, capillary conductivity and seed-soil water contact. I. Experimental study. **Agronomy Journal**, Madison, v. 66, n. 6, p. 643-647, Nov./Dec. 1974.

HARRIS, W. L. **The soil compaction process en compaction of agricultural soils**. St. Joseph: ASAE. 1971.

HENKLAIN, J. C.; VIEIRA, M. J.; OLIVEIRA, E. L. Resistência do solo pelo efeito dos métodos de preparo. In: CONGRESSO LATINO AMERICANO DE CIÊNCIA DO SOLO, 13., 1996, Águas de Lindóia. **Resumos...** Piracicaba: Comissão Conservação e Manejo do Solo e da água. 1996. CD-ROM.

HILL, R. L.; HORTON, R.; CRUSE, R. M. Tillage effects on soil water retention and pore size distribution of two Mollisols. **Soil Science of the Society of America Journal**, Madison, v. 49, n. 5, p. 1264-1270, Sepet./Oct. 1985.

HOFFMANN, C.; JUNGK, A. Growth and phosphorus supply of sugar beet as affected by soil compaction and water tension. **Plant and Soil**, Dodrecht, v. 176, n. 1, p. 15-25, Sept. 1995.

HOQUE, M. M.; KOBATA, T. Effect of soil compaction on the grain yield of rice (*Oryza sativa* L) under water-deficit stress during the reproductive stage. **Plant Production Science**, Matsue, v. 3, n. 3, p. 316-322, 2000.

HSIAO, T. C. Plant responses to water stress. **Annual Review of plant physiology**, Palo Alto, v. 24. p. 519-570, 1973.

INFELD, J. A.; REIS, J. C. L.; FRANCO, J. C. B.; SILVA, J. G. C. da. Arroz irrigado em sucessão com pastagem em planossolo pelotas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ARROZ IRRIGADO, 1.; REUNIÃO DA CULTURA DO ARROZ IRRIGADO, 23., 1999, Pelotas. **Anais...** Pelota: Embrapa Clima Temperado, 1999. p. 706-709.

INGRAM, K. T.; REAL, M. A.; MAGULING, M. A.; OBIEN, M. A.; LORESTO, G. C. Comparison of selection indices to creen lowland rice for drought resistance. **Euphytica**, Wageningen, v. 48, n. 3, p. 553-560, July 1990.

INTERNATIONAL RICE RESEARCH INSTITUTE. **Annual report for 1968**. Los Baños, 1969. 251 p.

JHA, K. P.; CHANDRA, D.; CHALLAIAN, D. Irrigation requirement of high-yielding rice varieties grown on soils having shallow water-table. **Indian Journal of Agricultural Sciences**, New Delhi, v. 51, n. 10, p. 732-7, Oct. 1981.

JONG Van Lier Q. Índices da disponibilidade de água para as plantas. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ V.; SCHAEFER, C. E. G. R. (Ed). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: SBCS, 2000. v. 1, p. 95-106.

KAISER, D. R.; STRECK, C. A.; REINERT, D. J.; SANTI, G.; KUNZ, M. Compactação do solo e suas relações no desenvolvimento radicular e produtividade do feijoeiro. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 29., 2003, Ribeirão Preto-SP. **Anais...** Ribeirão Preto: UNESP, 2003. 4 p. CD-ROM.

KLUTHCOUSKI, J. **Efeito de manejo em alguns atributos de um latossolo roxo sob cerrado e nas características produtivas de milho, soja, arroz e feijão, após oito anos de plantio direto**. 1998. 179 p. Tese (Doutorado em Fitotecnia) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, SP.

KLUTHCOUSKI, J.; AIDAR, H.; THUNG, M.; OLIVEIRA, I. P. de. Efeito do Manejo do solo sobre algumas de suas propriedades físicas, enraizamento e rendimento de arroz de terras altas. In: CONGRESSO DA CADEIA PRODUTIVA DE ARROZ, 1.; REUNIÃO NACIONAL DE PESQUISA DE ARROZ – RENAPA, 7., 2002, Florianópolis, SC. **Anais...** Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e feijão, 2002. p. 343-347. (Embrapa Arroz e feijão. Documentos, 134).

