EFEITOS DA COMPACTAÇÃO DO SOLO EM MUDAS DE *Eucalyptus*
torreliana F. MUELL. E DE *Eucalyptus grandis* HILL EX MAIDEN

ROBERTO CHIARANDA
Engenheiro Florestal

Orientador: Prof. Dr. FÁBIO POGGIANI

Dissertação apresentada à Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", da Universidade de São Paulo, para obtenção do título de Mestre em Ciências. Área de Concentração em Ciências Florestais.

P I R A C I C A B A

Estado de São Paulo - Brasil

Setembro - 1989

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Livros da
Divisão de Biblioteca e Documentação - PCLQ/USP

C532e Chiaranda, Roberto
Efeitos da compactação do solo em mudas de
Eucalyptus torelliana F. MUELL. e de *Eucalyptus*
grandis HILL EX MAIDEN. Piracicaba, 1989.
118p.

Diss.(Mestre) - ESALQ
Bibliografia.

1. Eucalipto - Muda - Desenvolvimento 2. Eucalipto - Plântula - Efeito da compactação do solo 3. Eucalipto - Plântula - Desenvolvimento I. Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba

CDD 634.9734

EFEITOS DA COMPACTAÇÃO DO SOLO EM MUDAS DE *Eucalyptus*
toreliana F. Muell. E DE *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden

Autor: ROBERTO CHIARANDA

Aprovada em 20-10-89

Comissão julgadora:

Prof. Dr. Fábio Poggiani

ESALQ/USP

Prof. Dr. Antonio Natal Gonçalves

ESALQ/USP

Prof. Dr. Zilmar Ziller Marcos

ESALQ/USP

Aos meus pais, Josê e Maria,
pelos 30 anos de carinho,
amor e convivência

DEDICO

AGRADECIMENTOS

- Ao Prof. Dr. Fábio Poggiani pela orientação e amizade;
- Ao Prof. Dr. Hilton Thadeu Zarate do Couto e ao Eng^o. Florestal José Franklin Chichorro pelo processamento dos dados e análise estatística;
- Ao Prof. Dr. Antonio Natal Gonçalves pelo auxílio na elaboração do Summary e sugestões;
- Ao Prof. Dr. Zilmar Ziller Marcos pela cessao do laboratório de Solos e sugestões;
- Ao Prof. Dr. Mário Tomazello Filho pela cessao do laboratório de Dendrologia e Anatomia da Madeira e, ao Prof. José Nivaldo Garcia pela cessão do laboratório de Propriedades Físicas e Mecânicas da Madeira.
- Ao Eng^o Florestal José Henrique Catâneo pelo auxílio na instalação do experimento.
- Ao Eng^o Florestal Reginaldo Brito da Costa e ao Prof. Sidney F. Caldeira pela correção do texto e sugestões.
- À KAMAQ - Ind. Com. Máquinas Agrícolas Ltda, pelo interesse na pesquisa e desenvolvimento do aparelho compactador.
- À Universidade Federal de Mato Grosso, na pessoa da Prof.^a Sueli A.A. Pinto pelo auxílio durante o desenvolvimento da dissertação.
- Ao CNPq pela concessão de bolsa de estudos.

À Biblioteca do Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais, na pessoa de Marialice M. Poggiani e Sueli Dressano, pelo auxílio nas consultas bibliográficas;

A Antonio Carlos Chiaranda e Humberto Ch. V. Camargo pelo auxílio na coleta de dados, dedicação e compreensão demonstrados no decorrer da experimentação.

Aos Colegas da Pós-Graduação Araci Aparecida da Silva, Celina Ferraz do Valle, Marília Figueira Reis, Antonio Moreira e Crisomar Raimundo Lobatto pela amizade, apoio e convivência gratificante.

Ao Engº Agrônomo Mariúze Dias de Andrade pelo auxílio nas últimas etapas da dissertação.

À Jesuina de Oliveira Garcia e a Milton Cezar Ribeiro pelo serviço de datilografia, apoio e amizade.

A todos aqueles que, de forma direta ou indireta, contribuíram para a execução deste trabalho.

S U M Á R I O

	Página
LISTA DE FIGURAS	ix
LISTA DE QUADROS	x
LISTA DE TABELAS	xi
RESUMO	xii
SUMMARY	xiv
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	3
2.1. Definição e tipos de compactação	3
2.2. Processo de compactação do solo	4
2.3. Efeitos da compactação nas propriedades físi— cas do solo	11
2.3.1. Efeitos da compactação na retenção e fluxo de água	12
2.3.2. Efeitos da compactação na aeração dos solos	16
2.3.3. Efeitos da compactação sobre a condução de calor nos solos	19
2.3.4. Efeitos da compactação no estado nutri- cional do solo	21
2.3.5. Efeitos da compactação na resistência à penetração no solo	27
2.4. Efeitos da compactação sobre as espécies flo- restais	31
2.4.1. Efeitos da compactação sobre a germina- ção e sobrevivência de espécies flores- tais	32

2.4.2. Efeitos da compactação sobre o sistema radicular de espécies florestais	34
2.4.3. Efeitos da compactação no crescimento da parte aérea de espécies florestais	36
3. MATERIAL E MÉTODOS	41
3.1. Material	41
3.1.1. Local	41
3.1.2. Solo	41
3.1.3. Espécies de <i>Eucalyptus</i> utilizadas	42
3.2. Métodos	43
3.2.1. Obtenção dos blocos compactados	43
3.2.1.1. Aparelho compactador	44
3.2.1.2. Operação de compactação	45
3.2.2. Obtenção dos blocos não compactados ...	46
3.2.3. Montagem dos sistemas solo-recipientes .	47
3.2.4. Plantio e desbaste	48
3.2.5. Irrigação	49
3.2.6. Adubação	49
3.2.7. Delineamento estatístico	50
3.2.8. Variáveis mensuradas	51
3.2.8.1. Variável climática	51
3.2.8.2. Variáveis do solo	52
3.2.8.3. Variáveis do sistema radicular	54
3.2.8.4. Variáveis da parte aérea	57

	Página
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	59
4.1. Propriedades físicas do solo	59
4.1.1. Densidade global	59
4.1.2. Resistência à penetração no solo	64
4.2. Sistema radicular	71
4.2.1. Distribuição das raízes laterais de primeira ordem	71
4.2.2. Diâmetro da raiz pivotante	75
4.2.3. Biomassa do sistema radicular	77
4.2.4. Comprimento do sistema radicular	80
4.2.5. Área superficial do sistema radicular .	88
4.3. Parte aérea	94
4.3.1. Biomassa da parte aérea	94 -
4.3.2. Crescimento em altura	99
5. CONCLUSÕES	103
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	105

LISTA DE FIGURAS

FIGURAS Nº	Página
1. Esquema do aparelho compactador de solos e forma de compactação	44
2. Corte transversal do sistema bloco-recipiente	48
3. Disposição das parcelas e tratamentos na casa de vegetação	50
4. Relação entre o número de batidas e a densidade global induzida, com o solo à capacidade de campo, na superfície inferior (- -) e superior (—) do bloco	60
5. Comportamento da resistência do solo à penetração em colunas de solo argiloso compactado (- -) e não compactado (—), plantados com <i>E. toreliana</i> (o) e <i>E. grandis</i> (●)	66
6. Distribuição relativa do comprimento do sistema radicular, por classe de diâmetro de raízes, nos tratamentos	84
7. Distribuição relativa da área superficial do sistema radicular, por classes de diâmetro de raízes, nos tratamentos	91
8. Biomassa da parte aérea, total (T), do caule (C) e de folhas (F), mensuradas aos 135 dias	95
9. Valores de crescimento em altura (cm), mensurados quinzenalmente, para o <i>E. toreliana</i> (□) e <i>E. grandis</i> (●), no tratamento compactado (—) e não compactado (- -)	100

LISTA DE QUADROS

QUADRO Nº	Página
1. Caracterização físico-química do solo utilizado no experimento	42
2. Valores de densidade global obtidos nos blocos compactados e não compactados, para intensidade compactativa de 4 batidas, no término do experimento	63
3. Valores de resistência à penetração, observados nos tratamentos, aos 135 dias de idade, mensurados com penetrômetro de bolso	65
4. Distribuição das raízes laterais de primeira ordem, diâmetro superior, médio e inferior da raiz pivotante e peso de biomassa seca do sistema radicular do <i>E. toreliana</i> e <i>E. grandis</i>	72
5. Comprimento do sistema radicular do <i>E. toreliana</i> e <i>E. grandis</i> nos tratamentos compactados e não compactados	81
6. Efeito da compactação do solo na biomassa da parte aérea e na altura do <i>E. toreliana</i> e <i>E. grandis</i>	96

LISTA DE TABELAS

TABELA Nº	Página
1. Temperatura média mensal observada dentro da casa de vegetação, no decorrer do experimento	52
2. Contaminação da biomassa de raízes verificada para os quatro tratamentos (média de 5 amostras, ao acaso, por tratamento)	57
3. Efeitos da compactação na produção de biomassa do sistema radicular de espécies florestais, em condições de casa de vegetação	79
4. Densidade de raízes, calculada para o <i>E. toreliana</i> e <i>E. grandis</i> , nos tratamentos compactados e não compactados	86
5. Área superficial do sistema radicular do <i>E. toreliana</i> e <i>E. grandis</i> nos tratamentos compactados e não compactados	89
6. Distribuição da área superficial radicular por unidade de comprimento de raiz.....	93
7. Efeito deletério da compactação em plântulas de espécies florestais crescendo em condições de casa de vegetação e de campo	102

EFEITOS DA COMPACTAÇÃO DO SOLO EM MUDAS DE *Eucalyptus*
toreliana F. MUELL E DE *Eucalyptus grandis* HILL EX MAIDEN

Autor: ROBERTO CHIARANDA

Orientador: Prof. Dr. FÁBIO POGGIANI

RESUMO

Foram avaliados os efeitos da compactação do solo em mudas de *E. torelliana* F. Muell e de *E. grandis* Hill ex Maiden.

O trabalho foi realizado em casa de vegetação, no Departamento de Ciências Florestais, da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"/USP, em Piracicaba-SP. O período de desenvolvimento do referido estudo foi de 15/02 a 15/07/88, perfazendo 135 dias. Os tratamentos consistiram em blocos de solo não compactados ($0,96 - 0,97 \text{ g.cm}^3$), com estrutura deformada e blocos de solo compactados artificialmente à densidade de $1,50 \text{ g.cm}^3$.

Das variáveis mensuradas do sistema radicular, apenas a biomassa do sistema radicular absortivo e sistema radicular total, dentro dos blocos, apresentaram efeitos significativos, devido à compactação. Outras características, tais como o número de raízes laterais de primeira ordem, o comprimento e área superficial de raízes, o diâmetro da raiz pivotante

e sua biomassa apresentaram diferenças significativas apenas em relação às espécies de *Eucalyptus*.

A arquitetura radicular, analisada através da distribuição das raízes laterais de primeira ordem, demonstrou que o *E. grandis* tende a concentrá-las na região do colo, próximo à superfície, enquanto que o *E. torelliana* apresenta poucas raízes na região do colo e aproximadamente 70% delas na parte restante da raiz pivotante. Tal fato pode ser indicativo de uma maior vantagem adaptativa do *E. torelliana* quando plantado em solos compactados.

Para as variáveis mensuradas na parte aérea, detectou-se apenas diferenças significativas em relação ao efeito das espécies.

EFFECTS OF SOIL COMPACTATION ON *Eucalyptus torelliana* F.
MUELL AND *Eucalyptus grandis* HILL EX MAIDEN SEEDLINGS

Author: ROBERTO CHIARANDA

Adviser: Prof. Dr. FÁBIO POGGIANI

SUMMARY

The effects of soil compactation on *E. torelliana* F. Muell and *E. grandis* Hill ex Maiden seedlings maintained under greenhouse conditions were evaluated through tap, lateral and total root systems biomass, tap root diameter, first-order lateral root number, root length, root surface, shoot height and biomass in relation to soil compactation.

This work was carried out in the greenhouse of the Departamento de Ciências Florestais, of the Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"/USP, in Piracicaba-SP, from February 15 to July 13, 1988.

The soil density used were 0.96 - 0.97 g.cm³ for uncompacted soil and 1.50 g.cm³ for compacted soil.

From the assessed variables for the root systems, only the lateral and total biomass within blocks showed significant effects due to the compactation. First-order lateral root number, root length and surface, tap root diameter and biomass showed significant differences only in relation to the utilized species.

The root architecture evaluated through the distribution of the first-order lateral roots showed that *E. grandis* trend to concentrate them in the root collar while *E. toreliana* trend to distrib them along the tap root. This observation could be an indicative of a better adaptation of *E. toreliana* to soil with compacted superficial layer.

Significant differences of shoot height and biomass were observed only in relation to the species effect.

1. INTRODUÇÃO

A atividade florestal no Brasil tem se destacado, no âmbito econômico, ano após ano, movimentando um parque industrial que visa, basicamente, atender a produção de polpa de celulose, papel, compensados, aglomerados, resinas, etc.

Apesar da importância das florestas plantadas como fonte de matéria prima, as mesmas são implantadas em solos marginais, não mais utilizados pelas atividades de agricultura e pecuária. Esses solos trazem consigo toda uma história de modificações em suas propriedades físico-químicas, como esgotamento nutricional, desestabilidade de agregados, compactação, entre outras.

Não obstante, também as operações florestais mecanizadas causam impactos deletérios a esses solos, os quais sustentam apenas a floresta, causando, ao longo do tempo, diminuição em suas respectivas produtividades. Esses impactos estão bem documentados para florestas temperadas naturais e temperadas implantadas, não se conhecendo ainda os efeitos dos mesmos nas florestas tropicais naturais e tropicais implantadas, onde a dinâmica edafoclimática é consideravelmente diferente. Dos impactos causados pela atividade florestal e agrícola, a compactação tem sido apontada como principal alteração

que os solos sofrem, em razão do seu uso inadequado e falta de critérios específicos de planejamento.

Como consequência da compactação, a resistência mecânica que o solo impõe à penetração das raízes aumenta, impedindo muitas vezes o crescimento adequado do sistema radicular. Deve ser ressaltado, no entanto, que o comportamento das espécies florestais frente à compactação e resistência mecânica à penetração não é uniforme, podendo este fator ser prejudicial ou não.

Visando proporcionar informações à respeito do comportamento das espécies florestais frente ao estresse compactativo, este trabalho teve como objetivo estudar os efeitos da compactação no desenvolvimento de plântulas de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden e de *Eucalyptus toreliana* F. Muell em condições de casa de vegetação.

O *E. toreliana* e o *E. grandis* foram escolhidos para o experimento em função de serem utilizados para florestamento e reflorestamento no Vale do Aço-MG, onde ocorrem problemas de compactação do solo, e apresentarem respostas diferenciadas às condições adversas do ambiente e, em específico, à compactação.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. DEFINIÇÃO E TIPOS DE COMPACTAÇÃO

Considerando um meio poroso flexível, constituído de partículas sólidas, ar e água, ao aplicarmos uma força de compressão sobre o mesmo, poderá ocorrer uma mudança em suas propriedades físico-químicas e em suas dimensões, fato que provavelmente acarretará modificações nos diversos processos que ocorrem nesse meio.

Com o solo ocorrem fenômenos semelhantes quando da aplicação de forças mecânicas sobre sua superfície.

Dessa forma, compactar um solo constitui-se no ato de forçar a aglutinação de suas partículas e agregados, reduzindo o volume por eles ocupado. Como consequência da redução do volume do solo, ocorre um aumento de sua densidade global, decréscimo no volume de poros na macroporosidade, diminuição da taxa de infiltração, movimentação mais lenta da água, deficiência de aeração, maior resistência mecânica à penetração das raízes e alterações nas suas relações térmicas (COSTA, 1985).

Durante o processo, os agregados são comprimidos

dos, mas considerando-se que as partículas minerais individuais são rígidas, o espaço poroso é que é reduzido.

A agregação das partículas durante o processo de compactação pode ocorrer de maneira diferenciada, formando dois tipos de camadas compactadas (JORGE, 1986). Um dos tipos refere-se as camadas provenientes de derivação genética, resultantes da ação lenta e contínua dos processos pedogenéticos, originados pela eluviação dos colóides minerais e orgânicos dos horizontes superficiais para camadas mais profundas do solo, causando, durante o processo, a obstrução dos poros e, ao final do mesmo, uma camada de impedimento. O outro tipo, refere-se às camadas de origem induzida, resultantes da aplicação de uma força sobre a superfície do solo.

Pode-se encontrar na literatura o termo compactação referindo-se indistintamente aos dois processos, seja superficial ou subsuperficial, uma vez que ambos apresentam os mesmos efeitos desfavoráveis. É possível, ainda, a ocorrência simultânea dos dois tipos de camadas compactadas. Isto ocorre quando as camadas de origem induzida levam à formação de camadas de origem genética sobre si (RANEY et al., 1955).

2.2. PROCESSO DE COMPACTAÇÃO DO SOLO

Considerando que a aplicação de uma força sobre o solo é capaz de causar mudanças em suas propriedades físico-químicas, há quatro possibilidades que poderão ser atri

buídas à mudança; compressão das partículas sólidas, compressão do líquido e do gás dentro do espaço poroso, mudança no conteúdo de gás e líquido dentro do espaço poroso e um rearranjo das partículas sólidas (HARRIS, 1971).

Segundo o autor, na compressão de partículas sólidas, a aplicação de uma força faz com que o líquido existente entre duas partículas se contraia e a área de contato entre as mesmas aumente, assumindo o menisco existente entre elas uma forma diferente da inicial. O aumento da área de contato depende da forma das partículas, que por sua vez é elástica, podendo as mesmas retornarem à sua configuração normal após o término da força aplicada. Na compressão de líquidos, o autor salienta que a aplicação de uma força causa mudança de volume muito pequena, com o conseqüente aumento de resistência às mudanças volumétricas adicionais. Para finalidades práticas, a modificação no volume de água pode ser desconsiderada como fator que influencia a compactação do solo. Cessada a força aplicada, o líquido retorna aos espaços entre as partículas. Dessa forma, as partículas, os gases e os líquidos contribuem para uma modificação temporária da compactação dos solos, conferindo aos mesmos uma elasticidade parcial.

A susceptibilidade dos solos à compactação depende da maior ou menor possibilidade de suas partículas mudarem de posição por rolagem ou deslizamento, provocando mudanças no volume, especialmente em solos não saturados (HARRIS, 1971). A compactação ocorre mais facilmente em solos que, con-

forme WARKENTIN (1971), apresentam partículas de diversos tamanhos, onde os grânulos pequenos podem rolar ou deslizar para os espaços vazios existentes entre os grânulos maiores.

Em concordância com o processo citado, BODMAN & CONSTANTIN (1965) verificaram que uma mistura de 80% de areia e 20% de argila mais silte pode apresentar, ao final da compactação, os menores valores possíveis de porosidade comparada a qualquer material puro. Segundo esses autores, os solos mais susceptíveis à compactação são os de textura média a moderadamente grossa devido a maior facilidade de reorganização de suas partículas.

Em termos de estabilidade de agregados, os solos com agregados estáveis são mais resistentes à compactação do que aqueles com agregados facilmente desestruturáveis (BODMAN & CONSTANTIN, 1965; SANCHEZ, 1981).

Quando ocorre desestruturação dos agregados nas camadas superficiais, as partículas resultantes aproximam-se entre si, ocorrendo simultaneamente diminuição na macroporosidade e entupimento dos poros das camadas subseqüentes do horizonte, com aumento da possibilidade de ocorrência de compactação, diminuição da taxa de infiltração e erosão.

Para solos tropicais, SANCHEZ (1981) relata que os solos Podzólicos Vermelho-Amarelo e Vermelho-Amarelo Eutrófico são mais susceptíveis à compactação e à erosão devido ao menor teor de argila em seu horizonte superficial, enquanto que a maioria dos Latossolos apresentam estrutura estável.

