

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
FACULDADE DE AGRONOMIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO

**MODELAGEM DO CRESCIMENTO RADICULAR DE MILHO E SOJA
SUJEITO A ESTRESSES HÍDRICO E MECÂNICO EM LATOSSOLO**

Moacir Tuzzin de Moraes

(Tese de Doutorado)

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
FACULDADE DE AGRONOMIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO

**MODELAGEM DO CRESCIMENTO RADICULAR DE MILHO E SOJA
SUJEITO A ESTRESSES HÍDRICO E MECÂNICO EM LATOSSOLO**

MOACIR TUZZIN DE MORAES

Engenheiro Agrônomo (UFSM)
Mestre em Ciência do Solo (UFSM)

Tese apresentada como
um dos requisitos à obtenção do
Grau de Doutor em Ciência do Solo

Orientador: Prof. Dr. Renato Levien
Co-orientador: Dr. Henrique Debiasi

Porto Alegre (RS) Brasil
Janeiro de 2017

CIP - Catalogação na Publicação

Moraes, Moacir Tuzzin de

Modelagem do crescimento radicular de milho e soja sujeito a estresses hídrico e mecânico em Latossolo / Moacir Tuzzin de Moraes. -- 2017. 122 f.

Orientador: Renato Levien.

Coorientador: Henrique Debiasi.

Tese (Doutorado) -- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Faculdade de Agronomia, Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Porto Alegre, BR-RS, 2017.

1. Resistência do solo à penetração. 2. aeração do solo. 3. deficiência hídrica. 4. Glycine max. 5. Zea mays. I. Levien, Renato, orient. II. Debiasi, Henrique, coorient. III. Título.

MOACIR TUZZIN DE MORAES
Engenheiro Agrônomo - UFSM
Mestre em Ciência do Solo - UFSM

TESE

Submetida como parte dos requisitos
para a obtenção do Grau de

DOUTOR EM CIÊNCIA DO SOLO

Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo
Faculdade de Agronomia
Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Porto Alegre (RS), Brasil

Aprovada em: __/__/____
Pela Banca Examinadora

Homologado em: __/__/____
por

MICHAEL MAZURANA
Presidente da Banca Examinadora
Departamento de Solos/UFRGS

FLAVIO A. DE O. CAMARGO
Coordenador do
Programa de Pós-Graduação
em Ciência do Solo

CIMELIO BAYER
Departamento de Solos/UFRGS

VANDERLEI RODRIGUES DA SILVA
UFSM

PAULO IVONIR GUBIANI
UFSM
(por meio de Skype)

CARLOS ALBERTO BISSANI
Diretor da Faculdade de
Agronomia

À minha família, que me deu
educação e estudo.

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) e ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo pela oportunidade de realização do curso de Doutorado.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão das bolsas de estudo no país e no Exterior pelo Programa de Doutorado Sanduíche.

À Fundação AGRISUS, a qual foi extremamente importante no apoio financeiro para a realização das pesquisas contidas nesta tese de Doutorado por meio do Projeto 1236/13 intitulado “Estratégias para mitigação da compactação do solo no sistema plantio”, o qual foi coordenado pelo autor desta Tese.

Agradeço meu orientador Renato Levien pelos ensinamentos durante o curso de Doutorado, e ao meu co-orientador Henrique Debiasi o qual vem desde 2010 me supervisionando nas pesquisas desde a Graduação em Agronomia, Mestrado em Ciência do Solo, e principalmente durante o curso de Doutorado em Ciência do Solo.

I would like to thank very much my supervisor in Scotland, Glyn Bengough, which was very attentive and helpful for the advances in soil-root modelling.

À minha família, que esteve ao meu lado em todos os momentos da minha vida, sempre me apoiando e incentivando, nunca deixando que eu desistisse dos meus objetivos.

De forma geral gostaria de agradecer a todos os amigos, de perto e de longe que sempre estiveram próximos pessoalmente ou virtualmente para trocar ideias dos mais diversos assuntos.

A todos vocês, que fizeram parte de mais esta fase da minha vida, meus sinceros agradecimentos.

Obrigado a todos.
Thank you very much.

“A nation that destroys its soil, destroys itself.”
“A nação que destrói o seu solo, destrói a si mesma. ”

(Franklin D. Roosevelt)

MODELAGEM DO CRESCIMENTO RADICULAR DE MILHO E SOJA SUJEITO A ESTRESSES HÍDRICO E MECÂNICO EM LATOSSOLO¹

Autor: Eng. Agr. MSc. Moacir Tuzzin de Moraes
Orientador: Prof Dr. Renato Levien
Co-orientador: Dr. Henrique Debiasi

RESUMO

O desenvolvimento das culturas pode ser afetado por combinações de estresses físicos, químicos e biológicos. Na ausência de outras limitações, os fatores físicos do solo que afetam diretamente o crescimento radicular são a resistência mecânica, a aeração e a disponibilidade hídrica. O objetivo deste trabalho foi incluir os fatores físicos do solo na modelagem do crescimento radicular de soja e de milho. As condições físicas dos solos foram modeladas com o fluxo de água em 1D e o crescimento radicular em 3D por meio da inclusão de um parâmetro de redução do estresse para o alongamento radicular. Soja e milho foram cultivados em quatro níveis de compactação em um Latossolo Vermelho. O modelo foi validado com dados de campo de conteúdo volumétrico de água, resistência do solo à penetração e densidade de comprimento radicular de soja e de milho cultivadas em diferentes níveis de compactação e condições hídricas. A taxa de alongamento radicular foi reduzida exponencialmente em função do aumento da resistência do solo à penetração, e linearmente em relação ao decréscimo da aeração ou da disponibilidade hídrica. A produtividade de grãos de soja e milho foi reduzida em função da escarificação do solo ou tráfego intenso de colhedora no Latossolo Vermelho. As densidades de comprimento radicular simulados concordaram com os valores medidos no campo. As condições físicas de resistência mecânica, hipoxia e estresse hídrico foram eficientemente incorporadas por meio do parâmetro de redução do estresse ao alongamento radicular, e podem ser usadas para avanços nos estudos de interações solo-raiz.

Palavra-chave: resistência do solo à penetração; aeração do solo; deficiência hídrica; *Glycine max*; *Zea mays*.

¹ Tese de Doutorado em Ciência do Solo. Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. (122 p.). Janeiro, 2017. Trabalho realizado com apoio da Fundação Agrisus, CAPES e do Programa de Doutorado Sanduíche no Exterior da CAPES.

ROOT GROWTH MODELLING OF CORN AND SOYBEAN AFFECTED BY HYDRIC AND MECHANICAL STRESS IN OXISOL²

Author: Eng. Agr. MSc. Moacir Tuzzin de Moraes
Adviser: Prof. Dr. Renato Levien
Co-adviser: Dr. Henrique Debiasi

ABSTRACT

Crop development is affected due soil physical, chemical, and biological conditions. In the absence of others limitations, the soil physical factors that affect directly root growth are mechanical impedance, aeration and water stress. The aim of this work was to include soil physical limitations into the root growth model of soybean and maize crops. Soil physical conditions was modelling with water flux in one-dimensional and root growth in three-dimensional by stress reduction function for root elongation. Soybean and maize crops was cultivate in four soil compaction levels in a Rhodic Eutrudox. The model was validate with field data of soil water content, soil penetration resistance, and root length density of soybean and maize cropping in four soil compaction levels and two weather conditions. Root elongation rate was reduced exponentially as a function of soil penetration resistance, and linearly in relation to soil aeration or water stress. Soybean and maize grain yield was reduced due to soil chiselling and intense harvester traffic in a Rhodic Eutrudox. Soybean and maize root length density modelling agreed to field measurement. Soil physical conditions of mechanical impedance, hypoxia and water stress was successful incorporated into the root growth model by stress reduction function to root elongation, and its can be used for advances in soil-root interaction research.

Keywords: soil penetration resistance; soil aeration; water stress; *Glycine max*; *Zea mays*.

² PhD thesis in Soil science. Graduate Program Soil Science, Faculty of Agronomy, Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre. (122 p.). January, 2017. Research supported by Agrisus Foundation, CAPES Foundation and CAPES-PDSE

SUMÁRIO

Página

1	INTRODUÇÃO GERAL	1
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1.	O sistema plantio direto e os problemas com compactação do solo	4
2.2.	Manejo do solo em áreas compactadas	6
2.3.	Fatores físicos que afetam o desenvolvimento das culturas	8
2.4.	Conceitos de valores críticos, limitantes ou restritivos de atributos físicos	10
2.5.	Relações entre crescimento radicular e condições físicas dos solos ...	10
2.6.	Crescimento radicular e a interface solo-raiz.....	12
2.7.	Modelagem do crescimento radicular	14
3	HIPÓTESE.....	16
4	OBJETIVO GERAL	16
4.1.	Objetivos específicos	16
5	CAPÍTULO 1. MODELLING OF ROOT GROWTH LINKED WITH SOIL- WATER FLUX AND SOIL STRENGTH.....	17
5.1.	Abstract.....	17
5.2.	Introduction	18
5.3.	Modelling approach.....	19
5.3.1.	Root growth model	19
5.3.2.	The soil-water flux	20
5.3.3.	Root water uptake	22
5.3.4.	Soil strength model.....	24
5.3.5.	Soil physical conditions for root growth.....	25
5.3.5.1.	Reduction of root elongation due to water stress and poor aeration	25
5.3.5.2.	Reduction of root elongation due to soil strength	26
5.3.6.	Coupling of the models.....	28
5.4.	Implementation.....	29
5.5.	Evaluation of model performance	31
5.6.	Simulation scenarios	32
5.6.1.	Soil water content and soil penetration resistance	32
5.6.2.	Effects of a soil compact layer for root growth	34
5.6.3.	Effects of a drought season for root growth	37
5.7.	Direct effects of soil physical conditions on shoot growth	44
5.8.	Conclusions	44
6	CAPÍTULO 2. MODELLING OF SOIL PHYSICAL CONDITIONS FOR SOYBEAN ROOT GROWTH.....	45
6.1.	Abstract.....	45
6.2.	Introduction	45
6.3.	Material and Methods.....	47
6.3.1.	Study site	47
6.3.2.	Experimental design and treatments	47
6.3.3.	Crop and field management	48
6.3.4.	Soil sampling.....	48
6.3.5.	Determination of soil physical and hydraulic properties	49
6.3.6.	Soil penetration resistance at the field	49
6.3.7.	Grain yield and shoot dry weight	49

6.3.8.	Root system sampler and analyses	50
6.3.9.	Root anatomy analysis	50
6.3.10.	Agrometeorological dates	51
6.3.11.	Root growth modelling.....	51
6.3.12.	Data analysis.....	51
6.4.	Results.....	52
6.4.1.	Soil physical properties.....	52
6.4.2.	Soybean grain yield	54
6.4.3.	Soybean root system.....	56
6.4.4.	Soil physical condition relation to crop and root parameters	57
6.4.5.	Root growth modelling.....	59
6.4.6.	Stress reduction function for root elongation.....	61
6.4.7.	Root anatomy	63
6.5.	Discussion.....	64
6.6.	Conclusion	69
7	CAPÍTULO 3. MODELAGEM DE LIMITAÇÕES FÍSICA AO CRESCIMENTO RADICULAR DE MILHO	70
7.1.	Resumo.....	70
7.2.	Introdução	71
7.3.	Materiais e Métodos	72
7.3.1.	Local de estudo e solo.....	72
7.3.2.	Tratamentos e delineamento experimental.....	73
7.3.3.	Cultivo e manejo no campo	73
7.3.4.	Amostragem e curva de retenção de água no solo.....	74
7.3.5.	Produtividade de grãos e biomassa	74
7.3.6.	Sistema radicular, amostragem e análises	75
7.3.7.	Dados climatológicos	76
7.3.8.	Modelagem do crescimento radicular	76
7.3.9.	Avaliação de desempenho do modelo de simulação do crescimento radicular de milho	79
7.3.10.	Análise de dados.....	79
7.4.	Resultados	80
7.5.	Discussão	89
7.6.	Conclusões	92
8	CONCLUSÕES GERAIS.....	93
9	CONSIDERAÇÕES FINAIS	95
10	REFERÊNCIAS CITADAS E CONSULTADAS.....	96
11	RESUMO BIBLIOGRÁFICO	106

RELAÇÃO DE TABELAS

	Página
Table 5.1. Van Genuchten's parameter of a Rhodic Eutrudox.	30
Table 5.2. Root architectural parameters of soybean (<i>Glycine max</i>).	30
Table 5.3. Bulk density of Rhodic Eutrudox used in simulation of the scenario.	38
Tabela 7.1. Parâmetros físicos do solo e de ajuste da curva de retenção de água no solo pelo modelo de Van Genuchten.	77
Tabela 7.2. Parâmetros de arquitetura radicular de milho (<i>Zea mays</i>).	77

RELAÇÃO DE FIGURAS

Página

Figura 2.1. Relação entre condições físicas do solo e o desenvolvimento das culturas. Adaptado de Letey (1985).	9
Figura 2.2. Representação esquemática do ápice radicular com regiões de divisão, alongamento e maturação celular. Fonte: Konrad (2006)...	13
Figure 5.1. An illustration of the self-similar characters of plant roots (LEITNER et al., 2010a).	20
Figure 5.2. Measured vs. calculated values of soil penetration resistance (SPR) for a Rhodic Eutrudox, very clayed.	25
Figure 5.3. Root elongation (RE) parameter as a function of matric potential (adapted from Feddes, Kowalik e Zaradny (1978)) (a) and penetration resistance with presence (dashed blue line) or absence (red line adapted from Bengough (1997)) of continuous pores (b), and the total stress reduction function (srf) in a colour map for a soil without (c) or with (d) continuous pores. Root elongation parameter is expressed as an index from 1 (maximum root elongation) to 0 (no root growth). I: data set of a loose soil; II: data set of compacted soil.	28
Figure 5.4. Schematic representation of the model coupling in soil-root-plant-atmosphere relationship.	29
Figure 5.5. Simulated and measured values on field for water content (a) and penetration resistance (b) in two depth.	33
Figure 5.6. Rainfall, reference evapotranspiration (ET _o), potential transpiration (T _p) and actual transpiration (T _a) during soybean season growth for a loose soil and a soil with a compact soil layer.	34
Figure 5.7. Root system (a,b) and stress reduction function (c,d) in soil without (a,c) or with (b,d) a compact layer from 16 to 20 cm.	35
Figure 5.8. Water uptake for a soil with a compact layer (a) and on a loose soil (b).	36
Figure 5.9. Relative frequency of total stress reduction function (srf) (a,b) and effect from soil penetration resistance (c,d) or matric potential (e,f) and in a soil with a compact layer (a,c,e) or in a loose soil (b,d,f) for the depth 18 cm.	37
Figure 5.10. Rainfall, reference evapotranspiration, potential and actual transpiration during soybean season growth in a drought (a) or a wet condition (b).	38
Figure 5.11. Root system (a,d), root length density (RLD) (b,e) and stress reduction function (srf) (c,f) in the dry season (a,b,c) or wet season (d,e,f) growth.	40
Figure 5.12. Relative frequency of total stress reduction function (srf) (a,b) and effect from soil penetration resistance (c,d) or matric potential (e,f) and in a dry season (a,c,d) or wet season (b,d,f) for the depth 8 cm.	41
Figure 5.13. Water uptake for a dry season (a) or a wet season (b) growth. ...	42
Figure 5.14. Root system distribution simulated (a,c) and measured (b,d) for a dry (a,b) and wet season (c,d) at the soil profile (slice of 2 cm transversal to row).	42

Figure 5.15. Root length density measured on field and simulated for a dry season (a) and wet season (b) and relation 1 to 1 (c).....	43
Figure 6.1. Soil penetration resistance in a Rhodic Eutrudox under compaction levels.....	53
Figure 6.2. Soil bulk density (a), total porosity (a), macroporosity (a), and microporosity (d) in profile of a Rhodic Eutrudox under compaction levels.....	54
Figure 6.3. Soybean grain yield in function of soil compaction levels of Rhodic Eutrudox.	55
Figure 6.4. Rainfall, evapotranspiration potential (ETo), transpiration potential (Tp), transpiration actual (Ta) for compaction levels, and phenological development stages of soybean.....	56
Figure 6.5. Root length density (a) and dry root mass (b) of soybean under soil compaction levels in a Rhodic Eutrudox.....	57
Figure 6.6. Relation of soybean grain yield (prod) (a,c,e) and root length density (RLD) (b,d,e) with bulk density (BD) (a,b), macroporosity (Mac) (c,d), microporosity (Mic) (e,f) or soil penetration resistance (SPR) (g,h) of 0 to 20 cm depth in a Rhodic Eutrudox.	58
Figure 6.7. 2D distribution of soybean root system measured (a,b,c,d) and simulated (e,f,g,h) at the profile for soil chiselling (a,e), no-tillage (b,f), NTC4 (c,g) and NTC8 (d,h) in a Rhodic Eutrudox.	60
Figure 6.8. Relation of root length density simulated and measured of soybean in compaction levels of a Rhodic Eutrudox.	60
Figure 6.9. Stress reduction function for root elongation at the soil chiselling (a), no-tillage (b), NTC4 (c) and NTC8 (d) in a Rhodic Eutrudox during the root growing season. Dashed lines are the rooting depth at the time for each soil compaction level.	62
Figure 6.10. Relative frequency of total stress reduction function (a) and effect from soil penetration resistance (b) or matric potential (c) at the soil chiselling, no-tillage (NT), NTC4 and NTC8 on soil profile until 30 cm during the season growth of soybean. Stress reduction function near one is a maximum root elongation, and near zero, there is no root growth.	63
Figure 6.11. Anatomy of soybean root at the primary tissues in no-tillage (a,b,c) and compact soil by eight traffic of harvester (d,e,f) in a Rhodic Eutrudox.	64
Figure 6.12. Anatomy of soybean root at the secondary growing in no-tillage (a,b,c) and compact soil by eight traffic of harvester (d,e,f) in a Rhodic Eutrudox.	64
Figura 7.1. Densidade do solo no perfil do solo no sistema de preparo mínimo (a), sistema plantio direto (b), sistema plantio direto com 4 tráfegos de trator (c) e sistema plantio direto com 8 tráfegos de colhedora (d) em Latossolo Vermelho.	80
Figura 7.2. Curva de retenção de água (a,c,e) e frequência cumulada e distribuição do tamanho de poros (b,d,f) nas camadas de 0-10 cm (a,b), 10-20 cm (c,d) e 20-30 cm (e,f) em função de níveis de compactação em um Latossolo Vermelho Distroférico.....	81
Figura 7.3. Produção de massa seca da parte aérea (a) e produtividade de grãos (b) de milho em níveis de compactação em um Latossolo Vermelho Distroférico.....	82

Figura 7.4. Densidade de comprimento (a) e massa seca (em escala logarítmica) (b) de raízes de milho em função de níveis de compactação em um Latossolo Vermelho Distroférrico.	83
Figura 7.5. Densidade do comprimento radicular de milho (<i>Zea Mays</i>) no sistema de preparo reduzido (a), em sistema plantio direto (b), em sistema plantio direto trafegado com 4 passadas de trator (c) ou em sistema plantio direto trafegado com 8 passadas de colhedora (d) em um Latossolo Vermelho Distroférrico.	84
Figura 7.6. Sistema radicular de milho simulado e visualizado em 2D no sistema de preparo mínimo (a), sistema plantio direto (b), sistema plantio direto trafegado com 4 passadas de trator (c) ou em sistema plantio direto trafegado com 8 passadas de colhedora (d) em um Latossolo Vermelho Distroférrico.	84
Figura 7.7. Densidade de comprimento radicular (DCR) de milho medidas no campo e simuladas em sistema de preparo mínimo (SPM) (a), sistema plantio direto (SPD) (b), sistema plantio direto compactado com 4 tráfegos de trator (SPDC4) (c) e sistema plantio direto compactado com 8 tráfegos de colhedora (SPDC8) (d), e relações entre valores medidos e simulados (e) em um Latossolo Vermelho Distroférrico.	86
Figura 7.8. Função de redução do estresse para alongamento radicular, e profundidade do sistema radicular em sistema de preparo mínimo (a), sistema plantio direto (b), sistema plantio direto com 4 tráfegos de trator (c) e sistema plantio direto com 8 tráfegos de colhedora (d) em Latossolo Vermelho Distroférrico.	87
Figura 7.9. Dados climatológicos de precipitação, evapotranspiração potencial (ET _o), transpiração potencial (T _p) e atual (T _a) em quatro níveis de compactação em Latossolo Vermelho Distroférrico.	88
Figura 7.10. Frequência dos estresses totais (a) ou por resistência do solo à penetração (b) e potencial matricial (c) para o alongamento radicular durante o ciclo de desenvolvimento do milho em Latossolo Vermelho Distroférrico.....	88

LISTA DE EQUAÇÕES

Página

$RL = k \left(1 - \exp \left(-\frac{re}{k} t \right) \right)$ (Eq. 5.1).....	20
$k = l_b + l_a + l_n \cdot (\text{nob}-1)$ (Eq. 5.2).....	20
$C(h) \frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial [K(h) \left(\frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right)]}{\partial z} - S(h)$ (Eq. 5.3)	21
$\Theta = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = [1 + \alpha h ^n]^{\left(\frac{1}{n}\right)^{-1}}$, (Eq. 5.4)	21
$K = K_{sat} \Theta^\lambda \{ 1 - (1 - \Theta^{\frac{n}{n-1}})^{1 - \left(\frac{1}{n}\right)} \}^2$, (Eq. 5.5).....	21
$ q \leq \left -K(h) \left(\frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right) \right $ (Eq. 5.6)	22
$S_z = p_z (M(h)_z - M_{0,z})$ (Eq. 5.7).....	22
$M(h) = \int_{h_w}^h K(h) \partial h = \int_{\theta_w}^\theta D(\theta) \partial \theta$, (Eq. 5.8)	23
$p_z = \frac{4}{r_{o,z}^2 - a_z^2 r_{m,z}^2 + 2(r_{m,z}^2 + r_{o,z}^2) \ln \left(\frac{a_z r_{m,z}}{r_{o,z}} \right)}$, (Eq. 5.9)	23
$RLD = \frac{1}{\pi \cdot r_m^2}$ or $r_{m,z} = \sqrt{\frac{1}{\pi \cdot RLD}}$, (Eq. 5.10).....	23
$T_a = \int_0^{z_{max}} S_z dz$ (Eq. 5.11).....	24
$SPR = a B D^b \theta^c$, (Eq. 5.12)	24
$RE(h) = \alpha(h) RE_{max}$ (Eq. 5.13)	26
$\alpha(h) = \left\{ \begin{array}{ll} 0 & \text{if } h \leq h_1 \\ \frac{(h_1 - h)}{(h_1 - h_2)} & \text{if } h_1 < h \leq h_2 \\ 1 & \text{if } h_2 < h \leq h_3 \\ \frac{(h_4 - h)}{(h_4 - h_3)} & \text{if } h_3 < h \leq h_4 \\ 0 & \text{if } h > h_4 \end{array} \right.$	(Eq. 5.14) 26
$RE(SPR) = \alpha(SPR) RE_{max}$ (Eq. 5.15).....	27
$\alpha(SPR) = \exp(-0.4325 SPR)$ (Eq. 5.16)	27
$\alpha(SPR) = \exp(-0.30 SPR)$ (Eq. 5.17)	27
$\alpha(SPR) = \exp(-0.30 SPR)$ (Eq. 5.18).....	27
$RE(SPR, h)_{t,z} = srf(SPR, h)_{t,z} RE_{max}$ (Eq. 5.19).....	27
$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i - O_i $ (Eq. 5.20)	31
$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}$ (Eq. 5.21).....	31
$CRM = \frac{\sum_{i=1}^n O_i - \sum_{i=1}^n P_i}{\sum_{i=1}^n O_i}$ (Eq. 5.22).....	31
$r = \frac{\sigma_{OP}}{\sigma_O - \sigma_P}$ (Eq. 5.23)	32
$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{O})^2}{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{O} + O_i - \bar{O})^2}$ (Eq. 5.24)	32
$EF = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 - \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2}$ (Eq. 5.25).....	32

1 INTRODUÇÃO GERAL

O sistema plantio direto tem sido reconhecido como o sistema de manejo do solo mais importante para a sustentabilidade dos agroecossistemas brasileiros. A expansão da área agrícola manejada sob sistema plantio direto, hoje estimada em cerca de 32 milhões de hectares (FEBRAPDP, 2016), só foi possível em função do desenvolvimento continuado de soluções tecnológicas. No entanto, apesar dos quase 40 anos de pesquisas e observações acumuladas por produtores, técnicos e pesquisadores, alguns problemas ainda persistem e merecem ser mais bem estudados. Dentre estes, destaca-se que, em quase todas as áreas em plantio direto, a presença de uma camada de maior grau de compactação, geralmente posicionada a 0,1-0,2 m de profundidade (FRANCHINI et al., 2011). Isso normalmente está associado à ausência de preceitos básicos do sistema plantio direto, tais como a rotação de culturas, o mínimo revolvimento e a cobertura permanente da superfície do solo.

O sistema plantio direto é comumente implantado nas principais áreas produtoras de grãos do Brasil, e dentre as principais classes de solos de ocorrência no Brasil, destacam-se os Latossolos e Argissolos, que representam 58% dos solos brasileiros (SANTOS et al., 2013). Assim, não há clareza se existem e quais são os níveis críticos de compactação do solo, aos quais as plantas toleram sem que ocorram perdas produtivas. Isso favorece que em muitos casos, indica-se a utilização de práticas invasivas, tais como a escarificação do solo, no sistema plantio direto (CAMARA; KLEIN, 2005b). Esta prática de manejo do solo, interfere na estruturação do solo e na dinâmica da água e de nutrientes para as plantas. As práticas de manejo que mobilizam o solo no sistema plantio direto, causam desestruturação do sistema, o qual levará muito mais tempo para que chegue a um novo estado de equilíbrio.

A degradação da qualidade física do solo reduz o desenvolvimento radicular (VALENTINE et al., 2012) e a disponibilidade de água, oxigênio e nutrientes às plantas. Além disso, a compactação exerce efeitos negativos sobre o ambiente, aumentando as perdas de água e de nutrientes, e por consequência, incrementa as emissões de gases causadores do efeito estufa, além de causar poluição dos recursos hídricos (LIPIEC; ARVIDSSON; MURER, 2003). Assim, uma das medidas preconizadas para melhorar a qualidade física de solos compactados é a adoção de sistemas de rotação de culturas que contemplem plantas com elevado potencial de produção de fitomassa com sistema radicular abundante, profundo e que supere as limitações físicas dos solos (MORAES et al., 2016a).

Existem diversos indicadores do estado de compactação do solo, sendo a resistência do solo à penetração, a macroporosidade e a densidade do solo os mais utilizados. Atualmente, o grande desafio de diversas pesquisas vem sendo estabelecer, para esses indicadores, valores considerados críticos ou restritivos ao crescimento das plantas. Entretanto, há pequena sensibilidade dos indicadores físicos tradicionalmente utilizados (densidade do solo, porosidades, resistência do solo à penetração) em detectar alterações no volume, geometria e continuidade dos poros que afetam diretamente a resistência do solo ao crescimento radicular das culturas (REICHERT; SUZUKI; REINERT, 2007). Além disso, o uso de valores estáticos para descrever processos físicos não tem se mostrado promissores, pois, as condições físicas dos solos são influenciadas diretamente pelo conteúdo de água e este varia durante o ciclo das culturas.

Assim, na ausência de outras limitações ao crescimento das culturas, os fatores físicos que afetam diretamente o desenvolvimento das culturas são determinados por processos físicos de transferência de água e de nutrientes, de gases e fluxo de calor no solo (LETEY, 1985). Portanto, o crescimento e desenvolvimento das culturas estará relacionado às condições físicas durante todo o ciclo de desenvolvimento. Estes processos (fluxo de água, gases e calor) podem ser descritos por modelos de base física, entretanto não existem modelos que consideram os estresses mecânicos no crescimento radicular das culturas.

Na maior parte dos modelos agrohidrológicos, com relações solo-planta-atmosfera são considerados como ligação entre os fatores de solo com a planta e a atmosfera, apenas a absorção de água que é igual numericamente à

transpiração das culturas (DE JONG VAN LIER et al., 2008). Assim, até o momento os modelos de crescimento radiculares, com exceção do conteúdo de água do solo, não consideram as demais condições físicas dos solos, especialmente a dinâmica da resistência do solo à penetração radicular. Neste sentido, a integração da dinâmica dos processos físicos que afetam diretamente o desenvolvimento das culturas em modelos com relações solo-planta-atmosfera, poderá promover avanços no conhecimento e entendimento destas interações biofísicas.

Diante do acima elucidado, propõe-se a seguinte temática de doutorado: “Modelagem do crescimento radicular de milho e soja sujeito a estresses hídrico e mecânico em Latossolo”. A tese está sendo apresentada em capítulos, os quais são artigos científicos relacionados à temática central. No capítulo 1 é proposto um novo parâmetro que representa as condições físicas do solo (resistência do solo à penetração, aeração e disponibilidade hídrica) que afetam diretamente o crescimento radicular das culturas, o qual é implementado em um modelo de crescimento radicular que usa solução numérica dos fluxos de água no solo e calcula a absorção de água pelas plantas por meio de modelos de base física. Além disso, no capítulo 1 são apresentadas simulações do crescimento radicular de soja em função da presença ou não de camadas com maior nível de compactação no solo. Também é avaliada a eficiência do modelo em prever o crescimento radicular de soja em condição de deficiência hídrica em um Latossolo Vermelho.

No capítulo 2, a modelagem do crescimento radicular de soja em diferentes níveis de compactação de um Latossolo Vermelho foi comparada com resultados obtidos no campo, sendo verificada adequada concordância entre valores simulados e medidos. Por fim, no capítulo 3, a modelagem foi usada para simular o crescimento radicular da cultura do milho, cultivado em diferentes níveis de compactação de um Latossolo Vermelho, situação em que o modelo também descreveu adequadamente o crescimento radicular observado no campo.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. O sistema plantio direto e os problemas com compactação do solo

O sistema plantio direto tornou-se o complexo tecnológico de manejo de solo e de culturas com o mais amplo potencial para subsidiar o desenvolvimento sustentável do agronegócio brasileiro, atingindo, na atualidade, cerca de 32 milhões de hectares (FEBRAPDP, 2016). Essa área representa mais de 55% dos 57,3 milhões de hectares de lavoura anual produtora de grãos do país (cereais, leguminosas e oleaginosas) (IBGE, 2015). Porém, ao se contrastar os preceitos da agricultura conservacionista preconizados para o sistema plantio direto a partir do fim dos anos 2000, com aqueles que na atualidade estão sendo efetivamente adotados, evidenciam-se problemas de degradação de solo e dos recursos naturais (DENARDIN et al., 2012).

Assim, a adoção isolada de alguns preceitos de conservação do solo, tais como a mobilização de solo restrita à linha de semeadura e manutenção dos restos culturais na superfície do solo (DENARDIN, 2014), embora propicie expressiva redução da erosão quando comparada ao preparo convencional (BERTOL et al., 2007), sem dúvida, não tem sido suficiente para imprimir conservacionismo às áreas agricultadas e preservacionismo às áreas do entorno, diante da diversidade edafoclimática no Brasil.

Diante desse cenário, denota-se que 40 anos após a introdução do sistema plantio direto no Brasil, não há ainda unanimidade na interpretação de seu conceito e de seus fundamentos, e, principalmente, nem discernimento para identificar e adotar um conjunto mínimo de preceitos da agricultura

conservacionista referentes à viabilização dessa tecnologia de modo ininterrupto ao longo do tempo.

O sistema plantio direto com adoção parcial dos preceitos da agricultura conservacionista tem resultado, entre outros problemas, na degradação da qualidade física do solo, percebida por acentuada estratificação física e química da camada superficial de 0-20 cm. Essa estratificação é expressa, na camada superficial (0-5 cm), por condições físicas favoráveis ao desenvolvimento de raízes, e, na camada subsuperficial (5-20 cm), pela degradação da estrutura do solo, notada pelo aumento da densidade do solo, redução da porosidade e permeabilidade do solo ao ar e à água com incrementos da resistência mecânica do solo à penetração (MORAES et al., 2014, 2016b). A associação desses fatores tem sido causa de concentração de raízes na camada superficial do solo, onde o estresse hídrico se manifesta, não apenas pela distribuição irregular da chuva, mas, também, pela baixa permeabilidade da camada subsuperficial do solo que limita o aprofundamento de raízes e a ascensão de água às raízes dispostas superficialmente (FRANCHINI et al., 2009). Em adição, a degradação física do solo tem propiciado erosão e poluição ambiental, quando da ocorrência de chuvas intensas (MERTEN et al., 2015). Portanto, solos com essas propriedades colocam em risco e comprometem as projeções estabelecidas para o agronegócio brasileiro. Os prejuízos econômicos e ambientais decorrentes da ausência de adequado manejo do solo podem estar sendo agravados com o advento da agricultura de precisão ao utilizar a aplicação de corretivos e fertilizantes na superfície do solo, sem a devida atenção à qualidade da estrutura e da cobertura do solo.

O processo de alteração estrutural do solo, biologicamente, pode estar condicionado ao aporte de fitomassa ao solo em quantidade e frequência aquém da demanda biológica (BAYER et al., 2000). Considerando que a adição de biomassa por meio do sistema radicular é a principal entrada de carbono no solo (ALBURQUERQUE et al., 2015), e a matéria orgânica é um dos agentes cimentantes mais ativos para as interações organo-minerais (CONCEIÇÃO; DIECKOW; BAYER, 2013), a alterações da estrutura do solo com a degradação de agregados pela mobilização, compactação do solo ou falta de adições de materiais orgânicos (BAYER et al., 2000) pode levar a perda de carbono fisicamente protegido (JHA et al., 2012), favorecendo os processos de

compactação pelo tráfego agrícola (KELLER et al., 2014), principalmente em função do aumento da capacidade de suporte de carga dos solos (ORTIGARA et al., 2015).

2.2. Manejo do solo em áreas compactadas

A compactação do solo é um dos principais problemas para que o solo exerça suas funções, principalmente em sistemas agrícolas intensificados de produção (TROLDBORG et al., 2013). A compactação do solo, além de aumentar a resistência do solo à penetração das raízes (BENGOUGH et al., 2011), limita a profundidade e o volume de solo explorado em busca de água e nutrientes (VALENTINE et al., 2012), reduz a porosidade total, a macroporosidade, a aeração, a capacidade de infiltração de água (MORAES et al., 2016b) e a condutividade hidráulica saturada do solo (SILVA et al., 2009). Essas modificações podem diminuir a produtividade das culturas, especialmente em anos secos ou com excesso de chuvas (FRANCHINI et al., 2009), bem como aumentar as perdas de água, solo e nutrientes, as emissões de gases causadores do efeito estufa e a poluição dos recursos hídricos (LIPIEC; ARVIDSSON; MURER, 2003), prejudicando ainda o desempenho das máquinas agrícolas (TULLBERG, 2000).

Os efeitos negativos da compactação do solo sobre a produtividade são dependentes das condições climáticas durante o ciclo de desenvolvimento da cultura (LINDSTROM; VOORHEES, 1994), tendo em vista que o impedimento mecânico do solo diminui o desenvolvimento radicular e a disponibilidade de água, o fluxo de oxigênio e a absorção de nutrientes (BENGOUGH et al., 2011). Dessa forma, a adoção de práticas de manejo para mitigação de camadas compactadas de solo pode contribuir para a redução das perdas de produtividade da soja ocasionadas por limitações físicas dos solos (FRANCHINI et al., 2009). Entretanto, nem sempre a compactação pode ser prejudicial à produtividade de grãos das culturas. Assim, em condições de clima temperado, nos Estados Unidos, Lindstrom e Voorhees (1994) observaram reduções exponenciais de produtividade de grãos e de biomassa de milho em função do incremento de tráfego agrícola em anos com boa disponibilidade hídrica.

Entretanto, em condições de déficit hídrico, a produtividade de milho apresentou resposta quadrática em função do tráfego agrícola.

A escarificação do solo em áreas conduzidas no sistema plantio direto tem sido frequentemente indicada como prática capaz de reduzir o nível de compactação de camadas superficiais do solo (CAMARA; KLEIN, 2005a; MELERO et al., 2011). Desde que bem executada, a escarificação é capaz de romper camadas compactadas de solo de modo imediato (KLEIN; CAMARA, 2007), mas seus efeitos persistem, em geral, por um período efêmero, igual ou inferior a um ano (VEIGA et al., 2007), uma vez que essa operação não elimina a causa do problema (MORAES et al., 2016b). A decisão em torno da necessidade ou não da escarificação no sistema plantio direto deve ser criteriosa, tendo vista o custo relativamente elevado da operação (ŠARAUSKIS et al., 2014), o aumento da suscetibilidade do solo à compactação pelo tráfego posterior à operação (MORAES et al., 2016a), a alteração da estrutura, a redução da cobertura do solo (NUNES et al., 2015b), a interrupção da continuidade e alteração da frequência do tamanho dos poros (MORAES et al., 2016b), contribuindo para a alteração do fluxo de água no solo (MORAES et al., 2015) e na maior parte das condições hídricas não há incrementos de produtividade de grãos das culturas (FRANCHINI et al., 2012). A escarificação do solo incrementa a taxa de infiltração de água no solo, de forma imediata (CAMARA; KLEIN, 2005b), mas não aumenta a disponibilidade de água extraível pelas culturas (MORAES et al., 2016b). Assim, as principais recomendações são que sistemas que incluam rotações de culturas devem ser a primeira opção para melhorar a qualidade física do solo em áreas sob sistema plantio direto (CALONEGO; ROSOLEM, 2010).