LEITE, C. E. P.; SILVA, L.; MARINATO, R. Estudo comparativo entre sistemas de irrigação na cultura do arroz em solo aluvial do Norte de Minas. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 10, n. 114, p. 41-45, jun. 1984.

LEITE, G. M. V.; RIBEIRO, G. J. T.; GROSS, M. R.; SCHMIDT, P. A.; CORRÊA, J. B. D.; SILVEIRA, T. Influência da compactação na germinação e desenvolvimento do arroz em três classes de solo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 29., 2003, Ribeirão Preto-SP. **Anais...** Ribeirão Preto: UNESP, 2003. 5 p. CD-ROM.

LEONEL, C. L.; RIBEIRO, G. J. T.; LEITE, G. M. V.; CORRÊA, J. B. D.; VASCONSELOS, C. L. Comportamento de forrageiras em diferentes graus de compactação num Latossolo vermelho Amarelo Distrófico textura argilosa. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 29., 2003, Ribeirão Preto-SP. **Anais...** Ribeirão Preto: UNESP, 2003. 4 p. CD-ROM.

LOEB, A. G.; BONILLA, C. R. C.; GALLARDO, C. A. B.; TAFUR, H. H. Efecto de algunas practicas de manejo del agua sobre las perdidas de nitrogeno en el cultivo del arroz. **Acta Agronomica**, Palmira, v. 37, n. 4, p. 41-49, oct./dic. 1987.

LOPES, R. A. P.; NÓBREGA, L. H. P.; OPAZO, M. A. U.; BRACCINI, A. L.; P. NETO, R. Monitoramento da densidade e porosidade do solo em dois sistemas de cultivo com cobertura de inverno. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA - CONBEA, 32., 2003, Goiânia. **Anais...** Goiânia: SBEA, 2003. CD-ROM.

MACEDO, V. R. M.; LOPES, M. S.; CORRÊA, N. I.; ANDRES, A.; LOPES, S. I. G.; SOUSA, P. R. de. Avaliação de sistemas de cultivo de arroz irrigado: parâmetros de rendimento. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ARROZ IRRIGADO, 1.; REUNIÃO DA CULTURA DO ARROZ IRRIGADO, 23., 1999, Pelotas. **Anais...** Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 1999. p. 269-271.

MALAVOLTA, E. **Elementos de nutrição mineral de plantas**. São Paulo: Agronômica Ceres, 1980. 251 p.

MAMBANY, B.; LAL, R. Response of upland rice varieteis to drought stress. I. Relation between root system development and leaf water potencial. **Plant and soil**, The Hague, v. 73, n. 1, p. 59-73, Jan. 1983.

MANTOVANI, E. C. Compactação do solo. **Informe Agropecuario**, Belo Horizonte, v. 13, n. 147, p. 52-55, mar. 1987.

MANTOVANI, E. C. Relação entre o teor de umidade e compactação de solo para diferentes classes de Latossolos. In: CONGRESO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 20., 1991, Londrina. **Anais...** SBEA, 1992. p. 1384.

MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. 2. ed. London: Academic Press, 1995. 889 p.

MASCARENHAS, R. E. B. **Manejo de água em arroz (*Oryza sativa* L) Irrigado em várzea do Rio Guamá, estuário amazônico, Belém-Pa**. 1987. 73 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, SP.

MEDEIROS, R. D. de; GHELFI FILHO, H.; DARIO, G. J. A.; BOTREL, T.; COSTA, M. C. Efeito do manejo da água e de herbicidas na cultura do arroz (*Oryza sativa* L) irrigado. **Irriga**, Botucatu, v. 2, n. 1, p. 38-49, 1997.