O tipo de material de argila também se relaciona com a susceptibilidade dos solos à compactação pelo fato de que a lâmina de água a ele adsorvida está intimamente ligada à plasticidade de suas partículas, às ligações existentes entre elas e ao movimento da água. O modelo estrutural ou orientação (casualizado, orientado e floculado) é proporcionado pelas forças interparticulares de repulsão, forças atrativas de Van-der-Waale e forças coulombianas (HARRIS, 1971). As forças interparticulares de repulsão são resultantes da interação entre as camadas de difusão de íons sobrepostos das partículas adjacentes, evidenciadas pelo intumescimento quando do umedecimento das argilas e na reação de expansão que ocorre durante o teste de compactação. As forças atrativas de Van-der-Waal referem-se àquelas que ocorrem entre moléculas descarregadas e as forças coulombianas referem-se às forças de atração elétrica. De acordo com o autor acima citado, cada tipo de argila apresenta propriedades coloidais próprias, sendo que as menos ativas produzem estruturas orientadas sob as mesmas condições de carga e umidade. O teor de argila também influencia o processo de compactação à medida que o mesmo diminui a susceptibilidade do solo à compactação.

Nessa mesma linha, SILVA (1984) observou maior susceptibilidade para Latossolos Vermelho-Amarelo em relação ao Latossolo Roxo, apresentando, os mesmos, teores de argila de 25 e 50%, respectivamente.

Em contraposição aos dados relatados, LARSON &

GUPTA (1980) e LARSON et al. (1980) verificaram um aumento linear da compactação com o teor de argila de até 33%, tendendo a mesma a permanecer constante com incrementos posteriores, tanto para solos lixiviados com predominância de caolinita ou óxidos de ferro na fração argila, quanto para solos com argila tipo montmorilonita, alofana, vermiculita e mica hidratada.

Em termos de tamanho de partículas, tem-se verificado que, com o seu aumento, o efeito compactativo diminui. Esse resultado foi evidenciado por JOHNSON & BUCHELLE (1961) para solo arenoso, e por GRABLE & SIEMER (1968) para solo siltoso.

Outro fator inerente ao processo é a rugosidade da superfície das partículas. As partículas de superfícies mais rugosas impõe maior resistência à movimentação em relação às de superfícies lisas ou pouco rugosas, devido ao maior atrito que aquelas causam. As informações contidas no trabalho de PERECIN & CAMPOS (1978) auxiliam a compreender o efeito da rugosidade das partículas no processo de compactação. Segundo os autores, os solos oxídicos apresentam maior volume de espaço poroso do que solos com argilas mais ativas, atribuindo tal fato às diferenças de rugosidade superficial existentes entre os diferentes tipos de argila. Colaborando com essa linha de pensamento, CRUSE et al. (1980) verificaram resultados similares para solos da planície costeira Atlântica dos E.U.A., atribuindo-os parcialmente às variações de rugosidade superficial das partículas.

Um outro fator que afeta a compactação dos so-

los é o seu conteúdo de matéria orgânica, verificando-se, em linhas gerais, que ocorre diminuição do efeito da compactação para uma mesma força aplicada, conforme aumenta o teor de matéria orgânica. Estudando os efeitos da matéria orgânica sobre a compactação, SANDS et al. (1979) verificaram que o grau de compactação dos solos foi modificado pela variação do conteúdo da mesma. Para aumentos do teor dessa fração do solo, os autores obtiveram diminuição dos valores de densidade global em condições não saturadas, fato corroborado por ALEXANDER (1980), SILVA (1984), LENHARD (1986), entre outros.

SANCHEZ (1981) informa que a matéria orgânica está relacionada com a estabilidade dos agregados dos Oxisolos, uma vez que desempenha papel aglutinador entre as partículas minerais primárias. Além dessa função, a matéria orgânica reduz a plasticidade e coesão das partículas, aumentando ao mesmo tempo sua capacidade de retenção de água (BRADY, 1979). Constata-se ainda, que o aumento do teor de matéria orgânica nos solos faz com que os mesmos apresentem uma umidade ótima mais elevada para a compactação, fato que pode ser verificado nos trabalhos de TAYLOR & HENDERSON (1959), BODMAN & CONSTANTIN (1965), FOIL & RALSTON (1967) e SILVA (1984).

A porosidade é outra propriedade física do solo relacionada com o fenômeno da compactação, uma vez que o movimento das partículas, de maneira natural ou induzida pela aplicação de uma força, ocorre em detrimento do espaço poroso ocupado pelo ar e pela água. No geral, além de diminuição da poro

sidade total, ocorre modificação na relação existente entre a macro e a microporosidade, com decréscimo da primeira e acréscimo da segunda. Esse efeito está evidenciado nos trabalhos de GROHMANN & QUEIROZ NETO (1966), MACHADO & BRUM (1978), ZISA et al. (1980), HULUGALLE et al. (1984), OLSSON (1986), entre outros. Segundo DAY & HOLMGREEN (1952), as modificações do volume dos poros podem ser atribuídas, em grande parte, às deformações plásticas dos agregados, as quais ocorrem facilmente no limite inferior de plasticidade, produzindo diminuição progressiva dos espaços entre os agregados à medida que a compactação aumenta. Para teores de umidade abaixo do limite inferior de plasticidade, as deformações parecem estar localizadas nas áreas de contato entre agregados.

O efeito do conteúdo de água na compactação varia consideravelmente com as características do solo e com o esforço compactativo aplicado. De maneira geral, a resistência à compactação é grande quando os solos estão secos, devido a baixa lubrificação proporcionada pela lâmina de água para o rearranjo das partículas.

À medida em que o conteúdo de umidade do solo aumenta, a resistência à compactação diminui, devido a maior lubrificação das partículas, até que se atinja um ótimo de umidade no qual um máximo de densidade pode ocorrer para um montante de energia aplicada, conforme demonstrado por SIDLE & DRLICA (1981), SILVA (1984), entre outros. Ao atingir o ótimo de umidade, um número máximo de pequenas partículas são força-

das a se movimentarem entre os grânulos e partículas maiores, com os espaços remanescentes sendo preenchidos com água.

Acima do teor ótimo de umidade, geralmente próximo ao ponto de saturação de cada tipo de solo, acréscimos de umidade resultam na diminuição dos valores de densidade (SIDLE & DRLICA, 1981; SILVA, 1984), com a possibilidade de expulsão da água para fora da amostra, conforme evidenciam os dados obtidos por SOEHNE (1958), ocorrendo ainda aumento do potencial de destruição da estrutura do solo (SIDLE & DRLICA, 1981).

Os testes de laboratório efetuados por SILVA (1984) exemplificam esta afirmação. Para um conteúdo de umidade de 5 a 15% base peso de massa, o autor elevou a densidade do Latossolo Vermelho-Amarelo de 1,5 a 2,0 g.cm⁻³, enquanto que para o Latossolo Roxo, necessitou de umidade de 15 a 25% para elevar sua densidade global de 1,4 a 1,6 g.cm⁻³. De acordo com BODMAN & CONSTANTIN (1965), com o aumento no teor de argila, o conteúdo de água no qual um máximo de densidade global é alcançado, também aumenta.

2.3. EFEITOS DA COMPACTAÇÃO NAS PROPRIEDADES FÍSICAS DO SOLO

Ao modificar o espaço poroso do solo, a compactação modifica seriamente as condições de armazenamento e transmissão de água, calor, gases e nutrientes, aumentando ainda a resistência à penetração das raízes. Essas modificações nos processos físicos, afetam o crescimento e o desenvolvimento da planta.

2.3.1. Efeitos da compactação na retenção e fluxo de água

Como a infiltração, retenção e movimentação da água no solo depende em grande parte das propriedades desse meio poroso, pode-se esperar então, que há uma modificação dessas propriedades, causada pela compactação, o comportamento da água também se modifique.

A infiltração da água no solo depende das condições de superfície, enquanto que o fluxo depende da condutividade hidráulica e da existência de um gradiente de potencial, conforme evidenciado pela equação de Darcy.

A condutividade hidráulica é o coeficiente que expressa a facilidade com que um líquido é transportado através de um meio poroso (LIBARDI, 1984), dependendo, portanto, das propriedades do meio (distribuição, forma, tamanho, tortuosidade e superfície específica das partículas e porosidade) e do fluido (densidade e viscosidade).

A transferência de água ocorre dos poros maiores para os poros menores onde fica retida, devido às forças de adesão e coesão. Dessa forma, a movimentação inversa torna-se um fenômeno da macroporosidade, pode-se dizer, portanto, que a transmissão de água também diminui (WARKENTIN, 1971).

Como o volume da água que flui através de um tubo capilar é proporcional à quarta potência de seu raio (VOMOCIL & FLOCKER, 1961), a compactação apresentará grande influên

cia na transmissão de água em solos saturados, pois a diminuição no raio do poro diminuirá o volume do fluxo em dezesseis vezes.

Um fato interessante a se considerar é que o fluxo nos canais pode continuar a diminuir mesmo quando o solo já atingiu o equilíbrio entre a força compactativa aplicada e a resistência às novas modificações. Esse fato é enfatizado por LENHARD (1986) em solo de textura fina, explicando o evento como devido à compressão e descompressão do meio poroso à aplicação e remoção da força compactativa constante.

Por outro lado, em condições não saturadas, a compactação aumenta a condutividade hidráulica, conforme evidenciado por KEMPER (1971).

A respeito da influência da textura do solo na retenção e fluxo de água, nota-se através de diversos trabalhos que, em solos de textura arenosa, o aumento da densidade aumenta o conteúdo de umidade a uma dada tensão de sucção constante, mas a magnitude do aumento torna-se pequena ou diminui conforme aumenta a sucção. Em solos de textura fina, a elevação do valor da densidade global produz acréscimos no conteúdo de umidade, com a magnitude de efeito tornando-se superior com o aumento da tensão de sucção. Para solos de textura intermediária, o aumento da densidade global diminui o conteúdo de umidade a baixas tensões de sucção e aumenta o referido conteúdo a altas tensões.

Respostas diferenciadas ao comportamento da tex

tura do solo em relação a tensão de sucção e retenção de água foram encontradas por HILL & SUMNER (1967), para nove solos de textura arenosa e barro-argilosa, ao mensurarem seus respectivos conteúdos de umidade a tensões de sucção variando entre 0,1 e 15 bars, a vários graus de compactação.

O comportamento hidrológico diferenciado dos solos com diferentes texturas pode também ser explicado através da modificação na orientação das partículas (WARKENTIN, 1971). Em solos de textura grossa, ocorre um rearranjo das partículas e agregados numa nova estrutura, com concomitante redução no tamanho dos poros devido à compressão. Em solos de textura fina, além da modificação na distribuição dos macro e microporos e mudanças em seu tamanho devido a expansão das argilas, ocorre a mudança de orientação das mesmas, fato este que afeta tanto a retenção de água como a sua própria expansão.

Com relação às operações de exploração e manejo florestal, tem-se verificado uma diminuição do valor da condutividade hidráulica, com a conseqüente diminuição da taxa de infiltração, conforme dados relatados por JAKOBSEN & MOORE (1981), GENT JR. et al. (1983; 1984), JAKOBSEN (1983), RILEY (1984) e WRONSKI (1984). Sob os sulcos formados pelas rodas dos veículos, a condutividade hidráulica tende a decrescer mais, conforme verificou WRONSKI (1984) ao encontrar valores de $0,5 \times 10^{-4} \text{ m.s}^{-1}$ nesses pontos de contato, após duas passadas do veículo, em solo barro-argiloso com pedregulhos tendendo a solo argiloso friável.

As operações de preparo do solo igualmente contribuem para a modificação da taxa de infiltração, a qual varia de acordo com o método aplicado e com sua intensidade. Exemplificando, HULUGALLE et al. (1984) obtiveram maiores valores de taxa de infiltração para a limpeza de um alfisol realizado manualmente ($3,8 \times 10^{-1} \text{ mm.s}^{-1}$), em relação a mesma operação realizada de forma mecânica (empurrador de árvores e empurrador arrancador de raízes), com taxa de 2,6 e $2,8 \times 10^{-1} \text{ m.s}^{-1}$, respectivamente.

No revolvimento do solo, MARTINES & LUGO-LOPEZ (1953), estudando os efeitos do preparo do solo sobre as características físicas de seus respectivos perfis, encontraram taxas de infiltração da ordem de 142 mm.h^{-1} , para os tratamentos que receberam aração e gradagem, contra 13 mm.h^{-1} nos perfis não trabalhados. Porém, TROUSE JR. (1979) relatou queda de 99% na taxa de infiltração, quando um solo sob floresta recebeu as operações de limpeza e preparo para o plantio. Outros exemplos são citados por SANCHEZ (1981).

Considerando a queda do valor das taxas de infiltração e dos valores de condutividade hidráulica devido à compactação, verifica-se que, para chuvas de determinada intensidade, pode haver a formação de escoamento superficial e conseqüente erosão, além de problemas de encharcamento e aeração na zona radicular (GREACEN & SANDS, 1980).

O problema do escoamento superficial também poderá aparecer quando da incidência de gotas de chuvas sobre

a superfície do solo desnudo. O impacto das gotas, quer oriundas da precipitação interna, quer da precipitação direta sobre os agregados, pode desintegrá-los, causando dispersão, reorientação das partículas e entupimento dos poros, conforme estas são carregadas para dentro dos solos à medida em que a água se infiltra. Segundo RUARK et al. (1982), a crosta que fica na superfície apresenta duas camadas, sendo a primeira bem delgada, de 0,01 mm de espessura na superfície e uma camada adjacente de poros entupidos.

A formação da crosta pode reduzir a infiltração a pequenas frações de sua taxa original. A infiltração é afetada primeiramente pelo número e pela orientação dos macroporos conectados e, adicionalmente, pelo grau de bloqueio dos canais de drenagem pelo gelo, se o solo for congelado. Desse modo, a remoção do litter, o conteúdo de água, o volume total de poros abertos e a densidade global apenas afetam a infiltração na proporção em que desarranjam o número e orientação dos macroporos interconectados (HARRIS, 1972).

2.3.2. Efeitos da compactação na aeração do solo

Ao modificar o comportamento da água a compactação também afeta a transferência de gases dentro do solo e entre este e a atmosfera, tendo em vista que tanto a água quanto os gases ocupam o mesmo espaço poroso, não sendo possível agir sobre um sem modificar o outro.

Os dois mecanismos de fluxo de gases, principal

mente via macroporos, são: mecanismo de fluxo de massa e mecanismo de difusão. Quando a energia que move os gases é o gradiente total de pressão, o fluxo resultante é denominado de fluxo de massa e, quando a energia que move um componente gasoso específico é o gradiente de pressão parcial, o fluxo resultante desse componente é denominado de fluxo difusivo. Ambos os processos são desenvolvidos nos trabalhos de GRABLE (1971) e REICHARDT (1975).

O principal mecanismo de transferência de gases, segundo BRADY (1979), é o de difusão. A maior pressão de oxigênio na atmosfera, afirma o autor, origina a livre movimentação deste gás para o interior do solo, havendo movimentação contrária de CO_2 e de vapor d'água, uma vez que as pressões parciais desses dois gases são, geralmente mais elevados no ar do solo do que na atmosfera.

A movimentação e difusão dos gases na atmosfera do solo pode ser facilmente rompida pelo realinhamento e destruição dos macroporos. Decréscimo no espaço macroporoso devido a compactação pode restringir a difusão de CO_2 para fora ou a de O_2 para dentro do solo, produzindo condições anaeróbicas que afetarão o desenvolvimento do sistema radicular com conseqüente diminuição do crescimento da parte aérea. Um outro problema a ser evidenciado ocorre quando os solos compactados ficam saturados pela precipitação, em determinadas épocas do ano, quando, então, os processos anaeróbicos podem começar a ocorrer, tanto à nível de planta, quanto à nível de química do solo.

De acordo com VOMOCIL & FLOCKER (1961) e BAVER et al. (1972), pode-se considerar que 10% em volume é o menor valor em porosidade para o qual ainda ocorrem trocas gasosas no solo, sendo que valores abaixo deste limitam o crescimento das plantas. GRABLE (1966) considera que há limites de porosidade ótimos para cada cultura, de acordo com sua idade, necessidades nutricionais, temperatura, intensidade luminosa, etc.

Os estudos dos efeitos da porosidade na difusão do ar tem demonstrado que a permeabilidade dos solos ao fluxo de ar é nula quando o espaço poroso não capilar é menor que 10%. GRABLE & SIEMER (1968) encontraram valores de difusividade relativa igual a zero para macroporosidade de até 12% em solos sílticos, tanto para aumento da densidade global, quanto para diminuição do tamanho dos agregados.

Como as grandes perdas de macroporosidade podem restringir a difusão do oxigênio e a penetração das raízes, torna-se possível a ocorrência de um crescimento menor da árvore em relação a locais sem deficiência de aeração (KARR et al., 1988). Um outro fator que afeta de forma indireta o crescimento das árvores, seria a diminuição da atividade microbiana, devido a falta de O_2 , limitando a mineralização dos nutrientes, fazendo com que os mesmos fiquem indisponíveis para o reaproveitamento por um período maior de tempo (MITCHEL et al., 1982; ARNOTT et al., 1988).

Há, porém, condições nas quais a compactação não provoca restrições sensíveis nas trocas gasosas do solo, tais

como mudanças de temperatura do solo e do ar, flutuações da pressão barométrica, chuvas e irrigação, os quais promovem um aumento dos gradientes de pressão responsáveis pela movimentação dos gases (PHILLIPS & KIRKMAN, 1962).

2.3.3. Efeitos da compactação sobre a condução de calor nos solos

Dentre os diversos mecanismos existentes de transferência de calor no solo, o mecanismo de condução é o principal deles (REICHARDT, 1975; GEIGER, 1980). A quantidade de calor pode ser expressa pela equação de Fourier, na qual a quantidade de calor transferido é igual ao produto da condutividade térmica do solo pelo gradiente de temperatura.

Como a condutividade térmica é uma propriedade do material e mensura sua habilidade em transferir calor, seu valor depende da composição, forma e arranjo do material, conjuntamente com seu conteúdo de umidade. Dessa forma, através do mesmo processo de rearranjo do meio poroso, que afeta a umidade e a aeração, a compactação pode afetar a condutividade térmica ao aproximar as partículas umas das outras, ao aumentar a quantidade de água retida e ao diminuir o conteúdo de gás.

COSTA (1985) ressalva que a porosidade contribui para a redução da condutividade de calor, principalmente quando o espaço poroso encontra-se ocupado com ar, ocorrendo isto devido ao fato deste componente apresentar baixos valo-

res de condutividade. Portanto, para uma redução nos valores de porosidade e, em específico da macroporosidade, pode-se esperar um aumento de valor da condutividade, com maior transferência de calor para dentro e para fora do solo, conforme a situação do balanço de energia sobre a superfície.

Segundo REICHARDT (1975), a condutividade, além de depender da composição da fração sólida e líquida do solo, é também uma função da densidade global deste.

GRADWELL (1963) observou uma diferença de condutividade térmica de aproximadamente o dobro do valor entre o solo solto (densidade global de $0,98 \text{ g.cm}^{-3}$) e o solo denso ($1,26 \text{ g.cm}^{-3}$) a favor deste último. Por outro lado, mensurações noturnas, durante o período de inverno, apresentaram uma perda de calor sensível de 10 a 20 cal.cm^{-2} a mais no solo denso que no solo solto.

A condutividade térmica, porém, é mais afetada pelo conteúdo de água do solo que pela sua densidade global, visto que o transporte de calor pela água é muito grande, especialmente com o aumento da temperatura (WILLIS & RANEY, 1971).

O fluxo de água e calor nos solos são simultâneos, verificando-se na literatura relatos de movimento de água induzido por gradientes de temperatura sob condições de congelamento, movimento de água através da temperatura de vapor, das zonas de alta para as zonas de baixa pressão devido a temperatura ou gradiente de potencial.

Segundo BRADY (1979), o calor se transfere do

solo para a água cerca de 150 vezes mais facilmente do que do solo para o ar. À medida em que aumenta a quantidade de água no solo, diminui igualmente a do ar, com conseqüente diminuição da resistência à transferência.

A temperatura do solo não depende somente da quantidade de calor transportado, mas também da sua capacidade em absorver calor, capacidade esta dada pelo calor específico que, por sua vez, depende da porosidade, conteúdo de umidade presente e calor específico da fração sólida.

À semelhança da condutividade, o rearranjo do espaço poroso tende a aumentar a quantidade de água no solo e a diminuir o espaço não ocupado pelas partículas, aumentando por conseguinte, o valor do calor específico. Conforme BRADY (1979) e GEIGER (1980), o teor de umidade dos solos determina, mais do que qualquer outro fator, a energia necessária para elevar sua temperatura.