Outra alternativa mecânica para a redução de problemas originados pela compactação das áreas em sistema plantio direto é o uso ou o aprofundamento da ação das hastes sulcadoras para deposição da adubação no momento da semeadura (NUNES et al., 2015a). O aumento da profundidade de atuação das hastes sulcadoras, favorece incrementos na produtividade de soja em condições de déficit hídrico (CONTE et al., 2009a), entretanto, não são observados os mesmos resultados para a cultura do milho (CONTE et al., 2009b), além de apresentarem menores efeitos do que o uso de culturas de cobertura do solo (DEBIASI et al., 2010). Assim, o incremento na profundidade

de atuação das hastes sulcadoras para controle de compactação do solo, demanda maior esforço de tração, patinagem do trator e consumo de combustível por área trabalhada (LEVIEN et al., 2011). Além disso, as maiores eficiências de mobilização do solo das hastes sulcadoras ocorrem quando estas são usadas até no máximo à 12 cm de profundidade (CONTE et al., 2011).

2.3. Fatores físicos que afetam o desenvolvimento das culturas

O conhecimento das propriedades físicas do solo que afetam o desenvolvimento das culturas tem fundamental importância na agricultura. Conforme Letey (1985), os fatores que afetam diretamente o crescimento radicular são a água, o oxigênio, a temperatura e a resistência mecânica do solo (Figura 2.1). Sendo que o principal parâmetro físico não é o conteúdo de água no solo, mas sim o potencial com que a água está retida na matriz do solo para absorção radicular (DE JONG VAN LIER et al., 2008).

Os atributos físicos dos solos, tais como a densidade do solo, a textura, a estabilidade de agregados e a distribuição e o tamanho de poros (Figura 2.1) afetam indiretamente o crescimento das plantas (LETEY, 1985). Entretanto, estas propriedades são importantes, pois alteram os fluxos de gases, de água e de nutrientes (KUNCORO et al., 2014), assim influenciam na alteração dos estresses físicos ao crescimento radicular de forma indireta.

As plantas são afetadas por uma combinação de fatores atribuídos à variação do conteúdo de água (potencial matricial), resistência mecânica do solo e aeração (BENGOUGH et al., 2011), assim, estes parâmetros podem indicar os estresses que as plantas foram submetidas para o crescimento radicular (VALENTINE et al., 2012), principalmente quando se desenvolvem em solos compactados (LIPIEC et al., 2012). Assim, pergunta-se qual é o valor ideal de cada parâmetro para a produção das plantas? Entretanto, não é possível uma resposta simples, pois estes parâmetros variam conforme o tempo e a posição no solo (LETEY, 1985). Por exemplo, o conteúdo de água no solo está sempre variando devido a evapotranspiração, irrigação e precipitação. A água não é extraída de forma uniforme pela planta devido às diferenças de potenciais existentes entre as diferentes posições das raízes. Um simples valor de potencial de água não descreve todas as condições que a planta é exposta.

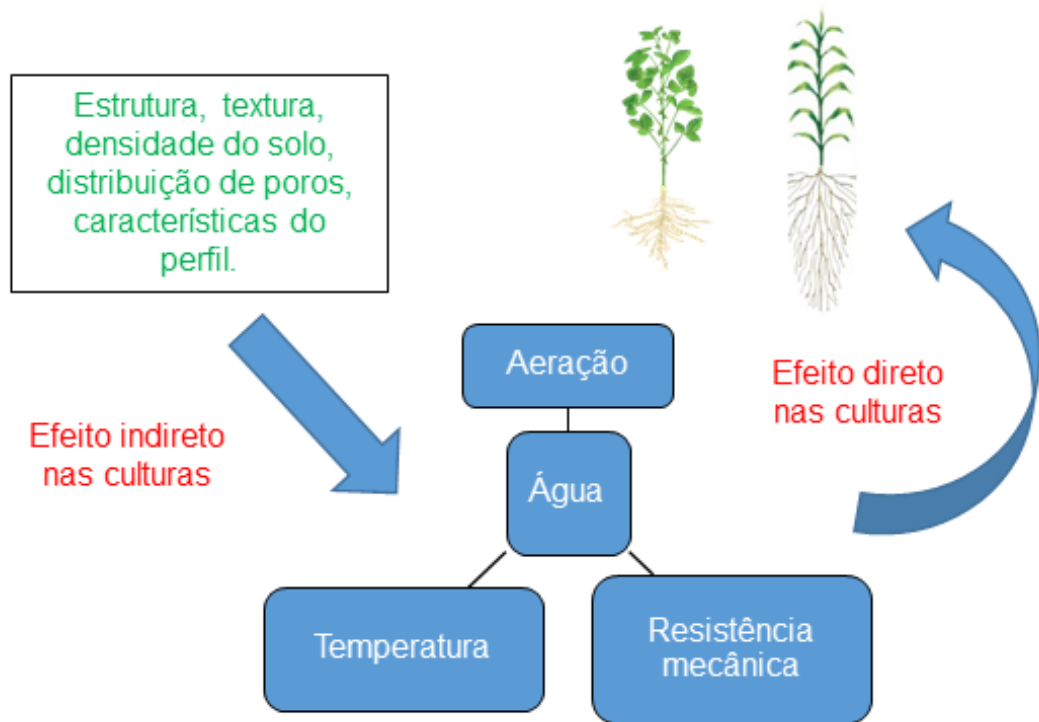


Figura 2.1. Relação entre condições físicas do solo e o desenvolvimento das culturas. Adaptado de Letey (1985).

Outra complicação surge do fato em que os quatro fatores físicos do solo (água, aeração, temperatura e resistência mecânica) são considerados interligados e nunca independentes um do outro (LETEY, 1985). Assim, em condições de mínima resistência do solo à penetração, que ocorreria em solo saturado, haveria severa deficiência de aeração.

Neste sentido, relações entre a produtividade de grãos das culturas e as condições físicas do solo dependem de muitas variáveis das plantas e do clima, e conforme Letey (1985), alguns pontos devem ser destacados. Primeiro, as espécies de plantas diferem em suas respostas a propriedades físicas. Segundo, os diferentes estádios fenológicos de uma cultura podem ter diferentes limites ou parâmetros físicos. Terceiro, os limites físicos impostos podem ser alterados pelas condições climáticas (clima temperado ou subtropical).

Assim, os valores de densidade do solo limitantes ao crescimento de plantas, podem ser alterados diretamente pela disponibilidade de oxigênio para o sistema radicular das culturas. RICKMAN; LETEY; STOLZY (1966), mantiveram a taxa de difusão de oxigênio em níveis adequados para culturas e verificaram que raízes de tomates desenvolveram igualmente em solos com

baixos e altos valores de densidade do solo. Assim, mais importante que a densidade do solo é a taxa de difusão de oxigênio no solo e a concentração de CO₂ (JONG VAN LIER, 2001). Por isso, torna-se fundamental a utilização do sistema plantio direto que possibilitam a preservação da continuidade de poros no perfil do solo.

2.4. Conceitos de valores críticos, limitantes ou restritivos de atributos físicos

Os conceitos de valores críticos, limitantes ou restritivos ao crescimento das plantas foram definidos por REICHERT; SUZUKI; REINERT (2007): i) crítico é um valor de alguma propriedade que retardaria alguma função ou o crescimento da planta, mas não limitaria nem restringiria tal função; ii) limitante ou restritivo é um valor que interrompe ou impede alguma função ou o crescimento da planta. Assim, os valores limitantes de propriedades físicas para as culturas se relacionam diretamente com o decréscimo significativo na sua produtividade de grãos.

Diversas pesquisas têm buscado definir e conseguir identificar valores limitantes de propriedades físicas ao crescimento das culturas. Para isso, relações baseadas no crescimento relativo das plantas poderiam indicar com maior precisão limites físicos do que buscar estes valores associados ao crescimento/não crescimento ou produtividade/não produtividade das culturas (SILVA; IMHOFF; KAY, 2004). Entretanto, as respostas das culturas são resultados das interações dinâmicas dos processos físicos, químicos e biológicos que ocorrem durante o ciclo de desenvolvimento das culturas.

2.5. Relações entre crescimento radicular e condições físicas dos solos

A compactação do solo em níveis intermediários é benéfica às plantas em relação a um solo solto e desagregado, porém, em níveis elevados, a compactação é extremamente prejudicial às plantas (REICHERT; SUZUKI; REINERT, 2007). As modificações provocadas pelo revolvimento do solo na estrutura, distribuição do tamanho dos poros e teor de carbono orgânico, alteram

as forças de retenção de água no solo e sua disponibilidade, os quais são fatores determinantes para o desenvolvimento de plantas (SILVA et al., 2005). A conservação do solo e da água interfere na sustentabilidade do sistema produtivo, necessitando assim de várias práticas de conservação para preservação da qualidade física, química e biológica destes recursos naturais.

Na avaliação de sistemas produtivos, os indicadores de qualidade física do solo mais utilizados são a densidade do solo e classes de poros do solo (MORAES et al., 2016b), grau de compactação do solo (SUZUKI; REICHERT; REINERT, 2013), resistência do solo à penetração (MORAES et al., 2014), teor de água no solo, água disponível, índice S (CAVALIERI et al., 2009), intervalo hídrico ótimo (GUEDES FILHO; BLANCO-CANQUI; SILVA, 2013), curva de retenção de água e a curva de resistência do solo à penetração (BLAINSKI et al., 2008). As principais relações dos indicadores de qualidade física do solo têm sido realizadas com parâmetros morfológicos (área foliar, crescimento de parte aérea e radicular) das culturas, porém, a relação entre indicadores de compactação do solo em sistema plantio direto e produtividade de grãos é um assunto com quantidade pequena de publicações científicas, mesmo que já tenham transcorridos 40 anos de uso do sistema plantio direto (GUBIANI, 2012). Assim, relações que busquem valores de atributos físicos limitante (por exemplo, a aeração, a resistência do solo à penetração em e a densidade do solo) ao desenvolvimento radicular associadas com a produtividade de grãos, fibras, frutos, tubérculos ou massa vegetal ainda estão em menores quantidades.

Os macroporos são os principais poros responsáveis pelos fluxos de gases no solo, e conforme Prevedello e Armindo (2015) para obter um ótimo desenvolvimento das plantas, a porosidade de aeração não deve ser menor do que 0,10 a 0,15 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$, principalmente dentro de dois ou três dias após ocorrer chuva ou irrigação. Porém não tem sido comprovado a importância destes valores limitantes de 0,10 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ de porosidade de aeração em solos bem drenados com uso de sistema plantio direto (GUBIANI; REICHERT; REINERT, 2013). A porosidade de aeração mínima de um solo deveria variar em função de diversos fatores, que determinam características de drenagem e o tempo que o sistema radicular fica exposto a uma oxigenação restrita (JONG VAN LIER, 2001). Por exemplo, o crescimento radicular de soja somente foi restringido quando o grau de compactação (determinado em amostras inicialmente

coletadas com estrutura preservada e submetidas à aplicação de carga de 1600 kPa) esteve próximo de 100 % entretanto a máxima produtividade de grãos ocorreu com um grau de compactação de 82 % em Alfisols e Ultisol, já em Oxisol foi de 85 % (SUZUKI; REICHERT; REINERT, 2013).

Os resultados de algumas pesquisas relacionando o crescimento das plantas com as condições físicas do solo sugerem que as raízes atuam como sensores do ambiente físico do solo e enviam sinais à parte aérea que controlam o crescimento e a expansão foliar (TORMENA, 2009). Entretanto, as raízes das culturas podem se adaptar a diferentes condições de restrição ao crescimento. Kolb, Hartmann e Genet (2012) apresentam novas técnicas, baseadas em medições fotoelásticas no campo, para estudar a mecânica de resposta das raízes à resistência e à estrutura do solo. Estes autores afirmam que existe grande diferença nos mecanismos de reação da planta, dependendo da forma como o desenvolvimento do sistema radicular tem sido impedida, axial ou radialmente. Neste estudo, Kolb, Hartmann e Genet (2012) observaram que, curiosamente, o alongamento radicular em plântulas de grão de bico foi insensível a restrições puramente radiais ao eixo da raiz, ou seja, camadas de solo compactadas com pequenas fissuras ou poros rígidos e contínuos poderiam permitir a alongação radicular. Assim, as raízes só deverão ser impedidas de crescer se houver restrições por pressão axial associadas ou não com pressões radiais (BENGOUGH, 2012a). Isso sugere que os macroporos ou bioporos presentes em solos com elevada resistência à penetração tem importante papel no alongamento radicular. Além disso, Kolb, Hartmann e Genet (2012) detalharam os efeitos de pressões radiais no crescimento radicular de grão-de-bico e, em nível microscópico, observaram que as células do córtex externo na zona do poro foram comprimidas, mas as células do cilindro central não foram alteradas.

2.6. Crescimento radicular e a interface solo-raiz

O aumento da extensão das raízes ocorre na região apical das raízes, e esta extensão dos eixos radiculares apicais bem como emissão de raízes laterais ocorrem para expansão da área de captação de água e nutrientes, além de potencialização da ancoragem das plantas (GREGORY, 2006). No ápice

radicular são encontradas diferentes regiões da raiz (Figura 2.2), sendo que as divisões celulares ocorrem no meristema apical, a qual está confinada próximo da coifa que é um escudo de proteção das raízes, e pela zona de alongamento radicular (KONRAD, 2006), região onde ocorrem as pressões radiculares para penetração nos solos como resultado dos processos biofísicos da interação solo-raiz (BENGOUGH, 2006).

A divisão celular não resulta em aumento no comprimento radicular, mas sim fornece as matérias-primas para a expansão celular subsequente e, portanto, o crescimento radicular não é resultado somente da divisão celular (GREGORY, 2006). Na zona de alongamento, fora do meristema, as células aumentam de comprimento, acompanhadas por um grande aumento no tamanho do vacúolo e um aumento na área das paredes laterais da célula (GREGORY, 2006).

As limitações físicas dos solos afetam diretamente o crescimento radicular das culturas por meio da redução da taxa de alongamento radicular (BENGOUGH et al., 2011). Assim, caso não haja limitações químicas dos solos, as condições físicas dos solos durante o ciclo de desenvolvimento das culturas serão as responsáveis por permitir que as raízes possam se alongar e crescer no solo.

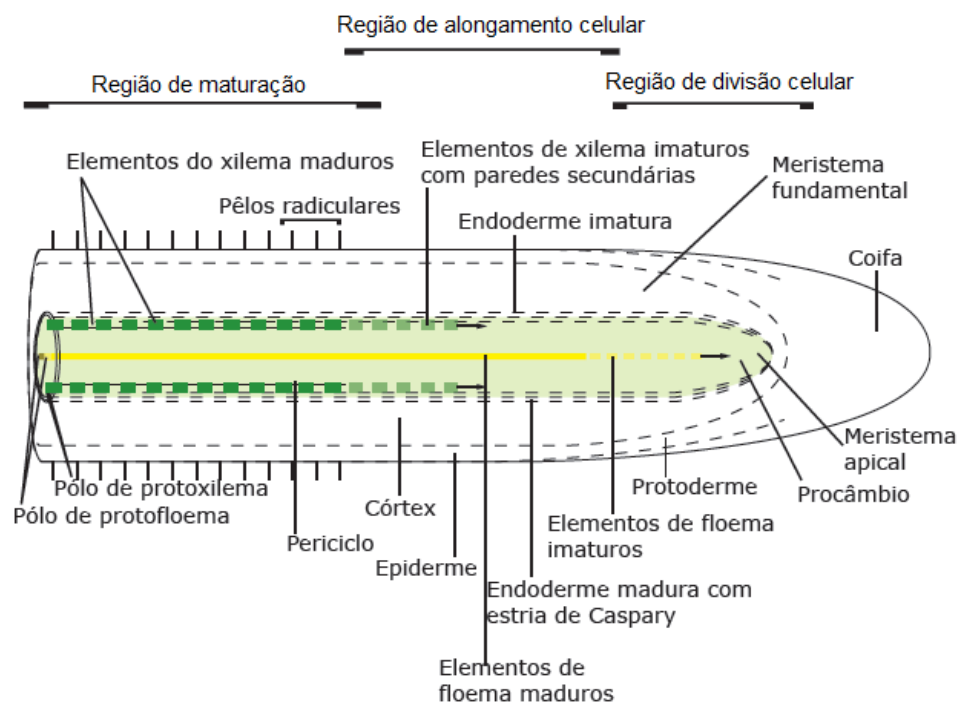


Figura 2.2. Representação esquemática do ápice radicular com regiões de divisão, alongamento e maturação celular. Fonte: Konrad (2006)

O uso intenso de revolvimento do solo promove a dispersão das partículas de solo e causa o selamento superficial, promovendo entupimento dos poros do solo (VALENTINE et al., 2012), causando alteração dos fluxos de ar e água no solo e do solo para as raízes das plantas. Assim, os limites físicos ao crescimento das plantas, provavelmente sejam diferentes em solos com ou sem mobilização. Solos sob sistemas conservacionistas, tais como o sistema plantio direto, promovem a preservação da continuidade dos bioporos ao longo do perfil. A estruturação dos bioporos ao longo do perfil do solo em sistema plantio direto favorece incrementos nas variações espaciais verticais e horizontais nos atributos físicos do solo, e isso, poderá reduzir a resistência do solo em alguns locais, favorecendo a penetração das raízes no solo.

Em condições de ausência de restrições químicas e biológicas dos solos, as condições físicas podem limitar o crescimento, desenvolvimento e a produtividade das culturas. Sistemas radiculares extensivos são vitais quando as plantas estão se desenvolvendo em solos com suplemento insuficientes de água ou de nutrientes (BENGOUGH et al., 2011). Entretanto, uma vez que estes sistemas mesmo extensivos encontrem restrições físicas e ou químicas ao crescimento, a melhora das condições físicas do solo e o bom desenvolvimento da planta fica comprometido.

2.7. Modelagem do crescimento radicular

O conhecimento do desenvolvimento do sistema radicular das culturas é de fundamental importância para melhorias no entendimento das relações solo-planta-atmosfera. Com o incremento do potencial computacional desde as décadas de 80 e 90, iniciaram predições do crescimento radicular com uso de modelos complexos (DUNBABIN et al., 2013), especialmente em terceira-dimensão (3D) (LUNGLEY, 1973). Mas foi com os sistemas de regras de Lindenmayer (L-systems) (PRUSINKIEWICZ; LINDENMAYER, 1990), associados aos recentes avanços tecnológicos que novos programas computacionais, tais como o RootBox (LEITNER et al., 2010a) proporcionaram avanços no desenvolvimento de modelos dinâmicos que simulem o crescimento radicular e a absorção de água e nutrientes (LEITNER et al., 2010c). Assim,

complexas arquiteturas radiculares podem ser descritas em modelos L-system, em função da dependência do tempo, com simples sequências de regras de crescimento (LEITNER et al., 2010a).

Diversos sistemas radiculares podem ser construídos no RootBox (BODNER et al., 2013), sendo apenas necessário informar parâmetros de arquitetura radicular das culturas, tais como informações para cada ordem radicular do diâmetro radicular, comprimento da zona apical e basal, distância entre ramificações, número máximo de ramificações, taxa inicial de alongamento, tipo e grau de tropismo para o crescimento das raízes (TRON et al., 2015). Arquiteturas radiculares simuladas no RootBox foram comparadas com medições de campo para as culturas de milho e canola (LEITNER et al., 2010a), ou para estudos da absorção de nutrientes em função da presença de pelos radiculares (LEITNER et al., 2010b), no crescimento de hifas de fungos (SCHNEPF et al., 2016) ou em estudos de absorção de água em função da arquitetura radicular (TRON et al., 2015).

Alguns modelos de solução numérica da equação de Richards para o fluxo de água no solo, que incluem processos de absorção de água pelas plantas, tais como Hydrus (HARTMANN; ŠIMŮNEK, 2016), R-SWMS (JAVAUX et al., 2008) e *Soil Water Atmosphere Plant* (SWAP) (KROES et al., 2008) não consideram efeitos dinâmicos dos processos físicos (temperatura, aeração, resistência do solo à penetração e conteúdo de água do solo) ao crescimento radicular. Recentes aproximações com acoplamento de modelos de fluxo de água no solo, com absorção de água e crescimento dinâmico dos sistemas radiculares foram realizados sem considerar os efeitos das condições físicas ao crescimento. Assim, nestes modelos normalmente a taxa de alongamento radicular é considerada exponencial em função do tempo, mas independentemente das condições físicas das camadas do solo. Para avanços na área de modelagem do crescimento radicular é necessário que as condições físicas dos solos sejam consideradas como parâmetros de entrada nos modelos de crescimento radiculares.

3 HIPÓTESE

Os estresses hídrico, mecânico e anóxico dos solos às plantas podem ser incluídos em modelos de crescimento radicular por meio de um parâmetro de redução do alongamento radicular, e o crescimento radicular pode ser predito em função da dinâmica dos estresses físicos durante o ciclo de cultivo.

4 OBJETIVO GERAL

Determinar um parâmetro representativo das condições físicas dos solos para o crescimento radicular de culturas, e implementar este parâmetro em um modelo com interação solo-planta-atmosfera.

4.1. Objetivos específicos

Determinar um parâmetro que represente os estresses hídricos e mecânicos dos solos ao crescimento radicular das culturas.

Modelar o crescimento radicular de culturas em função dos estresses hídricos e mecânicos dos solos.

Estudar como os níveis de compactação afetam o crescimento e desenvolvimento das culturas.

5 CAPÍTULO 1. MODELLING OF ROOT GROWTH LINKED WITH SOIL- WATER FLUX AND SOIL STRENGTH

5.1. Abstract

Root elongation is generally limited by a combination of mechanical impedance and water stress in most arable soils. However, dynamic of soil penetration resistance never was included in a model for predict the root growth. We need to develop a better modelling framework for understanding root growth interactions between plant genotype, soil management, and climate. Aim of paper is to develop a simple model for root elongation in relation to soil physical characteristics (penetration resistance, matric potential and hypoxia), and implement the model in RootBox for contrasting soil management systems. The model use MatLab® language, then include root parameters associate to numerical solution of the Richards equation and water uptake in function of matric flux potential. A diagrammatic framework is proposed to illustrate the interaction between root growth, soil management, and climatic conditions. Two scenario was performed, for simulated effect of soil compaction and weather condition for soybean root growth. In the first condition, there was used a soil compact layer from 16 to 20 cm at the soil profile. In the second scenario, drought condition was compared with a normal rainfall season during the vegetative stadium. The results of root length density simulated and in filed conditions was compared by one-to-one line. In the first condition, the soil compaction reduced the root development into and below the compact layer. In the second scenario, the root system was dependent of the soil physical conditions influenced by hydric available. The root length density simulated and measured of soybean for all profile until 100 cm was very close to 1:1 relation. Mains causes to reduce the

root elongation was simulated strongly by stress reduction function. This framework can be used for any implementation of soil physical limitation for root growth.

5.2. Introduction

Root growth can be limited by many factors in the soil environmental, including temperature, nutrient and water availability, pathogens, aeration, and soil strength (BENGOUGH, 1997). In terms of physical limitations to root growth, water stress (too little water for root growth), hypoxia or anoxia (too little oxygen), and mechanical impedance (soil that is too hard for roots to penetrate rapidly) are the major causes of poor root system growth and development (BENGOUGH et al., 2011). Thus, various process and mechanisms are involved in maintaining root elongation under water stress, such as osmotic adjustment and enhanced cell wall loosening (SCHMIDT et al., 2013; WU; COSGROVE, 2000). Root elongation is the main parameter for study the process and mechanism of soil physical conditions for plant development, but, penetrometer resistance in excess of 2 MPa have been used for characterized soil physical quality (LIPIEC et al., 2012; SILVA; KAY; PERFECT, 1994; TAYLOR; ROBERSON; PARKER, 1966). However, penetration resistance of 2 MPa, than occur even in many relatively moist soils, just is sufficient to slow root elongation to less than half of its unimpeded rate (BENGOUGH et al., 2011).

Penetration resistance depending of matric potential and has been the major limit on root elongation rate in most arable soil. However, this effect has not been included in root growth models to any great extent. Thus, need to develop a modelling framework of dynamic of soil physical conditions for understanding plant genotype and soil management element and root growth (i.e. root elongation). A major problem in applying laboratory-based understanding of root growth is that soil water potential in the field changes constantly, and can vary substantially through the soil profile (BENGOUGH, 2006). This indicate that is necessary to know how was the soil physical condition during the growing season, because the soil physical conditions are dynamic properties for plant development, and it need been incorporate in an agro-hydrological model.

Mathematical modelling has played a significant role in the development of our understanding of the root growth and plant water uptake (SCHNEPF; LEITNER; LEPSCH, 2012), and the improve of modelling of soil process still are necessary to a better quantification and prediction of ecosystem services (VEREECKEN et al., 2016). A dynamic root architecture model based on L-Systems (Lindenmayer system) in three-dimensional with effect of various kinds of root tropisms was developed by (LEITNER et al., 2010a) in MatLab® code called RootBox. This model have been used for some situation like nutrient uptake (LEITNER et al., 2010a; SCHNEPF; LEITNER; LEPSCH, 2012), growth of arbuscular mycorrhizal fungi (SCHNEPF et al., 2016), root-hydrology interactions (TRON et al., 2015) and water stress tolerance (LEITNER et al., 2014).

L-Systems model are a common tool in plant architecture modelling (LEITNER et al., 2010a; SCHNEPF et al., 2016). The visual comparison of the root simulation with field conditions by Leitner et al. (2010a) was promising for maize, *Anagallis femina* and *Brassica napus*. Already, RootBox code was efficient for reproduce 48 root architectures in 16 drought scenarios (TRON et al., 2015), additionally this program was used for reproduce the structural attributes for classification of root functional type in 288 simulated root systems (BODNER et al., 2013).

This paper presents a simple model for root elongation in relation to soil physical characteristics (penetration resistance, water stress, hypoxia or anoxia), and implement the model in RootBox for contrasting soil management regimes. Furthermore, a diagrammatic framework is proposed to illustrate the interaction between root growth, soil management, and climatic conditions.

5.3. Modelling approach

5.3.1. Root growth model

Root system was generated using the model developed by Leitner et al. (2010a), called Rootbox, than simulates three-dimensional root growth using L-systems (PRUSINKIEWICZ; LINDENMAYER, 1990). Root growth function was described as a negative exponential growth, (Eq. 5.1), and originally, root

elongation follows a negative exponential function of elongation rate until maximum length (k) is reached (LEITNER et al., 2010a; PAGÈS; JORDAN; PICARD, 1989). The maximal root length (k) is calculated for each individual root (Eq. 5.2) (LEITNER et al., 2014), as a result of sum the length of basal and apical zone, plus the spacing and number of branching (**Figure 5.1**). Basic production rules are applied for simulating root growth, branching, and different types of tropisms, e.g. gravitropism, exotropism, hydrotropism or chemotropism (TRON et al., 2015).

$$RL = k \left(1 - \exp \left(-\frac{re}{k} t \right) \right) \quad (\text{Eq. 5.1})$$

where RL is root length (cm), t is time (day), k the maximum root length (cm) and re the initial root elongation (cm day^{-1}).

$$k = l_b + l_a + l_n \cdot (nob - 1) \quad (\text{Eq. 5.2})$$

where k is the maximum root length (cm), l_b is the basal zone (cm), l_a is the apical zone (cm), l_n is the inter-spaces between branching (cm), nob is the maximal number of lateral branches (unit).

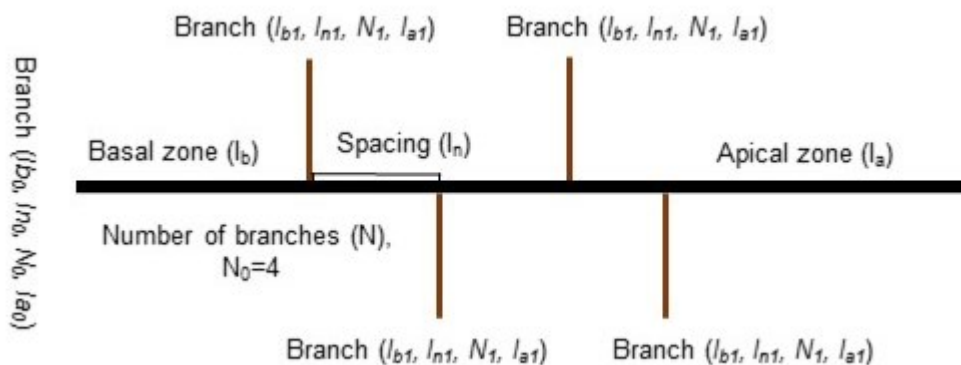


Figure 5.1. An illustration of the self-similar characters of plant roots (LEITNER et al., 2010a).

5.3.2. The soil-water flux

Water flux was modelling using the Richards' equation (Eq. 5.3) in one dimension added by the sink terms (S) to calculate the water movement in the

soil matrix by solving the Richards equations numerically with methods proposed by Celia and Bouloutas (1990) and Van Dam and Feddes (2000). Thus, the full description of numerically implement are described in Van Dam and Feddes (2000).

$$C(h) \frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial [K(h) \left(\frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right)]}{\partial z} - S(h) \quad (\text{Eq. 5.3})$$

where C is the differential water capacity ($\partial \theta / \partial h$) (cm^{-1}), θ is the volumetric soil water content ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$), h is the soil water pressure head (cm), t is the time (d), K is the unsaturated hydraulic conductivity (cm d^{-1}), z is the depth (cm, positive upward), S is the root water extraction ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3} \text{ d}^{-1}$).

The Eq. (5.3) was solved by both finite difference and finite element methods (CELIA; BOULOUTAS, 1990; VAN DAM; FEDDES, 2000). Richards' equation was used to describing water flux in the unsaturated and saturated zones of the soil, for this the model solves Eq. (5.3) numerically, using the relations between θ , h and K , with the Mualem-van Genuchten relations θ (h) and $K(h)$ (Eq. 5.4 and Eq. 5.5) (MUALEM, 1976; VAN GENUCHTEN, 1980).

$$\Theta = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = [1 + |\alpha h|^n]^{(\frac{1}{n}) - 1}, \quad (\text{Eq. 5.4})$$

$$K = K_{sat} \Theta^\lambda \{1 - (1 - \Theta^{(\frac{n}{n-1})})^{1 - (\frac{1}{n})}\}^2, \quad (\text{Eq. 5.5})$$

in which Θ is the effective saturation; θ is the water content ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$); θ_s is the saturated water content ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$); θ_r is the residual water content ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) that was estimate by regression for positive values; h is pressure head (cm); K is the hydraulic conductivity unsaturated (cm d^{-1}); K_{sat} is the saturated hydraulic conductivity (cm d^{-1}); and α (cm^{-1}), n and λ are empirical parameters. The value of parameter λ (Eq. 5.5) was 0.5 (MUALEM, 1976; VAN GENUCHTEN, 1980).

The initial condition is imposed through the specification of the pressure head (h) along the depth (z) at initial time (at $t = 0$). The boundary conditions can be of two types, Dirichlet condition, i.e., specification of the

pressure head h , or Neumann condition, i.e., specification of a flux q through the boundaries (FEDDES; KOWALIK; ZARADNY, 1978).

At the lower boundary we assume that the water table is deep enough to not influence soil water dynamics and the gradient of water pressure head $\partial h/\partial z$ is equal to zero (TRON et al., 2015). Thus, the flux is solely driven by gravity and is equal to the unsaturated hydraulic conductivity calculated at this boundary.

At the top boundary, i.e., the soil surface, water flux depends on both meteorological and soil conditions. The soil can lose water by evaporation or gain water by infiltration. In case of evaporation, the potential water flux from the soil surface only depends on atmospheric conditions, but the actual flux would be conditioned by availability of water in upper soil layers (TRON et al., 2015). If these soil layers dry out, the boundary condition will switch from flux-controlled, with q equal to the potential evaporation EP (cm day^{-1}), to head-controlled, with $h = h_{\text{atm}}$. The parameter h_{atm} is the water pressure head at the soil surface in equilibrium with the pressure head of the atmosphere (FEDDES; KOWALIK; ZARADNY, 1978).

In both cases, as described in Tron et al. (2015) the condition in the Eq. (5.6) must be respected.

$$|q| \leq \left| -K(h) \left(\frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right) \right| \quad (\text{Eq. 5.6})$$

5.3.3. Root water uptake

Root water uptake is simulated using the model proposed by De Jong Van Lier et al. (2008) (Eq. 5.7), that used the root length density and matric flux potential of each soil layers (Eq. 5.8). This model was coupling with the Richard's equation in one-dimensional (1D) by water uptake model (Eq. 5.7). The matric flux potential (M , $\text{cm}^2 \text{d}^{-1}$) is defined as the integral of unsaturated hydraulic conductivity, ($K(h)$, cm d^{-1}), over pressure head (h); or equivalently as the integral of diffusivity, ($D(\theta)$, $\text{cm}^2 \text{d}^{-1}$), over water content (θ , $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) (DE JONG VAN LIER et al., 2008). The boundary of the integral is the permanent wilting point in terms of pressure head (h_w) (cm) or water content (θ_w) ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$).

$$S_z = p_z (M(h)_z - M_{0,z}) \quad (\text{Eq. 5.7})$$

where p_z (m^{-2}) is defined as weighting factor for matric-flux potential dependent of root uptake; $M(h)$ is the matric flux potential ($cm^2 day^{-1}$); M_0 is the matric flux potential at the root surface ($cm^2 day^{-1}$).

Eq. (4b).

$$M(h) = \int_{h_w}^h K(h) \partial h = \int_{\theta_w}^{\theta} D(\theta) \partial \theta, \quad (\text{Eq. 5.8})$$

where h is the pressure head (cm); h_w is the pressure head at the wilting point (cm); K is the unsaturated hydraulic conductivity ($cm day^{-1}$); D is the diffusivity ($cm^2 day^{-1}$); θ is the soil water content ($cm^3 cm^{-3}$); θ_w is the water content at the wilting point.

The procedure for calculation root water uptake (Eq. 5.7) was described by De Jong Van Lier et al. (2008), and that can estimate the water uptake for each layer dependent of matric flux potential (Eq. 5.8) with a reduction function from root length density (Eq. 5.9).

$$p_z = \frac{4}{r_{0,z}^2 - a_z^2 r_{m,z}^2 + 2(r_{m,z}^2 + r_{0,z}^2) \ln(a_z r_{m,z} / r_{0,z})}, \quad (\text{Eq. 5.9})$$

in which p_z (cm^{-2}) is a weighting factor for matric-flux potential dependent of root uptake; a_z is a constant equal to 0.53; z is the soil layer (cm); $r_{0,z}$ is the root radius (cm); and $r_{m,z}$ is the rhizosphere radius (cm).

The rhizosphere radius ($r_{m,z}$) is equal to the half mean distance between roots and is related to the root length density (Eq. 5.10) (DE JONG VAN LIER et al., 2008).

$$RLD = \frac{1}{\pi r_m^2} \quad \text{or} \quad r_{m,z} = \sqrt{\frac{1}{\pi RLD}}, \quad (\text{Eq. 5.10})$$

where RLD is the root length density ($cm cm^{-3}$); r_m is the rhizosphere radius (cm); z is the each soil layer (cm).

The values of root radius ($r_{0,z}$) and root length density are simulate with the equations from Rootbox model (LEITNER et al., 2010a). For these variables

of root growth is coupling the soil-root interaction by stress reduction function for root elongation (see topic 5.3.5).

Actual transpiration is given by the integral of water uptake (Eq. 5.7), resulting in Eq. (5.11). Actual transpiration (T_a) cannot be higher than the potential transpiration T_P (cm day^{-1}) of the plant. The matric flux potential M_0 is initially considered equal to zero, i.e., $h = h_w$ at the root surface, but if the obtained transpiration is larger than potential transpiration, no water stress occurs and thus M_0 is larger than zero and its value is obtained by setting $T = T_P$ (TRON et al., 2015).

$$T_a = \int_0^{z_{max}} S_{(z)} dz \quad (\text{Eq. 5.11})$$

where T_a is actual transpiration (cm day^{-1}); z_{max} is the maximum root depth (cm); $S_{(z)}$ is the water uptake in each soil layer (cm day^{-1}).

5.3.4. Soil strength model

Soil penetration resistance was modelling as a function to soil water content and bulk density using non-linear model (Eq. 5.12) (BUSSCHER, 1990). For each set data is necessary a fitting of relationship of soil penetration resistance, water content and bulk density for determination of statistical parameters (a , b , and c). For soil penetration resistance curve was used a data set from a Rhodic Eutrudox (ORTIGARA et al., 2015), and soil penetration resistance simulated and measured was compared with one-to-one line (Figure 5.2). Soil penetration resistance simulated and measured showed a good fitting, and that parameters (a , b and c) can be used for this Rhodic Eutrudox for estimating of soil penetration resistance values from bulk density and water content values. Thus the Busscher's model (Eq. 5.12) can be used for adjust of soil penetration resistance for this soil.

$$SPR = a BD^b \theta^c, \quad (\text{Eq. 5.12})$$

where SPR (MPa) is the soil penetration resistance; BD (Mg m^{-3}) is the bulk density; θ ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) is volumetric soil water content and a , b e c are empirical parameters.