MEDEIROS, R. D. de; GUIMARÃES, R. M.; SOARES, A. A.; PEREIRA, R. C. A.; VON PINHO, E. R.; OLIVEIRA, J. A. Efeitos do teor de água no solo sobre a emergência e desenvolvimento de plântulas de arroz. In: CONGRESSO DOS ESTUDANTES DE PÓS-GRADUAÇÃO DA UFLA, 2003, Lavras. **Anais...** Lavras: APG-UFLA, 2003b. CD-ROM.

MEDEIROS, R. D. de; GUIMARÃES, R. M.; SOARES, A. A.; VON PINHO, E. R.; OLIVEIRA, J. A. Efeitos da umidade do solo sobre a emergência e desenvolvimento de plântulas de arroz. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 29., 2003, Ribeirão Preto-SP. **Anais...** Ribeirão Preto: UNESP, 2003a. 5 p. CD-ROM.

MEDEIROS, R. D. de; HOLANDA, J. S.; COSTA, M. C. Manejo de água em arroz irrigado no Estado de Roraima. **Lavoura Arrozeira**, Porto Alegre, v. 48, n. 420, p. 12-14, maio/jun. 1995.

MEDEIROS, R. D. de; OLIVEIRA JUNIOR, J. O. L.; ARAÚJO, J. W. de. Densidade de semeadura e níveis de nitrogênio em cobertura na cultura do arroz (*Oryza sativa* L). In: BALBUENA, R. H.; BENEZ, S. H.; JORAJURÍA, D. **Avances em el manejo del Suelo y Agua em la Ingeniería Rural Latinoamericana**. La Plata, 1998. p. 201-205.

MELO IVO, W. M. P.; MIELNICZUK, J. Influência da estrutura do solo na distribuição e na morfologia do sistema radicular do milho sob três métodos de preparo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 36, n. 1, p. 135-143, jan./mar. 1999.

MORAES, M. H. **Efeito da compactação em algumas propriedades físicas do solo e no desenvolvimento radicular de plantas de soja (*Glycine max*, L)**. 1988. 106 p. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, SP.

MONTTI, A.; VENTURI, P.; ELBERSEN, H. W. Evaluation of lowland and upland swuitchgrass (*Panicum virgatum* L) varieties under different tillage and seedbed conditions in northern Italy. **Soil Tillage Research**, Amsterdam, v. 63, n. 1/2, p. 75-83, Dec. 2001.

MORAES, S. O.; LIBARDI, P. L.; DOURADO NETO, D. Problemas metodológicos na retenção da água pelo solo. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 50, n. 3, p. 383-391, out./dez. 1993.

MOURA NETO, F. P. **Desempenho de cultivares de arroz de terras altas sob plantio direto e convencional**. 2001. 92 p. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.

MULLER, M. M. L.; GRECCON, G.; ROSOLEM, C. A. Influência da Compactação do solo em subsuperfície sobre o crescimento aéreo e do sistema radicular de plantas de adubação verde de inverno. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, Viçosa, v. 25, n. 3, p. 531-538, jul./set. 2001.

NEDEL, J. L.; de ASSIS NETO, F.; CARMONA, P. S. A planta de arroz: morfologia e fisiologia. In: **Produção do arroz irrigado**. Pelotas: UFP, 1998. p. 11-66.

NOVAIS, R. F.; SMYTH, T. J. **Fósforo em solo e planta em condições tropicais**. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 1999. 399 p.

OBERHAUSER, A. G.; BARROS, N. F.; COSTA, L. M.; SILVA, S. R. Comportamento da soja influenciado pelo volume de solo livre de compactação e pela adubação. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 29., 2003, Ribeirão Preto-SP. **Anais...** Ribeirão Preto: UNESP, 2003. 4 p. CD-ROM.

OGUNREMI, L. T. Influence of bulk density and moisture regime of a permeable soil on the performance of lowland rice, *Oryza sativa* L. **Tropical Agriculture**, Trindade, v. 68, n. 2, p. 129-34, Apr. 1991.

OGUNREMI, L. T.; LAL, R. S. K. de; BABALOLA, O. Effects of tillage and seeding methods on soil physical properties and yield of upland rice for an ultisol in southeast Nigeria. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 6, n. 4, p. 305-324, Mar. 1986.