Além de ser afetada pela compactação, a transferência de calor varia sazonalmente com a cobertura do solo, precipitação, etc (GEIGER, 1980). Como resultado dessas modificações, o ambiente térmico das raízes é afetado, com conseqüência para os diversos processos da planta.

2.3.4. Efeitos da compactação no estado nutricional do solo

As condições físico-químicas do solo afetam di-

retamente a nutrição das plantas por controlar a taxa e o nível pelos quais os íons movem-se até a superfície das raízes.

Segundo PARISH (1971), o fluxo de massa, o contato de troca das raízes com as fontes de íons e a difusão através de pequenas distâncias são os mecanismos através dos quais os nutrientes são translocados para as plantas. A importância de cada rota varia consideravelmente, com a textura e estrutura do solo, conteúdo de nutrientes e distribuição do sistema radicular.

Considerando as modificações que a compactação pode causar ao solo, os mecanismos de translocação também podem ser afetados. Ao enfocar este aspecto, convém salientar que a microporosidade retém maior quantidade de água nos solos, requerendo maior tensão de sucção para retirá-la e, dessa forma, apenas a água das proximidades das superfícies compactadas está sujeita a mudanças rápidas de tensão. Como a movimentação da água é lenta, a rota do fluxo de massa fica prejudicada. KEMPER (1971) e PARISH (1971) ressaltam que o fluxo de nitratos, sulfatos e outros ânions absorvidos depende do maior grau de fluxo de massa, sendo este prejudicado quando da compactação.

Na troca de contato, a compactação força as partículas do solo a uma maior aproximação, permitindo uma sobreposição do dobro de camadas das mesmas, tornando possível, desta forma, o movimento contínuo de fase de troca (PARISH, 1971). Segundo o autor, esse efeito é marcante em solos com solução salina fraca ou em solos com íons adsorvidos.

Finalmente, o coeficiente de difusão aumenta com a compactação, devido a produção de uma quantidade maior de sistemas aquosos contínuos (PHILLIPS & BROWN, 1965). Porém, com o aumento excessivo da compactação, o coeficiente de difusão poderá ser reduzido devido à obstrução física dos poros pelas partículas.

Segundo KEMPER (1971), a interdifusão de cátions pode ser aumentada ou diminuída pela compactação. Tal fato depende do tipo de argila que constitui o solo. Dessa forma, a montmorilonita (argila tipo 2:1, expansível) apresenta diminuição no coeficiente de difusão de cátions quando compactada, em virtude de ser argila saturada de íons de cálcio. A força de atração eletrostática mantém as plaquetas de argila mais próximas entre si, mesmo quando da saturação, impedindo sua expansão e retendo os cátions. O referido autor encontrou uma diminuição no valor do coeficiente de difusão de Ca_{45} quando da compactação de um solo barro-argiloso contendo montmorilonita.

Com a caolinita (argila tipo 1:1) e com a illita (argila tipo 2:1 não expansível) ocorre o inverso. Por serem argilas saturadas de íons de hidrogênio, estes impedem a formação de tactóides e, por conseguinte, a compactação aumenta a interdifusão de íons. PHILLIPS & BROWN (1966) encontraram um aumento de 50% na taxa de interdifusão quando a densidade global de um solo barro-limoso passou de 1,1 para 1,6 g.cm^{-3} .

Os fatores que afetam a interdifusão de ânions são os mesmos que afetam a interdifusão de sais, pois os

ânions geralmente são acompanhados de cátions livres. No geral, a difusão de ânions e sais ocorre na fase líquida do solo e a conexão de poros estreitos com poros grandes pode impedir a difusão desses elementos.

Quando os efeitos da compactação são muito severos nas camadas superficiais do solo, pode-se esperar uma redução na disponibilidade de nutrientes, com conseqüências para o crescimento das plantas. YOUNGBERG (1959) verificou que o conteúdo do nitrogênio, disponível nas trilhas de exploração florestal, ficou abaixo do limite mínimo necessário para o crescimento de plântulas de *Pseudotsuga menziesii*, creditando tal fato à aeração deficiente das trilhas e ao seu baixo conteúdo de matéria orgânica.

De acordo com MILLER & SIROIS (1986), a redistribuição dos horizontes superficiais de um solo tipo barro com horizonte B argílico, devido às operações de exploração florestal, causou redução na umidade disponível do solo e no conteúdo de matéria orgânica, fósforo, cálcio e potássio. Segundo os autores, a menor disponibilidade de fósforo e cálcio refletiu-se no menor crescimento das plântulas de *Pinus taeda* existentes no local.

A menor aeração e umidade existentes nos solos compactados, devido à exploração florestal e recreação, proporcionaram uma taxa lenta de mineralização da matéria orgânica, fato esse verificado por YOUNG & GILMORE (1976). Dessa forma, dentro da ciclagem biogeoquímica, os nutrientes minerais passam a requerer um maior período de tempo para ficarem disponíveis.

veis às plantas. Enquanto o reservatório do solo possuir as quantidades necessárias de nutrientes minerais para suprir as necessidades das plantas, estas continuarão a crescer normalmente mas, com diminuição destes pela absorção radicular e com reposição mais lenta devido a mineralização da matéria orgânica, as quantidades dos elementos minerais podem tornar-se limitantes ao crescimento.

GREACEN & SANDS (1980), revisando diversos trabalhos sobre compactação do solo e adição de adubos minerais afirmam que, dependendo das circunstâncias, o adubo pode ou não compensar a redução de crescimento causado pela compactação. Provavelmente dependerá do sistema radicular, lugar e forma de aplicação do adubo, umidade do solo, capacidade de absorção das plantas, etc.

Estudando o efeito da compactação nas raízes e a capacidade de absorver fósforo pelas plantas, nessas condições, SHIERLAW & RALSTON (1984) verificaram que essa capacidade variou conforme a espécie, dependendo da habilidade de seu sistema radicular em penetrar e desenvolver-se dentro dessas camadas.

BORGES (1983), analisando o efeito das camadas de compactação sobre o crescimento de soja (*Glycine hispida*) e de três espécies do gênero *Eucalyptus*, verificou um aumento da concentração de fósforo, potássio, cálcio e magnésio na parte aérea da leguminosa, para densidades globais crescentes até $1,05 \text{ g. cm}^{-3}$, enquanto que, para o *Eucalyptus*, a concentração des

ses elementos nutrientes decresceu linearmente ou manteve-se inalterada com a compactação.

FLOCKER & NIELSEN (1962), em uma análise de crescimento de plantas em solos com vários graus de compactação e estresse de umidade, verificaram que a absorção de nutrientes não foi diretamente afetada pela compactação, mas sim, pela quantidade insuficiente de água disponível para o crescimento normal nas regiões meristemáticas, envolvendo a elongação da célula e absorção de nutrientes. Provavelmente, sob essa condição variável de estresse, alguns efeitos da limitação dos nutrientes podem não ter sido detectados.

Discutindo alguns efeitos benéficos da compactação em relação à absorção de nutrientes, PARISH (1971) informa que uma diminuição no valor de pH em solos neutros e alcalinos pode auxiliar a absorção de fósforo e microelementos, tornando-os solúveis. Nessas mesmas linhas de pensamento, MENGEL & KIRKBY (1982) enfatizam que a solubilidade de vários sais como carbonatos, sulfatos e fosfatos é altamente dependente do pH do solo.

Um outro efeito benéfico, citado por PARISH (1971), é o do contato da superfície das raízes com concreções de dióxido de manganês, que ocorre em solos compactados de textura fina, e com pH entre 6,5 e 8,0. Analogamente ao contato de troca, agentes orgânicos produzidos pela raiz reduziram e solubilizaram o dióxido de manganês, tornando-o disponível.

2.3.5. Efeitos da compactação na resistência à penetração no solo

Considerando que a toda aplicação de uma força corresponde o surgimento de uma força de ação contrária, a ação de penetração das raízes no solo corresponde uma ação contrária deste, causando uma determinada resistência à penetração. Como nos solos compactados as partículas ficam mais próximas entre si e sua resistência a deformações aumenta, pode-se esperar uma maior resistência ou dificuldade à penetração das raízes.

Trabalhando com solos franco-siltosos, ZISA et al. (1980) verificaram que um aumento de densidade global dos solos de 1,2 para 1,8 g.cm⁻³ acarretou diminuição na macro e microporosidade e conseqüente aumento da resistência à penetração de 1,4 para 9,4 bars. Observaram ainda, para solos franco-arenosos, que o mesmo aumento da densidade determinou semelhante diminuição da macro e microporosidade, com conseqüente aumento do valor da resistência à penetração de 0,6 para 3,4 bars. Portanto, além do rearranjo dos poros, a resistência depende também da composição granulométrica do solo, assim como de sua umidade.

As formas como se desenvolvem as forças de impedimento mecânico ao crescimento do sistema radicular das plantas são discutidas em detalhes nos trabalhos de CHANCELLOR (1971) e GREACEN & SANDS (1980).

Em relação à possibilidade das raízes superarem

a resistência do solo e penetrarem em poros de diâmetro menor que o seu próprio, por exercer pressão suficiente para expandi-lo ou por diminuir seu diâmetro para penetrá-lo, WIERSUM (1957) verificou que, quando a elongação das raízes era restrita por pressões externas, seu diâmetro geralmente aumentava. Adentrar esses poros depende da expansão das raízes contra uma pressão de resistência (GOSS & RUSSEL, 1980).

De acordo com RUSSEL (1977) e GOSS & RUSSEL (1980), se a pressão de resistência é suficiente para reduzir e não inibir o crescimento da raiz, o número de células de secção transversal, em específico na região do córtex, aumenta. Quando o crescimento em extensão é impedido, a zona de elongação encurta e as células podem alcançar seu comprimento máximo dentro do limite de 1 mm a partir do ápice, com os pêlos radiculares freqüentemente se desenvolvendo nessa zona. Exames morfológicos realizados pelos autores demonstraram distorções ou cizalhamento dos pêlos radiculares nessas raízes, isto porque elas são sustentadas por estes, de modo que a força axial recebida pelo ápice penetrante é transmitida a uma curta distância ao longo da raiz.

Quando do aumento da resistência do solo à penetração e da redução da macroporosidade, a taxa de elongação radicular é reduzida, fato este que ocorre de maneira exponencial em relação ao aumento da resistência do solo, até atingir um valor crítico de resistência acima do qual a penetração das raízes cessa (GREACEN & SANDS, 1980).

SANDS et al. (1979) encontraram grande restrição à penetração das raízes de *P. radiata* em solos arenosos do sul da Austrália para valores de resistência à penetração de 30,6 kgf/cm⁻².

Em experimentos de casa de vegetação, com solos arenosos sedimentares, WASTERLUND (1985) verificou que valores de resistência à penetração de 4,08 kgf/cm⁻² foram suficientes para inibir o crescimento do sistema radicular de plântulas de coníferas entre 16 e 20 dias.

Conduzindo experimento com *Pseudotsuga menziesii* em condições controladas, em solos tipo barro com intensidade de compactação variando entre 1,30 e 1,77 g.cm⁻³, HEILMAN (1981) verificou que a penetração das raízes declinou linearmente com o aumento da densidade, sendo estimados valores de 1,74 a 1,83 g.cm⁻³ como valores máximos de compactação que impedem a penetração das raízes nesse solo.

ZISA et al. (1980) obtiveram valores médios de penetração de 7,8 cm para o *P. nigra*, 7,7 cm para o *P. rigida* e 6,9 cm para *Picea abies*, em solo tipo barro-argiloso e barro-arenoso, verificando que o aumento da densidade global de 1,6 e 1,4 g.cm⁻³, respectivamente, começou a restringir a penetração das raízes.

A resistência à penetração vem sendo apresentada como um bom indicador de densidade do solo para prever a performance das plantas (SANDS et al., 1979; ZISA et al., 1980; HALVERSON & ZISA 1982), sendo que as mensurações efetuadas

com penetrômetro correlacionaram-se bem com a penetração das raízes (TAYLOR & RATLIFF, 1969).

A interrelação específica, resistência dos solos com o comprimento das raízes, depende do tipo de penetrômetro, método de aplicação e cuidados necessários quando da comparação dos dados obtidos (TAYLOR, 1971), de tal forma que é importante padronizar processos e equipamentos para que os resultados possam ser reproduzidos (FREITAG, 1971).

Analogamente à densidade global, a resistência à penetração apresenta variabilidade espacial no solo, tanto no sentido vertical como no sentido horizontal, dependendo da evolução e intensidade dos usos do solo a que o local foi submetido, profundidade, teor de matéria orgânica, umidade, etc.

SANDS et al. (1979) verificaram que a resistência à penetração de um solo arenoso, à densidade global constante, aumentou com a profundidade, devido a um acréscimo na sobrecarga de pressão e decréscimo no conteúdo de matéria orgânica. Os autores verificaram ainda que a resistência à penetração foi afetada pelo conteúdo de matéria orgânica e não pelo conteúdo de umidade.

Em termos de estratégia de penetração, as raízes procuram penetrar locais onde a resistência para tal é baixa, ou onde haja fragilidades estruturais como fissuras, interfaces, etc. Esse fato foi verificado por SANDS et al. (1979), para raízes de *P. radiata* em bolsas de solo de baixa resistência à penetração. KIMBER (1974) verificou que as raízes de

E. marginata penetram uma camada de laterita através de suas fissuras e interfaces, criando um sistema radicular auxiliar na camada de argila caolinítica, logo abaixo da camada de laterita.

2.4. EFEITOS DA COMPACTAÇÃO SOBRE AS ESPÉCIES FLORESTAIS

Existe na literatura uma grande quantidade de trabalhos a respeito dos efeitos da compactação sobre as plantas em relação ao seu crescimento e produtividade. Porém, as respostas obtidas pelos mesmos nem sempre são concordantes, provavelmente devido às diferentes interações entre as condições do ambiente e as variáveis da planta.

Fazendo uma revisão sobre os efeitos da compactação dos solos no crescimento das plantas, GREACEN & SANDS (1980) verificaram que, dos 142 trabalhos realizados entre 1970 e 1977, à respeito do assunto, 24 apresentaram redução na produção das culturas florestais, um apresentou aumento na produção e apenas um não apresentou nenhum efeito.

As principais espécies que vêm sendo estudadas são: *P. radiata*, *P. taeda*, *P. ellioti*, *P. ponderosa*, *P. nigra*, *P. sylvestris*, *Picea abies*, *Pseudotsuga menziesii*, *Abies grandis*, *Liquidambar styraciflua*, *E. grandis*, *E. delegatensis*, *E. deversivolor*, entre outras.

Os efeitos da compactação são observados em todos os estágios de crescimento, desde a germinação e sobrevi-

vência até a terceira rotação, tanto em termos de sistema radicular quanto de parte aérea.

Os efeitos da compactação do solo sobre as espécies florestais são estudados tanto em condições de casa de vegetação e de viveiro, como em condições de campo. Em condições de casa de vegetação e de viveiro, é comum o uso de colunas de solo compactadas artificialmente e acondicionadas em recipientes plásticos ou metálicos. Em condições de campo, o uso de trilhas de exploração é bastante comum, assim como linhas de plantio e camalhões.

2.4.1. Efeitos da compactação sobre a germinação e sobrevivência de espécies florestais

A germinação e sobrevivência de espécies florestais podem ser afetadas de maneira adversa pela compactação, embora os resultados sejam variados.

FOIL & RALSTON (1967) estudando o crescimento e estabelecimento de plântulas de *P. taeda* em solos barro-arenoso, barro e argiloso, em condições de casa de vegetação, verificaram que a compactação não afetou de maneira significativa a germinação, embora a percentagem de sobrevivência tenha sido uniformemente reduzida, sendo atribuído este fato à deficiência de aeração e impedimento mecânico ao crescimento das raízes. Nesta mesma linha, YOUNG et al. (1967) também verificaram uma pequena regeneração de *Pseudotsuga menziesii*, *Larix occi-*

dentalis e *P. ponderosa*, em áreas perturbadas, 4 anos após a exploração.

Os dados obtidos por HATCHELL et al. (1970) são oportunos e vem ratificar os resultados anteriores. Estes autores, trabalhando em condições de casa de vegetação, obtiveram redução de 25% na sobrevivência de mudas de *P. taeda*, aos 150 dias de idade, em solo barro-arenoso compactado a $1,08 \text{ g. cm}^{-3}$, em relação à plântulas da mesma espécie crescendo no mesmo solo, mas com densidade global de $0,75 \text{ g. cm}^{-3}$. Isto pode ser creditado ao fato das radículas sofrerem fortes restrições à penetração no solo compactado.

ZISA et al. (1980) verificaram diminuição na porcentagem de sobrevivência para 85, 76 e 72% do *P. nigra*, *P. rígida* e *Picea abies*, respectivamente, com efeito significativo para solo tipo barro-siltoso, à densidade global de $1,9 \text{ g. cm}^{-3}$.

A germinação e sobrevivência em áreas de regeneração natural podem igualmente ser afetadas. Steinbrenner & Gessel¹, citados por OMI (1986), relatam redução na sobrevivência de coníferas no estágio juvenil, em áreas naturalmente regeneradas, em trilhas de arraste de madeira.

HATCHELL et al. (1970), em condições de campo,

¹ STEINBRENNER, E.C. & GESSEL, S.P. Effect of tractor logging on soils and regeneration in the douglas-fir region of Southwestern Washington. Society of American Foresters Proceedings, 19: 77-80, 1955.

verificaram que a compactação de um solo barro-arenoso não afetou a germinação de sementes de *P. taeda* em trilhas de skidder, mas a sobrevivência das plântulas foi baixa nos solos altamente compactados.

A densidade global foi considerada uma das características mais importantes na determinação da classificação de sítios, para a implantação de talhões de *P. taeda* visando o controle de erosão, possibilitando a previsão de um péssimo desenvolvimento da população em sítios onde a densidade global excede a $1,45 \text{ g.cm}^{-3}$.

Relatos à respeito da sobrevivência e posterior crescimento de plântulas de *P. taeda* são apresentados por CAMPBELL et al. (1973). Segundo os autores, as plântulas dessa espécie não foram afetadas de forma significativa devido à compactação oriunda da operação de retirada de madeira. HATCHELL (1981) constatou fato semelhante para coníferas até a quarta estação de crescimento após o plantio. Nestes dois casos, o revolvimento do solo da cova durante o plantio reduziu os valores de densidade global do solo, e as chuvas auxiliaram a minimizar as diferenças de umidade.

2.4.2. Efeitos da compactação sobre o sistema radicular de espécies florestais

Para a maioria das espécies estudadas, o sistema radicular tem seu crescimento restrito pela compactação, com tendência de decréscimo no peso da biomassa e modificação no

comportamento das raízes primárias e secundárias.

O grau pelo qual a compactação afeta as raízes depende da espécie, tipo de solo e magnitude do efeito compactativo. Desse modo, o crescimento das raízes pode ser inibido em solos de textura fina, pobremente drenados, compactados e com deficiência de oxigênio, quando o solo não apresenta carência de oxigênio e água, o crescimento das raízes pode ser inibido pela resistência à penetração (SANDS & BOWEN, 1978; SANDS et al., 1979; ZISA et al., 1980; HEILMAN, 1981).

Têm-se observado modificações na distribuição das raízes totais e raízes finas (SANDS & BOWEN, 1978; WASTERLUND, 1985), embora as raízes laterais tenham, em alguns casos, proliferado em solos compactados (FOIL & RALSTON, 1967). Observa-se ainda o aumento de diâmetro das raízes laterais (SANDS & BOWEN, 1978) e diminuição da área superficial das raízes (MITCHELL et al., 1982).

Por outro lado, HILTON (1979) relata que o número de novas raízes emergentes em plântulas de *Juniperus virginiana* não foi afetado pelos diferentes graus de compactação aplicado a um solo barro-arenoso, durante o período de duas estações de crescimento, apresentando grande efeito, no entanto, as diferentes estações do ano.