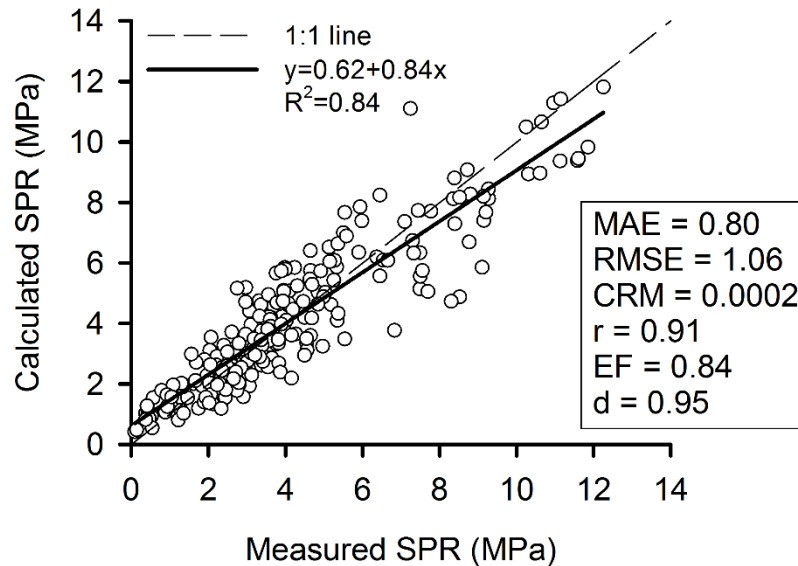


Figure 5.2. Measured vs. calculated values of soil penetration resistance (SPR) for a Rhodic Eutrudox, very clayed.

Dashed line represents a one-to-one relationship. The Busscher's parameters were $a=0.00587$; $b=8.0772$; $c=-4.65$. The data set are from Ortigara et al. (2015). MAE: means absolute error; RMSE: root mean squared error; CRM: coefficient of residual mass; r : coefficient of correlation; EF: modelling efficiency; and d : index of agreement.

5.3.5. Soil physical conditions for root growth

5.3.5.1. Reduction of root elongation due to water stress and poor aeration

Root elongation is a function of soil strength and matric potential (Figure 5.3a,b), and we assume that two stress reduction functions combine linearly i.e. the stresses act independently to decrease elongation rate (Figure 5.3c,d). The diagram in Figure 5.3c and Figure 5.3d allows us to compare the effects of contrasting soil management regimes on root growth. By combining this diagram with climate data, it can be used to compare stresses that limit root elongation in different seasons.

Using the Feddes concept for water uptake (FEDDES; KOWALIK; ZARADNY, 1978), and adapting for root elongation, we have the Eq. (5 13).

$$RE(h) = \alpha(h)RE_{\max} \quad (\text{Eq. 5.13})$$

Where $RE(h)$ is the root elongation potential affected by matric potential (cm day^{-1}), α_h is a dimensionless prescribes function of soil water pressure head and, RE_{\max} (cm day^{-1}) is the root elongation maximal possible without restrictions.

Under non-optimal conditions, i.e. either too dry (water deficit) or too wet (poor aeration), the root elongation is reduced by means of the stress reduction factor ($\alpha(h)$) from 1 (maximum root elongation) to zero (no growth). The shape of this function for root elongation was adapted from concept proposed to by Feddes, Kowalik e Zaradny (1978) (Eq. 5.14).

$$\alpha(h) = \begin{cases} 0 & \text{if } |h| \leq |h_1| \\ \frac{(|h_1| - |h|)}{(|h_1| - |h_2|)} & \text{if } |h_1| < |h| \leq |h_2| \\ 1 & \text{if } |h_2| < |h| \leq |h_3| \\ \frac{(|h_4| - |h|)}{(|h_4| - |h_3|)} & \text{if } |h_3| < |h| \leq |h_4| \\ 0 & \text{if } |h| > |h_4| \end{cases} \quad (\text{Eq. 5.14})$$

Where $\alpha(h)$ is the stress reduction factor of root elongation due pressure head; $|h|$ is the module of pressure head, and h_1 , h_2 , h_3 and h_4 are the limits of pressures head for root elongation (Figure 5.3a). Root elongation below $|h_1|$ (critical respiratory oxygen pressure, with $|h_1|$ approaching to saturation (1 cm) (SAGLIO et al., 1984)) and above $|h_4|$ (maximum growth pressure, with $|h_4|$ approaching 1 MPa (BENGOUGH et al., 2011)) is set equal to zero. Between $|h_2|$ and $|h_3|$ (reduction point, $|h_2|$ is 6 kPa, and $|h_3|$ is 10 kPa) root elongation is maximal. Between $|h_1|$ and $|h_2|$ and between $|h_3|$ and $|h_4|$ a linear variation is assumed.

5.3.5.2. Reduction of root elongation due to soil strength

Root elongation can be reduced due to soil strength (Eq. 5.15) with exponential relationship (Eq. 5.16) (BENGOUGH, 1997). Thus, the root elongation can be write as a function of soil strength (SPR) and matric potential

(h), on time (t) and depth (z). Daily combination of water stress, poor aeration (Eq. 5.14) and soil strength (Eq. 5.16), can be predicted from Eq. (5.18) and showed at the Figure 5.3c. Stress reduction function in a layer z, on day t can showed the effect of root elongation on field conditions by Eq. (5.19). The biopores effects are included at the root modelling by soil strength effects (Eq. 5.17), and this effect can be observed in blue dashed line at the Figure 5.3b. When there are cracks, biopores or continuous pores, the soil resistance at the tip root are reduced, and the root can growth with less resistance than bulk soil resistance (BENGOUGH, 2012a). This favour faster root elongation, and change the root response to soil strength. Because of presence of continuous pores at the soil profile, the root elongation is increased in same soil penetration resistance at the Figure 5.3d in relation to Figure 5.3c.

$$RE(SPR) = \alpha(SPR)RE_{\max} \quad (\text{Eq. 5.15})$$

$$\alpha(SPR) = \exp(-0.4325 SPR) \quad (\text{Eq. 5.16})$$

$$\alpha(SPR) = \exp(-0.30 SPR) \quad (\text{Eq. 5.17})$$

$$srf(SPR, h) = \alpha(SPR) \alpha(h) \quad (\text{Eq. 5.18})$$

$$RE(SPR, h)_{t,z} = srf(SPR, h)_{t,z} RE_{\max} \quad (\text{Eq. 5.19})$$

where $\alpha(SPR)$ is the stress reduction function by soil strength, $\alpha(h)$ is the stress reduction function by matric potential (water and aeration stress) and, t is the time (day), z is the depth (cm), RE_{\max} is the root elongation maximal possible without restrictions (cm day^{-1}), and RE is the root elongation (cm day^{-1}).

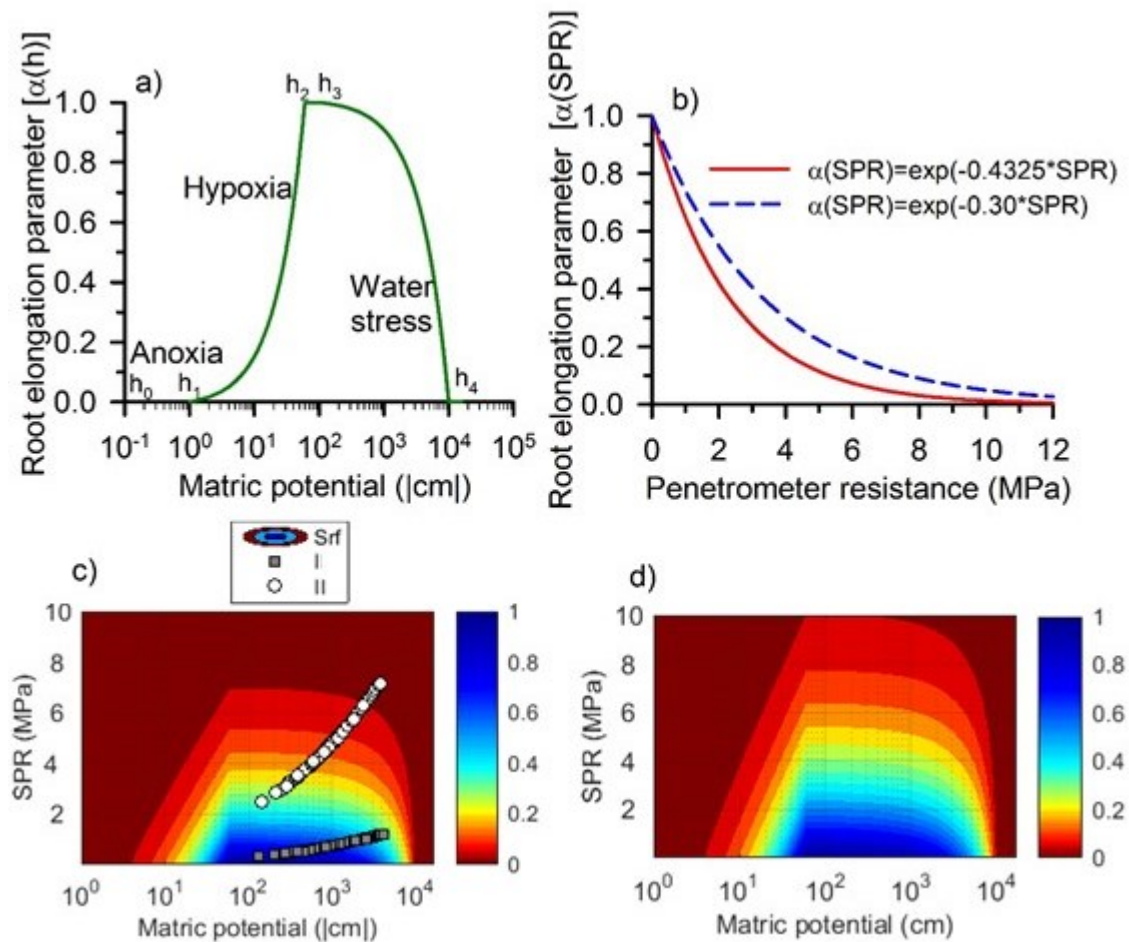


Figure 5.3. Root elongation (RE) parameter as a function of matric potential (adapted from Feddes, Kowalik and Zaradny (1978)) (a) and penetration resistance with presence (dashed blue line) or absence (red line adapted from Bengough (1997)) of continuous pores (b), and the total stress reduction function (srf) in a colour map for a soil without (c) or with (d) continuous pores. Root elongation parameter is expressed as an index from 1 (maximum root elongation) to 0 (no root growth). I: data set of a loose soil; II: data set of compacted soil.

5.3.6. Coupling of the models

The link between root and soil water models is the water uptake (1D sink term) on Richards' equation (TRON et al., 2015), and the link for soil physical conditions and root growth is the stress reduction function for root elongation (Figure 5.4). Sink term represent root water uptake for each horizontal soil layer (1 cm), and soil physical conditions change the stress reduction function that restricted the root elongation and root system growth. The water uptake term depend on two factors: root length density and availability of water in each soil layer (DE JONG VAN LIER et al., 2008). Thus, the model is dynamic, and when

there are more roots for water uptake, maybe the soil become dry and hard, with high restriction for root elongation. However, the effect for root elongation are for each single root, and this is can change the root architecture, because, maybe part of the root system are growing on a wet soil or in a dry soil conditions.

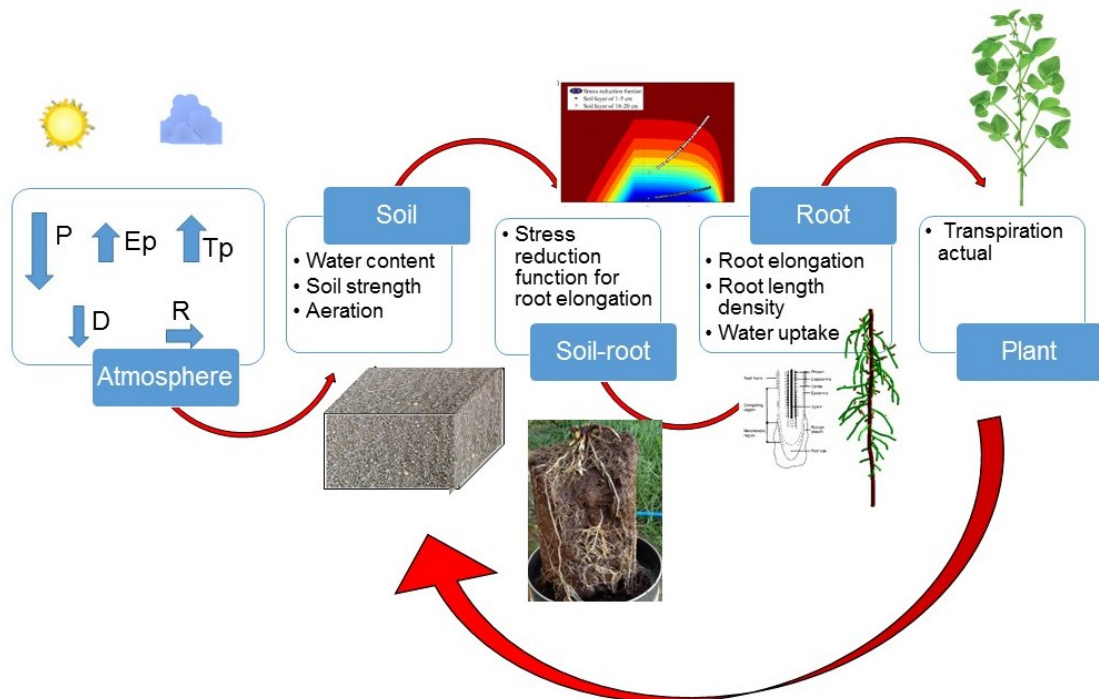


Figure 5.4. Schematic representation of the model coupling in soil-root-plant-atmosphere relationship.

*P: precipitation; Ep: potential evaporation; Tp: potential transpiration; R: runoff; D: deep percolation.

5.4. Implementation

The model was implemented by extending the L-system model for root growth, ROOTBOX (LEITNER et al., 2010c), it is written in MATLAB®, and can be obtained at <http://www.csc.univie.ac.at/index.php?page=rootbox>. Water flux, soil physical conditions, stress reduction function for root elongation and root growth are alternately computed at each time step, which was set to be 1 day. Each segment root was submitted to dynamic soil physical conditions in a specific day and position from a soil layer with 1 cm depth.

Model parameters input are parameters from the soil (soil water retention curve, soil penetration resistance curve and bulk density) (Table 5.1), weather (potential evaporation and transpiration, temperature, air humidity,

rainfall and irrigation), and crop (root architecture parameters (i.e., initial root elongation, length of the apical and basal zone, spacing between branches, number of branches and insertion angle), type of tropism, growing period and limits for root elongation) (Table 5.2).

Model output parameters are the soil conditions (hydic balance, infiltration, runoff and deep drainage, actual evaporation rate, water content, matric potential, soil penetration resistance and hydraulic conductivity unsaturated) and crop root system structure, root length density, actual transpiration and water uptake for each layer.

Table 5.1. Van Genuchten's parameter of a Rhodic Eutrudox.

Depth cm	θ_s $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$	θ_r $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$	α cm^{-1}	n --	Ksat cm day^{-1}
0-10	0.555	0.198	0.0892	1.1848	39.36
10-20	0.537	0.200	0.0822	1.1503	39.36
21-100	0.539	0.200	0.0756	1.1407	54.15

* θ_r , θ_s , α , and n are van Genuchten's parameters; Ksat: hydraulic conductivity saturated;

Table 5.2. Root architectural parameters of soybean (*Glycine max*).

Symbol	Parameter name	units	Values [mean, s.d.]
<i>Tap root</i>			
r	Initial tip elongation rate	cm day^{-1}	[5.5, 0]
a	Root radius	cm	[0.2, 0]
la	Length of apical zone	cm	[2.0, 0]
lb	Length basal zone	cm	[1.0, 0]
ln	Internodal distance	cm	[0.65, 0]
nob	Maximum number of branches	-	[300, 0]
σ	Expected change of root tip heading	rad cm^{-1}	0.4
type	Type of tropism	-	1
N	Strength of tropism	-	1.5
dx	Spatial resolution along root axis	cm	0.25
<i>First-order laterals</i>			
r	Initial tip elongation rate	cm day^{-1}	[1.5, 0]
a	Root radius	cm	[0.05, 0]
Θ	Insertion angle	rad	[1.2217, 0]
la	Length of apical zone	cm	[3, 0]
lb	Length basal zone	cm	[3, 0]
ln	Internodal distance	cm	[0.7, 0]
nob	Maximum number of branches	-	[60, 0]
σ	Expected change of root tip heading	rad cm^{-1}	0.3
type	Type of tropism	-	1
N	Strength of tropism	-	0.1
dx	Spatial resolution along root axis	cm	0.25
<i>Second-order laterals</i>			
r	Initial tip elongation rate	cm day^{-1}	[1, 0]
a	Root radius	cm	[0.03, 0]
Θ	Insertion angle	rad	[1.22173, 0]
k	Maximal root length	cm	[2, 0]
σ	Expected change of root tip heading	rad cm^{-1}	0.4
type	Type of tropism	-	1

N	Strength of tropism	-	0
dx	Spatial resolution along root axis	cm	0.25
<i>Basal roots</i>			
r	Initial tip elongation rate	cm day ⁻¹	[2, 0]
a	Root radius	cm	[0.06, 0]
Θ	Insertion angle	rad	[1.39626, 0]
la	Length of apical zone	cm	[15, 0]
lb	Length basal zone	cm	[2, 0]
ln	Internodal distance	cm	[2, 0]
nob	Maximum number of branches	-	[40, 0]
σ	Expected change of root tip heading	rad cm ⁻¹	0.1
type	Type of tropism	-	1
N	Strength of tropism	-	0.5
dx	Spatial resolution along root axis	cm	0.25

5.5. Evaluation of model performance

The agreement between simulated and measured values was expressed by the means absolute error (MAE) (Eq. 5.20) (CASAROLI; DE JONG VAN LIER; DOURADO NETO, 2010), the root mean squared error (RMSE) (Eq. 5.21) (DE JONG VAN LIER et al., 2008), the coefficient of residual mass (CRM) (Eq. 5.22) coefficient of correlation (r) (Eq. 5.23) (BONFANTE et al., 2010), and the index of agreement (d) (Eq. 5.24) (CASAROLI; DE JONG VAN LIER; DOURADO NETO, 2010), besides with the modelling efficiency (EF) (Eq. 5.25) (BONFANTE et al., 2010), and one-to-one line were used as criteria to evaluate the model performance.

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |P_i - O_i| \quad (\text{Eq. 5.20})$$

The root mean square error (RMSE) has minimum and optimum value at 0. It is a difference-based measure of the model performance in a quadratic form, and it is fairly sensitive to outliers.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2} \quad (\text{Eq. 5.21})$$

The coefficient of residual mass (CRM), ranges between $-\infty$ and $+\infty$, with the optimum equal to zero. If positive values it indicates that the model underestimates the prediction, if negative values it indicates overestimation and when is close to zero indicates the absence of trends.

$$CRM = \frac{\sum_{i=1}^n O_i - \sum_{i=1}^n P_i}{\sum_{i=1}^n O_i} \quad (\text{Eq. 5.22})$$

The coefficient of correlation (r) (ADDISCOTT; WHITMORE, 1987) has its optimum value to maximum (+1) values. Zero means no correlation.

$$r = \frac{\sigma_{OP}}{\sigma_O - \sigma_P} \quad (\text{Eq. 5.23})$$

where σ_{OP} is the covariance between measured and estimated data and σ_O and σ_P are respectively the measured and estimated standard deviation.

The agreement coefficient of Willmott (d) is dimensionless, bounded by -1.0 and 1.0 and, in general, more rationally related to model accuracy than are other existing indices (WILLMOTT; ROBESON; MATSUURA, 2012).

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{O})^2}{\sum_{i=1}^n (|P_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \quad (\text{Eq. 5.24})$$

Modelling efficiency (EF) (GREENWOOD; NEETESON; DRAYCOTT, 1985) can get either positive or negative values, 1 being the upper limit, while negative infinity is the theoretical lower bound. EF values lower than 0 result from a worse fit than the average of measurements.

$$EF = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 - \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (\text{Eq. 5.25})$$

where n is the total number of observation, O_i and P_i are the observed and predicted values of the observation, respectively.

5.6. Simulation scenarios

5.6.1. Soil water content and soil penetration resistance

The model was tested using soil physical parameters (Table 5.1), soil water content and soil penetration resistance of a Rhodic Eutrudox in no-tillage system (MORAES et al., 2012, 2013). In this experiment there was no plant growing, thus the accuracy of simulation with Richards equations was evaluated. This data of water content and soil penetration resistance of two soil layers (0-10 cm and 10-20 cm depth) from a field experiment were obtained from 45 days in a wet-dry cycle on field conditions carried out at the Embrapa Soybean experimental station at Londrina, Brazil.

The combination of weather and soil data resulted in a prediction of soil water content and penetration resistance in soil profile with values very closer the 1:1 line (Figure 5.5a). The linear regression line between simulated and measured data of soil water content or penetration resistance are not significantly different from the 1:1 line at a 95% confidence level, and the index of agreement was 0.84, with a RMSE e MAE of 0.03, then is a good concordance to measured data set. Besides, the agreement of simulated to measured values of soil penetration resistance was good, because the index agreement value was 0.92 and correlation was 0.85 (Figure 5.5b). Thus, the data set simulated was very similar than measured at the field, indicating that modelling was efficient for reproduce the water content and penetration resistance of Rhodic Eutrudox for use in the root growth modelling.

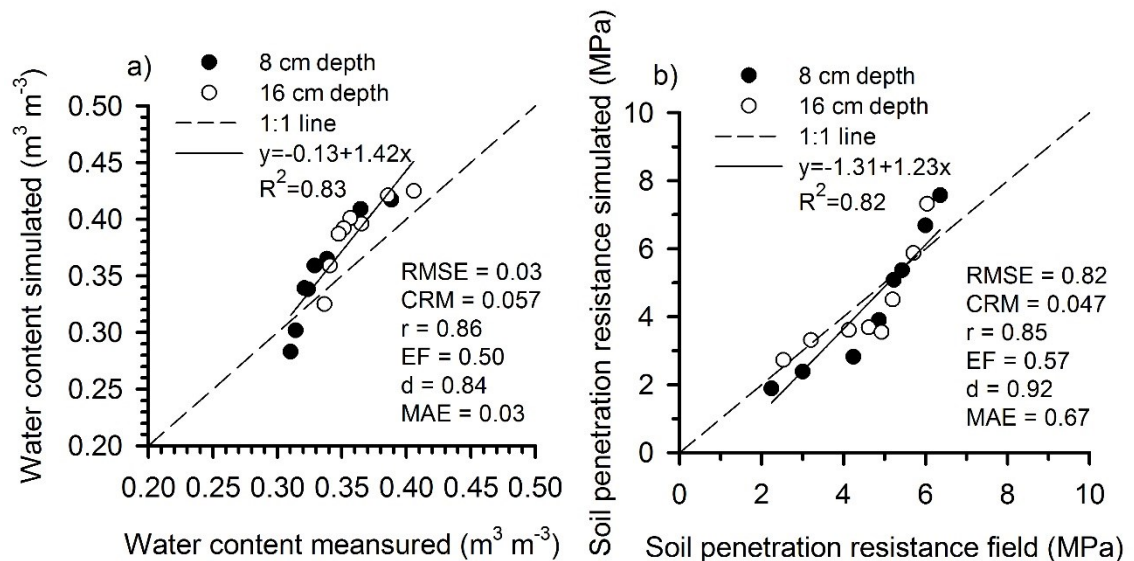


Figure 5.5. Simulated and measured values on field for water content (a) and penetration resistance (b) in two depth.

Thus, the differences in simulated and measured values of soil water content occur and reflect the horizontal and vertical soil variation on field conditions, especially when is used a 1D model for the water flux at the soil, maybe led to differences in simulated soil water content.

The model still need improvement, especially for runoff conditions, but this is a useful framework than showed the coupling of soil physical properties with plant and atmosphere conditions. This model can simulate soil physical conditions for root growth and the stress reduction function can be used for input in others soil-plant models.

5.6.2. Effects of a soil compact layer for root growth

The boundary conditions at the soil surface, i.e., potential evaporation and rainfall rates during one-season conditions and two soil conditions. For this simulation we used the daily time series of climate dates from Embrapa Soybean, in Londrina (latitude 23°11'S; longitude 51°11'W; and 620 m altitude), State of Paraná, southern Brazil (Figure 5.6). For the simulation was used soil physical properties (Table 5.1) from an Oxisol (Latossolo Vermelho Distroférrico, Brazilian classification; Rhodic Eutrudox, USA classification) on no-tillage system (established in 1997) with 755 g kg⁻¹ of clay, 178 g kg⁻¹ of silt and 67 g kg⁻¹ of sand. Two soil conditions was simulated, no-tillage without (Figure 5.7a) or with a compact soil layer from 16 to 20 cm depth (Figure 5.7b). The bulk density in all soil profile (0-100 cm depth) in loose soil was used 1.0 Mg m⁻³, already the same profile but with a compacted soil layer, from 16 to 20 cm of bulk density of 1.30 Mg m⁻³ was used. We simulated the root growth of soybean crop until 87 days, from 10th October 2013 (sowing) to 5th January 2014 (sample roots).

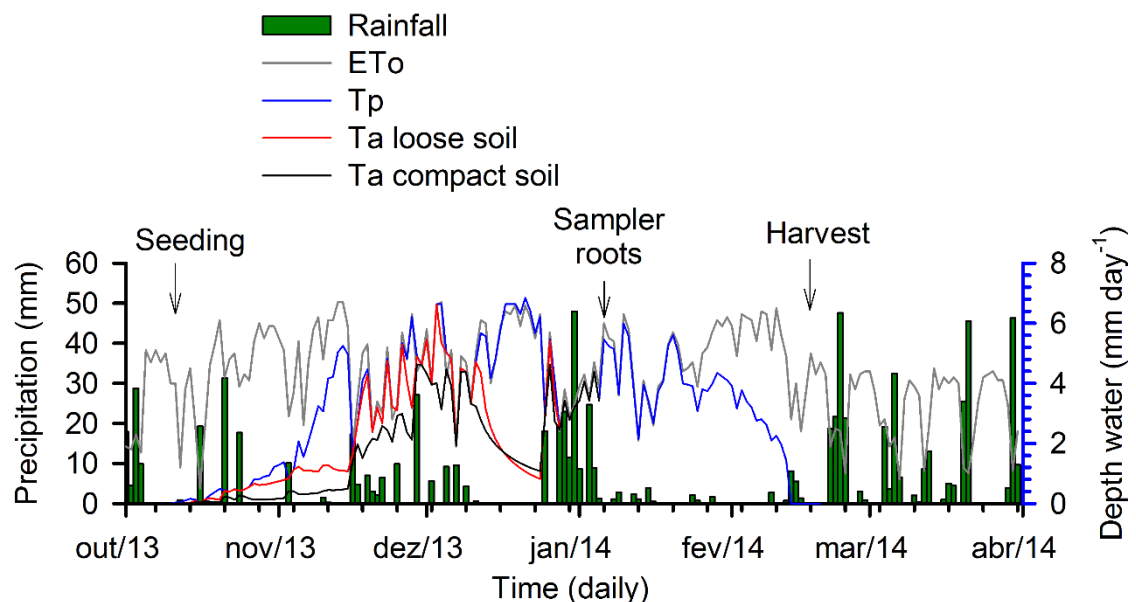


Figure 5.6. Rainfall, reference evapotranspiration (ETo), potential transpiration (Tp) and actual transpiration (Ta) during soybean season growth for a loose soil and a soil with a compact soil layer.

Soybean root system was modelling with the effect from soil and climate conditions. Thus, the stress reduction factor indicates different conditions for root growth during the season growth by effect of presence or absence of a

compact layer (Figure 5.7). In both situation, same climate date was used during 87 days of season root growth, with a total precipitation of 352 mm, with 31 raining days.

In 87 days, the root system was affected by variation on climate conditions. For the soil without compact layer, the root system was growth until 75 cm depth. If we consider 45 cm of inter-rows, the root system developed mainly on first 20 cm around the bed seed until 75 cm of soil profile. However, there was potential for growth more roots on first 20 cm depth on all soil layer. This indicate than the root system can explore very well the all soil profile.

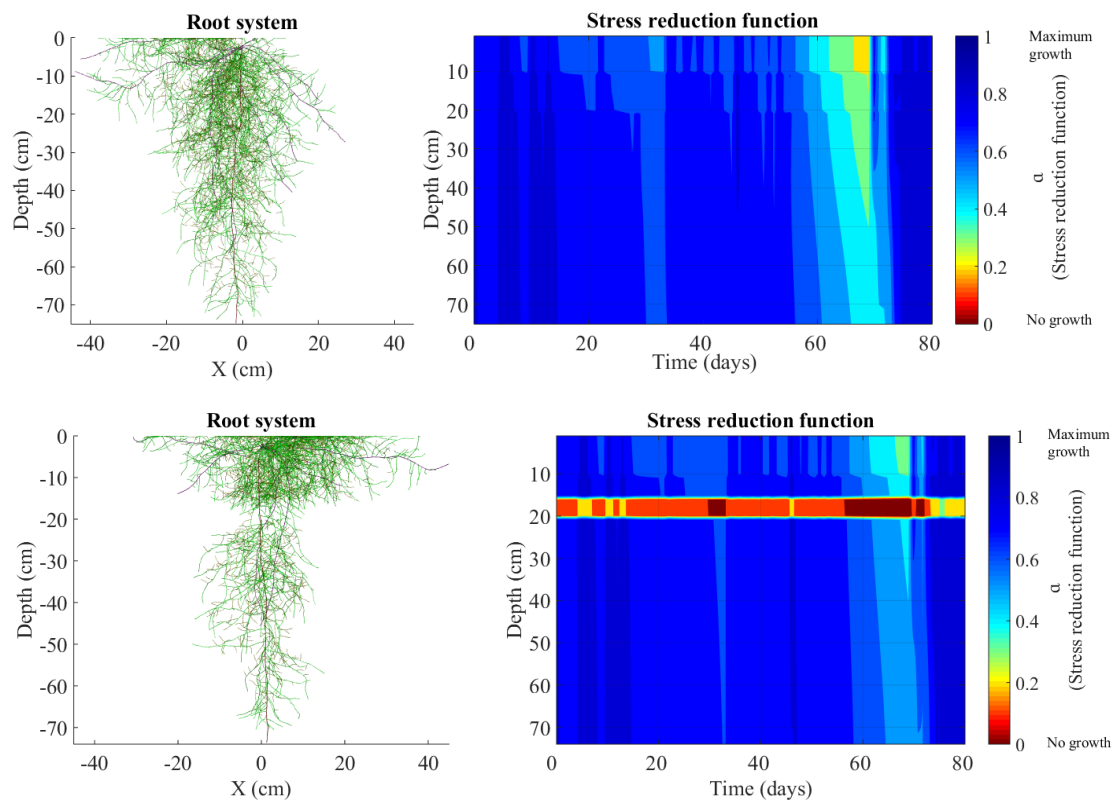


Figure 5.7. Root system (a,b) and stress reduction function (c,d) in soil without (a,c) or with (b,d) a compact layer from 16 to 20 cm.

When there was a soil compact layer, the root system architecture was changed. On this conditions, less roots crossing the compact soil layer from 16 to 20 cm, and there was just few days with conditions for the main root growth on that soil layer, specially when there was growth inside on compact layer, the root elongation was slower and the root spend more days for crossing the compact soil layer. Stress reduction function, during the season growth, showed than root

elongation was reduced from 20% to zero (no growth) in relation of the maximum root elongation inside the compacted soil layer.

The effect of layered soil compact on profile changed root architecture; however rooting depth was similar in both soil conditions, with 75 cm depth. However, just this 5 cm of a compact layer reduced the water uptake and actual transpiration of the plant (Figure 5.8). Water uptake was affected strongly by 5 cm of a compact soil layer, because there was restriction on root system development (Figure 5.7). The plant prefer uptake water where there was more length root density or water available and is modelling by matric flux density (DE JONG VAN LIER et al., 2008), thus, this was changed the depth than the root system uptake more water according the both conditions. Root system was restricted on depth above of 20 cm depth for 20 days, however, when we compare soil profile with or without a compact layer for all that some time (20 days) the root system already uptake water until 40 cm (Figure 5.8b). The water uptake was higher on first 15 cm until 65 days plant growth, and after this time, the first soil layer (15 cm) was drier and there was more influence on depth soil layer (below than 20 cm). That indicated a higher influence of matric flux density on water uptake.

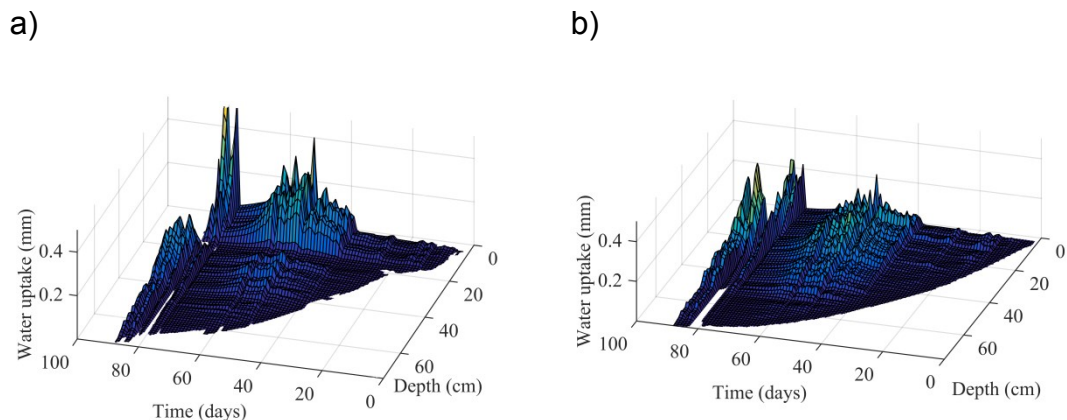


Figure 5.8. Water uptake for a soil with a compact layer (a) and on a loose soil (b).

The soil restrictions, mainly soil penetration resistance and water content was dynamic during the season growth, and this effect on plants was incorporate in this modelling by stress reduction function for root elongation. Soil strength and water availability can independently, reduce crop growth, but there is no consensus on which of these stresses or combination of stresses is the

most important (JIN et al., 2013). However, when separated the total stress reduction function in two effects, one from penetration resistance (Figure 5.9c and Figure 5.9d) and another of matric potential (Figure 5.9e and Figure 5.9f), the frequency of the stress daily by high soil penetration resistance was closer to zero (high restriction) for the soil with a compact layer (Figure 5.9c). Restrictions of root elongation due matric potential was similar for both soil conditions, with a tendency for more stress days by matric potential on soil without compact layer (Figure 5.9d), probably due to higher root length density for increase the actual transpiration.

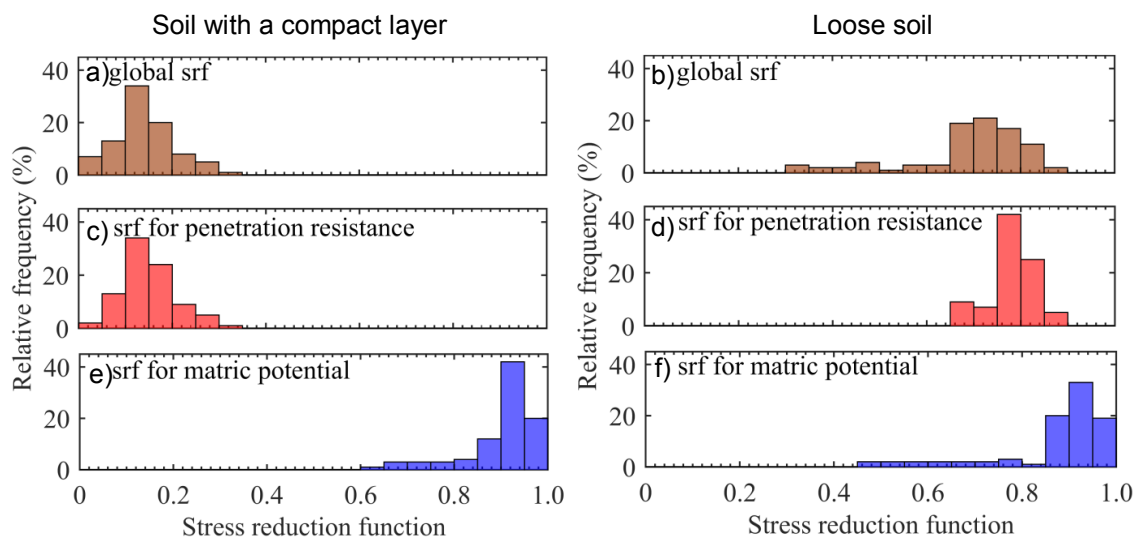


Figure 5.9. Relative frequency of total stress reduction function (srf) (a,b) and effect from soil penetration resistance (c,d) or matric potential (e,f) and in a soil with a compact layer (a,c,e) or in a loose soil (b,d,f) for the depth 18 cm.