OLIVEIRA, C. M. M. **Níveis de água e de nitrogênio na cultura do arroz irrigado por aspersão**. 1995. 62 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Estadual Paulista, Botucatu, SP.

OLIVEIRA, G. S. **Efeito de espaçamento e densidade de semeadura sobre o desenvolvimento de cultivares de arroz de sequeiro irrigados por aspersão**. 1997. 62 p. Dissertação (Mestrado em Sistema de Produção) – Universidade Estadual Paulista, Botucatu, SP.

OLOFINTOYE, J. A. Tillage and weed control practices for upland rice (*Oryza sativa* L.) on a hydromorphic soil in the Guinea savanna of Nigeria. **Tropical Agriculture**, London, v. 66, n. 1, p. 43-48, Jan. 1989.

PEDROSO, P. A. C.; CORSINI, P. C. Manejo físico do solo. In: FERREIRA, M. E.; YAMADA, T.; MALAVOLTA, E. (Ed.). **Cultura do arroz de sequeiro: fatores afetando a produtividade**. Piracicaba: Instituto da Potassa e Fosfato/Instituto Internacional da Potassa, 1983. p. 225-238.

PEDROTTI, A.; VAHL, L. C.; PAULETTO, E. A. Absorção de nutrientes em diferentes níveis de compactação de um Planossolo. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO E NUTRIÇÃO DE PLANTAS, 21., 1994, Petrolina. **Anais...** Petrolina: EMBRAPA/CPATSA, 1994. p. 302-304.

PEREIRA, J. A.; TAVARES SOBRINHO, J.; BELTRÃO, N. E. M. Resposta de cultivares tradicionais e melhoradas de arroz de sequeiro a diferentes níveis de umidade. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 29, n. 6, p. 857-865, jun. 1994.

PONKIAIA, H. P.; PATEL, C. L.; POLARA, K. B.; POLARA, J. V. Efecto of soil compaction on water absorption and seed water diffusivity of germinating seeds of different cultivars of groundnut. **Journal of the Indian Society of Soil Science**, New Delhi, v. 41, n. 1, p. 11-16, 1993.

PRASERTSAK, A.; FUKAI, S. Nitrogen availability and water stress interation on rice growth and yield. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 52, n. 1, p. 249-260, Feb. 1997.

PRIMAVESI, A. **Manejo ecológico do solo: a agricultura em regiões tropicais**. 9. ed. São Paulo: Nobel, 1990. 549 p.

REDDY, M. N.; RAJU, R. A. Studies on Water management in rice on vertisols. **Indian Journal of Agronomy**, New Delhi, v. 32, n. 3, p. 232-235, Sept. 1987.

REICHARDT, K. **Controle da irrigação do milho**. Campinas: Fundação Cargil, 1993a. 21 p.

REICHARDT, K. **Dinâmica da matéria e da energia em ecossistemas**. Piracicaba: USP/ESALQ. Departamento de Física e Meteorologia, 1993b. 505 p.

REEVES, D. W. Soil management under no-tillage soil physical aspects. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DO SISTEMA DE PLANTIO DIRETO, 1., 1995, Passo Fundo. **Anais....** Passo Fundo: EMBRAPA-CNPT, 1995. p. 121-125.

REZENDE, M. A.; RESENDE, P. C. S.; LIMA, A. B.; BRUDER, E. M.; RODRIGUES, V. A. Estudo do crescimento do sistema radicular do feijoeiro sob diferentes níveis de compactação, resistência mecânica e umidade do solo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 29., 2003, Ribeirão Preto-SP. **Anais...** Ribeirão Preto: UNESP, 2003. 4 p. CD-ROM.

RIBEIRO, G. J. T.; CORRÊA, J. B. D.; LEITE, G. M. V.; MOURA, F. P.; SOARES, A. A. Compactação e sua influência no desenvolvimento e produção de arroz, em três classes de solos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 29., 2003, Ribeirão Preto-SP. **Anais...** Ribeirão Preto: UNESP, 2003. 4 p. CD-ROM.