Em termos de biomassa de raízes, verifica-se na maior parte dos casos, uma diminuição do peso seco (FOIL & RALSTON, 1967; MINORE et al., 1969; HATCHELL, 1970; SILVA et al., 1982; SNIDER & MILLER, 1985), com reduções superiores, al

gumas vezes, a 50% em relação ao controle. Porém, resultado inverso foi obtido por TRUJILLO (1976), que verificou um aumento de 19% na biomassa de raízes, para *P. ponderosa* com 19 meses de idade, crescendo em solo barro-síltico-argiloso, com intensidade de compactação variando de 1,02 a 1,28 g.cm⁻³.

Freqüentemente os fatores responsáveis pela inibição das raízes, em solos compactados interagem e são difíceis de serem separados (OMI, 1986).

2.4.3. Efeitos da compactação no crescimento da parte aérea de espécies florestais

À semelhança do crescimento do sistema radicular, o crescimento da parte aérea das plantas pode apresentar resultados variados devido às interações complexas existentes entre as características físicas dos solos e das espécies.

Se todos os requisitos necessários para o crescimento das plantas estiverem presentes em quantidades adequadas em um solo compactado, sua parte aérea se desenvolverá a taxas satisfatórias (SANDS & BOWEN, 1978), independente da compactação. Em outros casos, a compactação pode ser benéfica ao aumentar a difusão de íons e promover a absorção de nutrientes (KEMPER, 1971), embora possa também se revelar deletéria ao conteúdo de nutrientes e mineralização de matéria orgânica no solo (GREACEN & SANDS, 1980).

Em experimentos com plântulas, geralmente com

idades inferiores a um ano, ao aumento da densidade global do solo tem correspondido uma diminuição na altura das plântulas de várias espécies, entre elas: *P. ponderosa* (COCHRAN & BROCK, 1985), *Liquidambar styraciflua* (LOWERS & STONE, 1982), *P. radiata* (SANDS & BOWEN, 1978), *P. taeda* (FOIL & HALSTON, 1967; HATCHELL et al., 1980; MITCHELL et al., 1982; LOCKABY & VIDRINE, 1984; MELINDA-SAY et al., 1987) e *P. contorta* (ARNOTT et al., 1988).

Contrastando com os resultados anteriores, CAMPBELL et al. (1973) encontraram variações significativas de crescimento em altura, para plântulas de *P. taeda* crescendo em trilhas de skidder, em solo barro-arenoso e barro-argiloso, com densidade global variando entre 1,45 e 1,51 g.cm⁻³. HEILMAN (1981) obteve resultados semelhantes para plântulas de *Pseudotsuga menziesii*, crescendo em solo tipo barro, com densidade global variando de 1,30 a 1,77 g.cm⁻³.

Em análise de experimentos de compactação, em condições de laboratório, a altura das plântulas tem apresentado correlações fracas com a compactação e profundidade das raízes, não sendo recomendado o seu uso para prever o desempenho individual da planta (HALVERSON & ZISA, 1982).

Sobre a biomassa da parte aérea, não existe, na realidade, um consenso entre os diversos autores encontrados na literatura sobre os reais efeitos da compactação, conforme evidenciam os trabalhos de MINORE et al. (1969), TRUJILLO (1976), SILVA et al. (1977), SANDS & BOWEN, (1978), MITCHELL et al. (1982), BORGES (1983), MELINDA-SAY et al. (1987).

No estado adulto, o efeito da compactação no crescimento das árvores tem sido mensurado após o desbaste em plantios comerciais ou após o manejo de talhões multiâneos. As diversas operações mecanizadas dentro dos povoamentos modificam as propriedades físico-químicas dos solos, podendo ainda cortar e prejudicar o sistema radicular das árvores adjacentes aos locais de trânsito, sendo maior o prejuízo quanto mais superficiais estiverem as raízes.

Os silvicultores vêm questionando as perdas de produtividade devido a essas alterações, nas rotações subsequentes (LOCKABY & VIDRINE, 1984; KARR et al., 1987) e, embora inferências possam ser feitas a partir dos dados coletados nos estudos já realizados, ainda não é possível prescrever práticas silviculturais com a precisão necessária para proteger os solos vulneráveis e manter a produtividade do sítio.

No geral, o crescimento das árvores em zonas compactadas é menor em relação às testemunhas ou áreas não perturbadas, com estimativas de redução de crescimento variando entre 6 e 50% (OMI, 1986).

YOUNGBERG (1959) verificou para *Pseudotsuga menziesii*, crescendo em solo argiloso, uma diminuição do crescimento em altura de 22%, quando a densidade global de solo passou de 0,88 para 0,95 g.cm⁻³ e redução de 42% quando a mesma passou de 0,88 para 1,55 g.cm⁻³. WERT & THOMAS (1981) verificaram redução do crescimento em altura de 30% para as mesmas espécies quando a densidade do solo passou de 0,91 para 0,99 e

de 1,09 para 1,26 g.cm⁻³ nos 5 e 30 cm de profundidade do perfil do solo, respectivamente. Segundo os autores, essas árvores crescendo em trilhas compactadas apresentaram-se, na composição do dossel, como suprimidas ou com forte probabilidade de virem a ser suprimidas.

FROEHLICH (1979) relata uma pequena redução de 6 a 12% no crescimento de árvores de *P. ponderosa*, depois do desbaste dos talhões, e conseqüente aumento da densidade global, enquanto que HATCHELL et al. (1970) e LOCKBY & VIDRINE (1984) verificaram a redução superior a 50% para árvores de *P. taeda* em solo barro-arenoso e solo tipo barro.

Em termos de volume de madeira, tem-se verificado, em trilhas compactadas por skidder, uma estimativa de redução de volume variando de 45% após 26 anos de efetuada a operação de desbaste (Perry², citado por HATCHELL et al., 1970), a 80% após 32 anos (WERT & THOMAS, 1981; JACOBSEN, 1983). KARR et al. (1985) ponderam que a perda de produção volumétrica pode ser considerada grande em locais severamente compactados, com possível perda de produção comercial.

Um trabalho interessante de ser mencionado é o de MOEHRING & RAWLS (1970), no qual os autores criaram uma série de impactos compactativos, passando um trator seis vezes próximo às árvores, variando o número de lados atingidos de ca

² PERRY, T.O. Soil compactation and loblolly pine growth. Tree Planter's Notes, 67: 1-9, 1964.

da árvore-teste. Após cinco anos, o volume de crescimento foi mensurado. Quando a compactação foi limitada a um dos lados da árvore, o crescimento em volume foi levemente afetado, mas quando as árvores-teste tiveram 2, 3 ou 4 lados compactados, elas apresentaram volumes de 13,17%; 36,3% e 43,4% menores que o volume das árvores controle.

Considerando a complexidade das interações que ocorrem, torna-se necessária a obtenção de mais dados sobre os efeitos da compactação no crescimento das árvores para se determinar quais seriam os limites convenientes de medidas curativas e preventivas (GREACEN & SANDS, 1980).

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. MATERIAL

3.1.1. Local

O experimento foi conduzido em casa de vegetação, no Departamento de Ciências Florestais da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, em Piracicaba-SP, sob condições controladas.

3.1.2. Solo

O solo utilizado no experimento foi do tipo Latossolo Roxo Estruturado, de textura argilosa, conforme classificação do Departamento de Solos, Geologia e Fertilizantes, da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz". O referido solo foi coletado na Fazenda Areião/ESALQ, Piracicaba-SP.

As determinações analíticas de laboratório, para efeito de caracterização do solo, foram efetuadas em terra fina coletada na faixa de 25 a 75 cm de profundidade, expressas no QUADRO 1.

QUADRO 1. Caracterização físico-química do solo utilizado no experimento.

Profundidade (cm)	Composição granulométrica (%)			pH		M.O. (%)	P (ppm)	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Al ³⁺	H ⁺	ST	U (%)
	Areia	Silte	Argila	H ₂ O	CaCl ₂									
25-75	27,6	23,2	19,2	5,7	5,0	2,9	3	0,14	3,83	1,59	0,12	3,10	5,55	67

* TFSA: terra fina seca ao ar.

3.1.3. Espécies de *Eucalyptus* utilizadas

As espécies utilizadas no experimento foram o *Eucalyptus toreliana* F. Muell e o *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden.

O *Eucalyptus toreliana*, procedente de Kurunda, Austrália, de acordo com HALL et al. (1970), localiza-se entre as latitudes de 16° e 19°S, em uma pequena área próximo ao litoral, crescendo em competição com a floresta tropical pluvial ou nos limites desta, isolado ou em grupos. O clima na região de ocorrência é do tipo tropical com pequena variação de temperatura, com média máxima em torno de 29,4°C e média mínima em torno de 10 a 15°C, de acordo com a altitude. A precipitação média mensal é superior a 380 mm. Ocorre em solos barro ou barro-arenoso, de origem vulcânica, crescendo em morros e encostas de montanhas, a uma altitude variando entre 76 e 760 metros. Alcança alturas variando de 24 a 30 metros e diâmetro de 90 cm.

O *Eucalyptus grandis* utilizado no experimento é oriundo da Área de Produção de Sementes 4, da Celulose Nipobrasileira S/A. Em sua região de origem, na Austrália, segundo HALL et al. (1970), a espécie ocorre nas regiões costeiras, entre 16 e 30° de latitude sul, em clima subtropical com temperatura média variando entre 15 e 21°C. Para toda a amplitude de ocorrência da espécie, a precipitação média anual varia de 1000 a 1800 mm, com a precipitação média do mês mais seco por volta de 25 mm. Os sítios costeiros são livres de geada, embora elas possam ocorrer ocasionalmente em altas altitudes e depressões ao longo da costa. Ocorre em solos profundos, bem drenados e de origem vulcânica ou pluvial, nas planícies e encostas de morros dos vales mais férteis da parte sul da região de ocorrência e nos planaltos, na parte norte. A altitude varia desde o nível do mar até 900 metros. Produz indivíduos com altura variando entre 43 e 60 metros e diâmetro entre 1 e 1,5 cm.

3.2. MÉTODOS

3.2.1. Obtenção dos blocos compactados

O método utilizado foi o da compactação artificial de camadas de solo solto, o qual consiste na aplicação de uma força de impacto sobre camadas de solo até atingir o grau de compactação desejado.

3.2.1.1. Aparelho compactador

O aparelho utilizado para compactar artificialmente colunas de solo solto foi confeccionado a partir de modificações efetuadas em um penetrômetro de impacto modelo IAA/Planalsucar-Stolf (STOLF et al., 1983), e segue, em linhas gerais, o modelo descrito por BRUCE (1955). O mesmo consta de uma haste com um pistão de ferro fixo na extremidade inferior, dois limitadores de curso, um superior e outro inferior, e um peso de curso constante para provocar efeito compactativo com sua queda (Figura 1).

Figura 1. Esquema do aparelho compactador de solos e forma de compactação.

O referido aparelho apresenta as seguintes características:

- . peso de curso constante: 2 kg
- . curso de queda livre: 60 cm
- . diâmetro do pistão de ferro (embolo): 12,6 cm
- . energia de compactação: 36 kg.cm^{-3}

Para completar o aparelho, foi construída uma forma de compactação de 12,65 cm de diâmetro interno e 18 cm de altura, em ferro fundido, separada em duas partes para facilidade de manuseio. As paredes da forma foram fixadas, em sua base superior, em um anel metálico e, na inferior, em uma base metálica.

O aparelho permite obter amostras compactadas pela variação do número de batidas do peso sobre o pistão, depois de fixado a uma altura de queda adequada.

3.2.1.2. Operação de compactação

A operação de compactação do solo constou das seguintes etapas: a) secagem, destorroamento e peneiramento (malha de 2 mm) do solo; b) encharcamento do solo, com posterior drenagem livre até capacidade de campo, sendo o mesmo coberto com lona plástica para evitar perdas por evaporação; c) montagem da forma, a qual foi revestida internamente com embalagem de polietileno, para servir de invólucro ao bloco de solo e evitar que o mesmo ficasse aderido às paredes; d) colocação da primeira camada de solo solto, de espessura de 5 cm, dentro da for-

ma, nivelando-se a mesma para o perfeito assentamento do pistão; e) colocação do aparelho compactador sobre a camada, tomando-se o cuidado de mantê-lo sempre na posição vertical em ângulo de 90° . O percurso do peso foi fixado em 60 cm. Deixou-se o peso percorrer o cursor 4 vezes para a obtenção da densidade global desejada. Repetiu-se a operação para as camadas posteriores até o bloco atingir a altura de 17 cm.

A relação número de impactos pela densidade global induzida foi obtida através de teste prévio, onde camadas sucessivas de solo, com 5 cm de espessura, foram compactadas com 1,2,3,4,5,6,7,8,9 e 10 impactos, com posterior mensuração da densidade global através do método do anel volumétrico.

3.2.2. Obtenção dos blocos não compactados

Os blocos não compactados foram constituídos pelo solo peneirado e seco ao ar, colocado em embalagens plásticas perfuradas na base, dentro da fôrma, com o auxílio de um tubo de PVC e um funil para minimizar o efeito da separação de partículas por tamanho, durante o processo, procurando diminuir, dessa forma, possíveis variações localizadas de densidade global. De acordo com BOHM (1979), os melhores resultados obtidos no enchimento de recipientes ocorre quando o solo está com umidade próxima a dos solos secos ao ar.

A seguir, os blocos não compactados foram colocados em recipientes plásticos e irrigados a intervalos regulares de 48 horas para provocar e auxiliar o processo de rearran

jamento das partículas do solo solto, ao longo do tempo.

3.2.3. Montagem dos sistemas solo-recipiente

Para acondicionar os blocos de solo foram utilizados recipientes plásticos de 10 litros de capacidade, perfurados na lateral a uma altura de aproximadamente 5 cm, conservando, dessa forma, um pequeno reservatório de água para irrigação na base do recipiente.

Na montagem dos sistemas solo-recipiente seguiram-se as seguintes fases: a) foi colocada uma camada de pedra britada de aproximadamente 5 cm de espessura, no fundo do recipiente; b) uma tela de nylon, de formato circular e diâmetro de 12,6 cm, foi colocada sobre a camada de pedra; c) assentou-se o bloco de solo sobre a tela; d) preencheu-se os espaços vazios entre o bloco e a parede do recipiente com solo arenoso, provendo, desta maneira, maior estabilidade ao sistema e auxílio à irrigação; e) o solo nos recipientes foi irrigado até a capacidade de campo e assim mantido; f) identificou-se cada sistema para distinção dos tratamentos utilizados.

Um esquema do sistema bloco de solo-recipiente, pode ser visualizado na Figura 2.

O método permite a realização de estudos em plantas, isolando os fatores individuais que influenciam as raízes. Apresenta, como vantagem, maior facilidade de estudo em relação aos que são efetuados em condições de campo. Além dis-

so, as condições de crescimento podem ser uniformemente repetidas diversas vezes.

Figura 2. Corte transversal do sistema solo-recipiente.

3.2.4. Plantio e desbaste

O sistema de plantio adotado foi o de semeadura direta nos blocos compactados e não compactados. Esse sistema evita que as raízes venham a sofrer danos com as operações de repicagem e possível parada de crescimento durante o período de pegamento. Para tanto, foi retirado um pequeno volume de solo da parte central dos blocos compactados e em seu lugar, foi colocada terra fina seca ao ar, enquanto que nos blocos não compactados foi feito um pequeno orifício. A seguir foram semeadas, em cada bloco de solo, 6 a 7 sementes.

Vinte dias após a germinação das sementes efetuou-se o primeiro desbaste, deixando-se três plântulas em cada bloco. Dez dias após o primeiro desbaste, foi efetuado o segundo, deixando-se, agora, apenas uma plântula por bloco, mais próximo do centro do mesmo. Durante as operações de desbaste, procurou-se uniformizar a altura das plântulas.

3.2.5. Irrigação

A irrigação foi realizada periodicamente, conforme a superfície do bloco apresentava-se com sinais de seca. O método utilizado foi o da irrigação pela base do recipiente. Segundo BOHM (1979), a irrigação nesses moldes permite melhor aeração do solo, mantém sua estrutura e diminui a perda d'água e nutrientes por drenagem.

A água foi colocada no solo arenoso, ao redor dos blocos, até abastecer o depósito que se formou na camada de pedra britada na base do recipiente, movimentando-se para as plantas através da capilaridade do solo.

3.2.6. Adubação

Após 75 dias, foi efetuada adubação com solução nutritiva em todos os tratamentos. Utilizou-se a solução nutritiva completa de SARRUGE (1975), na concentração 1:1, aplicada 10 vezes entre 75 e 90 dias, na quantidade de 50 ml por planta, sobre a superfície dos blocos.

Os dados obtidos foram analisados através da análise de variância simples.

Para atender as condições de normalidade, exigidas para a análise estatística, os dados sobre o comprimento e área superficial das raízes foram transformados em logx.

3.2.8. Variáveis mensuradas

3.2.8.1. Variável climática

Com o auxílio do termômetro de máxima e mínima foi obtida a temperatura, dentro da casa de vegetação, no decorrer do experimento. Os dados são apresentados na **TABELA 1**.

TABELA 1. Temperatura média semanal observada dentro da casa de vegetação, no decorrer do experimento.

Semana	Temperatura média (°C)
1. ^a	27,0
2. ^a	29,4
3. ^a	26,9
4. ^a	25,7
5. ^a	27,9
6. ^a	25,6
7. ^a	24,4
8. ^a	24,4
9. ^a	23,2
10. ^a	24,3
11. ^a	22,6
12. ^a	23,4
13. ^a	20,0
14. ^a	17,2
15. ^a	19,9
16. ^a	20,0
17. ^a	21,0
18. ^a	21,0
19. ^a	20,1
20. ^a	21,4

3.2.8.2. Variáveis do solo

Ao final do experimento, foram coletados dados referentes à densidade global e resistência à penetração das raízes.

a) Densidade Global

A metodologia utilizada para a coleta dos valores de densidade global foi a do Anel Volumétrico de Kopeck (KIEHL, 1979), a qual consiste em introduzir um anel de bordos cortantes, de volume conhecido, na parede do bloco, por pressão. As amostras foram coletadas na lateral dos blocos, entre as profundidades de 6 e 11 cm. Quando do cálculo dos valores, as amostras foram secas em estufa a 105°C, até peso constante. A seguir, foram pesadas e os respectivos volumes dos anéis calculados. A densidade global foi calculada pela seguinte fórmula:

$$D = \frac{m}{V} \quad \text{g.cm}^{-3}$$

onde:

D = densidade global

m = massa seca da amostra de solo contida no anel volumétrico

V = volume do anel volumétrico

b) Resistência à Penetração das Raízes

A resistência à penetração das raízes foi mensurada com penetrômetro de bolso modelo CL-700, fabricado por Soiltest Inc. - USA, o qual mensura a resistência que o solo oferece à penetração do cursor em 1 cm de profundidade. Os valores de penetração foram coletados na parede dos blocos, a 1,3,5,7,10 e 15 cm de profundidade, a partir da superfície.

3.8.2.3. Variáveis do sistema radicular

a) Coleta e Armazenamento do Sistema Radicular

O método utilizado foi o da lavagem manual, descrito por BOHM (1979), o qual requer, para sua realização, um recipiente de 40 litros de capacidade, acoplado a um coador de malha extra-fina (Gase Suíça "Monge" NY 120 HD) por um cano. Esta operação apresentou as seguintes etapas: a) os blocos compactados foram imersos em água por 24 horas para facilitar o desprendimento das partículas do solo das raízes; b) os blocos foram colocados, um a um, dentro do separador de raízes e o solo foi desagregado com jato d'água, até não haver mais raízes dentro do vaso flutuador; c) as raízes coletadas foram acondicionadas em embalagens de polietileno, em solução alcoólica 20%, devidamente identificadas e armazenadas a baixas temperaturas, para posteriores mensurações, conforme recomendado por BOHM (1979).

b) Mensuração das Variáveis

Foram mensuradas as seguintes variáveis: biomassa da raiz pivotante e do sistema radicular absorptivo, biomassa total, diâmetro das raízes, diâmetro da raiz pivotante, área da superfície radicular, número e distribuição das raízes laterais de primeira ordem. A metodologia adotada para cada variável é descrita conforme segue:

b.1) Diâmetro das raízes: foram seccionados pe-

quenos pedaços de segmentos de raízes mais ou menos uniformes, os quais foram colocados sobre lâminas de vidro e projetados em fundo branco com auxílio de um projetor de fibras de celulose Baush & Lomb. Os valores ampliados foram corrigidos para valores reais através do fator de correção 0,217 e, posteriormente, classificados por classe diamétrica de amplitude de 0,25 mm.

