

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

Rodrigo Pivoto Mulazzani

**AVALIAÇÃO DO MODELO CROPGRO PARA DETECTAR EFEITO
DA COMPACTAÇÃO DO SOLO NO CRESCIMENTO E NA
PRODUTIVIDADE DA SOJA**

Santa Maria, RS
2020

PPGCS/UFSM, RS

MULAZZANI, Rodrigo Pivoto

Doutor 2020

Rodrigo Pivoto Mulazzani

**AVALIAÇÃO DO MODELO CROPGRO PARA DETECTAR EFEITO DA
COMPACTAÇÃO DO SOLO NO CRESCIMENTO E NA
PRODUTIVIDADE DA SOJA**

Tese apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Ciência do Solo da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para a obtenção do título de **Doutor em Ciência do Solo**.

Orientador: Prof.º Dr.º Paulo Ivonir Gubiani

Santa Maria, RS
2020

Mulazzani, Rodrigo Pivoto

Avaliação do modelo CROPGRO para detectar efeito da compactação do solo no crescimento e na produtividade da soja / Rodrigo Pivoto Mulazzani.- 2020.

90 p.; 30 cm

Orientador: Paulo Ivonir Gubiani

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós Graduação em Ciência do Solo, RS, 2020

1. Compactação do solo 2. Crescimento e produtividade soja 3. CROPGRO-Soybean 4. Estresse mecânico 5. Fatores de estresse I. Gubiani, Paulo Ivonir II. Título.

Sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFSM. Dados fornecidos pelo autor(a). Sob supervisão da Direção da Divisão de Processos Técnicos da Biblioteca Central. Bibliotecária responsável Paula Schoenfeldt Patta CRB 10/1728.

© 2020

Todos os direitos autorais reservados a Rodrigo Pivoto Mulazzani. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita mediante a citação da fonte.

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

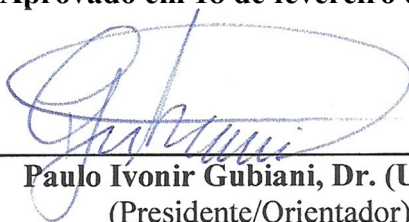
Fone (55) 3220 8108; E-mail: rpmulazzani@gmail.com

Rodrigo Pivoto Mulazzani

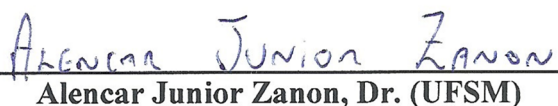
**AVALIAÇÃO DO MODELO CROPGRO PARA DETECTAR EFEITO DA
COMPACTAÇÃO DO SOLO NO CRESCIMENTO E NA
PRODUTIVIDADE DA SOJA**

Tese apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Ciência do Solo da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para a obtenção do título de **Doutor em Ciência do Solo**.

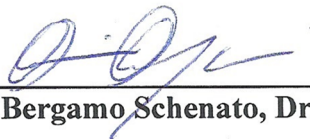
Aprovado em 18 de fevereiro de 2020:



Paulo Ivonir Gubiani, Dr. (UFSM)
(Presidente/Orientador)



Alencar Junior Zanon, Dr. (UFSM)



Ricardo Bergamo Schenato, Dr. (UFSM)



Marta Sandra Drescher, Dra. (UERGS)



Vitor Cauduro Girardello, Dr. (URI)

Santa Maria, RS
2020

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha esposa Janete Teresinha Arnt, que muito me ensinou sobre escolhas, dedicação, trabalho e amor, e às minhas filhas Helena (2 anos) e Melissa (em gestação), que me inspiram a conhecer o mundo para melhorá-lo.

AGRADECIMENTOS

A Deus, criador do universo que me encanta.

À minha mãe, Roza Alice Pivoto Mulazzani, por ter me ensinado que aprender não ocupa espaço.

A meu pai, Pedro Volmir Mulazzani, por ter me ensinado que sempre há oportunidades para quem é honesto e dedicado.

À Janete Teresinha Arnt, esposa, amiga, companheira, amante, professora e infinitos outros atributos, por incentivar meu retorno à carreira acadêmica e por me permitir a incrível experiência da paternidade.

Ao professor, cientista e pesquisador, Paulo Ivonir Gubiani, pelas conversas sobre filosofia e ciência, pela confiança na execução do trabalho e pela paciência na orientação.

Aos colegas de pós-graduação, André Somavilla, Caroline Andrade, Daniel Boeno, Ezequiel Koppe, Francieli de Vargas, Fábio José Andres Schneider, Jordano Vaz Ambus e Micael Stolben Mallmann e aos estagiários Alexandre Arthur Kazmirski, Cassiano Salin Pigatto e Jainara Fresinghelli Netto, pelo auxílio no experimento e no laboratório, e ao colega Gean Leonardo Richter pelo auxílio com o CROPGRO. Também aos demais colegas do Laboratório de Física do Solo, pelos momentos de discussão, estudo e descontração, vitais para a produção de conhecimento.

Ao colega, companheiro e amigo Alan Carlos Batistão, por toda ajuda no campo e no laboratório, pela dedicação e paciência em me ensinar “R” e pela disposição em dividir as alegrias e angústias da vida acadêmica e fora dela.

Ao Instituto Federal Farroupilha Campus Santo Ângelo, por permitir conciliar minha formação acadêmica com o trabalho enquanto fui servidor da instituição.

Ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, ao Departamento de Solos e à Universidade Federal de Santa Maria, pelo ambiente acolhedor e por proporcionar toda a estrutura física e humana indispensável para a execução deste trabalho.

À CAPES e ao CNPQ, pela concessão de bolsa de estudos, permitindo dedicação integral a minha formação e ao fortalecimento do conhecimento científico.

Não teria conseguido sem vocês, OBRIGADO!

“Só o conhecimento liberta o homem. Só através do conhecimento o homem é livre e em sendo livre pode aspirar uma condição de vida melhor para ele e seus semelhantes.”

Enéas Carneiro

RESUMO

AValiação DO MODELO CROPGRO PARA DETECTAR EFEITO DA COMPACTAÇÃO DO SOLO NO CRESCIMENTO E NA PRODUTIVIDADE DA SOJA

AUTOR: Rodrigo Pivoto Mulazzani
ORIENTADOR: Paulo Ivonir Gubiani

A compactação do solo é um fenômeno inerente ao manejo dos cultivos em larga escala e pode estar associada à redução no crescimento e produtividade das plantas. Conhecer o efeito da compactação nas propriedades físicas do solo é insuficiente para prever essa associação, pois sua ocorrência depende de interações do sistema solo-planta-atmosfera. A modelagem de processos é uma estratégia que permite avaliar tais interações. O sucesso dos modelos depende da capacidade de integrar elementos meteorológicos, fenológicos e de solo para estimar estresses associados ao não suprimento das demandas da planta. Os estresses relacionados ao déficit hídrico (estresse hídrico), ao déficit de oxigênio (estresse gasoso) e ao excesso de resistência mecânica do solo (estresse mecânico) sofrem interferência de propriedades físicas do solo afetadas pela compactação. Entretanto, são raros os modelos que simulam crescimento e produtividade das plantas e que estimem estresse mecânico. O CROPGRO, modelo de crescimento vegetal da plataforma DSSAT, contempla esses requisitos. Por isso, o objetivo desse trabalho foi avaliar o desempenho do CROPGRO na detecção da associação entre compactação do solo e crescimento e produtividade da soja. O CROPGRO foi avaliado em dois estudos. No primeiro (manuscrito 1), foi caracterizada a sensibilidade do modelo ao efeito da compactação no desempenho da soja. Para isso, sete cenários de déficit hídrico (DH) foram combinados com 12 cenários de estado de compactação (EC) em experimentos numéricos. O CROPGRO simulou crescimento e produtividade da soja sem prejuízos causados por aumento de EC quando o DH ocorreu nos estágios em que a planta tem baixa sensibilidade à restrição hídrica (início do período vegetativo e final do reprodutivo). Sob estresse hídrico, o CROPGRO indica que o efeito de EC é maior sobre a produtividade de grãos do que sobre o crescimento foliar e das raízes. No segundo estudo (manuscrito 2), foi avaliada a capacidade do CROPGRO prever o efeito da compactação no crescimento e produtividade da soja observadas em experimento a campo. Para isso, dois cultivos de soja (2016/17 e 2017/18) foram conduzidos em três EC, representados pelos manejos: compactado (CO), não perturbado (NP) e escarificado (ES). As estimativas do CROPGRO foram semelhantes aos valores observados de índice de área foliar e produtividade. Porém, as estimativas de densidade de comprimento de raiz (RLD) não foram afetadas pelos manejos enquanto à campo foi observado maior RLD nos manejos CO e ES. Isso revela que a estratégia usada pelo CROPGRO para estimar estresse mecânico é pouco sensível à variação de EC, especialmente quando comparada a estimativa do estresse mecânico calculada em função da resistência do solo à penetração (proposta recentemente por Moraes et al. (2018)). Os resultados dos dois estudos indicam que a sensibilidade das estimativas de estresse hídrico, gasoso e mecânico à mudança no estado de compactação do solo permite ao CROPGRO fazer previsões sobre a associação entre compactação e desempenho da soja. Entretanto, há oportunidades para melhorar a estimativa de estresse mecânico pelo CROPGRO.

Palavras-chave: Estresse mecânico. Modelagem. Estresse físico. CROPGRO-Soybean.

ABSTRACT

EVALUATION OF THE CROPGRO MODEL FOR DETECTING SOIL COMPACTION EFFECT IN SOYBEAN GROWTH AND YIELD

AUTHOR: Rodrigo Pivoto Mulazzani

ADVISOR: Paulo Ivonir Gubiani

Soil compaction is an inherent phenomenon of the management of large-scale crops and can be associated to reduction on plant growth and yield. To know the effect of compaction on soil physical properties is insufficient to predict this association, because its occurrence depends on soil-plant-atmosphere system interactions. The modelling of process is a strategy that allows to evaluate such interactions. The success of the models depends of the ability to integrate meteorological, phenological and soil elements to estimate stresses associated to poor supplying of plant demands. Stresses related to water deficit (water stress), oxygen deficit (oxygen stress) and excessive soil mechanical resistance (mechanical stress) suffer interference of soil physical properties affected by compaction. However, models that simulate plant growth and yield and that estimate mechanical stress are scarce. CROPGRO, a plant growth model of the DSSAT crop system model, addresses these requirements. Therefore, the objective of this study was to evaluate the performance of CROPGRO in detecting the association between soil compaction and soybean growth and yield. CROPGRO was evaluated in two studies. In the first one (manuscript 1), the sensitivity of the model to the effect of compaction on soybean performance was characterized. For this purpose, seven water deficit (WD) scenarios were combined with 12 soil compaction states (CS) scenarios in numerical experiments. The CROPGRO simulated soybean growth and yield without damage caused by an increase in EC when the DH occurred in the stages where the plant has low sensitivity to water restriction (beginning of the vegetative period and end of the reproductive period). Under water stress, CROPGRO indicates that the effect of EC is greater on yield than on leaf and root growth. In the second study (manuscript 2), the ability of CROPGRO to predict the effect of compaction on soybean growth and yield observed in a field experiment was evaluated. For this purpose, two soybean season crops (2016/17 and 2017/18) were conducted in three CS, represented by managements: compacted (CO), no-till (NT) and chieseling (CH). The CROPGRO estimates were near to the observed values of leaf area index and yield. However, root length density (RLD) estimates were not affected by managements while RLD observed were higher in CO and CH managements. This reveals the low sensitivity of the CROPGRO mechanical stress estimates to CS variation, especially when compared to the estimate of mechanical stress calculated from soil resistance to penetration (recently proposed by Moraes et al. (2018)). The results of the two studies indicate that the sensitivity of water, oxygen and mechanical stress estimates to changes in CS allows CROPGRO to make predictions about the association between compaction and soybean performance. However, there are opportunities for improvement in the estimate of mechanical stress by CROPGRO.

Keywords: Mechanical stress. Modelling. Physical stress. CROPGRO-Soybean.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AEC	Água extraída por camada de solo
CCG	Camada com compactação gradual
CCL	Camada com compactação local
CN	Parâmetro curva número de escoamento superficial
CO	Compactado
CR	Comprimento de raiz
DAE	Dias após a emergência
DCR	Densidade de comprimento de raiz
DCR _p	Densidade de comprimento de raiz ponderada
DH	Déficit hídrico
DSSAT	<i>Decision Support System for Agrotechnology Transfer</i>
EC	Estado de compactação do solo
ES	Escarificado
ET _r	Evapotranspiração de referência
FCR	Fator de crescimento de raiz
IAF	Índice de área foliar
IAF _{máx}	Índice de área foliar máximo
K	Condutividade hidráulica
K _{SAT}	Condutividade hidráulica de solo saturado
LI	Limite inferior de disponibilidade de água
LSD	Limite superior de drenagem
NP	Não perturbado
PHC	Perfil homogêneo compactado
RG	Rendimento de grãos
RMSE	Raiz do erro quadrático médio
RP	Resistência do solo à penetração
S _g	Estresse gasoso
S _{g_p}	Estresse gasoso ponderado
Sh	Estresse hídrico
Sm	Estresse mecânico
Sm _p	Estresse mecânico ponderado
Sm _{RP}	Estresse mecânico em função da RP
T _a	Transpiração atual
T _p	Transpiração potencial
WCR	<i>Water content reflectometer</i>
β _{MIN}	Porosidade mínima de aeração
θ	Conteúdo de água do solo
θ _{SAT}	Conteúdo de água de solo saturado
ρ	Densidade do solo
ρ _s	Densidade de partículas

SUMÁRIO

1 APRESENTAÇÃO	11
2 MANUSCRITO 1 – SENSIBILIDADE DO CROPGRO AO EFEITO DA COMPACTAÇÃO DO SOLO NO CRESCIMENTO E PRODUTIVIDADE DA SOJA	15
Introdução	16
Metodologia	20
Resultados	28
Discussão	33
Conclusão	35
Referências	36
3 MANUSCRITO 2 – AVALIAÇÃO DA CAPACIDADE DO CROPGRO PARA PREDIÇÃO DO EFEITO DE COMPACTAÇÃO DO SOLO NO CRESCIMENTO E PRODUTIVIDADE DA SOJA	44
Introdução	45
Metodologia	50
Resultados	61
Discussão	70
Conclusão	73
Referências	74
4 DISCUSSÃO GERAL	85
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	87
6 REFERÊNCIAS	88

1 APRESENTAÇÃO

Desde o estabelecimento de sociedades sedentárias, o homem altera o ambiente natural com a agricultura para suprir sua demanda por alimento, energia e matéria-prima. O aumento da população, ou do poder aquisitivo, aumenta essas demandas (GOUEL; GUIMBARD, 2019) e, conseqüentemente, aumenta o uso dos recursos naturais e o risco de degradá-los. Portanto, a sustentabilidade ambiental das demandas humanas depende da minimização do impacto negativo que a agricultura possa ter na funcionalidade dos recursos naturais (KOPNINA, 2016; MCBRATNEY; FIELD; KOCH, 2014).

As práticas agrícolas de sementeira, pulverização, colheita e transporte na agricultura de larga escala são realizadas por sistemas mecanizados (KELLER et al., 2019). O tráfego intenso de máquinas associado à rotação de culturas com poucas espécies e pouco aporte de biomassa na superfície do solo, são os principais fatores relacionados ao aumento do estado de compactação do solo (EC) (HAMZA; ANDERSON, 2005; KELLER et al., 2019; KUMAR et al., 2018). O aumento de EC é caracterizado pelo aumento da densidade do solo (redução na porosidade total), e pela diminuição da relação macroporos/microporos.

Essas mudanças afetam propriedades que controlam o transporte de água e ar no solo e propriedades relacionadas à resistência mecânica do solo à deformação (BUSSCHER, 1990; HILL; SUMNER, 1967; KOJIMA et al., 2018; MORAES et al., 2014). Por isso, é comum encontrar estudos que associem estatisticamente variáveis que indicam o aumento de EC (principalmente densidade do solo, ρ , e resistência do solo à penetração, RP) com redução no crescimento e produtividade das plantas. Por exemplo, Beulter e Centurion (2004) verificaram relação quadrática negativa entre RP (5 – 15 cm) e produtividade da soja e Moraes et al. (2019) observaram redução de 20% na produtividade de milho com o aumento de ρ de 1,26 para 1,37 g cm⁻³ (10 – 20 cm). Entretanto, há situações em que a associação entre EC e produção das culturas não é verificada. Benjamin, Nielsen e Vigil (2003) concluíram que apenas 0,4% da variação na produtividade de milho foi explicada pela variação de ρ entre 1,2 e 1,6 g cm⁻³. Gubiani e Reichert e Reinert (2013) compilaram resultados de experimentos com arroz, feijão, milho, soja e trigo e verificaram que em 81% dos casos o rendimento relativo das culturas foi maior que 80% independentemente de EC. Portanto, a ocorrência de associação entre EC e variáveis de planta não depende exclusivamente da alteração causada pela compactação em propriedades físicas do solo.

As plantas têm o crescimento e produtividade reduzidos quando suas demandas por energia, carbono, oxigênio, água e nutrientes não são totalmente supridas (LAMBERS;

CHAPIN; PONS, 2008). Do ponto de vista físico, o solo regula processos relacionados à oferta (disponibilidade) de água às plantas (entrada, armazenamento e redistribuição no perfil do solo) (LETEY, 1985; VAN LIER, 2010) e processos relacionados ao crescimento e funcionalidade das raízes (resistência mecânica ao alongamento radicular e oferta de oxigênio às raízes) (BENGOUGH, 1997; LORETI; VAN VEEN; PERATA, 2016), que afetam a acessibilidade das plantas à água (COLOMBI et al., 2018).

A variabilidade espaço-temporal do fluxo de água, da resistência mecânica e da aeração (oxigenação) do solo está relacionada à variabilidade espaço-temporal do conteúdo de água do solo (θ). O conteúdo de água, por sua vez, é determinado pelo balanço hídrico que depende de variáveis do solo, meteorológicas (chuva e evapotranspiração) e da planta (índice de área foliar, distribuição das raízes no perfil e estágio fenológico) (REICHARDT; TIMM, 2012). Quando a combinação dessas variáveis for desfavorável ao suprimento de água às plantas, como reduzido θ somado à elevada evapotranspiração potencial e elevado índice de área foliar, ocorre uma situação de estresse que limita o potencial produtivo vegetal.

O suprimento insuficiente da demanda de água causado por déficit hídrico, déficit de oxigênio às raízes ou excesso de impedimento mecânico ao crescimento radicular caracterizam os estresses hídrico, gasoso e mecânico respectivamente (BENGOUGH et al., 2011; FEDDES, 1978; VAN LIER, 2001). Assim, só haverá redução no crescimento e produtividade das plantas com o aumento de EC se mudanças nas propriedades físicas do solo proporcionarem maior frequência e/ou intensidade desses estresses.

Isso é verificado em estudos que avaliam o efeito de déficit ou excesso hídrico na manifestação de associação entre EC a produtividade de culturas. Conte et al. (2009) detectaram redução de 23% na produtividade de milho com o aumento de ρ de 1,58 para 1,62 (9 – 18 cm) nas parcelas que receberam chuva, mas não verificaram diferença nas parcelas que receberam irrigação suplementar. Gubiani et al. (2018) calcularam um fator de redução de transpiração em função da estimativa de estresse hídrico e gasoso em soja cultivado em várzea e concluíram que a produtividade foi melhor associada ao fator calculado do que a propriedades físicas do solo relacionadas ao transporte de água e gases. Portanto, a ocorrência de estresse hídrico, gasoso ou mecânico determina a ocorrência de associação entre EC e crescimento e produtividade das plantas.

O monitoramento de variáveis do solo, meteorológicas e da planta permite quantificar os estresses hídrico, gasoso e mecânico à medida que eles ocorrem, se ocorrerem, durante o ciclo de crescimento. Entretanto, a predição dos estresses hídrico, gasoso e mecânico possibilita avaliar estratégias de manejo do solo que possam minimizar a ocorrência e

intensidade desses estresses antes da implantação das culturas. A simulação de processos físicos (balanço hídrico) e fisiológicos (crescimento e desenvolvimento vegetal) envolvidos na predição dos estresses hídrico, gasoso e mecânico permite estimar o potencial de dano que o aumento de EC pode causar às culturas.

Modelos que simulem processos físicos e fisiológicos de forma integrada são pouco comuns. Uma opção é a plataforma DSSAT (*Decision Support System for Agrotechnology Transfer*, Jones et al. (2003)), que abriga modelos de crescimento de planta capazes de simular mais de 30 culturas entre cereais, leguminosas, culturas de raízes, oleaginosas, hortaliças, forrageiras, entre outras (HOOGENBOOM et al., 2015). O DSSAT possui seis módulos primários para organizar os processos simulados: meteorológico, manejo, solo, solo-planta-atmosfera, genérico de cultura (CROPGRO, para culturas como soja, feijão, amendoim) e culturas específicas (por exemplo, CERES-maize para milho, SUBSTOR-potato, para batata). A base de dados fornecida pelo usuário com informações de solo, meteorológicas, genéticas e de manejo, é utilizada pelos módulos do DSSAT para simular os processos físicos ou fisiológicos relacionados a cada módulo. Como os módulos operam em conjunto (o dado de saída de um módulo é utilizado como dado de entrada em outro), integram diferentes processos durante a simulação.

Para que o crescimento das plantas esteja integrado com processos que ocorrem no solo e na atmosfera, o DSSAT possui estratégias para estimar os estresses hídrico, gasoso e mecânico, que são utilizados pelos módulos de cultura para reduzir o crescimento das plantas quando a demanda por água não é suprida. Portanto, os modelos do DSSAT podem ser utilizados para avaliar a ocorrência de associação entre EC e crescimento e produtividade das plantas. Como a parametrização do solo é feita em um módulo independente, a ocorrência de associação entre EC e crescimento e produtividade das plantas pode ser avaliado para qualquer uma das culturas simuladas pelo DSSAT. Entretanto, fazer essa avaliação para cultura da soja é particularmente interessante.

A soja é uma das plantas mais cultivadas no mundo e no Brasil, ocupando, respectivamente, ~10% e ~60% das áreas agrícolas destinadas a cultivos temporários (FAO, 2020). O cultivo da soja é comumente realizado sob condições favoráveis ao aumento de EC (tráfego intenso de máquinas, monocultivo e pouco aporte de palha). Além disso, o déficit hídrico em lavouras não irrigadas no Brasil é responsável por uma lacuna média de 42% na produtividade da soja, especialmente nos Estados do Sul (SENTELHAS et al., 2015). No Rio Grande do Sul, Estado com a segunda maior área cultivada com soja no Brasil (CONAB, 2020), a irregularidade da chuva durante o ciclo de crescimento causa uma lacuna de

produtividade por déficit hídrico (para a região de Cruz Alta) de 2.050 a 2.600 kg ha⁻¹ (SENTELHAS et al., 2015). Como a ocorrência de redução no crescimento e produtividade das plantas com o aumento de EC está relacionada à ocorrência de déficit hídrico, avaliar o efeito de EC sobre a cultura da soja no Sul do Brasil pode auxiliar na tomada de decisão sobre o manejo de solo mais apropriado para reduzir a lacuna de produtividade por déficit hídrico.

Além do DSSAT ser mundialmente usado para simulação do desempenho da soja por meio do modelo de cultura CROPGRO (ALAGARSWAMY et al., 2006; CALMON et al., 1999; FENSTERSEIFER et al., 2017; MERCAU et al., 2007), a possibilidade de simular o efeito das interações dos componentes do sistema solo-planta-atmosfera sobre os estresses hídrico, gasoso e mecânico e as consequências no desempenho das plantas, motivaram o desenvolvimento desse trabalho. Assim, nosso principal objetivo foi avaliar o desempenho do CROPGRO para detectar efeito de compactação do solo na cultura da soja. Esse propósito foi dividido em dois estudos. O primeiro estudo (manuscrito 1) caracterizou a sensibilidade do crescimento e produtividade da soja estimados pelo CROPGRO a mudanças no estado de compactação do solo em diferentes cenários meteorológicos. O segundo estudo (manuscrito 2) avaliou a capacidade do CROPGRO para prever o efeito da compactação do solo no crescimento e na produtividade da soja observadas em experimento a campo.