5.6.3. Effects of a drought season for root growth

For this simulation we used the daily time series of climate dates in two season growth from Embrapa Soybean, in Londrina (latitude 23°11'S; longitude 51°11'W; and 620 m altitude), State of Paraná, southern Brazil (Figure 8). For the simulation was used the soil physical properties of an Oxisol (Latossolo Vermelho Distroférico, Brazilian classification; Rhodic Eutrudox, USA classification) on no-tillage system (established in 1997) with 755 g kg⁻¹ of clay, 178 g kg⁻¹ of silt and 67 g kg⁻¹ of sand (Table 5.1 and Table 5.3). Two season growth conditions was used for compare effects of weather effects, thus a drought

(2008/09) and a wet (2009/10) season was used for simulation of root development (FRANCHINI et al., 2017).

Table 5.3. Bulk density of Rhodic Eutrudox used in simulation of the scenario.

Soil layer (cm)	0-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-80	80-100
BD (Mg m^{-3})	1.21	1.26	1.26	1.16	1.10	1.08	1.06	1.05

BD: bulk density.

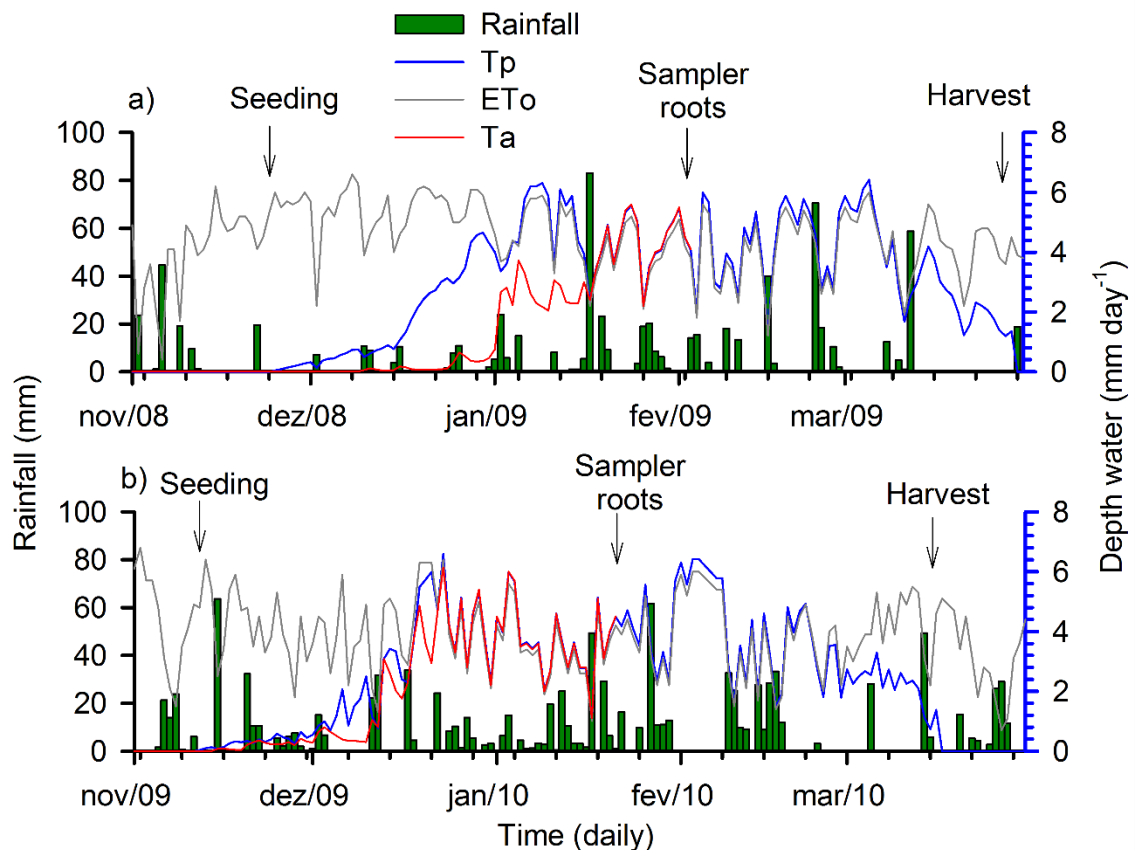


Figure 5.10. Rainfall, reference evapotranspiration, potential and actual transpiration during soybean season growth in a drought (a) or a wet condition (b).

Soybean root system development (Cultivar BRS-282) was simulated until 70 days, in two weather conditions. Thus, for drought season, the soybean was seeding on 24th November 2008, and the sample roots was in 2nd February 2009 (FRANCHINI et al., 2017). In the wet condition, soybean root growth season was considered from 12th November 2009 to 20th January 2010 (FRANCHINI et al., 2017). Soybean root growth was modelling for one individual plant considering the area used of each plant with a population of 30 plants m^{-2} , with

0.45 cm inter-rows, i.e., 7 cm inter-plants, and soil water flux was simulated until 100 cm depth. Root elongation daily was modelling with effect of soil and climate conditions. Root length density was presented every ten days during the season growth. Root length density and root system architecture at the 70th day simulated was compared with field conditions.

At the drought season, there was 306 mm, in 70th days root growth time, with 32 raining days (Figure 5.10a). For the wet season, there was 46 days with raining, totalizing 515 mm depth water (Figure 5.10b). Thus, the rainfall distribution was irregular on drought season, and this affected the root development, mainly for the high soil resistance penetration, with a reduction on root elongation.

Stress reduction function was dependent of soil and climate conditions, and there was a stronger effect of weather conditions on root length density, root architecture and root distribution on soil profile (Figure 5.11). When there were drought conditions, the root system was growing slower, especially at the beginning of season growth when there was more restriction for root elongation. Soil limitation by drought conditions with higher soil penetration resistance values has reduced the depth and volume of soil explored by the root system.

Root growth was deeper on wet conditions, in that season there was less restrictions for root elongation (Figure 5.11). The frequency of total stress reduction function was different on wet and dry conditions (Figure 5.12). The frequency of stress reduction function at the 8 cm showed the main stress for root elongation was due soil penetration resistance in a wet condition. However, in a drought season, matric potential have a stronger role for reduce values of stress reduction function for root elongation. The modelling results suggest that as compact layer soil, on dry season, the mechanical impedance becomes a major limitation to root elongation. Roots growing at the drought conditions were submitted for more days with stress for root elongation (Figure 5.12a), especially by combination of penetration resistance (bellow than 0.4) and matric potential (bellow than 0.9) stress.

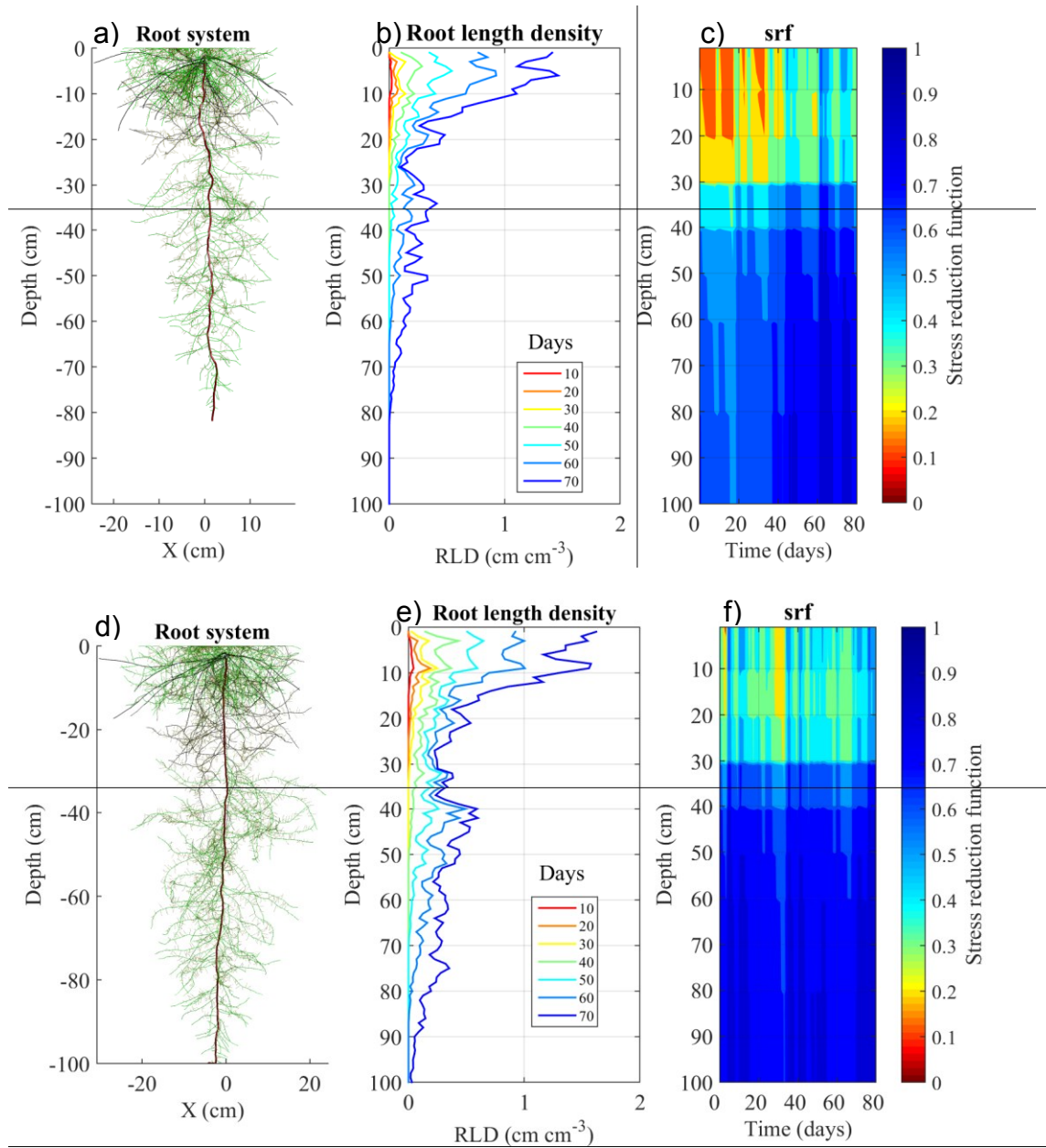


Figure 5.11. Root system (a,d), root length density (RLD) (b,e) and stress reduction function (srf) (c,f) in the dry season (a,b,c) or wet season (d,e,f) growth.

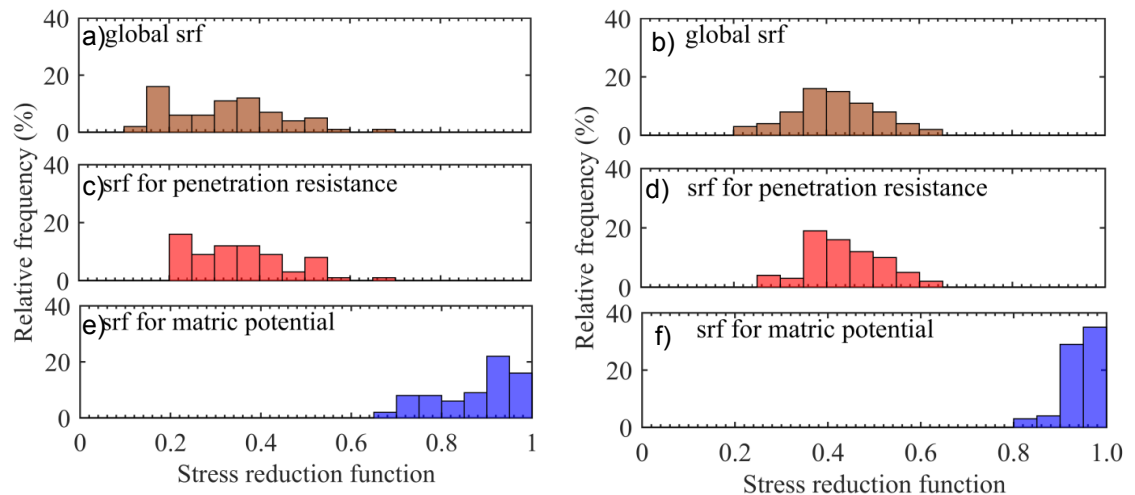


Figure 5.12. Relative frequency of total stress reduction function (srf) (a,b) and effect from soil penetration resistance (c,d) or matric potential (e,f) and in a dry season (a,c,d) or wet season (b,d,f) for the depth 8 cm.

Water uptake was affected by weather conditions (Figure 5.13) at the dry season, the root system spend more days for growth deeper than 16 cm, and this had restricted the soil layer for water uptake by roots. In general, plants were submitted to stress conditions under drought condition with reduction on actual transpiration. Water flux on both conditions was affected by root length density, especially in function of rooting depth. The model was sensible to soil and weather conditions for root elongation. Stress reduction function was dependent of soil water content soil strength for root elongation. Maximum root water uptake rate exists as a function of soil water status, soil hydraulic properties, root length density, and root radius (DE JONG VAN LIER et al., 2013). Thus, root water uptake is non-uniform process in soil profile, this is due a compensation process at the soil-root interface than are controlled by gradient of water head and hydraulic redistribution (JAVAUX et al., 2013). Eco-hydrological and root architecture models are important path to increase the understanding of plant-environment interactions and has a stronger role in the improvement in the modelling of physiological processes (TRON et al., 2015).

Root length density simulated and measured was very similar for all layers at the soil profile for both weather conditions (Figure 5.14 and Figure 5.15). There is qualitative agreement between the model predictions and field observations (Figure 5.15c). In a field experiment on this soil under no-tillage system due soil structures with a lot of visible cracks and biopores (SILVA et al.,

2014), that reduce the mechanical impedance in the root tip for root elongation (BENGOUGH et al., 2011), the stress reduction function by penetration resistance for soil with biopores (Eq. 5.16) was useful for simulate root growth (Figure 5.14).

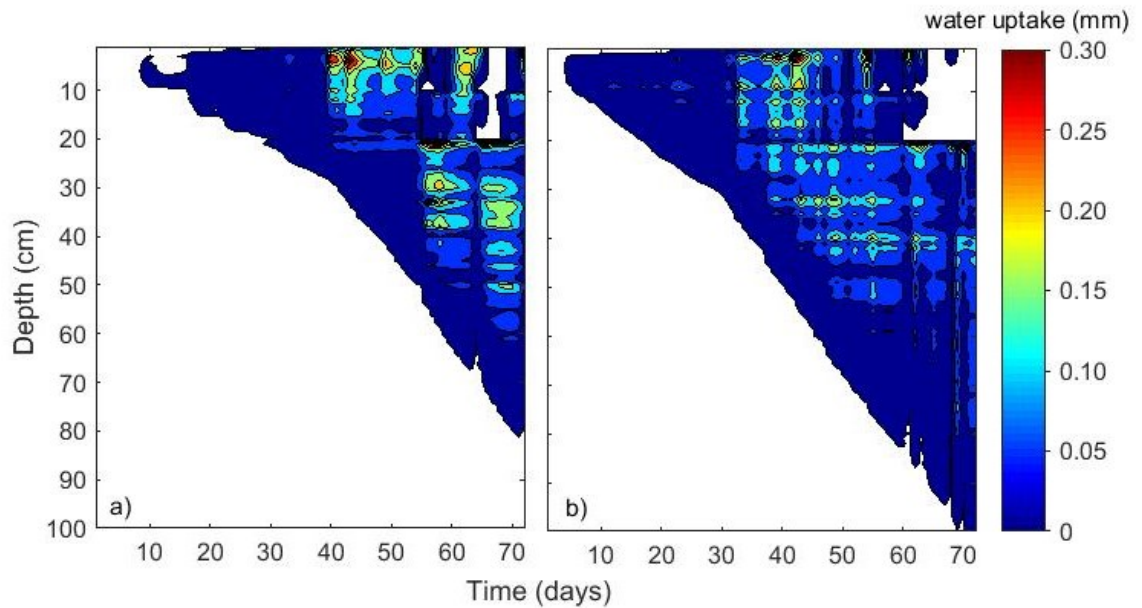


Figure 5.13. Water uptake for a dry season (a) or a wet season (b) growth.

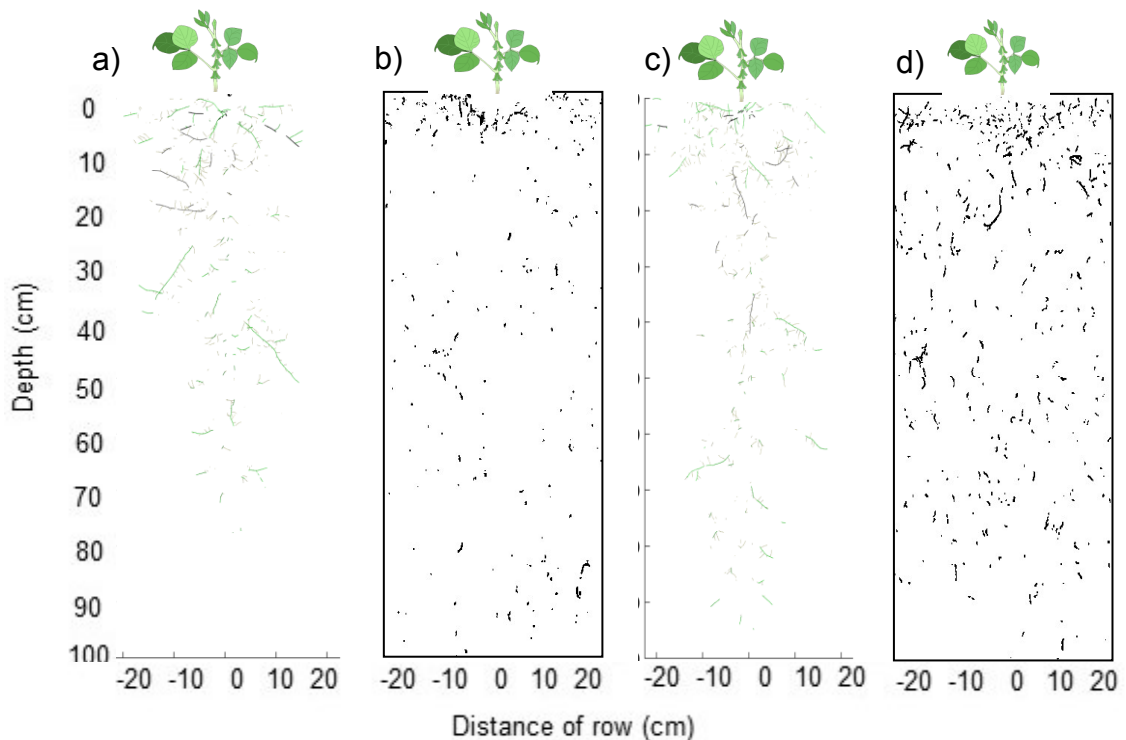


Figure 5.14. Root system distribution simulated (a,c) and measured (b,d) for a dry (a,b) and wet season (c,d) at the soil profile (slice of 2 cm transversal to row).

The model input the effect of biopores by soil strength curve, but still there are some variability difficult for represent at the model. If we use a

homogeneous mass of soil and no considering the cracks or channels, probably would reduce the agreement of root length density and root architecture simulated and measured. Bengough (1997) modelled the root growing through a homogeneous mass of soil, and observed that cabbage roots spend five weeks and had not penetrated below 30 cm depth, especially because the penetrometer resistance exceeded 6 MPa (6 MPa was the largest reading that could be registered on the field penetrometer used).

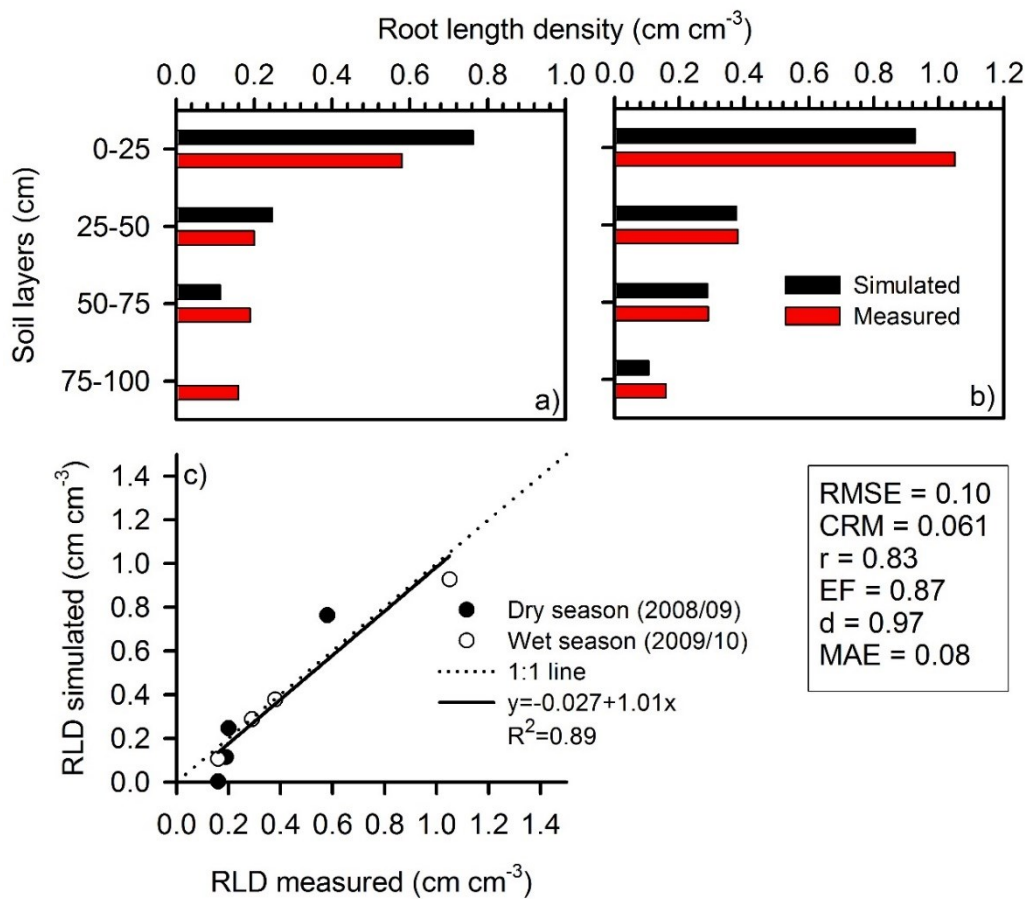


Figure 5.15. Root length density measured on field and simulated for a dry season (a) and wet season (b) and relation 1 to 1 (c).

*RMSE: root mean squared error; CRM: coefficient of residual mass; r : coefficient of correlation; EF: modelling efficiency; d : index of agreement; MAE: means absolute error.

We provide a new simple model for root elongation and have implemented in Matlab that easily improvement on modelling of root system development with soil and weather conditions. This simple soil-plant-atmosphere model can reproduce the dynamic effects on root growth with effect of soil and atmosphere conditions during the season growth, however, for difficult of daily

root measurement on field conditions, just the information at one point in time on field maybe a good parameter for a qualitative with a simulated and measured.

5.7. Direct effects of soil physical conditions on shoot growth

The main link of shoot and root growth is the water uptake and actual transpiration, thus, we linked these effects into the model. However, this model still has only the effect of soil physical conditions (soil strength, water stress and hypoxia) on root elongation. Soil physical conditions indirectly affects shoot growth by reducing the size and extent of a root system and so restricting the uptake of water and nutrients, if these are not abundant (BENGOUGH, 1997). Especially grain yield could be modelling by plant transpiration, and it can be quantified and incorporated on this model.

5.8. Conclusions

A schematic framework for input of soil physical conditions for root growth by stress reduction function was presented, enabling modelling of root growth, root water uptake, and water flux into the soil was performed using physical and hydraulic characteristics of the soil and root architectures parameters. The model is using stress reduction function for root elongation coupling with macroscopic root water uptake defined by matric flux potential can be used to study the effects of soil management and weather conditions on root growth.

The stress reduction function was coded into the RootBox in MatLab® language, and its performance was evaluated by comparing data of simulations to measured soil water content, penetration resistance, and soybean root length density. Soil physical conditions inputted by stress reduction function into the RootBox model showed the successfully improvement in the understanding of soil-roots interaction. Stress reduction function should be tested and validated for others crops using experimental data from field trials.

6 CAPÍTULO 2. MODELLING OF SOIL PHYSICAL CONDITIONS FOR SOYBEAN ROOT GROWTH

6.1. Abstract

Soil mechanical impedance, hypoxia and water stress are the main soil physical causes of reducing of root growth. The aim of the work was modelling and studying the soil biophysical conditions for soybean root growth in an Oxisol. Soybean was cultivated in four soil compaction levels at the field conditions. Root system was examined, and a new combined model of soil physical limitation for root elongation, water flux and root water uptake was used for simulate the root growth. Soil compaction differentiated vertical root distribution, and it was simulated by stress reduction function to root elongation into the model. Root growth was a result of soil physical conditions during the crop season, and root length density simulated and measured have a strong agreement. Grain yield and root length density have no strong correlations with a statics soil physical parameters, thus we need consider the soil physical conditions modelled daily during the crop season. Soybean grain yield was reduced due both soil chiselling and heavily traffic. The study shows soybean root growth modelling in function to soil physical conditions (mechanical impedance, hypoxia and water stress) and it was performed successfully in different compaction levels of a Rhodic Eutrudox.

6.2. Introduction

Soil compaction is a continuum problem in arable soils, and this problem still persist in no-tillage system. In general, soil compacted layer is located from 10 to 20 cm depth, and that occurs due absence crop rotation and

crop residues or due to soil chiselling. This soil compact layer increase the soil penetration resistance (MORAES et al., 2016b) limiting depth and soil volume of roots use for water uptake (NOSALEWICZ; LIPIEC, 2014) and plant nutrition (SCHNEPF; LEITNER; LEPSCH, 2012). Thus, an increase in soil strength at the subsoil result in a higher concentration of roots in the top layer and in reduced rooting in the deeper layers due to the limitation for root growth or absence of continuous pores at the soil profile (BENGOUGH, 2012a; NOSALEWICZ; LIPIEC, 2014). Soil compaction affects pore size distribution (MORAES et al., 2016b), its geometry, gas and water fluxes and consequently root elongation (BENGOUGH et al., 2011), and root system development (CHEN; WEIL, 2011).

There are many soil physical indicators, and the most used are bulk density, macroporosity and soil penetration resistance (CAVALIERI et al., 2009; KELLER et al., 2015). However, the critical values of soil physical indication are not stronger due than in many cases there are no correlation to plant development and grain yield (MORAES et al., 2014). In addition, the classical studies was developed in conventional tillage systems, in an older time when crop productions and techniques were others (TAYLOR; ROBERSON; PARKER, 1966). In addition, in many relations of soil physical attributes and crop parameters are very dispersive, and few times showed strong relations. This occurs because the soil-plant-atmosphere system are dynamic, and there are daily variation of direct factors that affect the crop production (water content, soil penetration resistance, aeration, and temperature). Thus, the most important is how many time the crop was submitted to stress conditions for its development than a fixed number of soil physical properties for plant development.

Thus, soil biophysical modelling for soil-plant-atmosphere interface are the most important factors for determinate the total stress that crops were submitted during the season growth (BENGOUGH, 1997). The sum of stresses during the season growth could showed the real conditions for root and shoot development. For the understanding of the dynamic of soil physical process than limiting the root growth are necessary considering all stresses for plant growth (BENGOUGH et al., 2011). The aim of this work is modelling and studying the soil biophysical conditions for soybean root growth in an Oxisol from Subtropical condition.

6.3. Material and Methods

6.3.1. Study site

This experiment was established in an area with no-tillage system since 1991 at the Experimental Station of Embrapa Soybean, in Londrina (latitude 23°12'S; longitude 51°11'W; and 585 m altitude) State of Paraná, Southern Brazil. According to the Köppen classification, the climate of the region is humid subtropical (Cfa), with annual average temperature of 21 °C and 1,651 mm rainfall (Moreno, 1961). The experiment was established on an Oxisol (Latosolo Vermelho Distroférico, Brazilian classification; Rhodic Eutrudox, USA classification) with 784 g clay kg⁻¹ soil, 178 g silt kg⁻¹ soil and 67 g sand kg⁻¹ soil. Soil particle density at 0-0.3 m depth is 2.96 Mg m⁻³, and the mean slope of the experimental area is 0.03 m m⁻¹. Before the establishment of the experiment, the area had been cropped, from 1991 to 2009, with crop rotation system using soybean or maize in the summer and wheat or black oat in the winter. This area from 2010 to 2012 was cropped with *Urucloua ruziziensis* (cover crop) without pasture, and it was desiccated with herbicide at 90 and 20 days before establishment the treatments.

6.3.2. Experimental design and treatments

The treatments were established in February 2013, the treatments were distributed in a randomized block design with four treatments and twelve replications. The treatments consisted of four compaction levels on 5 m wide and 15 m long plots: minimum tillage with chiselling (MTC), no-tillage system (NT), and no-tillage with additional compaction by four passes of tractor (NTC4) or eight passes of harvester (NTC8).

Soil chiselling was performed when the soil was in the friable consistency (gravimetric water content, at the 0-20 layer, of 0.29 kg kg⁻¹), by chisel plow equipped with five shanks spaced 35 cm each other, and shovel of 8 cm, working at 25 cm depth.

The additional compaction on treatment NTC4 was performed with a tractor CBT 4x2 TDA, model 8060, equipped with an additional shovel/shell. In

the frontal axes was used tires Goodyear 14.9-24 R1, and in the rear was tires Goodyear 18.4-34 R1 ballasted (iron and liquid). The total mass of tractor was 7.2 Mg.

Soil compaction in NTC8 was performed with a self-propelled grain harvester SLC-6200 (weight of 66 kN) equipped with grain header for maize (weight of 12 kN), and with the grain tank empty, presenting a total weight of 78 kN (58 kN on the front axle). The total mass of harvest was 9.5 Mg. The harvester was equipped with single front tires, Pirelli 18.4-30 R1, diagonals, inflated to pressure of 180 kPa; and rear tires Pirelli 9.00-16 F2 10PR, diagonals, inflated to a pressure of 410 kPa. The ground pressure of the front tires was estimated in 200 kPa, using a simple procedure proposed by O'Sullivan, Henshall, and Dickson (1999). Following this methodology, the soil-tire contact area was estimated from tire width and diameter, inflation pressure and load, using an empirical model developed for a rigid surface. The soil gravimetric water content during the tractor and harvester traffic was equivalent to the field capacity (0.34 kg kg^{-1}).

6.3.3. Crop and field management

The soybean (cultivar BRS 359RR) was sown in 10th October 2013, for seeding was used a seed drill (Jumil, Exacta 5070 model), equipped with rod type fertilizer and seed furrow openers and double offset disc. The fertilizer dispenser was type endless screw (Fertisystem), and seed type perforated with a disc vertical vacuum. The crop was seeding for a population of 300 hundred plants ha^{-1} , with an inter-row of 45 cm, and 5 cm deep. The fertilizer furrow (NPK 0-20-20, 270 kg ha^{-1}) was performed with a shanks working at the 10 cm depth. The sowing, the crop management, and the control of weeds, pests, and diseases followed the technical recommendations for the cultivation of soybean and were the same for all treatments.

6.3.4. Soil sampling

The soil sampling was performed in all treatments in April 2013, after the soil compaction. Undisturbed soil cores (internal diameter of 5.0 cm, and

height of 5.0 cm) were collected in five soil layers, each 10 cm depth in duplicates, totalling 288 samples. The cores were sampled at soil water content near field capacity, by means of a soil sampler apparatus coupled to a tractor, enabling the vertical insertion of the core in the centre of each soil layer.

6.3.5. Determination of soil physical and hydraulic properties

Soil water retention curve was determined by separating of soil cores into four groups of 60 and one group of 48 samples, totalizing 288 soil samples. Core samples were saturated and subjected to the following soil matric potentials (Ψ) of -3 and -6 kPa in tension table; and -10, -33, -100 and -500 kPa using Richards' chambers pressure plates. After reaching equilibrium at each water tension, the soil samples were weighed, and with exception in -3 kPa, all groups was oven-dried at 105 °C for 48 h to quantify the soil bulk density (Mg m^{-3}) and volumetric soil water content ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$). The soil total porosity ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$) was obtained by the relationship between bulk density and soil particle density (2.96 Mg m^{-3}), while the macroporosity (pores $>50 \text{ mm}$) was calculated as the difference between total porosity and soil microporosity (pores $<50 \text{ mm}$, equivalent to water content at $\Psi = -6 \text{ kPa}$, equilibrated in tension table).

6.3.6. Soil penetration resistance at the field

Soil penetration resistance was measured, in the end of soybean season in 26 February 2014. For this was measured soil penetration resistance in ten points at a spacing of 9 cm (two transect with 45 cm length) on a transect transversal to soybean row, totalizing 120 point. Digital penetrometer was equipped with a tip cone composed of a base area 130 mm^2 and solid angle 30° , and measurement interval of 1 cm. Soil water content was determined along each plot by a disturbed soil sampler in the five soil layers, it was one each 10 cm until 50 cm depth.

6.3.7. Grain yield and shoot dry weight

The soybean grain yields was evaluated by the mechanical harvest 12 m of six central rows within each plot, totalizing area of 32.4 m^2 . The seeds were

then cleaned and weighed; and the values obtained were corrected to 13% moisture content. The shoot dry weight was measured twice time at the 49th (28 Nov 2013) and 89th (07 Jan 2014) day, thus, plants in two rows with 100 cm length was sampled and dried in an oven-drying at the 60°C.

6.3.8. Root system sampler and analyses

Soil monoliths were sampled for soybean root distribution throughout the soil profile in four of the twelve replications. Root analysis was performed with soil sample by simple spade method, that require the taking of soil monoliths and separating the soil from the root by washing (BÖHM, 1979). These monoliths (7 cm thick) were sampled in trench perpendicular to soybean seedling row (45 cm) until 50 cm depth. Each monolith (50 x 45 x 7 cm) was subdivided into five depths (0-10, 10-20, 20-30, 30-40, and 40-50 cm) at five position at the row/interrow crop (each 9 cm, i.e. 0-9, 9-18, 18-27, 27-36, 36-45 cm), resulting in 25 sub-monolith for each field replicate.

The root length was measured for subsamples of each sub-monolith and then later correlated to the main sample for root length density. Root length was obtained using scanning of a sample roots from each position from field, in a scanner (Delta-T Scan) followed by images processing in the software for analysis of fragments and roots, Safira 2.0 (JORGE; SILVA, 2010). Based on the root length, root density was calculated as the ratio of root length/soil volume (cm cm^{-3}). Root dry weight was determined after oven-drying at 60°C for lest 5 days and the root weight density (g m^{-2} in 10 cm depth) was then calculated and related to soil surface area.

6.3.9. Root anatomy analysis

The root samples for making transverse cross sections were taken from ten roots. The roots were collected from 4.5 to 13.5 cm from the plant at the top soil (0-10 cm) in field conditions. The roots were fixed in a mixture of 4% paraformaldehyde and 4% glutaraldehyde in phosphate buffer saline for 24 h and then water was removed stepwise by passing the root specimens through ethanol solutions with increasing concentrations (every 10%) from 10% to 100% (15 min

each) at room temperature. Afterwards the roots were imbedded in LR white resin. Transverse sections of 1 mm thickness were prepared in an ultramicrotome.

6.3.10. Agrometeorological dates

Climatic data, from October 2013 to March 2014 (crop growing season), were collected from the weather station at the Embrapa Soybean, near the experiment; thus, daily dates of radiation data, temperature, relative humidity, wind speed, and precipitation were collected during the growing season. Reference evapotranspiration was calculated from basic meteorological data using the Penman-Monteith equation, as described in Allen et al. (1998) .

6.3.11. Root growth modelling

Root growth was modelled in MatLab® code, with an architecture model in 3-D, proposed by (LEITNER et al., 2010c) called RootBox, and improved with soil physical limitation by stress reduction function proposed at the 5.3.5 item. This model include a 1-D hydrological model that numerically solves the Richards equation to simulate water transporting the soil-plant-atmosphere environment described in Van Dam and Feddes (2000), and a water uptake followed De Jong Van Lier et al. (2008) method than use the matric flux potential for plant water uptake. For more details about input and output parameters of soil, weather and crop see 5.4.

6.3.12. Data analysis

The agreement between root length density simulated and measured values was expressed by the means absolute error (MAE) (CASAROLI; DE JONG VAN LIER; DOURADO NETO, 2010), the root mean squared error (RMSE) (DE JONG VAN LIER et al., 2008), the coefficient of residual mass (CRM), coefficient of correlation (r) (ADDISCOTT; WHITMORE, 1987), and the index of agreement of Wilmott (d) (WILLMOTT; ROBESON; MATSUURA, 2012), besides with the modelling efficiency (EF) (GREENWOOD; NEETESON;

DRAYCOTT, 1985), and one-to-one line were used as criteria to evaluate the model performance.

