

Níveis de manejo do solo para avaliação de riscos climáticos na cultura da soja



**Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
Embrapa Soja
Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento**

DOCUMENTOS 447

Níveis de manejo do solo para avaliação de riscos climáticos na cultura da soja

*Henrique Debiasi
José Eduardo Boffino de Almeida Monteiro
Julio Cezar Franchini
José Renato Bouças Farias
Osmar Conte
Gilberto Rocca da Cunha
Moacir Tuzzin de Moraes
Alvadi Antonio Balbinot Junior
Fernando Antonio Macena da Silva
Balbino Antônio Evangelista
Anderson Carlos Marafon*

Autores

Embrapa Soja
Londrina, PR
2022

Exemplares desta publicação podem ser adquiridos na:

Embrapa Soja
Rod. Carlos João Strass, s/n
Acesso Orlando Amaral, Distrito da Warta
CEP 86065-981
Caixa Postal 4006
Londrina, PR
Fone: (43) 3371 6000
www.embrapa.br/soja
www.embrapa.br/fale-conosco/sac

**Comitê Local de Publicações
da Embrapa Soja**

Presidente
Adeney de Freitas Bueno

Secretária-Executiva
Regina Maria Villas Bôas de Campos Leite

Membros
*Claudine Dinali Santos Seixas, Edson Hirose,
Ivani de Oliveira Negrão Lopes, José de Barros
França Neto, Liliane Márcia Mertz-Henning,
Marco Antonio Nogueira, Mônica Juliani
Zavaglia Pereira, Norman Neumaier*

Supervisão editorial
Vanessa Fuzinatto Dall'Agnol

Normalização
Valéria de Fátima Cardoso

Projeto gráfico da coleção
Carlos Eduardo Felice Barbeiro

Editoração eletrônica
Marisa Yuri Horikawa

Foto da capa
Julio Cezar Franchini

1ª edição
PDF digitalizado (2022).

Todos os direitos reservados.

A reprodução não autorizada desta publicação, no todo ou em parte,
constitui violação dos direitos autorais (Lei nº 9.610).

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Embrapa Soja

Níveis de manejo do solo para avaliação de riscos climáticos na cultura da soja / Henrique
Debiasi... [et al.]. – Londrina : Embrapa Soja, 2022.
137 p. (Documentos / Embrapa Soja, ISSN 2176-2937 ; n. 447).

1. Manejo do solo. 2. Análise de risco. 3. Clima. 4. Soja. I. Debiasi, Henrique. II. Monteiro,
José Eduardo Boffino de Almeida. III. Franchini, Julio Cezar. IV. Farias, José Renato Bouças.
V. Conte, Osmar. VI. Cunha, Gilberto Rocca da. VII. Moraes, Moacir Tuzzin de. VIII. Balbinot
Junior, Alvadi Antonio. IX. Silva, Fernando Antonio Macena da. X. Evangelista, Balbino
Antônio. XI. Marafon, Anderson Carlos. XII. Série.

CDD: 631.8 (21. ed.)

Autores

Henrique Debiasi

Engenheiro-agrônomo, doutor em Ciências do Solo, pesquisador da Embrapa Soja, Londrina, PR.

José Eduardo Boffino de Almeida Monteiro

Engenheiro agrônomo, doutor em Agrometeorologia, pesquisador da Embrapa Agricultura Digital, Campinas, SP.

Julio Cezar Franchini

Engenheiro-agrônomo, doutor em Ciências, pesquisador da Embrapa Soja, Londrina, PR.

José Renato Bouças Farias

Engenheiro-agrônomo, doutor em Fitotecnia, pesquisador da Embrapa Soja, Londrina, PR.

Osmar Conte

Engenheiro-agrônomo, doutor em Ciências do Solo, pesquisador da Embrapa Trigo, Passo Fundo, RS.

Gilberto Rocca da Cunha

Engenheiro-agrônomo, doutor em Fitotecnia, pesquisador da Embrapa Trigo, Passo Fundo, RS.

Moacir Tuzzin de Moraes

Engenheiro-agrônomo, doutor em Ciências do Solo, Professor da ESALQ/USP, Piracicaba, SP.

Alvadi Antonio Balbinot Junior

Engenheiro-agrônomo, doutor em Produção Vegetal, pesquisador da Embrapa Soja, Londrina, PR.

Fernando Antonio Macena da Silva

Engenheiro-agrônomo, doutor em Engenharia Agrícola, pesquisador da Embrapa Cerrados, Planaltina, DF .

Balbino Antônio Evangelista

Geógrafo, doutor em Engenharia Agrícola, analista da Embrapa Pesca e Aquicultura, Palmas, TO.

Anderson Carlos Marafon

Engenheiro-agrônomo, doutor em Fisiologia Vegetal, pesquisador da Embrapa Tabuleiros Costeiros, Unidade de Execução de Pesquisa e Desenvolvimento de Rio Largo, Rio Largo, AL

Apresentação

Nas últimas duas décadas, o Brasil se consolidou como um dos principais players do agronegócio mundial. Somente em 2021, as exportações do agro brasileiro somaram US\$ 120 bilhões, ou 43% do total exportado. É, também, o setor econômico que gera o maior superávit na balança comercial (US\$ 105 bilhões em 2021). Boa parte desse protagonismo brasileiro no cenário agrícola mundial é impulsionado pelo complexo soja, cujas exportações renderam US\$ 48 bilhões (40% do total do auferido pelo agronegócio). Neste contexto, a soja é atualmente a cultura com a maior área cultivada (41 milhões de ha) e produção (124 milhões de t) no Brasil, o que torna o País o maior produtor e exportador mundial do grão.

A manutenção do protagonismo brasileiro no cenário agrícola mundial passa pelo desenvolvimento e adoção de tecnologias que aumentem a produtividade e a estabilidade de produção. Entre essas tecnologias, merece destaque o Zoneamento Agrícola de Risco Climático (Zarc), cujos resultados indicam o que, onde e quando semear/plantar, de forma a minimizar os riscos de perdas de produtividade por eventos meteorológicos adversos. Além de ser requisito para acessar programas governamentais de gestão de riscos, como o Proagro (Programa de Garantia da Atividade Agropecuária) e o PSR (Programa de Subvenção ao Prêmio do Seguro Rural), o Zarc constitui-se em uma importante ferramenta no processo de tomada de decisão por produtores e técnicos no que diz respeito aos cultivos com maior viabilidade em cada município, às melhores épocas de semeadura e aos ciclos mais adequados das cultivares de forma a reduzir os riscos climáticos.

A maior parte das indenizações pagas pelo seguro agrícola tem sido motivada pela ocorrência de secas. No Zarc atual, a definição dos riscos de perdas de produtividade por seca leva em consideração, além das condições me-

teorológicas e das características das culturas/cultivares, a capacidade de armazenamento de água disponível no solo, estimada com base na sua textura e na profundidade efetiva do sistema radicular. A qualidade do manejo do solo adotado pelos produtores não é considerada na geração dos resultados do Zarc atual, não obstante o grande potencial que práticas como a adoção plena do sistema plantio direto (SPD) têm em mitigar os riscos de perdas de produtividade por seca.

Visando preencher essa lacuna, o presente documento torna pública a 1ª versão de uma proposta inovadora para enquadramento de áreas de produção de soja em quatro níveis de manejo (NMs), segundo indicadores e critérios que refletem os impactos das práticas agrícolas sobre características e processos físicos, químicos e biológicos do solo associados à magnitude dos riscos de perdas de produtividade por seca. Em conformidade com a qualidade e o histórico do manejo adotado, a metodologia prevê a adequação de parâmetros dos modelos do Zarc que determinam a disponibilidade de água para a cultura, gerando assim riscos hídricos decrescentes do NM1 ao NM4. Por sua vez, os menores riscos podem, no futuro, proporcionar benefícios para o produtor cujas áreas sejam enquadradas em NMs mais altos, como ampliação dos períodos de semeadura previstos no Zarc, maior produtividade e estabilidade da produção, facilitando assim o acesso ao Proagro e ao PSR. Salienta-se que a proposta ora apresentada é focada na produção de soja, mas pode ser estendida para outras culturas de grãos com pequenos ajustes nos critérios e indicadores para enquadramentos nos NMs, bem como nos parâmetros de modelagem.

Esperamos que a proposta aqui apresentada contribua para incentivar a adoção, pelos produtores de soja, das melhores práticas de manejo do solo visando mitigar os riscos de perdas de produtividade por déficit hídrico e, assim, diminuir o impacto negativo das secas sobre a economia brasileira, sobretudo a dos municípios de base agrícola.

Adeney de Freitas Bueno

Chefe-adjunto de Pesquisa e Desenvolvimento
Embrapa Soja

Conteúdo

Introdução.....	9
Revisão de Literatura	11
Disponibilidade hídrica e produtividade.....	11
Manejo do Solo	15
Principais modificações nos atributos do solo e mitigação de riscos.....	23
Profundidade efetiva do sistema radicular (Ze).....	23
Fatores químicos.....	34
Fatores físicos.....	40
Fatores biológicos.....	58
Infiltração de água no solo	63
Conceitos e caracterização do processo físico.....	63
Fatores que influenciam a taxa de infiltração de água.....	65
Relação entre manejo do solo e infiltração.....	67
Evapotranspiração e coeficiente de cultura (Kc).....	70
Material e Métodos.....	82
Proposta de níveis de manejo.....	82
Profundidade efetiva do sistema radicular (Ze).....	83
Infiltração de água no solo	86
Coeficiente de cultura (Kc).....	88
Análise de sensibilidade.....	91
Avaliação de impactos nos resultados do ZARC	93
Resultados e Discussão.....	95
Critérios e indicadores para enquadramento de lavouras de soja nos NMs	95
Proposta de parametrização de variáveis do balanço hídrico alteradas pelas classes de nível de manejo	99

Profundidade efetiva do sistema radicular (Z_e)	99
Infiltração de água no solo	103
Coefficiente de cultura (K_c).....	104
Análise de Sensibilidade	108
Avaliação de impactos nos resultados do ZARC	112
Considerações Finais	116
Referências	118

Introdução

Apesar de todos os avanços tecnológicos, produzir alimentos, quer seja de natureza vegetal ou animal, ainda continua sendo uma atividade de risco. Tais riscos decorrem da instabilidade climática, ocorrências sanitárias e oscilações do mercado (Guimarães; Nogueira, 2009). Estudo realizado pelo Banco Mundial, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (Mapa) e Embrapa, indica que o Brasil perde no setor agropecuário mais de R\$ 11 bilhões ao ano devido a riscos diversos que poderiam ser geridos de forma mais eficaz (Arias et al., 2015). Em muitas regiões do globo, mais de 60% da instabilidade da produção agrícola são causados pela variabilidade climática (Ray et al., 2015), uma vez que os agricultores exercem pouco ou nenhum controle sobre fenômenos naturais como secas, inundações, geadas, ondas de calor, vendavais e granizo (Monteiro, 2009).

No Brasil, o Programa de Garantia da Atividade Agropecuária (Proagro) atende pequenos e médios produtores rurais, indenizando perdas causadas por condições meteorológicas adversas. Paralelamente, o Programa de Subvenção ao Prêmio do Seguro Rural (PSR), fomenta a contratação de Seguro Rural privado ao custear parte do valor do prêmio. Para ter acesso a estes programas, o produtor deve respeitar as indicações do Zoneamento Agrícola de Risco Climático (Zarc) (Brasil, 2021), por ser um eficiente instrumento de gestão de riscos agroclimáticos reconhecido pelo Conselho Monetário Nacional. O Zarc é um estudo agrometeorológico que delimita regiões de produção por classes de risco e indica as épocas de semeadura com baixos riscos de acordo com probabilidades de perda de produção causadas por eventos meteorológicos adversos. Os seus resultados indicam o que, onde e quando semear/plantar com riscos climáticos estabelecidos e dentro de certos limites. As informações do Zarc podem ser usadas por assistentes técnicos e produtores rurais para avaliar quais os cultivos são mais viáveis em cada município, as melhores datas de semeadura, os ciclos mais adequados das cultivares, a viabilidade ou não de se realizar 2ª ou 3ª safras e as práticas de manejo importantes ou indispensáveis. Isso permite que os produtores rurais planejem seus investimentos de forma economicamente sustentável e que busquem alternativas de manejo para reduzir riscos, difundindo boas práticas e adoção de tecnologia. Quando as indicações do Zarc passaram a ser exigidas pelo

Proagro na década de 1990, observou-se uma redução relevante nos índices de perda (Santos; Martins, 2016; BCB, 2022a). Por isso, o Proagro, o PSR e as seguradoras privadas exigem o cumprimento das indicações Zarc como forma a evitar cultivos em regiões ou épocas com risco climático além de um limite aceitável, reduzindo, assim, perdas evitáveis na agricultura brasileira.

Os resultados do Zarc pressupõem um manejo agrônômico adequado para o bom crescimento, desenvolvimento e produtividade das culturas, conforme a disponibilidade dos recursos ambientais de cada localidade. Dessa forma, adota-se um referencial teórico médio como representativo das condições adequadas de manejo e de tecnologia de produção, sem as quais não seria possível produzir satisfatoriamente mesmo em clima favorável. Todavia, há diferentes realidades do campo, que nem sempre possibilitam que os pré-requisitos para uma boa produtividade sejam plenamente atendidos. São passíveis de identificação, falhas ou deficiências de manejo de diversos tipos, que vão desde fertilidade do solo inadequada até manejo deficiente de pragas e doenças, podendo resultar em perdas de produtividade independente de condição meteorológica ou, em muitos casos, agravar danos e perdas causados por eventos meteorológicos adversos. Portanto, a execução do manejo da cultura ou o investimento em tecnologias variam entre propriedades rurais, podendo ser identificadas condições que são claramente limitantes até aquelas que beneficiam sobremaneira a produção agrícola.

De 2013 a 2021, a maioria dos comunicados de perda no Proagro foram motivados por seca, representando 48% do valor total das coberturas deferidas, enquanto chuva excessiva e geada foram a segunda e a terceira principais causas de perdas, com 20% e 19% do total, respectivamente (BCB, 2022b). Por isso, dentre as práticas de manejo, as que melhoram as condições produtivas do solo assumem especial relevância no contexto da gestão de riscos climáticos. Destacam-se aquelas que exercem influência direta na redução de perdas de produtividade por seca e, portanto, sobre o risco hídrico em geral (Singer; Ewing, 2000; Hamza; Anderson, 2005). No Brasil, a adoção do sistema plantio direto (SPD) contribui para a sustentabilidade da produção agrícola, sendo, frequentemente, utilizado como sinônimo de boas práticas de manejo de solo. Os principais benefícios do SPD são a manutenção da cobertura do solo e a preservação ou aumento do teor de matéria orgânica e a melhoria das propriedades físicas, químicas e biológicas do solo. Além des-

ses benéficos, o crescimento do sistema radicular tem grande importância para o aumento do reservatório de água disponível durante os períodos de estresse hídrico, que têm sido cada vez mais frequentes durante o ciclo de produção das culturas de verão (Franchini et al., 2009). Nesse sentido, práticas de manejo do solo que aumentem a infiltração e a retenção de água no solo e o crescimento das raízes das culturas em profundidade são relevantes para minimizar as perdas por déficit hídrico.

Diante desse contexto, a hipótese deste trabalho é que a tipificação de níveis de manejo e seus respectivos impactos nos atributos do solo permitirá a geração de resultados de Zarc específicos para cada nível. Com isso, esses resultados evidenciarão os benefícios e a redução de riscos com o aperfeiçoamento do manejo do solo, estimulando sua adoção e auxiliando na definição de estratégias do planejamento da produção e da gestão de riscos.

O objetivo deste trabalho foi definir quatro níveis de manejo de solo (NMs) para utilização nas avaliações de risco hídrico do Zarc da cultura da soja.

Revisão de Literatura

Disponibilidade hídrica e produtividade

Nas últimas quatro décadas, para surpresa de muitos, tecnologias especialmente desenvolvidas e apropriadas às condições tropicais brasileiras revolucionaram totalmente os sistemas de produção e o Brasil passou, de importador, para o grupo dos principais países exportadores de alimentos, principalmente pelos ganhos expressivos de produtividade e pela intensificação dos sistemas de produção.

A produção agrícola mostra-se, dia após dia, mais dinâmica, buscando informações que levem à rápida e correta tomada de decisões, com vista à maximização da produtividade e da sua rentabilidade. No entanto, a agricultura é uma atividade de elevado risco e significativas incertezas, pois se caracteriza por sistemas produtivos que são afetados frequentemente por diversos tipos de riscos que, infelizmente, têm crescido nos últimos anos. Tais riscos decorrem das ocorrências fitossanitárias, oscilações do mercado e, principalmente, da instabilidade climática. Dentre os fatores inerentes à produção agrícola, o

clima continua aparecendo como aquele de mais difícil controle e maior ação sobre a limitação às máximas produtividades. Aliado a isto, a imprevisibilidade das variabilidades do clima confere à ocorrência de adversidades climáticas a posição de principal fator de risco e de insucesso na exploração das principais culturas agrícolas. Segundo o Banco Mundial (Arias et al., 2015), no Brasil, até 75% das perdas são devido ao clima, que alcançam, em média, R\$ 11 bilhões ao ano.

O clima é um dos fatores mais importantes na produção de grãos, pois afeta as cadeias de duas maneiras: a primeira é por meio das adversidades climáticas e a segunda, via o controle exercido pelo clima em relação às áreas onde se podem cultivar determinadas espécies (Ávila et al., 2013). Apesar do vasto conhecimento para o cultivo da soja, a disponibilidade hídrica durante a estação de crescimento constitui-se, ainda, na principal limitação à expressão do potencial de produtividade da cultura e na maior causa de variabilidade dos rendimentos de grãos observados de uma safra para outra. De acordo com Sentelhas et al. (2015), períodos de seca foram responsáveis por elevadas perdas (cerca de 30%) na produção brasileira de soja. Além disso, os cenários climáticos futuros para a produção de soja podem impactar drasticamente a produtividade da cultura (Rio et al., 2016). Previsões ambientais sinalizam para o aumento do aquecimento global nas próximas décadas. O último relatório publicado pelo IPCC (2021) menciona que as mudanças climáticas estão acontecendo rapidamente. Os aumentos da variabilidade e da ocorrência de eventos extremos incrementam o risco de perdas por condições climáticas adversas. A magnitude desse fenômeno implica, entre outros, em necessidade de novas e combinadas estratégias que visem mitigar ou buscar maior adaptação a tais efeitos, como alternativas de manejo do solo e da cultura, estudos com modelagem e análise de dados, para avaliação dos possíveis impactos sobre atividades humanas, recursos naturais e, particularmente, sobre a agricultura mundial.

A água desempenha a função de solvente, transportando gases, minerais e outros solutos na planta, além de atuar como regulador térmico, agindo tanto no resfriamento como na manutenção e na distribuição do calor. A disponibilidade de água é importante, principalmente em dois períodos do ciclo de desenvolvimento da soja: germinação-emergência e floração-final de enchimento de grãos. Durante o primeiro período, tanto o excesso como a falta de

água são prejudiciais ao estabelecimento da cultura e à obtenção de uma boa uniformidade na população de plantas (Farias et al., 2009).

A necessidade de água na cultura da soja vai aumentando com o desenvolvimento da planta, atingindo o máximo durante a floração-enchimento de grãos (7 a 8 mm dia⁻¹), decrescendo após esse período (Ávila et al., 2013). Em geral, o consumo mais elevado de água coincide com o período em que a cultura apresenta maiores altura e índice de área foliar (IAF). A necessidade total de água na cultura da soja, para obtenção do máximo rendimento, varia entre 450 e 800 mm/ciclo, dependendo das condições climáticas, do manejo da cultura e da duração do ciclo (Farias et al., 2007). Como o consumo de água pela cultura da soja depende, além do estágio de desenvolvimento, da demanda evaporativa da atmosfera, o seu valor absoluto pode variar, tanto em função das condições climáticas de cada região como em função do ano e da época de semeadura (condições de tempo) na mesma região climática (Bergamaschi et al., 1999).

A distribuição desuniforme da precipitação pluvial é limitante à obtenção de altos rendimentos, principalmente durante as fases de maior demanda de água (floração/início do enchimento de grãos) e mais críticas à ocorrência de déficits hídricos (enchimento de grãos). A cultura da soja, para apresentar bom desempenho, necessita, além de uma quantidade de água suficiente, uma boa distribuição das chuvas durante o ciclo, atendendo suas necessidades, principalmente, durante as fases sensíveis ao déficit hídrico.

Em trabalhos conduzidos na Embrapa Soja, em Londrina, PR, ao longo de 15 safras, avaliando-se diversas cultivares sob diferentes condições de disponibilidade hídrica, verificou-se que os maiores rendimentos de grãos de soja foram obtidos com 650 a 700 mm de água, bem distribuídos ao longo de todo o ciclo. Observou-se ainda que nos níveis com aplicação de déficit hídrico durante as fases vegetativa e reprodutiva, apesar da quantidade total de água durante todo o ciclo ter atingido valores próximos a 700 mm, os rendimentos alcançados não foram tão altos em função da má distribuição da precipitação, principalmente, durante a fase mais crítica (período reprodutivo), limitando drasticamente a produtividade de grãos. Por outro lado, o excesso de chuva e dias nublados podem prejudicar a fotossíntese, o arejamento do solo, o desenvolvimento das raízes e a fixação biológica de nitrogênio, interferir em outros processos e causar várias anomalias no desenvolvimento da planta,

reduzindo o rendimento de grãos. A lâmina ideal de água para atender as necessidades da cultura da soja durante a fase crítica (R1-R6) situou-se entre 120 e 300 mm, bem distribuídos ao longo deste período (variando de 30 a 70 dias, a partir do início da floração, em função da cultivar, tipo de crescimento e das condições climáticas durante a estação de crescimento). Observou-se ainda que quantidades de água de igual magnitude, porém, mal distribuída, também limitaram a obtenção de altas produtividades. Desta forma, ficou evidente que, para garantir máximo rendimento de grãos, a água necessária deve ser disponibilizada ao longo de todo o ciclo, a fim de atender as exigências da cultura, podendo ser suprida através da chuva, da irrigação ou pelo armazenamento de água no solo (Farias et al., 2009).

A chuva é a principal fonte de água para a maior parte da produção de soja no mundo. Apesar de eficazes, poucos são os agricultores que dispõem de sistemas de irrigação para suplementar as necessidades de água da cultura. Cabe ressaltar que a ausência de chuvas, isoladamente, não significa, obrigatoriamente, ocorrência de déficit hídrico. A planta busca um ajuste entre a absorção de água e a transpiração. O limite a este ajustamento representa o início do déficit hídrico. A dinâmica da água no sistema solo-planta-atmosfera ocorre em função da demanda evaporativa da atmosfera (DEA), que, em última análise, determina a magnitude da perda de água por transpiração e, conseqüentemente, define a necessidade de absorção pelas raízes (Bergamaschi et al., 1999). A transpiração ocorre, então, em função da DEA e, de forma prática, o déficit hídrico tem início quando a transpiração da planta começa a ser limitada pela disponibilidade de água no solo. Em regiões com distribuição irregular das chuvas e elevada demanda evaporativa da atmosfera (caracterizadas por densidade de fluxo de radiação solar elevada, ventos fortes, altas temperaturas e baixa umidade relativa do ar), a disponibilidade hídrica no solo passa a ser fundamental para assegurar sucesso na exploração agrícola, principalmente, em áreas não irrigadas.