1 **2 MANUSCRITO 1 – SENSIBILIDADE DO CROPGRO AO EFEITO DA**
2 **COMPACTAÇÃO DO SOLO NO CRESCIMENTO E PRODUTIVIDADE DA SOJA**

3

4 (Manuscrito submetido à revista Field Crops Research)

5

6 **Destaques**

7 - A compactação do solo afeta os parâmetros de solo do CROPGRO.

8 - A sensibilidade das plantas à compactação depende das condições meteorológicas.

9 - O CROPGRO revelou que os estresses hídrico, gasoso e mecânico são ocasionais.

10 - A sensibilidade do CROPGRO deve ser avaliada para compactação do solo à campo.

11

12 **Resumo**

13 A predição do risco da compactação do solo prejudicar o crescimento e produtividade
14 das plantas ajuda planejar ações para manutenção da capacidade produtiva das culturas. O
15 modelo CROPGRO é um dos poucos modelos que estima os estresses hídrico, gasoso e
16 mecânico, e tem sido amplamente utilizada na predição de safras. Neste estudo, o crescimento
17 e produtividade da soja foi simulada em 12 cenários de distribuição de estados de
18 compactação (EC) no perfil do solo, sob sete cenários de déficit hídrico (DH), com o objetivo
19 de caracterizar a sensibilidade do CROPGRO a mudanças de EC e como ela depende das
20 condições meteorológicas. O CROPGRO simulou crescimento e produtividade da soja sem
21 prejuízos causados por aumento de EC quando o DH ocorreu nos estádios em que a planta
22 tem baixa sensibilidade à restrição hídrica (início do período vegetativo e final do
23 reprodutivo). Sob estresse hídrico, o CROPGRO indica que o efeito de EC é maior sobre a
24 produtividade de grãos do que sobre o crescimento foliar e das raízes. Portanto, o CROPGRO
25 é capaz de predizer redução de crescimento e produtividade da soja em combinações de EC

26 com condições meteorológicas desfavoráveis à cultura. O modelo também indica em que
27 circunstâncias meteorológicas uma situação desfavorável de EC não causaria prejuízo para a
28 produção de soja. Em estudos na sequência, seria útil comparar esta importante capacidade do
29 modelo com medições de plantas em experimentos de campo para verificar se ajustes no
30 modelo seriam necessários.

31

32 **Palavras-chave:** CROPGRO-Soybean; estresse mecânico; modelagem; estresses físicos

33

34 **Introdução**

35

36 A capacidade das culturas agrícolas produzirem alimentos, fibras e energia é afetada
37 pela disponibilidade de recursos necessários ao crescimento das plantas, como água,
38 nutrientes, oxigênio, CO₂ e radiação solar. Recursos como água, nutrientes e oxigênio podem
39 ser limitados pela compactação do solo. Por isso, predições do impacto da compactação na
40 produção das plantas serão indicadores importantes para o planejamento de ações políticas
41 pelos gestores ou de manejo pelos agricultores (Graves et al., 2015). Entretanto, é difícil
42 mensurar a perda de produtividade por efeito de compactação (Keller et al., 2019) porque
43 depende de interações de processos no solo, na planta e na atmosfera.

44 As evidências experimentais mostram que a relação do crescimento das plantas com o
45 estado de compactação do solo (EC) é um evento ocasional. Por exemplo, Gubiani et al.
46 (2013) compilaram resultados de 141 observações experimentais de produtividade de culturas
47 de grão (arroz, trigo, milho, soja e feijão) e verificaram que em 81% dos casos o rendimento
48 relativo foi maior que 80% independentemente do estado de compactação do solo. Maiores
49 EC estavam presentes, mas as combinações de variáveis meteorológicas e estádios
50 fenológicos foram mais importantes para evitar o prejuízo que elevados EC poderiam causar.

51 A chuva e a evapotranspiração causam mudanças enormes nas taxas de fluxo de água
52 e gases e na resistência mecânica do solo no campo, mesmo que seu EC permaneça estável no
53 tempo, pois a magnitude da condutividade hidráulica (K) e da resistência mecânica à
54 penetração (RP), que são afetadas pelo conteúdo de água (θ) (Busscher, 1990; van Genuchten,
55 1980), mudam muito no tempo sem haver mudança de EC. Por exemplo, em horizonte franco
56 arenoso com densidade do solo (ρ) $1,6 \text{ g cm}^{-3}$, K e RP para θ na capacidade de campo podem
57 ser, respectivamente, 8.10^5 e 0,52 vezes suas magnitudes observadas para θ no ponto de
58 murcha permanente (Gubiani e Mentges, 2020). Portanto, as plantas podem sofrer estresse
59 hídrico, gasoso e mecânico muitas vezes ao longo do ciclo e com diferentes intensidades
60 apenas por variação de θ , sem que haja mudança de EC (sem compactação).

61 Embora os processos que ocorrem no solo, na planta e na atmosfera e que regulam os
62 estresses possam ser monitorados com equipamentos, somente a modelagem desses processos
63 é capaz de elaborar predições quantitativas de ocorrência e severidade desses estresses ao
64 serem mudados os cenários de EC e condições meteorológicas. Para isso, os modelos de
65 crescimento vegetal baseados em processos são ferramentas úteis para testar as interações dos
66 componentes do sistema solo-planta-atmosfera afim de conhecer a relação dos estresses com
67 combinações desses componentes e avaliar suas consequências no crescimento e
68 produtividade das plantas.

69 Os modelos de crescimento vegetal são desenvolvidos para estimar o crescimento e
70 produtividade das plantas em diferentes combinações de condições meteorológicas, de solo e
71 de manejo (Hoogenboom et al., 1992; Siad et al., 2019). O CROPGRO é um modelo baseado
72 em processos que simula o crescimento vegetal com sub-rotinas que determinam o
73 desenvolvimento da cultura e os balanços de carbono, nitrogênio e hídrico (Boote et al., 2008)
74 e compõe um módulo da plataforma DSSAT - *Decision Support System for Agrotechnology*
75 *Transfer* (Jones et al., 2003). O modelo representa o solo como um perfil unidimensional,

76 homogêneo horizontalmente e composto por camadas empilhadas e utiliza informações da
 77 superfície e cada camada do solo para calcular componentes do balanço de radiação e do
 78 balanço hídrico.

79 Neste estudo, os processos do CROPGRO mais relevantes são os que simulam os
 80 fatores de estresse hídrico, gasoso e mecânico. Os fatores de estresse são calculados conforme
 81 as Eqs. (1), (2) e (3) (Boote et al., 2008; Jones et al., 2010).

82

$$Sh = \frac{Ta}{Tp} \quad (1)$$

$$Sg = \begin{cases} 1 & \text{se } (\theta_{SAT} - \theta) > \beta_{MIN} \\ \frac{\theta_{SAT} - \theta}{\beta_{MIN}} & \text{se } (\theta_{SAT} - \theta) \leq \beta_{MIN} \end{cases} \quad (2)$$

$$Sm = \begin{cases} 1 & \text{se } (\theta - LI) \geq 0,25(LSD - LI) \\ \frac{\theta - LI}{0,25(LSD - LI)} & \text{se } (\theta - LI) < 0,25(LSD - LI) \text{ e } \theta > LI \\ 0 & \text{se } \theta \leq LI \end{cases} \quad (3)$$

83

84 Em que Sh, Sg e Sm são os fatores de estresse hídrico, gasoso e mecânico
 85 respectivamente, que variam de 1 (sem estresse) a 0 (máximo estresse), Ta é a transpiração
 86 atual, Tp é a transpiração potencial, θ_{SAT} é o conteúdo de água na saturação, β_{MIN} é a
 87 porosidade mínima de aeração, LSD é o limite superior de drenagem (θ quando o potencial
 88 matricial é -10 kPa) e LI é o limite inferior de disponibilidade de água (θ quando o potencial
 89 matricial é -1.500 kPa). Ta será menor que Tp quando a quantidade de água extraída pelas
 90 raízes for menor que a demanda transpirativa. A quantidade de água extraída pelas raízes é o
 91 somatório da quantidade de água extraída em cada camada (AEC). AEC é calculado por meio

92 de uma simplificação da equação de fluxo radial em direção as raízes (Jones et al., 2010),
 93 conforme a Eq. (4).

94

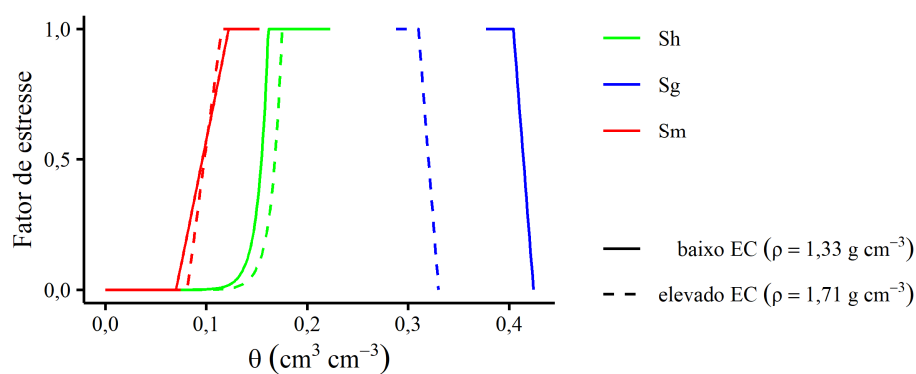
$$AEC_L = C1 \frac{e^{\min\{[C2_L(\theta_L - LI_L)], 40\}}}{C3 - \ln DCR_L} \quad (4)$$

95

96 Em que C1 e C3 são coeficientes de ajuste da equação (0,00267 e 6,68
 97 respectivamente (Ritchie, 1998)), C2 é um parâmetro calculado internamente pelo
 98 CROPGRO em função de LI, DCR é a densidade de comprimento de raiz e L é a camada
 99 considerada.

100 O aumento de EC causa redução de θ_{SAT} , aumento de LI e pode causar aumento ou
 101 redução de LSD dependendo do intervalo de variação de ρ (Hill e Sumner, 1967; Kojima et
 102 al., 2018; Silva et al., 1994). Mudanças em θ_{SAT} , LI e LSD interferem na estimativa dos
 103 fatores de estresse hídrico, gasoso e mecânico (Eqs. (1), (2) e (3)), de forma que o aumento de
 104 EC diminui o intervalo de θ no qual não há manifestação de estresses (Fig. 1).

105



106

107 Fig.1. Efeito do EC nas estimativas de estresse hídrico (Sh), gasoso (Sg) e mecânico (Sm) em
 108 função do conteúdo de água no solo (θ).

109 A mudança de θ_{SAT} , LSD e LI por efeito de mudança de EC não garante estresses mais
110 frequentes ou mais severos para a planta, mas mostra o mecanismo pelo qual o CROPGRO é
111 capaz de detectar a mudança de EC. Por isso, o CROPGRO tem potencial para testar as
112 interações dos componentes do sistema solo-planta-atmosfera a fim de predizer estresses e
113 suas consequências no crescimento e produtividade das plantas. Assim, o objetivo deste
114 estudo foi caracterizar a sensibilidade do crescimento e produtividade da soja estimados pelo
115 CROPGRO a mudanças no estado de compactação do solo em diferentes cenários
116 meteorológicos.

117

118 **Metodologia**

119

120 O estudo consistiu em um conjunto de experimentos numéricos nos quais o
121 crescimento e produtividade de soja foram simulados pelo modelo CROPGRO em diferentes
122 estados de compactação do solo combinados com diferentes condições meteorológicas.

123

124 Cenários de simulação

125

126 *Cenários de estado de compactação do solo*

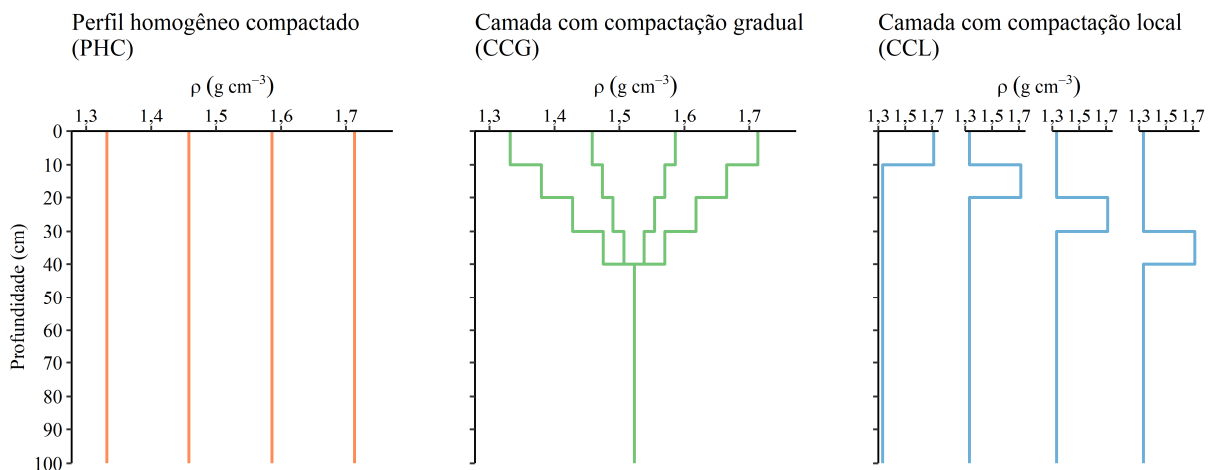
127

128 Ao total foram criados 12 cenários de EC para um solo hipotético com 100 cm de
129 profundidade e textura homogênea com 12% de argila, 23% de silte e 65% de areia. Essa
130 textura é semelhante à do horizonte A de solos da classe Argissolo Vermelho distrófico
131 arênico (Santos et al., 2018) (Ultisol (Soil Survey Staff, 2014)). Os Argissolos ocupam 27%
132 da superfície do Brasil (Santos et al., 2011) e são amplamente cultivados com soja. A

133 definição desse perfil hipotético com textura homogênea foi feita com o propósito de
 134 manifestar apenas o efeito de EC.

135 O perfil de solo foi dividido em sete camadas (0-10, 10-20, 20-30, 30-40, 40-60, 60-80
 136 e 80-100 cm) e os cenários de EC foram representados quantitativamente pela ρ (g cm^{-3}). No
 137 conjunto dos 12 EC, a menor e maior ρ usada ($1,33$ e $1,71 \text{ g cm}^{-3}$) correspondem
 138 aproximadamente a 0,7 e 0,9 da máxima ρ do ensaio de compactação de Proctor (Marcolin e
 139 Klein, 2011). Os 12 cenários de EC foram agrupados em três modos de distribuição da ρ no
 140 perfil: perfil homogêneo compactado (PHC), camada com compactação gradual (CCG) e
 141 camada com compactação local (CCL) (Fig.2).

142



143

144 Fig. 2. Cenários de EC agrupados em três modos de distribuição da ρ no perfil do solo
 145 utilizados nas simulações.

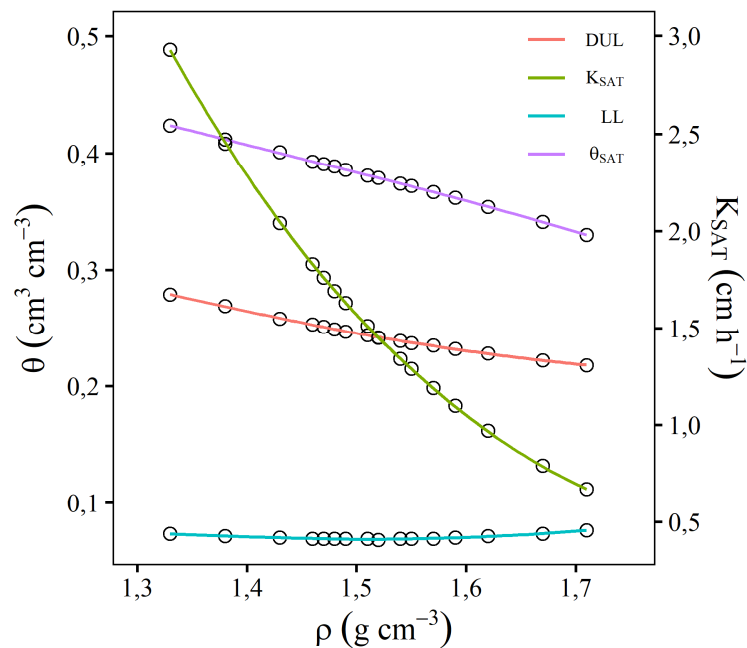
146

147 No grupo PHC, foram estabelecidos quatro perfis homogêneos de ρ . No grupo CCG, a
 148 ρ da camada 0-10 cm do grupo PHC foi aumentada ou diminuída com o aumento da
 149 profundidade até a camada 30-40 cm e nas camadas mais profundas a ρ foi a mesma para
 150 todos os perfis ($1,52 \text{ g cm}^{-3}$). No grupo CCL, uma camada de solo com maior ρ ($1,71 \text{ g cm}^{-3}$)
 151 foi posicionada em quatro profundidades (0-10, 10-20, 20-30 e 30-40 cm) em um perfil

152 homogêneo com menor ρ ($1,33 \text{ g cm}^{-3}$). Cabe ressaltar que esses cenários de EC foram
153 criados apenas para caracterizar a sensibilidade do CROPGRO e podem não possuir
154 correspondência exata com a distribuição da ρ observada à campo.

155 O CROPGRO requer os parâmetros hidráulicos LSD, LI, θ_{SAT} e condutividade
156 hidráulica de solo saturado (K_{SAT}) de cada camada para modelar o balanço hídrico. Para obter
157 valores apropriados desses parâmetros para cada cenário de EC, foram feitas estimativas em
158 função da ρ de cada camada do solo nos diferentes cenários de EC. Primeiramente, os
159 parâmetros da curva de retenção de água do solo do modelo de Van Genuchten (1980) e a
160 K_{SAT} foram estimados com o módulo Rosetta (Schaap et al., 2001) do software Hydrus
161 (Šimůnek et al., 2013) em função da textura (areia, silte e argila) e da ρ de cada camada (Fig.
162 2). Posteriormente, os parâmetros θ_{SAT} , LSD e LI foram obtidos para os respectivos valores 0,
163 -100 e -15.000 cm de potencial matricial, usando as curvas de retenção parametrizadas pelo
164 Rosetta (Fig. 3).

165 Alguns parâmetros de solo e de superfície foram mantidos constantes em todos os
166 cenários de EC. O parâmetro curva número de escoamento superficial (CN=73) foi
167 determinado internamente pelo CROPGRO a partir da declividade informada (2%) e do grupo
168 hidrológico selecionado (grupo B – potencial de escoamento moderadamente baixo). O
169 albedo (0,14) foi definido internamente pelo CROPGRO a partir da cor do solo selecionada
170 (vermelho) e a taxa de drenagem (0,75) a partir da seleção de uma classe de drenagem interna
171 do perfil do solo (moderadamente excessiva). O grupo hidrológico, a cor do solo e a classe de
172 drenagem selecionados, dentre as opções disponíveis no DSSAT (Wilkins et al., 2004), foram
173 os que mais se assemelham ao horizonte A de um Argissolo.



174

175 Fig. 3. Relação entre parâmetros hidráulicos e ρ . θ_{SAT} – conteúdo de água de solo saturado.176 LSD – limite superior de drenagem. LI – limite inferior de disponibilidade de água. K_{SAT} –

177 condutividade hidráulica de solo saturado.

178

179 *Cenários meteorológicos*

180

181 Sete cenários meteorológicos de déficit hídrico (DH) foram estabelecidos tomando

182 como base os dados registrados pela estação automática Santa Maria-A803 (OMM 86977),

183 localizada em Santa Maria/RS (29° 43' 30" S; 53° 43' 14" E; 103 m), Brasil, entre novembro

184 de 2017 e abril de 2018. Inicialmente foi preciso saber se as variáveis meteorológicas

185 medidas, combinadas com o cenário de solo mais restritivo (maior EC), criariam situações de

186 estresse hídrico ou não. Portanto, uma simulação do crescimento da soja foi feita combinando

187 os dados meteorológicos medidos com o cenário de EC com maior ρ (1,71 g cm^{-3}) do grupo

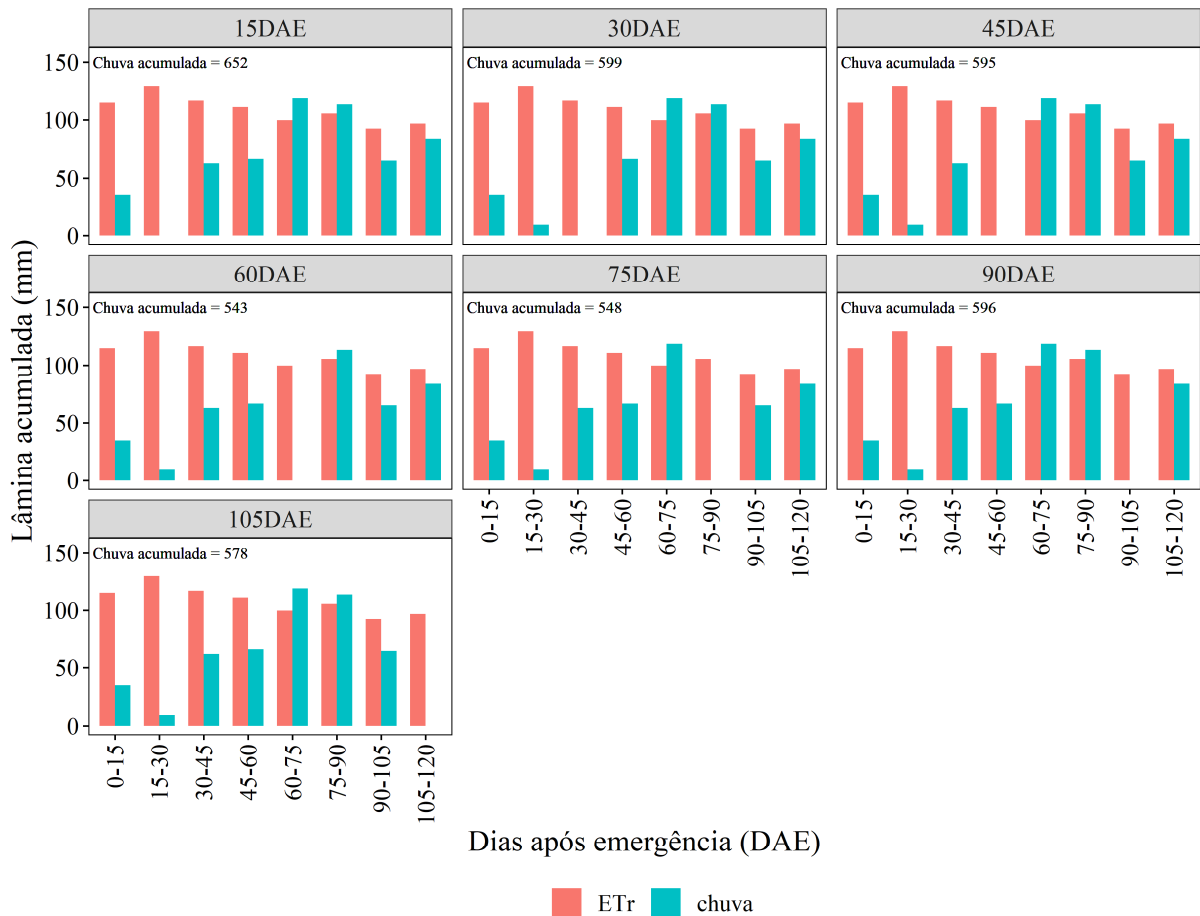
188 PHC (Fig. 2). Nessa simulação foram identificados períodos de estresse hídrico. Assim,

189 chuvas foram sendo adicionadas aos dados originais e a simulação repetida até que não

190 houvesse estresse hídrico em nenhum momento do período simulado.

191 Os cenários com DH foram estabelecidos removendo chuvas de 15 dias sucessivos dos
192 dados originais com as chuvas adicionadas. As chuvas foram removidas aos 15, 30, 45, 60,
193 75, 90 e 105 dias após emergência (DAE). Foi assumido que 15 dias seria suficiente para
194 submeter as plantas a DH porque numa condição de evapotranspiração da cultura de 3 mm d^{-1}
195 (baixa demanda), seria removido em torno de 90% da água disponível na camada onde há
196 maior concentração de raízes (0-20 cm). Com essa estratégia, as plantas foram submetidas a
197 condições de DH em diferentes momentos do ciclo de desenvolvimento (Fig. 4).