The data of soil attributes (soil penetration resistance, bulk density, macroporosity, microporosity) and plant responses (grain yield, shoot production, root length density and root dry mass) were subjected to analysis of variance (ANOVA, F value, $p < 0.05$). ANOVA was performed separately for each layer. When the effects of the treatments were significant, means were compared by Tukey's test ($p < 0.05$). All data analysis were performed using the software, Statistical Analysis System 6.1 (SAS, 2013). Relation of soil physics attributes (bulk density, macroporosity, microporosity and soil penetration resistance) with productivity or root length density was performed by SigmaPlot® 12.0 (Systat software, Inc.).

6.4. Results

6.4.1. Soil physical properties

Soil penetration resistance was strongly affected by traffic of machines or soil chiselling (Figure 6.1). This effect was not influenced by water content, because, it was similar in the same layers for all treatments. In general, the water content was from 0.29 kg kg⁻¹ (0-10 cm layer) to 0.37 kg kg⁻¹ (40-50 layer), near the field capacity for this soil. There was differences in the soil penetration resistance until 23 cm depth, and generally, the higher values was for NTC8 and the smaller for the soil chiselling. For all profile, there was few differences between NT and NTC4, it is probably because the higher water content at the soil analysis. When analysed the soil bulk density at the top soil layer (0-10 cm) differences are highest, and there are four soil compaction level, MTC < NT < NTC4 < NTC8 treatments.

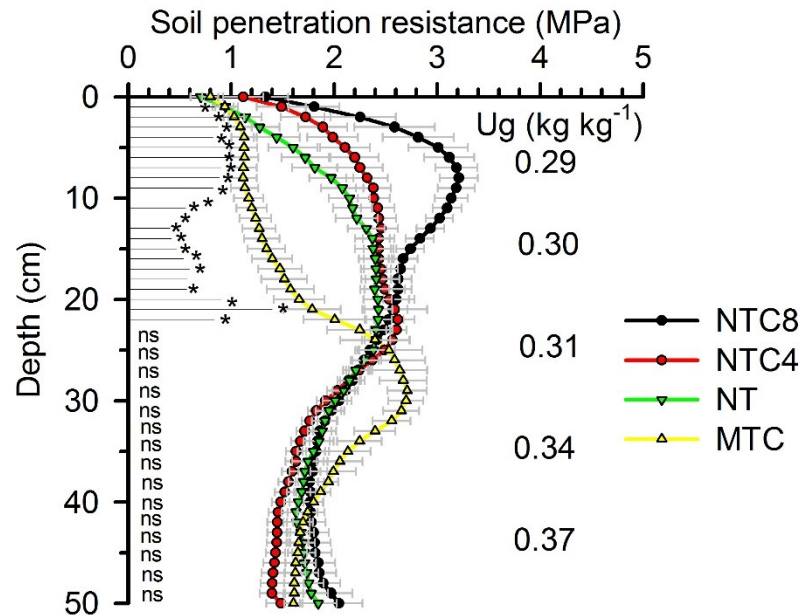


Figure 6.1. Soil penetration resistance in a Rhodic Eutrudox under compaction levels.

MTC: minimum tillage system with soil chiselling; NT: no-tillage system; and no-tillage with additionally compaction by four passes of tractor (NTC4) or eight traffic of harvester (NTC8). *: significant by minimum significant difference (bars) of Tukey test ($p < 0.05$). ns: not significant.

Soil bulk density, total porosity, macroporosity and microporosity have showed the compaction level was increased proportionally to machine traffic at the no-tillage, and decreased with soil chiselling (Figure 6.2). Four passes of tractor or eight harvester traffic increased the bulk density and decreased the total porosity for all layers until 30 cm depth. The chisel plow was regulated for shank worked until 25 cm depth, however, the residual effects was not observed for bulk density at the 20-30 cm soil layer. There was effect of soil chiselling only until 20 cm, and when the soil was chiselling there was increment on macroporosity and reduction of microporosity, it indicated a higher potential for increase water infiltration, but lower potential for retention and storage of water into the soil (MORAES et al., 2016b). Thus, there are differences in soil physical quality between compaction levels, especially at the 0-10 and 10-20 cm soil layers, differences required to establish different soil physical conditions for root growth.

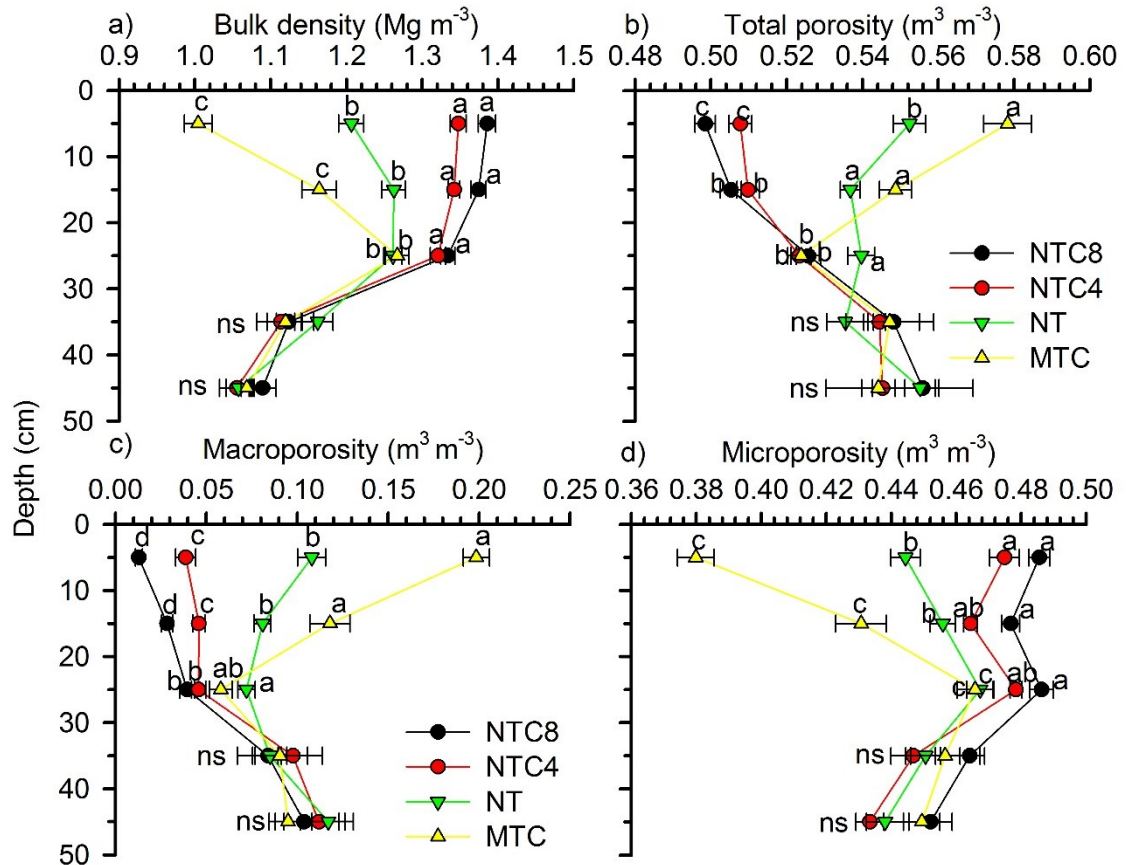


Figure 6.2. Soil bulk density (a), total porosity (a), macroporosity (a), and microporosity (d) in profile of a Rhodic Eutrudox under compaction levels.

MTC: minimum tillage system with soil chiselling; NT: no-tillage system; and no-tillage with additionally compaction by four passes of tractor (NTC4) or eight traffic of harvester (NTC8). *Means followed by same letter, in each soil layer, do not differ by the Tukey test ($p < 0.05$). ns: not significant in each soil layer.

In addition, results showed that soil physical quality indicators with greater sensitivity to the different states of soil compaction were, in order, macroporosity, soil penetration resistance and bulk density. However, it should be noted that soil penetration resistance tends to be more sensitivity in drier soil condition (MORAES et al., 2013).

6.4.2. Soybean grain yield

Grain yield of soybean was affected by compaction levels, and there was a strong negative response to compaction and chiselling (Figure 6.3a). Results demonstrate that no-tillage was the best condition for plant response. Reduction on soybean grain yield due soil compaction was observed in other studies, and this probably are related to reduction in water availability due a

limitation on soil volume explored by restriction on root growth and plant development (CALONEGO; ROSOLEM, 2010).

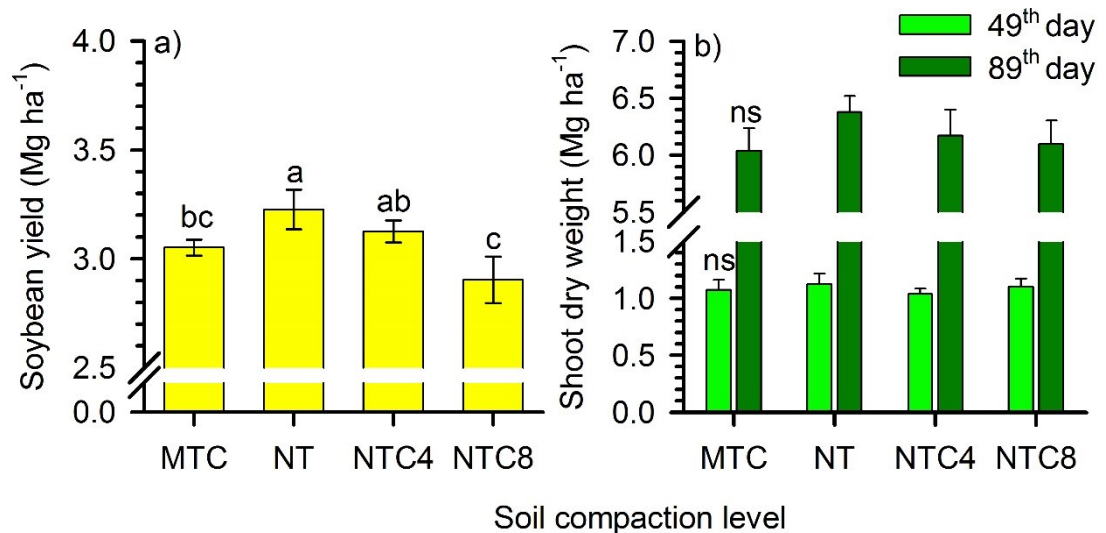


Figure 6.3. Soybean grain yield in function of soil compaction levels of Rhodic Eutrudox.

MTC: minimum tillage system with soil chiselling; NT: no-tillage system; and no-tillage with additionally compaction by four passes of tractor (NTC4) or eight traffic of harvester (NTC8). *Means followed by same letter do not differ by the Tukey test ($p < 0.05$). ns: not significant. Vertical bars indicate standard error of the mean.

Shoot dry weight, in two evaluations, were not affected by soil compaction levels (Figure 6.3b). Plants produced around 1 Mg ha⁻¹ of shoot dry weight at the 49th day (fenologic stadium R2), and more than 6 Mg ha⁻¹ at the 89th day (fenologic stadium R5.5), probably as a result of good rainfall distribution (Figure 6.4). Total rainfall was 372 mm during the crop growing season (126 days), with 44 days raining. However, there was 122 mm in the vegetative stages (14 days raining, until fenologic stadium V7), 230 mm at the reproductive stages from R1 to R5.2 (17 days raining), and just 20 mm in 37 days (13 days raining) of beginning seed (R5.2) to maturity (R9).

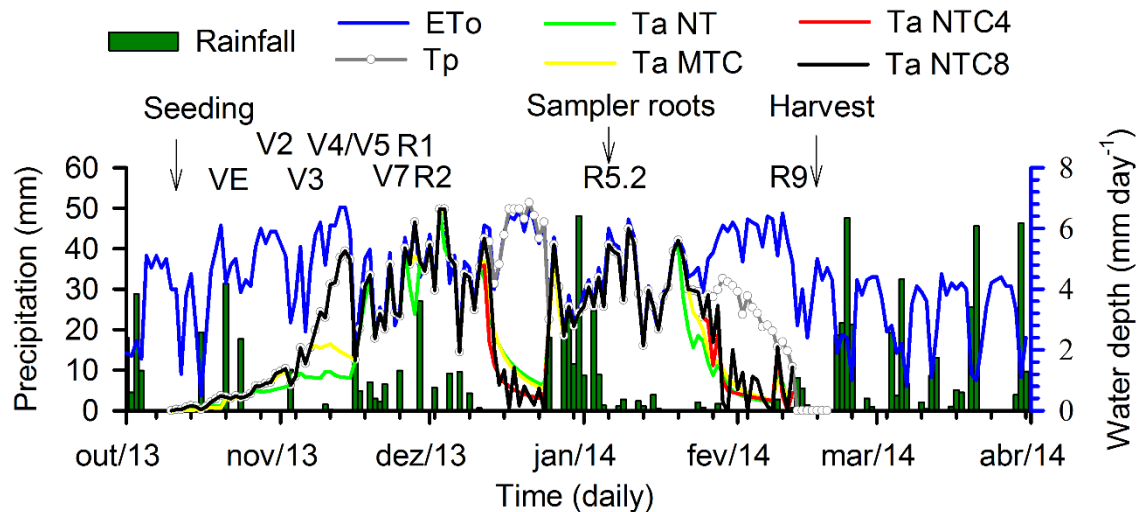


Figure 6.4. Rainfall, evapotranspiration potential (ETo), transpiration potential (Tp), transpiration actual (Ta) for compaction levels, and phenological development stages of soybean.

MTC: minimum tillage system with soil chiselling; NT: no-tillage system; and no-tillage with additionally compaction by four passes of tractor (NTC4) or eight traffic of harvester (NTC8).

6.4.3. Soybean root system

Root length density and root dry mass of soybean were affected by compactions levels (Figure 6.5), however there was no differences of root dry biomass at the 0-10 cm (Figure 6.5b). For the top soil layer (0-10 cm) and second soil layers (10-20 cm) there was more length of root at the soil chiselling than other treatments. Furthermore, there was less root length density in NTC8 at the top layer that all others treatments. For the root dry mass, there was differences at 10-20 cm and 30-40 cm. For the 10-20 cm, there was mass of roots in soil chiselling than at NTC4, already at 30-40 cm, there was more root mass in the NTC8 than in soil chiselling. This occurred because, the effects of soil compaction are until 30 cm, and soil chiselling effects are just until 20 cm depth.

Thus, as well expected, there was more root length density in the lower soil compaction level, and root system distribution was changed by soil compaction levels. For all treatments, the root distribution decreased exponentially with depth. However, there was reduction on root length density for the layers with more compaction levels, and increased the root mass in deeper layer for NTC8. Root length density medium for all soil profile was 2.42 cm cm⁻³ (Chiselling) 1.94 cm cm⁻³ (no-tillage), 1.75 cm cm⁻³ (NTC4), and 1.80 cm cm⁻³ (NTC8). There are some indications that at the soil compact in the surface, the root system are increased deeper in loose soil layer, this was observed in the

NTC8, because, especially at the 30-40 cm depth, there was 5.23 g m^{-2} (1.38 cm cm^{-3}) in NTC8, against 3.32 g m^{-2} (0.88 cm cm^{-3}) in soil chiselling. This can indicate that there are a stronger effect of soil physical conditions for root growth at the soil profile.

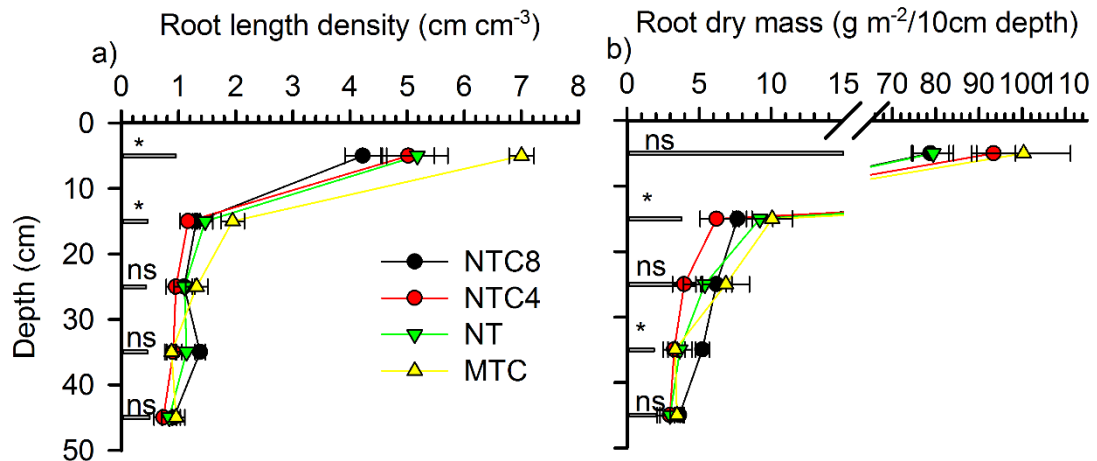


Figure 6.5. Root length density (a) and dry root mass (b) of soybean under soil compaction levels in a Rhodic Eutrudox.

*Bars are the minimum significant difference. ns: not significant in each soil layer. *There are differences between treatments by Tukey test ($p < 0.10$). MTC: minimum tillage system with soil chiselling; NT: no-tillage system; and no-tillage with additionally compaction by four passes of tractor (NTC4) or eight traffic of harvester (NTC8).

6.4.4. Soil physical condition relation to crop and root parameters

There was weakly relation of soil physical attributes (at the top soil layer, 0-20 cm) and productivity or with root length density (Figure 6.6), and in general the coefficient of determination was smaller of 0.23 (grain yield and soil penetration resistance) or 0.61 (root length density and macroporosity). Grain yield was described in general by second degree equation for all attributes (bulk density, macroporosity, microporosity and soil penetration resistance), however, for all situations, determination coefficient was very small, not more than 23% of variation of productivity was explained by soil physics attributes. In general, soybean grain yield was reduced when there was soil chiselling or compaction by machine traffic. Relation of bulk density and productivity indicate than there are losses when the soil are loose or compact. For example, there are a reduction of 18% of productivity when the soil are compacted (bulk density of 1.44 Mg m^{-3}), but, still there are 12% of losses when there is a loose soil (bulk density 1.00 Mg m^{-3}). Maximum soybean grain yield are observed with a bulk density of 1.18

Mg m⁻³, and when we look for the treatments distribution (Figure 6.6a), no-tillage are positioned on the range of higher yields.

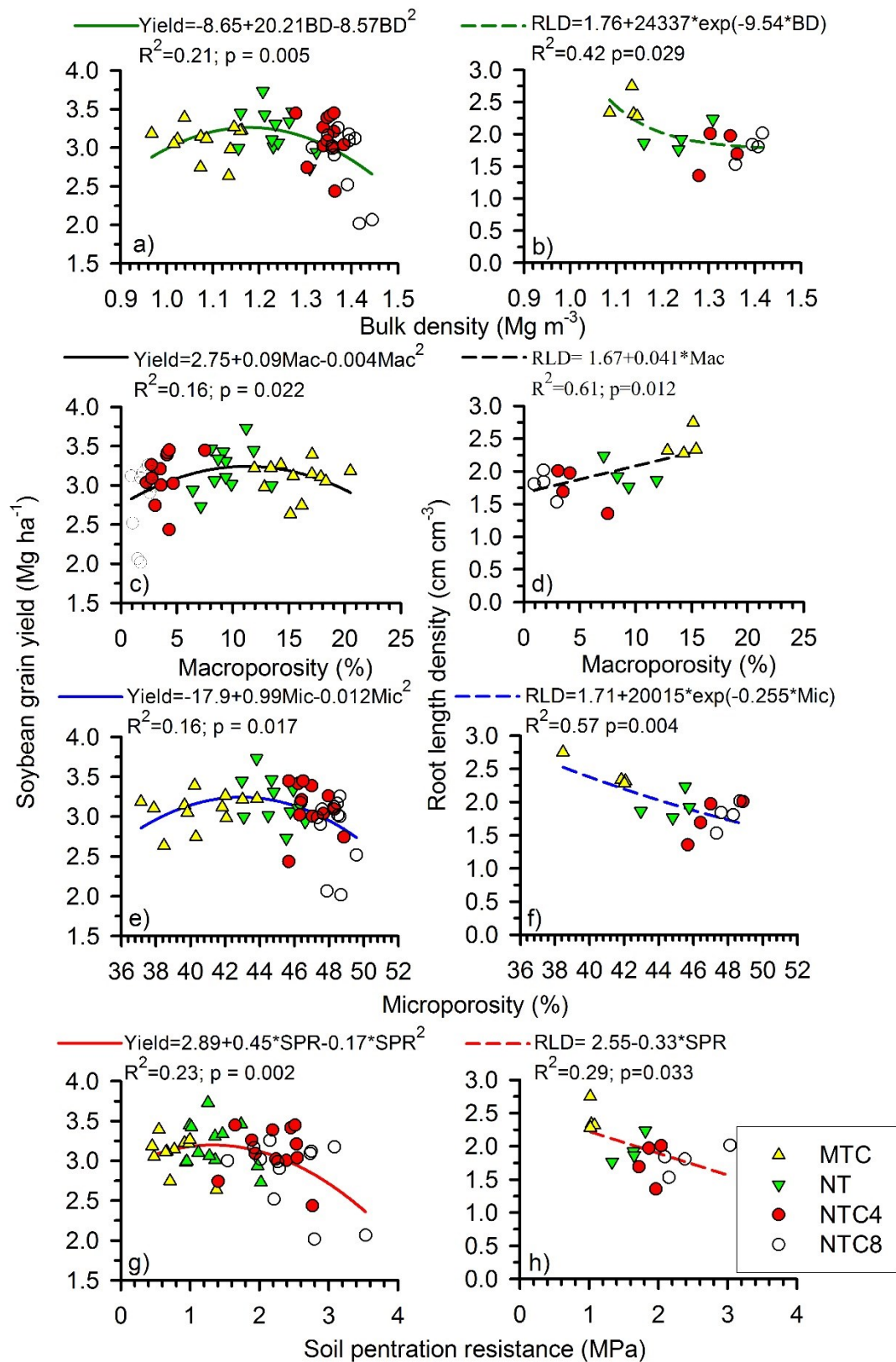


Figure 6.6. Relation of soybean grain yield (prod) (a,c,e) and root length density (RLD) (b,d,e) with bulk density (BD) (a,b), macroporosity (Mac) (c,d),

microporosity (Mic) (e,f) or soil penetration resistance (SPR) (g,h) of 0 to 20 cm depth in a Rhodic Eutrudox.

MTC: minimum tillage system with soil chiselling; NT: no-tillage system; and no-tillage with additionally compaction by four passes of tractor (NTC4) or eight traffic of harvester (NTC8).

In opposite, root length density was reduced exponentially with bulk density and microporosity (Figure 6.6b and Figure 6.6f). There was a linear increment of root length density with macroporosity, and a decreased with an increment of soil penetration resistance. However, determination coefficient of the relationship are lower than 0.61, indicated dispersion in results.

6.4.5. Root growth modelling

The model simulated the root system for the soil compaction levels, and the results of the three dimensional simulation is presented in front view for compared with 2D root distribution at the field (Figure 6.7a). Root length density decrease exponentially with depth, as well there are a horizontal variations in function the root architecture and soil restriction for root growing. In a loose soil (soil chiselled), there was more root length density especially from zero to 20 cm depth. When there was an increment at the soil bulk density, that soil was stronger and soil physical conditions was more restrictive for root growth, decreasing the root elongation rate. Thus, there are less root length at the profile in compact soil (NTC4 and NTC8). In no-tillage system, there are an intermediary quantity of root length, it agree with soil physic conditions, than during the crop season, there was less days than compact soil with higher restriction for root elongation.

Root length density for five soil layers simulated was compared with field conditions in four compaction levels (Figure 6.8). There was adequate relationship of soybean root length density simulated and measured, that was very close one to one line, and this indicated the root growth can be modelling with stress reduction function for root elongation. The root means square error (RMSE=0.84), coefficient of correlation ($r=0.87$), modelling efficiency (EF=0.78), coefficient of agreement willmott ($d=0.95$) showed stronger agreement of simulated and measured root length density, indicating than root growth was a result of soil physical conditions during the crop season growth.

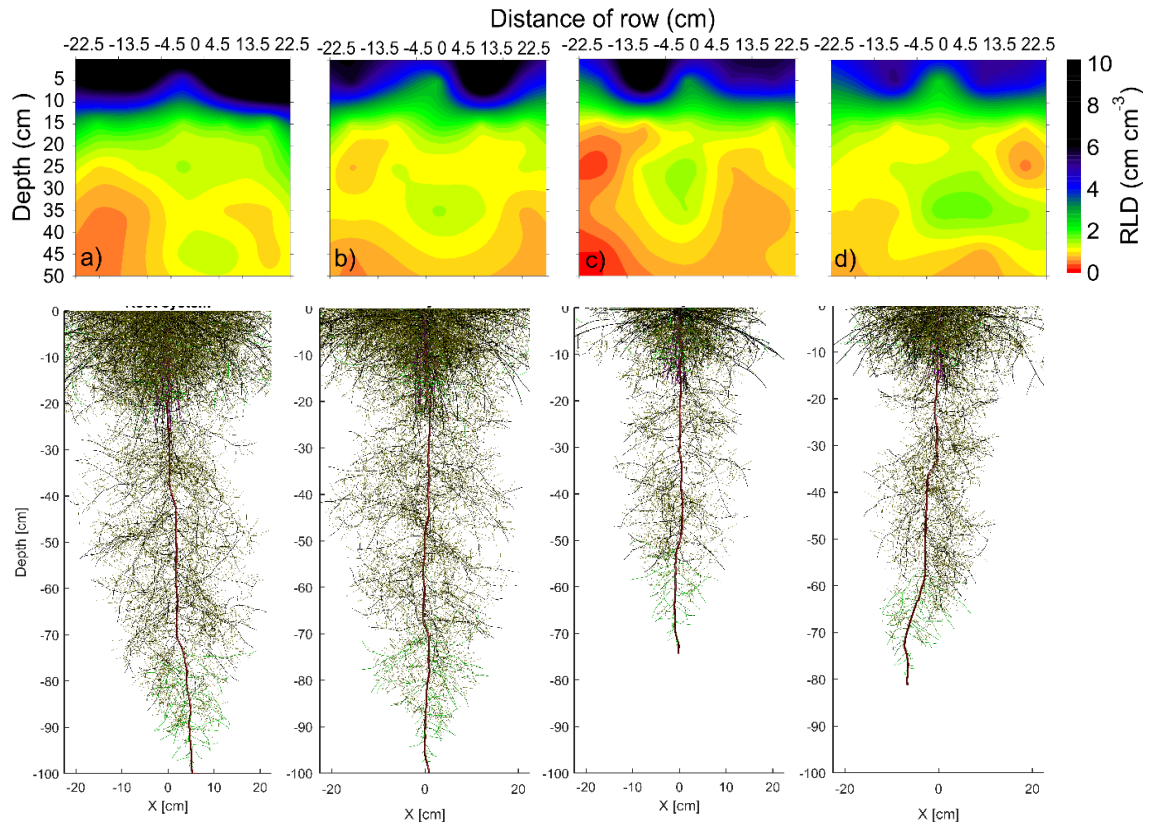


Figure 6.7. 2D distribution of soybean root system measured (a,b,c,d) and simulated (e,f,g,h) at the profile for soil chiselling (a,e), no-tillage (b,f), NTC4 (c,g) and NTC8 (d,h) in a Rhodic Eutrudox.

MTC: minimum tillage system with soil chiselling; NT: no-tillage system; and no-tillage with additionally compaction by four passes of tractor (NTC4) or eight traffic of harvester (NTC8).

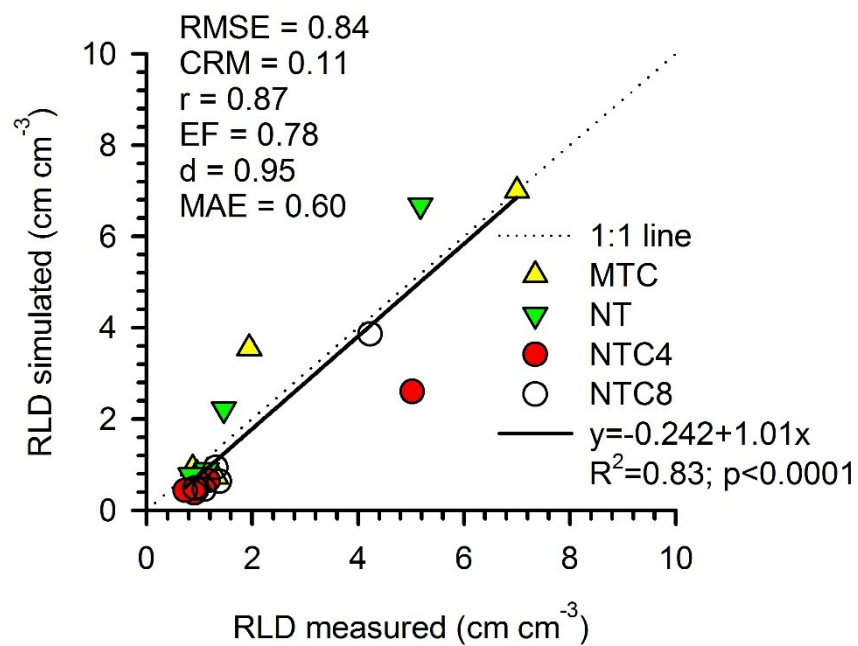


Figure 6.8. Relation of root length density simulated and measured of soybean in compaction levels of a Rhodic Eutrudox.

MTC: minimum tillage system with soil chiselling; NT: no-tillage system; and no-tillage with additionally compaction by four passes of tractor (NTC4) or eight traffic of harvester (NTC8).

6.4.6. Stress reduction function for root elongation

Soil physical conditions for root growth was modelled by stress reduction function (Figure 6.9). Stress reduction function change with soil penetration resistance and matric potential (aeration and water stress), and that reduce the maximum root elongation. This is a function from one (maximum root growth) to zero (no growth), than change with depth and time, thus, there is a different stress reduction function for each kind of root or position at the soil profile. Rooting depth are showed by dashed lines (Figure 6.9), and represent the variation of root depth at the time, during the growing season. In the soil chiselling, the root system spend around 37 days for growth until 50 cm at the soil profile, already, when the soil was compact, this time was increased for 50 days (NTC4 and NTC8). Thus, there was a reduced in soil layer and water available for root uptake, increasing the time with stress conditions for plant development.

The total stress reduction function for root elongation (Figure 6.10a) are divided in two stresses, penetration resistance stress (Figure 6.10b) and matric potential stress (Figure 6.10c). That indicate reduction of root length density due soil physical limitation during the season growth. The frequency of penetration resistance stress indicates that, for all soil compact levels, root elongation rate was smaller than 60% of maximum elongation rate.

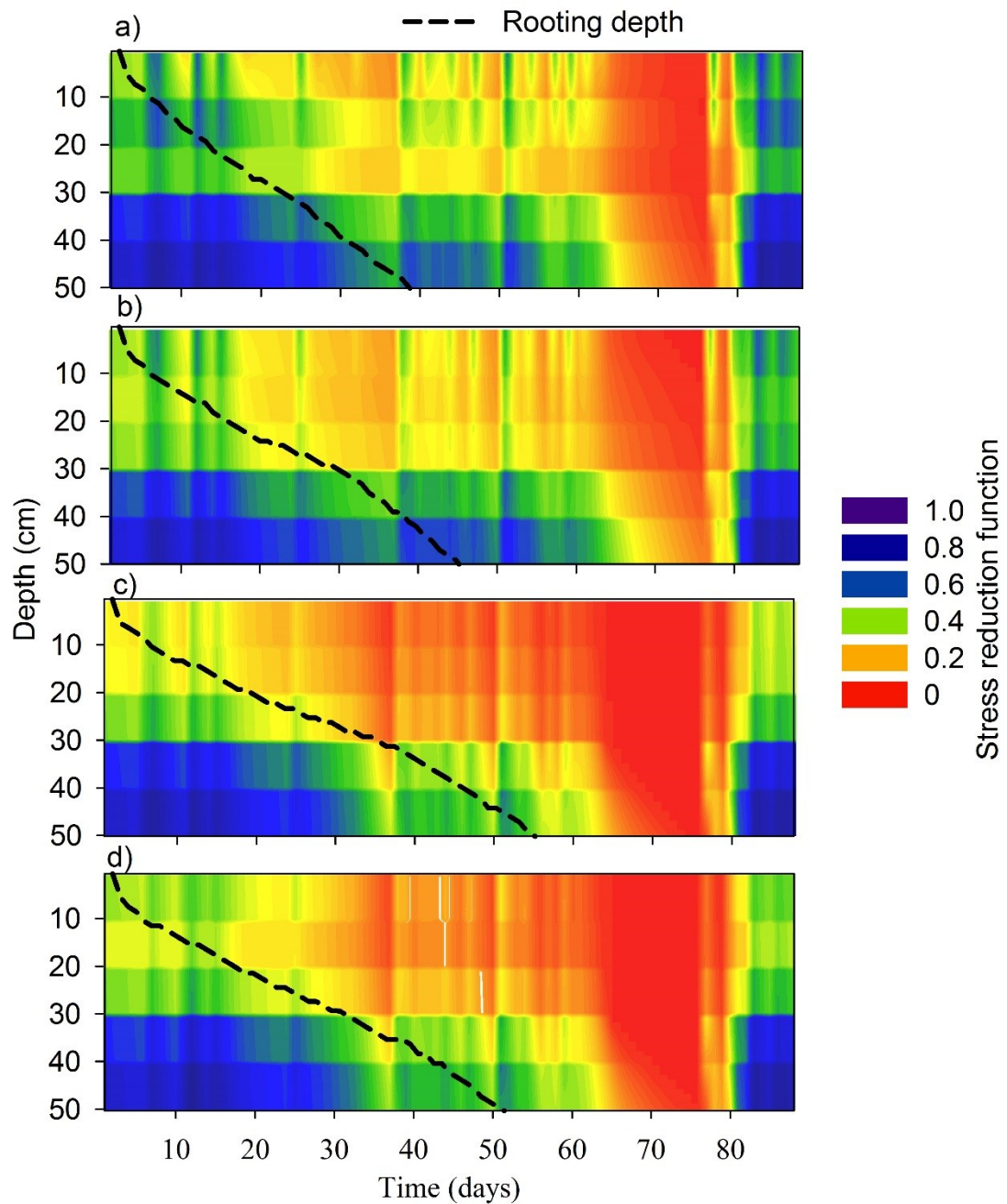


Figure 6.9. Stress reduction function for root elongation at the soil chiselling (a), no-tillage (b), NTC4 (c) and NTC8 (d) in a Rhodic Eutrudox during the root growing season. Dashed lines are the rooting depth at the time for each soil compaction level.

MTC: minimum tillage system with soil chiselling; NT: no-tillage system; and no-tillage with additionally compaction by four passes of tractor (NTC4) or eight traffic of harvester (NTC8).

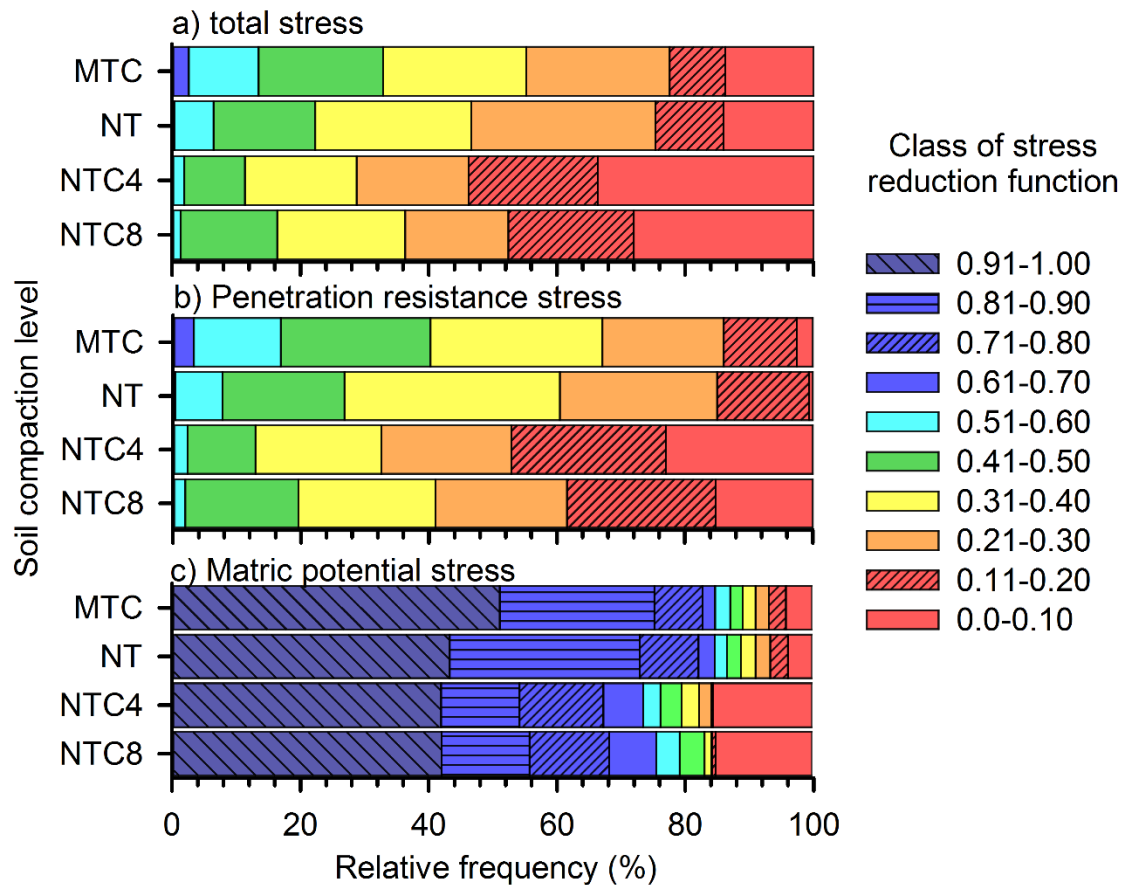


Figure 6.10. Relative frequency of total stress reduction function (a) and effect from soil penetration resistance (b) or matric potential (c) at the soil chiselling, no-tillage (NT), NTC4 and NTC8 on soil profile until 30 cm during the season growth of soybean. Stress reduction function near one is a maximum root elongation, and near zero, there is no root growth.