Imenso progresso tem sido conseguido na adaptação da soja para a obtenção de altos rendimentos em áreas de baixa latitude. A limitação fotoperiódica foi eliminada via seleção genética cuidadosa e desenvolvimento de germoplasma menos sensível ao fotoperíodo. O baixo pH e os altos teores de alumínio nos solos foram superados, principalmente, pela calagem. Atualmente, no Brasil, admite-se que o principal fator que limita a expressão do potencial de rendimento da soja, em algumas regiões e anos, seja a disponibilidade de

água nos solos. As produtividades são extremamente dependentes da água disponível e, desta forma, provavelmente, será necessário aumentar a oferta de água para atender a transpiração da cultura e, conseqüentemente, obterem-se incrementos na produtividade e menores perdas. Há evidências de que o aumento da profundidade do sistema radicular da soja é relevante para a obtenção de altas produtividades e redução de perdas sob condições limitantes de água. Além disso, no futuro, muito do potencial para obtenção de altas produtividades, provavelmente, será resultado da maior disponibilidade de água às culturas, decorrentes da capacidade de recarga e armazenamento de água pelo solo.

Manejo do Solo

A definição atual de manejo do solo, para atender os requisitos de sistemas de produção de grãos sustentáveis, encontra-se diretamente associado ao conceito de agricultura conservacionista. Conforme Denardin e Kochhnnan (2006), a agricultura conservacionista é entendida como um complexo tecnológico de enfoque holístico, cujos objetivos são preservar e melhorar a utilização dos recursos naturais, mediante o manejo integrado do solo, da água e da biodiversidade, devidamente compatibilizado com o uso de insumos externos. A partir desse conceito, o manejo conservacionista do solo pode ser definido como um conjunto de práticas agrícolas e tecnologias aplicadas ao solo de maneira a preservar ou melhorar a sua fertilidade para sustentar a produtividade agrícola por tempo ilimitado, com maior eficiência de utilização dos insumos e dos recursos naturais e, assim, causar menor impacto negativo sobre o ambiente. Nesse contexto, o termo “fertilidade” não se restringe à capacidade do solo em fornecer nutrientes para as plantas em quantidades equilibradas e adequadas a cada fase do desenvolvimento vegetal. O conceito de fertilidade no âmbito da agricultura conservacionista é mais amplo, emergindo das interações entre as diversas propriedades físicas, químicas e biológicas do solo ao longo do tempo, de tal modo que seja garantida a expressão do potencial produtivo sem degradar os recursos naturais.

O SPD, quando implantado e conduzido em consonância com suas premissas, constitui-se na principal ferramenta do manejo conservacionista do solo em regiões com clima tropical e subtropical. As premissas que caracterizam o SPD envolvem a mínima mobilização do solo, restrita à linha de semea-

dura; a cobertura permanente do solo por culturas e por seus resíduos; e a diversificação de espécies vegetais, via rotação, sucessão e consorciação de culturas. Além do atendimento dessas premissas, é essencial que o SPD seja estabelecido de maneira correta, com a correção da acidez do solo e dos teores de nutrientes no perfil em consonância com os resultados da análise química do solo. Na etapa de implantação, operações de preparo do solo são frequentemente necessárias, para incorporar os corretivos e fertilizantes pelo menos a 20 cm de profundidade, bem como para eliminar sulcos de erosão, camadas compactadas oriundas do uso intensivo de implementos no preparo convencional (pé-de-grade ou pé-de-arado) e readequar o sistema de terraceamento. Mais detalhes a respeito dos cuidados e das práticas a serem adotadas na fase de implantação do SPD podem ser encontrados em Conte et al. (2020).

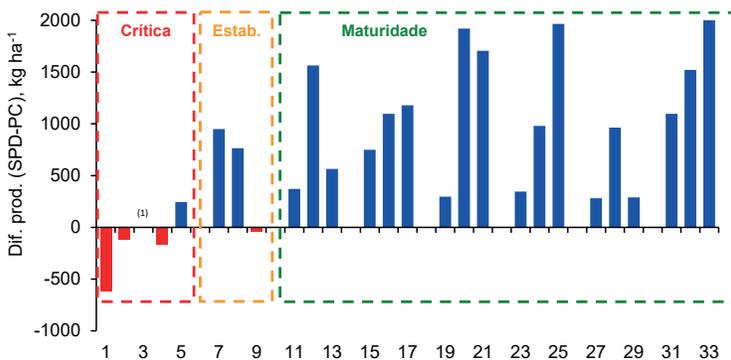
A utilização do SPD em substituição a outros sistemas de manejo do solo resulta em vários benefícios que atendem aos requisitos da agricultura conservacionista, tais como: diminuição dos custos associados às operações mecanizadas e à necessidade de mão-de-obra (Lal, 2007); controle da erosão do solo, com reduções de 97% e 40% nas perdas médias de solo e água, respectivamente (Merten et al., 2015); melhoria da estrutura do solo e aumento da disponibilidade hídrica para as culturas (Alvarez; Steinbach, 2009; Jin et al., 2011; Moraes et al., 2016; Moraes et al., 2018c); incremento dos estoques de carbono no solo, com reflexos positivos na mitigação de gases causadores de efeito estufa (GEEs) (Babujia et al., 2010; Bayer et al., 2016); diminuição dos picos de temperatura máxima do solo (Derpsch et al., 1986); e aumento da atividade e diversidade da biota do solo (Adl et al., 2005; Babujia et al., 2010). Esses benefícios resultam em redução dos custos de produção e dos impactos ambientais negativos decorrentes da atividade agrícola (Reicosky; Saxton, 2007; Merten et al., 2015; Bayer et al., 2016), bem como no aumento da produtividade com menor risco de perdas por estresses hídricos (McGregor et al., 2006; Jin et al., 2011; Franchini et al., 2012; Debiasi et al., 2013; Silva et al., 2020b).

No que diz respeito à produtividade das culturas, diversos trabalhos de pesquisa têm demonstrado que o SPD resulta em valores de produtividade similares ou inferiores ao preparo convencional por um período ao redor de 4 a 5 anos (McGregor et al., 2006; Fontoura; Bayer, 2008; Franchini et al., 2012;

Debiasi et al., 2013), que se constitui na chamada fase crítica de consolidação do sistema. Após esse período, há uma fase de estabilização, com duração de 4 a 8 anos, quando começam a aparecer diferenças de produtividade favoráveis ao SPD (Debiasi et al., 2013). Passados 8 a 12 anos, a produtividade das culturas passa a ser consistentemente maior no SPD comparativamente ao preparo convencional (fase de maturidade do sistema), em função da melhoria da fertilidade química, física e biológica do solo proporcionada pela mínima mobilização, pela cobertura permanente e pela diversificação de espécies vegetais (Sá et al., 2010). Um exemplo de como as diferenças de produtividade da soja entre o SPD e o preparo convencional (PC) evoluem ao longo do tempo é apresentado na Figura 1, elaborada a partir dos dados de um experimento de longa duração que vem sendo conduzido na Embrapa Soja desde 1988. Conforme essa Figura, as produtividades de soja no SPD foram em geral inferiores ao PC nas cinco primeiras safras, caracterizando a fase crítica do sistema. Do 6º ao 9º ano tem-se a fase de estabilização, em que o SPD resultou em maiores produtividades de soja em relação ao PC na maioria dos anos, porém as diferenças foram menores comparativamente à fase de maturidade, que iniciou a partir da 11ª safra. Na fase de maturidade, a produtividade da soja foi maior no SPD do que no PC em todas as safras, com uma diferença média de 50%.

Franchini et al. (2012) correlacionaram a produtividade da soja das safras 1994/1995 a 2010/2011 do mesmo experimento referente à Figura 1, com o índice de satisfação das necessidades de água (ISNA), calculado para período reprodutivo da cultura (estádios R1 a R6) (Figura 2). O ISNA é definido como a relação entre a evapotranspiração real (ET_r) e evapotranspiração máxima ou potencial da cultura (ET_c), ou seja, $ISNA = ET_r/ET_c$. Os resultados mostraram que as diferenças de produtividade entre o SPD e o PC aumentaram com a redução do ISNA. Enquanto no PC a produtividade foi reduzida com valores de $ISNA < 0,8$, no SPD isso ocorreu com $ISNA < 0,7$. Isso evidencia que o SPD, alicerçado na diversificação de espécies vegetais, via rotação, sucessão e consorciação de culturas, na mobilização de solo apenas na linha de semeadura, na manutenção permanente da cobertura e na minimização do intervalo entre colheita e semeadura, constitui-se em uma das principais ferramentas para aumento da eficiência de uso e da disponibilidade de água no solo, reduzindo assim os impactos negativos do déficit hídrico na produtividade e na estabilidade da produção das culturas. A maior disponibilidade

hídrica no SPD em relação a sistemas com revolvimento do solo pode ser atribuída, entre outros fatores, ao aumento da taxa de infiltração de água (Merten et al., 2015; Moraes et al., 2016), da condutividade hidráulica não saturada (Ortigara, 2017), da capacidade de água disponível (Moraes et al., 2016) e dos fluxos ascendentes de água (Prevedello et al., 2007); à redução das perdas de água por evaporação (Andrade, 2008) e da amplitude térmica do solo (Derpsch et al., 1986); e à melhoria da estrutura do solo, favorecendo o armazenamento de água disponível e o crescimento radicular das culturas (Franchini et al., 2009; Moraes et al., 2016).



(1) Nas safras 3, 6, 10, 14, 18, 22, 26 e 30, o experimento foi cultivado com milho durante o verão, cujos dados não estão apresentados.

Figura 1. Diferença de produtividade da soja obtida no sistema plantio direto (SPD) e preparo convencional (PC), ao longo de 33 safras (1989 a 2021). Embrapa Soja, Londrina, PR, 2021.

Fonte: Dados parcialmente publicados em Franchini et al. (2012) e Moraes et al. (2018c).

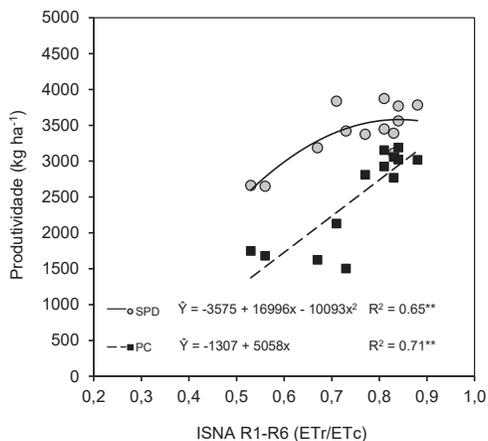


Figura 2. Relação entre a produtividade da soja (safras 1994/1995 a 2010/2011) e o índice de satisfação das necessidades de água estimado para a subperíodo reprodutivo da cultura (R1 a R6), em áreas manejados sob sistema plantio direto (SPD) e preparo convencional de solo (PC).

Fonte: adaptado de Franchini et al. (2012).

Embora estatísticas recentes indiquem o uso do SPD em cerca de 33 milhões de ha no Brasil (Fuentes-Llanillo et al., 2021), é consenso que a maior parte dessa área não atende de forma integral às premissas do sistema, restringindo-se, na maioria das situações, apenas à mínima mobilização do solo pela eliminação (muitas vezes, feita de forma parcial ao longo do tempo) de operações de preparo primário e secundário do solo, técnica conhecida como semeadura direta (SD) ou plantio direto (PD). Nesse caso, grande parte dos benefícios potenciais do SPD não é alcançada, e problemas associados à ocorrência de erosão, degradação da estrutura do solo, elevação das perdas de produtividade em função de estresses climáticos (seca ou excesso de chuvas) e aumento da incidência e dos danos ocasionados por pragas, doenças e plantas daninhas, têm sido frequentemente observados e relatados, ameaçando a sustentabilidade dos sistemas de produção de grãos (Denardin et al., 2008; Torres et al., 2010; Franchini et al., 2012; Adegas et al., 2013; Franchini et al., 2018; Nunes et al., 2019).

A expressão plena dos benefícios do SPD está diretamente associada à diversidade de plantas cultivadas e ao aporte de biomassa da parte aérea e raízes ao solo, o que é viabilizado por meio da adoção de sistemas diversificados de produção agropecuária (Debiasi et al., 2020). Nesse sentido, a diversificação de culturas em um dado sistema de produção é operacionalizada por meio do planejamento e adoção de um determinado modelo de produção, que compreende o arranjo temporal e espacial das espécies vegetais e animais que compõem os sistemas agrícolas (Denardin; Kochhann, 2006). Em um modelo de produção, as estratégias para diversificação de espécies vegetais envolvem o uso da rotação, sucessão e consorciação de culturas.

A rotação de culturas é definida como sendo a alternância ordenada de diferentes culturas, em determinado espaço de tempo (ciclo), na mesma área e na mesma estação do ano. Já a sucessão de culturas consiste no ordenamento de duas culturas na mesma área agrícola por tempo indeterminado, cada uma delas sendo cultivada em uma estação do ano. Exemplos de sistemas de rotação e sucessão de culturas são apresentados nas Tabelas 1 e 2, conforme Debiasi et al. (2020).

Tabela 1. Exemplo de arranjo espacial e temporal de espécies vegetais em um sistema de rotação de culturas com ciclo de quatro anos.

Talhão	Ano/estação							
	1		2		3		4 ³	
	Inverno ¹	Verão ²	Inverno	Verão	Inverno	Verão	Inverno	Verão
A	Aveia branca	Milho	Trigo	Soja	Milho 2ª safra	Soja	Trigo	Soja
B	Trigo	Soja	Aveia branca	Milho	Trigo	Soja	Milho 2ª safra	Soja
C	Milho 2ª safra	Soja	Trigo	Soja	Aveia branca	Milho	Trigo	Soja
D	Trigo	Soja	Milho 2ª safra	Soja	Trigo	Soja	Aveia branca	Milho

¹ Inverno: período de outono-inverno; ² Verão: período de primavera-verão; ³ Como se trata de um sistema de rotação com quatro anos, a partir do 5º ano um novo ciclo se inicia, com a repetição da primeira cultura prevista para o talhão (ano 1).

Fonte: Debiasi et al. (2020).

Tabela 2. Exemplo de arranjo espacial e temporal de espécies vegetais em um sistema de sucessão de culturas.

Talhão	Ano/estação							
	1		2		3		4	
	Inverno ¹	Verão ²	Inverno	Verão	Inverno	Verão	Inverno	Verão
A	Milho 2ª safra	Soja	Milho 2ª safra	Soja	Milho 2ª safra	Soja	Milho 2ª safra	Soja
B	Milho 2ª safra	Soja	Milho 2ª safra	Soja	Milho 2ª safra	Soja	Milho 2ª safra	Soja
C	Milho 2ª safra	Soja	Milho 2ª safra	Soja	Milho 2ª safra	Soja	Milho 2ª safra	Soja
D	Milho 2ª safra	Soja	Milho 2ª safra	Soja	Milho 2ª safra	Soja	Milho 2ª safra	Soja

¹ Inverno: período de outono-inverno; ² Verão: período de primavera-verão.

Fonte: Debiasi et al. (2020).

Na Tabela 1, é apresentado um modelo de produção em rotação de culturas, com ciclos de 4 anos. Neste sistema, em todos os anos, 75% da área será cultivada com soja e 25% com milho no verão e, no inverno, 50% da área será cultivada com trigo, 25% com milho 2ª safra, e 25% com aveia branca para grãos ou forragem. Já no sistema de sucessão, 100% da área da propriedade é cultivada com milho 2ª safra no outono-inverno e soja no verão, em todos os anos (Tabela 2). Assim, modelos de produção envolvendo a rotação de culturas são mais complexos e envolvem um maior grau de di-

versificação de espécies vegetais em comparação à sucessão de culturas. Além disso, a rotação de culturas implica na alternância de espécies vegetais em uma mesma estação, o que se constitui em um princípio básico para a quebra do ciclo biológico de pragas e patógenos com a consequente redução da sua população, bem como para a melhoria da fertilidade física, química e biológica do solo.

O grau de diversificação biológica do modelo de produção pode ser aumentado por meio da consorciação entre espécies vegetais, tanto na rotação (Tabela 1) quanto na sucessão (Tabela 2) de culturas, com benefícios para a sustentabilidade do sistema de produção de soja. A consorciação de culturas envolve o cultivo de duas ou mais espécies vegetais em uma mesma área agrícola e em um mesmo período de tempo. Neste contexto, nos exemplos de modelos de produção em rotação ou sucessão de culturas mostrados nas Tabelas 1 e 2, o milho 2ª safra, dependendo da região do País, pode ser consorciado com forrageiras tropicais, como a braquiária ruziziensis (*Urochloa ruziziensis*), com o objetivo de aumentar a cobertura do solo e a adição de biomassa, ou ainda, no caso de sistemas de integração lavoura-pecuária, para produção de forragem de qualidade no período de entressafra.

Uma alternativa para diversificar os modelos de produção envolvendo a soja é a utilização de espécies vegetais de rápido crescimento no período entre a colheita e a semeadura das culturas principais. Por exemplo, no sistema de rotação (Tabela 1), entre a colheita do milho verão e a semeadura do trigo, o produtor poderia utilizar alguma espécie vegetal de ciclo curto, como o nabo forrageiro, promovendo maior cobertura, descompactação do solo e ciclagem de nutrientes para o trigo a ser cultivado em sequência. Com esse mesmo objetivo, a área poderia ser cultivada com milheto ou nabo forrageiro após a colheita do milho 2ª safra e antes da semeadura da soja no sistema de sucessão de culturas, dependendo das condições climáticas da região.

Existem diversas opções de culturas para compor modelos de produção diversificados, tornando essa prática técnica e economicamente viável em todas as regiões brasileiras produtoras de grãos. Independentemente da situação, a escolha das espécies vegetais, bem como a definição do seu arranjo no espaço e no tempo, deve levar em consideração a aptidão agrícola dos diferentes talhões, definida pelas condições locais de clima, solo e topografia, bem como pelo Zarc. Maiores detalhes sobre as alternativas de culturas para

diversificação e os princípios que devem ser seguidos para definir seu arranjo espaço-temporal são apresentados em Debiasi et al. (2020).

A adoção do SPD de forma isolada não é, na maioria das situações, condição suficiente para o controle efetivo das perdas de água, solo e nutrientes por erosão hídrica. A cobertura do solo por resíduos vegetais ou plantas vivas no SPD apresenta potencial para dissipar em até 100% energia cinética gerada pelo impacto da gota da chuva e, assim, praticamente eliminar a erosão nos entressulcos (Kochhann et al., 2005). Entretanto, de acordo com os mesmos autores, a cobertura do solo não apresenta a mesma eficácia na dissipação da energia cinética decorrente da ação cisalhante da enxurrada, responsável pela erosão em sulcos. Deste modo, a ocorrência de chuvas com intensidade superior à capacidade de infiltração de água do solo, associada a topossequências com grandes comprimentos de declive, condições comuns a grande parte das áreas de produção de soja no Brasil, principalmente na Região Sul, podem resultar no arraste dos resíduos presentes na superfície do solo e, conseqüentemente, em escoamento superficial de água mesmo em áreas manejadas sob SPD. Nestas situações, o controle da enxurrada no SPD deve ser feito por meio da segmentação do comprimento do declive com a utilização de práticas como o terraceamento e a realização das operações mecanizadas em nível.

A falta de manutenção ou eliminação parcial ou total dos terraços, sem critério técnico, associada à realização das operações mecanizadas paralelamente ao declive, com o objetivo de economizar insumos e tempo, pode resultar em elevadas perdas de água, solo e nutrientes por erosão hídrica, mesmo em SPD, comprometendo a sustentabilidade do sistema de produção de soja. Um exemplo da importância da adoção integrada de práticas conservacionistas para a redução do escoamento superficial de água é apresentado na Tabela 3, cujos dados foram obtidos em área com histórico de 33 anos de SPD e declividade média de 3%, em Campo Mourão, PR, sob chuva simulada em parcelas de 1 m² em solo já úmido. A chuva foi aplicada por 10 min, com uma quantidade total de água de 20 mm nesse tempo, o que equivale a uma intensidade de 120 mm/h, buscando simular eventos extremos de precipitação com histórico de ocorrência na região. Observa-se que, em ambos os modelos de produção, a semeadura em desnível reduziu a infiltração e aumentou a lâmina de água escoada, o que, entretanto, foi mais evidente na

sucessão trigo/soja. Por sua vez, a rotação de culturas aumentou a taxa de infiltração de água, comparativamente à sucessão em 2,6 e 9,8 vezes sob cultivo em nível e desnível, respectivamente. A utilização conjunta da rotação e do cultivo em nível proporcionou uma taxa de infiltração quase 12 vezes maior que o tratamento composto pela sucessão de culturas e cultivo em desnível. Os resultados mostram ainda que, mesmo na condição que resultou em uma taxa de infiltração alta (rotação mais cultivo em nível), chuvas de alta intensidade podem ocasionar escoamento superficial e erosão, o que ratifica a necessidade, nesse caso, de terraceamento.

Tabela 3. Taxa de infiltração estável de água (TIE) e escoamento superficial em Latossolo muito argiloso com declividade média de 3% manejado sob sistema plantio direto em sucessão ou rotação de culturas por 33 anos, sob chuva simulada. Embrapa Soja/Coamo, Campo Mourão, PR, 2018.

Parâmetro	Sucessão ¹		Rotação ²	
	Nível	Desnível	Nível	Desnível
Chuva	20,0 (120,0) ³	20,0 (120,0)	20,0 (120,0)	20,0 (120,0)
TIE	6,0 (36,3)	1,3 (7,7)	15,3 (91,9)	12,7 (76,6)
Escoamento	14,0 (83,7)	18,7 (112,3)	4,7 (28,3)	7,3 (43,4)

¹ Sucessão trigo/soja. ² Rotação: aveia/soja - trigo/soja - milho/consórcio (milho + braquiária ruziziensis) - trigo/soja. ³ mm/10 min (mm/h).

Principais modificações nos atributos do solo e mitigação de riscos

Profundidade efetiva do sistema radicular (Ze)

A profundidade efetiva do sistema radicular (Ze) é a profundidade do perfil do solo que as raízes das culturas podem efetivamente extrair água e nutrientes para o seu crescimento. É um dos fatores que influencia significativamente a produtividade dos cultivos e um parâmetro fundamental em modelos usados para estimar a capacidade de água disponível no solo (CAD) para a cultura. De forma geral, admite-se que cerca de 70% da umidade extraída pelas raízes provém da metade superior da zona radicular. Outros 20% provém do terceiro quarto e 10% do quarto mais profundo (NRCS, 1997).

As definições de Ze apresentadas em trabalhos publicados variam conforme o autor. A Ze é aquela que delimita 80% do comprimento total das raízes da planta (Silva et al., 2009) ou a que supre 80% da água absorvida pela planta (Phocaides, 2007). Já para Reichardt e Timm (2004), Ze corresponde a 95% do sistema radicular ativo. De acordo com Manfron et al. (2003), Ze compreende o volume de solo responsável por suprir 95% da evapotranspiração da planta. Independentemente da definição de Ze, diversos trabalhos de pesquisa mostram que o perfil de absorção de água em profundidade depende não somente da presença e da densidade radicular, mas também da demanda evaporativa da atmosfera e da variação da disponibilidade de água e da condutividade hidráulica nas diferentes camadas (Allmaras et al., 1975a, 1975b; Stone et al., 1976; Righes, 1980; Leitner et al., 2014; Schröder et al., 2014; Huber et al., 2015).