198 O DSSAT utiliza o método Priestley-Taylor (Priestley e Taylor, 1972) como padrão
199 para estimar evapotranspiração de referência (ETr) pois é o único método dentre as opções
200 que não necessita das variáveis velocidade do vento e umidade relativa. Como essas variáveis
201 foram medidas, o método Penman-Monteith/FAO-56 (Allen et al., 1998) foi selecionado para
202 estimar a ETr. As demais opções de simulação foram mantidas conforme o padrão do
203 DSSAT. As variáveis meteorológicas radiação solar, temperaturas máxima e mínima,
204 umidade relativa e velocidade do vento foram as mesmas em todos os cenários
205 meteorológicos.



206

207 Fig. 4. Evapotranspiração de referência (ETr) e chuva acumuladas a cada 15 dias durante o
 208 período de simulação em cada cenário meteorológico. A ETr total foi a mesma para todos os
 209 cenários (925 mm).

210

211 Parametrização do crescimento vegetal

212

213 O DSSAT possui um banco de dados com parâmetros genéticos de soja agrupados por
 214 hábito de crescimento (determinado ou indeterminado) e grupos de maturação. Entretanto, a
 215 calibração local para cultivares específicas aprimora o desempenho das simulações. Por esse
 216 motivo, a cultivar de soja NA 5909 RG (Nidera Sementes S.A), de hábito indeterminado e
 217 grupo de maturação 6.2 foi utilizada neste estudo. Os parâmetros genéticos da NA 5909 RG
 218 foram calibrados por Fensterseifer et al. (2017) (Anexo A) para a mesma região na qual os

219 dados meteorológicos foram usados neste estudo, e é uma cultivar amplamente utilizada no
220 Sul do Brasil. Para os parâmetros não calibrados, foram utilizados valores genéricos do
221 DSSAT correspondentes aos de uma cultivar de hábito de crescimento indeterminado e grupo
222 de maturação 6.

223 Além dos parâmetros genéticos, o CROPGRO necessita de alguns parâmetros de
224 manejo relacionados à implantação da cultura. A semeadura foi estabelecida para o dia
225 15/11/2017, data intermediária do período de semeadura recomendado pelo Zoneamento
226 Agrícola de Risco Climático para a soja no Rio Grande do Sul. As linhas de semeadura foram
227 espaçadas 45 cm entre si e alinhadas a 0° a partir do Norte. A profundidade de semeadura foi
228 5 cm com 30 sementes (e plantas emergidas) por m².

229

230 Opções de simulação

231

232 As simulações foram executadas com a versão 4.6 do DSSAT (Hoogenboom et al.,
233 2015). O modelo foi configurado para a simulação iniciar dia 15/11/2017 (data estabelecida
234 para semeadura) em condição de solo com 100% de água disponível ($\theta = \text{LSD}$). Também foi
235 estabelecido que o crescimento das plantas seria penalizado apenas pelos estresses hídrico,
236 gasoso e mecânico (relacionados a variação de θ), portanto sem a interferência de outros
237 fatores modelados pelo CROPGRO (N, P, K, simbiose, agrotóxicos, doenças e manejo da
238 cultura antecessora).

239

240 Análise dos dados

241

242 A sensibilidade do CROPGRO a mudanças no EC foi analisada usando as variáveis
243 rendimento de grãos (RG, Mg ha⁻¹), índice de área foliar máximo (IAF_{máx}, m² m⁻²) e

244 densidade de comprimento de raiz (DCR, cm cm⁻³). Também foi analisado como o momento
 245 de ocorrência do DH ao longo do ciclo da cultura (estágio fenológico) determina a associação
 246 que pode haver entre EC e ocorrência e severidade dos estresses hídrico, gasoso e mecânico.

247 A fim de expressar os dados de DCR em uma única variável, a DCR ponderada foi
 248 calculada a partir da DCR e da espessura de cada camada, conforme a Eq. (5).

249

$$DCR_p = \frac{\sum_{L=1}^n (DCR_L h_L)}{\sum_{L=1}^n h_L} \quad (5)$$

250

251 Em que DCR_p é a DCR ponderada para cada dia do período de simulação, h é a
 252 espessura da camada, n é o número de camadas e L é a camada considerada. Para expressar o
 253 máximo crescimento das raízes foi usado o maior DCR_p que ocorreu na simulação de
 254 crescimento. Para executar os cálculos e expressar os resultados nos arquivos de saída, o
 255 DSSAT subdividiu automaticamente o perfil de solo informado (Tabela 1) em 10 camadas (0-
 256 5, 5-15, 15-20, 20-30, 30-40, 40-50, 50-60, 60-70, 70-80 e 80-100 cm). Essas 10 camadas é
 257 que foram utilizadas na Eq. (5).

258 O fator de estresse hídrico é calculado conforme a Eq. (1) que resulta em um valor
 259 único para todo o perfil de solo. O fator de estresse gasoso é calculado para cada camada (Eq.
 260 (2)) e ponderado pelo comprimento de raiz, conforme a Eq. (6) (Jones et al., 2010) para
 261 compor um valor indicativo de estresse gasoso único para todo o perfil do solo.

262

$$Sg_p = \frac{\sum_{L=1}^n (Sg_L DCR_L h_L)}{\sum_{L=1}^n (DCR_L h_L)} \quad (6)$$

263

264 Em que S_{gp} é o fator de estresse gasoso ponderado para todo perfil e S_{gL} é fator de
265 estresse gasoso obtido pela Eq. (2) para uma camada L. Os fatores de estresse hídrico e
266 gasoso são calculados internamente pelo modelo.

267 O fator de estresse mecânico não é listado nos arquivos de saída. Por isso, ele foi
268 calculado conforme a Eq. (3) para todas as 10 camadas de solo formadas automaticamente
269 pelo CROPGRO. Para essas novas camadas, o valor dos parâmetros LSD e LI foram
270 calculados e fornecidos pelo CROPGRO usando interpolação linear dos valores inicialmente
271 informados (Tabela 1). Para se ter um indicador integrado de estresse mecânico para todo o
272 perfil de solo, o fator de estresse mecânico foi calculado usando a mesma estratégia de
273 ponderação descrita para o fator de estresse gasoso. Inicialmente foi calculado o fator de
274 estresse mecânico para cada camada (Eq. (3)) e depois foi feita a ponderação pela DCR. Foi
275 usada a Eq. (6) com a substituição de S_{gp} por S_{mp} (fator de estresse mecânico ponderado) e
276 de S_{gL} por S_{mL} (fator de estresse mecânico de cada camada obtido pela Eq. (3)).

277 Os fatores de estresse hídrico e gasoso foram analisados no intervalo entre a
278 emergência e a maturidade fisiológica e o fator de estresse mecânico foi analisado no
279 intervalo entre a emergência e o dia em que ocorreu o máximo DCR. Os fatores de estresse
280 foram categorizados nas classes 0,5-1,0 (baixo estresse) e $< 0,5$ (elevado estresse) com sua
281 respectiva frequência.

282

283 **Resultados**

284

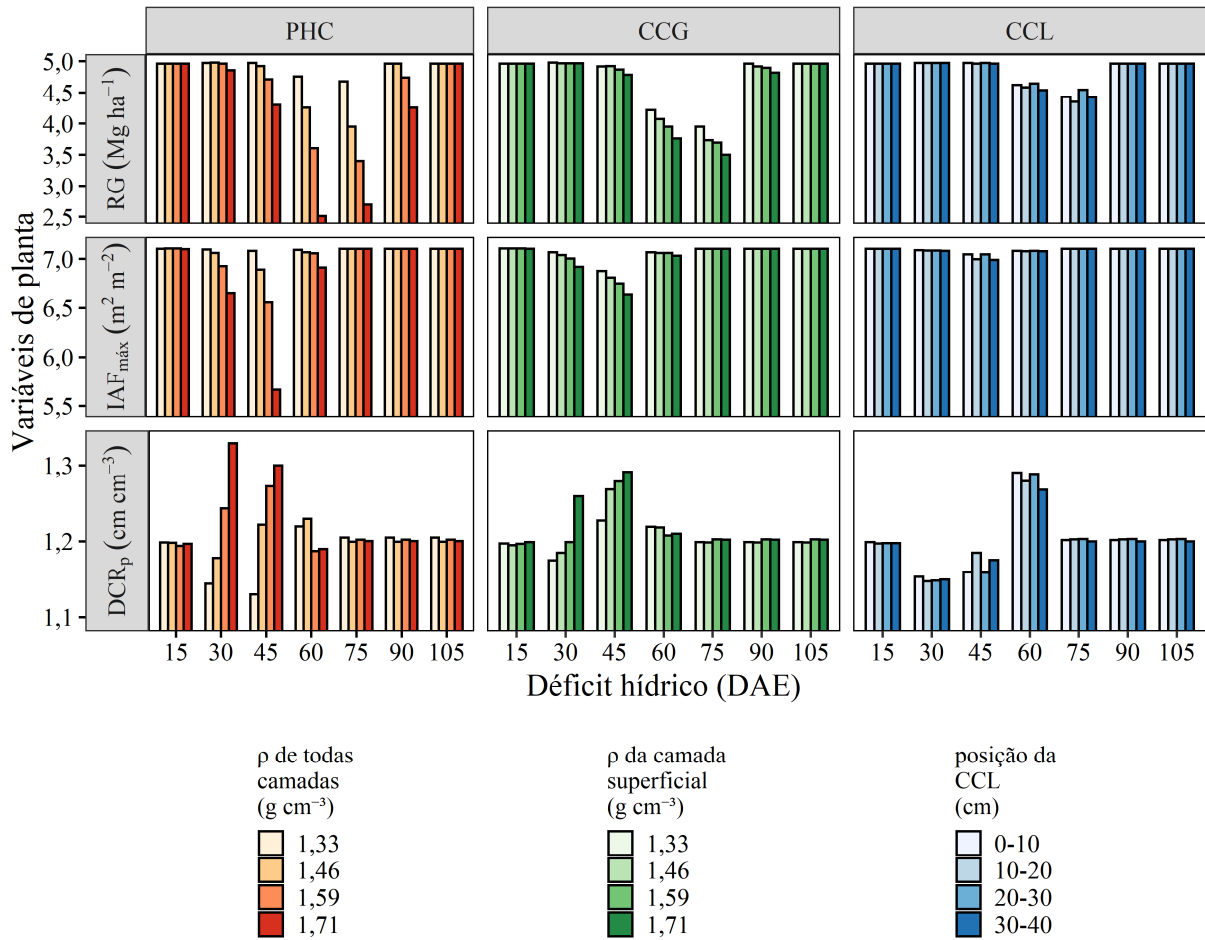
285 O CROPGRO não penalizou o crescimento e a produtividade da soja por aumento de
286 EC quando o DH ocorreu no início do estágio vegetativo (15 DAE) ou próximo à maturidade
287 fisiológica (105 DAE) (Fig. 5). Nos demais casos de DH, a associação entre EC e crescimento

288 e produtividade da soja predita foi diferente dependendo da variável de planta considerada e
289 do modo como a ρ foi distribuída no perfil do solo.

290 Para os grupos PHC e CCG, o modelo diminuiu RG e $IAF_{m\acute{a}x}$ com o aumento de EC
291 quando o DH ocorreu entre 30 e 90 DAE e entre 30 e 60 DAE, respectivamente (Fig.5). O
292 modelo aumentou a DCR_p com o aumento de EC quando o DH ocorreu entre 30 e 45 DAE,
293 mas associou irregularmente DCR_p com EC quando o DH ocorreu 60 DAE. Apesar de a
294 predição de DCR_p ter mudado nos demais cenários meteorológicos, a variação foi pouco
295 expressiva ($<0,5\%$) (Fig. 5). As predições de RG, $IAF_{m\acute{a}x}$ e DCR_p foram mais afetadas pela
296 mudança de EC no grupo PHC do que no CCG, independentemente do período de ocorrência
297 do DH (Fig. 5).

298 Para o grupo CCL, a mudança de RG, $IAF_{m\acute{a}x}$ e DCR_p com a mudança da profundidade
299 da camada compactada ocorreram em menos cenários meteorológicos comparado aos outros
300 grupos (entre 60 e 75 DAE para RG, 45 DAE para $IAF_{m\acute{a}x}$ e entre 45 e 60 DAE para DCR_p).
301 O modelo reduziu RG e o $IAF_{m\acute{a}x}$ quando a camada com maior EC passou da profundidade 0-
302 10 cm para 10-20 cm e da profundidade de 20-30 cm para 30-40 cm, mas aumentaram RG e o
303 $IAF_{m\acute{a}x}$ quando ela passou da posição 10-20 cm para 20-30 cm (Fig.5). O padrão de variação
304 de DCR_p foi similar ao de RG e $IAF_{m\acute{a}x}$ quando o DH ocorreu 60 DAE, mas foi inverso
305 quando o DH ocorreu 45 DAE. Além disso, as predições de RG, $IAF_{m\acute{a}x}$ e DCR_p foram menos
306 afetadas no grupo CCL do que nos grupos PHC e CCG.

307 O modelo indicou que o RG é a variável mais sensível à mudança do EC, pois ele foi
308 reduzido pelo aumento de EC em um número maior de cenários meteorológicos. Predições de
309 redução de RG com o aumento de EC chegaram a 47% e 11% para os grupos PHC (60 DAE)
310 e CCG (60 e 75 DAE), respectivamente. Com o aumento da profundidade da camada
311 compactada, as predições de redução de RG não passaram de 4% (75 DAE). Porém, essas
312 reduções são maiores que as reduções estimadas para $IAF_{m\acute{a}x}$ e DCR_p .



313

314 Fig. 5. Sensibilidade do crescimento e produtividade da soja simulada pelo CROPGRO para
 315 12 cenários de EC do solo combinados com sete cenários meteorológicos. PHC – perfil
 316 homogêneo compactado. CCG – camada com compactação gradual. CCL – camada com
 317 compactação local. DAE – dias após a emergência. RG – rendimento de grãos. IAF_{máx} –
 318 índice de área foliar máximo. DCR_p – densidade de comprimento de raiz ponderada.

319

320 O CROPGRO estimou a ocorrência de estresse hídrico para os grupos PHC e CCG
 321 quando o DH ocorreu entre 30 e 90 DAE e para o grupo CCL entre 45 e 75 DAE em ambas as
 322 classes (elevado estresse e baixo estresse) (Fig. 6). O modelo indicou ocorrência de estresse
 323 mecânico na classe baixo estresse em todos os cenários meteorológicos em todos os cenários
 324 de EC. Diferentemente, o estresse mecânico na classe elevado estresse foi estimado apenas
 325 quando o DH ocorreu entre 30 e 45 DAE, independentemente do cenário de EC. Em relação

326 ao estresse gasoso, o modelo considerou que ele não ocorreu nas combinações dos cenários
327 meteorológicos e de solo simulados.

328 O modelo indicou que o EC afeta mais o estresse hídrico do que o estresse mecânico
329 para a classe elevado estresse, pois o estresse hídrico ocorreu em mais cenários
330 meteorológicos e em maior intensidade (Fig. 6). Com relação aos grupos de EC, a frequência
331 e intensidade do estresse hídrico previstas aumentou na sequência CCL, CCG e PHC.

332 Nos cenários em que o modelo indicou redução de RG (DH entre 45 e 90 DAE
333 combinados com os grupos PHC e CCG), a redução de RG e o aumento do estresse hídrico da
334 classe elevado estresse estiveram, respectivamente, inversa e diretamente associados com o
335 aumento de EC (Fig. 5 e 6). Por outro lado, nos cenários em que o modelo indicou redução de
336 DCR_p (DH entre 30 e 45 DAE combinados com os grupos PHC e CCG), o modelo simulou
337 aumento de estresse mecânico da classe elevado estresse e de DCR_p , ambos diretamente
338 associados com o aumento de EC (Fig. 5 e 6).

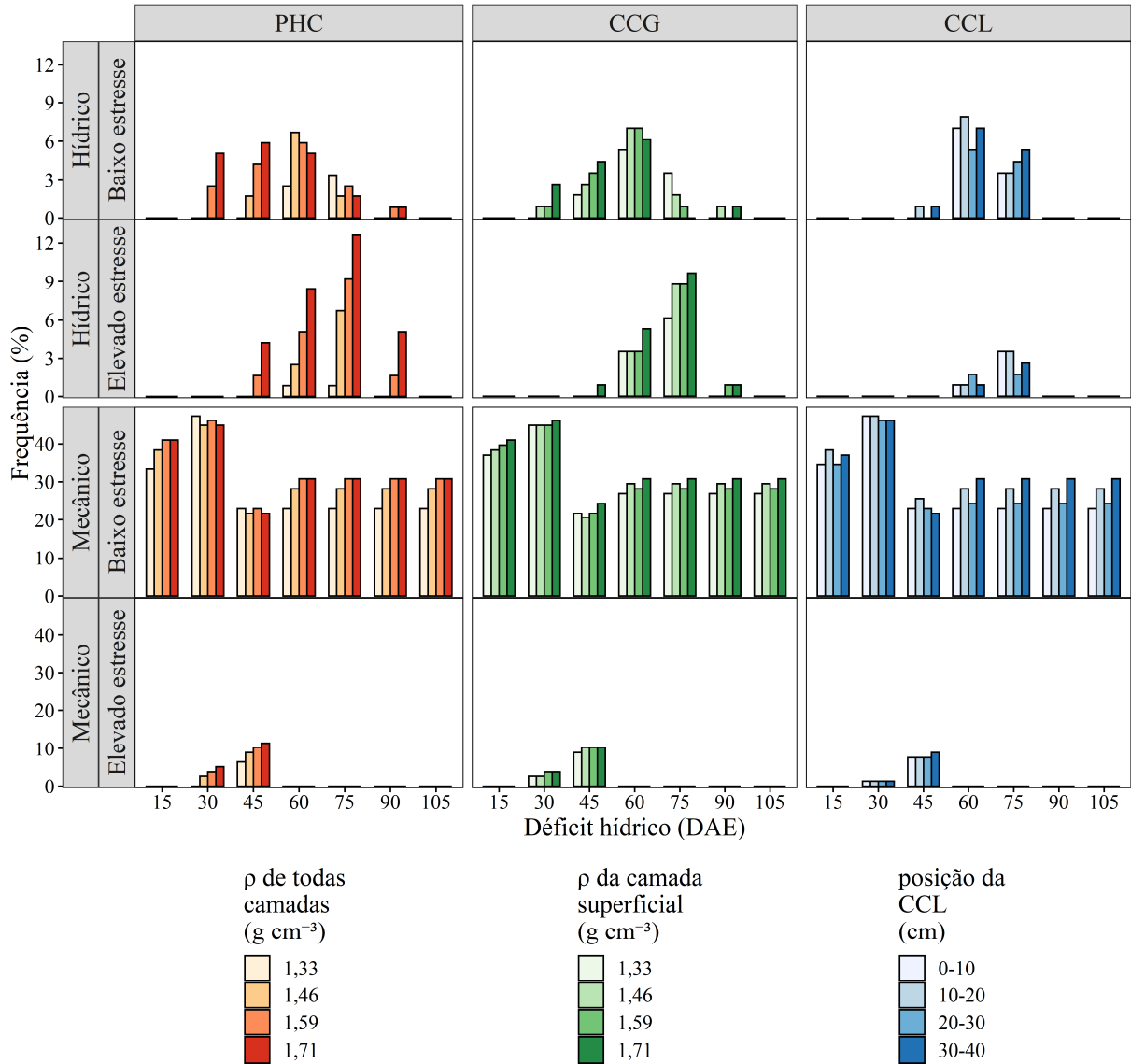


Fig. 6. Frequências das classes baixo estresse (0,5-1,0) e elevado estresse (< 0,5) dos fatores de estresse hídrico e mecânico simulados pelo CROPGRO para 12 cenários de EC do solo combinados com sete cenários meteorológicos. PHC – perfil homogêneo compactado. CCG – camada com compactação gradual. CCL – camada com compactação local. DAE – dias após a emergência.

345 **Discussão**

346

347 O CROPGRO detectou as circunstâncias (combinações entre cenários de EC, cenários
348 meteorológicos e estágio fenológico da planta) em que não houve interferência de EC no
349 crescimento e produtividade da soja. O CROPGRO não penalizou o crescimento e
350 produtividade da soja com o aumento de EC nos cenários meteorológicos com DH aos 15 e
351 105 DAE (Fig. 5), pois eles coincidiram com estágios fenológicos (início vegetativo e final
352 reprodutivo), nos quais a soja é menos sensível ao DH (Sentelhas et al., 2015).

353 As circunstâncias em que o CROPGRO não penalizou o crescimento e produtividade
354 das plantas com o aumento de EC reforça duas conclusões. Uma delas é que, para saber como
355 será a resposta das plantas à compactação é indispensável considerar a dinâmica
356 meteorológica e fenológica da planta. Por isso, conhecer apenas como a compactação afeta as
357 propriedades físicas do solo é insuficiente para indicar como a compactação afeta o
358 crescimento e produtividade das plantas, embora muitas tentativas nesse sentido tenha sido
359 feitas via indicadores de qualidade física do solo (Benjamin et al., 2003; Letey, 1985; Silva et
360 al., 1994). Outra conclusão é que a modelagem dos processos que inter-relacionam
361 componentes do solo, da atmosfera e das plantas permite prever em quais combinações
362 desses componentes e em que medida as plantas podem ser prejudicadas pelo aumento de EC.

363 O modelo foi mais sensível ao efeito de EC sobre RG do que sobre o $IAF_{máx}$ e DCR_p
364 (Fig. 5). Esse resultado diverge de evidências de que um solo com maior EC é mais restritivo
365 ao crescimento radicular do que ao rendimento de grãos. Trabalhos desenvolvidos por
366 Bengough (1997) e Bengough et al. (2006), mostram redução na taxa de alongação radicular
367 com o aumento de RP. Como o aumento de RP está associado ao aumento de ρ (Busscher,
368 1990), a conclusão que o aumento de EC reduz o crescimento radicular parece óbvia.
369 Entretanto, as simulações com o CROPGRO indicam que a relação entre aumento de EC e

370 restrição ao crescimento radicular pode ser mais ocasional do que óbvia, pois ela ocorreu
371 apenas sob combinações específicas de DH com estágio fenológico (60 DAE, Fig. 5). As
372 evidências de aumento de DCR com o aumento de EC (Glab, 2007; Moraes et al., 2019),
373 DCR não associada com EC (Beulter e Centurion, 2004) e redução de DCR com o aumento
374 de EC (Bengough, 1997; Bengough et al. 2006) revelam um padrão de associações irregulares
375 decorrentes de relação ocasional entre DCR e EC.

376 A independência entre crescimento de raízes e produtividade é reconhecida há muito
377 tempo (Taylor e Brar, 1991). O CROPGRO indica que essa independência ocorre mesmo com
378 mudança de EC (Fig. 5). Isso destaca a importância do uso de modelos de crescimento vegetal
379 para avaliar como aconteceria a interferência de EC sobre o crescimento de raízes e a
380 produtividade. O menor crescimento de raízes provocado por aumento de EC pode estar
381 associado à menor RG (menos raízes = menor acessibilidade a recursos (Keller et al., 2019)),
382 mas não é um componente determinante da produtividade em todas as situações. Por isso,
383 observações de redução de RG associadas com menor crescimento radicular em solos
384 compactados (Moraes et al., 2019; Sivarajan et al., 2018) são coerentes quando as condições
385 meteorológicas e de planta são capazes de explicá-las.

386 As variáveis RG, $IAF_{máx}$ e DCR_p foram mais sensíveis à mudança de EC e dos
387 cenários meteorológicos para os grupos PHC e CCG do que para o grupo CCL (Fig. 5). Esse
388 resultado pode indicar que a sensibilidade do modelo para identificar o efeito do EC é menor
389 quando camadas de solo pouco espessas estiverem compactadas em um perfil homogêneo.
390 Todavia, esse comportamento precisa ser mais investigado, especialmente para perfis de solo
391 reais, a fim de identificar a sensibilidade do modelo à ocorrência de camadas compactadas
392 ocasionadas pelos sistemas de uso e manejo do solo como sistema plantio direto, integração
393 lavoura-pecuária, tráfego de máquinas, etc.