O diâmetro das raízes pivotantes foi mensurado com o auxílio de paquímetro digital, nas proximidades do colo, terço médio e terço inferior.

b.2) Comprimento das raízes: o comprimento das raízes foi mensurado através do método dos intersectos de NEW MAN (1966), modificado por TENNANT (1975), que consiste em jogar, ao acaso, os segmentos de raízes sobre um retículo de valor conhecido, com uma lâmina de água sobre o mesmo, contando-se os pontos de intersecções entre as raízes e o retículo.

O número de intersecções foi transformado em comprimento de raízes com o auxílio da seguinte fórmula:

$$R = \frac{11}{14} . N . \text{valor do retículo},$$

onde:

R = comprimento das raízes

N = número de intersecções

Foram amostrados oito sistemas radiculares completos por tratamento, escolhidos dentro das classes de altura final, as quais foram calculadas através da seguinte fórmula:

$N^{\circ} \text{ Classes} = 1 + 3,33 \log n^{\circ} \text{ de observações}$

b.3) Área da superfície radicular: a área superficial das raízes foi calculada considerando-as como um cilindro e utilizando-se dos valores do comprimento e diâmetro das mesmas, através da fórmula:

$$\text{ASSR} = \pi . D . L$$

onde:

ASSR = área superficial do sistema radicular

D = diâmetro das raízes

L = comprimento das raízes

b.4) Biomassa das raízes: as raízes foram secas em estufa a $70^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$, em envelopes de alumínio, abertos, de tara conhecida, devidamente identificados, até peso constante, sendo então seu peso de massa seca determinada através de balança analítica.

Como durante a lavagem nem todas as partículas de solo se desprendem das raízes, foi necessário determinar o grau de contaminação para efetuar as devidas correções do peso da biomassa.

O método consistiu em amostrar cinco sistemas radiculares por tratamento, escolhidos ao acaso, tomando-se uma determinada quantidade de raízes secundárias e pivotante, determinando o seu peso de matéria seca e incinerando-as à 650°C . Ao final do processo, as cinzas foram lavadas com ácido clorídrico, filtradas por decantação, secas a 105°C e pesadas. Os

valores de contaminação obtidos (TABELA 2) foram subtraídos do peso da biomassa seca inicial.

TABELA 2. Contaminação da biomassa de raízes verificada para os quatro tratamentos (média de 5 amostras, ao acaso, por tratamento).

Tratamento	Espécies	Compactação	Contaminação (%)	
			Sistema radicular Pivotante	Secundário
1	<i>E. toreliana</i>	com	0,78	28,94
2	<i>E. toreliana</i>	sem	2,06	31,71
3	<i>E. grandis</i>	com	3,33	36,98
4	<i>E. grandis</i>	sem	3,80	32,11

3.2.8.4. Variáveis da parte aérea

Foram mensuradas as seguintes variáveis da parte aérea: altura, biomassa das folhas, biomassa do caule e biomassa total.

a) **Altura:** foi mensurada a altura de todos os indivíduos, por tratamento, a partir dos 30 dias de idade, até o término do experimento.

b) **Biomassa de folhas, caule e biomassa total da parte aérea:** as folhas foram separadas dos caules, colocadas em sacos de papel, identificadas e colocadas em estufa a $70^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ para secagem até o peso constante, sendo a seguir pesadas em balança semi-analítica.

O peso total da biomassa da parte aérea foi determinado pela somatória da biomassa das folhas com a biomassa do caule de cada planta.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. PROPRIEDADES FÍSICAS DO SOLO

4.1.1. Densidade global

Para compactar o solo à densidade global de $1,50 \text{ g.cm}^{-3}$, efetuou-se um estudo preliminar da relação entre o número de batidas do pistão e a densidade global induzida pelo mesmo, cujos resultados são apresentados na **Figura 4**.

Os valores de densidade global, coletados na superfície superior e inferior do bloco, mostraram-se diferenciados. O valor obtido na superfície inferior, para todas as intensidades compactativas. Isto ocorre devido ao fato das partículas se deslocarem enquanto a energia fornecida pelos impactos não atingir seu limite máximo.

A diferença de densidade global entre as duas superfícies consideradas foi $0,13-0,08-0,07$ e $0,05 \text{ g.cm}^{-3}$, para intensidades compactativas de 1, 4, 6, 10 batidas, demonstrando um decréscimo da diferença de densidade global entre as curvas, conforme aumenta o número de impactos.

Um recurso passível de ser utilizado para a uniformização da densidade global induzida no bloco é o de aplicar a metade do número de impactos na superfície superior, invertendo-o a seguir, e aplicando a outra metade dos impactos, conforme método utilizado por SILVA (1984). Ocorre porém, que, para utilizar esse processo, é necessário que o bloco seja constituído por uma única camada de solo a ser compactada, sendo exequível apenas em blocos de pequenas dimensões.

Figura 4. Relação entre o número de batidas e a densidade global induzida, com o solo à capacidade de campo, na superfície inferior (- -) e superfície superior (—).

O valor da densidade global obtida para o Latos solo Roxo, com 49% de argila, à intensidade compactativa de 10 batidas, foi de $1,74 \text{ g.cm}^{-3}$, semelhante ao valor de densidade global máxima obtida por SILVA (1984), para esse mesmo tipo de solo, com idêntico teor de argila. Esses valores são baixos quando comparados com os valores máximos de densidade global

de outros solos com menor teor de argila, como por exemplo, o Latossolo Vermelho-Amarelo compactado por SILVA (1984), que apresentou densidade máxima de $1,98 \text{ g.cm}^{-3}$ para um teor de argila de 25%.

O conteúdo de matéria orgânica presente no Latossolo Roxo, em torno de 2,9%, pode ter contribuído, conjuntamente com o teor de argila, para atenuar o efeito da força compactativa aplicada. Esta atenuação de efeito foi observada por SANDS et al. (1979), ALEXANDER (1980), SILVA (1984) e LENHARD (1986), entre outros.

Em relação à espessura das camadas de solo compactado, vários trabalhos indicam o uso de camadas de pequena espessura e diâmetro, procurando minorar os efeitos da distribuição das forças compactativas. ZISA et al. (1980), em estudo de estabelecimento e crescimento de coníferas em solos compactados, utilizaram blocos de 15 cm de altura e 6,5 cm de diâmetro, compostos por sucessivas camadas de 1 cm de espessura. HALVERSON & ZISA (1982) utilizaram idêntica espessura de camada e dimensões de blocos, porém, em ambos os trabalhos citados, não há referência a respeito da variação espacial da densidade global ocorrida dentro dos blocos.

No presente experimento, optou-se por camadas de solo solto de 5 cm de espessura para evitar o problema de excesso de interfaces dentro do bloco. Um maior número de camadas aumenta o número de interfaces e, devido ao fato da junção

entre elas nem sempre ser satisfatória, aumenta-se, por conseguinte, a probabilidade de surgirem pontos de menor resistência à penetração das raízes e alterações em relação à movimentação de água e modificações na densidade global no local. O *E. toreliana*, por desenvolver raízes secundárias em toda a extensão de sua raiz pivotante, apresentou algumas delas crescendo nessas interfaces, embora a maior parte tenha se desenvolvido dentro da camada de solo compactado.

Um outro motivo que levou ao uso de camadas de maior espessura foi a morosidade do trabalho proporcionada pelo método, além do ruído excessivo produzido e do grande número de blocos a serem compactados. Um maior número de camadas de menor espessura iria requerer um maior número de repetições da operação de compactação, aumentando ainda mais as variações de densidade global ou problemas de junção das interfaces camada/camada.

Os valores de densidade global mensurados ao final do experimento, encontram-se no QUADRO 2.

O tratamento não compactado apresentou valores médios de densidade global de 0,96 e 0,97 g.cm⁻³ para o *E. toreliana* e *E. grandis*, respectivamente, obtidos através do assentamento das partículas do solo de estrutura deformada, do molhamento do mesmo no decorrer do experimento e da ação das raízes.

Os valores obtidos no tratamento não compactado aproximam-se daqueles obtidos por GROHMANN & QUEIROZ NETO

(1966), PREVEDELLO & PREVEDELLO (1984) e SILVA (1984) para Latossolo Roxo com estrutura não deformada.

QUADRO 2. Os valores de densidade global obtidos nos blocos compactados e não compactados, para intensidade de 4 batidas, no término do experimento.

Espécie	Tratamento	Densidade global (g.cm ⁻³)
<i>E. toreliana</i> ¹	Compactado	1,40 A
<i>E. grandis</i> ²		1,41 A
<i>E. toreliana</i> ³	não Compactado	0,96 B
<i>E. grandis</i> ⁴		0,97 B
C.V. (%)		2,51

¹ - média de 20 repetições

² - média de 24 repetições

³ - média de 15 repetições

⁴ - média de 16 repetições

O efeito das 4 batidas é evidenciado pelo aumento do valor da densidade global nos tratamentos compactados. Os blocos compactados e plantados com *E. toreliana* apresentaram volumes médios de 1,40 g.cm⁻³, enquanto que os blocos compactados plantados com *E. grandis* apresentaram valores médios de 1,41 g.cm⁻³, valores estes que não diferiram estatisticamente entre si.

Os valores de densidade global, mensurados nas colunas de solo compactado, são semelhantes aos obtidos por GROHMANN & QUEIROZ NETO (1966) para o Latossolo Roxo compacta-

do artificialmente em condições de laboratório, com um aparelho semelhante ao utilizado neste experimento. Porém, deve-se ressaltar que, no trabalho dos autores acima citados, a densidade global foi obtida utilizando-se o bloco inteiro como amostra volumétrica, enquanto que, neste trabalho, utilizou-se o método do anel volumétrico e amostragem na lateral do bloco.

Os valores de densidade global observados no tratamento de compactação foram inferiores aos indicados pela **Figura 4**. Isto se deve ao fato de que o local de amostragem de densidade global foi diferente daquele considerado para construção das curvas, abrangendo uma área de menores valores de compactação. Outros fatores que poderiam ter contribuído para o resultado apresentado foram: a) maior número de interfaces contidas na amostra de solo dentro do anel volumétrico; b) maior movimentação do solo durante a amostragem; c) manuseio do bloco durante o preparo do mesmo para amostragem; d) penetração das raízes na parede do bloco durante o período final de experimentação.

4.1.2. Resistência à Penetração no Solo

Os valores relativos à resistência à penetração que o solo impõe às raízes, mensurados com o auxílio do penetrômetro, encontram-se no **QUADRO 3** e **Figura 5**.

QUADRO 3. Valores de resistência à penetração, observados nos tratamentos aos 135 dias de idade, mensurados com penetrômetro de bolso.

Profundi dade de Amostra- gem (cm)	Resistência à penetração (kg. cm ⁻²)				C.V. (%)
	<i>E. toreliana</i> ¹ (Compactados)	<i>E. grandis</i> ²	<i>E. toreliana</i> ³ (não compactados)	<i>E. grandis</i> ⁴	
1	0,62 Aa	0,71 Ab	0,07 Bc	0,06 Bc	19,85
3	0,77 Aa	0,82 Aa	0,10 Bb	0,08 Bb	33,19
5	1,06 Aa	1,10 Aa	0,13 Ab	0,14 Bb	25,03
7	1,25 Aa	1,24 Aa	0,19 Bb	0,19 Bb	10,27
10	1,25 Aa	1,25 Aa	0,20 Bb	0,20 Bb	8,49
15	1,24 Aa	1,13 Aa	0,20 Bb	0,20 Bb	8,43

Médias dentro de cada linha, seguidas por letras maiúsculas iguais, não representam diferenças significativas, pelo teste F, ao nível de 1%.

Médias dentro de cada linha, seguidas por letras minúsculas iguais, não apresentam diferenças significativas, pelo teste Tukey, ao nível de 5%.

¹ - médias de 20 repetições

² - médias de 21 repetições

³ - médias de 15 repetições

⁴ - médias de 16 repetições

Observa-se que houve diferenças significativas entre os tratamentos compactados e não compactados, em todas as profundidades amostradas, com os tratamentos compactados apresentando valores maiores que os não compactados.

Houve, também, para todos os tratamentos, uma tendência à diminuição dos valores de resistência até os 5 cm de profundidade, efeito este mais perceptível nos tratamentos compactados.

Figura 5. Comportamento da resistência do solo à penetração (kg.cm^{-2}), em coluna de solo argiloso compactado (--) e não compactado (—), plantados com *E. torelia* na ($\square$) e *E. grandis* ($\bullet$).

Nos blocos compactados e plantados com *E. torreliana*, os valores de resistência à penetração, observados nas profundidades de 1, 3 e 5 cm foram, respectivamente, 50%, 38% e 15% menores que o valor observado a 10 cm. Nos blocos compactados e plantados com *E. grandis*, os valores de resistência à penetração foram, respectivamente, 43%, 34% e 12% menores que o valor observado a 10 cm.

Os tratamentos não compactados apresentaram comportamento semelhante de resistência à penetração, mas os valores observados foram relativamente menores que os do tratamento compactado.

Apenas no tratamento compactado e na camada inicial de 1 cm de espessura, as duas espécies apresentaram diferenças significativas entre si, não se evidenciando essas diferenças, entre as espécies, nas outras profundidades amostradas.

A partir dos 90 dias, surgiram fissuras na superfície dos blocos compactados, para as duas espécies utilizadas, com o acentuamento do fenômeno até o término do experimento.

A diminuição dos valores de resistência à penetração, nas camadas superficiais dos blocos de solo, depende da intensidade de compactação proporcionada, do teor de umidade, da localização da camada compactada e da força ou vigor que o sistema radicular apresenta para vencer essa resistência. Uma explicação possível para o fato remete a discussão para a dis

tribuição do número de raízes laterais de primeira ordem. O *E. grandis* apresenta tendência de concentrar suas raízes laterais de primeira ordem próximo à superfície do solo, conferindo a estas um aspecto de rede radial de nervuras nos blocos compactados e não compactados, podendo, inclusive, ter auxiliado no processo de rachaduras superficiais e no rompimento da camada do solo.

Embora apresentando um comportamento de distribuição diferenciado, o *E. toreliana* provocou efeito semelhante, mas de maior intensidade, proporcionando ao solo, aos 135 dias, valores menores de resistência à penetração na camada inicial de 1 cm de espessura que aqueles obtidos para o *E. grandis*.

O comportamento do *E. toreliana* asseguraria êxito no seu estabelecimento em áreas compactadas superficialmente, tendo em vista seu sistema radicular apresentar comportamento mais agressivo que aquele mostrado pelo *E. grandis*.

Apesar do *E. toreliana* apresentar emissão de raízes laterais de primeira ordem em quase toda a extensão da raiz pivotante, verificou-se que as mesmas não influenciaram de maneira sensível a diminuição da resistência à penetração, em profundidades abaixo de 5 cm. Na realidade, ocorre que essas raízes laterais apresentam menor ramificação em relação às aquelas próximas à superfície, deixando para ter um melhor desenvolvimento na interface bloco/filme plástico, onde as condições de aeração e nutrição foram melhores.

A interface bloco de solo/filme plástico constituiu-se em uma área de menor resistência à penetração, permitindo que as raízes cresçam nesse espaço com pequenas modificações em sua morfologia. Isto vem de encontro com a estratégia

de penetração das raízes, que procuram penetrar sempre em locais de menor resistência do solo, conforme evidenciado nos trabalhos de KIMBER (1974) e SANDS et al. (1979).

Para se considerar de maneira mais apropriada os resultados obtidos, há que se observar 3 fatores importantes. O primeiro deles refere-se aos valores de resistência à penetração, observados neste experimento, os quais são baixos quando comparados com valores considerados limitantes ao crescimento, obtidos por ZISA et al. (1980), para plântulas de *P. rigida*, *P. nigra* e *Picea abies* ($9,59 \text{ kg.cm}^{-2}$) em solo barro-siltoso.

Os dados também são contrastantes com aqueles obtidos por WASTERLUND (1985), com valor de $9,08 \text{ kg.cm}^{-2}$, para plantas de coníferas crescendo em solo arenoso, em condições de laboratório. Para condições de campo, com as plantas em idade adulta, SANDS et al. (1979) verificaram, através do uso do penetrômetro, que valores superiores a $30,6 \text{ kg.cm}^{-2}$ atuaram como fator limitante à penetração das raízes.

Com base nos resultados obtidos e discussão dos autores citados, pode-se afirmar que, nas condições em que se desenvolveu o experimento, a resistência à penetração não causou restrições que pudessem afetar, de maneira severa, o crescimento e desenvolvimento das plantas.

Um outro fator a ser considerado é o posicionamento da camada compactada no perfil do bloco experimental. No

presente estudo, as raízes tiveram que penetrar no bloco totalmente compactado, logo após a germinação, estágio em que as raízes são finas e com capacidade de penetrar pequenos poros. Se a camada compactada estivesse posicionada de maneira subsuperficial, as raízes, ao atingi-la, poderiam apresentar um diâmetro maior, dificultando sua penetração. Esse comportamento foi verificado por BACCHI (1976) para cana-de-açúcar e por BORGES (1986) para *E. camaldulensis*, *E. grandis* e *E. tereticornis*.

Diante dos aspectos levantados, torna-se importante o estudo do comportamento do *E. toreliana*, em perfil de solo com camadas subsuperficial compactada, em condições de laboratório.

O último fator a ser considerado é o local de amostragem da resistência à penetração. O mesmo não foi ideal, pois, a parede do bloco constitui-se numa região de maior variação de densidade global, além de sofrer prováveis deformações originadas do transporte, preparo e manuseio dos blocos para amostragem. Evitou-se mensurar os valores de resistência à penetração nas interfaces, devido a possíveis fragilidades estruturais aí existentes.

Os dados observados, nas condições do experimento, apontam para as duas espécies um potencial de superar a resistência à penetração do solo e auxiliar na recuperação de algumas de suas propriedades físicas, em camadas próximas à superfície. Porém, esse potencial somente se efetivará caso as

condições de umidade, aeração e nutrientes não sejam limitantes e a camada superficial do solo apresente fragilidades estruturais ou resistência à penetração abaixo do limite crítico.

4.2. SISTEMA RADICULAR

4.2.1. Distribuição das raízes laterais de primeira ordem

Após a retirada e lavagem dos sistemas radiculares de dentro dos blocos de solo, os mesmos foram divididos em raiz pivotante e sistema radicular obsortivo, sendo subdividido, este último, em raízes laterais de primeira ordem e outras raízes laterais de ordem superior.

O exame da arquitetura radicular do *E. torelia-*na e do *E. grandis* mostrou que os mesmos possuem padrões distintos de distribuição de raízes laterais de primeira ordem. Nota-se, através do QUADRO 4, que a compactação não afetou, de maneira significativa, o número de raízes laterais de primeira ordem e nem sua distribuição.

O *E. toreliana* apresentou, em média, 5 raízes laterais de primeira ordem na região do colo radicular e 15 dessas raízes distribuídas ao longo da raiz pivotante, em ambos os tratamentos. Não ocorreu simetria na distribuição das

QUADRO 4. Distribuição das raízes laterais de primeira ordem, diâmetro superior, médio e inferior da raiz pivotante e peso de biomassa seca do sistema radicular do *E. toreliana* e *E. grandis*.

Espécie	Tratamento	Distribuição das raízes laterais de primeira ordem			Diâmetro da raiz pivotante (mm)			Biomassa seca (g)		
		Colo	Abaixo do colo	Total	Superior	Médio	Inferior	Pivotante	Sistema Absortivo	Total
<i>E. toreliana</i>	Compactado ¹	5,30 A	15,34 A	20,64 A	3,93 A	2,30 A	1,17 A	0,3519 A	1,5350 A	1,8869 A
	Não compactado ¹	5,56 A	15,22 A	20,78 A	4,24 A	2,36 A	1,35 A	0,4491 A	1,7417 B	2,1908 B
<i>E. grandis</i>	Compactado ²	9,82 B	4,86 B	14,68 B	3,23 A	1,22 A	0,71 A	0,2304 B	1,2655 C	1,4959 C
	Não compactado ³	10,78 B	5,44 B	14,22 B	4,03 A	1,46 A	0,65 A	0,1604 B	1,5569 A	1,7173 D
CV (%)		26,47	30,64	24,29	26,82	40,22	44,14	57,20	25,04	25,44

Média dentro de cada coluna, seguidas de mesma letra, não diferem significativamente entre si, pelo teste F, ao nível de 1% de probabilidade.