O aumento da Ze resulta em maior CAD, o que, evidentemente, reduz o risco de perdas de produtividade por deficiência hídrica. Ao mesmo tempo, o estabelecimento de relações entre altas produtividades e o maior crescimento radicular em profundidade tem sido objeto de diversas pesquisas nos últimos anos. Dentre essas pesquisas, merece destaque a conduzida por Faé et al. (2020), envolvendo a determinação da profundidade de crescimento de raízes em áreas com diferentes históricos de produtividade de soja, pertencentes a duas regiões da Pensilvânia, nos Estados Unidos da América. Os resultados desse trabalho (Figura 3) mostram que, com o aumento da profundidade do sistema radicular de 75 cm para 95 cm, a produtividade de grãos subiu de cerca de 4.200 kg ha⁻¹ para 6.500 kg ha⁻¹, o que representa um incremento próximo a 55%. Adicionalmente, 60% da variação da produtividade foi explicada pela profundidade das raízes. Isso demonstra a importância da presença das raízes em camadas mais profundas para o suprimento de nutrientes e, sobretudo, água para as plantas, mesmo em densidades significativamente inferiores à camada mais próxima da superfície do solo.

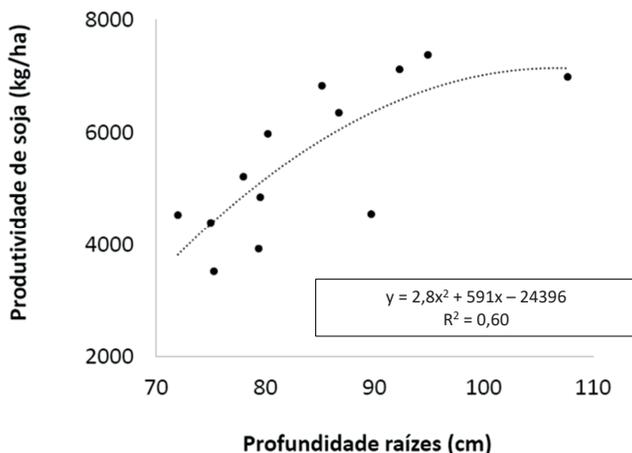


Figura 3. Relação entre a profundidade de raízes da soja e a produtividade da cultura em lavouras comerciais de soja de alta produtividade nos EUA.

Fonte: Faé et al. (2020).

A contribuição de um sistema radicular mais profundo para redução das perdas de produtividade da soja por seca foi determinada por meio de simulações utilizando o modelo CSM-CROPGRO-Soja (Boote et al., 2003), que faz parte do sistema DSSAT (*Decision Support System for Agrotechnology Transfer*) (Jones et al., 2003), para as condições brasileiras por Battisti e Sentelhas (2017). As simulações foram realizadas para 24 locais e três classes texturais de solo (argilosa, média e arenosa), de forma a representar apropriadamente as principais regiões produtoras de soja no Brasil. Dentro do modelo, os autores alteraram o parâmetro *soil root growth factor* (SRGF) de forma a obter diferentes perfis de distribuição do sistema radicular com profundidades máximas variando de 0,6 a 2 m, que representam valores passíveis de obtenção em condições de campo (Sako et al., 2016; Franchini et al., 2017; Dantas, 2018). Os resultados mostraram que o aumento da profundidade máxima das raízes em relação ao valor-base de 0,6 m proporcionou ganhos de produtividade significativos, sobretudo em regiões com maior risco de déficit hídrico no período de 1965-2016, exemplificado pela região de Cruz Alta, RS (Figura 4). Nessa localidade, o aumento da profundidade radicular máxima de 0,6 para 2,0 m resultou em um ganho de produtividade superior à

média, de aproximadamente 1260 kg ha^{-1} , o que equivale a 9 kg de grãos por cm de aprofundamento de raiz. Em Tapurah, MT, que apresenta um menor risco de déficit hídrico, os ganhos foram menores do que a média geral das 24 localidades, de aproximadamente 210 kg ha^{-1} na situação com 2 m de profundidade máxima. Além disso, os autores encontraram que os maiores ganhos de produtividade com o aumento da profundidade máxima das raízes ocorreram em safras ou regiões caracterizadas por déficit hídrico moderado, observando-se redução dos impactos positivos em condições de seca leve ou muito intensa. Assim, o trabalho evidencia que a presença de raízes em camadas mais profundas, mesmo que em densidades de comprimento pequenas relativamente à superfície do solo, é essencial para aumentar a produtividade da soja e mitigar as perdas por seca.

O estabelecimento da Ze para fins de modelagem do risco agroclimático deve ser embasado, idealmente, em trabalhos de pesquisa que avaliem a distribuição do sistema radicular em grandes profundidades, uma vez que, em solos profundos e com baixo grau de limitação ao crescimento das raízes, a profundidades de enraizamento da soja pode ultrapassar 2 m (Kaspar et al., 1978). Em virtude da dificuldade operacional e metodológica em se obter tal tipo de informação, existem poucos trabalhos publicados em que o perfil de distribuição de raízes foi determinado em grandes profundidades, tornando importante o desenvolvimento e utilização de modelos que permitam estimar o crescimento de raízes sob diferentes condições de estresses ambientais (Leitner et al.; 2014; Batisti; Sentelhas, 2017; Moraes et al., 2018a, 2019). Outro ponto importante a ser considerado é que, mesmo em baixas densidades de comprimento, a presença de raízes em camadas profundas pode contribuir para o atendimento de grande parte da demanda hídrica da cultura sob as seguintes condições: 1) existência de gradiente de potencial hídrico entre o solo e a atmosfera, abertura estomática e, assim, transpiração; 2) camadas superficiais do solo com baixa umidade e condutividade hidráulica; e 3) camadas subsuperficiais apresentando água disponível e elevada condutividade hidráulica (Leitner et al., 2014; Schröder et al., 2014; Huber et al., 2015).

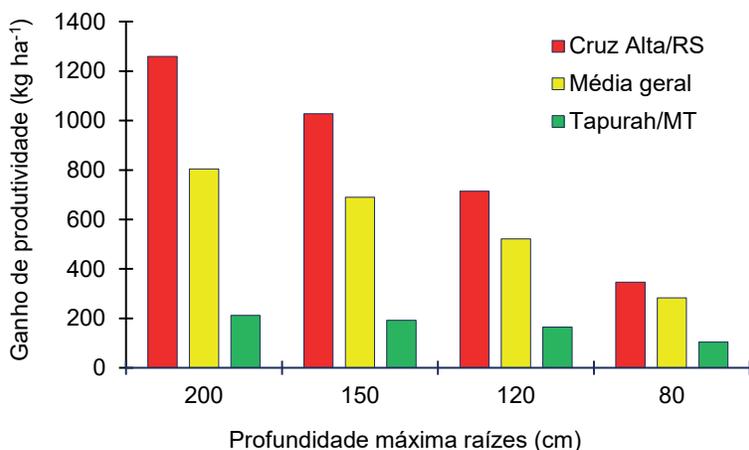


Figura 4. Ganho de produtividade de grãos da soja em função do aumento da profundidade máxima do sistema radicular, na média geral das 24 localidades e para os municípios de Cruz Alta, RS e Tapurah, MT, que representam, respectivamente, locais com alto e baixo nível de déficit hídrico (1965-2016). O ganho foi calculado em relação à produtividade modelada para uma profundidade radicular máxima de 60 cm.

Fonte: adaptado de Battisti e Sentelhas (2017).

Dentre os trabalhos que avaliaram o crescimento de raízes de soja em grandes profundidades, merece destaque o conduzido por Righes (1980). Trabalhando em um solo profundo e com baixo grau de limitação ao desenvolvimento radicular, o autor encontrou raízes de soja em quantidades significativas até 1,80 m de profundidade (Figura 5A), sendo que 80% do comprimento radicular foi observado até a 1,5 m de profundidade. Por meio do monitoramento da variação dos teores de água no solo por quatro dias durante um período seco, foi possível estimar o consumo de água em diferentes camadas (Figura 5B). Os resultados indicaram que, sob condições de secamento da camada superficial, mais de 60% da lâmina de água utilizada no período foi proveniente da camada entre 0,60 e 1,50 m. O autor salienta que ao menos parte das variações de umidade no perfil do solo e, assim, do consumo de água, deve-se a fluxos ascendentes de água; de qualquer modo, os dados mostram, inequivocamente, que a água presente em camadas profundas foi utilizada na evapotranspiração da cultura, evidenciando que a Ze pode ultrapassar 1,0 m de profundidade.

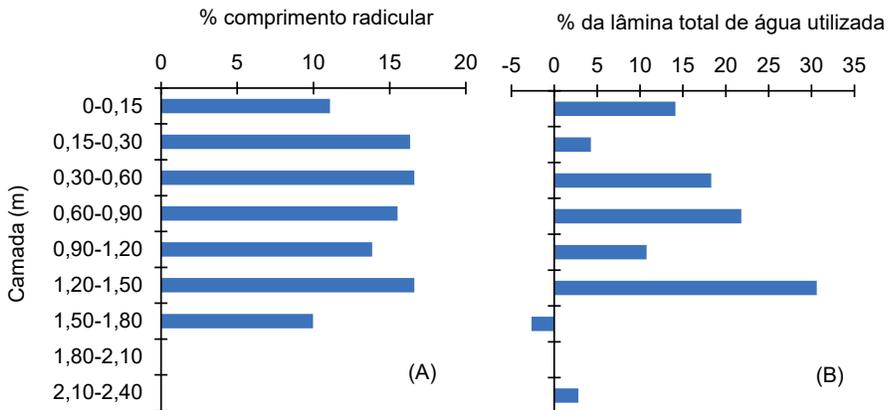


Figura 5. Distribuição do sistema radicular da soja no perfil de solo (A) e porcentagem da lâmina total de água evapotranspirada pelas plantas extraída de camadas de solo até 2,40 m de profundidade (B).

Fonte: adaptado de Righes (1980).

O potencial de aproveitamento da água armazenada em camadas profundas pela soja foi também observado por Stone et al. (1976), em experimento conduzido no Estado do Kansas, EUA. Os autores avaliaram a depleção de água sob cultivo de soja com ou sem irrigação em quatro períodos ao longo do ciclo da cultura, em camadas de solo até 1,60 m de profundidade. Os resultados de duas avaliações na condição não irrigada são apresentados na Figura 6, onde se observa a utilização de água armazenada no solo até a camada de 1,40-1,60 m. Na avaliação realizada no período de 20-27/06, 81% da água utilizada encontrava-se armazenada até 0,75 m de profundidade. Com o secamento da camada mais superficial do solo e o aumento da densidade radicular da soja em camadas mais profundas, o maior consumo de água (76% do total) no período de 11-16/07 foi observado na camada de 0,60-1,50 m, que, por sua vez, apresentava cerca de 16% da biomassa radicular. Isso evidencia que a eficiência de consumo de água (cm^3 de água g^{-1} raiz dia^{-1}) aumentou com a profundidade, provavelmente em virtude de as raízes serem mais jovens e com maior comprimento por unidade de massa, crescendo em camadas de solo mais úmidas, com maior condutividade hidráulica e com menor concentração de raízes. Os autores observaram ainda que o consumo de água ocorreu em camadas de até 15 cm abaixo da profundidade máxima das raízes, evidenciando o papel dos fluxos ascendentes no atendimento à evapotranspiração da cultura. Resultados similares foram obtidos

por Garay e Wilhelm (1983) que, em medição realizada aos 78 dias depois da semeadura e após 30 dias de seca, concluíram que 80% do sistema radicular da soja foi encontrado na camada de 0,0-1,20 m, sendo o consumo de água detectado na camada mais profunda avaliada (1,20-1,50 m).

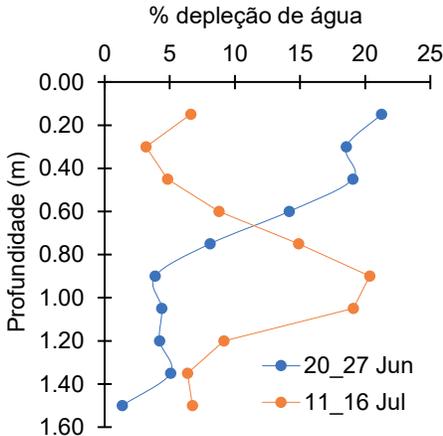


Figura 6. Depleção de água (% do total) medida em camadas de 0,15 m até 1,50 m, em dois períodos durante o ciclo de soja cultivada sem irrigação, no Estado do Kansas, EUA.

Fonte: adaptado de Stone et al. (1976).

Allmaras et al. (1975a) estimaram a absorção de água pelas raízes da soja em diferentes camadas até 1,22 m de profundidade, por meio de medições realizadas durante um período de 45 dias em que a superfície do solo das parcelas permaneceu coberta por um filme plástico, evitando entrada de água por chuva e garantindo perda de água apenas por transpiração. Por meio de modelos matemáticos, as variações no consumo de água em virtude dos fluxos ascendentes foram eliminadas. No período compreendido entre o 20° e o 36° dia após o início do trabalho, com o secamento da superfície do solo, as raízes presentes nas camadas de 46 a 107 cm de profundidade foram responsáveis pela absorção de quase 90% da água transpirada pela soja (Figura 7A). Nessa mesma faixa de profundidade, a proporção do comprimento total das raízes no perfil do solo foi de pouco mais de 21% (Figura 7B), comprovando mais uma vez que uma pequena proporção do sistema radicular em camadas profundas tem potencial de suprir grande parte da demanda de água da cultura, e, assim, compensando em grande parte a baixa absorção na superfície do solo devido ao secamento dessa camada. Utilizando os mesmos resultados desse trabalho, Allmaras et al. (1975b) estimaram a absorção de água em aproximadamente $38 \text{ cm}^3 \text{ m}^{-1}$ de raiz de soja nas camadas de 0,6-1,05 m de profundidade, valor esse que foi cerca

de 40 vezes maior comparativamente à camada de 0-0,45 m ($0,9 \text{ cm}^3 \text{ m}^{-1}$ de raiz). Isso evidencia a maior eficiência de absorção de água pelas raízes em camadas mais profundas, corroborando os resultados de Stone et al. (1976) e Righes (1980).

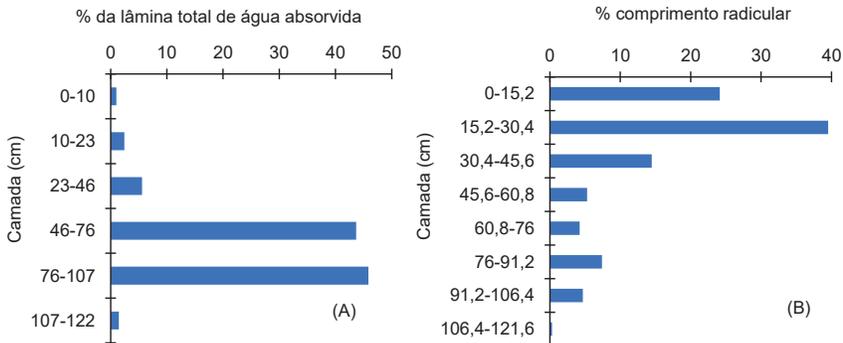


Figura 7. Porcentagem da lâmina total de água absorvida pela soja (A) e distribuição do sistema radicular da cultura (B) em camadas de solo até 1,22 m de profundidade, do 20º ao 36º dia após a cobertura do solo com filme plástico.

Fonte: adaptado de Allmaras et al. (1975a).

Trabalhos recentes e realizados no Brasil, envolvendo a avaliação de raízes e consumo de água em perfis de solo com profundidade maior que 1,0 m, são raros. Um desses trabalhos foi conduzido em área comercial de soja localizada em Ponta Porã, MS, participante do Desafio Nacional de Máxima Produtividade promovido pelo Comitê Estratégico Soja Brasil (CESB) na safra 2015/16 (Sako et al., 2016). A distribuição de raízes até 1,60 m de profundidade nessa área, com produtividade de 7.620 kg ha^{-1} , foi comparada a outro talhão localizado na mesma propriedade, porém com produtividade média de 4.320 kg ha^{-1} (Figura 8). A área com alta produtividade apresentou densidade de comprimento radicular média ao longo do perfil cerca de duas vezes maior do que a com menor produtividade, sendo essa diferença significativamente maior em camadas abaixo de 1,0 m (cerca de 10 vezes maior) (Figura 8A). A distribuição também foi diferente; na área de alta produtividade, a Ze (80% do comprimento radicular) foi próxima a 1,0 m, ao passo que, no talhão com produtividade inferior, o valor foi reduzido para 0,6 m (Figura 8B). Salienta-se que, na área de maior produtividade, a camada de 1,0-1,6 m de profundidade apresentava ainda 20% do comprimento radicular, tornando possível o uso da água armazenada nessa camada em caso de secamento das demais, conforme demonstrado por Allmaras et al. (1975a) e Stone et al. (1976).

Tomando como base o trabalho de Sako et al. (2016), é possível verificar o impacto da profundidade máxima avaliada sobre a Ze. Por exemplo, se o perfil avaliado fosse limitado a 1 m de profundidade, a Ze seria de aproximadamente 0,60 m. Isso demonstra que a avaliação de raízes em perfis rasos tende a subestimar os valores de Ze, reforçando a importância da quantificação das raízes de culturas anuais como a soja em maiores profundidades.

A contribuição da água armazenada em diferentes camadas até 1,0 m de profundidade para a evapotranspiração real (ET_r) da soja foi estimada para um período de três dias por Dantas (2018), em lavouras com potencial produtivo contrastantes (5.460 e 3.660 kg ha⁻¹). O autor considerou como Ze a profundidade do perfil que contribuiu com 80% da ET_r acumulada no período. Com base nessa definição e nos resultados obtidos, a Ze foi estimada em 0,80 e 0,20 m para as áreas de alta e baixa produtividade, respectivamente. Salienta-se que esse trabalho foi realizado na presença de elevada umidade em todo o perfil do solo, de modo que a contribuição da água armazenada em camadas mais profundas poderá ser maior à medida que a superfície do solo seca.

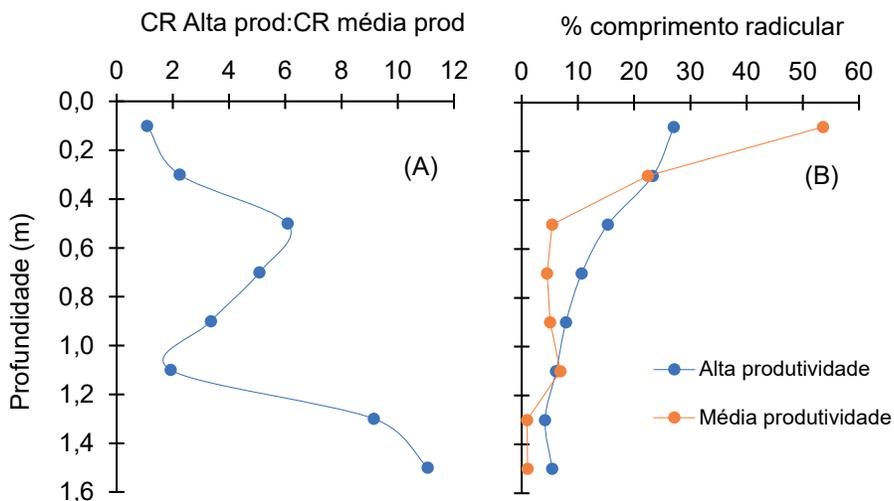


Figura 8. Relação entre o comprimento radicular da soja (CR) medido em áreas de alta e média produtividade (CR Alta prod: CR média prod) localizadas em Ponta Porã, MS (A) e porcentagem do comprimento radicular em diferentes camadas até 1,60 m de profundidade nas referidas áreas (B).

Franchini et al. (2017) avaliaram o comprimento radicular de oito cultivares soja em camadas de 0,25 m de espessura até 1,0 m de profundidade, em um Latossolo muito argiloso localizado em Londrina, PR. Os resultados mostraram que, na média das cultivares avaliadas, a camada de 0,0 a 0,75 m concentrou aproximadamente 87% do comprimento radicular (Figura 9), de forma que a Ze estaria nessa faixa. Resultados similares foram obtidos por Franchini et al. (2009) que, em amostragem de raízes realizada também até 1,0 m de profundidade, observaram que cerca de 80% do comprimento radicular da soja foi encontrado até 0,75 m, independentemente da cultura utilizada na 2ª safra (milho ou braquiária *ruziziensis*) (Figura 10B). Embora a proporção de raízes nas diferentes camadas tenha sido similar entre os tratamentos, verifica-se que a soja apresentou maior comprimento radicular quando cultivada após a braquiária *ruziziensis* em todas as camadas (Figura 10A), sobretudo na mais profunda (0,75 a 1,0 m). Nessa camada, o cultivo da soja em sucessão à braquiária proporcionou um incremento de 70% no comprimento radicular em relação ao milho 2ª safra, o que foi atribuído pelos autores à melhoria da estrutura do solo com a consequente redução nas limitações de natureza física ao crescimento das raízes. Mesmo apresentando a mesma Ze, é muito provável que a capacidade de aproveitamento da água armazenada em camadas mais profundas pela soja seja maior quando cultivado após a braquiária.

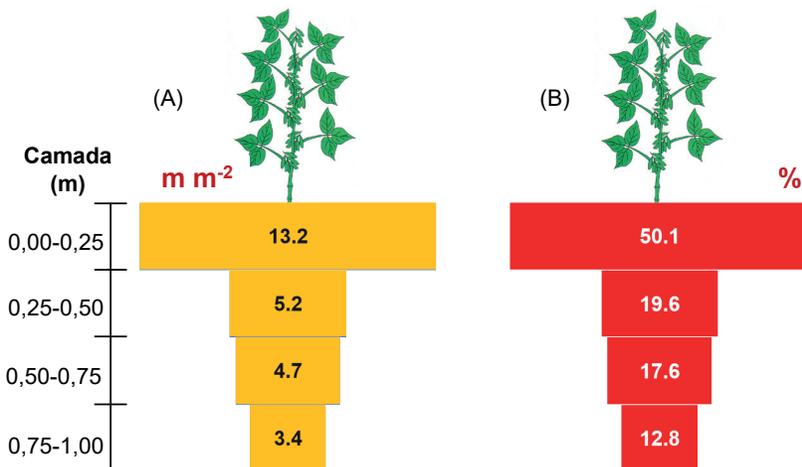


Figura 9. Comprimento radicular médio (m m⁻²) (A) e respectiva porcentagem (B) em camadas de 0,25 m até 1,0 m de profundidade, de oito cultivares de soja.

Fonte: adaptado de Franchini et al. (2017).

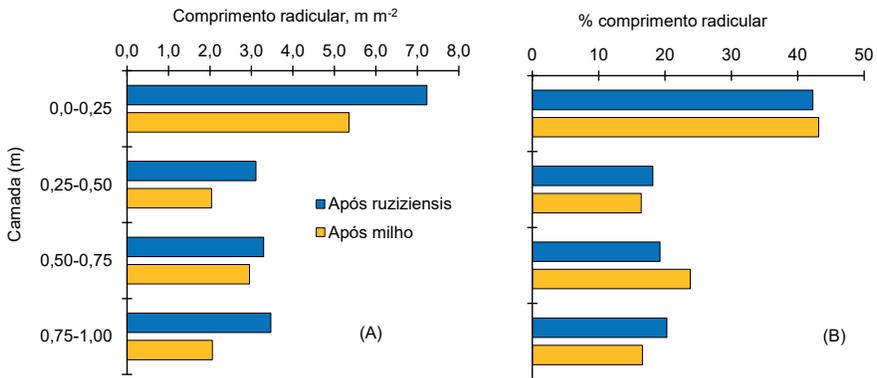


Figura 10. Comprimento radicular da soja (A) e respectiva porcentagem (B) em camadas de 0,25 m até 1 m de profundidade, quando cultivada em sucessão ao milho 2^a safra ou à braquiária ruziziensis.

Fonte: adaptado de Franchini et al. (2009).