RIBEIRO, M. A. V. **Resposta da soja e do eucalipto a fósforo em solos de diferentes texturas, níveis de densidade e de umidade.** 1999. 71 p. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.

RICHARDS, L. A. Pressure membrane apparatus construction and use. **Agriculture Engineering**, St. Joseph, v. 28, p. 451-454, 1947.

RIPOLI, T. C. **Compactação e subsolagem.** Programa São Paulo vai ao campo. BANESPA, Jun 1992. 18 p.

ROBAINA, A. D. Manejo de água em arroz irrigado. In: ENCONTRO SOBRE OS PRINCIPAIS PROBLEMAS DA LAVOURA DO ARROZ, 1991, Santa Maria. **Anais...** Santa Maria: UFSM, 1991. p. 177-204.

RODRIGUES, R. A. F. **Efeitos do manejo de água nas características fenológicas e produtivas do arroz (*Oryza sativa* L) cultivado em condições de sequeiro sob irrigação por aspersão.** 1998. 75 p. Tese (Doutorado) – Universidade Estadual Paulista. Botucatu, SP.

RODRIGUES, R. A. F.; ARF, O. Manejo de água em cultivares de arroz de terras altas. I. Características fenológicas e agronômicas. In: CONGRESSO DA CADEIA PRODUTIVA DE ARROZ, 1.; REUNIÃO NACIONAL DE PESQUISA DE ARROZ – RENAPA, 7., 2002, Florianópolis, SC. **Anais...** Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e feijão, 2002a. p. 361-364. (Embrapa Arroz e Feijão. Documentos, 134).

RODRIGUES, R. A. F.; ARF, O. Manejo de água em cultivares de arroz de terras altas. II. Componentes de produção e produtividade. In: CONGRESSO DA CADEIA PRODUTIVA DE ARROZ, 1.; REUNIÃO NACIONAL DE PESQUISA DE ARROZ – RENAPA, 7., 2002, Florianópolis, SC. **Anais...** Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e feijão, 2002b. p. 365-368. (Embrapa Arroz e Feijão. Documentos, 134).

ROSA JÚNIOR, E. J. **Efeitos de manejo na cultura do milho (*Zea mays* L.) em um Latossolo Roxo na região de Dourados-MS.** 2000. 112 p. Tese (Doutorado) – Universidade Estadual de São Paulo, Botucatu, SP.

ROSOLEM, C. A. **Relações solo-planta na cultura do milho.** Jaboticabal: Funep, 1995. 53 p.

ROSOLEM, C. A.; FERNANDEZ, E. M.; ANDREOTTI, M.; CRUSCIOL, C. A. C. Crescimento radicular de plântulas de milho afetado pela resistência do solo à penetração. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 34, n. 5, p. 821-825, maio 1999.

SANTAMARIA, O. H. J.; GALLARDO, B. C. A. Efecto del riego y profundidad de compactación en la producción de soya cv. Valluna-5. **Acta Agronomica**, Palmira, v. 42, n. 1, p. 23-31, ene/mar. 1992.

SANTI, G. R.; COLLARES, G. L.; REINERT, D. J.; REICHERT J. M.; KUNZ, M.; KAISER, D. R. Crescimento e produtividade do feijoeiro submetido à compactação residual e imediata. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 29., 2003, Ribeirão Preto-SP. UNESP, 2003. **Anais...** Ribeirão Preto: UNESP, 2003. 4 p. CD-ROM.

SANTOS, A. B. dos; SILVA, O. da; FERREIRA, E. Avaliação de práticas culturais em um sistema agrícola irrigado por aspersão. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 32, n. 3, p. 317-327, mar. 1997.

SANTOS, G. A. dos. **Graus de compactação e adubação fosfatada no crescimento do milho (*Zea mays* L) em solos distintos.** 2001. 80 p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de plantas) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.

SARTORI, M. T. R. **Caracterização da resposta de grupos de genótipos de arroz submetidos à deficiência hídrica no período reprodutivo.** 1996. 84 p. (Dissertação) Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, SP.