394 A sensibilidade do CROPGRO permitiu identificar em quais situações (combinações
395 entre cenários de EC, cenários meteorológicos e fase de desenvolvimento da planta) a
396 mudança de EC interferiu na estimativa dos estresses hídrico, gasoso e mecânico e em quais
397 situações não. O CROPGRO pareceu considerar consistentemente o balanço entre suprimento
398 e demanda para definir os estresses hídrico, gasoso e mecânico com mudança de EC (Fig. 1) e
399 das condições meteorológicas (Fig. 6). Entretanto, sua abordagem para estimativa do estresse
400 mecânico (Eq. 3) não considera o efeito da ρ sobre a resistência mecânica do solo (Bengough,
401 1997; Gubiani et al., 2013). Assim, estudos de campo serão úteis para verificar se o
402 CROPGRO simula adequadamente a sensibilidade das plantas à mudança de EC.

403 A caracterização da sensibilidade do CROPGRO realizada nesse estudo, ainda que
404 para situações hipotéticas de solo, mostra que o modelo tem grande potencial como
405 ferramenta para auxiliar nas decisões sobre o manejo. Com o modelo calibrado e validado
406 será possível prever a redução na produtividade da soja causada pela compactação em
407 qualquer condição meteorológica. Também será possível avaliar se haverá ganho de
408 produtividade com a redução de EC, por meio da escarificação, por exemplo, em diferentes
409 cenários meteorológicos ou sob irrigação. Portanto, o CROPGRO pode auxiliar na
410 identificação das situações em que a compactação limita o potencial produtivo das culturas e
411 na identificação da melhor estratégia para mitigação dos danos causados pela compactação.

412

413 **Conclusão**

414

415 A sensibilidade dos parâmetros de solo do CROPGRO à compactação do solo permite
416 ao modelo fazer previsões do risco de a compactação do solo prejudicar o crescimento e
417 produtividade das plantas. O modelo mostra que o aumento no estado de compactação do solo
418 não necessariamente causa redução no crescimento e produtividade da soja. Além disso,

419 revela que a redução no crescimento e produtividade da soja depende da combinação de
420 fatores meteorológicos (déficit hídrico), fatores fisiológicos (estágio fenológico no qual o
421 déficit hídrico ocorre) e do estado de compactação do solo.

422 Como os estresses hídrico, gasoso e mecânico preditos pelo CROPGRO dependem,
423 em grande medida, do balanço de componentes externos ao solo (como chuva,
424 evapotranspiração, estágio fenológico da planta, etc.), o modelo revela quão ocasional pode
425 ser a relação entre o estado de compactação e o crescimento e produtividade das plantas.
426 Portanto, o CROPGRO é uma ferramenta útil para auxiliar agricultores e gestores na
427 identificação de estratégias de manejo que garantam a conservação do solo e a maximização
428 da produção das culturas.

429

430 **Agradecimento**

431

432 Esse trabalho foi financiado pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de
433 Nível Superior (CAPES) e pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e
434 Tecnológico (CNPq).

435

436 **Referências**

437

438 Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M., 1998. Crop Evapotranspiration: guidelines for
439 computing crop water requirements (FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56). FAO,
440 Rome. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2010.12.001>

441

442 Bengough, A.G., 1997. Modelling rooting depth and soil strength in a drying soil profile. J.
443 Theor. Biol. 186, 327–338. <https://doi.org/10.1006/jtbi.1996.0367>

- 444 Bengough, A.G., Bransby, M.F., Hans, J., McKenna, S.J., Roberts, T.J., Valentine, T.A.,
445 2006. Root responses to soil physical conditions; growth dynamics from field to cell. *J.*
446 *Exp. Bot.* 57, 437–447. <https://doi.org/10.1093/jxb/erj003>
447
- 448 Benjamin, J.G., Nielsen, D.C., Vigil, M.F., 2003. Quantifying effects of soil conditions on
449 plant growth and crop production. *Geoderma* 116, 137–148.
450 [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(03\)00098-3](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(03)00098-3)
451
- 452 Beulter, A.N., Centurion, J.F., 2004. Compactação do solo no desenvolvimento radicular e na
453 produtividade da soja. *Pesqui. Agropecuária Bras.* 39, 581–588.
454 <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2004000600010>
455
- 456 Boote, K.J., Sau, F., Hoogenboom, G., Jones, J.W., 2008. Experience with water balance,
457 evapotranspiration, and predictions of water stress effects in the CROPGRO model, in:
458 Ahuja, L.R., Reddy, S.A., Saseendran, S.A., Yu, Q. (Eds.), *Response of Crops to Limited*
459 *Water: Understanding and Modeling Water Stress Effects on Plant Growth Processes.*
460 *ASA-CSSA-SSSA, Madison, WI, pp. 59–103.*
461
- 462 Busscher, W.J., 1990. Adjustment of flat-tipped penetrometer resistance data to a common
463 water content. *Trans. ASAE* 33, 0519–0524. <https://doi.org/10.13031/2013.31360>
464
- 465 Fensterseifer, C.A., Streck, N.A., Baigorria, G.A., Timilsina, A.P., Zanon, A.J., Cera, J.C.,
466 Rocha, T.S.M., 2017. On the number of experiments required to calibrate a cultivar in a
467 crop model: The case of CROPGRO-soybean. *F. Crop. Res.* 204, 146–152.
468 <https://doi.org/10.1016/J.FCR.2017.01.007>

- 469 Glab, T., 2007. Effect of soil compaction on root system development and yields of tall
470 fescue. *Int. Agrophysics* 21, 233–239.
471
- 472 Graves, A.R., Morris, J., Deeks, L.K., Rickson, R.J., Kibblewhite, M.G., Harris, J.A.,
473 Farewell, T.S., Truckle, I., 2015. The total costs of soil degradation in England and Wales.
474 *Ecol. Econ.* 119, 399–413. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2015.07.026>
475
- 476 Gubiani, P.I., Mentges, L.R., 2020. Using root water uptake estimated by hidrological model
477 to evaluate the last limiting water range. *Rev. Bras. Ciência do Solo* 44.
478 <https://doi.org/10.36783/18069657rbc20190096>
479
- 480 Gubiani, P.I., Reichert, J.M., Reinert, D.J., 2013. Indicadores hídrico-mecânicos de
481 compactação do solo e crescimento de plantas. *Rev. Bras. Ciência do Solo* 37, 1–10.
482 <https://doi.org/10.1590/S0100-06832013000100001>
483
- 484 Hill, J.N.S., Sumner, M.E., 1967. Effect of bulk density on moisture characteristics of soils.
485 *Soil Sci.* 103, 234–238. <https://doi.org/10.1097/00010694-196704000-00002>
486
- 487 Hoogenboom, G., Jones, J.W., Boote, K.J., 1992. Modeling growth, development, and yield
488 of grain legumes using soygro, pnuogro, and beangro: a review. *Trans. Am. Soc. Agric.*
489 *Eng.* 35, 2043–2056. <https://doi.org/10.13031/2013.28833>
490
- 491 Hoogenboom, G., Jones, J.W., Wilkens, P.W., Porter, C.H., Boote, K.J., Hunt, L.A., Singh,
492 U., Lizaso, J.I., White, J.W., Uryasev, O., Ogoshi, R., Koo, J., Shelia, V., Tsuji, G.Y.,
493 2015. *Desion Support System for Agrotechnology Transfer System (DSSAT) Version 4.6.*

- 494 Jones, J., Hoogenboom, G., Porter, C., Boote, K., Batchelor, W., Hunt, L., Wilkens, P.,
495 Singh, U., Gijsman, A., Ritchie, J., 2003. The DSSAT cropping system model. *Eur. J.*
496 *Agron.* 18, 235–265. [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(02\)00107-7](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(02)00107-7)
497
- 498 Jones, J.W., Hoogenboom, G., Wilkens, P.W., Porter, C.H., Tsuji, G.Y., 2010. DSSAT
499 Version 4.5. Volume V4: Crop Model Documentation., Decision Support System for
500 Agrotechnology Transfer Version 4.0.
501
- 502 Keller, T., Sandin, M., Colombi, T., Horn, R., Or, D., 2019. Historical increase in agricultural
503 machinery weights enhanced soil stress levels and adversely affected soil functioning. *Soil*
504 *Tillage Res.* 194, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104293>
505
- 506 Kojima, Y., Heitman, J.L., Sakai, M., Kato, C., Horton, R., 2018. Bulk density effects on soil
507 hydrologic and thermal characteristics: A numerical investigation. *Hydrol. Process.* 32,
508 2203–2216. <https://doi.org/10.1002/hyp.13152>
509
- 510 Letey, J., 1985. Relationship between soil physical properties and crop production, in:
511 Stewart, B.A. (Ed.), *Advances in Soil Science*. Springer New York, New York, NY, p.
512 320. <https://doi.org/10.1007/978-1-4612-5046-3>
513
- 514 Marcolin, C.D., Klein, V.A., 2011. Determinação da densidade relativa do solo por uma
515 função de pedotransferência para a densidade do solo máxima. *Acta Sci. Agron.* 33, 349–
516 354. <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v33i2.6120>

- 517 Moraes, M.T., Debiasi, H., Franchini, J.C., Bonetti, J. de A., Levien, R., Schnepf, A., Leitner,
518 D., 2019. Mechanical and hydric stress effects on maize root system development at
519 different soil compaction levels. *Front. Plant Sci.* 10, 1–18.
520 <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01358>
521
- 522 Priestley, C.H.B., Taylor, R.J., 1972. On the assessment of surface heat flux and evaporation
523 using large-scale parameters. *Mon. Weather Rev.* 100, 81–92.
524 [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1972\)100<0081:OTAOSH>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1972)100<0081:OTAOSH>2.3.CO;2)
525
- 526 Ritchie, J.T., 1998. Soil water balance and plant water stress, in: Tsuji, G.Y., Hoogenboom,
527 G., Thornton, P.K. (Eds.), *Understanding Options for Agricultural Production, Systems*
528 *Approaches for Sustainable Agricultural Development*. Springer Netherlands, Dordrecht,
529 pp. 41–54. <https://doi.org/10.1007/978-94-017-3624-4>
530
- 531 Santos, H.G. dos, Carvalho Júnior, W., Dart, R.O., Áglio, M.L.D., Sousa, J.S., Pares, J.G.,
532 Fontana, A., Martins, A.L.S., Oliveira, A.P.O., 2011. O novo mapa de solos do Brasil:
533 legenda atualizada, Documentos 130.
534
- 535 Santos, H.G. dos, Jacomini, P.K.T., Anjos, L.H.C. dos, Oliveira, V.Á. De, Lumbreras, J.F.,
536 Coelho, M.R., Almeida, J.A. De, Cunha, T.J.F., Oliveira, J.B., 2018. *Sistema Brasileiro de*
537 *Classificação de Solos*, 5th ed. EMBRAPA, Brasília, DF.
538
- 539 Schaap, M.G., Leij, F.J., Van Genuchten, M.T., 2001. Rosetta: A computer program for
540 estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions. *J. Hydrol.*
541 251, 163–176. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(01\)00466-8](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(01)00466-8)

- 542 Sentelhas, P.C., Battisti, R., Câmara, G.M.S., Farias, J.R.B., Hampf, A.C., Nendel, C., 2015.
543 The soybean yield gap in Brazil – magnitude, causes and possible solutions for sustainable
544 production. *J. Agric. Sci.* 153, 1394–1411. <https://doi.org/10.1017/S0021859615000313>
545
- 546 Siad, S.M., Iacobellis, V., Zdruli, P., Gioia, A., Stavi, I., Hoogenboom, G., 2019. A review of
547 coupled hydrologic and crop growth models. *Agric. Water Manag.* 224, 105746.
548 <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105746>
549
- 550 Silva, A.P., Kay, B.D., Perfect, E., 1994. Characterization of the Least Limiting Water Range
551 of Soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58, 1775.
552 <https://doi.org/10.2136/sssaj1994.03615995005800060028x>
553
- 554 Šimůnek, J., M. Šejna, a, Saito, H., Sakai, M., Genuchten, M.T. Van, 2013. The HYDRUS-
555 1D Software Package for Simulating the Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes
556 in Variably Saturated Media, Version 4.17, HYDRUS Software Series 3, 343.
557
- 558 Sivarajan, S., Maharlooei, M., Bajwa, S.G., Nowatzki, J., 2018. Impact of soil compaction
559 due to wheel traffic on corn and soybean growth, development and yield. *Soil Tillage Res.*
560 175, 234–243. <https://doi.org/10.1016/j.still.2017.09.001>
561
- 562 Soil Survey Staff, 2014. *Keys to Soil Taxonomy*, 12th ed. USDA-Natural Resources
563 Conservation Service, Washington, DC.
564
- 565 Taylor, H.M., Brar, G.S., 1991. Effect of soil compaction on root development. *Soil Tillage*
566 *Res.* 19, 111–119. [https://doi.org/10.1016/0167-1987\(91\)90080-H](https://doi.org/10.1016/0167-1987(91)90080-H)

- 567 van Genuchten, M.T., 1980. A Closed-form Equation for Predicting Hydraulic Conductivity
568 of Unsaturated Soils. Soil Sci. Soc. Am. J.
569 <https://doi.org/doi:10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x>
570
- 571 Wilkens, P.W., Hoogenboom, G., Porter, C.H., Jones, J.W., Uryasev, O., 2004. Decision
572 Support System for Agrotechnology Transfer Version 4.0. Volume 2. DSSAT v4: Data
573 Management and Analysis Tools.

Anexo A

Parâmetros genéticos de espécie, ecótipo e cultivar calibradas por Fensterseifer et al. (2017) para a cultivar de soja NA 5909 RG para o Rio Grande do Sul.

Categoria do parâmetro	Parâmetro	Definição	Valor
Espécie	TB1	Temperatura vegetativa basal (C°)	10
	TB2	Temperatura basal reprodutiva inicial (C°)	8
	TO1	Temperatura ótima basal vegetativa (C°)	29
	TO2	Temperatura ótima basal reprodutiva inicial (C°)	28
Ecótipo	PL-EM	Tempo entre semeadura e emergência (V0) (dia termal)	3,4
Cultivar	CSDL	Comprimento crítico de dia curto abaixo do qual não há efeito do comprimento do dia no progresso do desenvolvimento reprodutivo (hora)	12,71
	PPSEN	Inclinação da resposta relativa do desenvolvimento ao fotoperíodo com o tempo (hora ⁻¹)	0,31
	EM-FL	Tempo entre emergência e floração (R1) (dia fototermal)	23,4
	FL-SH	Tempo entre primeira flor e primeiro legume (R3) (dia fototermal)	5,0
	FL-SD	Tempo entre primeira flor e primeira semente (R5) (dia fototermal)	11,6
	SD-PM	Tempo entre primeira semente (R5) e maturidade fisiológica (R7) (dia fototermal)	34,1
	FL-LF	Tempo entre primeira flor (R1) e final da expansão foliar (dia fototermal)	26,0
	LFMAX	Taxa máxima de fotossíntese foliar a 30 °C, 350 vpm CO ₂ , e elevada luminosidade (mgCO ₂ m ⁻² s ⁻¹)	1,0
	SLAVR	Área foliar específica sob condições normais de crescimento (cm ² g ⁻¹)	355
	SIZELF	Tamanho máximo da folha completa (três folíolos) (cm ²)	220
	WTPSD	Peso máximo da semente (g)	0,17

1 **3 MANUSCRITO 2 – AVALIAÇÃO DA CAPACIDADE DO CROPGRO PARA**
2 **PREDIÇÃO DO EFEITO DE COMPACTAÇÃO DO SOLO NO CRESCIMENTO E**
3 **PRODUTIVIDADE DA SOJA**

4

5 (Manuscrito submetido à revista Soil and Tillage Research)

6

7 **Destaques**

8 - CROPGRO explica como as condições meteorológicas afetam a associação entre
9 compactação do solo e produtividade das plantas.

10 - O CROPGRO foi capaz de detectar a associação entre compactação do solo e crescimento
11 e produtividade da soja.

12 - O submodelo que o CROPGRO usa para calcular o estresse mecânico precisa ser
13 aprimorado.

14

15 **Resumo**

16

17 A modelagem do crescimento e produtividade das plantas é uma abordagem
18 promissora para prever o risco de perdas de produtividade devido à compactação do solo.

19 A compactação do solo afeta vários processos físicos no solo, como o transporte de água,
20 gases e calor e a dinâmica da resistência mecânica. O CROPGRO é um modelo de

21 crescimento de plantas sensível ao efeito da compactação nos estresses hídrico, gasoso e
22 mecânico, mas ele estima estresse mecânico em função do conteúdo de água do solo,

23 desconsiderando parâmetros mecânicos mais bem relacionados à mudança no estado de
24 compactação do solo (EC). Considerando que haverá aumento do uso de modelos para

25 prever o impacto negativo que a compactação do solo pode causar na produção das
26 culturas, o objetivo desse estudo foi avaliar a capacidade do CROPGRO prever a

27 associação da compactação com o crescimento e produtividade da soja em dois cultivos
28 (2016/17 e 2017/18) a campo, sob três EC: compactado (CO), não perturbado (NP) e
29 escarificado (ES). O crescimento de raízes, folhas e a produtividade de grãos da soja foram
30 medidos e comparados com as respectivas estimativas do CROPGRO. O modelo fez
31 previsões acuradas para índice de área foliar ($RMSE = 0,651 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$) e produtividade
32 ($RMSE = 0,305 \text{ Mg ha}^{-1}$). Entretanto, a densidade de comprimento de raiz (*DCR*) estimada
33 pelo CROPGRO foi semelhante em todos os manejos, mas a *DCR* medida foi maior nos
34 manejos CO e ES. A comparação do submodelo de estresse mecânico do CROPGRO com
35 modelo que estima estresse mecânico em função da resistência mecânica do solo (proposto
36 recentemente por Moraes et al. (2018)), indica que o CROPGRO estaria subestimando o
37 estresse mecânico. Embora o CROPGRO tenha feito previsão satisfatória do efeito da
38 compactação na produtividade de grãos e no índice de área foliar, novos estudos são
39 necessários para avaliar se o submodelo do CROPGRO de estimativa do estresse mecânico
40 precisa ser melhorado para aumentar a confiabilidade do modelo para predizer o impacto da
41 compactação do solo na produção das culturas.

42

43 **Palavras-chave:** estresse mecânico, modelagem, crescimento radicular

44

45 **Introdução**

46

47 A crescente demanda por alimentos, fibra e energia (FAO/OECD, 2018; Gouel e
48 Guimbard, 2019) exige que as estratégias de manejo das áreas agrícolas maximizem o
49 potencial produtivo das plantas e minimizem a degradação do solo. Muitas operações de
50 manejo, como semeadura, aplicação de pesticidas, colheita e transporte, são realizadas por
51 sistemas mecanizados em grande parte das áreas agrícolas (Keller et al., 2019), que são a

52 principal causa da compactação do solo (Hamza e Anderson, 2005). Estimativas realizadas
53 para Inglaterra e País de Gales indicam que perdas de produtividade das culturas
54 compreendem mais de 40% do total dos danos ambientais causados pela compactação do
55 solo (Graves et al., 2015). Por isso, previsões sobre a complexa associação entre
56 compactação e produtividade das plantas são necessárias para planejar estratégias de
57 manejo sustentáveis.

58 As estratégias de previsão usando indicadores baseados nas propriedades físicas do
59 solo (Letey, 1985; Arvidsson e Håkansson, 1991; Silva et al., 1994; Leão et al., 2006) não
60 provêm uma relação confiável entre compactação do solo e resposta da planta (Gubiani et
61 al., 2013; van Lier e Gubiani, 2015; Lozano et al., 2016). Isso ocorre porque a relação entre
62 aumento do estado de compactação do solo (EC) e redução do crescimento e produtividade
63 das plantas não é regular (Glab, 2007; Gubiani et al., 2013; Sivarajan et al., 2018). Essa
64 irregularidade é consequência do efeito que variáveis meteorológicas, como chuva e
65 evapotranspiração, exercem sobre a associação entre crescimento e produtividade das
66 plantas e compactação (Silva et al., 2000; Conte et al., 2009; Gubiani et al., 2014). Nesse
67 sentido, a modelagem do crescimento de plantas é a estratégia mais promissora para
68 prever quando e quanto as plantas são afetadas pela compactação do solo.

69 Os modelos hidrológicos consideram que as mudanças no balanço hídrico causadas
70 pela compactação afetam apenas a transpiração das plantas (Feddes, 1978; van Lier et al.,
71 2008). Modelos como Hydrus (Šimůnek et al., 2013) e Soil-Water-Atmosphere-Plant
72 (Kroes et al., 2017), por exemplo, usam funções de redução para restringir a extração de
73 água pelas raízes em condições de déficit hídrico ou déficit de oxigênio. Entretanto, esses
74 modelos e muitos modelos de crescimento de raiz (Jones et al., 1991; Leitner et al., 2010;
75 Kalogiros et al., 2016) desconsideram efeito da restrição mecânica do solo na distribuição
76 das raízes no perfil, o que limita a capacidade desses modelos prever associações entre

77 compactação e crescimento das plantas. Uma alternativa que incorpora estratégias para
 78 estimar os efeitos dos estresses hídrico, gasoso e mecânico no crescimento e produtividade
 79 das plantas é o modelo CROPGRO da plataforma DSSAT (*Decision Support System for*
 80 *Agrotechnology Transfer*) (Jones et al., 2003).

81 O CROPGRO é um modelo baseado em processos de crescimento vegetal com sub-
 82 rotinas que simulam o desenvolvimento da cultura e os balanços de carbono, nitrogênio e
 83 hídrico (Boote et al., 2008). O modelo opera em um perfil unidimensional na direção
 84 vertical, assumindo que cada camada empilhada é horizontalmente homogênea.
 85 Informações da superfície e de cada camada do solo são usadas para calcular componentes
 86 do balanço hídrico. Neste estudo, os processos mais relevantes simulados pelo CROPGRO
 87 são os estresses hídrico, gasoso e mecânico. Os estresses são estimados conforme as Eqs.
 88 (1), (2) e (3) (Boote et al., 2008; Jones et al., 2010).

89

$$Sh = \frac{Ta}{Tp} \quad (1)$$

$$Sg = \begin{cases} 1 & \text{se } (\theta_{SAT} - \theta) > \beta_{MIN} \\ \frac{\theta_{SAT} - \theta}{\beta_{MIN}} & \text{se } (\theta_{SAT} - \theta) \leq \beta_{MIN} \end{cases} \quad (2)$$

$$Sm = \begin{cases} 1 & \text{se } (\theta - LI) \geq 0,25(LSD - LI) \\ \frac{\theta - LI}{0,25(LSD - LI)} & \text{se } (\theta - LI) < 0,25(LSD - LI) \text{ e } \theta > LI \\ 0 & \text{se } \theta \leq LI \end{cases} \quad (3)$$

90

91 Em que Sh , Sg e Sm são os fatores de estresse hídrico, gasoso e mecânico
 92 respectivamente, que variam de 1 (sem estresse) a 0 (máximo estresse), Ta é transpiração
 93 atual (mm), Tp é a transpiração potencial (mm), θ é o conteúdo de água do solo ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$),

94 θ_{SAT} é o conteúdo de água na saturação ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$), β_{MIN} é a porosidade mínima de aeração
 95 ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$), LSD é o limite superior de drenagem (θ quando o potencial matricial é -10
 96 kPa) e LI é o limite inferior de disponibilidade de água (θ quando o potencial matricial é $-$
 97 1.500 kPa). Ta será menor que Tp quando a quantidade de água extraída pelas raízes for
 98 menor que a demanda transpirativa. A quantidade de água extraída pelas raízes é o
 99 somatório da quantidade de água extraída em cada camada (AEC , mm). AEC é calculada
 100 pelo CROPGRO por meio de uma simplificação da equação de fluxo radial em direção as
 101 raízes (Jones et al., 2010), conforme a Eq. (4).

102

$$AEC_L = CI \frac{e^{\min\{[C2_L(\theta_L - LI)], 40\}}}{C3 - \ln DCR_L} \quad (4)$$

103

104 Em que CI e $C3$ são coeficientes de ajuste da equação ($0,00267$ e $6,68$
 105 respectivamente (Ritchie, 1998)), $C2$ é um parâmetro calculado internamente pelo
 106 CROPGRO em função de LI , DCR é a densidade de comprimento de raiz e L é a camada de
 107 solo.