Em ambos os trabalhos apresentados no parágrafo anterior, os valores ainda altos de comprimento de raízes na camada de 0,75 a 1,0 m indicam um sistema radicular significativamente mais profundo do que o perfil de avaliação (1,0 m), evidenciando uma provável subestimativa do comprimento total e, dessa forma, da Ze. É importante ainda considerar a maior eficiência de absorção de água (lâmina de água por unidade de comprimento) pelas raízes localizadas em camadas mais profundas (Allmaras et al., 1975b).

A Ze é um parâmetro altamente influenciado pela qualidade do manejo do solo, que determina o grau de limitação ao crescimento das raízes devido a fatores químicos, físicos e biológicos do solo. A Figura 11 sintetiza os principais fatores físicos, químicos e biológicos do solo que limitam o crescimento das raízes e, assim, o parâmetro Ze.

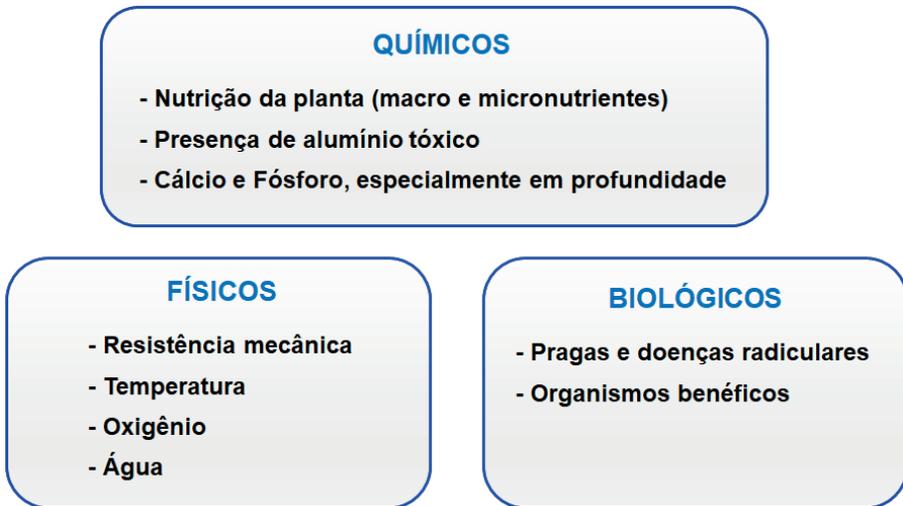


Figura 11. Síntese dos principais fatores químicos, físicos e biológicos que limitam o crescimento radicular das plantas.

Fatores químicos

Do ponto de vista químico, as limitações ao crescimento radicular estão associadas, em primeiro lugar, à presença de elevados teores de alumínio trocável (Al^{3+}) e aos baixos teores de cálcio (Ca^{2+}) no perfil do solo, resultantes da acidez excessiva. O efeito tóxico do Al^{3+} ao sistema radicular das plantas causa inibição da divisão celular, desorganização dos meristemas e necrose dos tecidos o que, por sua vez, leva à redução do crescimento e das ramificações, ao engrossamento e à necrose das raízes (Tedesco; Bissani, 2004). Do mesmo modo, o desenvolvimento das raízes em uma determinada camada é condicionado à presença de Ca^{2+} junto aos pontos de crescimento, tendo em vista o seu papel na formação da parede celular e que este nutriente não é móvel na planta via floema, ou seja, não pode ser translocado da parte aérea para as raízes (Malavolta, 1980). A nutrição adequada e equilibrada da planta, no que se refere aos macro e micronutrientes, também é importante para a formação de um sistema radicular profundo e com alta ocupação das camadas de solo. Além disso, a distribuição dos nutrientes no perfil do solo influencia o crescimento das raízes e, conseqüentemente, das plantas.

A presença de Mg^{2+} nas raízes é essencial para diversos processos metabólicos associados ao crescimento radicular, uma vez que o nutriente participa como cofator de enzimas envolvidas na transferência de fosfato e síntese de ATP, bem como na estabilização das membranas, ácidos nucleicos e ribossomos. Ao contrário do Ca^{2+} , o Mg^{2+} é móvel na planta (Malavolta, 1980), de forma que sua presença junto aos pontos de crescimento das raízes não tem sido considerada um fator relevante para o maior aprofundamento do sistema radicular das plantas. Porém, mais recentemente, a presença de Mg^{2+} junto aos pontos de crescimento radicular tem sido associada a maior taxa de alongamento das raízes, o que é mais evidente na presença de Al^{3+} tóxico. Silva et al. (2005) conduziram um experimento em que raízes de soja cresceram por 12 dias a partir de um compartimento superficial com solo corrigido para um compartimento subsuperficial com soluções nutritivas que continham concentrações variáveis de Ca^{2+} e Mg^{2+} . Os resultados mostraram que, mesmo com um suprimento adequado de Mg^{2+} para o crescimento da parte aérea da soja no compartimento superficial com solo, a presença deste nutriente nas soluções subsuperficiais foi necessária para promover o alongamento radicular. Na ausência de Al^{3+} na solução, a presença de Mg^{2+} , em uma concentração de 2 mmol L^{-1} , resultou em um aumento de 74% no comprimento das raízes de soja em relação à testemunha. Na presença de classes tóxicas de Al^{3+} , esse aumento foi de quatro vezes. Os autores observaram ainda maior crescimento de raízes laterais nos tratamentos com Mg^{2+} na solução do compartimento subsuperficial, o que é associado a uma maior capacidade de colonização (ocupação do solo) pelo sistema radicular. A redução do efeito tóxico do Al^{3+} pela presença de Mg^{2+} no ambiente radicular é explicada pela diminuição da atividade do Al^{3+} e a substituição do mesmo em sítios de troca no apoplasma celular, o que ocorre tanto em mono, quanto em dicotiledôneas (Kinraide; Parker, 1987; Grauer; Horst, 1992; Keltjens; Tan, 1993).

Baixos teores de P no perfil do solo também representam grande limitação ao crescimento radicular das culturas, uma vez que esse nutriente contribui para induzir a iniciação e posterior alongamento das raízes primárias e secundárias (Drew, 1975; Salisbury; Ross, 1992). Além disso, a presença de teores adequados de P pode reduzir os efeitos tóxicos do Al^{3+} sobre as raízes (Nolla; Anghinoni, 2006). Experimentos clássicos em solução nutritiva, como o realizado por Anghinoni e Barber (1980a), demonstraram que, quando apenas uma porção do sistema radicular de milho recebeu P, essa se desenvolveu

mais em relação às aquelas sem P, o que evidencia que a presença desse nutriente na zona de crescimento radicular é necessária. O maior desenvolvimento das raízes de milho em resposta ao adequado suprimento de P na camada de solo onde a alongamento radicular ocorre também foi observado em experimentos de campo (Anghinoni; Barber, 1980b; Klepker; Anghinoni, 1993; Costa et al., 2009; Nunes et al., 2019). De modo similar ao milho, a distribuição de raízes da soja é determinada, em parte, pela distribuição de P. Nesse sentido, Hansel et al. (2017) concluíram que o aumento do teor de P na camada de 20-25 cm de profundidade, ocasionado pela aplicação profunda de fertilizantes fosfatados em área sob SPD consolidado, proporcionou um aumento de até 85% no comprimento radicular da soja na referida camada, em comparação à aplicação superficial (5 cm) do nutriente.

Por se tratar de um nutriente de muito baixa mobilidade no solo, o P tende a se acumular próximo à superfície de solos manejados em SPD, formando um gradiente de concentração ao longo do perfil (Costa; Crusciol, 2016). Em muitos casos, a mudança dos teores de P no perfil do solo é abrupta, o que configura o processo de estratificação do P (Nunes et al., 2011; Nunes et al., 2014; Tiecher et al., 2017; Nunes et al., 2019). Em trabalho conduzido em diferentes regiões produtoras de soja do Rio Grande do Sul, Martinazzo (2006) encontrou que 75% das amostras de solo coletadas apresentavam teores de P abaixo do nível de suficiência na camada de 10-20 cm. Tendo em vista o papel do P no crescimento das raízes em profundidade, a estratificação desse nutriente pode limitar o potencial produtivo e aumentar as perdas de produtividade por seca. Utilizando abrigos de proteção contra chuva para induzir estresse hídrico em parte do experimento durante os estágios reprodutivos da cultura da soja, Hansel et al. (2017) concluíram que a perda de produtividade em resposta à seca foi de 9% nos tratamentos com maiores teores de P em profundidade (20-25 cm), ao passo que, nas demais situações, a redução foi de até 30%. Diante disso, Rheinheimer et al. (2020) recomendam elevar os teores de P disponível acima do nível crítico pelo menos até 20 cm de profundidade, o que exige a estratificação na coleta das amostras (por exemplo, 0-10 e 10-20 cm) e a definição de teores críticos em separado para cada uma dessas camadas.

Do ponto de vista de manejo, a formação de um ambiente químico favorável ao crescimento radicular envolve o monitoramento contínuo da acidez e da

disponibilidade de nutrientes no solo, por meio da coleta e análise de amostras de solo das camadas de 0-20 e 20-40 cm. Esse diagnóstico serve de base para a correção da acidez do solo, o aumento dos teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} e a neutralização do Al^{3+} , por meio de práticas como a calagem e a gessagem. Da mesma forma, a análise química dessas camadas de solo é o ponto de partida para a recomendação de adubações de correção ou manutenção com macro e micronutrientes.

A avaliação do estado nutricional da planta via análise foliar e a realização do balanço de nutrientes no sistema de produção, levando em consideração as quantidades exportadas e aplicadas, bem como a eficiência de uso, também se constituem em informações importantes para a correta recomendação de fertilizantes e corretivos. Ressalta-se que as indicações técnicas para amostragem e interpretação de laudos de análise de solo e tecido vegetal, visando à correta recomendação de correção e adubação para a soja podem ser acessadas em Oliveira Junior et al. (2020). Adicionalmente, atenção especial deve ser dada ao uso de boas práticas de inoculação das sementes com bactérias fixadoras de N do gênero *Bradyrhizobium*, conforme descrito em Hungria e Nogueira (2020).

Além da correção e manutenção de teores adequados e equilibrados de nutrientes, é muito importante atentar para a sua distribuição vertical e horizontal no solo. Essa questão é particularmente relevante para nutrientes com baixa mobilidade no perfil do solo, como o Ca^{2+} , Mg^{2+} e P, que tendem a se acumular na camada superficial de solos manejados sob SPD. Conforme detalhado anteriormente, a estratificação desses nutrientes no perfil do solo limita o crescimento radicular em profundidade, incrementando assim o risco de perdas de produtividade por seca. Para evitar o processo de estratificação de nutrientes, o primeiro aspecto a ser considerado é o correto diagnóstico da fertilidade química do solo e, sendo necessário, realizar a correção da acidez e dos teores de nutrientes, especialmente Ca^{2+} , Mg^{2+} e P, no momento da conversão do preparo convencional para o SPD, com a incorporação de corretivos (calcário e gesso, esse último no caso de acidez abaixo da camada revolvida) e fertilizantes fosfatados por meio de aração ou gradagem, na maior profundidade possível. Posteriormente, na condução do SPD, diversos trabalhos de pesquisa têm demonstrado que a calagem superficial é capaz de reduzir a acidez do solo em subsuperfície, com aumento da disponibilidade

de Ca^{2+} e Mg^{2+} e redução do Al^{3+} (Oliveira; Pavan, 1996; Caires et al., 2008; Debiasi et al., 2013; Rheinheimer et al., 2018). Entretanto, é um processo lento e dependente de diversos fatores, tais como clima, tipo de solo e da dose e frequência de aplicação do calcário (Rheinheimer et al., 2018), o que torna imprescindível a correção da acidez na implantação do SPD. Paralelamente, a aplicação de gesso agrícola em superfície em SPD, conforme indicações constantes em Oliveira Junior et al. (2020), pode ser realizada para aumentar os teores de Ca^{2+} e reduzir a concentração do Al^{3+} em camadas subsuperficiais, melhorando o ambiente químico para crescimento das raízes. No caso do P, a aplicação em profundidade na linha de semeadura, por meio de hastes sulcadoras com atuação profunda, é uma das opções para minimizar o processo de estratificação do nutriente no perfil do solo (Nunes et al., 2014, 2019).

A utilização de modelos de produção com maior diversidade de espécies vegetais e maior aporte de biomassa da parte aérea e de raízes também contribui para a formação de ambiente químico mais favorável ao crescimento de raízes ao longo do perfil de solo. As estratégias de obtenção de nutrientes, assim como a labilidade das formas acumuladas nos tecidos das plantas, variam em função da espécie vegetal, de modo que o uso de modelos de produção com maior diversidade de plantas pode contribuir para aumentar a disponibilidade de nutrientes (Tiecher et al., 2017). Além disso, tais modelos resultam no aumento do teor de matéria orgânica do solo (MOS) (Zanatta et al., 2007; Salton et al., 2011; Bayer et al., 2016) e, dependendo das espécies vegetais utilizadas e das condições climáticas da região, no aumento da concentração de compostos orgânicos dissolvidos na solução do solo, como ácidos orgânicos de baixo (cítrico, oxálico, tartárico e málico, entre outros) ou alto peso molecular (ácidos fúlvicos) (Hue et al., 1986; Franchini et al., 2001; Alleoni et al., 2010). A interação química entre esses compostos orgânicos e nutrientes catiônicos como o Ca^{2+} e o Mg^{2+} pode formar complexos solúveis em água e com maior mobilidade no perfil do solo, contribuindo para o aumento dos teores desses nutrientes em camadas mais profundas (Reinheimer et al., 2018). Por outro lado, determinados ácidos orgânicos, exsudados pelas raízes ou provenientes da decomposição do material orgânico (palha e raízes), podem formar complexos organominerais com o Al^{3+} na solução do solo, sobretudo sob $\text{pH} < 5$, diminuindo a bioatividade e, conseqüentemente, o efeito tóxico desse elemento (Hue et al., 1986; Franchini et al., 2001; Schindwein

et al., 2003; Nolla; Anghinoni, 2006; Alleoni et al., 2010). Além desse mecanismo, a formação de bioporos e canais pelas raízes e pela macrofauna do solo facilita o movimento vertical do calcário, contribuindo para a correção da acidez subsuperficial (Rheinheimer et al., 2018).

Outro aspecto importante relaciona-se ao papel que as raízes de determinadas espécies vegetais, especialmente aquelas destinadas à cobertura do solo, exercem na remobilização de P inclusive em camadas profundas, que pode ocorrer de quatro maneiras principais: 1) acesso ao P ligado a compostos orgânicos por meio da exsudação de enzimas (fosfatases); 2) exsudação de ácidos orgânicos de baixo peso molecular que promovem a mobilização de P por troca de ligantes ou por ocupar sítios de potencial adsorção desse nutriente; 3) associação com microrganismos, como os micorrízicos; e 4) alteração do pH da rizosfera (Bayon et al., 2006; Li et al., 2008; Kunze et al., 2011; Chavarría et al., 2016). Como resultado, diversos trabalhos têm demonstrado maior eficiência de uso de P com a utilização de plantas de cobertura do solo (Calegari et al., 2013; Tiecher et al., 2017; Soltangheisi et al., 2018), entre as quais se destacam as forrageiras tropicais perenes, como as braquiárias (Rodrigues et al., 2021). Tendo em vista a mobilidade de P da parte aérea para as raízes, o uso de plantas de cobertura pode contribuir para a redistribuição desse nutriente em profundidade, por meio da sua absorção na superfície e liberação em camadas profundas através da decomposição das raízes. A importância desse processo foi comprovada por Franchini et al. (2004), que encontraram, após 80 dias de cultivo de diferentes espécies de cobertura de inverno em colunas de PVC contendo solo muito argiloso adubado com fertilizante fosfatado na camada de 0-10 cm de profundidade, redistribuição variando de 2 a 7 kg/ha do P na camada de 10-55 cm, conforme a espécie vegetal. Nesse trabalho, a aveia preta (5,4 kg ha⁻¹ P) e as ervilhacas peluda (5,1 kg ha⁻¹ P) e comum (7 kg ha⁻¹) foram as plantas de cobertura que mais contribuíram para a redistribuição do P em camadas abaixo da fertilizada. Além disso, existem evidências de que formas orgânicas de P, liberadas durante o processo de decomposição da biomassa ou de fertilizantes orgânicos, apresentam maior mobilidade no perfil do solo e podem contribuir, assim, para o aumento da disponibilidade do nutriente em camadas mais profundas (Chardon et al., 1997; Gebrim et al., 2010).

Fatores físicos

De acordo com Letey (1985), as principais propriedades físicas do solo que limitam o crescimento das plantas e de suas raízes são a resistência mecânica, a temperatura e a disponibilidade de água e oxigênio (Figura 11). O grau de limitação imposto por esses fatores depende de sua variabilidade temporal e espacial (horizontal e vertical, ao longo perfil do solo), da espécie vegetal, da cultivar, da intensidade e da época de ocorrência do estresse em relação ao estágio de desenvolvimento da cultura, e da existência de condições químicas ou biológicas do solo restritivas ao crescimento radicular (Robertson et al., 1980; Stone; Taylor, 1983; Hoogenboom et al., 1987; Sponchiado et al., 1989; Bengough et al., 2006, 2011; Franchini et al., 2017; Moraes et al., 2020). Vale destacar que os quatro fatores determinantes do crescimento radicular são interdependentes, com o conteúdo de água influenciando significativamente as demais propriedades físicas, sobretudo a resistência mecânica e a disponibilidade de oxigênio (Figura 12). Ademais, a melhoria de uma determinada propriedade física pode impactar negativamente em outra, de modo a prejudicar o crescimento radicular. Por exemplo, elevados teores de água favorecem, de forma direta, o crescimento das raízes, mas limitam a disponibilidade de oxigênio quando em excesso. Assim, o manejo do solo deve ser focado na obtenção de um balanço entre as propriedades físicas que influenciam no crescimento radicular (Letey, 1985).

Os gráficos da Figura 12 mostram como os estresses hídricos (por déficit ou excesso) e mecânicos interagem para limitar a taxa de alongamento radicular, expressa por um índice relativo variável entre 0 (alongamento nula) e 1 (máxima alongamento) (Moraes et al., 2018a; Moraes; Gusmão, 2021). Sob elevados conteúdos de água, em que menos de 10% do espaço poroso está preenchido com ar, o coeficiente de difusão de gases no solo e o suprimento de oxigênio para as raízes são limitados (Xu et al., 1992), reduzindo assim o alongamento radicular (Figura 12B). Além de restringir a disponibilidade de oxigênio, a baixa difusão de gases no solo pode aumentar a concentração de CO₂ em níveis tóxicos às raízes (Boru et al., 2003), prejudicando o seu crescimento.

A máxima taxa de alongamento radicular ocorre em potenciais hídricos entre 10 kPa (capacidade de campo) e 100 kPa (Figura 12B). À medida que o solo seca, a taxa de alongamento das raízes passa a ser limitada pela combina-

ção de estresse hídrico por déficit e impedimento mecânico (Bengough et al., 2011; Moraes et al., 2018a, 2020). Com base na revisão de diversos estudos, Bengough et al. (2011) explicam que o alongamento radicular foi reduzido pela metade quando a resistência mecânica à penetração (RP) medida com penetrômetro foi maior que 0,8-2 MPa (dependendo da espécie vegetal), na ausência de estresse hídrico, ou quando o Ψ foi menor que 0,5 MPa, na ausência de impedimento mecânico. Portanto, tanto o impedimento mecânico quanto o estresse hídrico podem limitar, isoladamente ou em conjunto, a taxa de alongamento radicular em um solo sob secagem.

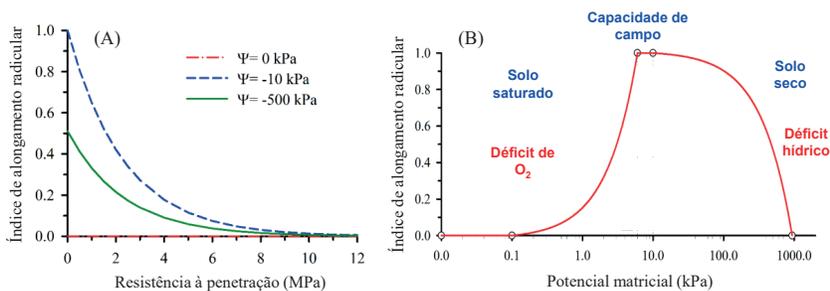


Figura 12. Índice de alongamento radicular (0 a 1) da soja em função da resistência mecânica do solo à penetração em diferentes potenciais matriciais (Ψ) (A) e da disponibilidade de água no solo, expressa pelo Ψ (B).

Fonte: adaptado de Moraes et al. (2018a) e Moraes e Gusmão (2021).

Comparando o crescimento radicular de oito cultivares de soja em duas safras com disponibilidades hídricas contrastantes, Franchini et al. (2017) demonstraram que o comprimento radicular médio, na camada de 0-50 cm e no estágio R2 da cultura, foi 24% menor sob ocorrência de seca durante os estádios vegetativos. Em maiores profundidades, onde as variações de umidade e os valores de RP foram menores, os efeitos da disponibilidade hídrica foram pequenos e, para algumas cultivares, houve aumento do comprimento radicular na camada de 50-100 cm na safra com déficit hídrico nos estádios vegetativos. Com isso, houve modificação na distribuição das raízes ao longo do perfil do solo, com aumento da porcentagem de raízes em camadas abaixo de 50 cm quando da ocorrência de seca nos estádios vegetativos. Para algumas cultivares, a proporção do comprimento radicular total (0-100 cm) na camada de 50-100 subiu de 22% para 38% na safra com menor disponibilidade de água nos estádios vegetativos da soja.

As interações entre impedimento mecânico e estresse hídrico na limitação do alongamento radicular em solo sob secagem são detalhadas na Figura 12A. O índice de alongamento radicular da soja diminuiu exponencialmente com o aumento da RP medida com penetrômetro, nos potenciais matriciais de -10 e -500 kPa. Em solo saturado, o alongamento é nulo, independentemente da RP, pois o fator restritivo é ausência de oxigênio, combinada com maiores concentrações de CO_2 . A redução pelo aumento de RP é maior com $\Psi = -10$ kPa (capacidade de campo) do que com $\Psi = -500$ kPa, pois no potencial menor, o alongamento é limitado também pelo déficit hídrico. Observa-se ainda que o índice de alongamento radicular foi reduzido de 1 para 0,3 (ou seja, em 70%) com valores de RP de 3,5 MPa em $\Psi = -10$ kPa. Em solo mais seco ($\Psi = -500$ kPa), a RP a partir da qual o alongamento diminuiu 70% foi reduzida para apenas 1,8 MPa, reforçando que, para uma mesma RP, o alongamento radicular é tão menor quanto mais negativo for Ψ . Isso ocorre porque a máxima pressão possível de ser exercida por uma raiz em crescimento buscando vencer a resistência do solo é diretamente relacionada à pressão de turgor das células na zona de alongamento radicular que, por sua vez, diminui com a redução do Ψ e do conteúdo de água do solo (Whalley et al., 1998). A redução do conteúdo de água do solo aumenta a fricção entre as raízes e o solo na zona de alongamento, contribuindo também para diminuir o crescimento radicular em um solo sob secamento (Bengough et al., 2011). Adicionalmente, o déficit hídrico prejudica a fotossíntese e, assim, limita a disponibilidade de fotoassimilados para sustentar o crescimento das raízes (Wissuwa et al., 2005).

À medida que o solo seca, ocorre um rápido incremento nas forças capilares que unem as partículas de solo (Whalley et al., 2005), aumentando sua resistência à deformação ou ruptura. Esse processo é o principal fator que explica o aumento da RP com a redução do conteúdo de água do solo (Moraes et al., 2017) o que, de forma indireta, também limita o crescimento das raízes (Franchini et al., 2017; Moraes et al., 2018a).