SCALCO, M. S. **Efeito do manejo da água no crescimento e absorção de N, P, K, Fe, Mn, e Zn pelo arroz (*Oryza sativa* L. CV. "IAC 25").** 1983. 90 p. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura de Lavras, Lavras, MG.

SCHMIDT, P. A.; RIBEIRO, G. J. T.; CORRÊA, J. B. D.; GROSS, M. R.; LEITE, G. M. V.; LEONEL, C. L. Influência da compactação na produção de forrageiras em um Latossolo Vermelho Amarelo distrófico (LVad) Textura média. In. CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 29., 2003, Ribeirão Preto-SP. **Anais...** Ribeirão Preto: UNESP, 2003. 4 p. CD-ROM.

SÉGUY, L.; BOUZINAC, S.; MARONEZZI, A. C.; TAFFAREL, V.; TAFFAREL, J. Plantio direto do arroz de sequeiro de alta tecnologia na zona tropical úmida do centro - norte do Mato Grosso. **Informações Agronômicas**, Piracicaba, n. 86, p. 1-28, jun. 1999. (Encarte Técnico.)

SHARMA, P. K.; INGRAM, K. T.; HARNPICHITVITAYA, D. Subsoil compaction to improve water use efficiency and yields of rainfed lowland rice in coarse-textured soils. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 36, n. 1/2, p. 33-44, Nov. 1995.

SIDRAS, N.; DERPSCH, R.; MONDARDO, A. Influência de diferentes sistemas de preparo do solo na variação da umidade e rendimento da soja, em Latossolo Roxo Distrófico (Oxisol). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 7, n. 1, p. 103-106, jan./abr. 1983.

SILVA, A. P. **Influência da compactação nas propriedades físicas do solo e no sistema radicular de plântulas de algodão (*Gossypium hirsutum*, l).** 1984. 75 p. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, SP.

SILVA, R. B. **Efeito da adsorção de fósforo em parâmetros físicos e na compressibilidade de solos da micro-região dos campos da Mantiqueira, MG.** 1998. 109 p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.

SILVA, S. R.; BARROS, N. F.; NOVAIS, R. F.; PEREIRA, P. R. G. Eficiência nutricional de potássio e crescimento de eucalipto influenciados pela compactação do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 26, n. 4, p. 1001-1010, out./dez. 2002.

SILVEIRA, P. M. da. Densidade do solo e micronutrientes em arroz de terras altas. In: CONGRESSO DA CADEIA PRODUTIVA DO ARROZ, 1.; REUNIÃO NACIONAL DE PESQUISA DE ARROZ – RENAPA, 7., 2002, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: Embrapa Arroz e Feijão, 2002. p. 538-539.

SILVEIRA, T.; RIBEIRO, G. J. T.; CORRÊA, J. B. D.; CHMIDT, P. A.; VASCONSELOS, C. L.; LEITE, G. M. V. Comportamento da brachiaria decumbes em função da compactação de subsuperfície em três classes de solos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 29., 2003, Ribeirão Preto-SP. **Anais...** Ribeirão Preto: UNESP, 2003. 4 p. CD-ROM.

SILVEIRA FILHO, A. **Integração de métodos cultural, manual e químico no controle de plantas daninhas e na produção de arroz (*Oryza sativa*, L.), irrigado por submersão e em várzea úmida.** 1992. 155 p. Tese (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, SP.

SMUCKER, A. J. M.; ERICKSON, A. E. Tillage and compactive modifications of gaseous flow and aeration. In: LARSON, W. E.; ALLAMARAS, R. R.; VOORHEES, W. B.; GUPTA, S. C. (Ed.). **Mechanics related process in structured agricultural soils:** Nato applied sciences. Amesterdam: Kluwer Academic Publisgers. 1989. v. 172, p. 205-221.

SOARES, A. A. **Cultura do arroz.** Lavras: UFLA, 2001. 177 p. (Notas de aula - Datilografado)

SOARES, A. A. Desvendando o segredo do insucesso do plantio direto do arroz de terras altas. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 25, n. 222, p. 58-66, 2004.