108 O aumento de EC causa redução de θ_{SAT} , aumento de LI e pode causar aumento
 109 (baixa para média densidade do solo, ρ) ou redução (média para elevada ρ) de LSD (Hill e
 110 Sumner, 1967; Silva et al., 1994; Kojima et al., 2018). Na Eq. (2) a diminuição de θ_{SAT}
 111 favorece a diminuição de Sg , portanto, favorece o aumento do estresse gasoso. Nas Eqs. (3)
 112 e (4) o aumento de LI favorece a diminuição de Sh e Sm , ou seja, favorece o aumento do
 113 estresse hídrico e mecânico. Entretanto, a mudança de θ_{SAT} , LSD e LI causada por mudança
 114 de EC não garante estresses mais frequentes ou mais severos para a planta, mas demonstra
 115 o mecanismo pelo qual o CROPGRO é sensível à mudança de EC.

116 A estimativa dos fatores de estresse hídrico, gasoso e mecânico é uma tentativa de
 117 quantificação do balanço entre suprimento e demanda da planta, em que um suprimento

118 menor que a demanda caracteriza uma situação de estresse. A ocorrência dos estresses
 119 hídrico, gasoso e mecânico é relacionada ao conteúdo de água do solo. Assim, esses
 120 estresses são regulados por processos interconectados que ocorrem no continuum solo-
 121 planta-atmosfera que determinam θ , e as estimativas dos estresses hídrico, gasoso e
 122 mecânico pelo CROPGRO são diretamente relacionadas a θ . Embora o CROPGRO não use
 123 um método robusto de cálculo do balanço hídrico (modelo empírico “*tipping bucket*”
 124 unidimensional (Ritchie, 1985, 1998)), a interferência da compactação no cálculo dos
 125 estresses hídrico e gasoso é bem perceptível, pois o aumento de EC afeta de maneira clara
 126 os parâmetros das Eqs. (1) e (2). Entretanto, a estratégia utilizada pelo CROPGRO assume
 127 que o estresse mecânico (Eq. (3)) pode ser indiretamente estimado apenas em função de
 128 conteúdos de água do solo (θ , LSD e LI). Essa estratégia é mais simplificada que a
 129 estratégia proposta por Moraes et al. (2018), que estima estresse mecânico em função da
 130 resistência do solo à penetração (RP), a qual depende de θ e ρ . Moraes et al. (2018)
 131 propõem duas equações para estimar estresse mecânico, uma para solos com presença de
 132 macroporos contínuos (bioporos e rachaduras) Eq. (5) e outra para solos com ausência de
 133 macroporos contínuos Eq. (6).

134

$$Sm_{RP} = e^{-0,30RP} \quad (5)$$

135

$$Sm_{RP} = e^{-0,4325RP} \quad (6)$$

136

137 Em que Sm_{RP} é o estresse mecânico em função da RP .

138 A estimativa proposta por Moraes et al. (2018) estabelece uma relação direta do
 139 aumento da RP com o impedimento sentido pelas raízes. Além disso, considerar a presença
 140 de bioporos e fissuras, que facilitam a alongação das raízes (Bengough, 2012), é uma

141 estratégia para amenizar a discrepância entre a impedimento sentido pelas raízes e a *RP*
142 medida em solos manejados em sistema plantio direto (Moraes et al., 2014).

143 Considerando a capacidade do CROPGRO para simular a resposta das plantas à
144 compactação do solo, o objetivo desse estudo foi avaliar (i) em que medida o CROPGRO é
145 capaz de prever associações entre compactação do solo e o crescimento e produtividade
146 da soja e (ii) qual estimativa de estresse mecânico, abordagem do CROPGRO ou de Moraes
147 et al. (2018), é melhor relacionada com crescimento de raízes.

148

149 **Metodologia**

150

151 Cultivo da soja em diferentes estados de compactação do solo

152

153 *Procedimentos experimentais*

154

155 A soja (*Glycine max*) foi cultivada em um Argissolo Vermelho distrófico arênico
156 (Santos et al., 2018) (Ultisol (Soil Survey Staff, 2014)) na área Experimental do
157 Departamento de Solos da Universidade Federal de Santa Maria (29°43'14" S; 53°42'19"
158 O; 101 m). Nove unidades experimentais de 6 m² (2 x 3 m), distribuídas em três blocos,
159 foram manejadas durante dois anos sob condições diferentes de EC.

160 Em junho de 2016, o solo foi corrigido com incorporação de calcário (6,75 Mg ha⁻¹)
161 e fósforo (0,28 Mg ha⁻¹ de superfosfato triplo) até a profundidade de 40 cm com base em
162 análise química do solo (Tabela 1) e conforme recomendações técnicas para soja
163 (CQFS/NRS-SBCS, 2016). Em seguida foram instaladas sondas WCR (*water content*
164 *reflectometer*, modelo CS616, Campbell Scientific Inc., Logan/UT, EUA) para

165 monitoramento de θ nas profundidades de 5, 15, 30 e 50 cm. Na sequência, aveia preta
 166 (*Avena strigosa*) foi semeada como planta de cobertura.

167

168 Tabela 1. Propriedades químicas do solo seis meses antes e seis meses depois da correção
 169 do solo com a incorporação de calcário e superfosfato triplo até 40 cm de profundidade.

Camada (cm)	pH	Sat. Al ^a (%)	Sat. Bases ^b (%)	MO ^c (%)	P (mg dm ⁻³)	K (mg dm ⁻³)
Antes da correção do solo (jan. 2016)						
0-20	4,82	32,6	34	2,0	22,2	95,1
20-40	4,39	51,5	19	1,5	6,7	95,1
Após a correção do solo (dez. 2016)						
0-20	5,49	7,4	48	1,6	21,5	84,4
20-40	4,92	43,0	21	1,5	8,4	73,6

170 ^a Sat. Al: proporção das cargas negativas do solo à pH natural (CTCefetiva) ocupadas por
 171 Al³⁺.

172 ^b Sat. Bases: proporção das cargas negativas do solo à pH neutro (CTCpH7) ocupadas por
 173 cátions alcalinos (Ca²⁺, Mg²⁺ e K⁺).

174 ^c MO: matéria orgânica do solo.

175

176 Os diferentes estados de compactação do solo foram implementados em novembro
 177 de 2016. Três parcelas foram escarificadas (ES) com uma haste sulcadora com ponteira de
 178 4 cm de largura e ângulo de ataque de 25° até 20 cm de profundidade e sulcos espaçados
 179 em 34 cm (Galetti, 1988). Outras três parcelas foram compactadas (CO) por seis tráfegos
 180 sucessivos de um pneu de borracha (265/70R16) preenchido com solo (carga ~ 75 kPa)
 181 quando θ estava próximo à *LSD*. As outras três parcelas restantes permaneceram sem
 182 perturbação adicional (NP).

183 A primeira semeadura da soja foi realizada em 13/12/2016. Em torno de 27
184 sementes da cultivar NA 5909 RG (grupo de maturação 6.2, crescimento indeterminado)
185 foram posicionadas por metro linear e a 5 cm de profundidade com o auxílio de semeadora
186 puncionadora manual (Molin et al., 2001), em linhas paralelas afastadas 45 cm umas das
187 outras. A população de 30 plantas m^{-1} foi obtida por desbaste quando as plantas atingiram o
188 estágio V2 (escala fenológica de Fehr e Caviness (1977)). A fertilização com P e K foi feita
189 com base na análise de solo para a expectativa de produtividade de 4.200 kg ha^{-1}
190 (CQFS/NRS-SBCS, 2016). O controle de plantas daninhas, pragas e doenças minimizaram
191 estresses bióticos. A colheita para determinação da produtividade de grãos foi realizada
192 manualmente em 13/04/2017.

193 Para o cultivo 2017/18, foram repetidas as etapas de semeadura de aveia preta
194 (02/07/2017), reaplicação da diferenciação do solo em termos de estado de compactação
195 (15/11/2017), semeadura (05/12/2017) e colheita da soja (21/04/2018), mantendo-se todas
196 as práticas usadas no primeiro cultivo.

197

198 *Dados de solo*

199

200 Amostras de solo com estrutura preservada (anéis metálicos de 100 cm^3) foram
201 coletadas em 07/12/2016 (primeiro cultivo) e em 27/11/2017 (segundo cultivo), no centro
202 das camadas de 0-10, 10-20, 20-40, 40-60 e 60-90 cm. O *LSD* foi considerado o θ do solo
203 após drenagem sob potencial matricial de -10 kPa (Klein et al., 2006) em coluna de areia
204 (Reinert e Reichert, 2006); a K_{SAT} (mm h^{-1}) foi determinada em permeâmetro de carga
205 constante (Donagema et al., 2011); e a ρ (g cm^{-3}) foi determinada pela razão entre massa de
206 solo seco ($105 \text{ }^\circ\text{C}$ por 48h) e volume do anel (Donagema et al., 2011).

207 Após a determinação de LSD e K_{SAT} e antes da determinação de ρ , a RP (MPa) foi
 208 determinada nas mesmas amostras em diferentes θ (θ em potenciais matriciais -10, -33, -
 209 100 kPa e em potencial matricial intermediário entre -100 e -500 kPa obtido após as
 210 amostras perderem água por evaporação por 24h). A RP foi medida com penetrômetro de
 211 bancada (modelo MA933, Marconi Equipamentos para Laboratórios Ltda, Piracicaba/SP)
 212 com haste metálica de ponta cônica (4 mm de diâmetro basal e ângulo de 30°) penetrando a
 213 uma velocidade de 10 mm min⁻¹.

214 Amostras deformadas foram coletadas nas mesmas camadas e foram utilizadas para
 215 determinar o LI , a textura e a densidade de partículas (ρ_s , g cm⁻³). O LI foi considerado o θ
 216 no potencial matricial de -1.500 kPa, e foi determinado por meio de potenciômetro de ponto
 217 de orvalho (modelo WP4-T, Decagon Devices, Inc., Pullman/WA, EUA). A textura do solo
 218 foi determinada pelo método da pipeta (Suzuki et al., 2015), e a ρ_s pelo método do balão
 219 volumétrico (Gubiani et al., 2006). A relação $1-\rho/\rho_s$ foi usada para calcular θ_{SAT} (cm³ cm⁻³)
 220 (Hillel, 2004).

221 Durante os dois cultivos de soja, o θ nas profundidades de 5, 15, 30 e 50 cm foi
 222 monitorado a cada 30 min. Um datalogger (modelo CR1000, Campbell Scientific, Inc.,
 223 Logan/UT, EUA) foi utilizado para registrar as leituras de θ das sondas WCR. As leituras
 224 de θ (θ_m) foram corrigidas (θ_c) a partir de curva de calibração (Eq. (7)) obtida com dados de
 225 θ de amostras de solo de quatro amostragens realizadas nas mesmas posições das sondas e
 226 em ampla faixa de θ (0,067 a 0,291 cm³ cm⁻³).

227

$$\theta_c = -4,62\theta_m^2 + 2,5\theta_m - 0,1 \quad (R^2 = 0,85, p < 0,05, N = 144: 4 \text{ amostragens}) \quad (7)$$

228

229 *Variáveis de planta*

230

231 As variáveis índice de área foliar máximo ($IAF_{máx}$, $m^2 m^{-2}$), densidade de
 232 comprimento de raiz (DCR , $cm cm^{-3}$) e rendimento de grãos (RG , $Mg ha^{-1}$) foram medidas
 233 nos dois cultivos para avaliar o desempenho do CROPGRO.

234 O IAF foi calculado pela Eq. (8).

235

$$IAF = \frac{P}{N} \sum_{k=1}^N \left(\sum_{i=1}^n (w_i l_i 2,0185) \right) \quad (8)$$

236

237 Em que P é a população de plantas por unidade de área ($plantas m^{-1}$), N é o número
 238 de plantas avaliadas, n é o número de folhas de cada planta avaliada, w_i é a largura do
 239 folíolo central da folha i (cm), l_i é o comprimento do folíolo central da folha i (cm) e 2,0185
 240 (adimensional) é o parâmetro empírico de ajuste entre dimensões lineares e área foliar
 241 (Richter et al., 2014). As medições de w e l e cálculo de IAF foram feitas a cada duas
 242 semanas entre os estágios V5 e R5. O maior valor de IAF foi selecionado para representar
 243 $IAF_{máx}$.

244 A DCR foi determinada nos dois cultivos quando as plantas atingiram o máximo
 245 crescimento vegetativo (estágio R2/R3) (Zanon et al., 2015). Blocos de solo com 7,4 cm de
 246 largura e 45 cm de comprimento foram coletados nas camadas de 0-10, 10-20 e 20-40 cm.
 247 As raízes foram separadas do solo por lavagem com água sobre peneira com abertura de
 248 malha de 1 mm, conforme metodologia descrita por Böhm (1979) e o comprimento foi
 249 determinado por meio de imagens das raízes processadas no software ImageJ versão 1.51
 250 (Schneider et al., 2012). A Eq. (9) foi usada para calcular DCR em cada camada.

$$DCR = \frac{CR}{ah} \quad (9)$$

251

252 Em que CR é o comprimento de raiz (cm), a é a área superficial de cada bloco (7,4 x
 253 45 cm = 333 cm²) e h é a espessura de cada bloco de solo (cm). A fim de expressar os
 254 dados de DCR em uma única variável, a DCR ponderada foi calculada a partir da DCR e da
 255 espessura de cada camada, conforme a Eq. (10).

256

$$DCR_p = \frac{\sum_{L=1}^n (DCR_L h_L)}{\sum_{L=1}^n h_L} \quad (10)$$

257

258 Onde DCR_p é a DCR ponderada (cm cm⁻³), n é o número de camadas e L é a camada
 259 considerada.

260 O RG foi determinado em ambos os cultivos quando as plantas atingiram o estágio
 261 R8. As plantas do centro de cada parcela (1 m²) foram colhidas e os grãos separados
 262 manualmente do restante da planta. Os grãos foram secos em estufa a 60 °C até atingirem
 263 peso constante, depois o peso de grãos foi calculado na umidade base de 13%.

264

265 Avaliação do CROPGRO

266

267 *Parâmetros de solo*

268

269 Os parâmetros de solo requeridos pelo CROPGRO foram quase todos determinados
 270 no experimento de campo descrito anteriormente. Os parâmetros curva número de
 271 escoamento superficial, albedo, taxa de drenagem e fator de crescimento de raiz (FCR), que

272 não foram determinados no campo, e a textura do solo foram considerados comuns a todos
273 os EC (Tabela 2).

274 O parâmetro curva número foi determinado internamente pelo CROPGRO a partir
275 da declividade informada (2%) e do grupo hidrológico selecionado (grupo B – potencial
276 moderadamente baixo de escoamento). O albedo foi definido internamente pelo
277 CROPGRO a partir da cor do solo selecionada (vermelha) e a taxa de drenagem a partir da
278 seleção de uma classe de drenagem interna do perfil do solo (moderadamente excessivo). O
279 grupo hidrológico, a cor do solo e a classe de drenagem selecionados, dentre as opções
280 disponíveis no DSSAT (Wilkins et al., 2004), foram os que melhor se aproximaram das
281 características observadas no solo do experimento a campo.

282

283 Tabela 2. Parâmetros de solo requeridos pelo CROPGRO e que foram considerados comuns
284 para todos os estados de compactação do solo.

Parâmetros de superfície		Parâmetros de camada				
Descrição	Valor	Horizonte	Camada (cm)	Argila (%)	Silte (%)	<i>FCR</i>
Número de escoamento	73	A	0-10	19,2	17,5	1
Albedo	0,14	A	10-20	17,5	16,4	1
Taxa de drenagem	0,85	A	20-40	20,9	17,5	0,55
		A	40-60	19,2	18,5	0,37
		E	60-90	12,3	23,9	0,22

285

286 O parâmetro fator de crescimento de raiz ($FCR = e^{-0,02C}$) indica o quanto uma
287 camada está propícia para a proliferação radicular (Boote et al., 2008) e é calculado
288 internamente pelo CROPGRO em função da posição do centro de cada camada (*C*, cm). Os
289 parâmetros hidráulicos do solo *LSD*, *LI*, θ_{SAT} e K_{SAT} requeridos pelo CROPGRO para

290 modelar o balanço hídrico foram os determinados em todas as parcelas do experimento de
291 campo.

292 *Variáveis meteorológicas*

293

294 As variáveis meteorológicas usadas pelo CROPGRO para o cálculo do balanço
295 hídrico foram medidas na estação automática Santa Maria-A803 (OMM 86977, 29° 43' 30"
296 S; 53° 43' 14" E; 103 m) distante 1,5 km do experimento.

297

298 *Parâmetros genéticos*

299

300 O DSSAT possui um banco de dados com parâmetros genéticos de soja agrupados
301 por características como hábito de crescimento (determinado ou indeterminado) e grupos de
302 maturação. Entretanto, a calibração local para cultivares específicas aprimora a acurácia das
303 simulações. Por esse motivo, a cultivar de soja NA 5909 RG (Nidera Sementes S.A), de
304 hábito indeterminado e grupo de maturação 6.2, amplamente cultivada no Sul do Brasil, foi
305 utilizada neste estudo. A maioria dos parâmetros genéticos da NA 5909 RG foram
306 calibrados por Fensterseifer et al. (2017) (Anexo A). Para os parâmetros não calibrados,
307 foram utilizados valores genéricos do DSSAT correspondentes aos de uma cultivar de
308 hábito de crescimento indeterminado e grupo de maturação 6.

309

310 *Opções de simulação*

311

312 As simulações foram executadas com a versão 4.6 do DSSAT (Hoogenboom et al.,
313 2015). O modelo foi configurado para as simulações iniciarem na data da semeadura e a
314 condição inicial de θ foi igual ao θ medido pelas sondas nesse dia (média de 0,164 e 0,213

315 para os cultivos de 2016/17 e 2017/18). Também foi estabelecido que o crescimento das
316 plantas seria penalizado apenas por estresse hídrico, gasoso e mecânico (conforme Eqs. (1),
317 (2) e (3)), portanto desconsiderando a interferência de outros fatores que podem ser
318 modelados pelo CROPGRO (N, P, K, simbiose, agrotóxicos, doenças e manejo da cultura
319 antecessora).

320 O DSSAT utiliza o método Priestley-Taylor (Priestley e Taylor, 1972) como padrão
321 para estimar a evapotranspiração de referência (ETr) pois é o único método dentre as
322 opções que não necessita das variáveis velocidade do vento e umidade relativa. Como essas
323 variáveis foram medidas, o método FAO-56/Penman-Monteith (Allen et al., 1998) foi
324 selecionado para estimar a ETr . As demais opções de simulação foram mantidas conforme
325 o padrão do DSSAT.

326

327 *Análise dos dados simulados*

328

329 A capacidade do CROPGRO estimar a resposta das plantas a mudanças no EC foi
330 analisada por meio das variáveis RG , $IAF_{máx}$ e DCR . Também foi analisada a relação de EC
331 com os fatores de estresse hídrico, gasoso e mecânico simulados pelo CROPGRO. A fim de
332 expressar os dados de DCR em uma única variável, a DCR ponderada (DCR_p) foi calculada
333 para cada dia do período de simulação a partir da DCR e da espessura de cada camada,
334 conforme descrito no item “Variáveis de planta”. Para executar os cálculos e expressar os
335 resultados nos arquivos de saída, o DSSAT subdividiu automaticamente o perfil de solo
336 informado (Tabela 2) em oito camadas (0-5, 5-15, 15-20, 20-30, 30-40, 40-50, 50-60 e 60 a
337 90 cm). Essas oito camadas foram utilizadas na Eq. (10) para calcular DCR_p e apenas o
338 maior valor de DCR_p foi utilizado para expressar o crescimento radicular simulado.

339 O fator de estresse hídrico é calculado conforme a Eq. (1) que resulta em um único
 340 valor para todo o perfil de solo. O fator de estresse gasoso calculado para cada camada (Eq.
 341 (2)) é ponderado pelo comprimento de raiz, conforme a Eq. (11) (Jones et al., 2010) para
 342 compor um valor indicativo de estresse gasoso único para todo o perfil do solo.

343

$$Sg_p = \frac{\sum_{L=1}^n (Sg_L DCR_L h_L)}{\sum_{L=1}^n (DCR_L h_L)} \quad (11)$$

344

345 Em que Sg_p é o fator de estresse gasoso ponderado e Sg_L é fator de estresse gasoso
 346 obtido pela Eq. (2). Os fatores de estresse hídrico e gasoso são calculados internamente
 347 pelo modelo. O fator de estresse mecânico foi calculado conforme a Eq. (3) pois não é
 348 listado nos arquivos de saída. Como o CROPGRO dividiu o perfil de solo em mais
 349 camadas, as variáveis LSD e LI foram interpoladas linearmente pelo CROPGRO a partir
 350 dos valores inicialmente informados (Tabela 2) para parametrizar as novas camadas.

351 Como o CROPGRO não calcula um fator integrado de estresse mecânico para todo
 352 o perfil de solo, o fator de estresse mecânico foi calculado externamente ao CROPGRO,
 353 mas usando a mesma estratégia de ponderação descrita para o fator de estresse gasoso.
 354 Inicialmente foi calculado o fator de estresse mecânico para cada camada (Eq. (3)) e depois
 355 foi feita a ponderação pelo comprimento de raiz. Foi usada a Eq. (11) com a substituição de
 356 Sg_p por Sm_p (fator de estresse mecânico ponderado) e de Sg_L por Sm_L (fator de estresse
 357 mecânico de cada camada obtido pela Eq. (3)).

358 Os fatores de estresse hídrico e gasoso foram analisados no intervalo entre a
 359 emergência e a maturidade fisiológica e o fator de estresse mecânico foi analisado no
 360 intervalo entre a emergência e o dia em que ocorreu o máximo DCR . Os fatores de estresse
 361 foram categorizados nas classes 0,5-1,0 (baixo estresse) e $< 0,5$ (elevado estresse) com a
 362 respectiva frequência.

363 *Estresse mecânico estimado em função da RP*

364

365 O estresse mecânico também foi estimado em função de *RP* conforme proposto por
366 Moraes et al. (2018) usando as Eqs. (5) e (6). O modelo de Busscher (1990) foi ajustado
367 com as medições de *RP* e usado para estimar a *RP* em função de ρ medida e de θ estimado
368 pelo CROPGRO. O Sm_{RP} foi calculado usando as Eqs. (5) e (6) para cada camada no
369 intervalo entre a emergência e o dia em que ocorreu o máximo *DCR* e depois foi ponderado
370 por *DCR* conforme descrito anteriormente para Sm_p . O Sm_{RP} também foi categorizado nas
371 classes 0,5-1,0 (baixo estresse) e $< 0,5$ (elevado estresse) com a respectiva frequência.

372

373 *Análises estatísticas*

374

375 O efeito da aplicação dos manejos nas parcelas experimentais (ES, NP e CO) para o
376 estabelecimento de diferença de EC foi avaliado por meio da análise de variância dos
377 parâmetros hidráulicos do solo requeridos pelo CROPGRO (LSD , LI , θ_{SAT} e K_{SAT}) e da ρ .
378 Quando o teste F indicou diferença significativa ($p < 0,05$), as médias foram comparadas
379 pelo teste Scott-Knott ($p < 0,05$). A mesma estratégia foi usada para avaliar se houve
380 associação entre EC e as variáveis de planta (RG , $IAF_{máx}$, DCR e DCR_p).

381 A relação entre crescimento de raiz (*DCR*) e estresse mecânico estimado pela
382 abordagem do CROPGRO (Eq. (3)) e pela abordagem de Moraes et al. (2018) (Eqs. (5) e
383 (6)) foi avaliada pela análise de correlação linear.

384 A avaliação da acurácia da estimativa das variáveis de planta e de θ pelo
385 CROPGRO foi feita por meio da raiz do erro quadrático médio ($RMSE$), conforme a Eq.
386 (13).