A temperatura do solo é outro fator físico que pode limitar a taxa de alongamento radicular. O efeito da temperatura do solo sobre o crescimento radicular da soja, mantendo-se a temperatura do ar constante e dentro da faixa recomendada para a cultura, foi estudado por Pushkala e Yagarajarao (1988), sendo os resultados sintetizados na Figura 13. O máximo comprimento radicular relativo (CRR) da soja ocorreu em temperaturas de solo próximas a 28

°C e, a partir de 30 °C, houve redução linear nesse parâmetro, de forma que, a cada aumento de 1 °C na temperatura, o CRR diminui 8% (Figura 13A). Da mesma forma, observa-se redução no CRR em temperaturas de solo abaixo dos 26 °C. O potencial hídrico na folha foi menor quando a temperatura do solo ficou fora da faixa ideal (Figura 13B), evidenciando menor suprimento de água em decorrência do menor crescimento radicular. Por sua vez, Stone e Taylor (1983) avaliaram o impacto de baixas temperaturas de solo (16 a 30 °C) na taxa de alongamento de raízes da soja. Os autores concluíram que a máxima alongamento radicular ocorreu na temperatura mais alta estudada (30 °C), com diminuição de 8% por grau de redução na temperatura. Além de limitar o alongamento radicular, valores extremos de temperaturas de solo prejudicam o funcionamento das raízes, diminuindo a absorção de água e nutrientes (Nielsen, 1974).

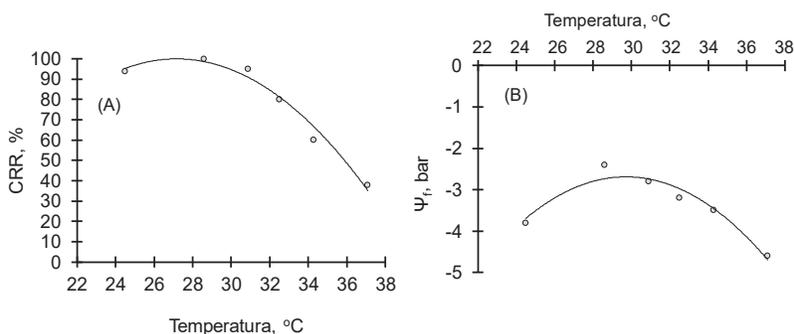


Figura 13. Comprimento radicular relativo (CRR) (A) e potencial hídrico na folha (Ψ_f) (B) de plantas de soja cultivadas em vaso aos 41 DAS, sob diferentes temperaturas do solo.

Fonte: adaptado de Pushkala e Yagarajarao (1988).

As propriedades físicas diretamente relacionadas ao crescimento radicular (resistência mecânica, temperatura e disponibilidade de água e oxigênio) são determinadas por diversos fatores, entre os quais se destacam o tipo/classe de solo, a profundidade e características do perfil, a textura, a composição mineralógica e a estrutura do solo (Letey, 1985; Moraes; Gusmão, 2021). A cobertura do solo por restos culturais é outra variável que atua indiretamente no crescimento das raízes, por influenciar principalmente a disponibilidade de água e a temperatura. Dentre todos esses fatores, a cobertura e a estrutura do solo são os únicos que podem ser alterados pelo manejo das áreas agrícolas, sendo assim de especial interesse para o Zarc.

A cobertura por restos culturais modifica o regime térmico do solo, atuando como um isolante. Conforme Prevedello (2010), isso ocorre pelo fato de a cobertura apresentar: 1) grande volume de ar, o que reduz a transmissão de calor da cobertura para o solo e vice-versa e, assim, atenua os processos de aquecimento e resfriamento; 2) elevado coeficiente de reflexão, diminuindo a radiação solar disponível para aquecimento; e 3) incremento do conteúdo de água do solo, o que aumenta o calor específico (quantidade de energia térmica necessária para elevar a temperatura de 1 m³ de solo em 1 K). Com isso, tem-se redução da amplitude térmica e da temperatura média abaixo da cobertura, pela diminuição das temperaturas máximas diárias (Allmaras et al., 1977; Derpsch et al., 1986; Bragagnolo; Mielniczuk, 1990; Gasparim et al., 2005; Torres et al., 2010) e aumento das mínimas (Kovaleski et al., 2015). O efeito isolante térmico da cobertura depende diretamente da porcentagem de solo coberto pelos restos vegetais, sendo tão maior quanto mais espessa, mais seca, mais clara e menos decomposta for a camada de restos culturais (Gasparim et al., 2005; Andrade, 2008; Prevedello, 2010). Na maioria das situações de cultivo de grãos das regiões tropicais e subtropicais do Brasil, são as temperaturas do solo excessivamente altas que podem limitar o crescimento das raízes, de modo que a formação de uma adequada cobertura com restos culturais é essencial para o estabelecimento de um sistema radicular abundante e profundo. Além disso, a cobertura do solo favorece o crescimento radicular por reduzir as perdas de água por evaporação (Andrade, 2008) e escoamento superficial (Derpsch et al., 1986), o que aumenta a disponibilidade de água e, assim, diminui a magnitude dos estresses hídrico e mecânico que limitam o alongamento das raízes. É importante salientar que, por suas características de baixa condutividade térmica e calor específico, a superfície da cobertura com palha apresenta temperaturas mínimas menores que o solo nu, podendo aumentar os danos por geada em culturas de inverno.

Conceitualmente, a estrutura do solo se refere ao padrão de arranjo das partículas minerais (argila, silte e areia) e orgânicas em unidades estruturais, os agregados, os quais são separados entre si por superfícies de fraqueza (Santos et al., 2005). Dexter (1988) completa esse conceito, salientando que a estrutura também envolve a forma como os agregados e partículas minerais e orgânicas se organizam no espaço e no perfil do solo. Assim, a estrutura do solo é resultante do arranjo dos agregados no espaço, sendo fundamental para a fertilidade do solo e extremamente vulnerável ao manejo. Nos

agregados, as partículas estão ligadas por substâncias orgânicas e minerais, como carbonatos, óxidos de ferro, de alumínio, entre outras, bem como por raízes e hifas fúngicas.

Em termos agronômicos, uma boa estrutura (Figura 14A) é aquela formada por agregados estáveis e porosos, que proporcionem ao perfil de solo as seguintes características: resistência à destruição por forças externas (impacto da gota de chuva, cisalhamento pela enxada e pressões aplicadas pelo tráfego de máquinas agrícolas e animais) sem, entretanto, impedir o crescimento das raízes; elevada infiltração e retenção de água disponível às plantas; e capacidade de suprimento de oxigênio em níveis adequados às raízes e à biota do solo (Ralisch et al., 2017). Para atender a esses requisitos, é essencial que os agregados e seu arranjo no espaço resultem em poros estáveis, contínuos e interconectados ao longo do perfil, com distribuição adequada de tamanho. A continuidade e interconectividade dos poros são características que melhoram a eficiência com que os fluxos de água e ar ocorrem no solo, bem como favorecem o crescimento radicular em profundidade. Os bioporos, que correspondem aos poros criados pelo crescimento das raízes e pela atividade da macro e mesofauna do solo, apresentam todas essas características. Assim, mesmo quando presentes em menores proporções comparativamente às demais classes de poros, os bioporos favorecem grandemente os fluxos de água e ar (Zhang et al., 2018), bem como se constituem em caminhos preferenciais para o crescimento das raízes, reduzindo os impactos negativos de estresses mecânicos sobre o alongamento radicular (Moraes et al., 2018a; Bertollo et al., 2021; Moraes; Gusmão, 2021). No caso do tamanho de poros, como referência, é desejável uma proporção de macroporos (diâmetro equivalente maior que 50 μm) entre 10 a 20%, para garantir elevada infiltração e favorecer o suprimento de oxigênio às raízes, combinado com o máximo volume possível de microporos com tamanho entre 0,2 e 50 μm , capazes de reter água disponível às plantas.

A destruição dos agregados, seja por pulverização ou compactação excessivas, leva à degradação da fertilidade estrutural do solo gerando, entre outros problemas, estresses físicos que limitam o crescimento das plantas e de suas raízes (Figura 14). Camadas de solo excessivamente solto ou pulverizado (Figura 14B), em geral resultantes de operações de preparo com implementos de discos ou hastes, apresentam como características marcantes a baixa

densidade, a alta proporção de macroporos e a descontinuidade do sistema poroso. No curto prazo, essas características significam altas taxas de infiltração de água, baixa resistência mecânica ao crescimento das raízes e elevada capacidade de aeração. Porém, essa condição prejudica a retenção de água, a condutividade hidráulica não saturada e o contato solo-raiz, especialmente em solos de textura média a arenosa (Ortigara, 2017; Moraes et al., 2018b, 2020), o que pode reduzir a produtividade e limitar o crescimento das raízes por estresse hídrico (Bertollo et al., 2021). Além disso, a pulverização dos agregados implica baixa resistência ao carregamento pela água da chuva e à deformação pelo tráfego de máquinas ou pisoteio animal. Assim, solos pulverizados são altamente suscetíveis à degradação por compactação e erosão, mesmo em curto prazo.



Figura 14. Diagrama conceitual mostrando as principais alterações induzidas pela degradação de um solo com adequada estrutura (A), por pulverização (B) ou compactação (C) excessivas. As fotos representam amostras coletadas na camada de 0-25 cm de um Latossolo Vermelho distroférico muito argiloso, como parte da aplicação do Diagnóstico Rápido da Estrutura do Solo - DRES.

Por sua vez, a degradação por compactação excessiva (Figura 14C) reduz a disponibilidade hídrica às plantas, em função da menor infiltração, condutividade hidráulica e volume de poros que retém água disponível. Adicionalmente, a compactação se reflete em impedimento mecânico ao alongamento radicular e, no caso de períodos excessivamente chuvosos, em limitação de suprimento de oxigênio às raízes. Portanto, a compactação limita a produtividade das culturas e o crescimento das raízes, sobretudo em anos secos ou com excesso de chuvas. Por apresentarem alta densidade e baixa porosidade, solos compactados são evidentemente mais resistentes à deformação pelo tráfego de máquinas ou pisoteio animal, bem como à desagregação pelo escoamento superficial de água. Salienta-se que, em geral, os problemas mais graves de compactação ocorrem justamente em solos que foram anteriormente submetidos à pulverização excessiva (Soriani, 2020).

Resultados de pesquisas conduzidas na Embrapa Soja em parceria com outras instituições mostram que a produtividade e o crescimento das raízes de culturas como a soja e o milho são prejudicados pela degradação da estrutura do solo, tanto por pulverização quanto por compactação excessiva (Moraes et al., 2019, 2020; Bertollo et al., 2021). Nesse sentido, o desempenho produtivo da soja e do milho 2ª safra sob deficiência hídrica moderada respondeu de forma quadrática ao aumento do grau de compactação do solo na camada de 10-20 cm (Figura 15), ou seja, houve perdas de produtividade de grãos com o solo excessivamente compactado ($RP > 3$ MPa) e, também, em solo solto, pulverizado ($RP < 1$ MPa). As reduções de produtividade na soja e no milho foram de, respectivamente, 28% e 30% por compactação, e 9% e 23%, por pulverização. Similarmente, a Figura 16 demonstra que o crescimento das raízes de soja no perfil de 0-50 cm foi menor em solos compactados por tráfego de máquinas agrícolas ou excessivamente soltos em decorrência de operações de preparo do solo (neste caso, escarificação). Em média, a densidade de comprimento radicular foi de 3,5; 4,0; e 4,8 cm cm^{-3} para os tratamentos plantio direto escarificado, sistema plantio direto com compactação adicional por quatro tráfegos de trator (SDPC) e sistema plantio direto sem compactação adicional ou escarificação (SPDN), respectivamente. Considerando a camada de 0,25-0,50 m, os tratamentos plantio direto escarificado e SDPC foram semelhantes entre si, mas com redução de cerca de 25% na densidade de comprimento radicular em relação ao SPDN.

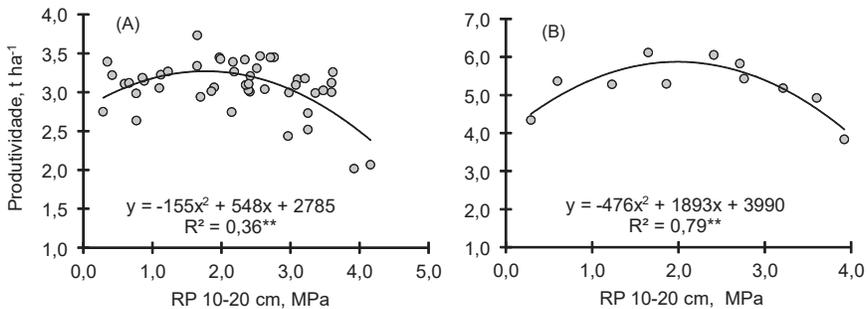


Figura 15. Produtividade da soja (A) e do milho 2^a safra (B) em função do estado de compactação do solo, expresso pela resistência mecânica à penetração (RP) na camada de 10-20 cm.

Fonte: adaptado de Moraes et al. (2019, 2020).

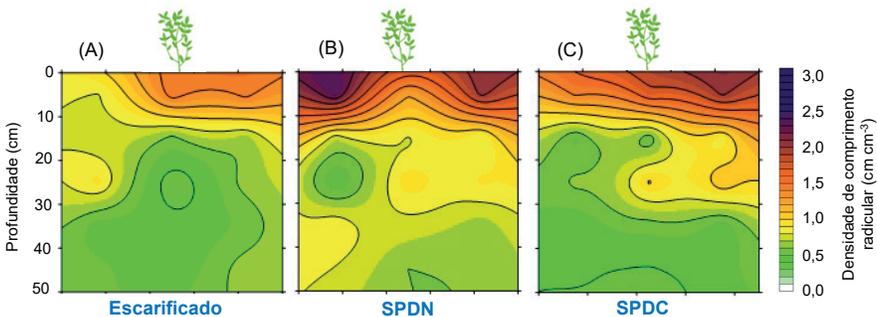


Figura 16. Distribuição bidimensional das raízes da soja cultivada em sucessão à braquiária *ruziensis* sob diferentes manejos de solo: plantio direto escarificado (A), sistema plantio direto sem compactação adicional ou escarificação (SPDN) (B) e sistema plantio direto com compactação adicional por quatro tráfegos de trator (SDPC) (C).

Fonte: Adaptado de Bertollo et al. (2021).

A construção de um perfil de solo com adequada fertilidade estrutural depende diretamente da adoção de modelos de produção com maiores diversidade de espécies vegetais e aporte de material vegetal (palha e raiz). Conforme esquematizado na Figura 17 (Debiasi et al., 2015), a utilização do material orgânico (palha e raízes) adicionado ao solo, como fonte de energia pela biota, resulta na formação de bioporos e na produção de agentes agregantes (mucilagens, polissacarídeos e hifas fúngicas, entre outros), levando à formação e estabilização de agregados que conferem ao solo uma estrutura porosa, resistente a forças externas e capaz de se recuperar rapidamente quando submetida a tais forças (resiliente). Simultaneamente, o crescimento das raí-

zes das culturas que compõem os modelos de produção forma e estabiliza bioporos e agregados, por meio da ação mecânica, liberação de exsudatos e formação de um ambiente (rizosfera) favorável à proliferação de microrganismos. Da mesma forma, a cobertura proporcionada pela palha conserva a umidade e modula a temperatura do solo, proporcionando um ambiente adequado ao funcionamento da biota e, assim, à produção de agentes agregantes e à formação de bioporos pela meso e macrofauna. A maior umidade decorrente da cobertura, por sua vez, diminui a resistência mecânica do solo (RP), favorecendo o crescimento das raízes e, conseqüentemente, aumentando os efeitos destas sobre a estrutura do solo. As imagens da Figura 18, referentes a amostras submetidas à metodologia do diagnóstico rápido da estrutura do solo (DRES) (Ralisch et al., 2017), coletadas na camada de 0-25 cm de um Latossolo muito argiloso sob diferentes usos e manejos, mostram claramente a relação direta entre a fertilidade estrutural do solo e o aporte de material vegetal e a diversidade de plantas no sistema. É importante ressaltar que os principais agentes agregantes são transitórios (Goldchin et al., 1997), de modo que os modelos de produção devem ser planejados para que adição de biomassa e a presença de raízes sejam contínuas ao longo do tempo e em quantidade e qualidade compatíveis com a demanda biológica (Denardin; Kochhann, 2006).

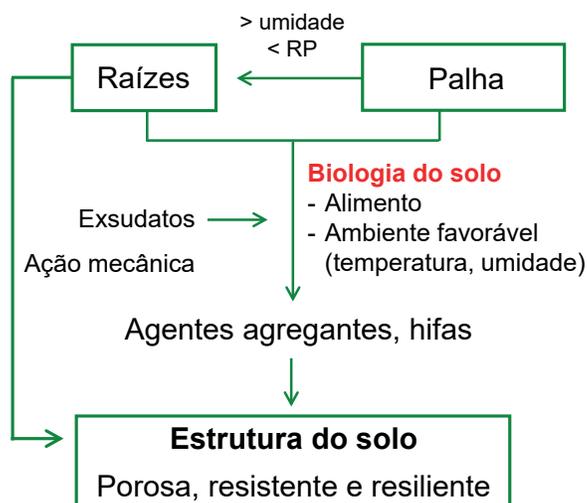


Figura 17. Modelo conceitual simplificado do papel exercido pela diversificação de culturas na fertilidade estrutural do solo.



Figura 18. Relação da qualidade estrutural do solo com a diversidade biológica e a adição de material vegetal (palha e raízes), determinada pelo uso e manejo do solo.

O mínimo revolvimento do solo, evitando-se operações de preparo sem critério técnico, é outra estratégia para manter e melhorar a fertilidade estrutural. O uso de implementos de hastes (escarificadores/subsoladores) e, sobretudo, de discos (arados e grades) proporciona desagregação excessiva na região mobilizada e, dependendo da situação, pode resultar em uma camada compactada logo abaixo da profundidade de trabalho (pé-de-arado ou pé-de-grade), conforme exemplificado na Figura 19. Nesse sentido, Moraes et al. (2020) mostraram que a compactação subsuperficial pode ocorrer inclusive em operações de preparo do solo com implementos de hastes, como escarificadores e subsoladores. Esses autores encontraram aumento da RP na camada imediatamente abaixo da revolvida por meio de escarificador (28-35 cm), evidenciando possível formação de soleira (camada compactada subsuperficial) pela ação das ponteiros do implemento. Ressalta-se também que as pressões aplicadas pelos rodados das máquinas agrícolas atingem maiores profundidades quando o tráfego ocorre em solos soltos ou úmidos, com menor resistência (Söhne, 1958). Isso significa que o tráfego em solos soltos, desestruturados, pode induzir a compactação em subsuperfície, como detectado por Silva et al. (2012) e Soriani (2020).

Nas situações exemplificadas pela Figura 19, tem-se duas camadas com estrutura degradada: a superficial, por pulverização excessiva; a subsuperficial, por compactação. Além de todas as implicações negativas que a pulverização e a compactação ocasionam isoladamente em sua respectiva camada, a estratificação da estrutura amplia as limitações físicas ao crescimento das plantas e raízes. Essa estrutura estratificada se reflete em descontinuidade de poros no perfil, o que prejudica os fluxos de água (infiltração, ascensão capilar e condutividade hidráulica não saturada) e de gases no solo, favorecendo ainda mais a ocorrência de estresses físicos que limitam o alongamento radicular. Bengough et al. (2011) acrescentam que, no processo de alongamento radicular, deve haver uma força contrária ao sentido da pressão exercida pelas raízes para que as mesmas possam vencer a resistência mecânica do meio. Essa força é gerada pela ancoragem das raízes na camada acima da zona de alongamento. Se o solo dessa camada for muito solto, a ancoragem é prejudicada, diminuindo o potencial de penetração das raízes em camadas subjacentes com impedimento mecânico.



Figura 19. Amostras de solo da camada de 0-25 cm coletadas em áreas submetidas a operações de preparo mecânico, mostrando a ocorrência de estratificação da estrutura do solo.

Ainda com relação aos perfis apresentados na Figura 19, é importante salientar que o solo solto na superfície se caracteriza por baixa condutividade térmica e baixo calor específico, por apresentar elevada porosidade com predomínio de poros grandes, constituindo-se, portanto, em uma camada com elevada proporção de ar e baixa umidade (Allmaras et al., 1977; Prevedello, 2010). Como resultado, a superfície do solo (profundidade < 5 cm) pode apresentar grande amplitude térmica diária com temperaturas máximas mais elevadas em relação a camadas mais estruturadas, sobretudo em solos arenosos e com baixa cobertura por palhada (Prevedello, 2010). Em termos

práticos, essa condição pode impor grandes limitações à germinação das sementes e estabelecimento das plântulas, ao crescimento radicular inicial e ao estabelecimento de relações ecológicas entre as raízes e microrganismos, como no caso da fixação biológica de nitrogênio (FBN) em soja.

A substituição dos discos duplos por hastes sulcadoras para deposição profunda dos fertilizantes (-15 cm) durante o processo de semeadura das culturas é outra estratégia capaz de mitigar camadas superficiais de impedimento mecânico, de forma localizada, favorecendo assim o crescimento inicial das raízes e seu maior aprofundamento no solo (Veiga et al., 2007; Betioli Junior et al., 2012; Nunes et al., 2014, 2019). A resposta positiva das culturas ao uso de hastes sulcadoras, em termos de produtividade, é mais evidente em áreas que apresentem compactação superficial, como às submetidas ao pisoteio animal (Andreolla; Gabriel Filho, 2006; Modolo et al., 2013), e em safras caracterizadas por períodos com baixa pluviosidade (Herzog, 2003). Um aspecto bastante importante é que a elevada concentração de raízes na linha mobilizada contribui para a estabilização da estrutura formada, aumentando assim a persistência dos efeitos benéficos de redução da resistência mecânica e, ao mesmo tempo, agregando partículas eventualmente pulverizadas pela ação mecânica da haste (Nunes et al., 2014; Franchini et al., 2018).

Salienta-se, entretanto, que a utilização de hastes sulcadoras com atuação profunda aumenta a demanda de potência e o consumo de combustível, reduzindo assim a velocidade de trabalho e, em consequência, a capacidade operacional (Silva, 2003). Além disso, quando mal utilizadas, as hastes sulcadoras promovem desagregação excessiva do solo e redução significativa da cobertura superficial, favorecendo a erosão e a infestação por plantas daninhas. Altas velocidades de operação (acima de 6 km/h) e umidade excessiva no momento da semeadura são as principais causas desses problemas (Conte et al., 2020).

Um dos grandes gargalos para o manejo da fertilidade estrutural do solo relaciona-se à carência de métodos e ferramentas para o seu correto diagnóstico, com custo acessível e aplicabilidade em escala de lavoura. Indicadores físicos baseados em relações massa/volume, como densidade, porosidade e sua distribuição em classes de tamanho, além de serem pouco sensíveis ao manejo e de difícil interpretação, exigem a coleta de amostras com estrutura preservada em anéis volumétricos, o que praticamente inviabiliza sua

utilização em larga escala (Moraes et al., 2012). Outros indicadores, como a estabilidade de agregados e a taxa de infiltração de água, são mais sensíveis ao manejo, porém esbarram na falta de critérios para diagnóstico e na baixa praticidade de execução em nível de campo. Diante disso, a RP, determinada por meio de penetrômetros, tem se constituído em uma das principais ferramentas utilizadas para avaliar a fertilidade estrutural do solo, principalmente por se tratar de um método que alia rapidez, facilidade de execução e caracterização detalhada do perfil do solo com medidas que, dependendo do equipamento utilizado, podem chegar a 1,0 m de profundidade (Debiasi et al., 2008).