MTC: minimum tillage system with soil chiselling; NT: no-tillage system; and no-tillage with additionally compaction by four passes of tractor (NTC4) or eight traffic of harvester (NTC8).

6.4.7. Root anatomy

The general root shape of soybean under no-tillage system was approximately circular (Figure 6.11a,b,c). However, under soil compaction it was close to flattened for all stages at the primary growth (Figure 6.11d,e,f). The effect of stress on cell development is particularly complex, as abiotic stress is known to intervene in different aspects of cell development (POTTERS et al., 2009). Roots are efficient for adapting to stress conditions, especially with a prominent morphological and anatomical plasticity, resulting cell deformation both in circular and flattened roots (LIPIEC et al., 2012). Thus, different responses are observed for root anatomic, and the main effects are mechanical stress around the cortex of roots, and are few changes at the vascular cylinder.

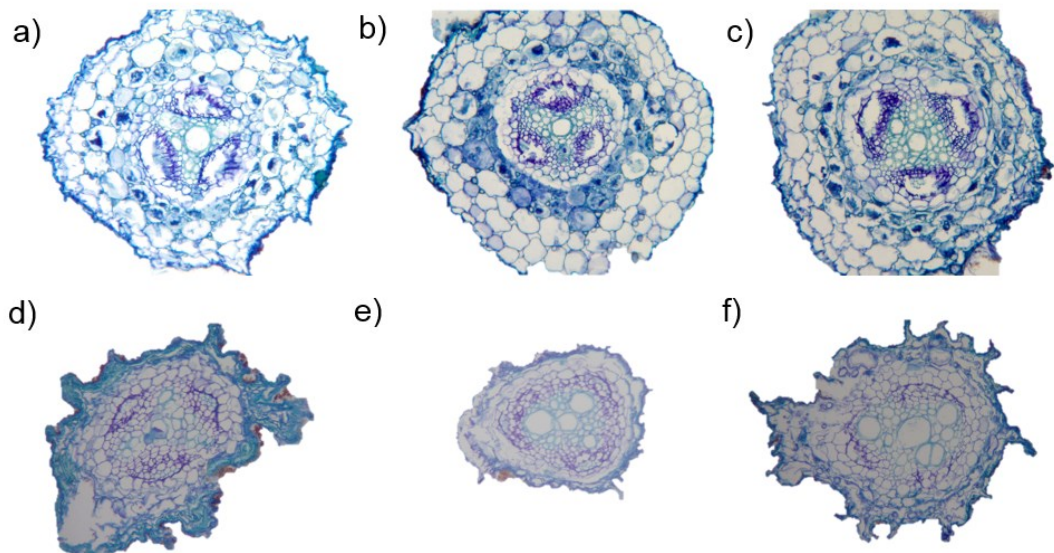


Figure 6.11. Anatomy of soybean root at the primary tissues in no-tillage (a,b,c) and compact soil by eight traffic of harvester (d,e,f) in a Rhodic Eutrudox.

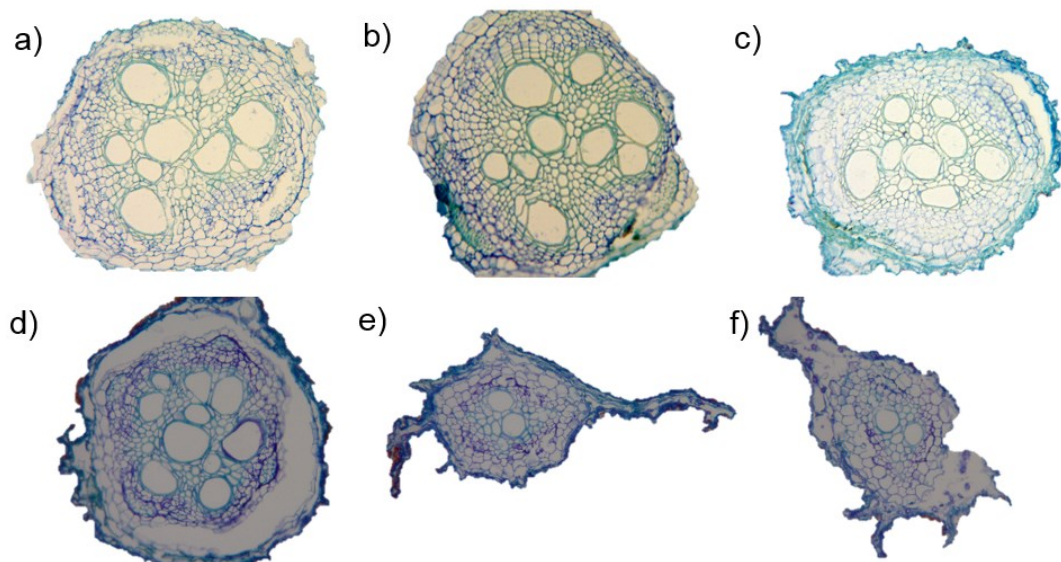


Figure 6.12. Anatomy of soybean root at the secondary growing in no-tillage (a,b,c) and compact soil by eight traffic of harvester (d,e,f) in a Rhodic Eutrudox.

6.5. Discussion

As the results show, the new approach of soil physical condition was coupling into the root growth modelling by stress reduction function for root elongation. The new coupling into the RootBox model (LEITNER et al., 2010a,

2010c) enable to simulate soybean root growth as a function of soil physical condition combining soil water flux (VAN DAM; FEDDES, 2000) with macroscopic root water uptake from matric flux potential (DE JONG VAN LIER et al., 2008). Stress reduction function for soybean crop represent the realistic root growth in conditions of four compaction levels in a Rhodic Eutrodox very clayed. Root elongation modelling are now possible under consideration of soil-root interaction, root water uptake and its dynamic interaction with soil water and penetration resistance into the soil (Figure 6.7). The implementation of stress reduction as a function of soil penetration and matric potential improve the understanding of how the soil physical condition contribute to reducing of root growth (Figure 6.9). Under loose soil condition the tap root will approaching down depth in short time than in soil compact layers, as a result of less soil penetration resistance and soil physical limitation for root elongation. In addition, as a result of rooting depth the soil volume explored by root system are increased and that improve the soil water available for root uptake.

Soil-root interactions are a complex process that need stronger models for describe the results of soil conditions in the biological development of plants (VERECKEN et al., 2016). Other crop-soil model also describe the complex interaction for water uptake (DE JONG VAN LIER et al., 2008), stomatal resistance (JAVAUX et al., 2013), gravitropism, hydrotropism (LEITNER et al., 2010c) or chemotropism condition (SCHNEPF; LEITNER; LEPSCH, 2012). Thus, no models before described the dynamic of soil physical process for root growth, especially daily variation of soil penetration resistance, aeration and soil water for root elongation. Soybean yield and root growth in this Rhodic Eutrodox very clayed have weak correlation with static values for penetration resistance at the field capacity (Figure 6.6), this occur due soil water flux during crop season, than changed the soil physical conditions to root elongation (Figure 6.9). For this reason, our model can help to understand the behaviour of soybean root system in function of soil structure.

Soil chiselling affect the soil physical structure, increasing the total porosity and macroporosity (Figure 6.2b,c), decreasing soil penetration resistance (Figure 6.1), bulk density and microporosity (Figure 6.2a,d). Root length density was increased with soil chiselling, especially until 20 cm depth, however, soybean grain yield was reduced in relation to no-tillage system. Thus,

the soybean crop has more roots, equal shoot and less productivity than no-tillage system, indicating that plant response are a complex interaction of soil-plant-atmosphere conditions. In soil chiselled, soybean grain yield was reduced due to changing in soil structure, such as changing at the pore distribution (Figure 6.2), water retention in micropores and especially due to reducing in unsaturated hydraulic conductivity. Grain yield was affected by soil chiselling maybe due to less soil moisture, mainly in the top soil layer (CALONEGO; ROSOLEM, 2010).

Soil compaction by agricultural traffic of tractor or harvester increase soil bulk density and penetration resistance (Figure 6.2), however just harvest traffic reduced the root length density in relation to no-tillage (Figure 6.5). Soil compaction by harvest machine and soil chiselling reduced the soybean grain yield in relation to no-tillage (Figure 6.3). This indicate than soybean grain yield are reduced in loose soil and compact soil, and the best condition for plant development to grain yield is the no-tillage system. Under no-tillage, continuous pores formed by decomposition of roots reduce the root resistance and play roles as route to linking the top soil to deeper layers (CALONEGO; ROSOLEM, 2010), improving the root growth deepest with higher root water uptake (JIN et al., 2013).

Plant responses are a result of interaction of environment with physical, chemical and biological conditions of the soil. Thus, there was a weak relationship of soil physical attributes (bulk density, macroporosity, microporosity and soil penetration resistance) with grain yield or root length density (Figure 6.6). This absence of a consistent relationship are due to soil physical conditions change daily during the season growth, specially aeration, water content and soil penetration resistance than affect directly plant development (LETEY, 1985). This happen because the soil physics conditions are dynamics with time and especially with water content in the soil. Thus, soil penetration resistance increased exponentially with reduction on water content (MORAES et al., 2013). In general, crops responses are dependent of climate conditions during the growing season, and, the main way for explain the soil physics conditions for plant development are with modelling of that conditions during the growing season.

Soil-root interaction modelling improve the understanding of response of the plants to soil physical conditions (Figure 6.10). Results of stresses frequency during the season growth, indicate than plants was submitted to

different stresses due soil penetration resistance or matric potential to root elongation. Time frequency of root growth reduction due to soil penetration resistance was higher as was increase the soil compaction level. However, root growth in chiselled soils was more decreased due hydric stress (matric potential stress). However, moderated soil compaction, in this way produced by tractor traffic, changed soil physical condition, but it was not limiting for crop production, that keeping the grain yield like in no-tillage system (Figure 6.3). Thus, Nosalewicz and Lipiec (2014) studied how the soil compaction affects water uptake by roots, and the results indicate than heavily compacted soil layers increased stomatal resistance decreasing the total water uptake. However, the root water uptake rate decreased with increments of root length density (NOSALEWICZ; LIPIEC, 2014).

Soil physical limitation, as a result of total stress (Figure 6.10) reduced the crop yield (Figure 6.3), decreasing the root elongation rate changing root system, restricting rooting depth (Figure 6.9) changing the shape of the root growth anatomy in primary structure (Figure 6.11) as well as in secondary root growth anatomy (Figure 6.12). As a result of modelling of soil physical condition during the season growth (Figure 6.9), root growth (Figure 6.7) and plant transpiration (Figure 6.4), and changing in the root anatomy (Figure 6.11 and Figure 6.12), can help explain how roots was developed in function of weather variation and soil water flux into the soil. Root penetration at the dense soil layer are possible with some adapting conditions, some roots have a stronger root cap protected by mucilage, than play an important role for protecting the root meristem from damage (BENGOUGH, 2006), however, soil structure and pore continuity play most important role to keep the higher root elongation rate into the soil (JIN et al., 2013). Thus, different regions and fields are constraining root elongation as a result of soil strength and oxygen deficiency (VALENTINE et al., 2012), and some field soils, presence of a crack can reduce root-penetration resistance to only one-quarter of that expected from the penetrometer measurement in the bulk soil (BENGOUGH; MULLINS, 1991). Recent studies, showed than root elongation rate are reduced just if the mechanical impedance are applied at the tip root with an axial pressure (BENGOUGH, 2012a), for this reason, pore continuity than can see at the no-tillage system are very important for keep the root growth in deep soil profile.

Soil strength changed the root shape, and there was no changes at the xylem and phloem secondary. In the no-tillage system, secondary root growth with few compression around the root cells, however, for cell expanded in a higher soil strength, roots change the shape and the cortex cells are compressed mechanically for preserve anatomic distribution of xylem and phloem at the vascular cylinder. In general, the cells located in the vascular cylinder were found to expand, whereas those located around the cortex were found to be radially compressed. The function of xylem is transport (unidirectional) of water and nutrients from roots to the shoots (COSTA et al., 2013), and phloem is responsible for translocation (bidirectional) of organic and mineral material in solutions from leaves to storage organs and growing parts of plant (MACHADO; CARMELLO-GUERREIRO, 2013). The secondary root growth started when vascular cambium produce xylem and phloem secondary. Thus, the vascular cambium is formed from vascular tissues and phellogen originated from periderm (QUEIROZ-VOLTAN; NOGUEIRA; MIRANDA, 2000). Soil compaction change the anatomy, shape and size of roots, and this can see in deformation of cortex cells in secondary root growth stage (Figure 6.12). The vascular cylinder at the no-tillage condition have more number of xylems and that are bigger than compacted soil conditions. The roots grown in compacted soil promote ruptured of epidermal cells, and the cortical parenchyma cells was more spherical in agreement of Baligar et al. (1975). This produce a vascular cylinder more oval, than changed the root shape.

Soil chiselling system decreased the root elongation as a result of soil physical limitation, its prove that use of a static limit of soil physical conditions for root elongation is incorrect. Soil physical properties are dynamic with time and especially soil penetration resistance increase exponentially with reduction of soil water content, this made faster changes in soil condition for plant growth. Soil physical limitation accumulated during the season growth can explain the root development of crops, and for no-tillage and in soil chiselling there was less times with higher limitation by soil penetration resistance stress (class of stress bellow than 0.20, brown and green colours at the Figure 6.10b. This higher restriction of soil penetration resistance stress was less than 20% of time in no-tillage and soil chiselling, and more than 40% of time in compacted soils (NTC4 and NTC8). That

promoted more time with faster root elongation rate for root system growth down at the soil profile.

6.6. Conclusion

In this study, we have shown the use of simple model for complex soil-root interaction of soil physical limitation to root growth coupling root elongation, root water uptake and soil water flux. Soil-root modelling was performed successfully for soybean crop developed in different soil compaction level of a Rhodic Eutrudox.

Soybean root growth modelling in function to soil physical conditions (mechanical impedance, hypoxia and water stress) was performed successfully in different compaction levels of a Rhodic Eutrudox. This method improve the understanding how the soil structure affect the root growth at the field condition, and will play an increasingly important role in root-soil interaction models research.

Soil strength stress has a major effect on soil-root interaction for the root growth in compacted soil condition, and matric potential contribute for increase the soil physical limitation to root growth in soil chiselling condition. The prevision of increments in root growth by the model in the soil chiselled was in an opposite way to reduction of grain yield in that treatment. Thus, soybean grain yield was reduced due both soil chiselling and heavily traffic.

7 CAPÍTULO 3. MODELAGEM DE LIMITAÇÕES FÍSICA AO CRESCIMENTO RADICULAR DE MILHO

7.1. Resumo

A resistência mecânica, a aeração e a disponibilidade hídrica afetam diretamente o crescimento radicular das culturas. O objetivo deste trabalho foi modelar o crescimento radicular de milho em função da dinâmica dos estresses hídricos e mecânico em um Latossolo Vermelho Distrérico. A densidade e a curva de retenção de água no solo foram determinadas para caracterização dos níveis de compactação do solo. A cultura do milho foi cultivada em quatro níveis de compactação (solo escarificado; sistema plantio direto; e solo trafegado por 4 passadas de trator ou 8 passadas de colhedora). O sistema radicular foi quantificado pela coleta de monólitos na linha e entrelinha da cultura e em até 50 cm de profundidade. As condições meteorológicas durante o ciclo da cultura foram monitoradas. Na cultura do milho foram determinadas a produtividade de grãos e de massa da parte aérea. Um modelo de crescimento radicular que considera a dinâmica da resistência do solo à penetração e o potencial matricial do solo foi usado para simulação de crescimento do sistema radicular do milho. A produtividade de grãos foi reduzida em função da compactação pelo tráfego de colhedora e pela escarificação do solo em relação ao sistema plantio direto. A densidade de comprimento radicular simulada apresentou adequada concordância com os valores medidos em condições de campo. Este estudo demonstra que o crescimento radicular de milho pode ser simulado considerando as condições físicas do solo durante o ciclo de desenvolvimento da cultura, sendo resultados dos estresses causados pela resistência mecânica, hipoxia, e disponibilidade hídrica à cultura do milho.

7.2. Introdução

A compactação do solo tem sido considerada a principal causa da degradação física dos solos agrícolas. Entretanto a definição do que é um solo compactado, muitas vezes tem levado a discussões, principalmente pela busca de limites críticos ao crescimento das plantas (DE JONG VAN LIER; GUBIANI, 2015; MORAES et al., 2014). O crescimento das plantas é afetado diretamente por quatro fatores físicos nos solos, que são a temperatura, aeração, resistência e conteúdo de água (LETEY, 1985). Além disso, é apenas indiretamente afetado por diversas características dos solos, como por exemplo textura, estrutura agregação e tamanho e distribuição dos poros (LETEY, 1985).

A modelagem tem se tornado importante ferramenta para descrever a funcionalidade de processos físicos na interação solo-planta, tais como a absorção de água e o crescimento radicular (DUPUY; GREGORY; BENGOUGH, 2010). As propriedades físicas do solo que influenciam o crescimento das plantas são dinâmicas no tempo e espaço, e o aperfeiçoamento de técnicas para o entendimento destas condições são necessárias. O uso de modelos eco-hidrológicos para o crescimento radicular, é portanto, um importante caminho para aumentar o entendimento das interações solo-planta-atmosfera (TRON et al., 2015). Entretanto, existem poucos modelos de interações entre processos físicos e biológicos nas interações solo-planta (VERECKEN et al., 2016).

A taxa de alongamento radicular de milho é fortemente correlacionada com a resistência do solo à penetração e com o potencial matricial (BENGOUGH et al., 2011). Entretanto, em nenhum modelo de absorção de água pelas raízes (DUNBABIN et al., 2013; LEITNER et al., 2014), ou de crescimento radicular (LEITNER et al., 2010c) são consideradas a dinâmica dos estresses mecânicos dos solos ao alongamento radicular durante o ciclo de desenvolvimento das culturas. A incorporação dos estresses hídricos e mecânicos para alongamento radicular se tornam fundamentais para o avanço no conhecimento das relações solo-raiz para a área de manejo dos solos. Isso porque durante o ciclo de desenvolvimento das culturas, as plantas são submetidas a uma série de modificações fenológicas que afetam a transferência de massa e energia no sistema solo-planta-atmosfera (DE JONG VAN LIER; GUBIANI, 2015). Assim,

as relações e o uso de parâmetros estáticos das propriedades físicas dos solos já se mostraram insuficientes para o completo entendimento das relações solo-planta.

Neste sentido, a hipótese deste trabalho foi que a inclusão de um parâmetro de estresse hídrico e mecânico melhora a simulação do crescimento de raízes pelo modelo RootBox. O objetivo deste trabalho foi avaliar a eficiência do modelo RootBox ao simular o crescimento radicular do milho em diferentes níveis de compactação em Latossolo Vermelho Distroférico.

7.3. Materiais e Métodos

7.3.1. Local de estudo e solo

O experimento foi implantado em uma área com sistema plantio direto desde 1991 na área experimental da Embrapa Soja, em Londrina (latitude 23°12'S; longitude 51°11'W; e 585 m altitude), estado do Paraná, no Sul do Brasil. O clima, de acordo com a classificação de Koppen é subtropical úmido (cfa), com temperatura média anual de 21°C e precipitação de 1650 mm. O solo da área experimental foi classificado como Latossolo Vermelho Distroférico (classificação Brasileira) e Rhodic Eutrudox (Classificação dos EUA), com 784 g kg⁻¹ de argila, 178 g kg⁻¹ de silte e 67 g kg⁻¹ de areia. A densidade de partículas média na camada de 0-30 cm é de 2,96 Mg m⁻³, e a declividade da área experimental é de 0,03 m m⁻¹.

Antes da implantação do sistema plantio direto na área do experimento, esta área foi cultivada com a cultura do café (*Coffe arabica* L.) por aproximadamente 40 anos. Entre 1991 e 2009 foram implantadas culturas em sistemas de rotações usando soja (*Glycine max*) ou milho (*Zea mays*) no verão e trigo (*Triticum aestivum*) ou aveia preta (*Avena Strigosa*) no inverno. Já entre o período de 2010 a 2012 foi cultivada *Urochloa ruziziensis* para cobertura do solo (sem pastejo). No ano de 2013 a *Urochloa ruziziensis* foi dessecada 90 dias antes da implantação do experimento. No inverno de 2013 a área foi cultivada com trigo e no verão de 2013/14 implantou-se a cultura da soja.

7.3.2. Tratamentos e delineamento experimental

Os tratamentos foram implantados em fevereiro de 2013, sendo que o delineamento experimental foi de blocos ao acaso com quatro tratamentos e três repetições. Os tratamentos consistiram de quatro níveis de compactação em parcelas de 5 m de largura e 15 m de comprimento. Os níveis de compactação foram (i) SPM: sistema de preparo mínimo com escarificação do solo; (ii) SPD: sistema plantio direto; (iii) SPDC4: sistema plantio direto com 4 tráfegos de trator; (iv) SPDC8: sistema plantio direto com 8 tráfegos de colhedora.

A escarificação do solo foi realizada em fevereiro de 2013 com o solo em consistência friável (umidade gravimétrica de $0,29 \text{ kg kg}^{-1}$) na camada de 0-20 cm. O escarificador, marca Köhler, foi equipado com rolo destorroador e cinco hastes espaçadas 35 cm, com ponteira de 8 cm, trabalhando a uma profundidade de 25 cm. A compactação adicional no tratamento SPDC4 foi realizada com o tráfego de um trator CBT 4x2 TDA, modelo 8060, equipado com uma pá-carregadeira no eixo frontal. A massa total do trator foi 7,2 Mg. Os pneus usados no eixo frontal foram Goodyear 14.9-24-R1 e pneus traseiros Goodyear 18.4-34-R1, lastrados com massas de ferro e com água (75% do volume do pneu).

A compactação adicional no tratamento SPDC8 foi realizada com o tráfego de uma colhedora auto propelida SLC-6200 (peso de 66kN) equipada com plataforma para colheita de milho (peso de 12 kN), com o depósito de grãos vazio; assim o peso total da colhedora foi de 78 kN (58 kN no eixo frontal). A massa total da colhedora foi de 9,5 Mg. A colhedora foi equipada com pneus simples no eixo frontal, Pirelli 18.4-30 R1, diagonais, inflados a uma pressão de 180 kPa. Os pneus no eixo traseiro foram do modelo Pirelli 9.00-16 F2 10PR, diagonais, inflados a uma pressão de 410 kPa. A pressão de contato no eixo dianteiro de pneu-solo foi estimada e 200 kPa por meio do procedimento proposto por O'sullivan, Henshall e Dickson (1999). Ambos os tráfegos, com trator e com colhedora, foram realizados no solo com umidade equivalente à capacidade de campo ($0,34 \text{ kg kg}^{-1}$).

7.3.3. Cultivo e manejo no campo

No inverno de 2013 foi cultivado a cultura do trigo com espaçamento de 17 cm, e no verão de 2013/14 foi implantada a cultura da soja espaçada em 45 cm. A cultura do milho (cultivar AG9010) foi semeada em 27 de fevereiro de 2014, usando uma semeadora (Semeato, modelo SHM 11/13), com 3 linhas espaçadas em 90 cm. A cultura foi semeada a uma população de 55 mil plantas ha^{-1} , com espaçamento entre linhas de 90 cm, e 5 cm de profundidade. A adubação da cultura foi realizada no sulco de semeadura em profundidade de 10 cm, sendo aplicado NPK 08-20-20, 300 kg ha^{-1} . A adubação nitrogenada de cobertura foi realizada no estádio V6, na dose de 80 kg ha^{-1} de nitrogênio (N) à lanço em superfície, na forma de sulfato de amônio.

7.3.4. Amostragem e curva de retenção de água no solo

Amostras indeformadas de solo foram coletadas, após o cultivo de soja em fevereiro de 2014, nas camadas de 0-0,10, 0,10-0,20 m, 0,20-0,30, 0,30-0,40, 0,40-0,50 m, sendo coletadas em três posições ao longo da linha e entrelinha em 12 repetições nos 4 níveis de compactação, totalizando 240 amostras. Na determinação da curva de retenção de água no solo, as amostras nas três primeiras camadas foram saturadas e submetidas aos potenciais matriciais de -3 e -6 kPa em mesa de tensão, e -10, -33, -100 e -500 kPa em câmaras de pressão extratoras de Richard. Após o equilíbrio em cada potencial matricial, as amostras foram pesadas, sendo secas em estufa a 105 °C por 48 h, para quantificação do conteúdo de água e a densidade do solo. O conteúdo gravimétrico de água no potencial matricial de -1000 e -1500 kPa foi determinado com a relação do conteúdo gravimétrico e o potencial da água no solo, realizado com leituras do potencial matricial em um psicrômetro (*water potential meter*, modelo WP4-C). A curva de retenção de água no solo foi ajustada à equação proposta por VAN GENUCHTEN (1980). A frequência de distribuição e acumulada dos poros foi determinada pela primeira derivada da equação de ajuste da curva de retenção de água no solo. Já o diâmetro equivalente de poros foi determinado pela teoria da capilaridade (HILLEL, 2004).

7.3.5. Produtividade de grãos e biomassa

A produtividade de grãos foi avaliada por meio da colheita mecânica, no dia 06 de agosto de 2014, em 4 linhas centrais com 13 m de comprimento, totalizando 46,8 m² de área. Os grãos foram trilhados e pesados, e a sua massa foi corrigida para 13% de umidade. A biomassa da parte área foi determinada pela coleta de duas linhas de 1 m (1,8 m²), as quais foram secas em estufas de circulação forçada de ar à 60 °C até peso constante.

7.3.6. Sistema radicular, amostragem e análises

Amostras de solo e raízes de milho foram coletadas por meio de trincheiras transversais às linhas de cultivo por meio de técnicas de coleta de monólitos (BÖHM, 1979). Em cada parcela de campo foi aberta e amostrada uma trincheira de 90 cm de largura, 8 cm de espessura e 50 cm de profundidade. Nas trincheiras, transversalmente às linhas de milho foram coletados os monólitos de solo sendo estes divididos em 5 camadas de 10 cm (0-10; 10-20; 20-30; 30-40 e 40-50 cm), e três posições de 30 cm (linha e entrelinha), sendo uma na linha e duas nas entrelinhas das plantas, totalizando 180 submonólitos.

As raízes foram separadas do solo por meio de lavagem em água corrente usando peneiras com malha de diâmetro de 0,5 mm. Após a lavagem das raízes, aproximadamente 10% das raízes foram amostradas para digitalização das raízes com o uso de escâner (Delta-T Scan). Após a digitalização das imagens radiculares, o comprimento radicular foi determinado pelo processamento das imagens no programa para análises de fibras e raízes, Safira 2.0 (JORGE; SILVA, 2010). O peso da amostra radicular escaneada e seu respectivo comprimento radicular foram relacionados ao peso total da amostra para obtenção do comprimento radicular total em cada submonólito.

A densidade de comprimento radicular do milho foi determinada pela relação entre o comprimento de raízes e o volume de solo amostrado nos sobmólitos (cm cm⁻³). A biomassa seca radicular foi determinada por secagem em estufa de circulação forçada de ar em 60 °C até peso constante, sendo expressos os resultados de densidade de biomassa radicular apresentados em função da área da superfície do solo (g m⁻² por 10 cm de profundidade).

7.3.7. Dados climatológicos

Dados climáticos, de fevereiro a agosto de 2014, referentes ao período de desenvolvimento do milho, foram coletados na estação meteorológica da Embrapa Soja, localizada próximo à área experimental. Assim, dados diários de radiação, temperatura, umidade relativa, velocidade do vento e precipitação foram coletados durante o desenvolvimento da cultura. A evapotranspiração de referência foi calculada a partir dos dados meteorológicos usando a equação de Pennan-Monteith (ALLEN et al., 1998).

7.3.8. Modelagem do crescimento radicular

O crescimento das raízes foi modelado em linguagem de programação MatLab®, associando o modelo RootBox de arquitetura radicular em 3-D, proposto por Leitner et al. (2010), incluindo os efeitos das limitações físicas do solo propostas no item 5.3.5. Assim, o modelo de crescimento radicular em 3-D foi acoplado ao modelo de fluxo de água no solo em 1-D por meio de equações propostas por Van Dam and Feddes (2000) e ao modelo de absorção de água pelas raízes proposto por De Jong Van Lier et al. (2008), baseado no potencial de fluxo matricial do solo. O modelo hidrológico 1-D de fluxo de água no solo resolve numericamente a equação de Richards e pode simular o fluxo de água no ambiente solo-planta-atmosfera (VAN DAM; FEDDES, 2000).

Os parâmetros de entrada do modelo são as características do solo (curva de retenção de água do solo, curva de resistência do solo à penetração, condutividade hidráulica saturada e a densidade do solo) (Tabela 7.1), clima (potencial de evaporação e transpiração, temperatura, umidade do ar, precipitação e irrigação) e características radiculares da cultura (comprimento da zona apical e basal, espaçamento entre ramificações, número de ramificações e ângulo de inserção das raízes), tipo de tropismo, período de crescimento e limitações físicas de resistência e de potencial matricial para o alongamento radicular. Os parâmetros de entrada para a arquitetura do sistema radicular de milho estão na Tabela 7.2.

Os resultados do modelo são variáveis de solo (balanço hídrico, infiltração, escoamento superficial e drenagem profunda, evaporação real, teor

de água, potencial matricial, resistência do solo à penetração e condutividade hidráulica não saturada) e de cultura (estrutura do sistema radicular, densidade de raízes, transpiração real e absorção de água) em cada camada do solo.

Tabela 7.1. Parâmetros físicos do solo e de ajuste da curva de retenção de água no solo pelo modelo de Van Genuchten.

Camadas cm	θ_s cm ³ cm ⁻³	θ_r cm ³ cm ⁻³	α cm ⁻¹	n --	Ksat cm dia ⁻¹	Ds Mg m ⁻³
----- SPM -----						
0-10	0,585	0,198	0,1927	1,2691	83,78	1,10
11-20	0,553	0,200	0,1313	1,1839	83,78	1,16
21-30	0,526	0,200	0,0469	1,1469	57,26	1,27
31-40	0,550	0,200	0,0512	1,1654	35,70	1,16
41-50	0,554	0,198	0,0583	1,1679	44,70	1,10
----- SPD -----						
0-10	0,555	0,198	0,0892	1,1848	39,36	1,21
11-20	0,537	0,200	0,0822	1,1503	39,36	1,26
21-30	0,539	0,200	0,0756	1,1407	54,15	1,26
31-40	0,539	0,200	0,0756	1,1407	54,15	1,16
41-50	0,539	0,200	0,0756	1,1407	54,15	1,10
----- SPDC4 -----						
0-10	0,508	0,200	0,01280	1,1782	26,09	1,35
11-20	0,510	0,200	0,02520	1,1391	26,09	1,34
21-30	0,524	0,197	0,0180	1,1494	26,98	1,32
31-40	0,550	0,200	0,0512	1,1654	35,70	1,16
41-50	0,554	0,198	0,0583	1,1679	44,70	1,10
----- SPDC8 -----						
0-10	0,499	0,200	0,0017	1,2480	18,39	1,39
11-20	0,505	0,200	0,0102	1,1485	18,39	1,37
21-30	0,526	0,200	0,0211	1,1307	15,29	1,33
31-40	0,550	0,200	0,0512	1,1654	35,70	1,16
41-50	0,554	0,198	0,0583	1,1679	44,70	1,10

* θ_s , θ_r , α , e n são parâmetros de ajuste do modelo de van Genuchten; Ksat: condutividade hidráulica saturada; Ds: densidade do solo.

Tabela 7.2. Parâmetros de arquitetura radicular de milho (*Zea mays*).

Símbolo	Parâmetro	Unidade	Valor [média, s.d.]
<i>Raiz principal</i>			
re	Taxa de alongamento inicial	cm dia ⁻¹	[2, 0]
a	Diâmetro radicular	cm	[0,13, 0]
la	Comprimento da zona apical	cm	[0,15, 0]
lb	Comprimento da zona basal	cm	[0,15, 0]
ln	Distância entre raízes	cm	[0,88, 0]
nob	Número máximo de raízes	-	[90, 0]
σ	Mudança esperada da ponta da raiz	rad cm ⁻¹	0,2
type	Tipo de tropismo	-	1
N	Força do tropismo	-	1,5

dx	Resolução espacial	cm	0,25
<i>Lateral de primeira ordem</i>			
re	Taxa de alongamento inicial	cm dia ⁻¹	[0,75, 0]
a	Diâmetro radicular	cm	[0,05, 0]
Θ	Ângulo de inserção	rad	[1,2217, 0]
la	Comprimento da zona apical	cm	[3, 0]
lb	Comprimento da zona basal	cm	[2, 0]
ln	Distância entre raízes	cm	[0,89, 0]
nob	Número máximo de raízes	-	[5, 0]
σ	Mudança esperada da ponta da raiz	rad cm ⁻¹	0,3
type	Tipo de tropismo	-	1
N	Força do tropismo	-	1
dx	Resolução espacial	cm	0,25
<i>Lateral de segunda ordem</i>			
re	Taxa de alongamento inicial	cm dia ⁻¹	[0,75, 0]
a	Diâmetro radicular	cm	[0,03, 0]
Θ	Ângulo de inserção	rad	[1,22173, 0]
k	Comprimento máximo da raiz	cm	[5, 0]
σ	Mudança esperada da ponta da raiz	rad cm ⁻¹	0,4
type	Tipo de tropismo	-	1
N	Força do tropismo	-	0
dx	Resolução espacial	cm	0,25
<i>Raízes basais</i>			
re	Taxa de alongamento inicial	cm dia ⁻¹	[3, 0]
a	Diâmetro radicular	cm	[0,01, 0]
Θ	Ângulo de inserção	rad	[1,39626, 0]
la	Comprimento da zona apical	cm	[2, 0]
lb	Comprimento da zona basal	cm	[0,15, 0]
ln	Distância entre raízes	cm	[0,88, 0]
nob	Número máximo de raízes	-	[90, 0]
σ	Mudança esperada da ponta da raiz	rad cm ⁻¹	0,1
type	Tipo de tropismo	-	1
N	Força do tropismo	-	1,5
dx	Resolução espacial	cm	0,25
basal_first	Primeira ocorrência	dias	3
basal_delay	Tempo de espera entre raízes	dias	2
basal_max	Número máximo	-	60
<i>Raízes adventícias</i>			
re	Taxa de alongamento inicial	cm day ⁻¹	[3, 0]
a	Diâmetro radicular	cm	[0,01, 0]
Θ	Ângulo de inserção	rad	[1,5708, 0]
la	Comprimento da zona apical	cm	[2, 0]
lb	Comprimento da zona basal	cm	[2, 0]

In	Distância entre raízes	cm	[0,88, 0]
nob	Número máximo de raízes	-	[90, 0]
σ	Mudança esperada da ponta da raiz	rad cm ⁻¹	0,05
type	Tipo de tropismo	-	1
N	Força do tropismo	-	1
dx	Resolução espacial	cm	0,25
sb_first	Tempo de emergência	dias	1
sb_delay	Tempo de espera entre raízes	dias	1,2
sb_nCR	Número de raízes por coroas	-	11
sb_delayRC	Tempo de espera entre coroas	dias	33
sb_dzRC	Distância entre coroas	cm	1

7.3.9. Avaliação de desempenho do modelo de simulação do crescimento radicular de milho

A concordância entre os valores medidos e simulados foram expressos por meio do erro absoluto (MAE) (CASAROLI; DE JONG VAN LIER; DOURADO NETO, 2010), pelo raiz quadrada do erro médio (RMSE) (DE JONG VAN LIER et al., 2008), coeficiente de massa residual (CRM) (BONFANTE et al., 2010). A precisão foi determinada pelo coeficiente de correlação (r) (ADDISCOTT; WHITMORE, 1987) e a exatidão por meio do índice de concordância de Willmott (d) (WILLMOTT; ROBESON; MATSUURA, 2012), além da avaliação do desempenho da modelagem pela eficiência do modelo (EF) (BONFANTE et al., 2010) e proximidade da relação 1:1.

7.3.10. Análise de dados

Os resultados de produtividade de grãos, produção de massa seca da parte aérea, densidade de comprimento radicular e massa seca radicular foram submetidos à análise de variância ANOVA ($p < 0,05$), e quando os efeitos dos tratamentos foram significativos, as médias foram comparadas pelo teste de Tukey em nível de 5% de probabilidade de erro. As análises foram realizadas por meio programa computacional *Statistical Analysis System* (SAS) versão 8.0.