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2} \quad (13)$$

387

388 Em que y é o valor estimado, x é o valor observado e n é número de observações.

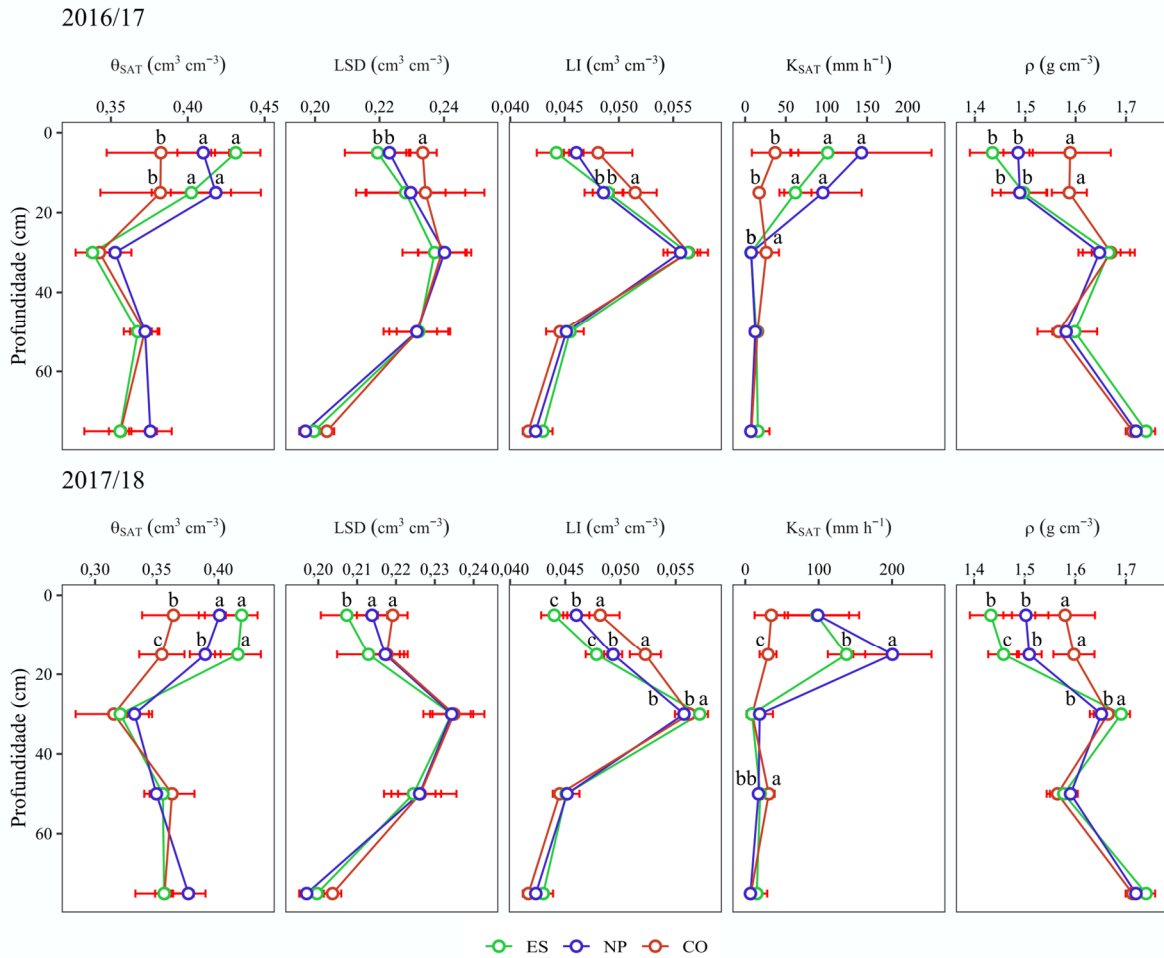
389

390 **Resultados**

391

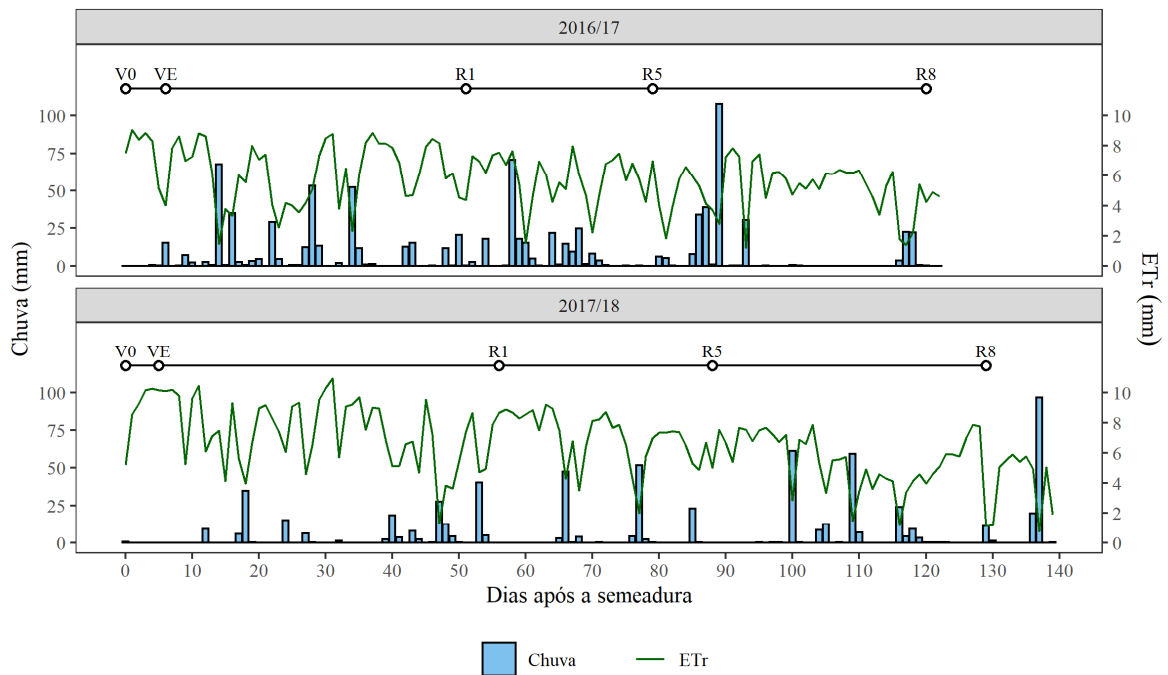
392 A estratégia experimental adotada para causar diferenças de EC no perfil do solo foi
 393 eficiente, pois foi detectada diferença estatística em todos os parâmetros hidráulicos (θ_{SAT} ,
 394 LSD , LI e K_{SAT}) e na ρ em pelo menos uma camada (principalmente nas camadas
 395 superficiais) em ambos os cultivos (Fig. 1). A ρ (principal indicador de EC) no manejo
 396 compactado (CO) foi maior que nos manejos escarificado (ES) e não perturbado (NP) nas
 397 camadas 0-10 e 10-20 cm nos dois cultivos. A ρ não diferiu entre os manejos ES e NP nas
 398 camadas 0-10 e 10-20 cm no cultivo 2016/17 e 0-10 cm no cultivo 2017/18 e foi menor no
 399 manejo ES na camada 10-20 cm no cultivo 2017/18. Na camada 20-40 cm, a ρ foi maior no
 400 manejo ES no cultivo 2017/18. Nas camadas mais profundas (40-60 e 60-90 cm) a ρ não
 401 diferiu entre os manejos (Fig. 1).

402 A distribuição da ETr e da chuva nos cultivos 2016/17 e 2017/18 resultou os
 403 acumulados de 713 e 879 mm para a ETr e 879 e 655 mm para a chuva. A maioria das
 404 chuvas (90%) ocorreram em menos de 7 dias de intervalo e 50% das lâminas de chuva
 405 foram maiores que 20 mm. Em apenas dois períodos em cada cultivo o intervalo entre as
 406 chuvas foi maior que 8 dias: entre 72 e 80 DAE (estágio R4) e entre 102 e 115 DAE
 407 (estágio R6 e R7) e no cultivo 2016/17 e entre 55 e 64 DAE (estágio R1) e entre 87 e 96
 408 DAE (estágio R5) no cultivo 2017/18 (Fig. 2).



409

410 Fig. 1. Parâmetros de solo requeridos pelo CROPGRO determinados na área experimental
 411 para cada estado de compactação do solo representado pelos manejos escarificado (ES), não
 412 perturbado (NP) e compactado (CO) nos dois cultivos. θ_{SAT} – conteúdo de água na saturação.
 413 LSD – limite superior de drenagem. LI – limite inferior de disponibilidade de água. K_{SAT} –
 414 condutividade hidráulica de solo saturado. ρ – densidade do solo. O parâmetro ρ não é
 415 utilizado pelo CROPGRO no balanço hídrico, mas é um indicador do EC. Barras de erro
 416 indicam o desvio padrão das observações. Letras diferentes na mesma profundidade indicam
 417 diferença significativa entre as médias pelo teste Scott-Knott ($p < 0.05$). Ausência de letras
 418 indica efeito não significativo dos tratamentos pelo teste F ($p < 0.05$).

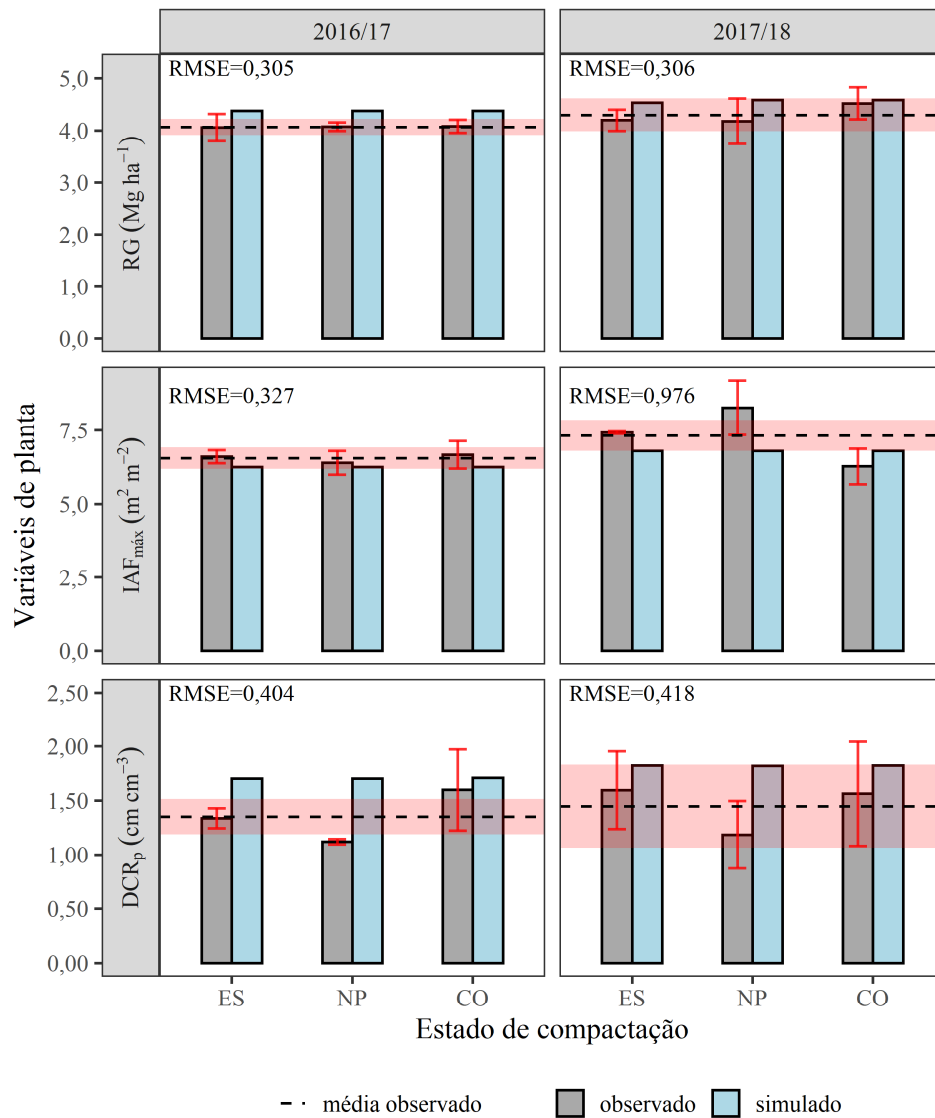


419

420 Fig. 2. Evapotranspiração de referência (ET_r) e chuva durante os dois cultivos. V0 –
 421 semeadura. VE – emergência. R1 – início florescimento. R5 – início enchimento de grãos.
 422 R8 – maturidade fisiológica (escala fenológica da soja (Fehr e Caviness, 1977)).

423

424 A ANOVA não detectou interferência de EC nas variáveis de planta RG , $IAF_{máx}$ e
 425 DCR_p , cujas médias foram $4,07 \text{ Mg ha}^{-1}$, $6,55 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ e $1,35 \text{ cm cm}^{-3}$, respectivamente, no
 426 cultivo 2016/17 e $4,30 \text{ Mg ha}^{-1}$, $7,32 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ e $1,45 \text{ cm cm}^{-3}$ no cultivo 2017/18. As
 427 previsões de RG , $IAF_{máx}$ e DCR_p feitas pelo CROPGRO foram semelhantes aos valores
 428 observados experimentalmente (Fig. 3). Apesar das estimativas de RG e DCR_p terem ficado
 429 acima e $IAF_{máx}$ abaixo das médias observadas, as diferenças foram pequenas e, na maioria
 430 dos casos, ficaram dentro do desvio padrão (Fig. 3).



431

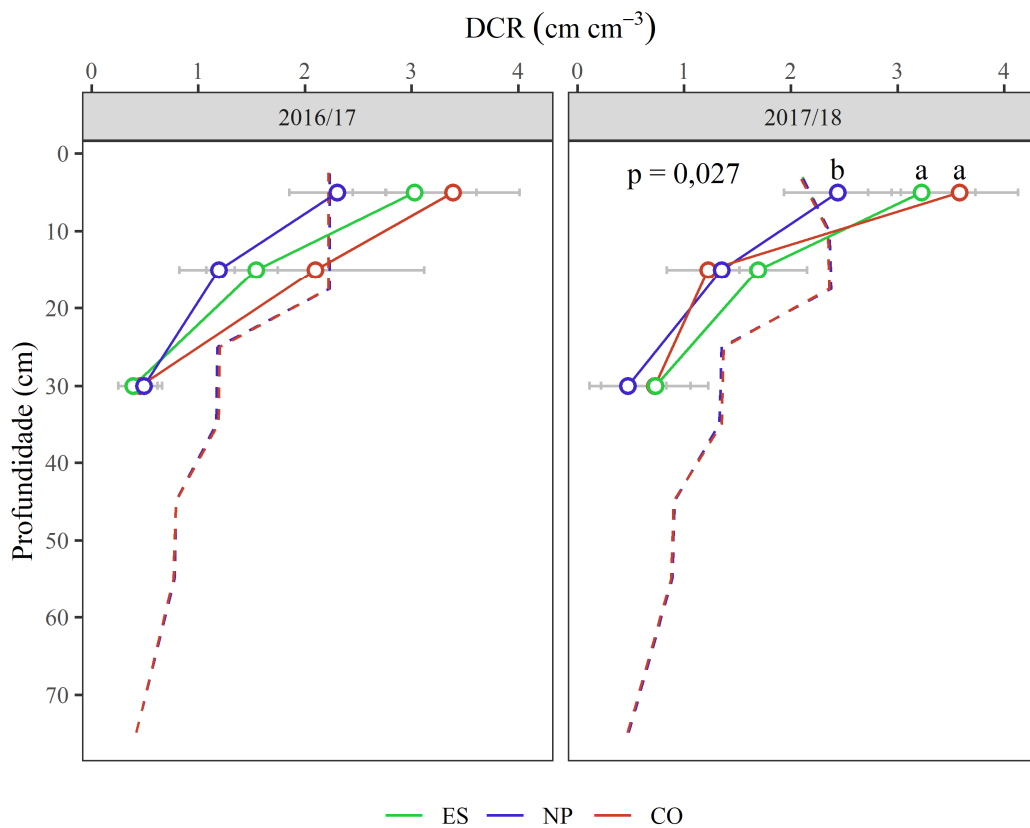
432 Fig. 3. Variáveis de plantas de soja observadas e previstas em diferentes estados de
 433 compactação do solo representado pelos manejos escarificado (ES), não perturbado (NP) e
 434 compactado (CO) nos dois cultivos. *RG* – rendimento de grãos. *IAF_{máx}* – índice de área foliar
 435 máximo. *DCR_p* – densidade de comprimento de raiz ponderada. Barras de erro indicam o
 436 desvio padrão das variáveis observadas em cada manejo. Faixas vermelhas indicam o desvio
 437 padrão da média das variáveis observadas.

438

439 Apesar de não ter sido detectada diferença estatística na *DCR_p*, houve diferença na

440 *DCR* da camada superficial (0-10 cm) no cultivo 2017/18 (Fig. 4). A *DCR* desta camada foi

441 maior nos manejos ES e CO que representam o menor e maior EC respectivamente. O
 442 CROPGRO simulou *DCR* semelhante nos diferentes EC, independentemente da camada de
 443 solo, e tendeu a concentrar menos raízes próximo à superfície e a distribuí-las mais em
 444 profundidade, independentemente do EC (Fig. 4).
 445



446
 447 Fig. 4. Distribuição da densidade de comprimento de raiz (*DCR*) no perfil para cada estado
 448 de compactação do solo representado pelos manejos escarificado (ES), não perturbado (NP)
 449 e compactado (CO) nos dois cultivos. Barras de erro indicam o desvio padrão das
 450 observações. Letras diferentes na mesma profundidade indicam diferença significativa entre
 451 as médias pelo teste Scott-Knott ($p < 0,05$). Ausência de letras indica efeito não significativo
 452 dos tratamentos pelo teste F ($p < 0,05$). Observado (—), estimado (- - -).

453 O modelo não estimou estresses no cultivo 2016/17, mas estimou estresse hídrico e
 454 mecânico no cultivo 2017/18. A frequência do estresse hídrico foi inferior a 2% em ambas
 455 as classes de estresse (elevado estresse e baixo estresse) e apenas na classe baixo estresse o
 456 modelo indicou interferência de EC. Nela, a frequência de estresse hídrico foi 0,8% maior
 457 no manejo ES em relação aos manejos NP e CO (Fig. 5). O modelo estimou estresse
 458 mecânico apenas na classe baixo estresse, com frequência igual (23%) para todos os EC.

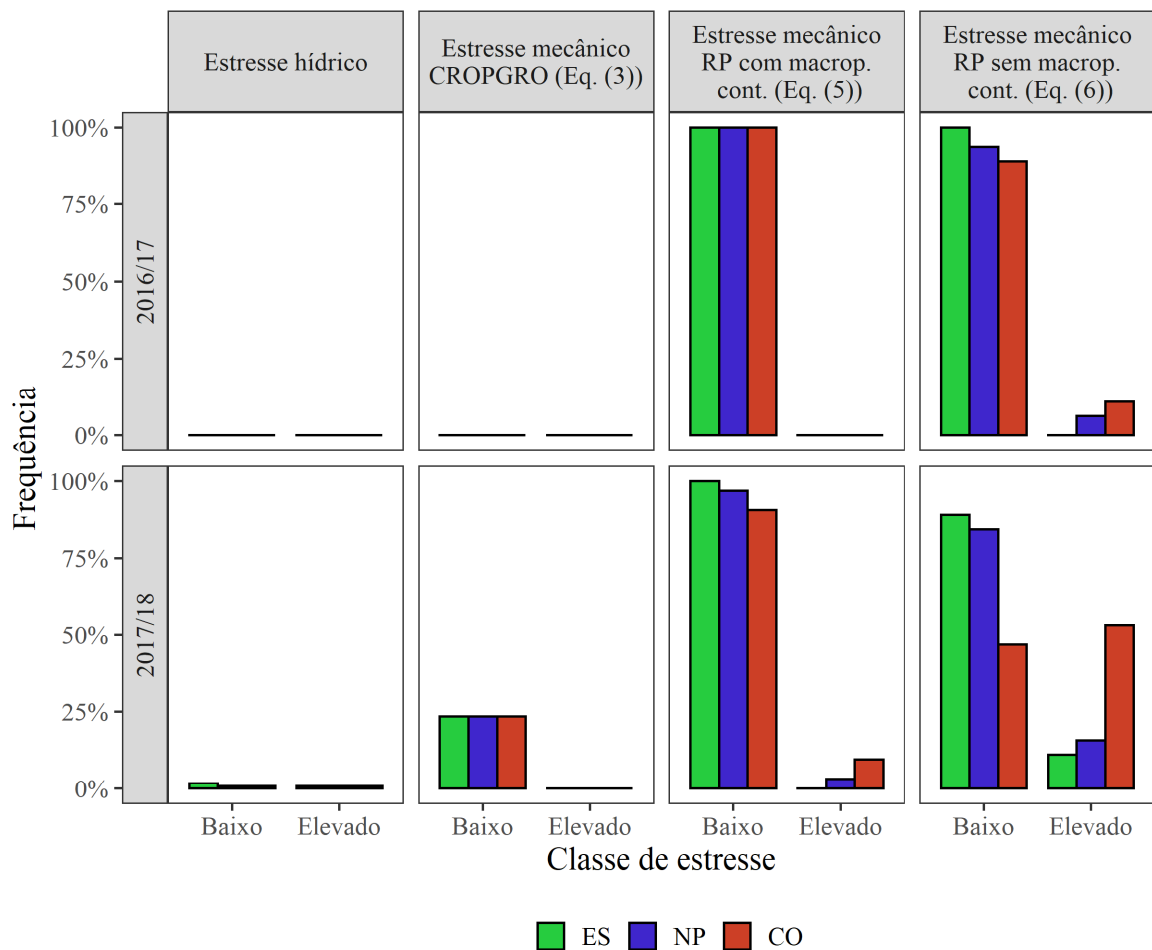
459 O modelo de Busscher (1990) ajustado para estimar RP (Eq. (12)) foi significativo
 460 ($p < 0,05$) e o R^2 indica que 57% da variabilidade dos dados é explicada pelo modelo. O
 461 expoente que acompanha ρ é positivo e o expoente que acompanha θ é negativo, indicando
 462 que a Eq. (12) é coerente com a relação de ρ e θ com a RP .

463

$$RP = 0,0125\rho^{5,445}\theta^{-1,3672} \quad (12)$$

464

465 O modelo sugerido por Moraes et al. (2018) (Eqs. (5) e (6)) indicou a ocorrência de
 466 estresse mecânico em ambos os cultivos (Fig. 5). Supondo condição de solo com presença
 467 de macroporos contínuos (Eq. (5)), o estresse mecânico foi predito somente na classe baixo
 468 estresse e no cultivo 2016/17, com frequência semelhante entre os EC (Fig. 5). A
 469 frequência do estresse mecânico estimado na classe elevado estresse foi maior no manejo
 470 CO, intermediária no manejo NP e menor no manejo ES, enquanto na classe baixo estresse
 471 a frequência foi maior no manejo ES, seguido por NP e CO. A Eq (6) foi mais sensível para
 472 prever efeito de EC no estresse mecânico em ambas as classes e nos dois cultivos (Fig. 5).



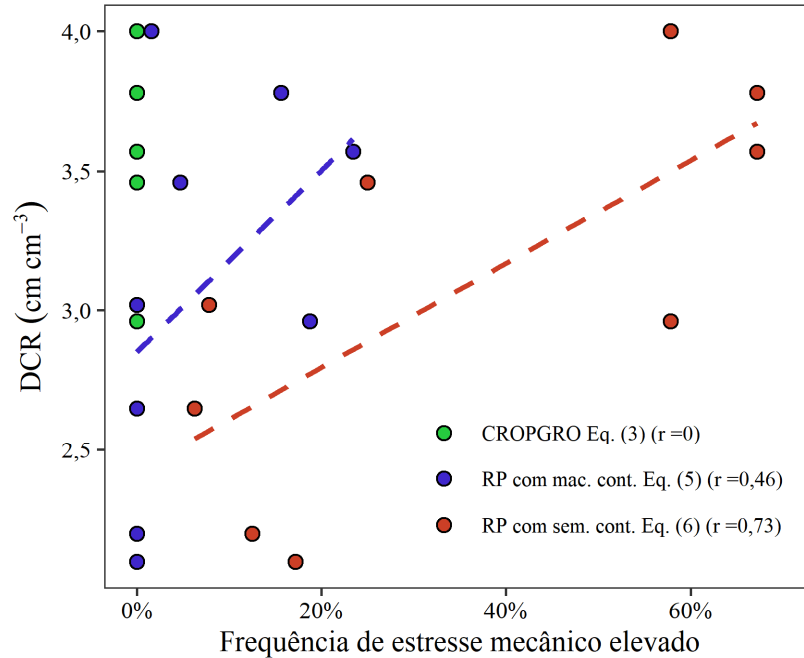
473

474 Fig. 5. Frequência de níveis de estresse hídrico e mecânico nas classes elevado estresse (<
 475 0,5) e baixo estresse (0,5–1,0). O estresse mecânico foi predito pelo CROPGRO (Eq. (3)) e
 476 estimado em função da *RP* na presença (Eq. (5)) e na ausência (Eq. (6)) de macroporos
 477 contínuos (Moraes et al. (2018)) para cada estado de compactação do solo representado pelos
 478 manejos escarificado (ES), não perturbado (NP) e compactado (CO) nos dois cultivos.