De maneira resumida, a RP corresponde à força necessária para que um cone se desloque verticalmente no perfil do solo, dividida pela área basal do referido cone. Entretanto, a interpretação dos resultados para fins de tomada de decisão não é óbvia, uma vez que a RP é influenciada por diversos fatores relacionados ao solo, ao método de determinação e às características construtivas do penetrômetro utilizado (Debiasi et al., 2008; Moraes et al., 2014a). Com relação aos equipamentos usados para a sua determinação, os valores de RP podem variar em função das características do cone, sobretudo diâmetro, ângulo, nível de desgaste e rugosidade da superfície (Bradford, 1986). Para a grande maioria das situações de campo, é indicado uso de cone com 12,83 mm diâmetro de base e ângulo de 30°, conectado a uma haste de 9,5 mm de diâmetro, conforme indicado na norma ASABE S313.3 (Asabe, 2006a). Segundo a mesma norma, o desgaste máximo permitido no cone é de 3%. Existem ainda dois tipos de penetrômetro de campo: 1) estático, em que o cone é inserido no solo com uma taxa de penetração constante; e 2) dinâmicos, onde o cone se desloca verticalmente no solo pela ação do impacto de uma massa caindo de uma altura conhecida. Os penetrômetros estáticos oferecem importantes vantagens em relação aos de impacto, pela maior rapidez e facilidade de medida, por serem normalizados internacionalmente e, ainda, largamente utilizados em pesquisa, o que proporciona melhores referências para comparação dos valores obtidos. No caso dos penetrômetros estáticos, a velocidade de inserção deve ser constante (30 mm/s), o que consta da norma ASABE EP542 (Asabe, 2006b). A variação dessa velocidade altera grandemente os resultados (Kim et al., 2008), de forma que sistemas automatizados de inserção devem ser preferidos.

A RP depende de vários atributos de solo, incluindo a densidade, o conteúdo de água e o potencial hídrico no momento da avaliação, o teor de argila, o atrito metal-solo, a resistência dos agregados e a presença de raízes (Molin et al., 2006; Dexter et al., 2007; Kim et al., 2008; Vaz et al., 2011; Moraes et al., 2012, 2017; Bertollo et al., 2021). A variação do conteúdo de água do solo é o principal fator que dificulta a interpretação dos dados de RP para fins de diagnóstico da fertilidade estrutural do solo. Nesse sentido, a RP aumenta exponencialmente com a redução do conteúdo de água, dificultando a comparação de solos com diferentes umidades (Busscher et al., 1997). Pequenos aumentos ou reduções da umidade resultam em grandes reduções ou incrementos na RP, sub ou superestimando o estado de compactação do solo (Moraes et al., 2014a). Assim, a norma ASABE EP542 (Asabe, 2006b) indica a medição da RP em conteúdo de água equivalente à capacidade de campo, permitindo assim comparar diferentes manejos entre si e com valores de referência, considerados limitantes ao crescimento das raízes e à produtividade das culturas.

Outras variáveis também devem ser levadas em consideração na interpretação dos valores de RP. Por exemplo, para uma mesma densidade, porosidade, teor de argila e conteúdo de água, a RP aumenta com o tempo transcorrido entre o último revolvimento de solo e a amostragem (Moraes et al., 2017). Isso se deve ao aumento da coesão do solo que ocorre gradativamente sob ausência de revolvimento, decorrente do incremento no número e na força das ligações entre as partículas minerais, orgânicas e agregados, processo conhecido como *age-hardening* (Dexter, 1988). Nas condições brasileiras, esse fenômeno foi comprovado pela primeira vez por Moraes et al. (2017), que concluíram que a RP foi maior em um SPD com 24 anos em relação a outro com 11 anos, quando comparados sob uma mesma densidade e conteúdo de água. Os dados apresentados nesse trabalho mostraram ainda que a maior RP no SPD de 24 anos não foi limitante à produtividade da soja, uma vez que a porosidade e sua distribuição por tamanho não foram alteradas. Bertollo et al. (2021) também encontram aumento da RP ao longo do tempo para amostras de solo com mesma densidade e conteúdo de água, sendo esse incremento maior nos tratamentos com presença de maior quantidade de raízes, cultivados no outono-inverno com braquiária *ruziziensis*. Mesmo com maior RP, a soja cultivada após braquiária apresentou maior comprimento radicular e maior produtividade em relação aos demais tratamentos,

o que foi atribuído aos bioporos formados na decomposição das raízes da gramínea.

Para medições realizadas com conteúdo de água equivalente à capacidade de campo, valores de RP maiores que 2 MPa têm sido tradicionalmente indicados como sendo limitantes ao crescimento das raízes e à produtividade das culturas (Taylor et al., 1966; Tormena et al., 1998; Reichert et al., 2007; Bengough et al., 2011). Entretanto, esse valor não leva em consideração as alterações estruturais observadas em SPD consolidado e conduzido em consonância com suas premissas, que envolvem aspectos como o *age-hardening* e a formação de uma complexa rede de bioporos contínuos e interconectados. Dessa forma, Moraes et al. (2014b) propuseram limites críticos de RP para solos argilosos, considerando o histórico de manejo, equivalentes a 2 MPa, 3 MPa e 3,5 MPa para áreas sob PC, preparo mínimo com escarificação e SPD consolidado, respectivamente. O valor crítico de 3,5 MPa para solos argilosos sob SPD consolidado é coerente com os resultados obtidos por Tormena et al. (2007), Betioli Junior et al. (2012) e Moraes et al. (2020). Esses limites são válidos quando a camada mais compactada estiver até 20 cm de profundidade. Existem evidências de que os valores críticos de RP são menores para camadas abaixo dos 20 cm, conforme detectado por Soriani (2020). Trabalhos similares em solos arenosos são escassos, mas se espera que os valores críticos sejam levemente inferiores aos indicados para solos argilosos, em função de sua menor coesão.

A utilização de metodologias visuais, como o DRES (Ralisch et al., 2017), constitui-se em excelente opção para avaliação da fertilidade estrutural do solo em escala de lavoura. O DRES é de baixo custo e altamente sensível ao manejo, além de se constituir em uma avaliação direta da estrutura, o que minimiza o efeito de outros fatores na interpretação dos resultados. Porém, a aplicação do DRES requer abertura de pequenas trincheiras e a retirada manual de amostras com o auxílio de ferramentas como enxadão e pá reta, o que o torna um método mais lento e trabalhoso do que a RP. Adicionalmente, a metodologia apresenta determinado grau de subjetividade, o que, muitas vezes, é visto como uma de suas principais desvantagens.

De maneira resumida, o DRES envolve a coleta de uma amostra na camada de 0-25 cm, a qual é processada manualmente, buscando a individualização dos agregados e partículas que a compõem. As avaliações nas amostras

constam da observação do tamanho e forma dos agregados, presença ou não de feições de compactação ou outra modalidade de degradação do solo, forma e orientação das fissurações, rugosidade das faces de ruptura, resistência à ruptura, distribuição e aspecto do sistema radicular, e evidências de atividade biológica. A partir desses critérios, são identificadas as camadas da amostra (em número variável de uma a três) e, em seguida, atribui-se uma pontuação de 1 a 6 para cada uma delas, onde 6 é indicativo de melhor condição estrutural, e 1 representa o solo totalmente degradado. A média ponderada pela espessura de cada camada corresponde ao índice de qualidade estrutural da amostra (IQEA), também variável entre 1 e 6. Por sua vez, a média dos IQEA em uma dada área corresponde ao índice de qualidade estrutural do solo (IQES). De acordo com o IQES, a fertilidade estrutural é interpretada em cinco classes: muito boa (5,0-6,0), boa (4,0-4,9), regular (3,0-3,9), ruim (2,0-2,9) e muito ruim (1,0-1,9) (Figura 20). Ressalta-se que um dos grandes diferenciais do DRES corresponde ao fato de levar em consideração tanto a degradação da estrutura por compactação/adensamento quanto por pulverização excessiva. Detalhes metodológicos do DRES, assim como as indicações de manejo para cada classe de interpretação, podem ser encontrados em Ralisch et al. (2017).

Difícilmente um correto diagnóstico da fertilidade estrutural do solo será obtido com a utilização de apenas um indicador. Assim, a integração de indicadores qualitativos e quantitativos, sobretudo com o uso de ferramentas de agricultura de precisão, é altamente recomendável, de forma a aliar os pontos fortes de cada um deles. Nesse contexto, a situação ideal é realizar o diagnóstico em duas etapas:

- Etapa 1: indicadores com maior facilidade e rapidez de determinação (RP, produtividade, condutividade elétrica e índices de vegetação obtidos por sensoriamento remoto), que permitam uma visão geral da área e assim, a seleção de regiões/zonas prioritárias para diagnóstico mais detalhado.
- Etapa 2: indicadores para diagnóstico mais aprofundado nas regiões/zonas selecionadas na etapa 1.

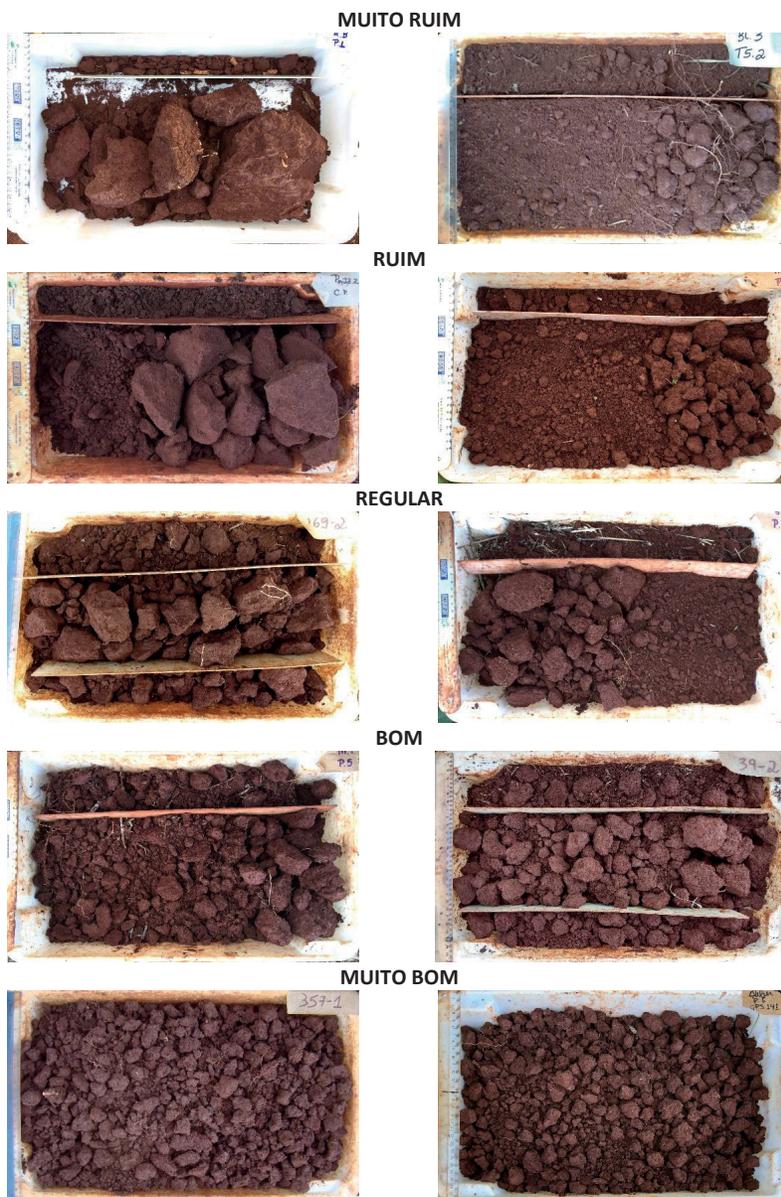


Figura 20. Exemplos de amostras processadas pela metodologia do diagnóstico rápido da estrutura do solo (DRES), enquadradas em diferentes classes de interpretação do índice de qualidade estrutural da amostra (IQEA). Nas classes muito ruim, ruim e regular, as amostras à esquerda e à direita apresentam degradação por compactação e pulverização excessivas, respectivamente.

Uma possibilidade interessante de integração envolve o emprego de mapas de RP ou de produtividade para a caracterização geral da área, e do DRES para detalhamento de regiões/zonas de interesse, conforme exemplificado na Figura 21. Nesse exemplo, a RP na camada mais compactada (15-17 cm) apresentou valores a princípio limitantes em toda a gleba de 121 ha (etapa 1). Entretanto, dividindo-se a área em 5 zonas conforme faixas de variação de RP e, em cada uma delas, coletando-se algumas amostras de solo para aplicação do DRES (etapa 2), verifica-se que parte da área não apresenta estrutura degradada, sendo os elevados valores de RP resultantes de outros fatores que não a compactação excessiva do solo. Por outro lado, nas outras três faixas, o IQEA pelo DRES confirmou degradação por compactação, porém, em um grau menos limitante do que os valores de RP poderiam sugerir. Assim, dentro da mesma gleba, os riscos de perda de produtividade são altos nas regiões com RP alta e IQEA baixo. Salienta-se ainda que esse procedimento possibilitou reduzir significativamente o número de pontos de amostragem necessários para o DRES, que apresenta maior dificuldade de execução comparativamente à RP.

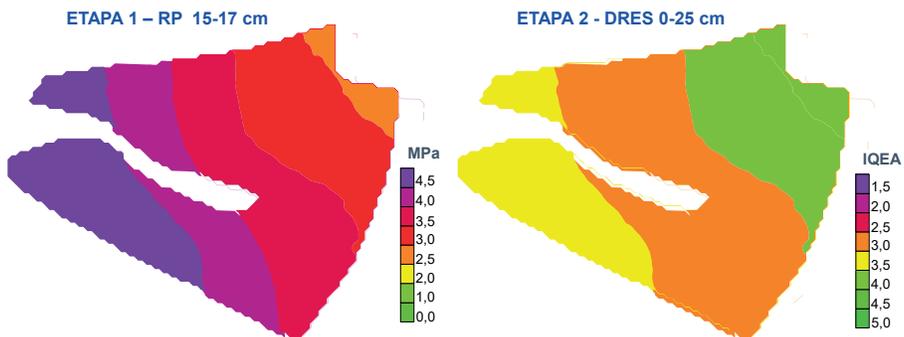


Figura 21. Exemplo de diagnóstico integrado da fertilidade estrutural do solo em uma gleba agrícola sob sistema plantio direto (SPD) no município de Toledo, PR, envolvendo duas etapas: 1) determinação e mapeamento da resistência mecânica do solo à penetração (RP), com a definição de cinco zonas de interesse; e 2) determinação do índice de qualidade estrutural da amostra (IQEA) pelo DRES.

Fatores biológicos

A biota do solo é composta, em parte, por organismos que interagem com as raízes das plantas, podendo exercer efeitos benéficos ou prejudicar seu crescimento (Raaijmakers et al., 2009). Dentre os organismos que causam danos

ao sistema radicular das culturas, encontram-se fitopatógenos como fungos, oomicetos e nematoides, além de algumas espécies de insetos-praga. Por outro lado, o crescimento radicular e sua capacidade de absorver água e nutrientes podem ser beneficiados por diferentes microrganismos, como rizobactérias e fungos promotores de crescimento, as bactérias fixadoras de N e os fungos micorrízicos.

A magnitude dos danos ocasionados pelas doenças radiculares varia em função de características do patógeno, do hospedeiro, do ambiente e de suas interações (Bergamin Filho, 1995). De maneira geral, as doenças radiculares provocam a morte da extremidade da raiz principal e destroem as raízes finas e pelos radiculares, comprometendo assim o crescimento radicular e a habilidade das raízes em absorver água e nutrientes (Raaijmakers et al., 2009). Tal fato resulta em redução do crescimento e da produtividade das culturas, que podem exibir sintomas de déficit hídrico e de deficiência de nutrientes, mesmo sob condições de adequada disponibilidade de água e nutrientes no solo. As principais doenças radiculares da soja englobam as podridões radiculares de *Fusarium* spp., *Macrophomina phaseolina*, *Phytophthora sojae* e *Corynespora cassiicola*, além das nematoses causadas pelo nematoide-de-cisto-da-soja (*Heterodera glycines*), nematoides-de-galhas (*Meloidogyne javanica* e *M. incognita*), nematoide-reniforme (*Rotylenchulus reniformis*) e nematoide-das-lesões-radiculares (*Pratylenchus* spp.) (Seixas et al., 2020). As medidas de controle e sua eficiência variam de doença para doença, mas de forma genérica envolvem a prevenção, evitando-se a entrada do patógeno na área; uso de cultivares resistentes ou com maior tolerância; práticas culturais como a rotação de culturas, a semeadura em época que proporcione o escape da cultura em relação ao período mais favorável à infecção e progresso da doença, e a adoção de estratégias de adubação, correção e de manejo do solo que resultem na formação de um ambiente (químico, físico e biológico) supressor ao patógeno e favorável ao crescimento das plantas; e o controle biológico ou químico, em geral aplicado via sementes (Almeida; Seixas, 2010; Seixas et al., 2020). Independentemente da doença, a melhor opção técnica e econômica constitui-se na utilização conjunta de diversas medidas de controle, por meio de manejo integrado de doenças (MID).

No contexto anteriormente exposto, a diversificação de espécies vegetais no sistema de produção é estratégia essencial para redução dos danos oca-

sionados pelas doenças radiculares no SPD, resultado de efeitos diretos e indiretos dessa tecnologia sobre os patógenos (Figura 22) (Debiasi et al., 2017). Os efeitos indiretos da diversificação de culturas no controle de doenças envolvem a produção de cobertura, a melhoria da estrutura física e o aumento da diversidade e atividade da microbiota do solo, o que resulta na formação de um ambiente supressor aos patógenos e que confere maior tolerância aos danos pela cultura. Por outro lado, os efeitos diretos estão relacionados à reação de uma dada espécie vegetal ao patógeno ou parasita (susceptibilidade, tolerância ou resistência), indicando se a planta é ou não um hospedeiro favorável ao agente causal. Adicionalmente, determinadas espécies de plantas, além de serem más hospedeiras do patógeno, podem atuar como planta armadilha ou produzir substâncias tóxicas, exercendo efeito antagonístico (“plantas antagonistas”). Um exemplo clássico de antagonismo é representado pelos efeitos da *Crotalaria spectabilis* sobre diversas espécies de nematoides. Além de se constituir em uma espécie vegetal resistente aos nematoides (Dias et al., 2010), *C. spectabilis* age como planta armadilha (o nematoide parasita a planta, mas não se reproduz) (Silva et al., 1989) e, ao mesmo tempo, apresenta em sua composição substâncias com efeito nematocida ou nematostático, como as monocrotalinas (Wang et al., 2002; Almeida et al., 2008).

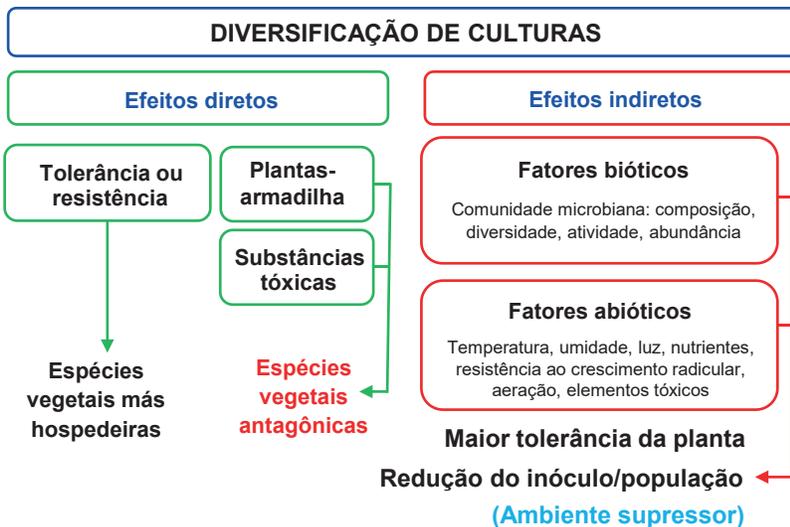


Figura 22. Efeitos da diversificação de culturas na redução dos danos ocasionados por doenças em plantas.

Fonte: Debiasi et al. (2017).

Assim, no planejamento e condução de modelos de produção diversificados, deve-se priorizar a inclusão de espécies vegetais que sejam tolerantes, resistentes ou antagonistas aos patógenos de solo com histórico de ocorrência na área, em sucessão ou, preferencialmente, em rotação com culturas suscetíveis (Debiasi et al., 2020). Salienta-se, entretanto, que a magnitude dos efeitos diretos da rotação ou sucessão com culturas não hospedeiras na redução dos danos ocasionados por doenças radiculares é dependente das características do patógeno. Em geral, essa estratégia é menos eficiente no controle de fitopatógenos polífagos (que apresentam um grande número de hospedeiros), como *M. phaseolina* (Almeida et al., 2014), ou capazes de sobreviver no solo por longos períodos, por meio de estruturas de sobrevivência (esclerócios, clamidósporos e oósporos), como *Fusarium* spp. e *P. sojae* (Santos; Reis, 2001).

O crescimento das raízes e sua capacidade de absorver água e nutrientes também podem ser prejudicados em função do ataque de determinadas espécies de insetos-praga. Como exemplos, pode-se citar o percevejo-castanho-da-raiz (*Scaptocoris* spp.), que suga as raízes de culturas como a soja, o milho, o algodão e pastagens; e as larvas de alguns coleópteros, comumente conhecidas como “corós” (*Phyllophaga* spp., *Diloboderus abderus* e *Liogenys fuscus*), que se alimentam de raízes de soja, milho, cereais de inverno e pastagens, entre outras culturas. O controle dessas pragas exige a integração de várias estratégias (Roggia et al., 2020), tais como: semeadura da cultura em época que não coincida com maior densidade populacional no solo ou com a fase de maior consumo dos insetos; adoção de práticas de manejo que melhorem a fertilidade química, física e biológica do solo, como a correção e adubação em consonância com indicações técnicas (Oliveira Junior et al., 2020) e a diversificação de culturas no sistema de produção (Debiasi et al., 2020), de forma a aumentar a tolerância das plantas aos danos; e o controle químico, que tem se mostrado efetivo até o presente momento apenas para os corós, por meio do tratamento de sementes ou da aplicação localizada (reboleiras) para controlar os adultos.

Fatores biológicos encontram-se também associados de forma direta ao aumento do crescimento das raízes e de sua habilidade em absorver água e nutrientes. Nesse sentido, o crescimento radicular da soja é favorecido por bactérias fixadoras de N, fungos micorrízicos e microrganismos promotores

de crescimento, nativos do solo ou aplicados na semente ou sulco de semeadura. A adoção plena do SPD, com base em todos os fundamentos técnicos já amplamente discutidos nos itens anteriores, aliada às boas práticas de correção e adubação das culturas, proporciona um ambiente de solo favorável para o estabelecimento de uma comunidade de microrganismos junto à rizosfera capaz de estimular o crescimento das raízes e aumentar a sua eficiência na absorção de água e nutrientes.