7.4. Resultados

A variabilidade horizontal e vertical da densidade do solo em fevereiro de 2014 pode ser observada na Figura 7.1. Os níveis de compactação após cultivo de soja demonstraram persistência das diferenças antes da implantação da cultura do milho de segunda safra. O cultivo de soja na safra de 2013/14, anteriormente ao cultivo de milho, associado aos efeitos da haste sulcadora favoreceram reduções da densidade na linha de semeadura, principalmente nas áreas trafegadas (Figura 7.1c,d), sendo importante para melhorar o aprofundamento radicular do milho na safra sequente. Os efeitos do tráfego de trator e colhedora podem ser observados até 30 cm de profundidade, e a escarificação apresentou efeito residual até 20 cm.

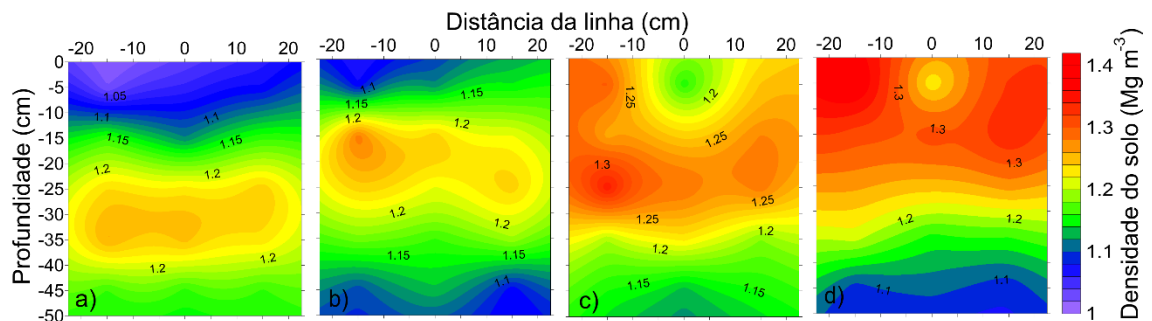


Figura 7.1. Densidade do solo no perfil do solo no sistema de preparo mínimo (a), sistema plantio direto (b), sistema plantio direto com 4 tráfegos de trator (c) e sistema plantio direto com 8 tráfegos de colhedora (d) em Latossolo Vermelho.

As curvas de retenção de água no solo foram alteradas em função dos níveis de compactação do solo (Figura 7.2). O tráfego agrícola com trator ou com colhedora reduziram a porosidade total do solo, alterando assim a frequência e distribuição dos poros no solo. Os parâmetros de ajustes das curvas de retenção de água no solo indicam satisfatórios ajustes das curvas aos valores observados (Tabela 7.1). Como resultado do tráfego agrícola, a retenção de água foi alterada, sendo necessário maiores tensões para a extração de água do solo. Em mesmos potenciais matriciais, entre a capacidade de campo (-10 kPa) e o ponto de murcha permanente (-1500 kPa), são observados incrementos nos conteúdos de água em função do aumento dos níveis de compactação do solo. Os efeitos do tráfego com trator ou da colhedora no sistema plantio direto apresentaram alterações na retenção de água no solo nas camadas até 30 cm

de profundidade, já a escarificação do solo proporcionou alterações principalmente até 20 cm de profundidade.

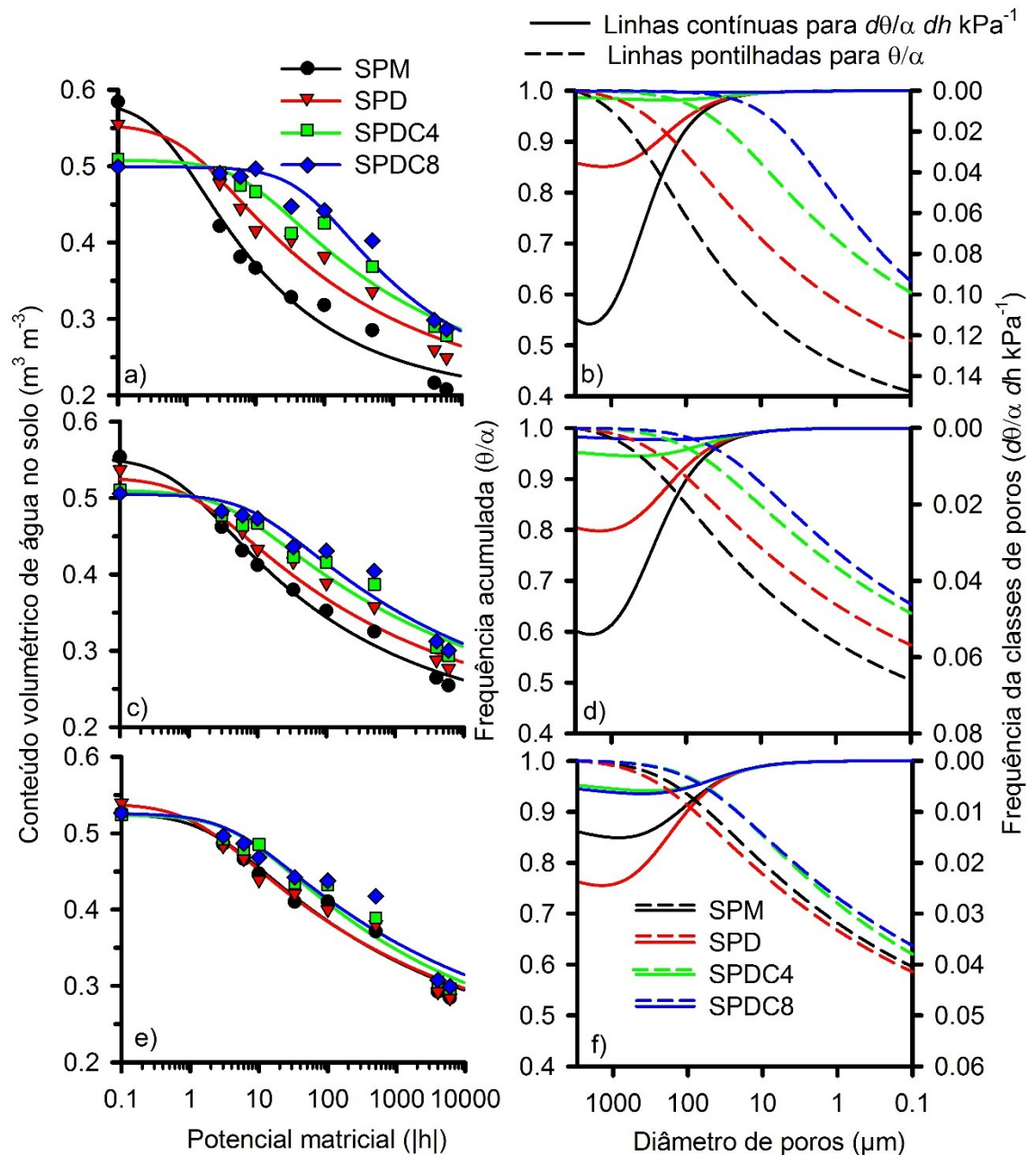


Figura 7.2. Curva de retenção de água (a,c,e) e frequência acumulada e distribuição do tamanho de poros (b,d,f) nas camadas de 0-10 cm (a,b), 10-20 cm (c,d) e 20-30 cm (e,f) em função de níveis de compactação em um Latossolo Vermelho Distroférico.

SPM: preparo reduzido com escarificação do solo; SPD: sistema plantio direto; SPDC4: SPD com 4 tráfegos com trator de 7,2 Mg; SPDC8: SPD com oito tráfegos de colhedora com massa total de 9,5 Mg.

A produção de biomassa da parte aérea do milho foi maior no sistema plantio direto, e no solo com tráfego de trator (Figura 7.3a). O incremento de

compactação pelo tráfego com colhedora ou a escarificação do solo, causaram reduções na produção de biomassa da parte aérea em relação ao solo trafegado com trator. A produtividade de grãos de milho foi reduzida na área escarificada e nas áreas com compactação adicional por tráfego de trator e colhedora em relação ao solo no sistema plantio direto sem compactação adicional (Figura 7.3b).

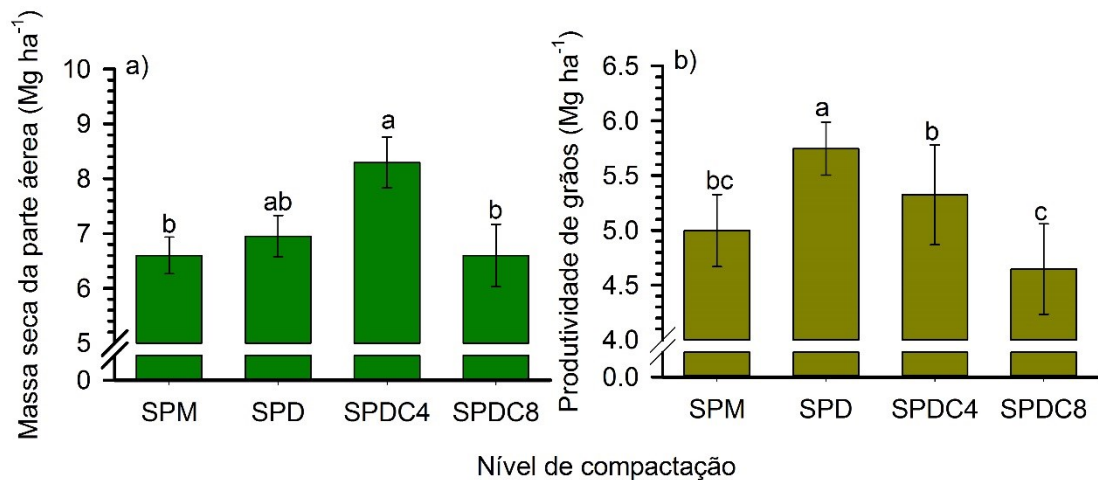


Figura 7.3. Produção de massa seca da parte aérea (a) e produtividade de grãos (b) de milho em níveis de compactação em um Latossolo Vermelho Distroférrico. SPM: preparo reduzido com escarificação do solo; SPD: sistema plantio direto; SPDC4: SPD com 4 tráfegos com trator de 7,2 Mg; SPDC8: SPD com oito tráfegos de colhedora com massa total de 9,5 Mg. *ns: não significativo; Médias seguidas por mesmas letras não diferem entre si pelo teste de Duncan ao nível de 10%; Barras indicam o erro padrão da média.

O crescimento do sistema radicular da cultura do milho foi alterado em função dos níveis de compactação do solo (Figura 7.4). A densidade de comprimento radicular (Figura 7.4a) ou a biomassa seca radicular (Figura 7.4b) indicaram alterações no perfil do solo em função do tráfego ou escarificação do solo. A densidade de comprimento radicular foi alterada até 20 cm de profundidade, já na massa seca radicular houveram alterações na camada de 20-30 cm. A escarificação do solo proporcionou incrementos na massa seca radicular de milho na camada de 20-30 cm em relação ao solo trafegado com trator. Na camada de 10-20 cm houveram reduções no comprimento radicular no solo trafegado com trator em relação ao sistema plantio direto. Entretanto, na camada superficial do solo (0-10 cm) a escarificação do solo reduziu a densidade de comprimento radicular em relação ao solo trafegado com colhedora.

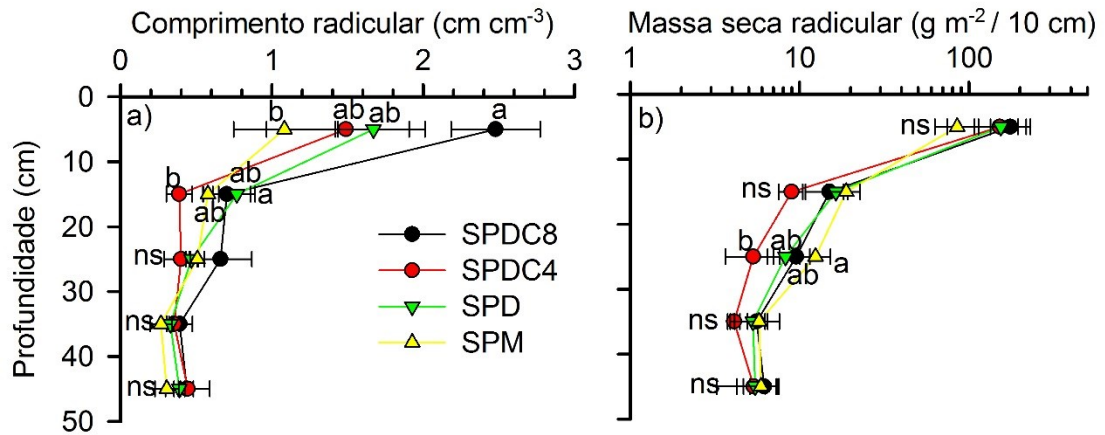


Figura 7.4. Densidade de comprimento (a) e massa seca (em escala logarítmica) (b) de raízes de milho em função de níveis de compactação em um Latossolo Vermelho Distroférico.

SPM: preparo reduzido com escarificação do solo; SPD: sistema plantio direto; SPDC4: SPD com 4 tráfegos com trator de 7,2 Mg; SPDC8: SPD com oito tráfegos de colhedora com massa total de 9,5 Mg. *ns: não significativo; Médias seguidas por mesmas letras não diferem entre si pelo teste de Duncan ao nível de 10%; Barras indicam o erro padrão da média.

A distribuição radicular no perfil do solo em relação à linha e entrelinha da cultura do milho foi alterada em função dos níveis de compactação do solo (Figura 7.5). O incremento dos níveis de compactação no solo favoreceu aumentos na quantidade de raízes no perfil do solo (Figura 7.5c,d) em relação ao solo escarificado (Figura 7.5a). Principalmente na camada de 0-10 cm, o tráfego com colhedora (SPDC8) proporcionou incrementos na densidade de comprimento radicular em relação ao solo escarificado (Figura 7.4a). Este aumento na densidade de comprimento radicular no SPDC8 esteve condicionado à maior concentração de raízes próximo à linha de semeadura do milho (Figura 7.5d).

A modelagem do crescimento radicular para a cultura do milho foi realizada para o período de desenvolvimento entre a semeadura e a amostragem radicular que correspondeu a 110 dias (Figura 7.6). A arquitetura do sistema radicular de milho foi alterada pelos níveis de compactação principalmente o número e o comprimento das raízes.

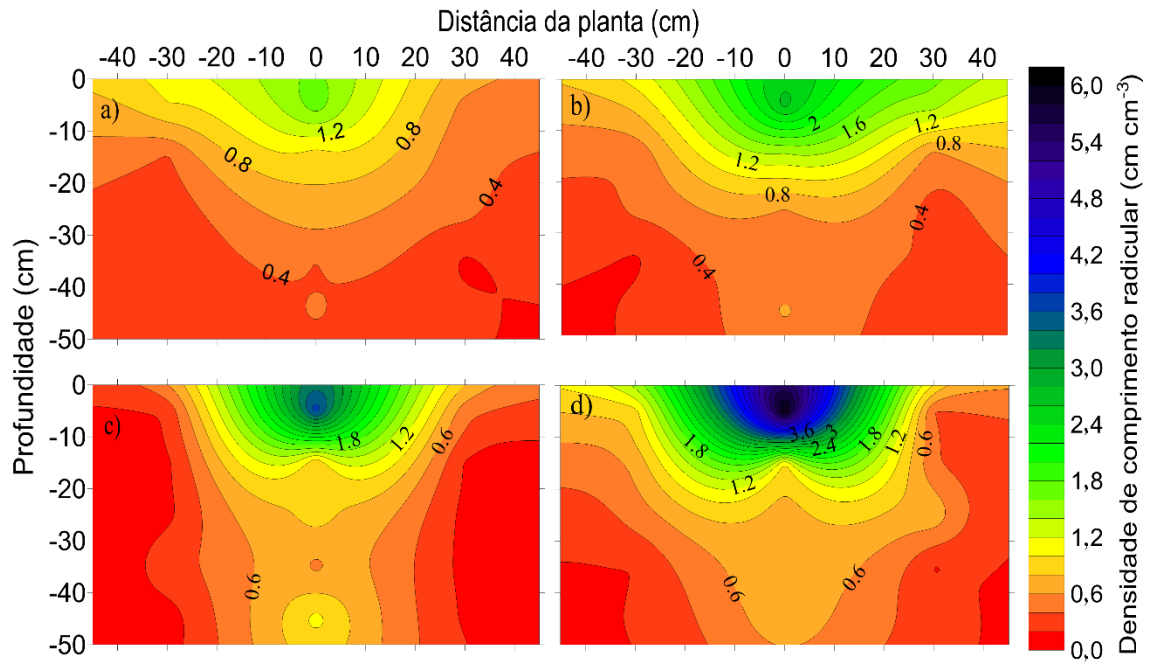


Figura 7.5. Densidade do comprimento radicular de milho (*Zea Mays*) no sistema de preparo reduzido (a), em sistema plantio direto (b), em sistema plantio direto trafegado com 4 passadas de trator (c) ou em sistema plantio direto trafegado com 8 passadas de colhedora (d) em um Latossolo Vermelho Distroférico.

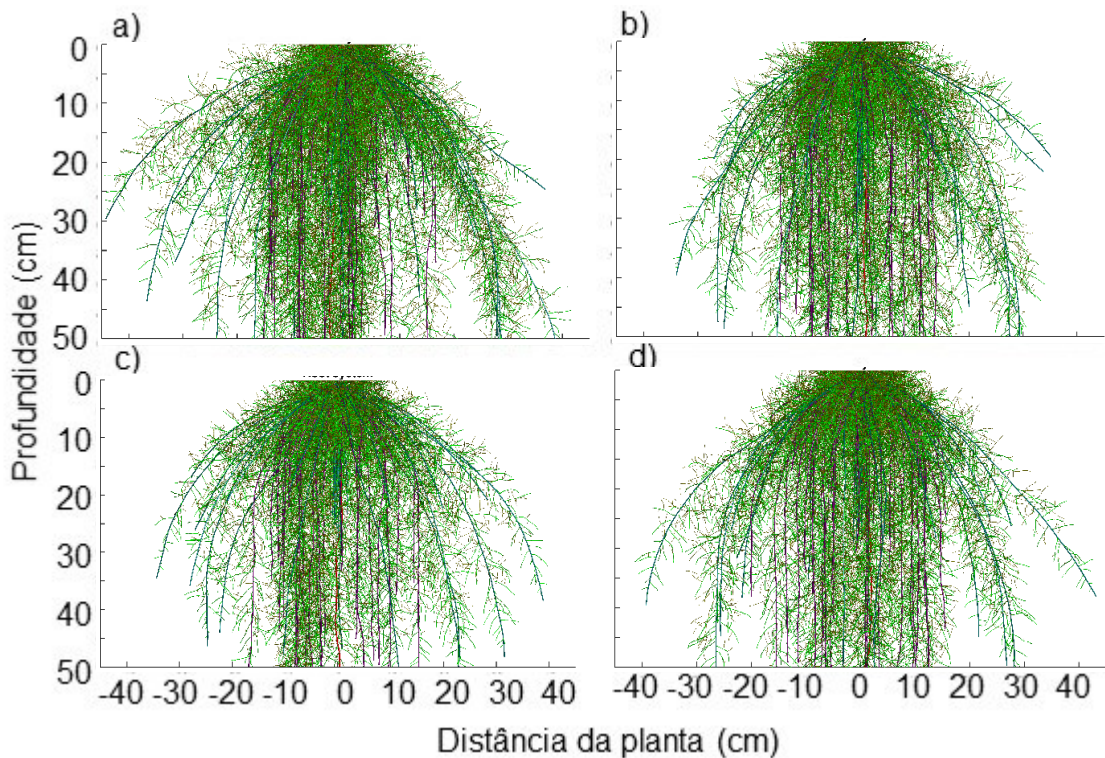


Figura 7.6. Sistema radicular de milho simulado e visualizado em 2D no sistema de preparo mínimo (a), sistema plantio direto (b), sistema plantio direto trafegado com 4 passadas de trator (c) ou em sistema plantio direto trafegado com 8 passadas de colhedora (d) em um Latossolo Vermelho Distroférico.

A densidade de comprimento radicular medida em campo foi simulada pela incorporação das limitações físicas no modelo de crescimento radicular (Figura 7.6). Dentre os níveis de compactação, somente no sistema de preparo reduzido houveram superestimativas da densidade de comprimento radicular em relação aos valores medidos no campo (Figura 7.7a). Nos demais níveis de compactação, os valores simulados e medidos foram similares. A relação entre valores de densidade do comprimento radicular medido e simulado (Figura 7.7e) indicam que os valores simulados concordaram com os valores observados no campo. O índice de Camargo (d) de 0,86, que avalia a concordância dos valores simulados e medidos, indicou que o modelo foi adequado para predizer o crescimento radicular de milho observado no campo.

A modelagem dos estresses para o alongamento radicular, e do crescimento radicular durante o ciclo de desenvolvimento do milho indicaram que houveram alterações nas condições físicas do solo durante o ciclo de cultivo nos níveis de compactação (Figura 7.8). A taxa de transpiração do milho, durante o período inicial de desenvolvimento, foi menor nas áreas com solo escarificado do que nos demais tratamentos (Figura 7.9). A profundidade do sistema radicular e a taxa de alongamento das raízes foram alteradas em função dos estresses hídricos e mecânico e das condições climáticas associadas ao fluxo de água no solo. O tempo necessário para que as raízes atingissem pelo menos 50 cm no perfil do solo foi alterada em função dos níveis de compactação do solo, e no sistema de preparo reduzido isso ocorreu em pelo menos 10 dias antes do que nas áreas em sistema plantio direto (Figura 7.8). Isso se deu como resultado da maior taxa de alongamento radicular em condições de menores limitações físicas do solo.

A taxa de alongamento radicular foi reduzida como resultado da combinação dos estresses por resistência do solo à penetração (Figura 7.10b) e pelo potencial matricial (Figura 7.10c), o qual incorpora os efeitos de excesso hídrico (anoxia ou hipoxia) ou deficiência hídrica. Assim, os valores globais de reduções do alongamento radicular (Figura 7.10a) devem ser interpretados como efeitos diários para cada raiz em cada posição no solo (Figura 7.8). A frequência e intensidade dos estresses para o alongamento radicular descrevem as condições físicas em que as raízes do milho foram submetidas durante todo o período de desenvolvimento da cultura. Os níveis de compactação do solo

proporcionaram alterações nas condições físicas de resistência do solo à penetração ou potencial matricial para o alongamento radicular. Na maior parte do período de desenvolvimento da cultura, o estresse causado pela resistência do solo à penetração (Figura 7.10b) foi o principal motivo da redução do crescimento radicular do milho. Em alguns períodos a redução do conteúdo de água no solo, proporcionou incrementos nos estresses hídricos, e isso causou reduções do parâmetro de estresse para o crescimento radicular.

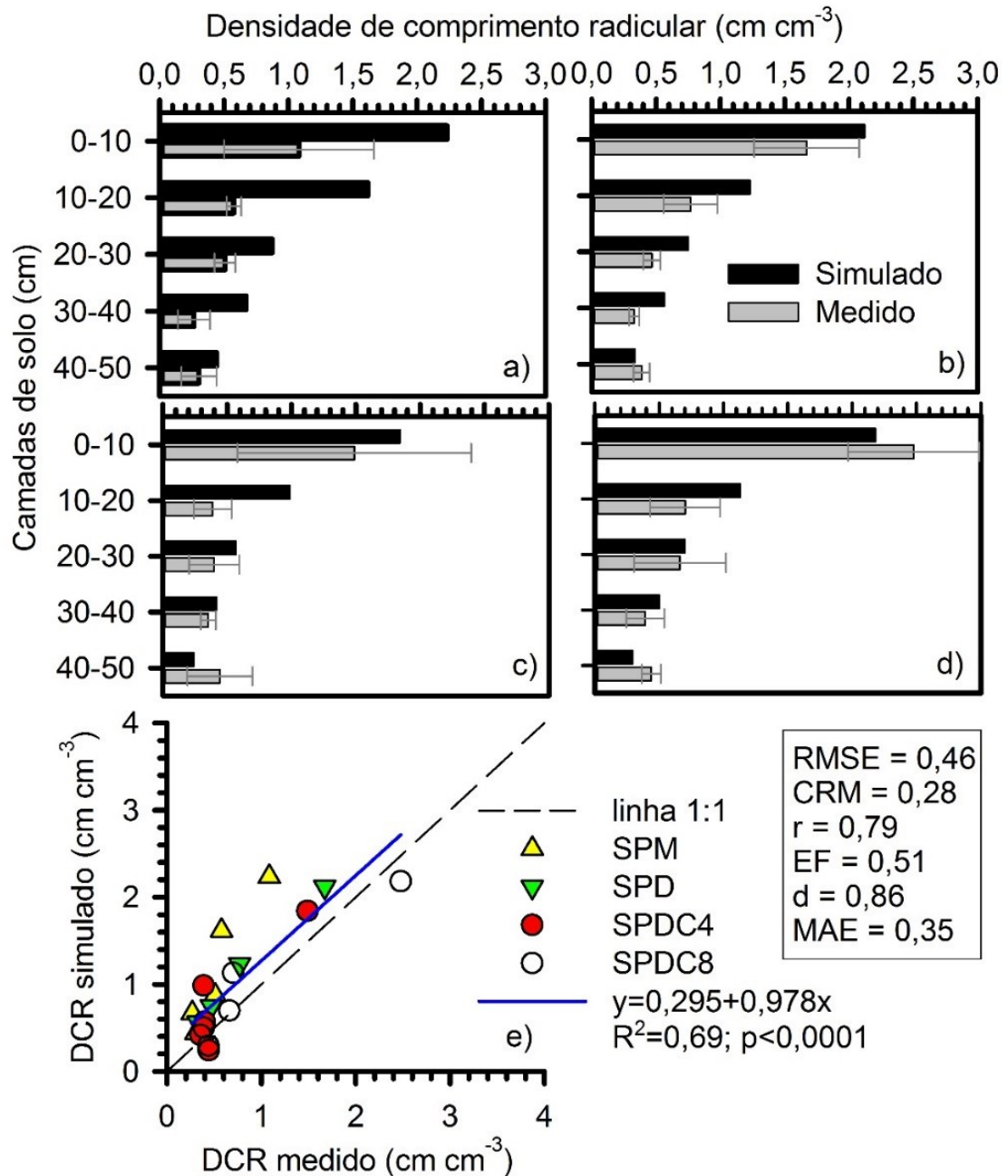


Figura 7.7. Densidade de comprimento radicular (DCR) de milho medidas no campo e simuladas em sistema de preparo mínimo (SPM) (a), sistema plantio direto (SPD) (b), sistema plantio direto compactado com 4 tráfegos de trator (SPDC4) (c) e sistema plantio direto compactado com 8 tráfegos de colhedora

(SPDC8) (d), e relações entre valores medidos e simulados (e) em um Latossolo Vermelho Distroférico.

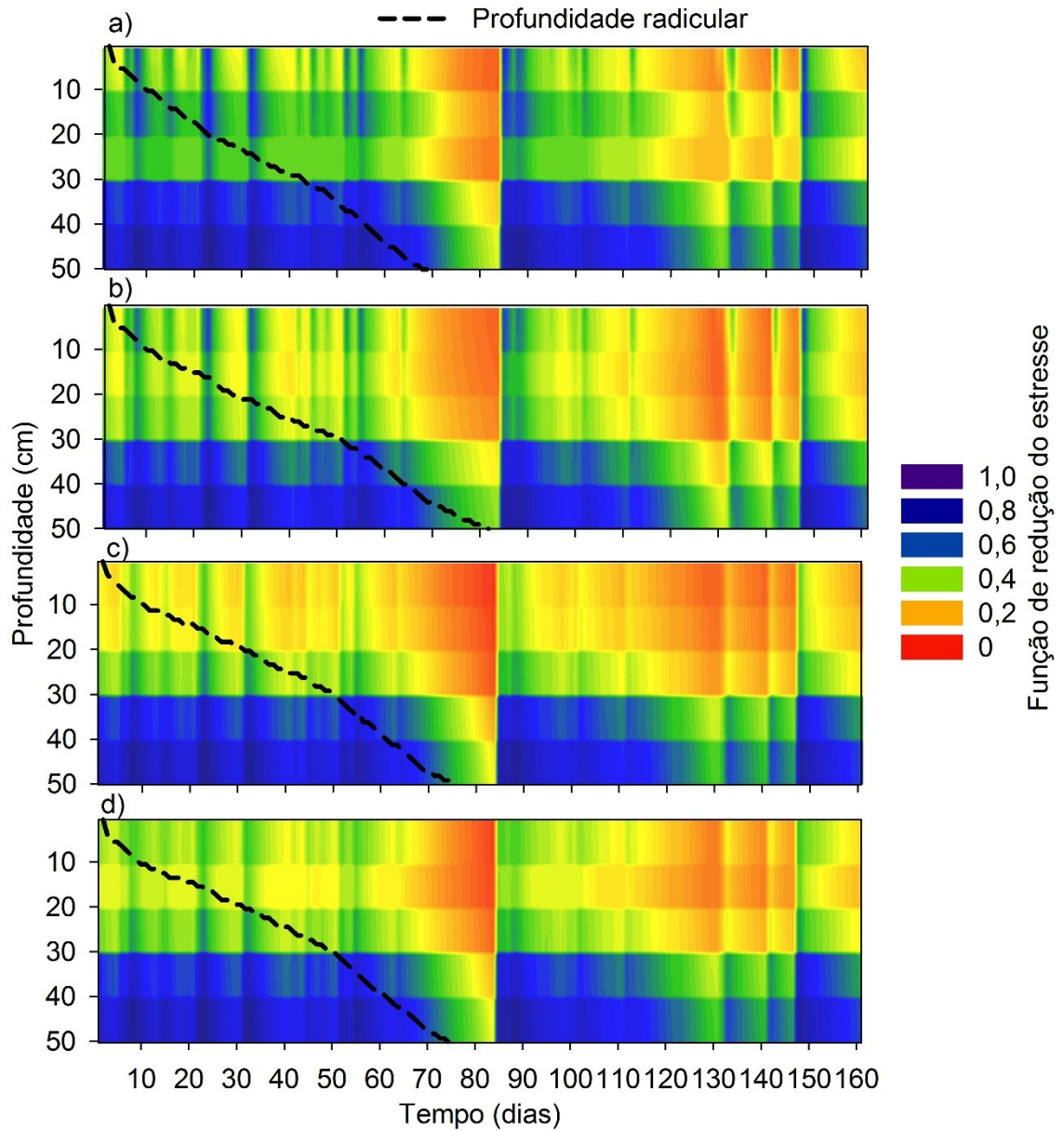


Figura 7.8. Função de redução do estresse para alongamento radicular, e profundidade do sistema radicular em sistema de preparo mínimo (a), sistema plantio direto (b), sistema plantio direto com 4 tráfegos de trator (c) e sistema plantio direto com 8 tráfegos de colhedora (d) em Latossolo Vermelho Distroférico.

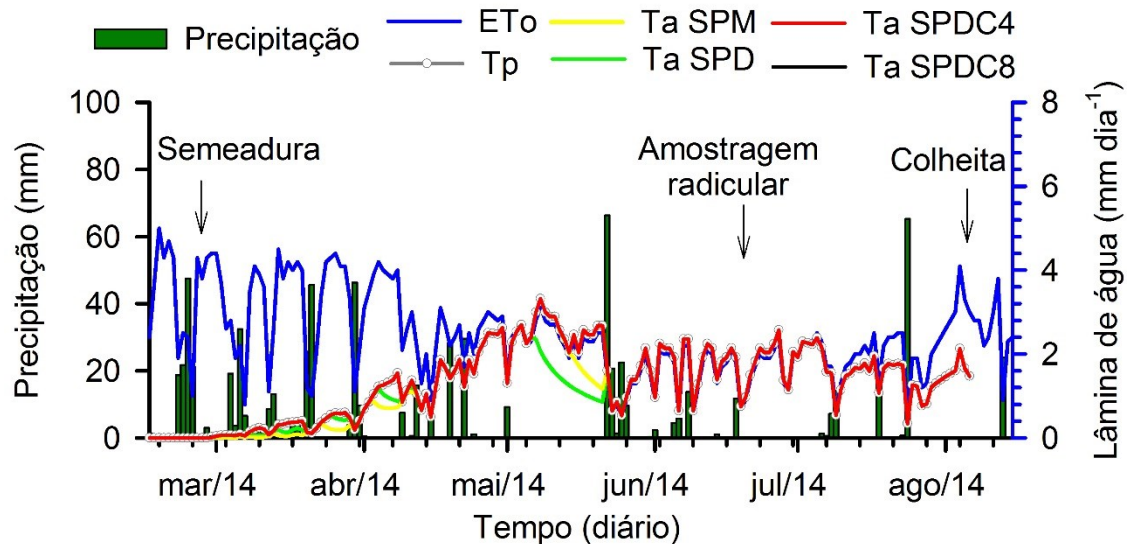


Figura 7.9. Dados climatológicos de precipitação, evapotranspiração potencial (ETo), transpiração potencial (Tp) e atual (Ta) em quatro níveis de compactação em Latossolo Vermelho Distroférico.

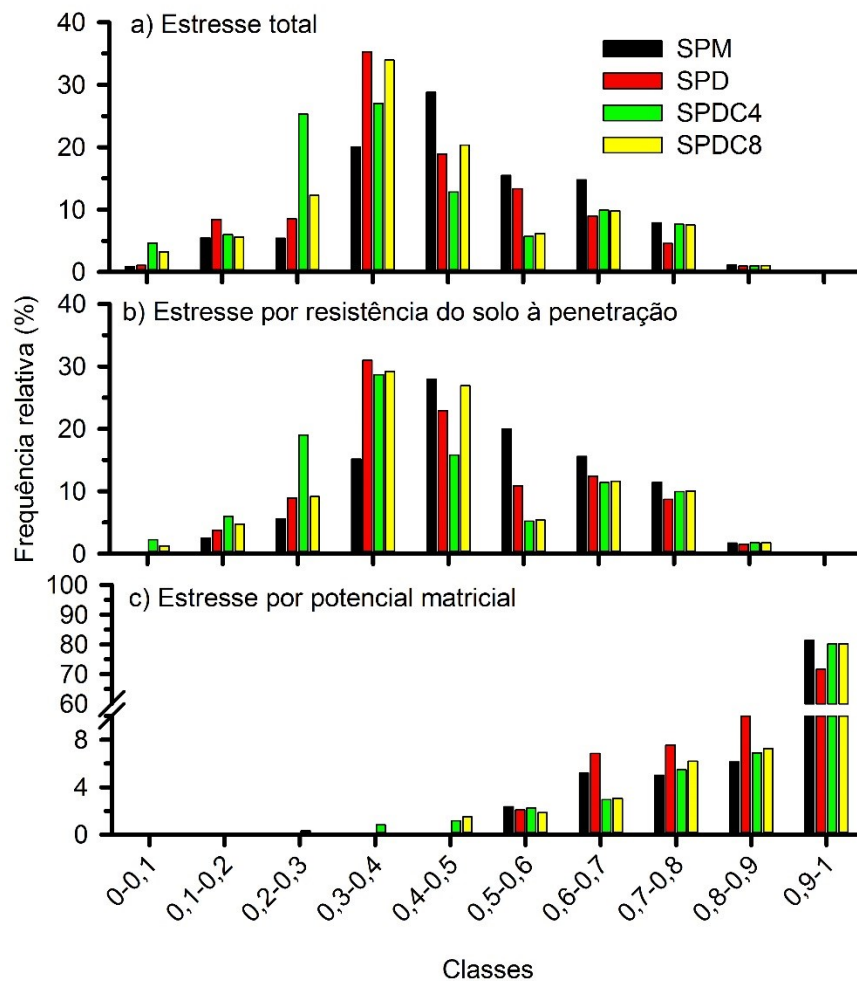


Figura 7.10. Frequência dos estresses totais (a) ou por resistência do solo à penetração (b) e potencial matricial (c) para o alongamento radicular durante o ciclo de desenvolvimento do milho em Latossolo Vermelho Distroférico.

*valores próximos a zero correspondem à ausência de crescimento, valores próximos a 1 significam máximos potenciais de crescimento radiculares. SPM: preparo reduzido com escarificação do solo; SPD: sistema plantio direto; SPDC4: SPD com 4 tráfegos com trator de 7,2 Mg; SPDC8: SPD com oito tráfegos de colhedora com massa total de 9,5 Mg.

7.5. Discussão

A inclusão dos estresses hídricos e mecânico para o alongamento radicular de milho foi incorporada com sucesso no modelo de crescimento radicular em 3D, RootBox (LEITNER et al., 2010c). A associação do modelo de crescimento radicular com o fluxo de água em 1D (VAN DAM; FEDDES, 2000) e a absorção de água pelas raízes em função do potencial de fluxo matricial (DE JONG VAN LIER et al., 2008), demonstram evolução no entendimento dos processos biofísicos nos solos. Nossa hipótese foi comprovada, sendo possível prever o crescimento radicular de milho em função das condições físicas dos solos (Figura 7.6). Este modelo também apresenta aplicabilidade em condições de avaliação da qualidade física dos solos para o crescimento radicular das culturas. No futuro este modelo poderá ser associado a outros modelos para prever o crescimento radicular em função de previsões climáticas e uso de estratégias agrícolas antecessoras às condições limitantes ao crescimento radicular das culturas agrícolas.