479

480 Na camada superficial (0-10 cm), onde efeito de EC sobre *DCR* foi detectado (Fig.
 481 4), a correlação entre *DCR* e estresse mecânico foi maior com o estresse mecânico estimado
 482 em função da *RP* considerando solo sem macroporos contínuos (Eq. (6)), seguido pelo
 483 estresse mecânico estimado em função da *RP* considerando solo sem macroporos contínuos

484 (Eq. (5)). A correlação entre DCR e estresse mecânico previsto pelo CROPGRO foi nula
 485 (Fig. (6)).

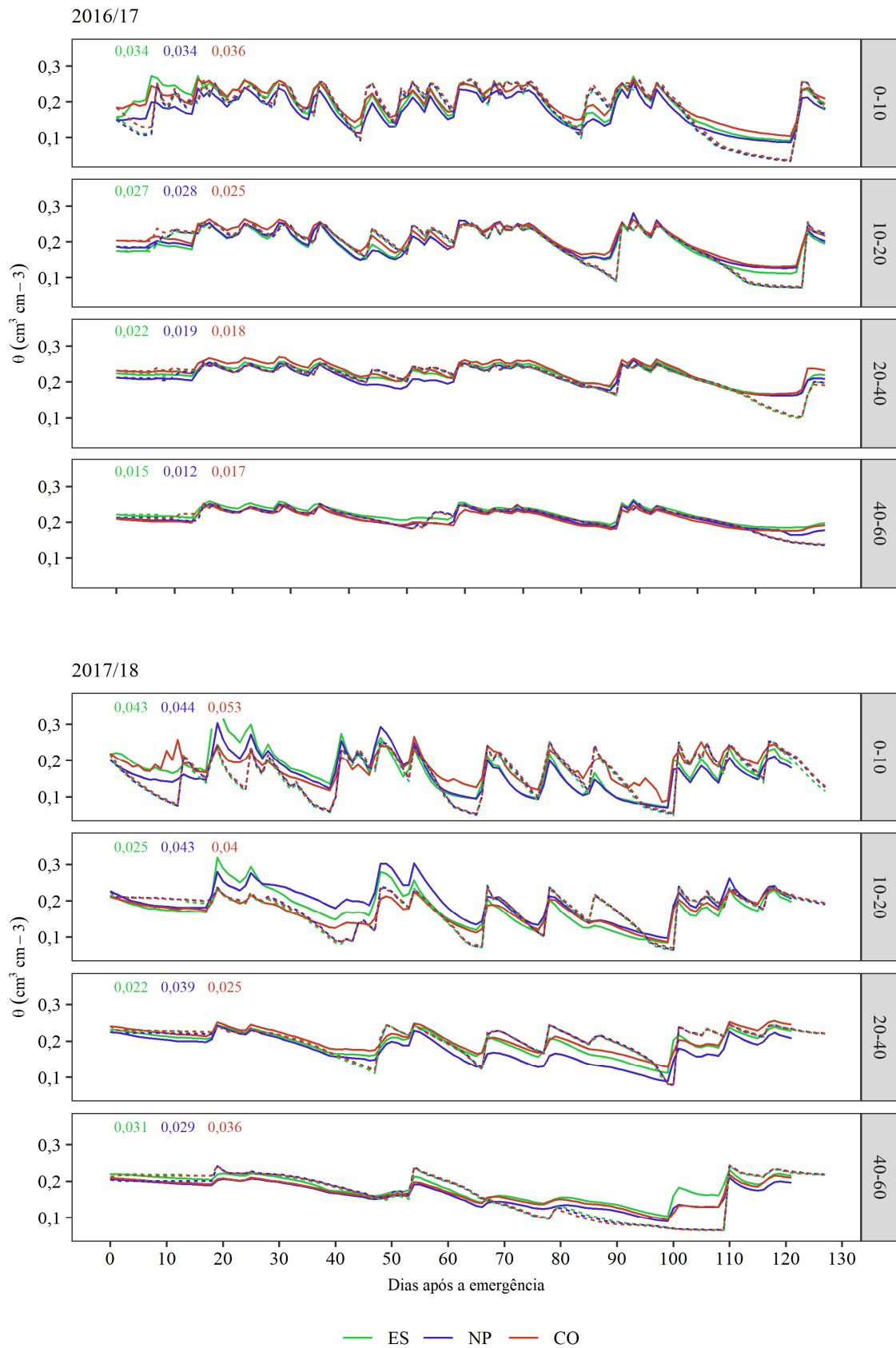


486

487 Fig. 6. Correlação linear (r) entre densidade de comprimento de raiz (DCR) da camada 0-10
 488 cm no cultivo 2017/18 e frequência de estresse mecânico na classe elevado previsto pelo
 489 CROPGRO (Eq. (3)) e estimado em função da RP na presença (Eq. (5)) e ausência (Eq. (6))
 490 de macroporos contínuos (Moraes et al., 2018).

491

492 O efeito de EC sobre θ (observado e estimado) foi maior na camada 0-10 cm, na
 493 qual as diferenças de θ foram mais evidentes. Nessa camada, as médias de θ observado no
 494 manejo CO foram 0,026 e 0,021 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ maiores que as média de θ observado no manejo
 495 NP, respectivamente para os cultivos 2016/17 e 2017/18. Entretanto, a diferença de θ
 496 estimado para a mesma comparação (CO vs NP) foi 0,008 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ em ambos os cultivos.
 497 Portanto, o CROPGRO predisse interferência de EC sobre θ menor que a detectada
 498 experimentalmente (Fig. 7).



499

500 Fig. 7. Variação espacial e temporal de θ observado e predito para cada estado de
 501 compactação do solo representado pelos manejos escarificado (ES), não perturbado (NP) e

502 compactado (CO) nas camadas 0-10, 10-20, 20-40 e 40-60 cm nos dois cultivos. Números
503 dentro das áreas de plotagem representam o RMSE. Observado (—), estimado (- - -).

504

505 **Discussão**

506

507 A causa mais provável da ausência de associação entre EC e as variáveis de planta
508 da soja, mesmo havendo diferença estatística de EC entre os manejos (Fig. 1), é a
509 regularidade das chuvas nos dois cultivos (Fig. 2). Esse resultado concorda com os
510 resultados de outros estudos. Em parcelas que sofreram déficit hídrico, Conte et al. (2009)
511 relataram redução na produtividade de milho de 4.082 para 3.116 kg ha⁻¹ com o aumento de
512 1,58 para 1,62 g cm⁻³ na ρ (camada 12-15 cm), mas essa diferença de EC não interferiu na
513 produtividade em parcelas que receberam irrigação suplementar. Considerando a ρ média
514 nos dois cultivos deste estudo, a diferença de ρ de 1,48 para 1,62 g cm⁻³ foi maior que a
515 relatada por Conte et al. (2009), mas não houve decréscimo de produtividade. Na mesma
516 linha, Benjamin, Nielsen e Vigil (2003) sugeriram que a regularidade das chuvas evitou
517 redução na produtividade de milho mesmo em solo com variação ampla de ρ (1,20 a 1,60 g
518 cm⁻³).

519 Evidências provenientes de análises baseadas em processos do sistema solo-planta-
520 atmosfera (van Lier e Gubiani, 2015) e de observações experimentais (Gubiani et al., 2014,
521 2013) alertam que as condições meteorológicas determinam quando e quanto as plantas são
522 afetadas por EC. Consequentemente, a relação apenas de EC com crescimento e
523 produtividade das plantas se manifesta experimentalmente como um evento ocasional. Por
524 isso, propostas de predições de crescimento e produtividade das plantas em função apenas
525 de EC (Letey, 1985; Arvidsson e Håkansson, 1991; Leão et al., 2006; Graves et al., 2015;
526 Keller et al., 2019), mesmo que essa associação possa ser ocasionalmente detectada

527 (Beulter e Centurion, 2004; Vrindts et al., 2005; Bengough et al., 2006, 2011; Collares et
528 al., 2008; Chen e Weil, 2011; Moraes et al., 2019), oferecem previsões incorretas quando o
529 aumento de EC não corresponde à redução a produtividade das plantas (Glab, 2007; Suzuki
530 et al., 2007; Tracy e Zhang, 2008; Cecagno et al., 2016; Lozano et al., 2016; Sivarajan et
531 al., 2018). A modelagem é a via mais plausível para explicar a irregularidade da relação
532 entre EC e crescimento e produtividade das plantas. Conhecer como a relação entre EC e
533 produtividade das plantas depende das condições meteorológicas é indispensável para
534 planejar ações de manejo que sustentem a demanda crescente de produção de alimentos,
535 fibra e energia (FAO/OECD, 2018; Gouel e Guimbard, 2019).

536 O CROPGRO é um modelo de crescimento vegetal que evolui historicamente de
537 modelos desenvolvidos para avaliar apenas o crescimento potencial, portanto, sem
538 considerar restrições associadas ao solo, como o modelo SoySim (Setiyono et al., 2010), ou
539 apenas restrições relacionadas à fertilidade (El-Sharkawy, 2011). Por isso, a estimativa do
540 estresse mecânico é um ganho que o CROPGRO apresenta na descrição de processos que
541 ocorrem no solo. Entretanto, a análise da abordagem simplificada para estimar estresse
542 mecânico (Eq. (3)) revela que CROPGRO estima esse estresse somente quando θ for menor
543 que 25% da água disponível ($LSD - LI$). Esse limite corresponde à média de θ nos dois
544 cultivos de 0,095, 0,093 e 0,091 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ para os manejos CO, NP e ES. Como θ foi quase
545 sempre maior que 0,095 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ (Fig. 7), a Eq. (3) resultou Sm quase sempre maior que
546 1,0, indicando ausência de estresse independentemente do EC. Entretanto, se substituirmos
547 θ da Eq. (12) por 0,095 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ e se substituirmos ρ pelos valores médios de ρ para os dois
548 cultivos observados na camada 10-20 cm em cada manejo (1,60, 1,50 e 1,48 g cm^{-3} para os
549 manejos CO, NP e ES, respectivamente), a RP estimada será 3,95, 2,95 e 2,78 MPa para os
550 cultivos CO, NP e ES, respectivamente. Esses valores são maiores que o limite de 2,0 MPa
551 amplamente empregado para representar impedimento mecânico restritivo ao crescimento

552 radicular (Taylor et al., 1966; Silva et al., 1994; Tormena et al., 1998; Cecagno et al., 2016;
553 Peixoto et al., 2019). Apesar da discussão sobre a magnitude desse limite (Moraes et al.,
554 2014), é plausível supor que solo com RP de 3,95 MPa (manejo CO) tem maior chance de
555 restringir o crescimento das raízes comparado a solo com RP de 2,78 MPa (manejo ES).
556 Portanto, o CROPGRO não discrimina efeito de EC na estimativa do estresse mecânico
557 mesmo havendo grande diferença de RP causada por mudança de EC.

558 Embora o CROPGRO tenha predito com acurácia o RG e $I AF_{máx}$ (Fig. 3), o efeito de
559 EC na DCR não foi simulado pelo modelo (Fig. 4). Na camada superficial, onde as
560 diferenças de EC foram mais evidentes e onde restrições de fertilidade foram minimizadas
561 (Tabela 1), as estimativas de DCR pelo CROPGRO revelam a falta de sensibilidade da Eq.
562 (3) para estimar estresse mecânico. Além disso, a melhor correlação da DCR com o estresse
563 mecânico estimado em função da RP (Eqs. (5) e (6)), sugere que estratégias adicionais no
564 CROPGRO para estimar o estresse mecânico podem melhorar a sensibilidade do modelo ao
565 EC para estimar o crescimento das raízes, melhorando a robustez do modelo em simular
566 processos que ocorrem no solo. Entretanto, a implementação de uma estratégia diferente
567 para estimar o estresse mecânico pode requerer a recalibração de parâmetros genéticos para
568 que mudanças no crescimento das raízes sejam adequadamente relacionados com o
569 crescimento das partes aéreas da planta.

570 O desempenho do CROPGRO foi avaliado em condições experimentais nas quais a
571 combinação das condições meteorológicas com as condições de solo não favoreceu a
572 detecção de efeito da compactação sobre o crescimento foliar e a produtividade da soja.
573 Outros estudos com mais combinações de diferentes culturas com diferentes EC (e
574 diferentes solos) em diferentes condições meteorológicas serão úteis para avaliar a
575 capacidade do CROPGRO para predizer a associação entre compactação e crescimento e
576 produtividade das plantas.

577 Além disso, a ampliação do cultivo da soja em novos ambientes de produção, como
578 os solos de várzea tradicionalmente cultivados com arroz no sul do Brasil, tem aumentado
579 os desafios para minimizar os estresses hídrico, gasoso e mecânico. Nesse sentido, a
580 modelagem de processos com ferramentas como o CROPGRO tem grande potencial para
581 auxiliar técnicos e agricultores na tomada de decisão sobre o manejo para otimizar os
582 recursos de produção.

583

584 **Conclusão**

585

586 O CROPGRO é uma ferramenta útil para predizer como a associação entre
587 compactação do solo e a produção da soja depende das condições meteorológicas. Apesar
588 do CROPGRO predizer satisfatoriamente a associação da compactação do solo com o
589 índice de área foliar e com o rendimento de grãos, a baixa sensibilidade à compactação do
590 submodelo que estima o estresse mecânico conduziu à predição incorreta do crescimento
591 das raízes. As estratégias de predição de estresse mecânico baseadas na resistência do solo
592 à penetração foram mais sensíveis à mudança do estado de compactação do solo e melhor
593 associadas ao crescimento das raízes. Portanto, para usar o CROPGRO como uma
594 ferramenta para predizer o impacto da compactação do solo na produção das culturas, pode
595 ser importante melhorar a capacidade do modelo em predizer o estresse mecânico no
596 crescimento das raízes.

597 **Agradecimento**

598

599 Esse trabalho foi financiado pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de
600 Nível Superior (CAPES) e pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e
601 Tecnológico (CNPq).

602

603 **Referências**

604

605 Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M., 1998. Crop Evapotranspiration: guidelines
606 for computing crop water requirements (FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56).
607 FAO, Rome. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2010.12.001>

608 Arvidsson, J., Håkansson, I., 1991. A model for estimating crop yield losses caused by soil
609 compaction. *Soil Tillage Res.* 20, 319–332. [https://doi.org/10.1016/0167-](https://doi.org/10.1016/0167-1987(91)90046-Z)
610 1987(91)90046-Z

611 Bengough, A.G., 2012. Root elongation is restricted by axial but not by radial pressures: So
612 what happens in field soil? *Plant Soil* 360, 15–18. [https://doi.org/10.1007/s11104-012-](https://doi.org/10.1007/s11104-012-1428-8)
613 1428-8

614 Bengough, A.G., Bransby, M.F., Hans, J., McKenna, S.J., Roberts, T.J., Valentine, T.A.,
615 2006. Root responses to soil physical conditions; growth dynamics from field to cell.
616 *J. Exp. Bot.* 57, 437–447. <https://doi.org/10.1093/jxb/erj003>

617 Bengough, A.G., McKenzie, B.M., Hallett, P.D., Valentine, T.A., 2011. Root elongation,
618 water stress, and mechanical impedance: a review of limiting stresses and beneficial
619 root tip traits. *J. Exp. Bot.* 62, 59–68. <https://doi.org/10.1093/jxb/erq350>

- 620 Benjamin, J.G., Nielsen, D.C., Vigil, M.F., 2003. Quantifying effects of soil conditions on
621 plant growth and crop production. *Geoderma* 116, 137–148.
622 [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(03\)00098-3](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(03)00098-3)
- 623 Beulter, A.N., Centurion, J.F., 2004. Effect of soil compaction in root development and in
624 soybean yield. *Pesqui. Agropecuária Bras.* 39, 581–588.
625 <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2004000600010>
- 626 Böhm, W., 1979. *Methods of Studying Root Systems*, Biological Conservation, Ecological
627 Studies. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/978-](https://doi.org/10.1007/978-3-642-67282-8)
628 [3-642-67282-8](https://doi.org/10.1007/978-3-642-67282-8)
- 629 Boote, K.J., Sau, F., Hoogenboom, G., Jones, J.W., 2008. Experience with water balance,
630 evapotranspiration, and predictions of water stress effects in the CROPGRO model, in:
631 Ahuja, L.R., Reddy, S.A., Saseendran, S.A., Yu, Q. (Eds.), *Response of Crops to*
632 *Limited Water: Understanding and Modeling Water Stress Effects on Plant Growth*
633 *Processes*. ASA-CSSA-SSSA, Madison, WI, pp. 59–103.
- 634 Busscher, W.J., 1990. Adjustment of flat-tipped penetrometer resistance data to a common
635 water content. *Trans. ASAE* 33, 0519–0524. <https://doi.org/10.13031/2013.31360>
- 636 Cecagno, D., de Andrade Costa, S.E.V.G., Anghinoni, I., Kunrath, T.R., Martins, A.P.,
637 Reichert, J.M., Gubiani, P.I., Balerini, F., Fink, J.R., de Faccio Carvalho, P.C., 2016.
638 Least limiting water range and soybean yield in a long-term, no-till, integrated crop-
639 livestock system under different grazing intensities. *Soil Tillage Res.* 156, 54–62.
640 <https://doi.org/10.1016/j.still.2015.10.005>
- 641 Chen, G., Weil, R.R., 2011. Root growth and yield of maize as affected by soil compaction
642 and cover crops. *Soil Tillage Res.* 117, 17–27.
643 <https://doi.org/10.1016/j.still.2011.08.001>

- 644 Collares, G.L., Reinert, D.J., Reichert, J.M., Kaiser, D.R., 2008. Traffic-induced
645 compaction of na Oxisol and its relation with growth and yield of common bean and
646 wheat. *Rev. Bras. Cienc. do Solo* 32, 933–942. [https://doi.org/10.1590/s0100-](https://doi.org/10.1590/s0100-06832008000300003)
647 06832008000300003
- 648 Conte, O., Levien, R., Trein, C.R., Debiasi, H., Mazurana, M., 2009. Corn response in
649 different physical conditions of soil and amount soil cover residues with or without
650 irrigation. *Cienc. Rural* 39, 1069–1076. [https://doi.org/10.1590/s0103-](https://doi.org/10.1590/s0103-84782009005000022)
651 84782009005000022
- 652 CQFS/NRS-SBCS, 2016. Manual de calagem e adubação para os estados do Rio Grande do
653 Sul e Santa Catarina, 11th ed. Comissão de Química e Fertilidade do Solo, Núcleo
654 Regional Sul - Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Porto Alegre, RS.
- 655 Donagema, G.K., Campos, D.V.B., Calderano, S.B., Teixeira, W.G., Viana, J.H.M., 2011.
656 Manual de Métodos de Análise de Solo. Embrapa.
- 657 El-Sharkawy, M.A., 2011. Overview: Early history of crop growth and photosynthesis
658 modeling. *Biosystems* 103, 205–211. <https://doi.org/10.1016/j.biosystems.2010.08.004>
- 659 FAO/OECD, 2018. OECD-FAO Agricultural Outlook 2018-2027, OECD-FAO
660 Agricultural Outlook. OECD Publishing/Food and Agriculture Organization of the
661 United Nations, Paris/Rome. https://doi.org/10.1787/agr_outlook-2018-en
- 662 Feddes, R.A., 1978. Simulation of field water use and crop yield, in: Feddes, R.A.,
663 Kowalik, P.J., Zaradny, H. (Eds.), *Simulation Monographs*. Pudoc for the Center for
664 Agriculture Publishing and Documentation, Wageningen, pp. 194–209.
- 665 Fehr, W.R., Caviness, C.E., 1977. Stages of Soybean Development. *Spec. Rep.* 80, 11.

- 666 Fensterseifer, C.A., Streck, N.A., Baigorria, G.A., Timilsina, A.P., Zanon, A.J., Cera, J.C.,
667 Rocha, T.S.M., 2017. On the number of experiments required to calibrate a cultivar in
668 a crop model: The case of CROPGRO-soybean. *F. Crop. Res.* 204, 146–152.
669 <https://doi.org/10.1016/J.FCR.2017.01.007>
- 670 Galeti, P.A., 1988. *Mecanizacao agricola : preparo do solo*. Instituto Campineiro de Ensino
671 Agrícola, Campinas.
- 672 Glab, T., 2007. Effect of soil compaction on root system development and yields of tall
673 fescue. *Int. Agrophysics* 21, 233–239.
- 674 Gouel, C., Guimbard, H., 2019. Nutrition transition and the structure of global food
675 demand. *Am. J. Agric. Econ.* 101, 383–403. <https://doi.org/10.1093/ajae/aay030>
- 676 Graves, A.R., Morris, J., Deeks, L.K., Rickson, R.J., Kibblewhite, M.G., Harris, J.A.,
677 Farewell, T.S., Truckle, I., 2015. The total costs of soil degradation in England and
678 Wales. *Ecol. Econ.* 119, 399–413. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2015.07.026>
- 679 Gubiani, P.I., Reichert, J.M., Reinert, D.J., 2014. Interaction between water availability and
680 soil compaction on common bean growth and yield. *Rev. Bras. Ciência do Solo* 38,
681 765–773. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832014000300008>
- 682 Gubiani, P.I., Reichert, J.M., Reinert, D.J., 2013. Hydric and mechanical indicators of soil
683 compaction and plant growth. *Rev. Bras. Ciência do Solo* 37, 1–10.
684 <https://doi.org/10.1590/S0100-06832013000100001>
- 685 Gubiani, P.I., Reinert, D.J., Reichert, J.M., 2006. Alternative method to measure the soil
686 particle density - exactness, precision, and processing time. *Ciência Rural* 36, 664–
687 668. <https://doi.org/10.1590/S0103-84782006000200049>
- 688 Hamza, M.A., Anderson, W.K., 2005. Soil compaction in cropping systems. *Soil Tillage*
689 *Res.* 82, 121–145. <https://doi.org/10.1016/j.still.2004.08.009>

- 690 Hanks, J., Ritchie, J.T., Jones, C.A., Bland, W.L., Ritchie, J.T., Williams, J.R., 1991.
691 Simulation of Root Growth, in: Hanks, J., Ritchie, J.T. (Eds.), Modeling Plant and Soil
692 Systems. ASA-CSSA-SSSA. <https://doi.org/10.2134/agronmonogr31.c6>
- 693 Hill, J.N.S., Sumner, M.E., 1967. Effect of bulk density on moisture characteristics of soils.
694 Soil Sci. 103, 234–238. <https://doi.org/10.1097/00010694-196704000-00002>
- 695 Hillel, D., 2004. Introduction to environmental soil physics. Academic Press, San Diego,
696 CA.
- 697 Hoogenboom, G., Jones, J.W., Wilkens, P.W., Porter, C.H., Boote, K.J., Hunt, L.A., Singh,
698 U., Lizaso, J.I., White, J.W., Uryasev, O., Ogoshi, R., Koo, J., Shelia, V., Tsuji, G.Y.,
699 2015. Decision Support System for Agrotechnology Transfer System (DSSAT) Version
700 4.6.
- 701 Jones, J., Hoogenboom, G., Porter, C., Boote, K., Batchelor, W., Hunt, L., Wilkens, P.,
702 Singh, U., Gijsman, A., Ritchie, J., 2003. The DSSAT cropping system model. Eur.
703 J. Agron. 18, 235–265. [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(02\)00107-7](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(02)00107-7)
- 704 Jones, J.W., Hoogenboom, G., Wilkens, P.W., Porter, C.H., Tsuji, G.Y., (Editors) 2010.
705 Decision Support System for Agrotechnology Transfer Version 4.0. Volume V4.
706 DSSAT v4.5: Crop Model Documentation. University of Hawaii, Honolulu, HI.
- 707 Kalogiros, D.I., Adu, M.O., White, P.J., Broadley, M.R., Draye, X., Ptashnyk, M.,
708 Bengough, A.G., Dupuy, L.X., 2016. Analysis of root growth from a phenotyping data
709 set using a density-based model. J. Exp. Bot. 67, 1045–1058.
710 <https://doi.org/10.1093/jxb/erv573>
- 711 Keller, T., Sandin, M., Colombi, T., Horn, R., Or, D., 2019. Historical increase in
712 agricultural machinery weights enhanced soil stress levels and adversely affected soil
713 functioning. Soil Tillage Res. 194, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104293>