Na soja, tecnologias como a inoculação com *Bradyrhizobium* spp e inoculação conjunta com *Azospirillum brasilense* são de grande importância para aumentar o crescimento das raízes e a eficiência destas na absorção de água e nutrientes, aumentando assim a tolerância da cultura ao déficit hídrico. Em experimento em casa-de-vegetação, Rondina et al. (2020) encontraram que a inoculação das sementes de soja com *Bradyrhizobium* spp, estirpes SEMIA 5079 e 5080, praticamente dobrou o comprimento radicular e quadruplicou o número de ramificações nas raízes em relação ao controle não inoculado. No tratamento inoculado, a inoculação conjunta com *Azospirillum brasilense* proporcionou um incremento de 35% no comprimento radicular e 25% nas ramificações nas raízes. Enquanto a contribuição positiva da inoculação com *Bradyrhizobium* ao crescimento radicular está associada principalmente ao aporte de N à planta, os autores atribuem os benefícios da coinoculação sobretudo à produção e liberação de auxinas na rizosfera por *A. brasilense*, o que estimula a atividade dos meristemas das raízes, o alongamento e diferenciação das células radiculares e o desenvolvimento de raízes laterais a partir do periciclo. Neste mesmo trabalho, ensaios de campo comprovaram que a coinoculação com *A. brasilense* aumentou a tolerância da soja a episódios de estresse hídrico moderado, permitindo assim o alcance de maiores produtividades. Além da fixação de N e promoção do crescimento de raízes, bactérias do gênero *Azospirillum* têm sido relacionadas à indução de tolerância sistêmica à seca e ao controle biológico de fitopatógenos pela produção de sideróforos, pela limitação da disponibilidade de ferro, ou pela indução de resistência sistêmica a doenças (Fukami et al., 2018).

Infiltração de água no solo

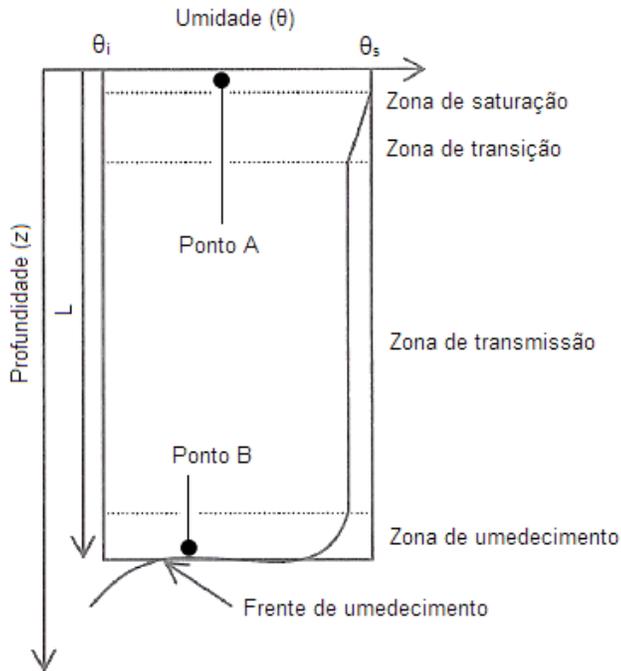
Conceitos e caracterização do processo físico

A descrição física completa do processo de infiltração pode ser encontrada em Hillel (1982), Reichardt e Timm (2004) e Brandão et al. (2006). De maneira resumida, à medida que a água infiltra no solo, as camadas superiores do perfil vão umedecendo de cima para baixo, gerando um perfil de distribuição de água que tende à saturação (θ_s) em toda profundidade enquanto há aplicação de água. A infiltração de água no solo é, normalmente, expressa em lâmina de água que atravessa a superfície do solo por unidade de tempo (mm/h), o que caracteriza o termo “taxa de infiltração de água no solo”.

Nesse sentido, a Figura 23 ilustra esquematicamente a distribuição de água em um perfil uniforme do solo com umidade inicial θ_i e submetido a uma pequena carga hidráulica na superfície (empoçamento), durante a infiltração. Neste processo, há a formação de quatro zonas distintas: (1ª) Zona de saturação: corresponde, naturalmente, a camada mais superficial do perfil, com espessura de apenas alguns centímetros, que atinge rapidamente a saturação (θ_s); (2ª) Zona de transição: camada caracterizada por um decréscimo acentuado na umidade, com espessura aproximada de 5 cm; (3ª) Zona de transmissão: é a camada através da qual a água é transmitida, apresentando umidade um pouco inferior à saturação, que não é atingida na prática em função do aprisionamento de ar. Enquanto as outras duas zonas apresentam espessura praticamente constante, a profundidade da zona de transmissão é aumentada continuamente com a aplicação de água; (4ª) Zona de umedecimento: é uma camada geralmente estreita, caracterizada por um decréscimo acentuado na umidade com a profundidade até a frente de umedecimento. Essa, por sua vez, constitui-se no limite visível do movimento descendente de água no solo, caracterizado por uma variação abrupta de umidade, tão mais acentuada quanto menor for θ_i .

O movimento de água no perfil do solo somente ocorre mediante gradiente de potencial hidráulico (Reichardt; Timm, 2004). A força que move a água da superfície para camadas inferiores depende da sucção exercida pelo solo, gravidade, existência ou não de lâmina de água livre sobre o solo, exercendo pressão, e distância (dimensão L, Figura 23) entre a superfície do solo (A) e a frente de umedecimento (B). A sucção decorrente da matriz do solo é

determinada pela umidade e pelo tamanho dos poros e partículas sólidas; assim, quanto mais seco, mais argiloso e mais compactado ou adensado for o solo, maior será a sucção e, conseqüentemente, a força motriz que governa a infiltração. As forças produzidas pela sucção e pela pressão diminuem com o aprofundamento da frente de umedecimento (dimensão L , Figura 23) ao longo do processo de infiltração, até atingir valores próximos a zero. Por sua vez, a força referente à gravidade é constante, não variando em função de atributos do solo.



θ_i = umidade inicial do solo; θ_s = umidade do solo correspondente à saturação

Figura 23. Perfil de umedecimento do solo durante a infiltração.

Fonte: adaptado de Brandão et al. (2006).

A taxa de infiltração depende também da condutividade hidráulica do solo (K). A taxa de infiltração e a K são variáveis relacionadas, porém com significados diferentes, de modo que não podem ser utilizadas como sinônimos. Enquanto a infiltração é um processo relacionado à entrada da água no solo através de sua superfície, K está relacionada à facilidade com que a água se movimenta no perfil do solo, após sua passagem pela superfície.

Fatores que influenciam a taxa de infiltração de água

A taxa de infiltração inicial é mais alta no solo inicialmente mais seco, o que pode ser atribuído ao maior gradiente de potencial matricial entre as zonas com maior e menor umidade, de forma similar a um efeito de sucção. O aumento da força de sucção exercida pelo solo resulta no incremento da taxa de infiltração. Em termos práticos, o escoamento superficial de água e, conseqüentemente, a erosão, são reduzidos quando a precipitação ocorre em solos inicialmente mais secos, o que é especialmente válido para chuvas de curta duração. Entretanto, independentemente da umidade inicial, a taxa de infiltração diminuiu com o tempo atingindo um valor constante final (TIE), em virtude do aprofundamento da frente de umedecimento, o que reduz a força de sucção de tal forma que a gravidade (que é constante ao longo do perfil) torna-se a principal força motriz do fluxo. Portanto, a TIE não depende da umidade inicial do solo. É importante ressaltar que o tempo necessário para se atingir a TIE é, naturalmente, maior no solo com menor umidade inicial (Reichardt; Timm, 2004).

A condutividade hidráulica saturada $K_{(s)}$ representa a facilidade com que a água é transmitida no perfil, em condições de solo saturado; assim, quanto maior a $K_{(s)}$, maior será a TIE. Por sua vez, a $K_{(s)}$ é determinada pelo volume, tamanho, tortuosidade, forma, continuidade, interconectividade e estabilidade do sistema poroso do solo. De modo geral, camadas de solo porosas, com predomínio de macroporos e que apresentam poros contínuos e interconectados, pouco tortuosos, estáveis e com forma a mais próxima possível da cilíndrica, são aquelas com maiores valores de $K_{(s)}$, e assim, de TIE. A presença de fissuras, assim como de canais produzidos por raízes e pela macrofauna do solo, também aumenta a $K_{(s)}$ e a TIE.

O volume, o arranjo, a geometria e a estabilidade dos poros são determinados principalmente pela textura, pela composição mineralógica e pela estrutura do solo. Em geral, solos de textura arenosa apresentam maior $K_{(s)}$ em relação aos argilosos, sobretudo em razão do maior volume de macroporos (Hillel, 1982). Entretanto, solos argilosos com teores consideráveis de óxidos de ferro e alumínio, como os Latossolos das regiões tropicais e subtropicais, apresentam uma estrutura de microagregados estável, de forma que podem apresentar $K_{(s)}$ similares ou até superiores a solos arenosos, dependendo do

manejo adotado (Brandão et al., 2006). Adicionalmente, solos argilosos favorecem o acúmulo de MOS (Sá et al., 2010) e, conseqüentemente, a formação de agregados porosos e estáveis (Dexter, 1988). Por sua vez, elevados teores de silte tendem a diminuir a $K_{(s)}$, pois o tamanho desta partícula é pequeno para gerar macroporos, além de ser eletricamente inerte, dificultando seu arranjo em agregados estáveis (Hillel, 1982). Dessa forma, a estrutura é fundamental na determinação da porosidade do solo e, conseqüentemente, da $K_{(s)}$ e da TIE, sendo diretamente influenciada pelas práticas de manejo do solo (Salton et al., 2008; Moraes et al., 2016).

Outra característica que determina a $K_{(s)}$ é a estabilidade da estrutura em resposta ao impacto da gota da chuva e ao próprio fluxo da água ao longo do processo de infiltração (Hillel, 1982; Brandão et al., 2006). Agregados pouco estáveis favorecem a formação de crostas superficiais e o entupimento de poros em camadas mais profundas, que limitam a $K_{(s)}$ e, conseqüentemente, a TIE.

A TIE também é influenciada pelo volume, a geometria e a estabilidade da porosidade na camada superficial (0-5 cm). A principal causa de redução da condutividade hidráulica na superfície do solo é o encrostamento superficial, ocasionado pelo impacto direto da gota da chuva sobre o solo ou desagregação pelo umedecimento excessivamente rápido. A formação de crostas superficiais pode ser evitada pela cobertura permanente do solo, viva ou morta, bem como pelo aumento da estabilidade dos agregados em água. Nesse sentido, Derpsch et al. (1986) encontraram que a TIE aumentou de 26 mm/h sob preparo convencional de solo para 45 mm/h em SPD, o que foi atribuído à cobertura do solo e à maior estabilidade dos agregados nesse último, evitando assim formação de crostas superficiais. Outro fator comumente associado à formação de camadas superficiais compactadas, resultando na redução da TIE, é o pastejo excessivo, envolvendo lotação animal acima da suportada pela pastagem (Bonetti et al., 2019).

A taxa de infiltração de água é influenciada pela descontinuidade em termos de volume e geometria do espaço poroso ao longo do perfil, oriunda de variações na textura e na estrutura no solo. De acordo com Hillel (1982), a presença de uma camada mais compactada, adensada ou argilosa comparativamente ao solo que a sobrepõe no perfil, proporciona redução na taxa de infiltração pela baixa $K_{(s)}$, em virtude da menor porosidade total e do predomí-

nio de poros de menor tamanho. Da mesma forma, uma camada de solo com maior porosidade ou poros maiores em relação à camada que a sobrepõe no perfil, em decorrência do maior teor de areia ou diferenças na estrutura, também limita a taxa de infiltração por causa da sua menor condutividade hidráulica não saturada ($K_{(\theta)}$) (Reichardt; Timm, 2004). Portanto, a taxa de infiltração é tão maior quanto mais contínuo e uniforme for o arranjo poroso ao longo do perfil, sendo os valores limitados pela camada de menor K.

Relação entre manejo do solo e infiltração

O manejo do solo no sistema de produção, ditado pelas opções de espécies vegetais, pelo manejo dos resíduos dessas espécies e pelas operações mecânicas de preparo de solo, geram situações distintas e que afetam a infiltração de água no solo. A ocupação constante do solo com plantas e seus resíduos determina uma condição favorável à estruturação e consequentemente mantém valores de TIE mais elevados. Práticas como consórcio de culturas, que amplia a presença de plantas vivas ou incrementa a adição de fitomassa aérea e raízes, também atua no sentido de melhorar a TIE. Isto fica evidenciado na Figura 24, onde se pode constatar que o manejo diferenciado por meio do consórcio milho e braquiária promoveu efeito incremental na TIE com o número de safras de adoção desta prática. As áreas avaliadas, que são cultivadas na sucessão soja/milho 2ª safra, apresentam em média 1/5 da infiltração medida em áreas de longo tempo de adoção do consórcio (maior que três anos).

Durante as safras de 2018/2019 e 2019/2020, a Embrapa Soja e a Cocamar Cooperativa Agroindustrial determinaram diversos indicadores de fertilidade do solo em 43 áreas comerciais localizadas em 19 municípios das regiões Norte e Noroeste do Paraná, incluindo a TIE. As áreas foram escolhidas de forma a representar a variabilidade de solo e clima da região e abranger manejos contrastantes em termos de preparo do solo e diversificação dos modelos de produção. Para facilitar a análise de TIE, os modelos de produção foram agrupados em padrão (cultivo repetido de milho 2ª safra ou trigo no outono-inverno e soja no verão) e aprimorados (utilização de plantas de cobertura do solo no outono-inverno, em cultivo solteiro ou consorciado com culturas para produção de grãos). Os resultados mostraram que, na ausência de preparo do solo, a utilização de modelos aprimorados proporcionou um

aumento médio da TIE de 2,3 vezes em relação ao modelo padrão (Figura 25A). Da mesma forma, os valores de TIE foram classificados como bons em 62% dos pontos amostrados nas áreas que adotam os modelos aprimorados, contra apenas 10% no modelo padrão. Não foi possível separar as áreas submetidas a preparo do solo de acordo com o modelo de produção e o implemento utilizado, em virtude do número insuficiente de casos avaliados. Mesmo assim, é possível verificar que a TIE nas áreas submetidas a escarificação ou gradagem não diferiu significativamente das que foram manejadas sob modelo padrão sem preparo do solo nos últimos três anos, com apenas 35% dos pontos avaliados atingindo valores considerados bons (Figura 25B). Portanto, esses resultados reforçam que a utilização de modelos de produção com maior diversidade de plantas e aporte de palha e raízes, em conjunto com o mínimo revolvimento do solo, aumentam a TIE e, em consequência, a disponibilidade de água para a soja.

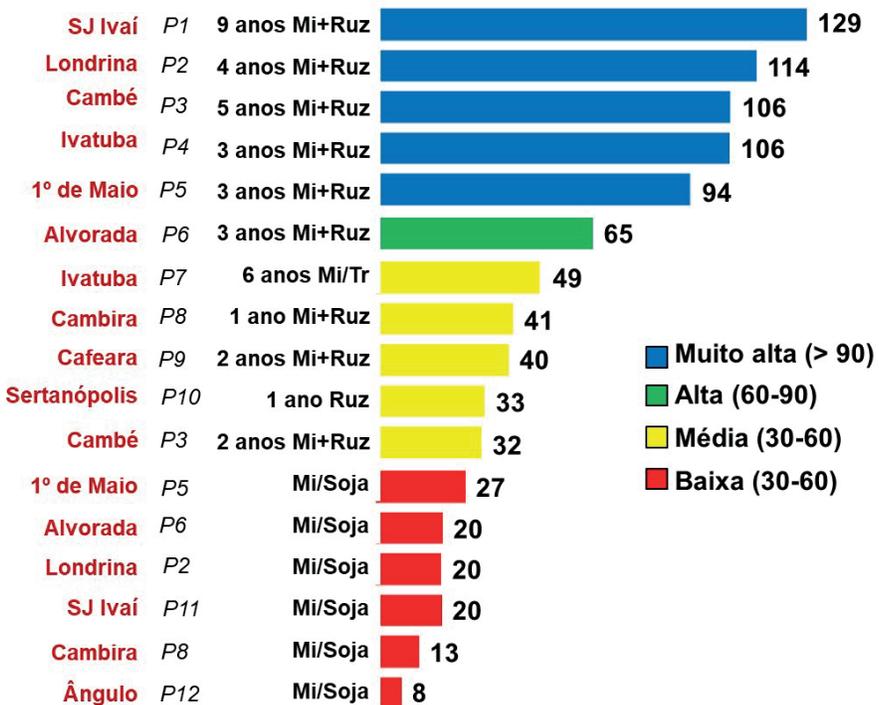
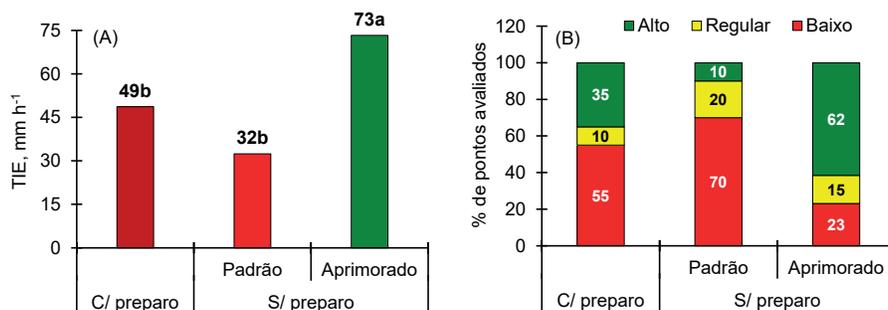


Figura 24. Taxa de infiltração estável de água do solo (mm h⁻¹) em 17 áreas comerciais manejadas sob diferentes modelos de produção no Norte do Paraná.



Com preparo = áreas submetidas a revolvimento(s) do solo com grades e/ou escarificadores/subsoladores, em pelo menos uma das últimas três safras antecedendo a avaliação; Modelos de produção padrão: cultivo repetido de milho 2ª safra ou trigo no outono-inverno e soja no verão; Modelos de produção aprimorados: modelos envolvendo a utilização de plantas de cobertura do solo no outono-inverno, em cultivo solteiro ou consorciado com culturas para produção de grãos; Baixo: < 40 mm h⁻¹; Regular: 40 a 60 mm h⁻¹; Alto > 60 mm h⁻¹; Médias seguidas pela mesma letra não diferem significativamente pelo teste não paramétrico de Kruskal-Wallis ($p < 0,05$).

Figura 25. Médias (A) e frequência relativa dos pontos avaliados por classe de valores (B) nos modelos de produção padrão e aprimorados, para a taxa de infiltração estável de água (TIE).

Além disso, práticas conservacionistas, como o cultivo em nível e o terraceamento, são complementares e essenciais para controlar as perdas de água por escoamento superficial e, assim, diminuir a erosão e incrementar o armazenamento de água no solo. O efeito do cultivo em nível na redução das perdas de água por escoamento foi demonstrado na Tabela 3. O impacto positivo do terraceamento na disponibilidade de água para as plantas foi comprovado por Freitas et al. (2021), em trabalho comparando áreas com e sem terraços de base larga em Júlio de Castilhos, RS, sobre um Nitossolo Vermelho. Os resultados mostraram que, ao longo de um período de 16 meses, a frequência de valores de fração de água disponível (FAD) maiores que 0,75 (o que caracteriza adequada disponibilidade hídrica) variou entre 67 e 75% na área terraceada, e entre 46 a 50% na área não terraceada. Da mesma forma, as diferenças positivas de FAD entre as áreas terraceadas e não terraceadas foram observadas em períodos de escassez de chuvas, reforçando a importância da adoção do terraceamento para mitigar as perdas de produtividade por deficiência hídrica. Nesse mesmo experimento, Hörbe et al. (2021) concluíram que a produtividade da soja (safra 2016/17) e do milho (safra 2017/2018) foram, respectivamente, 12% e 10% superiores na área terraceada comparativamente à área não terraceada, o que foi atribuído pelos autores à maior disponibilidade de água na presença de terraços.

Evapotranspiração e coeficiente de cultura (Kc)

De acordo com Allen et al. (2006), os principais fatores que determinam o coeficiente de cultura (Kc) são:

a) Tipo de cultivo: espécies vegetais com estômatos somente na parte inferior da folha ou com grande resistência nas folhas, apresentam valores relativamente menores de Kc. A maior altura e a rugosidade da superfície de uma cultura implicam em valores de Kc de 5% a 10% maiores do que os valores da grama de referência.

b) Clima: o Kc aumenta na maioria dos cultivos com o aumento da velocidade do vento e a diminuição da umidade relativa do ar.

c) Evaporação do solo: quando o solo se encontra úmido e sem cobertura, por longo tempo devido à irrigação ou chuva, a evaporação da água do solo será significativa e o valor de Kc poderá exceder a 1,0. Caso contrário, se a superfície do solo estiver seca o valor de Kc poderá atingir valores tão baixos quanto 0,1. A cobertura do solo com restos culturais reduz as perdas de água por evaporação (Bragagnolo; Mielniczuk, 1990; Andrade, 2008; Mariano et al., 2016) e, assim, o Kc inicial (Andrea et al., 2019; Barbieri et al., 2020).

d) Estádios do crescimento da cultura:

- Inicial: o valor de Kc é alto quando a superfície do solo se encontra úmida e baixo quando se encontra seca. Para condições de umedecimento frequente, tal como nos casos de irrigação por aspersão (pivô central), os valores de Kc inicial podem ser incrementados substancialmente podendo aproximar-se de 1,0 e 1,20. Dependendo da magnitude e do intervalo de tempo entre os eventos de umedecimento, e do poder evaporante da atmosfera, representado por E_{To} , o valor de Kc inicial pode variar entre 0,1 e 1,15.
- Desenvolvimento: nesta etapa, o valor de Kc está relacionado com a percentagem de cobertura do solo, bem como com a arquitetura da vegetação e a altura do cultivo em relação a grama de referência.
- Intermediária: é nessa fase que o Kc atinge seu valor máximo e relativamente constante. Climas de maior aridez e maior velocidade do vento apresentam valores mais altos de Kc.
- Final: nessa fase, com a senescência da planta, o valor de Kc final será baixo.

Allen et al. (2006) explicam que as diferenças na evaporação e transpiração, entre os cultivos e a grama de referência, podem ser integradas em um coeficiente simples de cultura (K_c) ou em um composto por dois coeficientes (K_c dual): um coeficiente basal de cultura (K_{cb}) e um coeficiente de evaporação da água no solo (K_e), sendo $K_{cb} = K_c + K_e$. No K_c simples, os efeitos da transpiração da planta e da evaporação da água do solo são integrados em um K_c único. Pelo fato de o K_c simples representar um valor médio da evaporação e transpiração, o mesmo é utilizado para estimar a evapotranspiração da cultura (E_{Tc}) em períodos de tempo semanais ou maiores, porém, os cálculos podem ser realizados na escala diária. Para o cálculo do K_c dual ($K_{cb} + K_e$) determinam-se, separadamente, os efeitos da transpiração da planta (K_{cb}) e da evaporação da água no solo (K_e) por meio de um balanço hídrico do solo. O K_{cb} é definido como o quociente entre E_{Tc} e E_{To} (evapotranspiração de referência) quando a superfície do solo se encontra seca, mas o conteúdo de água na zona radicular é suficiente para que a transpiração da planta seja mantida na sua taxa potencial, ou seja, a transpiração não está limitada pelo conteúdo de água na zona radicular.

Visando a redução do risco climático associado à ocorrência de secas, o principal fator associado ao K_c , passível de interferência antrópica por meio de práticas de manejo, é a evaporação de água do solo. A evaporação da água de uma superfície é um processo físico de passagem da água do estado líquido para o gasoso, em temperaturas abaixo do ponto de ebulição da água (Libardi, 1995; Reichardt; Timm, 2004).