A compactação do solo, causada pelo tráfego de colhedora, causou reduções significativas na produtividade de grãos e de biomassa da parte aérea (Figura 7.3), entretanto, a escarificação do solo também reduziu estes parâmetros em relação ao sistema plantio direto (Figura 7.3). O tráfego agrícola proporcionou incrementos na quantidade de raízes no perfil do solo trafegado com colhedora, principalmente nas regiões próximas do sulco de semeadura (Figura 7.5). De forma geral, no perfil do solo houveram alterações na distribuição do sistema radicular, principalmente nos 30 cm próximos da linha de semeadura, em profundidade no perfil do solo. Os níveis de compactação do solo, incrementaram as limitações físicas ao crescimento radicular, indicados pela frequência dos estresses globais (Figura 7.10a) ou em função da resistência do solo à penetração (Figura 7.10b) ou potencial matricial de água no solo (Figura 7.10c). Os estresses hídricos e mecânico durante o ciclo de desenvolvimento foram alterados em função das condições meteorológicas de precipitação e evapotranspiração (Figura 7.9), sendo estes condicionadores das condições físicas para o alongamento radicular do milho (Figura 7.8).

Os níveis intermediários de densidade do solo, em sistema plantio direto, proporcionam as melhores condições físicas para o desempenho

produtivo na cultura do milho. A escarificação do solo pode ser tão prejudicial quando a compactação do solo, pois ambas reduzem a produtividade de grãos da cultura do milho.

As alterações na arquitetura do sistema radicular do milho, no perfil do solo, foram resultadas dos níveis de estresses que o sistema radicular foi submetido durante o ciclo de desenvolvimento. O incremento no comprimento radicular de raízes nos maiores níveis de compactação ocorreu associado à redução do diâmetro das raízes. O aumento da densidade de comprimento radicular, principalmente na camada de 0-10 cm (Figura 7.4) se deve principalmente ao confinamento das raízes no sulco de semeadura (Figura 7.5), onde haviam melhores condições físicas para o crescimento radicular. Este confinamento das raízes em função do incremento do nível de compactação proporcionou direcionamentos das raízes para as camadas subsuperficiais com maior facilidade, o que incrementou a quantidade de raízes em todo o perfil do solo nos 30 cm próximos à linha de semeadura.

A modelagem foi eficiente para prever o crescimento radicular do milho (Figura 7.6) visualizado em campo (Figura 7.5), sendo útil para observar os efeitos dos estresses hídricos e mecânico durante o período de cultivo. A cultura do milho por apresentar sistema radicular adventício característico de monocotiledôneas foi menos afetada pela compactação do solo do que sistemas radiculares com arquitetura de dicotiledôneas. Isso indica que gramíneas tem melhores condições de desenvolvimento em condições de solo compactado principalmente pelas raízes seminais adventícias que são emitidas nas coroas do colmo, acima da superfície do solo.

A modelagem do crescimento radicular em função os estresses hídricos e mecânico do solo ao alongamento radicular, por serem dinâmicas no tempo e espaço, podem ser úteis nas interpretações das alterações que o solo proporcionou nas plantas. Assim, principalmente em função da predição do crescimento radicular no perfil do solo, os quais, podem ser usados para o aprofundamento nos estudos de conectividade e continuidade de poros no solo (BENGOUGH, 2012b). Isso permite efetuar simulações do crescimento de diferentes sistemas radiculares no perfil do solo ao longo do tempo, e em estudos da continuidade de poros em áreas de sistema plantio direto. O sistema radicular da cultura do milho mostrou-se pouco afetado pela compactação do solo,

apresentando alta resiliência para contornar os problemas causados pelo tráfego agrícola neste Latossolo Vermelho.

A maior densidade de comprimento radicular foi observada próxima dos sulcos de semeadura no solo trafegado com colhedora (Figura 4d), sendo que foram observados valores de até 6 cm cm^{-3} de raízes de milho. Estes valores estão bem próximos das máximas densidades radiculares observadas na literatura, onde Bengough (2012b) descreve que estes valores podem chegar até 10 cm cm^{-3} em camadas superficiais mobilizadas, com baixos níveis de resistência do solo. A distribuição radicular do milho no perfil do solo é exponencial no perfil do solo, ou seja, há uma concentração maior de raízes na camada superficial (0-10 cm) e uma redução exponencial com o aumento da profundidade do solo (PAGÈS et al., 2004), podendo chegar a profundidades maiores do que 2 m (CANADELL et al., 1996).

As variações nos estresses hídricos e mecânico para o alongamento radicular ocorreram devido ao fluxo de água no solo, à precipitação, evaporação e absorção de água pelas raízes, por consequência da transpiração das plantas (Figura 7.9). Assim, as propriedades físicas que limitam o alongamento radicular (resistência do solo à penetração, aeração e conteúdo de água) são dinâmicas no tempo, e único caminho para observar as condições físicas dos solos é por meio da modelagem. O parâmetro de redução do estresse para o alongamento radicular (Figura 7.8) foi eficientemente incorporado neste modelo para o crescimento do sistema radicular da cultura do milho, o qual possibilitou predizer o sistema radicular em função das condições físicas do solo.

A absorção de água pelas raízes, e por consequência a transpiração (Figura 7.8) foi influenciada pelos níveis de compactação do solo. No solo escarificado, houveram maiores períodos de déficit hídrico nos períodos iniciais de desenvolvimento do milho, pois a transpiração das plantas foi inferior à transpiração potencial naqueles períodos. A quantidade de água absorvida pelo sistema radicular, neste modelo é determinada pelo potencial de fluxo matricial do solo (DE JONG VAN LIER et al., 2008), a qual é uma função da densidade de comprimento radicular, diâmetro das raízes, e da integral da condutividade hidráulica não saturada do solo.

As características de transporte de água no solo não saturado são alteradas em função dos níveis de compactação do solo. No solo escarificado,

em função do aumento da frequência dos macroporos e redução do contato entre as partículas (Figura 7.2), a condutividade hidráulica não saturada é reduzida (GHANBARIAN-ALAVIJEH; HUNT, 2012). Como resultado da alteração da estrutura do solo pela escarificação (MORAES et al., 2016b) as raízes das culturas ficam mais suscetíveis a períodos com estresse hídricos, aumentando a frequência dos dias com maiores reduções do alongamento radicular em função do potencial matricial de água no solo (Figura 7.10). Como resultado ocorrem as reduções da quantidade de biomassa da parte aérea (Figura 7.3a), reduções de produtividade de grãos (Figura 7.3b) e redução na densidade de comprimento radicular (Figura 7.4a, Figura 7.5a) em relação ao solo em sistema plantio direto.

7.6. Conclusões

A modelagem do crescimento radicular de milho foi eficientemente realizada pela incorporação de limitações físicas do solo para o alongamento radicular, e pode ser usada para estudos do crescimento radicular associados a modelos de fluxo de água nos solos. O sistema plantio direto proporcionou as melhores condições físicas do solo para as máximas produtividades de grãos de milho, e esta foi reduzida em função da escarificação do solo e ou pelo excessivo nível de compactação causado pelo tráfego de colhedora. O sistema radicular da cultura do milho apresenta potencial de incrementos da densidade de comprimento radicular em função do aumento do nível de compactação do solo.

8 CONCLUSÕES GERAIS

O acoplamento das condições físicas dos solos para o crescimento radicular por um parâmetro de redução do estresse ao alongamento radicular foi apresentado para a modelagem do crescimento radicular. Assim, a absorção de água e fluxo de água no solo foi realizado usando as características físico hídricas do solo juntamente a parâmetros de arquitetura radicular das culturas. Este modelo utiliza um parâmetro de redução do estresse para o alongamento radicular acoplado com o processo absorção macroscópica de água pelas raízes definida pelo potencial de fluxo matricial do solo, e pode ser usado para estudos dos efeitos de manejos do solo ou de condições hídricas para o crescimento radicular das culturas.

No capítulo 1, o parâmetro de redução do estresse físico dos solos ao alongamento radicular foi implementado no programa RootBox em linguagem de programação MatLab®, e a performance deste modelo foi avaliada por meio de comparações entre valores simulados e medidos em campo de conteúdo de água do solo, resistência do solo à penetração e da densidade de comprimento radicular de soja. As condições físicas do solo incluídas no modelo por meio do parâmetro de redução do estresse no programa RootBox demonstraram sucesso na implementação e avanços no entendimento das interações solo-raízes. Este parâmetro de redução do estresse ao alongamento radicular deve ser testado e validado para outras culturas e condições de solos por meio de experimentos de campo.

No capítulo 2, o modelo de crescimento radicular foi utilizado para prever o desenvolvimento do sistema radicular da cultura da soja cultivada em diferentes níveis de compactação do solo. Este simples parâmetro de redução do estresse físico do solo ao crescimento radicular foi acoplado para os

diferentes níveis de compactação em um Latossolo Vermelho, e os resultados da modelagem demonstraram que os valores de densidade de comprimento radicular simulados concordaram com os valores medidos em condições de campo.

O crescimento radicular de soja em função das condições físicas de impedância mecânica, hipoxia e disponibilidade hídrica foi simulado com sucesso em diferentes níveis de compactação do solo. Este modelo proporciona melhoria no entendimento de como a estrutura do solo afeta o crescimento radicular das culturas em condições de campo e apresenta contribuição ao avanço do conhecimento dos processos físicos e às pesquisas de interações solo-raízes.

As restrições físicas impostas pela resistência do solo ao alongamento radicular tiveram maiores efeitos nas interações solo-raízes para o crescimento radicular em solos compactados. Em solos escarificados, os estresses ao alongamento radicular proporcionado pelo potencial matricial contribuem para incrementar as limitações físicas dos solos ao crescimento radicular. A produtividade de grão de soja foi reduzida em baixos (solo escarificado) e altos níveis de compactação do solo (tráfego de colhedora) em relação ao sistema plantio direto.

No capítulo 3, a modelagem do crescimento radicular foi realizada para a cultura do milho e a densidade de comprimento radicular foi eficientemente simulada pela incorporação dos estresses hídrico e mecânico ao alongamento radicular. Este modelo pode ser usado para a cultura do milho em estudos do crescimento radicular associados a modelos de fluxo de água nos solos. O sistema plantio direto proporcionou as melhores condições físicas do solo para as máximas produtividades de grãos de milho, e esta foi reduzida em função da escarificação do solo e ou pelo excessivo nível de compactação causado pelo tráfego de colheitadeira. O sistema radicular da cultura do milho apresenta potencial de incrementos da densidade de comprimento radicular em função do aumento do nível de compactação do solo.

9 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este modelo de crescimento radicular, aqui apresentado, o qual relaciona as limitações físicas dos solos (resistência mecânica, aeração e disponibilidade hídrica) para o alongamento radicular associados com a dinâmica da água no solo e a absorção de água pelas raízes em função do potencial de fluxo matricial, apresenta grandes avanços no entendimento dos processos do sistema solo-raízes-plantas-atmosfera. Entretanto, avanços no modelo ainda são necessários, principalmente a disponibilização de uma interface “amigável” semelhante a outros programas de fluxo de água no solo, e ou até do tipo do programa original RootBox, o qual descrevia apenas o crescimento radicular sem considerar as condições físicas dos solos e de fluxo de água.

Aprimoramentos nos parâmetros relacionados com a arquitetura radicular para outras culturas agrícolas são necessários. Bem como medições e modelagens com validações dos parâmetros de redução do estresse ao alongamento radicular para outros tipos de solo manejo e de clima. Somente com muito empenho e visão sistêmica dos processos envolvidos nas relações solo-raízes será possível avançar no conhecimento, assim o entendimento dos mecanismos envolvidos nos processos de limitações físicas dos solos para o crescimento radicular é de fundamental importância para o entendimento dos efeitos das condições físicas dos sistemas de preparo, manejo e de cultivos na melhoria da qualidade física dos solos.

Devemos sempre lembrar que o manejo e a conservação do solo e da água são de fundamentais importâncias para o avanço econômico de qualquer nação.

10 REFERÊNCIAS CITADAS E CONSULTADAS

ADDISCOTT, T. M.; WHITMORE, A. P. Computer simulation of changes in soil mineral nitrogen and crop nitrogen during autumn, winter and spring. **The Journal of Agricultural Science**, Cambridge, v. 109, n. 1, p. 141, 1987.

ALBURQUERQUE, M. A. et al. Carbon and nitrogen in a Ferralsol under zero-tillage rotations based on cover, cash or hay crops. **Soil Use and Management**, Lismore, v. 31, n. 1, p. 1–9, 2015.

ALLEN, R. G. et al. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop requirements. **Irrigation and Drainage Paper No. 56 FAO**, Rome n. 56, p. 300, 1998.

BALIGAR, V. C. et al. Soybean Root Anatomy as Influenced by Soil Bulk Density. **Agronomy Journal**, Madison, v. 67, n. 6, p. 842–844, 1975.

BAYER, C. et al. Organic matter storage in a sandy clay loam Acrisol affected by tillage and cropping systems in southern Brazil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 54, n. 1–2, p. 101–109, 2000.

BENGOUGH, A. G. Modelling Rooting Depth and Soil Strength in a Drying Soil Profile. **Journal of Theoretical Biology**, Amsterdam, v. 186, n. 3, p. 327–338, 1997.

BENGOUGH, A. G. Root responses to soil physical conditions; growth dynamics from field to cell. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 57, n. 2, p. 437–447, 2006.

BENGOUGH, A. G. et al. Root elongation, water stress, and mechanical impedance: A review of limiting stresses and beneficial root tip traits. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 62, n. 1, p. 59–68, 2011.

BENGOUGH, A. G. Root elongation is restricted by axial but not by radial pressures: So what happens in field soil? **Plant and Soil**, The Hague, v. 360, n. 1–2, p. 15–18, 2012a.

BENGOUGH, A. G.; MULLINS, C. E. Penetrometer resistance, root penetration resistance and root elongation rate in two sandy loam soils. **Plant and Soil**, The Hague, v. 131, n. 1, p. 59–66, 1991.

BENGOUGH, A. G. Water Dynamics of the Root Zone: Rhizosphere Biophysics and Its Control on Soil Hydrology. **Vadose Zone Journal**, Madison, v. 11, n. 2, p. 0, 2012b.

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

BLAINSKI, É. et al. Quantificação da degradação física do solo por meio da curva de resistência do solo à penetração. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 3, p. 975–983, 2008.

BODNER, G. et al. A statistical approach to root system classification. **Frontiers in Plant Science**, Lausanne, v. 4, n. 292, p. 1–16, 2013.

BÖHM, W. **Methods of Studying Root Systems**. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 1979. 190 p.

BONFANTE, A. et al. SWAP, CropSyst and MACRO comparison in two contrasting soils cropped with maize in Northern Italy. **Agricultural Water Management**, Amsterdam v. 97, n. 7, p. 1051–1062, 2010.

BUSSCHER, W. J. Adjustment of flat-tipped penetration resistance data to a common water content.pdf. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 33, n. 2, p. 519–524, 1990.

CALONEGO, J. C.; ROSOLEM, C. A. Soybean root growth and yield in rotation with cover crops under chiseling and no-till. **European Journal of Agronomy**, Amsterdam, v. 33, n. 3, p. 242–249, 2010.

CAMARA, R. K.; KLEIN, V. A. Propriedades físico-hídricas do solo sob plantio direto escarificado e rendimento da soja. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 35, n. 4, p. 813–819, 2005a.

CAMARA, R. K.; KLEIN, V. A. Escarificação em plantio direto como técnica de conservação do solo e da água. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, n. 5, p. 789–796, 2005b.

CANADELL, J. et al. Maximum rooting depth of vegetation types at the global scale. **Oecologia**, Berlin, v. 108, n. 4, p. 583–595, 1996.

CASAROLI, D.; DE JONG VAN LIER, Q.; DOURADO NETO, D. Validation of a root water uptake model to estimate transpiration constraints. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 97, n. 9, p. 1382–1388, 2010.

CAVALIERI, K. M. V. et al. Long-term effects of no-tillage on dynamic soil physical properties in a Rhodic Ferrasol in Paraná, Brazil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 103, n. 1, p. 158–164, 2009.

CELIA, M. A.; BOULOUTAS, E. T. A general Mass-Conservative Numerical solution for Unsaturated flow equation. **Water Resources Research**, Hoboken, v. 26, n. 7, p. 1483–1496, 1990.

CHEN, G.; WEIL, R. R. Root growth and yield of maize as affected by soil compaction and cover crops. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 117, p. 17–27, dez. 2011.

CONCEIÇÃO, P. C.; DIECKOW, J.; BAYER, C. Combined role of no-tillage and cropping systems in soil carbon stocks and stabilization. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 129, n. 5, p. 40–47, 2013.

CONTE, O. et al. Demanda de tração, mobilização de solo na linha de semeadura e rendimento da soja, em plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Rio de Janeiro, v. 44, n. 10, p. 1254–1261, 2009a.

CONTE, O. et al. Rendimento do milho em diferentes condições físicas de solo e quantidade de resíduo na ausência ou na presença de irrigação. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 39, n. 4, p. 1069–1076, 2009b.

CONTE, O. et al. Soil disturbance index as an indicator of seed drill efficiency in no-tillage agrosystems. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 114, n. 1, p. 37–42, jul. 2011.

COSTA, C. G. et al. Xilema. In: APPEZZATTO-DA-GLÓRIA, B.; CARMELLO-GUERREIRO, S. M. (Ed.). **Anatomia Vegetal**. 3. ed. Viçosa: Editora UFV, 2013. p. 123–133.

DE JONG VAN LIER, Q. et al. Macroscopic Root Water Uptake Distribution Using a Matric Flux Potential Approach. **Vadose Zone Journal**, Madison, v. 7, n. 3, p. 1065–1078, 2008.

DE JONG VAN LIER, Q. et al. Modeling Water Potentials and Flows in the Soil–Plant System Comparing Hydraulic Resistances and Transpiration Reduction Functions. **Vadose Zone Journal**, Madison, v. 12, n. 3, p. 1–20, 2013.

DE JONG VAN LIER, Q. DE J.; GUBIANI, P. I. Beyond the “least limiting water range”: rethinking soil physics research in Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 39, n. 4, p. 925–939, 2015.

DEBIASI, H. et al. Produtividade de soja e milho após coberturas de inverno e descompactação mecânica do solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Rio de Janeiro, v. 45, n. 6, p. 603–612, 2010.

DENARDIN, J. E. et al. **Diretrizes do sistema plantio direto no contexto da agricultura conservacionista**. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2012.

DENARDIN, J. E. **Práticas conservacionista complementares em sistema plantio direto**. In: ENCONTRO NACIONAL DE PLANTIO DIRETO NA PALHA, 14., 2014 [S.l.]. **Anais...** [S.l.: s.n], 2014. Disponível em: <http://febrapdp.org.br/14enpdp/arquivos14/13-08_Aditorio_Guaicurus_Praticas_Conservacionistas_complementares_em_SPD_Jose_Eloir_Denardin.pdf>. Acesso em: 01 de dezembro de 2016.

DUNBABIN, V. M. et al. Modelling root-soil interactions using three-dimensional models of root growth, architecture and function. **Plant and Soil**, The Hague, v. 372, n. 1–2, p. 93–124, 2013.

DUPUY, L.; GREGORY, P. J.; BENGOUGH, A. G. Root growth models: Towards a new generation of continuous approaches. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 61, n. 8, p. 2131–2143, 2010.

FEBRAPDP. **Área do sistema plantio direto**. Disponível em: <<http://www.febrapdp.org.br>>. Acesso em: 28 dez. 2016.

FEDDES, R. A.; KOWALIK, P. J.; ZARADNY, H. **Simulation of field water use and crop yield**, Wageningen, Netherlands: Pudoc, 1978.

FRANCHINI, J. C. et al. **Manejo do solo para redução das perdas de produtividade pela seca**. Londrina: Embrapa Soja, 2009. p. 39. (Documentos, 314).

FRANCHINI, J. C. et al. **Importância da rotação de culturas para a produção agrícola sustentável no Paraná**. Londrina: Embrapa Soja, 2011. p. 52. (Documentos, 327).

FRANCHINI, J. C. et al. Evolution of crop yields in different tillage and cropping systems over two decades in southern Brazil. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 137, p. 178–185, 2012.

FRANCHINI, J. C. et al. Root growth of soybean cultivars under different water availability conditions. *Semina*. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 38, p. in press, 2017.

GHANBARIAN-ALAVIJEH, B.; HUNT, A. G. Unsaturated hydraulic conductivity in porous media: Percolation theory. **Geoderma**, Amsterdam, v. 187–188, p. 77–84, 2012.

GREENWOOD, D. J.; NEETESON, J. J.; DRAYCOTT, A. Response of potatoes to N fertilizer: Dynamic model. **Plant and Soil**, The Hague, v. 85, n. 2, p. 185–203, 1985.

GREGORY, P. J. **Plant Roots Growth Activity and Interaction with Soils**. Oxford, UK: Blackwell Publishing Ltd, 2006.

GUBIANI, P. I. **Regularidade de resposta da cultura do milho à compactação do solo**. Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria, 2012.

GUBIANI, P. I.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J. Indicadores hídrico-mecânicos de compactação do solo e crescimento de plantas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 37, n. 1, p. 1–10, 2013.

GUEDES FILHO, O.; BLANCO-CANQUI, H.; SILVA, A. P. Least limiting water range of the soil seedbed for long-term tillage and cropping systems in the central Great Plains, USA. **Geoderma**, Amsterdam, v. 207–208, p. 99–110, 2013.

HARTMANN, A.; ŠIMŮNEK, J. **Hydrus: Root Growth module**. Version 1. ed. Riverside, California, USA: Department of Environmental Sciences, University of California Riverside, 2016.

HILLEL, D. **Introduction to environmental soil physics**. Amsterdam: Elsevier

Academic Press, 2004.

IBGE. **Levantamento sistemático da produção agrícola**: Pesquisa mensal de previsão e acompanhamento das safras agrícolas no ano civil. 29. ed. Rio de Janeiro: IBGE, 2015.

JAVAUX, M. et al. Use of a Three-Dimensional Detailed Modeling Approach for Predicting Root Water Uptake. **Vadose Zone Journal**, Madison, v. 7, n. 3, p. 1079–1088, 2008.

JAVAUX, M. et al. Root Water Uptake: From Three-Dimensional Biophysical Processes to Macroscopic Modeling Approaches. **Vadose Zone Journal**, Madison, v. 12, n. 4, p. 1–14, 2013.

JHA, P. et al. Soil and residue carbon mineralization as affected by soil aggregate size. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 121, p. 57–62, 2012.

JIN, K. et al. How do roots elongate in a structured soil? **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 64, n. 15, p. 4761–4777, 2013.

JONG VAN LIER, Q. DE. Oxigenação do sistema radicular: uma abordagem física. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25, n. 1, p. 233–238, 2001.

JORGE, L. A. C.; SILVA, D. J. C. B. **Safira: Manual de utilização**. São Carlos, SP: Embrapa Instrumentação Agropecuária, 2010.

KELLER, T. et al. Transmission of vertical soil stress under agricultural tyres: Comparing measurements with simulations. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 140, p. 106–117, 2014.

KELLER, T. et al. SoilFlex-LLWR: Linking a soil compaction model with the least limiting water range concept. **Soil Use and Management**, Wallingford, v. 31, n. 2, p. 321–329, 2015.

KLEIN, V. A.; CAMARA, R. K. Rendimento da soja e intervalo hídrico ótimo em latossolo vermelho sob plantio direto escarificado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, n. 2, p. 221–227, 2007.

KOLB, E.; HARTMANN, C.; GENET, P. Radial force development during root growth measured by photoelasticity. **Plant and Soil**, The Hague, v. 360, n. 1–2, p. 19–35, 2012.

KONRAD, M. L. Transporte de nutrientes em plantas. In: BIZERRIL, M. X. A. (Coord.), (Ed.). **Processos biológicos na captação e na transformação da matéria e energia**: Módulo II. Brasília: Universidade de Brasília, 2006. p. 357–383.

KROES, J. G. et al. **SWAP version 3.2**. Theory description and user manual. Wageningen, Netherlands: Alterra, 2008.

KUNCORO, P. H. et al. A study on the effect of compaction on transport properties of soil gas and water. II: Soil pore structure indices. **Soil and Tillage**

Research, Amsterdam, v. 143, p. 180–187, 2014.

LEITNER, D. et al. The algorithmic beauty of plant roots - an L- system model for dynamic root growth simulation Mathematical and Computer Modelling of Dynamical Systems. **Mathematical and Computer Modelling of Dynamical Systems**, Lisse, v. 16, n. 6, p. 575–587, 2010a.

LEITNER, D. et al. A dynamic model of nutrient uptake by root hairs. **New Phytologist**, London, v. 185, p. 792–802, 2010b.

LEITNER, D. et al. A dynamic root system growth model based on L-Systems. **Plant and Soil**, The Hague, v. 332, n. 1–2, p. 177–192, 2010c.

LEITNER, D. et al. Impact of contrasted maize root traits at flowering on water stress tolerance – A simulation study. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 165, p. 125–137, 2014.

LETEY, J. Relationship between soil physical properties and crop production. **Advances in Soil Science**, New York, v. 1, p. 277–294, 1985.

LEVIEN, R. et al. Semeadura direta de milho com dois tipos de sulcadores de adubo, em nível e no sentido do declive do terreno. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 41, n. 6, p. 1003–1010, 2011.

LINDSTROM, M. J.; VOORHEES, W. B. Responses of Temperate Crops in North America to Soil Compaction. In: SOANE, B. D.; OUWERKERK, C. VAN (Ed.). **Soil Compaction in Crop Production**. Second imp. ed. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier, 1994. p. 265–286.

LIPIEC, J. et al. Effects of soil compaction on root elongation and anatomy of different cereal plant species. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 121, p. 74–81, 2012.

LIPIEC, J.; ARVIDSSON, J.; MURER, E. Review of modelling crop growth , movement of water and chemicals in relation to topsoil and subsoil compaction. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 73, n. 1–2, p. 15–29, 2003.

LUNGLEY, D. R. The growth of root systems - A numerical computer simulation model. **Plant and Soil**, The Hague, v. 38, n. 1, p. 145–159, 1973.

MACHADO, S. R.; CARMELLO-GUERREIRO, S. M. Floema. In: APPEZZATO-DA-GLÓRIA, B.; CARMELLO-GUERREIRO, S. M. (Ed.). **Anatomia Vegetal**. 3. ed. Viçosa: Editora UFV, 2013. p. 147–153.

MELERO, S. et al. Implementation of chiselling and mouldboard ploughing in soil after 8 years of no-till management in SW, Spain: Effect on soil quality. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 112, n. 2, p. 107–113, 2011.

MERTEN, G. H. et al. No-till surface runoff and soil losses in southern Brazil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 152, p. 85–93, 2015.

MORAES, M. T. DE et al. Correction of resistance to penetration by pedofunctions and a reference soil water content. **Revista Brasileira de Ciência**

do Solo, Viçosa, v. 36, n. 6, p. 1704–1713, 2012.

MORAES, M. T. DE et al. Soil penetration resistance in a rhodic eutrudox affected by machinery traffic and soil water content. **Engenharia Agrícola**, Botucatu, v. 33, n. 4, p. 748–757, 2013.

MORAES, M. T. DE et al. Critical limits of soil penetration resistance in a rhodic Eutrudox. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 38, n. 1, p. 288–298, 2014.

MORAES, M. T. DE et al. SPD e a disponibilidade hídrica em solos argilosos. **Granja**, Porto Alegre, v. 791, n. 11, p. 58–59, 2015.

MORAES, M. T. DE et al. Benefícios das plantas de cobertura sobre as propriedades físicas do solo. In: TIECHER, T. (Ed.). **Manejo e conservação do solo e da água em pequenas propriedades rurais no sul do Brasil: práticas alternativas de manejo visando a conservação do solo e da água**. Porto Alegre: UFRGS, 2016a. p. 34–48.

MORAES, M. T. DE et al. Soil physical quality on tillage and cropping systems after two decades in the subtropical region of Brazil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 155, n. 1, p. 351–362, 2016b.

MUALEM, Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. **Water Resources Research**, Hoboken, v. 12, n. 3, p. 513–522, 1976.

NOSALEWICZ, A.; LIPIEC, J. The effect of compacted soil layers on vertical root distribution and water uptake by wheat. **Plant and Soil**, The Hague, v. 375, n. 1–2, p. 229–240, 2014.

NUNES, M. R. et al. Mitigation of clayey soil compaction managed under no-tillage. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 148, p. 119–126, 2015a.

NUNES, M. R. et al. Effect of soil chiseling on soil structure and root growth for a clayey soil under no-tillage. **Geoderma**, Amsterdam, v. 259–260, p. 149–155, 2015b.

O’SULLIVAN, M. F.; HENSHALL, J. K.; DICKSON, J. W. A simplified method for estimating soil compaction. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 49, n. 4, p. 325–335, 1999.

ORTIGARA, C. et al. Modeling of Soil Load-Bearing Capacity As a Function of Soil Mechanical Resistance To Penetration. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 39, n. 4, p. 1036–1047, 2015.

PAGÈS, L. et al. Root Typ: a generic model to depict and analyse the root system architecture. **Plant and Soil**, The Hague, v. 258, n. 1, p. 103–119, 2004.

PAGÈS, L.; JORDAN, M. O.; PICARD, D. A simulation model of the three-dimensional architecture of the maize root system. **Plant and Soil**, The Hague, v. 119, p. 147–154, 1989.

POTTERS, G. et al. Different stresses, similar morphogenic responses: Integrating a plethora of pathways. **Plant, Cell and Environment**, Oxford, v. 32, n. 2, p. 158–169, 2009.

PREVEDELLO, C. L.; ARMINDO, R. A. **Física do Solo com Problemas Resolvidos**. 2. ed. Curitiba: UFPR, 2015.

PRUSINKIEWICZ, P.; LINDENMAYER, A. **The Algorithmic beauty of plants**. New York: Springer-Verlag, 1990. 228 p.

QUEIROZ-VOLTAN, R. B.; NOGUEIRA, S. D. S. S.; MIRANDA, M. A. C. Aspectos Da Estrutura Da Raiz E Do Desenvolvimento De Plantas De Soja Em Solos Compactados. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Rio de Janeiro, v. 35, n. 5, p. 929–938, 2000.

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

RICKMAN, R. W.; LETEY, J.; STOLZY, L. H. Plant Responses to Oxygen Supply and Physical Resistance in the Root Environment. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 30, n. 3, p. 304–307, 1966.

SAGLIO, P. H. et al. Critical Oxygen Pressure for Growth and Respiration of Excised and Intact Roots. **Plant Physiology**, Rockville, v. 76, n. 1, p. 151–154, 1984.

SANTOS, H. G. et al. **Sistema brasileiro de classificação de Solos**. 3. ed. Brasília: Embrapa, 2013.

ŠARAUSKIS, E. et al. Energy balance, costs and CO₂ analysis of tillage technologies in maize cultivation. **Energy**, Oxford, v. 69, p. 227–235, 2014.

SAS, I. I. **SAS Enterprise Guide**. NC, USA: SAS Institute Inc., 2013.

SCHMIDT, S. et al. Root elongation rate is correlated with the length of the bare root apex of maize and lupin roots despite contrasting responses of root growth to compact and dry soils. **Plant and Soil**, The Hague, v. 372, n. 1–2, p. 609–618, 26 nov. 2013.

SCHNEPF, A. et al. L-System model for the growth of arbuscular mycorrhizal fungi, both within and outside of their host roots. **Journal of The Royal Society Interface**, London, v. 13, n. 117, p. 1-11, 2016.

SCHNEPF, A.; LEITNER, D.; LEPSCH, S. Modeling Phosphorus Uptake by a Growing and Exuding Root System. **Vadose Zone Journal**, Madison, v. 11, n. 3, 2012.

SILVA, A. P. DA et al. Soil structure and its influence on microbial biomass in different soil and crop management systems. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 142, p. 42–53, 2014.

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

SILVA, A. P. DA; KAY, B. D.; PERFECT, E. Characterization of the Least Limiting Water Range of Soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 58, n. 6, p. 1775, 1994.

SILVA, M. A. S. DA et al. Atributos físicos do solo relacionados ao armazenamento de água em um Argissolo Vermelho sob diferentes sistemas de preparo 1 Soil physics properties related to water storage and tillage systems in a Loamy Acrisol. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 35, n. 3, p. 544–552, 2005.

SILVA, V. R. DA et al. Soil water dynamics related to the degree of compaction of two brazilian oxisols under no-tillage. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, n. 5, p. 1097–1104, 2009.

SUZUKI, L. E. A. S.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J. Degree of compactness, soil physical properties and yield of soybean in six soils under no-tillage. **Soil Research**, Amsterdam, v. 51, n. 4, p. 311, 2013.

TAYLOR, H. M.; ROBERSON, G. M.; PARKER, J. J. Soil strength-root penetration relations for medium- to coarse-textured soil materials. **Soil Science**, Baltimore, v. 102, n. 1, p. 18–22, 1966.

TORMENA, C. A. **Atributos físicos e qualidade física do solo que afetam a produtividade da cultura do milho safrinha**. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE MILHO SAFRINHA, 10., 2009, Rio Verde. **Anais...** Rio Verde: ABMS, 2009

TROLDBORG, M. et al. Application of Bayesian Belief Networks to quantify and map areas at risk to soil threats: Using soil compaction as an example. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 132, p. 56–68, 2013.

TRON, S. et al. Can diversity in root architecture explain plant water use efficiency? A modeling study. **Ecological Modelling**, Amsterdam, v. 312, p. 200–210, 2015.

TULLBERG, J. N. Wheel Traffic Effects on Tillage Draught. **Journal of Agricultural Engineering Research**, Amsterdam, v. 75, n. 4, p. 375–382, 2000.

VALENTINE, T. A. et al. Soil strength and macropore volume limit root elongation rates in many UK agricultural soils. **Annals of Botany**, Oxford, v. 110, n. 2, p. 259–270, 2012.

VAN DAM, J. C.; FEDDES, R. A. Numerical simulation of infiltration, evaporation and shallow groundwater levels with the Richards equation. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 233, n. 1–4, p. 72–85, 2000.

VAN GENUCHTEN, M. T. A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 44, n. 5, p. 892–898, 1980.

VEIGA, M. DA et al. Soil compressibility and penetrability of an Oxisol from

southern Brazil, as affected by long-term tillage systems. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 92, n. 1–2, p. 104–113, 2007.

VEREECKEN, H. et al. Modeling Soil Processes : Review , Key Challenges , and New Perspectives Brief History of Soil Modeling. **Vadose Zone Journal**, Madison, v. 15, n. 5, p. 1–57, 2016.

WILLMOTT, C. J.; ROBESON, S. M.; MATSUURA, K. A refined index of model performance. **International Journal of Climatology**, Chichester, v. 32, n. 13, p. 2088–2094, 15 nov. 2012.

WU, Y.; COSGROVE, D. J. Adaptation of roots to low water potentials by changes in cell wall extensibility and cell wall proteins. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 51, n. 350, p. 1543–1553, 2000.

11 RESUMO BIBLIOGRÁFICO

Moacir Tuzzin de Moraes, filho de Armino Bertholdo de Moraes e Deolivia Armelinda Tuzzin de Moraes, nasceu em 28 de janeiro de 1988, em Santo Augusto, Rio Grande do Sul. Estudou o primeiro grau no colégio Maria Bolmont Albert e Feliciano Jorge Alberto em Redentora, Rio Grande do Sul. O segundo grau foi cursado no Colégio Agrícola de Frederico Westphalen, onde se formou em técnico em Agropecuária em 2005.

No ano de 2006 iniciou os estudos no curso de Agronomia da Universidade Federal de Santa Maria campus de Frederico Westphalen, o qual inicialmente já ingressou em projetos de pesquisa para iniciação científica. O curso de Agronomia foi concluído no primeiro semestre de 2011, e na sequência no segundo semestre de 2011 ingressou no Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo da Universidade Federal de Santa Maria para cursar o Mestrado em Ciência do Solo, no qual defendeu a tese de Doutorado em fevereiro de 2013.

O autor iniciou o curso de Doutorado em Ciência do Solo na Universidade Federal do Rio Grande do Sul no primeiro semestre de 2013, e no período de maio de 2015 a junho de 2016 o estudante realizou intercâmbio na modalidade de Doutorado Sanduíche no Exterior, no *The James Hutton Institute* na Escócia, UK, sob supervisão do pesquisador Anthony Glyn Bengough. Período esse em que foi possível aperfeiçoar as técnicas de modelagem do crescimento radicular em função das limitações físicas dos solos.

O autor realiza pesquisas na Embrapa Soja em parceria com a equipe de Manejo do Solo desde o ano de 2010 quando desenvolveu o trabalho de conclusão do curso de Agronomia e o estágio final de curso. No período de 2011 a 2012 o estudante realizou todas as pesquisas relacionadas ao mestrado também na área de Manejo do Solo na Embrapa Soja, estudando a qualidade física de solos em função do tempo de adoção do sistema plantio direto em sistemas de rotações ou sucessão de culturas. Assim, esta parceria consolidada permitiu o autor desenvolver os experimentos de doutorado em parceria com a Embrapa Soja o qual obteve apoio financeiro da Fundação AGRISUS, por meio da coordenação de um projeto relacionado à temática de Doutorado.