- 714 Klein, V.A., Reichert, J.M., Reinert, D.J., 2006. Available water in a clayey Oxisol and
715 physiological wilting of crops. *Rev. Bras. Eng. Agric. e Ambient.* 10, 646–650.
716 <https://doi.org/10.1590/S1415-43662006000300016>
- 717 Kojima, Y., Heitman, J.L., Sakai, M., Kato, C., Horton, R., 2018. Bulk density effects on
718 soil hydrologic and thermal characteristics: A numerical investigation. *Hydrol.*
719 *Process.* 32, 2203–2216. <https://doi.org/10.1002/hyp.13152>
- 720 Kroes, J.G., van Dam, J.C., Bartholomeus, R.P., Groenendijk, P., Heinen, M., Hendriks,
721 R.F.A., Mulder, H.M., Supit, I., van Walsum, P.E.V., 2017. - Theory description and
722 user manual. Wageningen. Wageningen Environmental Institute, Report 2780.
723 <https://doi.org/10.18174/416321>
- 724 Leão, T.P., da Silva, A.P., Macedo, M.C.M., Imhoff, S., Euclides, V.P.B., 2006. Least
725 limiting water range: A potential indicator of changes in near-surface soil physical
726 quality after the conversion of Brazilian Savanna into pasture. *Soil Tillage Res.* 88,
727 279–285. <https://doi.org/10.1016/j.still.2005.06.014>
- 728 Leitner, D., Klepsch, S., Bodner, G., Schnepf, A., 2010. A dynamic root system growth
729 model based on L-Systems. *Plant Soil* 332, 177–192. [https://doi.org/10.1007/s11104-](https://doi.org/10.1007/s11104-010-0284-7)
730 [010-0284-7](https://doi.org/10.1007/s11104-010-0284-7)
- 731 Letey, J., 1985. *Advances in Soil Science*, in: Stewart, B.A. (Ed.), *Soil Science, Advances*
732 *in Soil Science*. Springer New York, New York, NY, p. 320.
733 <https://doi.org/10.1007/978-1-4612-5046-3>
- 734 Lozano, L.A., Soracco, C.G., Villarreal, R., Ressia, J.M., Sarli, G.O., Filgueira, R.R., 2016.
735 Soil physical quality and soybean yield as affected by chiseling and subsoiling of a no-
736 till soil. *Rev. Bras. Cienc. do Solo* 40, 1–12.
737 <https://doi.org/10.1590/18069657rbcs20150160>

- 738 Molin, J.P., Menegatti, L.A.A., Gimenez, L.M., 2001. Evaluation of manual planters. Rev.
739 Bras. Eng. Agrícola e Ambient. 5, 339–343. [https://doi.org/10.1590/s1415-](https://doi.org/10.1590/s1415-43662001000200027)
740 43662001000200027
- 741 Moraes, M.T. de, Bengough, A.G., Debiasi, H., Franchini, J.C., Levien, R., Schnepf, A.,
742 Leitner, D., 2018. Mechanistic framework to link root growth models with weather
743 and soil physical properties, including example applications to soybean growth in
744 Brazil. Plant Soil 428, 67–92. <https://doi.org/10.1007/s11104-018-3656-z>
- 745 Moraes, M.T. de, Debiasi, H., Carlesso, R., Franchini, J.C., Silva, V.R. da, 2014. Critical
746 limits of soil penetration resistance in a rhodic Eutrudox. Rev. Bras. Ciência do Solo
747 38, 288–298. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832014000100029>
- 748 Moraes, M.T. de, Debiasi, H., Franchini, J.C., Bonetti, J. de A., Levien, R., Schnepf, A.,
749 Leitner, D., 2019. Mechanical and hydric stress effects on maize root system
750 development at different soil compaction levels. Front. Plant Sci. 10, 1–18.
751 <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01358>
- 752 Peixoto, D.S., Silva, B.M., de Oliveira, G.C., Moreira, S.G., da Silva, F., Curi, N., 2019. A
753 soil compaction diagnosis method for occasional tillage recommendation under
754 continuous no tillage system in Brazil. Soil Tillage Res. 194, 104307.
755 <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104307>
- 756 Priestley, C.H.B., Taylor, R.J., 1972. On the assessment of surface heat flux and
757 evaporation using large-scale parameters. Mon. Weather Rev. 100, 81–92.
758 [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1972\)100<0081:OTAOSH>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1972)100<0081:OTAOSH>2.3.CO;2)
- 759 Reinert, D.J., Reichert, J.M., 2006. Use of sand column to measure soil water retention -
760 prototypes and test. Ciência Rural 36, 1931–1935. [https://doi.org/10.1590/S0103-](https://doi.org/10.1590/S0103-84782006000600044)
761 84782006000600044

- 762 Richter, G.L., Zanon, A.J., Streck, N.A., Guedes, J.V.C., KrÄulich, B., Da Rocha, T.S.M.,
763 Winck, J.E.M., Cera, J.C., 2014. Estimating leaf area of modern soybean cultivars by a
764 non-destructive method. *Bragantia* 73, 416–425. [https://doi.org/10.1590/1678-](https://doi.org/10.1590/1678-4499.0179)
765 4499.0179
- 766 Ritchie, J.T., 1998. Soil water balance and plant water stress, in: Tsuji, G.Y., Hoogenboom,
767 G., Thornton, P.K. (Eds.), *Understanding Options for Agricultural Production,*
768 *Systems Approaches for Sustainable Agricultural Development.* Springer Netherlands,
769 Dordrecht, pp. 41–54. <https://doi.org/10.1007/978-94-017-3624-4>
- 770 Ritchie, J.T., 1985. A user-orientated model of the soil water balance in wheat, in: Day, W.,
771 Atkin, R.K. (Eds.), *Wheat Growth and Modelling.* Plenum Press, New York, pp. 293–
772 305.
- 773 Santos, H.G. dos, Jacomini, P.K.T., Anjos, L.H.C. dos, Oliveira, V.Á. De, Lumbreras, J.F.,
774 Coelho, M.R., Almeida, J.A. De, Cunha, T.J.F., Oliveira, J.B., 2018. *Sistema*
775 *Brasileiro de Classificação de Solos*, 5th ed. EMBRAPA, Brasília, DF.
- 776 Schneider, C.A., Rasband, W.S., Eliceiri, K.W., 2012. NIH Image to ImageJ: 25 years of
777 image analysis. *Nat. Methods.* <https://doi.org/10.1038/nmeth.2089>
- 778 Setiyono, T.D., Cassman, G.K., Specht, J.E., Weiss, A., Dobermann, A., Yang, H., 2010.
779 *SoySim: A simulation model for soybean growth and yield.* University of Nebraska-
780 Lincoln.
- 781 Silva, A.P., Kay, B.D., Perfect, E., 1994. Characterization of the Least Limiting Water
782 Range of Soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58, 1775.
783 <https://doi.org/10.2136/sssaj1994.03615995005800060028x>
- 784 Silva, V.R., Reinert, D.J., Reichert, J.M., 2000. Soil bulk density, chemical attributes and
785 corn root distribution as affected by grazing and soil management. *Rev. Bras. Ciência*
786 *do Solo* 24, 191–199. <https://doi.org/10.1590/s0100-06832000000100021>

- 787 Šimůnek, J., M. Šejna, a, Saito, H., Sakai, M., Genuchten, M.T. Van, 2013. The
788 HYDRUS-1D Software Package for Simulating the Movement of Water, Heat, and
789 Multiple Solutes in Variably Saturated Media, Version 4.17, HYDRUS Software
790 Series 3, 343.
- 791 Sivarajan, S., Maharlooei, M., Bajwa, S.G., Nowatzki, J., 2018. Impact of soil compaction
792 due to wheel traffic on corn and soybean growth, development and yield. *Soil Tillage*
793 *Res.* 175, 234–243. <https://doi.org/10.1016/j.still.2017.09.001>
- 794 Soil Survey Staff, 2014. *Keys to Soil Taxonomy*, 12th ed. USDA-Natural Resources
795 Conservation Service, Washington, DC.
- 796 Suzuki, L.E.A.S., Reichert, J.M., Albuquerque, J.A., Reinert, D.J., Kaiser, D.R., 2015.
797 Dispersion and flocculation of Vertisols, Alfisols and Oxisols in Southern Brazil.
798 *Geoderma Reg.* 5, 64–70. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2015.03.005>
- 799 Suzuki, L.E.A.S., Reichert, J.M., Reinert, D.J., De Lima, C.L.R., 2007. Relative
800 compaction, physical properties and crop yield in Oxisol and Alfisol. *Pesqui.*
801 *Agropecu. Bras.* 42, 1159–1167. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2007000800013>
- 802 Taylor, H.M., Roberson, G.M., Parker, J.J.J., 1966. Soil strength-root penetration relations
803 for medium - to coarse - textured soil materials. *Soil Sci.* 102, 18–22.
- 804 Tormena, C.A.A., Silva, Á.P. Da, Libardi, P.L., 1998. Characterization of the least limiting
805 water range of an Oxisol under no-tillage. *Rev. Bras. Ciência do Solo* 22, 573–581.
806 <https://doi.org/10.1590/S0100-06831998000400002>
- 807 Tracy, B.F., Zhang, Y., 2008. Soil compaction, corn yield response, and soil nutrient pool
808 dynamics within an integrated crop-livestock system in Illinois. *Crop Sci.* 48, 1211–
809 1218. <https://doi.org/10.2135/cropsci2007.07.0390>

- 810 van Lier, Q. de J., Gubiani, P.I., 2015. BEYOND THE “LEAST LIMITING WATER
811 RANGE”: RETHINKING SOIL PHYSICS RESEARCH IN BRAZIL. *Rev. Bras.
812 Ciência do Solo* 39, 925–939. <https://doi.org/10.1590/01000683rbc20140596>
- 813 van Lier, Q. de J., van Dam, J.C., Metselaar, K., de Jong, R., Duijnisveld, W.H.M., 2008.
814 Macroscopic Root Water Uptake Distribution Using a Matric Flux Potential
815 Approach. *Vadose Zo. J.* 7, 1065. <https://doi.org/10.2136/vzj2007.0083>
- 816 Vrindts, E., Mouazen, A.M., Reyniers, M., Maertens, K., Maleki, M.R., Ramon, H., De
817 Baerdemaeker, J., 2005. Management zones based on correlation between soil
818 compaction, yield and crop data. *Biosyst. Eng.* 92, 419–428.
819 <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2005.08.010>
- 820 Wilkens, P.W., Hoogenboom, G., Porter, C.H., Jones, J.W., Uryasev, O. (Editors). 2004.
821 Decision Support System for Agrotechnology Transfer Version 4.0. Volume 2.
822 DSSAT v4: Data Management and Analysis Tools. University of Hawaii, Honolulu,
823 HI.
- 824 Zanon, A.J., Streck, N.A., Richter, G.L., Becker, C.C., Rocha, T.S.M. da, Cera, J.C.,
825 Winck, J.E.M., Cardoso, Â.P., Tagliapietra, E.L., Weber, P.S., 2015. Branches
826 contribution and leaf area index evolution in modern cultivars of soybean. *Bragantia*
827 74, 279–290. <https://doi.org/10.1590/1678-4499.0463>

828 **Anexo A**

829 Parâmetros genéticos de espécie, ecótipo e cultivar calibradas por Fensterseifer et al. (2017)
 830 para a cultivar de soja NA 5909 RG para o Rio Grande do Sul.

Categoria do parâmetro	Parâmetro	Definição	Valor
Espécie	TB1	Temperatura vegetativa basal (C°)	10
	TB2	Temperatura basal reprodutiva inicial (C°)	8
	TO1	Temperatura ótima basal vegetativa (C°)	29
	TO2	Temperatura ótima basal reprodutiva inicial (C°)	28
Ecótipo	PL-EM	Tempo entre semeadura e emergência (V0) (dia termal)	3,4
Cultivar	CSDL	Comprimento crítico de dia curto abaixo do qual não há efeito do comprimento do dia no progresso do desenvolvimento reprodutivo (hora)	12,71
	PPSEN	Inclinação da resposta relativa do desenvolvimento ao fotoperíodo com o tempo (hora ⁻¹)	0,31
	EM-FL	Tempo entre emergência e floração (R1) (dia fototermal)	23,4
	FL-SH	Tempo entre primeira flor e primeiro legume (R3) (dia fototermal)	5,0
	FL-SD	Tempo entre primeira flor e primeira semente (R5) (dia fototermal)	11,6
	SD-PM	Tempo entre primeira semente (R5) e maturidade fisiológica (R7) (dia fototermal)	34,1
	FL-LF	Tempo entre primeira flor (R1) e final da expansão foliar (dia fototermal)	26,0
	LFMAX	Taxa máxima de fotossíntese foliar a 30 °C, 350 vpm CO ₂ , e elevada luminosidade (mgCO ₂ m ⁻² s ⁻¹)	1,0
	SLAVR	Área foliar específica sob condições normais de crescimento (cm ² g ⁻¹)	355
	SIZELF	Tamanho máximo da folha completa (três folíolos) (cm ²)	220
	WTPSD	Peso máximo da semente (g)	0,17

831

4 DISCUSSÃO GERAL

O crescimento e a produtividade da soja simuladas pelo CROPGRO ou observadas experimentalmente não foram afetadas pelo aumento do estado de compactação do solo (EC) quando não houve déficit hídrico, independentemente de como a compactação modificou as propriedades físicas do solo. Isso reforça as evidências do papel controlador das condições meteorológicas sobre a ocorrência dos estresses hídrico, gasoso e mecânico. O efeito da precipitação e da evapotranspiração na variação do conteúdo de água do solo causa grande mudança em propriedades físicas do solo, como condutividade hidráulica e resistência à penetração, sem que haja mudança de EC (GUBIANI; MENTGES, 2020). A percepção do efeito de relações dinâmicas como essa sobre a satisfação das demandas da planta facilita a aceitação da irregularidade da relação entre redução do desempenho das plantas e aumento de EC e explicita a dificuldade de fazer previsões sem o uso de modelos.

Nas ocasiões em que as variáveis de planta (simuladas ou observadas) foram afetadas pelo aumento de EC, o efeito não foi o mesmo entre as partes da planta, reforçando a desvinculação que há entre o efeito do aumento de EC no crescimento das raízes e o efeito do aumento de EC no rendimento de grãos (TAYLOR; BRAR, 1991). Muitas das conclusões encontradas em estudos que tentam relacionar propriedades físicas do solo com desempenho de plantas, afirmam que “a compactação do solo reduz o crescimento das plantas”, tomando por base a resposta das raízes (BENGOUGH et al., 2011; COLLARES et al., 2008; KELLER et al., 2019; VRINDTS et al., 2005). Assim, os resultados salientam a importância do uso de modelos de crescimento vegetal para avaliar o efeito do aumento de EC sobre o rendimento de grãos em detrimento a modelos focados exclusivamente na relação entre EC e crescimento radicular, especialmente para culturas de grãos como a soja. Para essas culturas, a quantificação do dano que um EC elevado pode causar no rendimento de grãos é mais útil para tomada de decisão sobre alguma estratégia de manejo do que a quantificação do dano que um elevado EC pode causar apenas sobre o crescimento das raízes.

Apesar do CROPGRO ser um dos poucos modelos que utiliza, além da estimativa dos estresses hídrico e gasoso, uma estratégia para estimar o impedimento mecânico, o sucesso do modelo para estimar o efeito do aumento de EC sobre o crescimento radicular foi inferior ao sucesso obtido para estimar o rendimento de grãos. A comparação da estratégia usado pelo CROPGRO (baseada essencialmente no conteúdo de água do solo) para estimar o estresse mecânico com uma estratégia baseada na resistência a penetração do solo (MORAES et al.,

2018) revela que há opções mais sensíveis à mudança de EC e que podem ser incorporadas ao CROPGRO para melhor sua capacidade preditiva.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os estudos voltados à predição da resposta das plantas a mudanças nas propriedades físicas do solo devem concentrar esforços no uso de modelos baseados nos processos do sistema solo-planta-atmosfera ao invés de tentar relacionar indicadores estáticos com desempenho das plantas. Além disso, deve ser dada preferência a modelos que permitam estimar o rendimento de grãos, pois o efeito da compactação sobre a produtividade de culturas como a soja não está necessariamente vinculado ao efeito da compactação sobre o crescimento das raízes.

O CROPGRO foi capaz de detectar o efeito da compactação sobre o crescimento e a produtividade da soja nas circunstâncias em que as condições meteorológicas ocasionaram tal efeito. A sensibilidade das estimativas de estresse hídrico, gasoso e mecânico à mudança no estado de compactação do solo em diferentes cenários meteorológicos permite ao CROPGRO fazer predições sobre quais circunstâncias e com qual intensidade a compactação pode afetar o desempenho da soja.

Entretanto, há oportunidades para melhoria na estimativa de estresse mecânico pelo CROPGRO. Por isso, estudos mais específicos podem revelar se a estratégia utilizada pelo modelo para calcular o estresse mecânico é suficiente para estimar adequadamente o crescimento radicular. Além disso, simulações com outras culturas combinadas com diferentes estados de compactação e em diferentes condições meteorológicas serão úteis para avaliar a efetividade do uso do CROPGRO na estimativa da associação entre compactação e desempenho de plantas.

6 REFERÊNCIAS

ALAGARSWAMY, G. et al. Evaluating the CROPGRO-soybean model ability to simulate photosynthesis response to carbon dioxide levels. **Agronomy Journal**, v. 98, n. 1, p. 34–42, 2006.

BENGOUGH, A. G. Modelling rooting depth and soil strength in a drying soil profile. **Journal of Theoretical Biology**, v. 186, n. 3, p. 327–338, 1997.

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**, v. 62, n. 1, p. 59–68, 2011.

BENJAMIN, J. G.; NIELSEN, D. C.; VIGIL, M. F. Quantifying effects of soil conditions on plant growth and crop production. **Geoderma**, v. 116, n. 1–2, p. 137–148, 2003.

BEULTER, A. N.; CENTURION, J. F. Compactação do solo no desenvolvimento radicular e na produtividade da soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 39, n. 6, p. 581–588, 2004.

BUSSCHER, W. J. Adjustment of flat-tipped penetrometer resistance data to a common water content. **Transactions of the ASAE**, v. 33, n. 2, p. 0519–0524, 1990.

CALMON, M. A. et al. Simulating soybean root growth and soil water extraction using a functional crop model. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, v. 42, n. 6, p. 1867–1877, 1999.

COLLARES, G. L. et al. Compactação de um latossolo induzida pelo tráfego de máquinas e sua relação com o crescimento e produtividade de feijão e trigo. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 32, n. 3, p. 933–942, 2008.

COLOMBI, T. et al. Feedbacks between soil penetration resistance, root architecture and water uptake limit water accessibility and crop growth – A vicious circle. **Science of the Total Environment**, v. 626, p. 1026–1035, 1 jun. 2018.

CONAB. **Série histórica das safras - soja**. Brasília, DF: [s.n.]. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/serie-historica-das-safras?start=30>>.

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

FAO. **FAOSTAT - Food and Agriculture Data**. Rome: [s.n.]. Disponível em: <<http://www.fao.org/faostat/en/#data/RL>>.

FEDDES, R. A. Simulation of field water use and crop yield. In: FEDDES, R. A.; KOWALIK, P. J.; ZARADNY, H. (Eds.). **Simulation monographs**. Wageningen: Pudoc for the Center for Agriculture Publishing and Documentation, 1978. p. 194–209.

- FENSTERSEIFER, C. A. et al. On the number of experiments required to calibrate a cultivar in a crop model: The case of CROPGRO-soybean. **Field Crops Research**, v. 204, p. 146–152, 2017.
- GOUEL, C.; GUIMBARD, H. Nutrition transition and the structure of global food demand. **American Journal of Agricultural Economics**, v. 101, n. 2, p. 383–403, 19 mar. 2019.
- GUBIANI, P. I. et al. Transpiration Reduction Factor and Soybean Yield in Low Land Soil with Ridge and Chiseling. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 42, 24 maio 2018.
- GUBIANI, P. I.; MENTGES, L. R. Using root water uptake estimated by a hydrological model to evaluate the least limiting water range. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 44, 14 maio 2020.
- 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**, v. 37, n. 1, p. 1–10, 2013.
- HAMZA, M. A.; ANDERSON, W. K. Soil compaction in cropping systems. **Soil and Tillage Research**, v. 82, n. 2, p. 121–145, 2005.
- HILL, J. N. S.; SUMNER, M. E. Effect of bulk density on moisture characteristics of soils. **Soil Science**, v. 103, n. 4, p. 234–238, 1967.
- HOOGENBOOM, G. et al. **Desion Support System for Agrotechnology Transfer System (DSSAT) Version 4.6** Washington, USADSSAT Foundation, , 2015.
- JONES, J. . et al. The DSSAT cropping system model. **European Journal of Agronomy**, v. 18, n. 3–4, p. 235–265, jan. 2003.
- KELLER, T. et al. Historical increase in agricultural machinery weights enhanced soil stress levels and adversely affected soil functioning. **Soil and Tillage Research**, v. 194, n. 104293, p. 1–12, 2019.
- KOJIMA, Y. et al. Bulk density effects on soil hydrologic and thermal characteristics: A numerical investigation. **Hydrological Processes**, v. 32, n. 14, p. 2203–2216, 1 jul. 2018.
- KOPNINA, H. The victims of unsustainability: A challenge to sustainable development goals. **International Journal of Sustainable Development and World Ecology**, v. 23, n. 2, p. 113–121, 3 mar. 2016.
- KUMAR, V. et al. A Review of Soil Compaction- Concerns, Causes and Alleviation. **International Journal of Plant & Soil Science**, v. 22, n. 4, p. 1–9, 10 abr. 2018.
- LAMBERS, H.; CHAPIN, F. S.; PONS, T. L. **Plant Physiological Ecology**. New York, NY: Springer New York, 2008.
- LETEY, J. Relationship between soil physical properties and crop production. In: STEWART, B. A. (Ed.). . **Advances in Soil Science**. New York, NY: Springer New York, 1985. v. 1p. 320.

LORETI, E.; VAN VEEN, H.; PERATA, P. Plant responses to flooding stress. **Current Opinion in Plant Biology**, v. 33, p. 64–71, 2016.

MCBRATNEY, A.; FIELD, D. J.; KOCH, A. The dimensions of soil security. **Geoderma**, v. 213, p. 203–213, 2014.

MERCAU, J. L. et al. Predicting on-farm soybean yields in the pampas using CROPGRO-soybean. **Field Crops Research**, v. 100, n. 2–3, p. 200–209, 2007.

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

MORAES, M. T. DE et al. Mechanistic framework to link root growth models with weather and soil physical properties, including example applications to soybean growth in Brazil. **Plant and Soil**, v. 428, n. 1–2, p. 67–92, 2018.

MORAES, M. T. DE et al. Mechanical and hydric stress effects on maize root system development at different soil compaction levels. **Frontiers in Plant Science**, v. 10, n. 1358, p. 1–18, 29 out. 2019.

REICHARDT, K.; TIMM, L. C. **Solo, planta e atmosfera: conceitos, processos e aplicações**. 2. ed. Barueri, SP: Manole, 2012.

SENTELHAS, P. C. et al. The soybean yield gap in Brazil - Magnitude, causes and possible solutions for sustainable production. **Journal of Agricultural Science**, v. 153, n. 8, p. 1394–1411, 1 nov. 2015.

TAYLOR, H. M.; BRAR, G. S. Effect of soil compaction on root development. **Soil and Tillage Research**, v. 19, n. 2–3, p. 111–119, 1991.

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

VAN LIER, Q. DE J. Disponibilidade de água às plantas. In: JONG VAN LIER, Q. DE (Ed.). **Física do Solo**. 1. ed. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2010. p. 298.

VRINDTS, E. et al. Management zones based on correlation between soil compaction, yield and crop data. **Biosystems Engineering**, v. 92, n. 4, p. 419–428, 2005.