SORATO, R. P.; RODRIGUES, R. A. F.; ARF, O. Manejo de água em cultivares de arroz irrigado por aspersão no sistema de plantio direto. In: CONGRESSO DA CADEIA PRODUTIVA DE ARROZ, 1.; REUNIÃO NACIONAL DE PESQUISA DE ARROZ – RENAPA, 7., 2002, Florianópolis, SC. **Anais...** Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e feijão, 2002. p. 369-372. (Embrapa Arroz e Feijão. Documentos, 134).

SOUSA, P. R. de; BRASIL, A. P.; NOLDIM, A. J.; INFELD, J. A.; GOMES, A. S.; PAULETO, E. A. Avaliação crítica dos projetos do PNP-arroz na área de práticas culturais, no período de 1980 a 1989: Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina. In: REUNIÃO NACIONAL DE PESQUISA DE ARROZ, 4., 1990, Goiânia. **Anais...** Goiânia: EMBRAPA/CNPAP, 1994. p. 327-342. (EMBRAPA /CNPAP. Documentos, 40).

STIRZAKER, R. J.; PASSIOURA, J. B.; WILMS, Y. Soil structure end plant growth: impactof bulk density and biopores. **Plant and Soil**. Dordrecht, v. 185, n. 1, p. 151-162, 1996.

STONE, L. F. Absorção de P, k, Mg, Ca e S por arroz, influenciada pela deficiência hídrica, vermiculita e cultivar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 20, n. 11, p. 1251-1258, nov. 1985.

STONE, L. F. **Produtividade e utilização do nitrogênio pelo arroz (*Oryza sativa* L): Efeito de deficiência hídrica, cultivares e vermiculita**. 1983. 200 p. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, SP.

STONE, L.F.; MOREIRA, J.A.A.; SILVEIRA FILHO, A. Manejo de água na cultura do arroz: Consumo, ocorrência de plantas daninhas, absorção de nutrientes e características produtivas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 25, n. 3, p. 323-37, mar. 1990.

STONE, L. F.; GUIMARÃES, C. M.; MOREIRA, J. A. A. Compactação do solo na cultura do feijoeiro. I: nas propriedades físico-hídricas do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 6, n. 2, p. 213-218, maio/ago. 2002a.

STONE, L. F.; LIBARDI, P. L.; REICHARDT, K. Deficiência hídrica, vermiculita e cultivares. II Efeito na utilização do nitrogênio pelo arroz. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 19, n. 11, p. 1403-1416, nov. 1984.

STONE, L. F.; LIBARDI, P. L.; REICHARDT, K. Produtividade do arroz e absorção de nitrogênio afetadas pelo veranico e pela adição de vermiculita ao solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 21 n. 2, p. 117-125, fev. 1986.

STONE, L. F.; MOREIRA, J. A. A.; DOUZET, J. M.; REYES, V. G. Sistemas de preparo do solo e produtividade do arroz de terras altas. In: CONGRESSO DA CADEIA PRODUTIVA DE ARROZ, 1.; REUNIÃO NACIONAL DE PESQUISA DE ARROZ – RENAPA, 7., 2002, Florianópolis, SC. **Anais...** Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2002b. p. 415-418. (Embrapa Arroz e Feijão. Documentos, 134).

STONE, L. F.; MOREIRA, J. A. A.; SILVA, S. C. Tensão da água no solo adequada para controle de irrigação do arroz de terras altas. Goiânia: EMBRAPA-CNPAP, 1997. N. p. (EMBRAPA-CNPAP. Pesquisa em Foco, 02)

STONE, L. F.; SANTOS, A. B. dos; STEINMETZ, S. Influência de práticas culturais na capacidade de retenção de água do solo e no rendimento de arroz de sequeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 15, n. 1, p. 63-68, jan. 1980.

STONE, L. F.; SILVA, J. G. da. Resposta do arroz de sequeiro à profundidade de aração. Adubação nitrogenada e condições hídricas do solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 33, n. 6, p. 891-897, jun. 1998.