¹ - média de 23 repetições

² - média de 22 repetições

³ - média de 18 repetições

raízes laterais de primeira ordem, nas duas regiões consideradas.

Contrastando com o *E. toreliana* o *E. grandis* apresentou, aproximadamente, o dobro de raízes laterais de primeira ordem na região do colo radicular e apenas 5 dessas raízes, em média, distribuídas ao longo da raiz pivotante, com a particularidade das mesmas se concentrarem logo abaixo da região do colo ou na extremidade inferior da raiz. Também não houve simetria na distribuição das raízes laterais de primeira ordem. Em *E. grandis*, com 8 meses de idade, em condições de campo, KREJCI et al. (1986) verificaram grande emissão de raízes laterais de primeira ordem na região do colo, com as mesmas crescendo próximas à superfície do solo.

Contrastando com os resultados obtidos neste experimento, SANDS & BOWEN (1978), estudando o comportamento de *P. taeda*, aos 160 dias de idade, frente à elevação da densidade global de um solo arenoso de 1,30 para 1,60 g.cm⁻³, verificaram que ocorreu um aumento significativo do número de raízes laterais de primeira ordem, passando o mesmo de 60 para 89 raízes.

Valores específicos de distribuição espacial das raízes laterais de primeira ordem e seu número total não são encontrados, para as duas espécies, na literatura.

É possível que a diferença no número total de raízes laterais de primeira ordem, existente entre as duas es-

pécies de *Eucalyptus*, contribua para com as diferenças detectadas entre as variáveis mensuradas. Enfatizando este aspecto importante, NAMBIAR (1984) sugere que ocorra, provavelmente, uma forte interrelação entre o vigor das plantas e o número de raízes laterais de primeira ordem.

As diferenças de padrão de distribuição das raízes laterais de primeira ordem e de arquitetura do sistema radicular podem ser atribuídas ao patrimônio genético de cada espécie, embora fatores do ambiente possam contribuir para aumentar a variabilidade entre e dentro as espécies. Esses fatos foram observados para diversas espécies, conforme constatações de RUSSEL (1977), KRAMER & KOZLOWSKY (1979), SUTTON (1980), FOGEL (1983), entre outros.

A melhor arquitetura radicular do *E. torrelliana*, em relação ao *E. grandis*, pode configurar-se em fator importante de sobrevivência e crescimento da espécie durante épocas de estresse hídrico.

Embora a maior parte dos sistemas radiculares situem-se próximos à superfície do solo, devido às melhores condições de aeração e ciclagem biogeoquímica de nutrientes, a emissão de raízes laterais de primeira ordem, em profundidade, pode auxiliar a absorção de água e nutrientes nas camadas mais profundas, onde a competição por esses elementos é menor do que nas camadas superficiais.

Em linhas gerais, a emissão de raízes laterais

de primeira ordem, ao longo da raiz pivotante, em detrimento de sua concentração próximo à superfície, associada a possível capacidade das espécies de romperem ou atravessarem camadas compactadas, pode ser uma estratégia muito importante na sobrevivência e desenvolvimento das espécies florestais sob condições edafoclimáticas inadequadas de solos compactados.

4.2.2. Diâmetro da raiz pivotante

Os valores mensurados para o diâmetro da raiz pivotante são apresentados no QUADRO 4. O diâmetro do terço superior não apresentou diferenças significativas para os efeitos da compactação e para os efeitos da espécie. Para os valores de diâmetro do terço médio e terço inferior não se observou diferenças significativas devido aos efeitos da compactação, mas, apenas devido aos efeitos da espécie.

O fato do diâmetro do terço superior não apresentar diferenças significativas devido à espécie deve-se provavelmente, à característica do *E. grandis* de emitir maior número de raízes laterais de primeira ordem nessa região, em relação ao *E. toreliana*, o que implicaria em maiores modificações anatômicas e, possivelmente, em maiores necessidades de formações estruturais para suporte e transmissão de metabólitos, água e nutrientes.

Os efeitos da compactação sobre o diâmetro da raiz pivotante ainda não estão bem determinados, havendo na li

teratura resultados contraditórios. Embora os efeitos da compactação não sejam considerados significativos, observa-se que os tratamentos em solo compactado apresentaram valores menores de diâmetro que os tratamentos em solo não compactado. Valores semelhantes foram obtidos por LOCKABY & VIDRINE (1984), para as raízes do *P. taeda* em um gradiente de densidade global. Por outro lado, resultados contrários foram obtidos por SANDS & BOWEN (1978), para plântulas de *P. radiata* crescendo em solo arenoso com valores crescentes de densidade global.

Em relação ao diâmetro médio da raiz pivotante e o efeito da espécie, verificou-se que o *E. toreliana* apresentou valores de 47% e 38% superiores nos tratamentos compactado e não compactado, em relação ao *E. grandis*. Para o diâmetro inferior a diferença foi de 40% e 52% a mais, para os tratamentos compactados e não compactados, respectivamente.

As raízes pivotantes das duas espécies, nos dois tratamentos utilizados, atravessaram completamente seus respectivos blocos, sem apresentar tortuosidade ou outras deformações. Dessa forma, a raiz pivotante foi induzida a penetrar no bloco compactado, não sendo possível detectar se as duas espécies são capazes de penetrar camadas compactadas subsuperficiais, após crescerem em uma camada superficial não compactada. Para o *E. grandis*, aos 8 meses de idade, KREJCI et al. (1986) verificaram que o impedimento mecânico, proporcionado pela camada subsuperficial do solo compactado, não permitiu a penetração e crescimento da raiz pivotante nesse espaço.

4.2.3. Biomassa do sistema radicular

Para efeito de análise da biomassa, o sistema radicular foi dividido em biomassa da raiz pivotante e biomassa do sistema radicular absortivo, uma vez que havia possibilidade de se obter respostas diferenciadas desses componentes aos tratamentos aplicados. Os resultados estão demonstrados no QUADRO 4.

O peso de biomassa seca da raiz pivotante mostrou diferenças significativas devido apenas ao efeito da espécie, com o *E. toreliana* apresentando valores superiores a 50% em relação ao *E. grandis*.

Por outro lado, os efeitos da compactação sobre os componentes do sistema radicular não apresentaram diferenças significativas. Nesse sentido, um fato interessante a ser notado é que o *E. toreliana* apresentou valores ligeiramente superiores de biomassa seca no tratamento não compactado, em relação ao compactado, enquanto que o *E. grandis* apresentou relação inversa.

O sistema radicular absortivo apresentou diferenças significativas tanto para os efeitos da compactação quanto para os efeitos da espécie. Em linhas gerais, os tratamentos compactados apresentaram valores menores de peso de biomassa seca que os não compactados (11,87% para o *E. toreliana* e 18,72% para o *E. grandis*), enquanto que para o efeito das espécies, o *E. toreliana* apresentou valores de biomassa seca 10,61%

e 17,56% maiores que o *E. grandis*, nos tratamentos compactado e não compactado, respectivamente.

O peso total de biomassa seca do sistema radicular, de maneira similar à do sistema absortivo, apresentou diferenças significativas devido aos efeitos da compactação (valores 13,87% e 12,89% menores nos tratamentos compactados, para o *E. toreliana* e *E. grandis*, respectivamente).

Para o efeito da espécie, o *E. grandis* apresentou valor de biomassa seca 21,52% menor que o *E. toreliana*, no tratamento não compactado, e 20,72% menor no tratamento compactado.

Os valores obtidos para biomassa total do sistema radicular são compatíveis com a tendência observada por outros autores para diferentes espécies, conforme evidenciado na **TABELA 3**. Observa-se que ocorre uma tendência geral de redução do peso da biomassa nos solos com maior valor de densidade global, em relação aos de menor valor, fato que, praticamente, independe da espécie e da idade.

TABELA 3. Efeitos da compactação na produção de biomassa do sistema radicular de espécies florestais, em condições de casa de vegetação.

Espécie	Idade (dias)	Densidade global (g.cm ⁻³)	Biomassa (g)	Referência
<i>Theobroma cacao</i>	180	1,00	17,00	SILVA et al. (1977)
		1,30	12,00	
<i>P. taeda</i>	133	1,20	0,70	MITCHELL et al. (1982)
		1,40	0,50	
		1,80	0,35	
<i>P. radiata</i>	151	2,00	0,30	SANDS & BOWEN (1978)
		1,35	5,60	
		1,48	4,90	
		1,60	3,00	
<i>E. grandis</i> ¹	90	0,85	0,65 ²	BORGES (1986)
		1,05	0,46	
		1,15	0,58	
		1,25	0,49	
		1,35	0,63	
<i>E. tereticornis</i> ¹	90	0,85	0,52 ²	BORGES (1986)
		1,05	0,50	
		1,15	0,54	
		1,25	0,55	
		1,35	0,49	
<i>E. camaldulensis</i> ¹	90	0,85	0,67 ²	BORGES (1986)
		1,05	0,46	
		1,15	0,56	
		1,25	0,39	
		1,35	0,40	

¹camada compactada subsuperficial.

²valor referente a duas plantas/vaso.

4.2.4. Comprimento do sistema radicular

O QUADRO 5 apresenta os valores de comprimento do sistema radicular por classe de diâmetro e raízes.

Em linhas gerais, os resultados demonstram que, embora não significativas, ocorreram diferenças de comprimento do sistema radicular causadas pelos efeitos da compactação. O *E. toreliana* apresentou comprimento do sistema radicular 15,48% maior no tratamento compactado, em relação ao não compactado, enquanto que o *E. grandis* apresentou resultado inverso, com valores 4,79% maiores para o tratamento não compactado, em relação ao compactado. Dessa maneira, a compactação pode ter induzido o crescimento das raízes do *E. toreliana* e reduzido o crescimento das raízes do *E. grandis*, em relação aos seus tratamentos não compactados.

Os fatores que levaram as duas espécies a desenvolverem comportamentos diferenciados ainda não são plenamente conhecidos. Uma hipótese possível para explicar tal fato seria o patrimônio genético de cada espécie, que responderia de maneira diferenciada ao ambiente. Porém, outros fatores podem ter agido de maneira direta ou indireta, requerendo, portanto, maiores investigações para respostas mais conclusivas.

A tendência da compactação em diminuir o comprimento do sistema radicular, de maneira não significativa, foi verificado por SQUIRE et al. (1978) para o *P. radiata*, aos 8 anos de idade, plantado em solo arenoso de baixa qualidade. Por

QUADRO 5. Comprimento do sistema radicular do *E. toreliana* e *E. grandis* nos tratamentos compactado e não compactado.

Espécie	Tratamento	COMPRIMENTO DO SISTEMA RADICULAR (mm) (área da amostra = 124,69 cm ²)					
		CLASSE DE DIÂMETRO (mm)					
		0,00-0,25 (I)	0,26-0,50 (II)	0,51-0,75 (III)	0,76-1,00 (IV)	1,01-1,25 (V)	Total
<i>E. toreliana</i>	Compactado	786,87 A	686,58 A	142,38 E	27,56 A	5,20 A	1.659,40 A
	Não compactado	741,93 A	571,21 A	86,35 B	16,38 B	9,72 A	1.437,86 A
<i>E. grandis</i>	Compactado	680,30 A	361,20 B	68,10 C	33,46 A	38,07 A	1.188,96 B
	Não compactado ¹	853,56 A	324,12 B	44,31 D	17,10 B	6,11 A	1,245,97 B
CV(%)		11,29	8,84	23,56	51,88	93,41	6,17

¹ Média de 9 repetições; demais tratamentos representam a média de 8 repetições

Médias dentro de cada coluna seguidas de mesma letra maiúscula, não diferem entre si significativamente, pelo teste F, ao nível de 5% de probabilidade.

outro lado, efeitos significativos de diminuição de comprimento das raízes dessa espécie foram obtidas por SANDS & BOWEN (1978) para valores crescentes de densidade global.

Os valores de comprimento do sistema radicular obtidos para o *E. toreliana* aproximam-se daqueles verificados por KUMMEROW et al. (1981) para o cacau (*Theobroma cacao* L.) em condições de campo.

Até que ponto o sistema radicular na interface bloco/filme plástico teve seu desenvolvimento afetado, é uma incógnita. Na interface, as condições de umidade, aeração e nutrientes foram melhores do que dentro do bloco de solo, com as raízes desprendendo menor esforço para a absorção de água e nutrientes, além de encontrarem resistência à penetração praticamente nula.

Os efeitos da espécie sobre o comprimento do sistema radicular, detectados através da análise de variância, mostraram-se significativos. O *E. toreliana* apresentou um comprimento 39,57% maior que o *E. grandis* no tratamento compactado e 33,18% maior no não compactado.

Provavelmente, o maior comprimento do sistema radicular esteja ligado a sua arquitetura e ao número de raízes laterais de primeira ordem. A arquitetura, possivelmente, atuaria no sentido de distribuir as raízes laterais de primeira ordem ou concentrá-las em um determinado volume de solo, enquanto que o número dessas raízes desempenharia um papel fundamental

para o desenvolvimento de um sistema radicular de maior ou menor extensão. Alicerçando esta última hipótese, o trabalho de NAMBIAR (1984) enfatiza a importância do número de raízes laterais de primeira ordem e seu papel no crescimento e desenvolvimento das plantas.

A distribuição do comprimento das raízes nas classes diamétricas (QUADRO 5 e Figura 6) demonstra que a maior parte do comprimento total localizou-se entre as raízes com diâmetro inferior a 0,5 mm.

Os efeitos da compactação e da espécie, alternaram-se conforme a classe de diâmetro. Na classe I não ocorreram diferenças significativas, tanto para os efeitos da compactação, quanto para os efeitos da espécie, com o *E. grandis* apresentando os dois valores extremos de comprimento entre os tratamentos utilizados. As diferenças significativas na classe II ocorreram apenas em função dos efeitos da espécie. O *E. toreliana* apresentou valores 90% e 76,19% maiores que aqueles obtidos para o *E. grandis*, nos dois tratamentos.

Divergindo das classes I e II, a classe III apresentou diferenças significativas em função dos efeitos da compactação (comprimentos 64,88% e 53,69% maiores nos tratamentos compactados em relação aos não compactados, para o *E. toreliana* e *E. grandis*, respectivamente). Diferenças significativas também foram observadas nessa classe, para os efeitos da espécie, com o *E. toreliana* apresentando valores de comprimento

109,07% e 94,88% maiores que o *E. grandis*, nos tratamentos compactados e não compactados, respectivamente.

Figura 6. Distribuição relativa do comprimento do sistema radicular, por classe de diâmetro de raízes, nos tratamentos.

Por outro lado, a classe IV apresentou diferenças significativas devido aos efeitos da compactação, com os tratamentos compactados apresentando valores 68,25% e 95,67%, maiores que o tratamento não compactado para o *E. toreliana* e *E. grandis*, respectivamente. Na classe V, mesmo considerando o valor obtido para o tratamento compactado do *E. grandis*, não foram detectadas diferenças significativas devido à espécie ou à compactação.

A partir da classe diamétrica VI, algumas repetições dentro de cada tratamento passaram a não apresentar valores de comprimento dentro das classes, sendo pouco comum encontrar raízes com diâmetro acima de 1,26 mm, de tal forma que as classes VI, VII e VIII (1,26-1,50; 1,51-2,00 e 2,01-2,50 mm, respectivamente) não foram analisadas, embora seus valores constem no comprimento total de cada tratamento.

Nota-se ainda que, a partir da classe III de diâmetro, o coeficiente de variação aumentou, alcançando valores de até 93,41% devido ao fato de nem todas as repetições apresentarem raízes.

A fixação do valor de amplitude da classe diamétrica em 0,25 mm foi arbitrária, pois, ainda não há convenção estabelecida definindo a amplitude de diâmetro das raízes finas.

O uso dessa amplitude, aparentemente, foi satisfatório para as condições do presente experimento. Porém, estudos de frequência de classe de diâmetro tornam-se necessários para uma melhor compreensão dos efeitos dos tratamentos e distribuição do comprimento das raízes.

Nota-se, ainda, através do QUADRO 5 e Figura 6, que 89% e 91% do comprimento total do sistema radicular do *E. toreliana*, nos tratamentos compactados e não compactados, respectivamente, é composto por raízes cujos diâmetros apresentam valores inferiores a 0,5 mm. Para o *E. grandis*, a percentagem

do comprimento total foi de 88% e 94%, para os tratamentos compactados e não compactados, respectivamente. Estes resultados seguem a tendência daqueles obtidos por ROBERTS (1976), que verificou que aproximadamente 90% do comprimento do sistema radicular de *P. sylvestris* foi composto por raízes cujos diâmetros apresentaram valores inferiores a 0,5 mm.

O fato da maior quantidade de raízes, em termos de comprimento, apresentar diâmetro muito pequeno pode ser de muita importância para vencer a resistência do solo à penetração, visto que as raízes de pequeno diâmetro conseguiriam penetrar com maior facilidade nas fissuras e poros.

Um coeficiente utilizado na comparação, entre espécies, da exploração do solo pelo sistema radicular é a densidade de raízes, a qual pode ser expressa em termos de comprimento de raízes por volume de solo. Os valores calculados para os tratamentos são apresentados na TABELA 4.

TABELA 4. Densidade de raízes, calculada para o *E. toreliana* e *E. grandis* nos tratamentos compactados e não compactados.

Espécie	Tratamento	Densidade de raízes (cm. cm ⁻³)
<i>E. toreliana</i>	Compactado	0,78
	Não compactado	0,68
<i>E. grandis</i>	Compactado	0,56
	Não compactado	0,59

Considerou-se o volume total do bloco como explorado uniformemente pelo sistema radicular. Dessa maneira, obteve-se valores de densidade de 0,78 e 0,68 cm^{-3} de raiz por cm^{-3} de solo, nos tratamentos compactados e não compactados, para o *E. toreliana*, enquanto que para o *E. grandis* os valores observados nesses tratamentos foram de 0,56 e 0,59 cm.cm^{-3} .

O fato do *E. toreliana* apresentar maior comprimento de raízes por volume de solo, associado à arquitetura de seu sistema radicular e ao número de raízes laterais de primeira ordem, auxilia a compreensão do melhor crescimento e desenvolvimento que a espécie apresentou.

Para determinadas condições de compactação, se a resistência à penetração no solo não apresentar valores limitantes, a maior densidade de raízes pode significar uma maior possibilidade de rompimento da estrutura induzida, auxiliando o solo a retornar a valores próximos aos valores originais de densidade global.

Dados referentes à densidade de raízes (cm.cm^{-3}) e, em particular, para o gênero *Eucalyptus*, são escassos e os valores relatados para outras espécies foram mensurados em condições de campo. Nessas condições, ROBERTS (1976) observou, para o *P. radiata*, uma densidade de raízes de 5,26 cm.cm^{-3} , nos 15 cm iniciais no perfil, diminuindo a referida densidade com a profundidade.

4.2.5. Área superficial do sistema radicular

Os valores de área superficial do sistema radicular, calculados a partir do diâmetro e comprimento das raízes, são apresentados na TABELA 5.

Embora não significativas, ocorreram diferenças entre os tratamentos compactados e não compactados, para as duas espécies. Em contraste com o maior comprimento observado nas raízes, o *E. toreliana* apresentou valor de superfície radicular 26,19% menor no tratamento compactado, em relação ao não compactado, enquanto que o *E. grandis* apresentou comportamento inverso, com o tratamento compactado mostrando uma área de superfície radicular 22,19% maior que o tratamento não compactado.

Este comportamento, verificado para as duas espécies, deve-se aos diâmetros individuais de cada raiz e sua localização dentro das classes diamétricas. Assim, a mensuração individual do comprimento e diâmetro de cada raiz é de fundamental importância para diminuição dos erros de estimativa de área superficial radicular.

A diminuição do valor de área superficial radicular, devido ao efeito da compactação, verificada para o *E. toreliana*, foi também observada por MITCHELL et al. (1982) para plântulas de *P. taeda* em condições de casa de vegetação. Segundo os autores, para valores crescentes de densidade global, a espécie apresentou valores decrescentes de área superficial.