STONE, L. F.; SILVEIRA, P. M. da; OLIVEIRA, A. B. de; AQUINO, A. R. L. de. Efeitos da supressão da água em diferentes fases do crescimento da produção do arroz irrigado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 14, n. 2, p. 105-9, abr. 1979.

STURANI, E.; COCUCCHI, S.; MARRE, E. Hydration dependent polysome-monosome interconversion in the germination castor bean endosperm. **Plant & Cell Physiology**, Kyoto, v. 9, n. 4, p. 783-795, 1968.

TAVARES, M. H. F.; COSTA, A. C. S. Estudos dos efeitos da compactação de solos argilosos através de radiação gama: In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 24., 1993, Goiânas. **Anais...** Goiânia: Sociedade Brasileira de ciência do solo, 1993. p. 119-120.

TEDESCO, M. J.; GIANELHO, C.; BISSANI, C. A.; BOHNEN, U.; VOLKWEISS, S. J. **Análises de solo, de plantas e outros materiais**. 2. ed. rev. e amp. Porto Alegre: UFRGS. Departamento de solos, 1995. 174 p. (Boletim Técnico, 5)

TREIN, C. R.; COGO, N. P.; LEVIEN, R. Métodos de preparo do solo na cultura do milho e ressemeadura do trevo na rotação aveia+trmoço/milho, após pastejo intensivo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 15, n. 1, p. 105-111, jan./abr. 1991.

TSUTSUI, H. Manejo da água para a produção do arroz. segunda parte. **Lavoura Arrozeira**, Porto Alegre, v. 25, n. 269, p. 36-41, Set./out. 1972.

TUBEILEH, A.; GROLEAU-RENAUD, V.; PLATUREUX, S.; GUKERT, A. Effect of soil on photosynthesis and carbon partitioning within a maize-soil system. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 71, n. 2, p. 151-161, June 2003.

VARGAS, R. M. B. **Mecanismos de suprimento de K, Ca, Mg e P às raízes de milho em solos do Rio Grande do Sul**. 1982. 93 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Federal Rural do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

VAHL, L. C.; TURATTI, A. C.; GOMES, A. S.; PAULETO, A. Épocas de início da inundação do solo x níveis de nitrogênio em arroz irrigado. In: REUNIÃO NACIONAL DE PESQUISA DO ARROZ, 3., 1987, Goiânia. **Resumo...** Goiânia: EMBRAPA/CNPAF, 1987. 39 p.

VERNETTI, Jr, F. de J.; GOMES, A. da S.; PENA, Y. A.; DIAS, A. D. Avaliação preliminar de cultivares de arroz irrigado no sistema de plantio direto. In: REUNIÃO DA CULTURA DO ARROZ IRRIGADO, 21., 1995, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre: IRGA, 1995. p. 149-150.

VERTUCCI, C. W.; LEOPOLDO, A. C. Dynamics of imbibition of soybean embryos. **Plant Physiology**, Rockville, v. 72, n. 1, p. 190-193, May 1983.

VILLANI, E. M. A.; NOVAIS, R. F.; BARROS, N. F.; FONTES, L. E. F.; NEVES, J. C. L. Difusão de fósforo em solos com diferentes texturas e níveis de umidade. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 17, n. 3, p. 343-347, set./dez. 1993.

WEBER, L.; MAECHEZAN, E.; CARLESSO, R.; SEGABINAZZI, T. Desempenho de cultivares de arroz irrigado em diferentes sistemas de cultivo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ARROZ IRRIGADO, 1.; REUNIÃO DA CULTURA DO ARROZ IRRIGADO, 23., 1999, Pelotas. **Anais...** Pelota: Embrapa Clima Temperado, 1999. p. 296-298.

YOSHIDA, S. Factors that limit the growth and yields of upland rice. In: INTERNATIONAL RICE RESEARCH INSTITUTE. **Major research in upland rice**. Los Baños, 1975. p. 46-71.

YOSHIDA, S. **Fundamentals of rice science**. Los Baños: International Rice Research Institute, 1981. 269 p.