TABELA 5. Área superficial do sistema radicular do *E. toreliana* e *E. grandis* nos tratamentos compactados e não compactados.

Espécie	Tratamento	ÁREA SUPERFICIAL DO SISTEMA RADICULAR (cm ²)					
		CLASSE DE DIÂMETRO (mm)					Total
		0,00-0,25 (I)	0,26-0,50 (II)	0,51-0,75 (III)	0,76-1,00 (IV)	1,01-1,25 (V)	
<i>E. toreliana</i>	Compactado	34,65 A	52,94 A	16,30 A	4,55 A	3,41 A	116,94 A
	Não compactado	40,75 A	76,42 A	27,83 A	7,59 A	3,45 A	158,44 A
<i>E. grandis</i>	Compactado	25,40 A	39,17 B	12,82 B	9,32 A	6,76 A	96,86 B
	Não compactado ¹	34,35 A	28,08 B	8,95 B	4,42 A	2,22 A	79,27 B
C.V. (%)		11,56	8,88	22,09	50,20	91,47	6,79

¹ Média de 9 repetições, demais tratamentos representam a média de 8 repetições.

Médias dentro de cada coluna seguidas de mesma letra maiúscula, não diferem entre si significativamente, pelo teste F, ao nível de 5% de probabilidade.

Os efeitos da espécie sobre a área superficial total do sistema radicular foram significativos, com o *E. toreliana* apresentando valores 30,73% e 99,87% maiores em relação ao *E. grandis*, para os tratamentos compactados e não compactados, respectivamente. Isto evidencia que a compactação tende a afetar mais o *E. toreliana*, em termos de área superficial.

A distribuição da área superficial radicular nas classes diamétricas (Figura 7), demonstra que 75% e 74% da área superficial radicular total do *E. toreliana*, nos tratamentos compactados e não compactados, é proveniente de raízes com diâmetro inferior a 0,5 mm. Para o *E. grandis*, a percentagem da área superficial total, proveniente das raízes com diâmetro inferior a 0,5 mm, é de 67% e 79%, para os tratamentos compactados e não compactados, respectivamente.

Nas classes diamétricas I, IV e V (TABELA 5) não ocorreram diferenças significativas devido aos efeitos da compactação ou da espécie, embora, em relação a este último, o *E. toreliana* tenha apresentado valores ligeiramente maiores que o *E. grandis*, na classe I.

As classes II, III e área superficial total apresentaram diferenças significativas devido aos efeitos da espécie, mas não devido aos efeitos da compactação. O *E. toreliana* apresentou área superficial total 17,17% e 49,28% maior que o *E. grandis*, nos tratamentos compactado e não compactado respectivamente.

Figura 7. Distribuição relativa da área superficial do sistema radicular, por classe de diâmetro de raízes, nos tratamentos compactados e não compactados.

Através das Figuras 6 e 7, observa-se que 90% do comprimento total do sistema radicular situa-se entre 0 e 0,5 mm de amplitude de diâmetro e que, nessa amplitude, concentra-se 70% da área superficial radicular; pode-se inferir então, que essas características apresentam não apenas possibilidade de rompimento da estrutura induzida do solo, como também maiores possibilidades de absorção de água e nutrientes. As raízes localizadas nas classes diamétricas de menor valor tendem a representar segmentos laterais de segunda e terceira or-

dem, sendo que as mesmas passam por uma série de modificações anatômicas, morfológicas e metabólicas ao longo de seu período de vida.

No contexto da diferenciação da capacidade de absorção das raízes, KRAMER & BULLOCK (1966) verificaram que as pontas das raízes de *P. taeda* e suas micorrizas retiram 5 a 26 vezes mais água, por unidade de superfície, que as outras raízes do sistema radicular. Nesta mesma linha, COX (1975) também verificou comportamento diferenciado para as raízes de *Liriodendron tulipifera*, à medida que o diâmetro das mesmas aumentava.

Não há concordância, entre os diversos autores, sobre qual seria a verdadeira extensão da área absorptiva das raízes. O comportamento absorptivo do sistema radicular indica que a área da sua superfície deve ser considerada como um índice de valor relativo de absorção, em função da sua variabilidade absorptiva. Neste sentido, é pertinente a observação de KARIZUMI (1976): "a área superficial das raízes é uma tentativa de se calcular um índice de estrutura absorptiva".

Em termos de distribuição da área superficial radicular pelo comprimento das raízes, observa-se, através da TABELA 6, que ocorreu uma tendência de aumento do valor do índice, à medida em que aumentou o valor das classes diamétricas, fato facilmente comprovável se considerarmos, para comparação, cilindros de comprimento fixo e valores de diâmetro crescente.

TABELA 6. Distribuição da área superficial radicular por unidade de comprimento da raiz.

Espécie	Tratamento	ÁREA SUPERFICIAL RADICULAR/COMPRIMENTO DAS RAÍZES (cm ² /cm)					
		CLASSE DE DIÂMETRO (mm)					Total
		0,00-0,25 (I)	0,26-0,50 (II)	0,51-0,75 (III)	0,76-1,00 (IV)	1,01-1,25 (V)	
<i>E. toreliana</i>	Compactado	0,044	0,077	0,115	0,655	0,655	0,089
	Não compactado	0,055	0,134	0,322	0,464	0,187	0,162
<i>E. grandis</i>	Compactado	0,037	0,108	0,188	0,279	0,178	0,116
	Não compactado	0,040	0,087	0,201	0,258	0,363	0,098

Até a classe IV de diâmetro, os tratamentos não compactados, das duas espécies, apresentaram valores maiores de densidade de área superficial radicular que os tratamentos compactados.

O tratamento não compactado do *E. toreliana* apresentou valores calculados duas vezes maiores que seu tratamento compactado e valores 1,40 e 1,45 vezes maiores que os tratamentos compactados e não compactados do *E. grandis*.

Os dados de área superficial radicular por comprimento de raízes demonstram que o *E. toreliana* foi a espécie mais afetada pela compactação, enquanto que, para o *E. grandis*, a diminuição do índice não foi tão severa. Aparentemente, a diminuição do valor do índice de área superficial radicular não se refletiu no crescimento da parte aérea.

4.3. PARTE AÉREA

4.3.1. Biomassa da parte aérea

Na avaliação do peso de biomassa seca da parte aérea das plântulas, a mesma foi dividida em biomassa dos caules e biomassa das folhas e a somatória destes dois componentes constituiu-se na biomassa total. Os resultados obtidos são apresentados na **Figura 8** e **QUADRO 6**.

Figura 8. Biomassa da parte aérea, total (T), do caule (C) e das folhas (F), mensurada aos 135 dias.

Observa-se, para as duas espécies, que os efeitos da compactação não foram significativos para a biomassa seca do caule, biomassa seca das folhas e biomassa total, embora tenha ocorrido uma pequena diferença de valor devido a esse efeito. Nesse sentido, a compactação mostrou-se deletéria ao *E. toreliana* e benéfica ao *E. grandis*, nos componentes analisados e seu total.

QUADRO 6. Efeito da compactação do solo na biomassa, da parte aérea e altura do *E. toreliana* e *E. grandis*.

Espécie	Tratamento	BIOMASSA			A L T U R A (cm)							
		Caule	Folhas	Total	T E M P O (dias)							
					30	45	60	75	90	105	120	135
<i>E. toreliana</i>	Compactado ¹	0,8163 A	2,2831 A	3,0994 A	4,39A	4,70A	6,18A	9,99A	12,45A	17,30A	22,64A	27,41A
	Não compactado ¹	0,9032 A	2,5703 A	3,4735 A	3,89A	4,20A	6,19A	10,35A	12,35A	17,37A	23,34A	29,14A
<i>E. grandis</i>	Compactado ²	0,6066 B	1,6826 B	2,2892 B	2,09A	2,44B	3,67B	6,53B	8,68B	12,35B	16,30B	21,10B
	Não compactado ³	0,5907 B	1,6592 B	2,2499 B	2,58B	2,81B	3,69B	6,02B	7,70B	10,80B	14,61B	19,91B
CV(%)		45,30	54,35	47,38	24,20	24,13	32,40	40,11	39,81	36,02	29,91	23,93

¹ - média de 23 repetições

² - média de 22 repetições

³ - média de 18 repetições

Médias dentro de cada coluna, seguidas de mesma letra, não diferem entre si significativamente, ao nível de 1% de probabilidade, pelo teste F.

Os resultados de pesquisas desenvolvidas com várias espécies, com relação aos efeitos da compactação no crescimento da parte aérea, têm sido os mais diversificados, havendo uma gradação desde efeitos deletérios até não deletérios. Porém, a maior tendência verificada para os efeitos da compactação é a diminuição da biomassa da parte aérea. Resultados dessa tendência prejudicial são apresentados por SILVA et al. (1977), SANDS & BOWEN (1978), MITCHELL et al. (1982), MELINDA-SLAY et al. (1987), entre outros.

Alguns trabalhos evidenciam a não ocorrência de qualquer efeito da compactação. MINORE et al. (1969) não encontraram efeitos significativos da compactação na biomassa de coníferas, com dois anos de idade, plantadas em solos arenosos com densidades globais crescentes. BORGES (1986), também, verificou que o peso de matéria seca da parte aérea de três espécies de *Eucalyptus* não apresentou diferenças significativas para níveis de compactação crescente (0,85-1,05, 1,15-1,25-1,35 g. cm⁻³). Os resultados obtidos no presente experimento são concordantes com a tendência observada por esses dois autores.

Uma explicação para o fato é o valor de densidade global do tratamento compactado (1,4 g.cm⁻³), que pode não ter sido limitante para as duas espécies. Porém, o assunto requer mais investigações para que se possam fazer inferências mais conclusivas.

As raízes que cresceram na interface bloco/filme plástico, também, podem ter afetado os resultados finais. Pa-

ra evitar que as raízes laterais alcancem a interface em experimentos de maior duração, faz-se necessário um estudo prévio sobre as dimensões adequadas dos blocos de solo, no qual deverão ser consideradas a velocidade de crescimento das raízes e a idade que as plantas deverão atingir.

O efeito da espécie foi significativo para a biomassa do caule, biomassa das folhas e biomassa total da parte aérea, conforme o QUADRO 6.

Para biomassa seca do caule, o *E. toreliana* apresentou valores 25,69% e 34,60% maiores que os apresentados pelo *E. grandis* nos tratamentos compactado e não compactado, respectivamente. Para a biomassa seca das folhas, o *E. toreliana* apresentou valores 26,30% e 35,45% maiores que o *E. grandis*, nos referidos tratamentos. Portanto, para a biomassa seca da parte aérea, a primeira espécie apresentou valores médios de 26,14% e 35,23% maiores que a segunda espécie, nos tratamentos utilizados.

Os valores superiores de biomassa seca que o *E. toreliana* apresentou em relação ao *E. grandis*, devem-se, possivelmente, ao patrimônio genético da espécie, uma vez que as condições experimentais foram semelhantes.

Em termos comparativos de biomassa total da parte aérea, os valores observados para o *E. grandis*, nos dois tratamentos, aproximam-se dos valores obtidos por BORGES (1986) para a mesma espécie, crescendo em colunas de solo com camada

subsuperficial compactada, à densidade global de $1,35 \text{ g.cm}^{-3}$, aos 90 dias de idade.

4.3.2. Crescimento em altura

O crescimento em altura das duas espécies, mensurado quinzenalmente, é apresentado no QUADRO 6.

A análise de variância não detectou diferenças significativas entre os tratamentos devido aos efeitos da compactação do solo, mas, detectou diferenças significativas devido ao efeito da espécie em todas as mensurações efetuadas.

No geral, o *E. toreliana* apresentou maior crescimento em altura que o *E. grandis*, tanto no tratamento não compactado como no tratamento compactado, com as diferenças chegando a 31,68% e 23,02%, respectivamente.

O comportamento das curvas de crescimento da parte aérea das duas espécies, para os tratamentos efetuados, é apresentado na Figura 9.

Através do QUADRO 6 e Figura 9 verifica-se a ocorrência de um arranque inicial de crescimento até os 30 dias de idade, seguido de um período de estagnação (dos 30 aos 45 dias) e de três etapas sucessivas de aceleração do mesmo.

O coeficiente de variação aumentou consideravelmente a partir da aplicação de solução nutritiva, efeito esse mais perceptível aos 60, 75 e 90 dias, com decréscimos posteriores a essas datas, quando as plantas não foram mais adubadas.

Figura 9. Valores de crescimento em altura (cm), mensurados quinzenalmente, para o *E. toreliana* (□) e *E. grandis* (●) no tratamento compactado (—) e não compactado (—)

O fato da compactação não ter afetado o crescimento em altura das duas espécies é enfatizado pelos dados de HEILMAN (1981), que verificou não ter ocorrido efeitos significativos de compactação no crescimento da parte aérea de plântulas de *Pseudotsuga menziesii*. Resultados semelhantes foram obtidos por CAMPBELL et al. (1973), para plântulas de *P. taeda*, em condições de campo.

Não obstante, os resultados obtidos neste experimento contrariam a tendência geral, verificada na literatura consultada, sobre os efeitos da compactação do solo no crescimento das espécies florestais, conforme evidenciado na TABELA 7.

Em concordância com a biomassa da parte aérea, a adubação e irrigação podem ter modificado os efeitos da compactação. MINORE et al. (1969) sugerem que o acúmulo de nutrientes no espaço compreendido entre o bloco de solo e as paredes do recipiente acelera o desenvolvimento das raízes nessa região; nesse sentido, as raízes das mudas das duas espécies utilizadas neste experimento cresceram na interface bloco/recipiente.

Devido às suas peculiaridades, a parte aérea das plântulas, mantidas em condições artificiais, não deve ser considerada como indicadora de resposta do sistema radicular ao estresse induzido por compactação, conforme evidenciam os resultados obtidos por HALVERSON & ZISA (1982), para coníferas.

TABELA 7. Efeito deletério da compactação em plântulas de espécies florestais crescendo em condições de casa de vegetação e de campo.

Espécie	Idade (meses)	Densidade Global (g.cm ⁻³)	Redução no crescimento (%)	Referências
<i>P. radiata</i> ¹	5	1,35 - 1,48 1,35 - 1,60	11 38	SANDS & BOWEN (1978)
<i>P. ponderosa</i> ²	54	0,99 - 1,07	53	COCHRAN & BROOK (1985)
<i>P. contorta</i> ²	12 54	1,08 - 1,35 1,08 - 1,35	30 60	ARNOTT et al. (1988)
<i>P. taeda</i> ²	12	1,10 - 1,30	50	ROIL & RALSTON (1967)
<i>P. taeda</i> ¹	5	0,75 - 1,08 0,75 - 0,92	43 12	HATCHELL et al. (1970)
<i>P. taeda</i> ¹	5	1,20 - 1,60 1,20 - 2,00	25 50	MITCHELL et al. (1982)
<i>P. taeda</i> ²	60	1,03 - 1,19 1,03 - 1,22	59 39	LOCKBAY & VIDRINE (1984)

¹ condições de casa de vegetação.

² condições de campo.

5. CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos e respectiva discussão, pode-se chegar às seguintes conclusões:

. A compactação do solo afetou significativamente a biomassa seca do sistema radicular absorptivo e do sistema radicular total de ambas as espécies.

. A altura, a biomassa da parte aérea, o diâmetro da raiz pivotante, a superfície radicular e o comprimento do sistema radicular não foram afetados pela compactação do solo.

. A compactação não afetou a distribuição das raízes laterais de primeira ordem das duas espécies de *Eucalyptus*, que, todavia, evidenciaram formas diferentes de crescimento. O *E. grandis* mostrou tendência, nos dois tratamentos, de concentrar as raízes laterais de primeira ordem na região do colo, enquanto que o *E. torelliana* mostrou tendência de distribuí-las ao longo da raiz pivotante.

. A maior parte da superfície radicular e do comprimento radicular, de ambas as espécies, situou-se entre as raízes com diâmetro inferior a 0,5 mm, tanto no tratamento

em solo compactado como no não compactado. O *E. toreliana* apresentou, nos tratamentos compactados e não compactados, valores maiores de comprimento e superfície radicular que o *E. grandis*. Estas características, aliadas à distribuição das raízes laterais de primeira ordem, poderiam justificar o melhor desempenho do *E. toreliana* observado em plantações sobre solos compactados.

. A resistência do solo à penetração foi afetada pelas duas espécies de *Eucalyptus*, nos centímetros iniciais dos blocos de solo, apresentando, essa camada, modificações em sua estrutura induzida.

. O sistema radicular afetou significativamente a estrutura dos blocos compactados, alterando nos 5 cm superficiais a resistência à penetração de 1,25 para 0,62 e 0,71 kg. cm⁻², para o *E. toreliana* e *E. grandis*, respectivamente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALEXANDER, E.B. Bulk density of California soil in relation of other soil properties. Soil Science Society of America Journal, Madison, 44(4): 689-92, 1980.
- ARNOTT, J.T.; CARR, W.W.; WAINES, A.C. Establishment forest cover on winter landings in the central interior of the British Columbia. Forestry Chronicle, Toronto, 64(2): 121-6, 1988.
- BACCHI, O.O.S. Efeitos da compactação sobre o sistema solo-planta em cultura de cana-de-açúcar (*Saccharum* sp.). Piracicaba, 1976. 67p. (Mestrado - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"/USP).
- BAVER, L.D.; GARDNER, W.H.; GARDNER, W.R. Soil Physics. 4.ed. New York, John Willey & Sons, 1972. 491p.
- BLAKE, G.R.; NELSON, W.W.; ALMARAS, R.R. Persistence of soil compactation in a mollisol. Soil Science Society of America Journal, Madison, 40(6): 943-8, 1976.
- BODMAN, G.B. & CONSTANTIN, G.K. Influence of particle size distribution on soil compaction. Hilgardia, Berkeley, 36: 567-91, 1965.
- BOHM, W. Methods of Studying Root Systems. New York, Springer-Verlag, 1979. 188p. (Ecological Studies, 33).
- BORGES, E.N. Resposta da soja e do eucalipto à camadas compactadas do solo. Viçosa, 1986. 74p. (Mestrado - Universidade Federal de Viçosa).

- BRADY, N.C. Natureza e Propriedades dos Solos. 5.ed. Rio de Janeiro, Freitas Bastos, 1979. 647p.
- BRUCE, R.R. Instrument for determination of soil compactibility. Soil Science Society of America Proceedings, Madison, 19 (2): 237-57, 1955.
- CAMPBELL, R.G.; WILLIS, J.R.; MAY, J.T. Soil disturbance by logging with rubber-tired skidder. Journal of Soil and Water Conservation, Chicago, 28(5): 218-20, 1973.
- CHANCELLOR, W.J. Compaction as it affects soil compaction. 5.E. Effects of soil compaction on soil strenght. In: BARNES, K.K.; CARLETON, W.M.; TAYLOR, H.M.; THROCKMORTON, R.I.; VANDEN BERG, F.E. (org.). Compaction of Agricultural Soil. St. Joseph, ASAE, 1971. Cap. 5, p. 190-312.
- COCHRAN, P.H. & BROCK, T. Soil compaction and initial eight growth of planted ponderosa pine. USDA. Forest Service, Pacific Northwest Forest and Range Experiment Station. Research Note. Portland, (PNW, 434): 1-4, 1985.
- COSTA, J.B. Caracterização e Constituição do Solo. 3. ed. Lisboa, Fundação Calouste Gulbenkian, 1985. 527p.
- COX, T.L. Seasonal respiration of yellow poplar roots by diameter class. Forest Science, Washington, 21(2): 185-8, 1975.
- CRUSE, R.M.; CASSEL, D.K.; AVERETTE, F.G. Effect of particle roughness on densification of coarse textured soil. Soil Science Society of America Journal, Madison, 44(4): 692-7, 1980.
- DAY, P. & HOLMGREEN, G.G. Microscopic changes in soil structure. Soil Science Society of America Proceedings, Madison, 16(1): 73-7, 1952.

- DUFFY, P.D. & McCLURKIN, D.C. Difficult eroded planting sites in North Mississippi evaluated by discriminant analysis. Soil Science Society of America Proceedings, Madison, 38 (4): 676-8, 1974.
- FLOCKER, W.J. & NIELSEN, D.R. The absorption of nutrient elements by tomatoes associated with levels of bulk density. Soil Science Society of America Proceedings, Madison, 26 (2): 183-6, 1962.
- FOGEL, R. Root turnover and productivity of coniferous forests. Plant and Soil, The Hague, 71(1): 75-85, 1983.
- FOIL, R.R. & RALSTON, C.W. The establishment and growth of loblolly pine seedlings on compaction soils. Soil Science Society of America Proceedings, Madison, 31(3): 565-8, 1967.
- FREITAG, G.R. Methods of measuring soil compaction. In: BARNES, K.K.; CARLETON, W.M.; TAYLOR, H.M.; THROCKMORTON, R. I.; VANDEN BERG, G.E. (org.). Compaction of Agricultural Soil. St. Joseph, ASAE, 1971. Cap. 2, p. 47-103.
- FROEHLICH, H.A. Soil compaction from logging equipment: effects of growth of young ponderosa pine. Journal of Soil and Water Conservation, Chicago, 34(6): 276-8, 1979.
- GEIGER, R. Manual de Climatologia. 4.ed. Lisboa, Fundação Calouste Gulbenkian, 1980. 556p.
- GENT JR., J.A.; BALLARD, R.; HASSAN, A.E. The impact of harvesting and site preparation on the physical properties of lower coastal plains forest soils. Soil Science Society of America Journal, Madison, 47(3): 595-8, 1983.
- GENT JR., J.A. BALLARD, R.; HASSAN, A.E.; CASSEL, D.K. Impact of harvesting and site preparation on properties of Piedmont forest soils. Soil Science Society of America Journal, Madison, 48(1): 173-7, 1984.

- GOSS, M.J. & RUSSEL, R.S. Effects of mechanical impedance on root growth in barley (*Hordeum vulgare* L.). Journal of Experimental Botany, Londres, 31(121): 577-88, 1980.
- GRABLE, A.R. Soil aeration and plant growth. Advances in Agronomy, New York, 18: 57-106, 1966.
- GRABLE, A.R. Compaction as it affects soil compaction. 5. B. Effects of soil compaction on content and transmittion of air in soils. In: BARNES, K.K.; CARLETON, W.M.; TAYLOR, H. M.; THROCKMORTON, R.I.; VANDEN BERG, G. E. (org.). Compaction of Agricultural Soil. St. Joseph, ASAE, 1971. Cap. 5, p. 153-64.
- GRABLE, A.R. & SIEMER, E.G. Effects of bulk density, aggregate size and soil water, suction of oxygen diffusion potential, and elongation of corn roots. Soil Science Society of America Proceedings, Madison, 32(2): 180-6, 1968.
- GRADWELL, M.W. Overnight heat losses from the soil in relation to its density. New Zealand Journal of Science, Auckland, 6(2): 463-73, 1963.
- GREACEN, E.L. & SANDS, R. Compaction of forest soil. A review. Australian Journal of Soil Research, Melbourne, 18: 163-89, 1980.
- GROHMANN, F. & QUEIROZ NETO, J.P. Efeito da compactação artificial de dois solos limo-argilosos sobre a penetração das raízes de arroz. Bragantia, Campinas, 25(38): 421-31, 1966.
- HALL, N.; JOHNSTON, R.D.; CHIPPENDALE, G.M. Forests Trees of Australia. Canberra, Australian Government Publishing Service, 1970. p.40-1, 54-5.

- HALVERSON, H.G. & ZISA, R.P. Measuring of the response of conifer seedlings to soil compaction stress. USDA. Forest Service Northeastern Forest Station. Research Paper. Broomall, (NE-509): 1-6, 1982.
- HARRIS, A.R. Infiltration rate as affected by soil freezing under three cover type. Soil Science Society of America Proceedings, Madison, 36(4): 489-92, 1972.
- HARRIS, W.L. The soil compaction process. In: BARNES, K. K.; CARLETON, W.M.; TAYLOR, H.M.; THROCKMORTON, R.I.; VANDEN BERG, G.E. (org.). Compaction of Agricultural Soil. St. Joseph, ASAE, 1971. Cap. 2, p. 8-44.
- HATCHELL, G.E. Site preparation and fertilizer increase pine growth on soils compacted in logging. Southern Journal of Applied Forestry, Betsheda, 52(2): 79-83, 1981.
- HATCHELL, G.E.; RALSTON, C.W.; FOIL, R.R. Soil disturbances in logging. Journal of Forestry, Washington, 68(12): 772-5, 1970.
- HEILMAN, P. Root penetration of Douglas-fir seedlings in to compacted soil. Forest Science, Washington, 27(4): 660 - 6, 1981.
- HILL, J.N.S. & SUMNER, M.E. Effect of bulk density on moisture characteristics of soils. Soil Science, Baltimore, 103 (4): 234-8, 1967.
- HILTON, R.J. Root growth in the guelf rhizotron. In: SIMPOSIUM PHYSIOLOGIE DES RACINES ET SIMBIOSIS, Nancy, 1979. Proceedings, Nancy, IUFRO, 1979. p.135-42.
- HULUGALLE, N.R.; LAL, R.; TERCKVILLE, C.H.H. Soil physical change crops root growth following different methods of land clearing in Western Nigeria. Soil Science, Baltimore, 138 (2): 172-9, 1984.

- JACOBSEN, B.F. Persistence of compaction effects in a forest kraznozen. Australian Forest Research, Melbourne, 13 (3/4): 305-8, 1983.
- JACOBSEN, B.F. & MOORE, G.A. Effect of two types skidders and of a slash cover soil on compactation by logging of mountain ash. Australian Forestry Research, Melbourne, 11(3/4): 247-55, 1981.
- JOHNSON, W.H. & BUCHELLE, W.F. Influence of the soil granule size and compaction on rate of soil drying and emergence of corn. Transaction of the ASAE, St. Joseph, 4(1):170-4, 1961.
- JORGE, J.A. Física e manejo dos solos tropicais. Campinas, Instituto Campineiro de Ensino Agrícola, 1985. 328p.
- KARIZUMI, N. The mechanism and function of tree roots in the process of forest production. III. Root density and absorptive structure. Bulletin of Governmental Forest Experiment Station, Toquio, 285: 43-119, 1976.
- KARR, B.L.; HOLDGES, J.D.; NEBEKER, T.E. The effect of thinning methods on soil physical properties in North Central Mississippi. Southern Journal of Applied Forestry, Betsheda, 11 (2): 110-2, 1988.
- KEMPER, W.D. Compaction as it affects soil compaction. 5.D. Effects of soil compaction on nutrient status. In: BARNES, K.K.; CARLETON, W.M.; TAYLOR, H.M.; THROCKMORTON, R.I.; VANDEN BERG, G.E. (org.). Compaction of Agricultural Soil. St. Joseph, ASAE, 1971. Cap. 5, p. 178-89.
- KIHTEL, E.J. Manual de edafologia. São Paulo, Ceres, 1979. 262 p.
- KIMBER, P.C. The root system of Jarrah (*Eucalyptus marginata*). Forest Department of Western Australia. Research Paper, Perth, (10): 1-5, 1974.

KRAMER, P.J. & BULLOCK, H.C. Seasonal variation in the proportions of suberised and insubерised roots of trees in relations to the absorption of water. American Journal of Botany, New York, 53: 200-4, 1966.

KRAMER, P.J. & KOZLOWSKY, T.T. Physiology of Wood Plants. New York, Academic Press, 1979. 811p.

KREJCI, L.C.; MARTINS, L.G.S.; LOURENÇO, P.Y. Desenvolvimento do sistema radicular de *Eucalyptus* sp. sob diferentes condições de solo. In: CONGRESSO FLORESTAL BRASILEIRO, Olinda, 1986. Anais. Olinda, SBS, 1986. p.70.

KUMMEROW, J.; KUMMEROW, A.; ALVIM, P.T. Root biomass in a mature cacao (*Theobroma cacao* L.) plantation. Revista Theobroma, Itabuna, 11(1): 77-85, 1981.

LARSON, W.E. & GUPTA, S.C. Estimating critical stress in unsaturated soils from changes in pore water pressure during confined compression. Soil Science Society of America Journal, Madison, 44(6): 1127-32, 1980.

LARSON, W.E.; GUPTA, S.C.; USECHE, R.A. Compression of agricultural soils from eight soils orders. Soil Science Society of America Journal, Madison, 44(2): 450-7, 1980.

LENHARD, R.J. Changes in void distribution and volume during compaction of a forest soils. Soil Science Society of America Journal, Madison, 50(2): 462-4, 1986.

LIBARDI, P.L. Dinâmica da água no sistema solo-planta-atmosfera. Piracicaba, CENA/USP, 1984. 232p.

LOCKBY, B.G. & VIDRINE, C.G. Effects of logging equipment traffic on soil density and growth and survival of young loblolly pine. Southern Journal of Applied Forestry, Bethesda, 8(2): 109-112, 1984.

- LOWERTS, G.A. & STONE, J.M. The effect of soil bulk density on nursery sweetgum seedlings growth. USDA Forest Service. Tree Planter's Note, Washington, 33(3): 3-5, 1982.
- MACHADO, J.A. & BRUM, A.C.R. Efeito do sistema de cultivo em algumas propriedades físicas do solo. Revista Brasileira de Ciências do Solo, Campinas, 2(2): 81-4, 1978.
- MARTINEZ, M.B. & LUGO-LOPEZ, M.A. Influence of subsoil shattering and fertilization on sugar cane production and soil infiltration capacity. Soil Science, Baltimore, 75(3): 307-14, 1953.
- MELINDA-SLAY, J.; LOCKBY, B.G.; ADAMS, J.C.; VIDRINE, C. G. Effects of site preparation on physical properties, growth of Loblolly pine, and competing vegetation. Southern Journal of Applied Forestry, Betsheda, 11(2): 83-6, 1987.
- MENGEL, K. & KIRBY, E.A. Principles of Plant Nutrition. 5. ed. Berna, International Potash Institute, 1982. 655p.
- MILLER, J.H. & SIROIS, D.L. Soil disturbance by skyline yarding versus skidding in a loamy hill forest. Soil Science Society of America Journal, Madison, 50(6): 1579-83, 1986.
- MINORE, D.; SMITH, C.E.; WOOLLARD, R.F. Effects of high soil density on seedlings root growth of seven northwestern tree species. USDA. Forest Service. Pacific Northwestern Forest and Range Experiment Station. Research Note, Portland, (PNW-112): 1-6, 1969.
- MITCHELL, M.L.; HASSAN, A.E.; DAVEY, C.B.; GREGORY, J. D. Loblolly pine growth in compacted greenhouse soils. Transactions of the ASAE, St. Joseph, 25(2): 304-7, 1982.
- MOHERING, D.M. & RAWLS, I.K. Detrimental effects of wet logging. Journal of Forestry, Washington, 68(1): 166 - 7, 1970.

- NAMBIAR, E.K.S. Significance of first-order lateral roots on the growth of young radiata pine under environmental stress. Australian Forest Research, Melbourne, 14(3): 187-9, 1984.
- NEWMAN, E.I.A. A method for estimating the total length of root sample. Journal of Applied Ecology, Oxford, 3: 139-45, 1966.
- OLSSON, M.T. Micromorphometric evaluation of artificial compactation of fine sands till. Forest Ecology and Management, Amsterdam, 17(2/3): 109-17, 1986.
- OMI, S.K. Soil compaction effects on seedlings growth. USDA. Forest Service Rocky Mountain Forest Range and Experiment Station, General Technical Report, Fort Collins, (RM-125): 12-23, 1986.
- PARISH, D. Effects of compaction on nutrient supply to plants. E. Soil conditions as they affect plant establishment, and yield. In: BARNES, K.K.; CARLETON, W. M.; TAYLOR, H. M.; THROCKMORTON, R.I.; VANDEN BERG, G.E. (org.). Compaction of Agricultural Soil. St. Joseph, ASAE, 1971. Cap. 6 p. 277-91.
- PERENCIN, D. & CAMPOS, D.A.F. Propriedades dos solos: microestereometria. Revista Brasileira de Ciências do Solo, Campinas, 2(2): 134-43, 1978.
- PHILLIPS, R.E. & BROWN, D.A. Ion diffusion. III. The effect of soil compaction on self diffusion of Rubidium-86 and Strontium-89. Soil Science Society of America Proceedings, Madison, 29(4): 657-61, 1965.
- PHILLIPS, R.E. & BROWN, D.A. Counterdiffusion of Rb and Sr in compacted soil. Journal of Soil Science, Londres, 17(3): 200-11, 1966.
- PHILLIPS, R.E. & KIRKHAM, A. Soil compaction in the field and corn growth. Agronomy Journal, Madison, 54(1): 29-34, 1962.
- PREVEDELLO, C.L. & PREVEDELLO, B.M.S. Os efeitos dos anos de cultivo sobre a massa específica e porosidade de um latossolo. O Solo, Piracicaba, 76(2): 57-60, 1984.

- RANEY, W.A.; EDMINSTER, T.W.; ALLAWAY, W.H. Current status of research in soil compaction. Soil Science Society of America Proceedings, Madison, 19(4): 423-8, 1955.
- REICHARDT, K. Processos de Transferência no Sistema Solo-Planta-Atmosfera. Campinas, Cargill, 1975. 286p.
- RYLEY, S.J. Effects of clearing and roading operations on the permeability of forest soil, Karuah Catchment, New South Wales, Australia. Forest Ecology and Management, Amsterdam, 9(4): 283-93, 1984.
- ROBERTS, J. A study of root distribution and growth in a *P. sylvestris* L. (scotspine) plantation in East Anglia. Plant and Soil, The Hague, 44(4): 607-21, 1976.
- RUARK, G.A.; MADER, D.L.; TATTAR, T.A. The influence of soil compaction and aeration in the root growth and vigour of a trees - A literature review. Arboricultural Journal, Londres, 6: 251-65, 1982.
- RUSSEL, R.S. Plant root systems: Their function and interaction with the soil. Londres, McGraw-Hill, 1977. 298p.
- SANCHEZ, P.A. Suelos del Tropico: Características y Manejo. San Jose, IICA, 1980. 660p.
- SANDS, R. & BOWEN, G.D. Comapction of sandy soils in a radiata pine forest. II. Effects of compaction on root configuration and growth of radiata pine. Australian Forest Research, Melbourne, 8(3/4): 163-70, 1978.
- SANDS, R.; GREACEN, E.L.; GERARD, C.J. Compaction of sandy soils in radiata pine forests. Australian Journal of Soil Research, Melbourne, 17: 101-13, 1979.

- SARRUGE, J.R. Soluções nutritivas. Summa Phytophatologica, Piracicaba, 1(30): 231-3, 1975.
- SHIERLAW, J. & RALSTON, A.M. Effects of soil compaction on root growth and uptake of phosphorus. Plant and Soil, The Hague, 77(1): 15-26, 1984.
- SIDLE, R.C. & DRLICA, D.M. Soil compaction from logging with a low-ground pressure skidder in the Oregon. Soil Science Society of America Journal, Madison, 45(6): 1219-24, 1981.
- SILVA, A.P. Influência da compactação nas propriedades físicas do solo e no sistema radicular de plântulas de algodão (*Gossypium hirsutum* L.). Piracicaba, 1984. 92p. (Mestrado - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"/USP).
- SILVA, L.F.; PEREIRA, C.P.; MELO, A.A.O. Efeito da compactação do solo no desenvolvimento de plântulas de cacau (*Theobroma cacao* L.) e na penetração de suas raízes. Revista Theobroma, Itabuna, 7: 13-8, 1977.
- SNIDDER, M.D. & MILLER, R.F. Effects of tractor logging on soils and vegetation in Eastern Oregon. Soil Science Society of America Journal, Madison, 49(5): 1280-2, 1985.
- SOEHNE, W. Fundamentals of pressure distribution and soil compaction under tractor tires. Agricultural Engineering, Madison, 290: 276-81, 1958.
- SQUIRE, R.O.; MARKS, G.C.; CRAIG, F.G. Root development in a *Pinus radiata* D. Don plantation in relation to site index, fertilizing and soil bulk density. Australian Forest Research, Melbourne, 8(2): 103-14, 1978.
- STOLF, R.; FERNANDES, J.; FURLANI NETO, V.L. Recomendação para o uso do penetrômetro de impacto modelo IAA/PLANALSUCAR-STOLF. Revista STAB-Açúcar e Derivados, Piracicaba, 1 (3): 13-24, 1983.

SUTTON, R.F. Root systems morphogenesis. New Zealand Journal of Forest Sciences, Rotorua, 10(1): 265-83, 1980.

TAYLOR, H.M. Soil condiction as they affects plant stablismnt, root development, and yield. F. Effects of soil strenght or seedlings emergence, root growth and crop yield. In: BARNES, K.K.; CARLETON, W.M.; TAYLOR, H.M.; THROCKMORTON, R. I.; VANDEN BERG, G.E. (org.). Compaction of Agricultural Soil. St. Joseph, ASAE, 1971. Cap. 6, p. 295-305.

TAYLOR, H.M. & HENDERSON, D.W. Some effects of organic adictives on compressibility of Yolo loam soils. Soil Science, Baltimorè, 88(2): 101-6, 1959.

TAYLOR, H.M. & RATLIFF, F. Root elongation rates of cotton and peanuts as a function of soil strenght and water content. Soil Science, Baltimore, 108(2): 113-9, 1969.

TENNENT, D.A. Test of modified line intersect method of stimating root length. Journal of Ecology, Londres, 63 (6): 995-1001, 1975.

TROUSE JR., A.C. Soil physical characteristics and root growth. In: LAL, R. & GREENLAND, D. J. (ed.). Soil Physical Properties and Crop Production. New York, John Willey and Sons., 1979. p.319-25.

TRUJILLO, D.P. Container growth ponderosa pine seedlings respond to fertilization. USDA. Forest Service Rocky Mountain Forest and Range Experiment Station Research Note, Fort Collins, (RM-319): 1-3, 1976.

VOMOCIL, J.A. & FLOCKER, W.J. Effects on soil compaction on storage and movement of soil air and water. Transaction of the ASAE, St. Joseph, 4: 242-6, 1961.

- WARKENTIN, B.P. Compaction as affects soil compaction. 5. A. Effects of compaction on content and transmission of water in soil. In: BARNES, K.K.; CARLETON, W.M.; TAYLOR, H. M.; THROCKMORTON, R.I.; VANDEN BERG, G.E. (org.). Compaction of Agricultural Soil. St. Joseph, ASAE, 1971. Cap. 5, p. 127-53.
- WASTERLUND, I. Compaction of till soils and growth tests with norway spruce and scots pine. Forest Ecology and Management, Amsterdam, 11(2): 171-89, 1985.
- WERT, S. & THOMAS, B.R. Effects of skid roads on diameter, height and volume growth in douglas-fir. Soil Science Society of America Journal, Madison, 45(3): 629-32, 1981.
- WIERSUM, L.K. The relationship of the size and structural rigidity of pores to their penetration by roots. Plant and Soil, The Hague, 9(1): 75-85, 1957.
- WILLIS, W.O. & RANEY, A. Compaction as it affects soil compaction. 5.C. Effects of compaction content and transmission of heat in soils. In: BARNES, K.K.; CARLETON, W.M.; TAYLOR, H.M.; THROCKMORTON, R.I.; VANDEN BERG, G. E. (org.). Compaction of Agricultural Soil, St. Joseph, ASAE, 1971. Cap. 5, p.165-7.
- WRONSKI, E.B. Impact of tractor thinnings operations on soils tree roots in Karri Forest, Western Australia. Australian Forest Research, Melbourne, 14(4): 319-32, 1984.
- YOUNG, R.A. & GILMORE, A.R. Effects of various camping intensities on soil properties in Illinois campground. Soil Science Society of America Journal, Madison, 40(6):908-11, 1976.

YOUNGEBERG, C.T. The influence of soil conditions, following tractor logging, on the growth of planted douglas-fir seedlings. Soil Science Society of America Proceedings, Madison, 23(1): 76-8, 1959.

ZISA, R.P.; HALVERSON, H.G.; STOUT, B.B. Establishment and early growth of conifers on compact soil in urban areas. USDA. Forest Service. Northeastern Forest Experiment Station Research Paper, Broomal (NE-45): 1-8, 1980.