De acordo com Hillel (1998), para que o processo de evaporação de água do solo ocorra e se mantenha, três condições são necessárias: 1) suprimento contínuo de energia para mudança de estado físico da água; 2) gradiente de pressão de vapor entre a superfície e a atmosfera, sendo que o vapor resultante deve ser removido da superfície por difusão e/ou convecção; e 3) suprimento hídrico contínuo de camadas mais profundas para a superfície do solo. A energia necessária para a evaporação vem da radiação solar ou de processos advectivos, enquanto que o gradiente de pressão de vapor é determinado pela umidade da superfície do solo e pela demanda evaporativa da atmosfera que, por sua vez, é função da temperatura, do déficit de saturação do ar e da velocidade do vento. A 3ª condição depende do potencial matricial no interior do solo e das propriedades de condução de água do meio, como

a condutividade hidráulica que, em conjunto, determinam a taxa máxima com que a água pode ser transmitida do interior para superfície do solo, onde a evaporação ocorre. Portanto, o suprimento de água para evaporação é dependente das propriedades físicas do solo (textura, estrutura, densidade e porosidade, por exemplo) e sua variabilidade ao longo do perfil. Em resumo, a taxa de evaporação é determinada tanto pelas condições atmosféricas próximas à superfície quanto pela capacidade do solo em fornecer água para o processo.

Considerando solos profundos e sem cobertura, o processo de evaporação envolve três estágios distintos, conforme ilustrado na Figura 26 (Hillel, 1998; Reichardt; Timm, 2004). O 1º estágio ocorre enquanto a umidade na superfície do solo for elevada e o fluxo ascendente de água das camadas inferiores for suficiente para manter a camada superficial úmida. Nesse estágio, a redução da condutividade hidráulica pelo secamento do solo é compensada pelo aumento no gradiente de potencial das camadas inferiores do perfil em relação à superfície, de forma que a magnitude dos fluxos ascendentes é suficiente para manter a umidade na camada superficial elevada e, assim, a taxa de evaporação é constante e alta. O processo de evaporação é controlado por condições meteorológicas externas (radiação solar, vento, temperatura e umidade do ar), sendo a influência das propriedades do perfil do solo muito pequena. Diante disso, a taxa de evaporação no 1º estágio é influenciada pelas condições da camada superficial, incluindo a refletividade da superfície e a presença de cobertura morta.

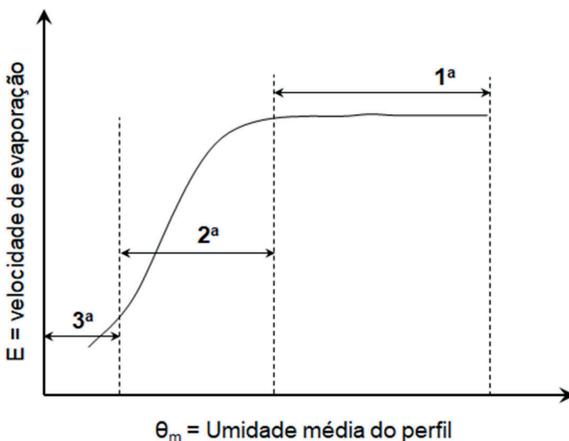


Figura 26. Estágios do processo de evaporação de um solo nu.

Fonte: Reichardt e Timm (2004).

O 2º estágio é caracterizado por uma queda linear na taxa de evaporação em função da redução da umidade da superfície do solo ao longo do tempo após uma chuva ou irrigação. Nessa fase, a evaporação é limitada pela taxa do fluxo de água de camadas inferiores do perfil em direção à superfície do solo, onde o processo ocorre. Diferentemente do 1º estágio, a magnitude dos fluxos ascendentes de água diminui com o secamento do solo devido à redução progressiva da condutividade hidráulica e, também, do gradiente de potencial entre as camadas mais profundas do perfil e a superfície. Em termos práticos, no 2º estágio, o processo de evaporação passa a ser governado pelas características e propriedades físicas do perfil do solo que determinam a ascensão capilar de água até a superfície do solo.

Quando a função que relaciona a taxa de evaporação com a umidade perde a linearidade, e a camada superficial encontra-se bem seca, inicia-se o 3º estágio. Nesse estágio, a evaporação ocorre no interior do solo, sendo o processo determinado pelas forças de adsorção das moléculas de água às partículas. Adicionalmente, o transporte da umidade para a atmosfera é feito por difusão de vapor, o que reduz substancialmente a taxa de evaporação.

A evaporação é indiretamente influenciada por diversos fatores que alteram a demanda evaporativa próximo à superfície do solo e as propriedades físicas do solo (Hillel, 1998; Dalmago, 2004). Entre eles, merecem destaque o método de preparo do solo adotado, a presença de plantas vivas na área e a cobertura morta. O revolvimento desestrutura a camada mobilizada, expondo maior superfície do solo para a atmosfera e, em consequência, acelera a evaporação de água nessa camada logo após a ocorrência de chuva ou irrigação com a consequente redução da duração do 1º estágio de evaporação. Paradoxalmente, o revolvimento interrompe a continuidade capilar responsável por conduzir a água do interior do perfil para a superfície do solo. Assim, a partir do 2º estágio da evaporação, com a secagem da camada superficial, as perdas de água podem ser substancialmente menores em comparação a solos com a superfície consolidada, em função da limitação no suprimento de água de camadas inferiores para a superfície, onde o processo ocorre. A camada revolvida, com baixas umidade e condutividade hidráulica, funciona como um isolante, reduzindo as perdas por evaporação da água armazenada em maiores profundidades no perfil de solo. Salienta-se que, em SPD bem manejado, o aumento dos teores de MOS na superfície, em conjunto com

os ciclos de secagem e umedecimento e ação dos mecanismos sulcadores das semeadoras-adubadoras, resulta em uma camada superficial (5-10 cm) mais solta, com maior macroporosidade e menor condutividade hidráulica não saturada, que também podem atuar reduzindo as perdas por evaporação no 2º estágio.

A presença de plantas vivas na área resulta no sombreamento da superfície do solo o que diminui a quantidade de energia disponível e, assim, reduz as perdas de água por evaporação (Bergamaschi et al., 2004). No início do desenvolvimento da cultura, esse efeito é pequeno, mas aumenta em importância com o incremento da área foliar ao longo do ciclo. Além disso, o sombreamento diminui a temperatura e o dossel protege a superfície do vento, que, por sua vez, reduz a diferença de pressão de vapor entre a camada superficial do solo e a atmosfera e dificulta a remoção do vapor de água. Em virtude desses fatores, a evaporação é o principal processo associado à perda de água no início do ciclo; porém, com o desenvolvimento da cultura, a transpiração passa a responder pela maior parte do consumo de água do solo (Hillel, 1998; Dalmago, 2004; Andrade, 2008; Barbieri et al., 2020).

A principal estratégia para diminuir as perdas de água por evaporação e, assim, o K_c , aplicável em larga escala para culturas de grãos, é a cobertura do solo com palha por meio da adoção do SPD (Dalmago, 2004). A palha reduz a evaporação por se constituir em uma barreira física (camada de ar entre o solo e atmosfera) que dificulta o processo de condução e difusão do vapor na superfície, além de reduzir a energia disponível por refletir parte da radiação solar em função de sua coloração mais clara. Adicionalmente, a menor disponibilidade de radiação solar e a maior umidade diminuem a temperatura da superfície do solo o que, em conjunto com a menor velocidade do vento e a maior resistência à saída do vapor de água da camada limite próxima ao solo, reduz o gradiente de pressão de vapor e, assim, a taxa de evaporação.

A eficiência da cobertura na redução da evaporação é tanto maior quanto mais elevados forem os valores de porcentagem da superfície do solo efetivamente coberta e da espessura da camada de restos culturais (Bond; Willis, 1969; Bragagnolo; Mielniczuk, 1990; Salton, 1991; Hillel, 1998; Andrade, 2008; Vieira, 2017). Da mesma forma, a capacidade de redução da evaporação pela cobertura morta diminui com o transcorrer do tempo após a deposição dos restos culturais na superfície do solo (Wagner-Riddle et al., 1996;

Andrade, 2008; Dalmago et al., 2004), pois, além da redução da espessura da camada e, eventualmente, da porcentagem de cobertura, há um escurecimento da palha o que reduz a sua refletividade (Salton, 1991). A maior parte da redução da lâmina de água evaporada pela cobertura durante um ciclo de secamento do solo ocorre nos primeiros dias após a chuva ou irrigação, com o conseqüente prolongamento do estágio 1 do processo de evaporação (Bond; Willis, 1969; Andrade, 2008; Saldanha, 2009). Assim, quanto mais longo for o período seco, menor é o efeito médio de redução da lâmina evaporada pela cobertura, pois a manutenção da camada superficial mais úmida por mais tempo favorece o fluxo ascendente de água em direção à superfície, diluindo assim a menor taxa de evaporação inicial (Bond; Willis, 1969; Hillel, 1998; Andrade, 2008). Por outro lado, o aumento da duração do estágio 1 proporciona mais tempo para que maior quantidade de água do solo se redistribua da superfície para camadas mais profundas, aumentando assim a água armazenada no perfil (Ji; Unger, 2001).

Segundo Allen et al. (2006), o uso de cobertura morta na superfície do solo, principalmente no início do ciclo das culturas, constitui-se em eficiente estratégia para redução da evaporação do solo. A palha em superfície promove uma barreira mecânica e térmica, promovendo melhor conservação da água e reduzindo as perdas por evapotranspiração (Gava et al., 2013). Ainda conforme Allen et al. (2006), em solo com 50% da superfície coberta com palha, a evapotranspiração da cultura pode ser reduzida em 25% nos estádios iniciais e entre 5 a 10% no máximo crescimento vegetativo do dossel. Da mesma forma, Stone et al. (2006) relatam que um solo com a superfície coberta com palha apresenta menor evaporação (e evapotranspiração), se comparado com um solo com a superfície descoberta, no início do ciclo das culturas, quando o dossel de plantas não cobre o solo. O fechamento das entrelinhas de cultivo pelas folhas das plantas aumenta a interceptação da radiação solar (Bergamaschi et al., 2004), desfavorecendo o processo de evaporação da água do solo. A partir deste estágio de desenvolvimento da cultura, a fração da transpiração das plantas assume maior importância no consumo de água do cultivo. Desta forma, o processo de evaporação da água do solo é reduzido, diminuindo a influência da quantidade de palha nas perdas de água (Andrade, 2008).

Conforme Stone et al. (2008), a palha em superfície reduz os processos de evaporação, principalmente quando o dossel das plantas não cobre totalmente o solo, como por exemplo no início do ciclo das culturas. A presença de palha na superfície do solo provoca redução do coeficiente K_e (Andrea et al., 2019), uma vez que a palha atua como uma barreira física que reduz a incidência direta de radiação solar e de energia disponível para os processos biofísicos (Gasparim et al., 2005). Na cultura do milho, a palha na superfície do solo em SPD reduziu a incidência de radiação na superfície do solo e provocou redução de 22% na evaporação do solo, se comparado ao PC, que apresentou evaporação total do solo de 235 mm durante o ciclo da cultura (Scopel et al., 2004). Freitas et al. (2014) avaliaram o efeito de 25, 50, 75 e 100% de cobertura morta na superfície do solo, comparando com solo sem palha na superfície, e verificaram que no primeiro ciclo de avaliações, a redução da evaporação foi de 15, 17, 20 e 30%, respectivamente. No segundo ciclo de avaliações, a redução evaporação foi de 15, 30, 45 e 60%, respectivamente.

Segundo Silva et al. (2006), apenas 35% da superfície do solo fica desprotegida com a presença de 3,5 t ha⁻¹ de resíduo de soja, enquanto as mesmas quantidades de palha de milho e de milho oferecem proteção mais eficiente, pois, respectivamente, 25% e 20% do solo ficam descobertos. Os mesmos autores afirmaram que a presença de 4 t ha⁻¹ de palhada de milho na superfície do solo diminui em até 65% a radiação que chega ao solo, ao passo que com essa mesma quantidade de resíduos de milho ou de soja, a redução é de 45% e 42%, respectivamente.

Murga-Orrillo et al. (2016) avaliaram a evapotranspiração da cultura e o K_c do milho em solo com e sem cobertura no estado de Roraima. A palha na superfície do solo funcionou como uma barreira mecânica e térmica, que melhorou a conservação da água no solo e reduziu as perdas por evapotranspiração. A evapotranspiração acumulada do milho foi 421 e 351 mm em solo sem e com cobertura de palha na superfície, com valores médios de 4,1 e 3,4 mm dia⁻¹, respectivamente. Em solo sem palha na superfície, o K_c médio foi de 0,40; 0,84; 1,59; e 0,81 nas fases I, II, III e IV, respectivamente, enquanto em solo com cobertura de palha, os valores foram reduzidos para 0,28; 0,64; 1,49; e 0,48, respectivamente. A evapotranspiração da cultura do milho em solo sem cobertura nas fases I, II, III e IV foi 1,4; 3,8; 5,3; e 3,2 mm dia⁻¹, respectiva-

mente. Em solo com cobertura de palha, a evapotranspiração do milho foi 0,8; 2,9; 5,0; e 1,9 mm dia⁻¹ nas fases I, II, III e IV, respectivamente.

Silva et al. (2012) avaliaram o efeito da cobertura morta do solo e da irrigação em características agronômicas e no rendimento de grãos do milho. Segundo esses autores, o aumento da quantidade de água e da cobertura morta do solo provocou redução da altura de plantas e da altura da inserção da espiga. O diâmetro do colmo foi maior quando foram aplicadas quantidades intermediárias de água e palha na superfície do solo (74% da evapotranspiração e 75% da cobertura do solo). Para a variável massa de mil grãos, a melhor resposta foi encontrada com irrigação de 100% da evapotranspiração e com 7,7 Mg ha⁻¹ de palha na superfície do solo.

Stone e Moreira (2005) determinaram os coeficientes de cultura do arroz de terras altas, em SPD com 0, 50 e 100% da superfície do solo coberta com palha. Os menores valores de evapotranspiração da cultura foram encontrados em solo com 100% da superfície coberta com palha e os maiores valores em solo sem palha na superfície. Considerando o ciclo total da cultura, a evapotranspiração da cultura foi 18% menor em solo com a superfície 100% coberta com palha, sendo que em solo sem palha na superfície a evapotranspiração da cultura foi de 371 mm e em solo com 100% da superfície coberta a evapotranspiração da cultura foi 305 mm. No período da emergência até a floração, a evapotranspiração da cultura foi de 169 mm em solo com a superfície 100% coberta com palha, que representou um valor 25% menor do que o solo sem palha na superfície.

A presença de palha na superfície do solo altera a relação solo-água, uma vez que reduz a evaporação do solo e provoca alterações na evapotranspiração da cultura (Stone et al., 2008). Singh et al. (2011) também concluíram que a cobertura do solo com palha diminui a evaporação, entretanto, a evapotranspiração da cultura do trigo foi pouco alterada, uma vez que o consumo de água por transpiração das plantas aumentou. Por sua vez, o Kc da cultura do trigo foi menor nos tratamentos com cobertura do solo até o espigamento; nessa fase, o Kc passou a ser maior nas áreas com *mulching*. Após a maturação fisiológica, os valores de Kc foram semelhantes entre as duas condições. Segundo os autores, a água economizada nos estádios vegetativos foi utilizada na fase reprodutiva, resultando em maior acúmulo de biomassa e produtividade de grãos.

Barros e Hanks (1993) verificaram que o feijoeiro apresentou maior eficiência de uso da água quando cultivado na presença de cobertura do solo com palha, comparativamente ao solo descoberto. Apesar disso, foram encontradas pequenas diferenças de evapotranspiração entre os dois sistemas de manejo do solo. Em solo com cobertura morta na superfície, a evaporação foi 45 mm menor do que em solo desnudo, porém, a transpiração do feijoeiro aumentou os mesmos 45 mm. Stone e Moreira (2000) verificaram que plantas cultivadas no SPD apresentaram maior crescimento vegetativo do que no preparo convencional, o que provocou aumento da evapotranspiração e consequentemente do consumo de água. Por isso, o solo nestas condições apresentou menor conteúdo de água a partir do 45° dia após a semeadura até o fim do ciclo do feijoeiro. Apesar do maior consumo, o SPD resultou em maior eficiência de uso da água pelo feijoeiro.

Similarmente, Vieira (2017) encontrou redução da evaporação e aumento da transpiração da cultura do milho em função da cobertura do solo com palha, com efeito líquido pequeno desse fator sobre a evapotranspiração da cultura. Estudando o efeito de diferentes quantidades de cobertura do solo de braquiária (0, 4 e 8 t ha⁻¹) sobre a dinâmica de água durante o cultivo de milho 2ª safra em Tangará da Serra, MT, o autor encontrou que a evapotranspiração acumulada durante todo o ciclo da cultura foi de 340; 309; e 337 mm nos tratamentos sem cobertura do solo, 4 t ha⁻¹ e 8 t ha⁻¹ de palha de braquiária, respectivamente. O Kcb médio para as fases inicial, intermediária e final do desenvolvimento do milho foi de 0,54; 0,88; e 0,64 sem cobertura do solo; 0,72; 1,00 e 0,69 com 4 t ha⁻¹ de cobertura e 0,75; 1,03; e 0,74 com 8 t ha⁻¹ de cobertura, respectivamente. Por sua vez, os valores de Ke foram de 0,78; 0,37; e 0,51 sem cobertura, 0,30; 0,22; e 0,34 com 4 t ha⁻¹ de cobertura e 0,35; 0,11; e 0,23 com 8 t ha⁻¹ de cobertura, nas fases inicial, intermediária e final, respectivamente. Em termos absolutos, a evaporação do solo foi reduzida em 68,64 mm, quando utilizado cobertura de 4 t ha⁻¹, e em 74,74 mm quando utilizou 8 t ha⁻¹ de cobertura. A cobertura do solo impactou positivamente na produtividade de grãos, com valores de 8265; 9929; e 9940 kg ha⁻¹, para os tratamentos sem cobertura, 4 e 8 t ha⁻¹ de palha, respectivamente.

Marques (2017) determinou, por meio do sensoriamento remoto, a produção primária líquida e o uso da água em áreas cultivadas com soja (em preparo convencional e SPD) e milho em preparo convencional, entre outras culturas,

no Piauí. O autor verificou que a evapotranspiração das culturas foi maior quando as plantas apresentaram o máximo IAF. Com máximo IAF, a evapotranspiração do milho e da soja em preparo convencional e soja em SPD foi de 3,91; 3,87; e 4,18 mm dia⁻¹, respectivamente. Um mês após o máximo IAF nas culturas anuais, a evapotranspiração foi de 3,16; 1,72; e 2,85 mm dia⁻¹ para o milho, soja em preparo convencional e soja em SPD, respectivamente. Próximo à colheita das culturas anuais, a evapotranspiração foi de 1,61; 1,29; e 1,63 mm dia⁻¹ para o milho, soja em preparo convencional e soja em SPD, respectivamente. Os rendimentos de grão *médios* do milho, soja em preparo convencional e SPD foram 3133, 1303 e 1714 kg ha⁻¹, respectivamente. Estes valores são próximos ao rendimento de grãos encontrado nas lavouras da região.

Lyra et al. (2010), no estado de Alagoas, verificaram que a evapotranspiração do milho foi maior no preparo convencional do que no SPD em apenas 35% dos dias (77 dias) no ciclo da cultura. No entanto, em solo sem cobertura de palha, a evapotranspiração média do milho foi de 2,9 mm dia⁻¹ e em solo com cobertura de palha na superfície, a evapotranspiração média foi 1,9 mm dia⁻¹. No período de enchimento de grãos, na transição do período chuvoso para o seco, em 80% dos dias, o conteúdo de água no solo foi menor no SPD do que no convencional. Segundo os autores, embora a cobertura do solo aumente a infiltração de água em eventos de precipitação maior que 7 mm dia⁻¹, a palha na superfície absorve e armazena parte da água da chuva, sendo esta água posteriormente perdida diretamente para a atmosfera sem ser aproveitada pela planta. Silva et al. (2006) afirmaram que 4,5 t ha⁻¹ de resíduo de soja apresentaram capacidade para interceptar e armazenar 1,18 mm de água ou 11,8 m³ ha⁻¹. Da mesma forma, Gava et al. (2009) encontraram que a presença de 10 Mg ha⁻¹ de palha de trigo em superfície pode reter até 1,5 mm de água, que é transferida para a atmosfera na evaporação sem contribuir com o armazenamento no solo. Em resíduos da cultura de milho, Freitas et al. (2004) encontraram retenção de água de 1,2; 1,4 e 1,8 mm com 4,8; 6,3 e 10 t ha⁻¹ de palha em cobertura, respectivamente, após aplicação de lâmina de irrigação de 20 mm. Por isso, em SPD, uma parte da precipitação ou lâmina de irrigação será perdida por evaporação direta na palha.

Lopes (2006) avaliou a evapotranspiração em diferentes manejos do solo em dois anos de cultivo na cultura do feijoeiro. No primeiro ano, os maiores valo-

res de evapotranspiração ocorreram no período da floração e enchimento de grãos, sendo que no SPD, a variação foi de 5,1 a 5,4 mm dia⁻¹ e, no preparo convencional, foi de 4,9 a 6,1 mm dia⁻¹. No período de 33 até 92 dias após a emergência, o consumo de água variou de 4,4 a 4,7 mm dia⁻¹ no SPD e de 4,0 a 4,8 mm dia⁻¹ no preparo convencional. Com isso, o consumo total variou de 238 a 289 mm no preparo convencional e de 266 a 278 mm no SPD. No segundo ano, os maiores valores de evapotranspiração ocorreram no período da floração e enchimento de grãos, sendo que no SPD a variação foi de 5,9 a 6,3 mm dia⁻¹, enquanto que, no preparo convencional, a variação foi de 6,1 a 6,9 mm dia⁻¹. No período de 41 até 80 dias após a emergência o consumo de água variou de 4,4 a 4,7 mm dia⁻¹ no SPD e de 4,4 a 4,9 mm dia⁻¹ no preparo convencional. Com isso, o consumo total variou de 177 a 194 mm no preparo convencional e de 177 a 187 no SPD.

Utilizando microlisímetros em parcelas de campo, Dalmago (2004) concluiu que a lâmina de água evaporada durante ciclos de secamento, com duração entre 12 e 15 dias, foi maior no SPD (90% de cobertura proporcionada por 5 t/ha de palha de aveia preta + ervilhaca) do que no preparo convencional, atribuindo, principalmente, ao maior volume de água armazenado na superfície do solo no SPD. Normalizando os dados de evaporação em função da umidade inicial, de forma a eliminar, ao menos parcialmente, o efeito das diferenças no volume de água armazenado, o autor obteve menor lâmina evaporada no SPD, com diferenças próximas a 10% em relação ao preparo convencional. Esses resultados demonstram que, sob um mesmo sistema de manejo, a cobertura com palha reduz a evaporação em relação ao solo desnudo. Porém, a menor evaporação pode não se constituir em fator associado ao maior armazenamento de água no SPD em relação ao preparo convencional.

Para Silva et al (2011), o SPD disponibilizou maior quantidade de água no solo, com a redução do escoamento superficial e também com a redução da evaporação. Com isso, a cultura do milho no SPD apresentou transpiração 16% maior do que no preparo convencional, com valor total durante o ciclo de 327 mm. Além disso, o IAF foi 6% maior no SPD do que no preparo convencional. Em contrapartida, Petry et al. (2007) obtiveram maior consumo de água pelo milho no preparo convencional, se comparado com o SPD, uma vez que as plantas do preparo convencional apresentaram maior área foliar. A evapotranspiração média da cultura do milho foi de 4,1 mm dia⁻¹ em solo sem cobertura e de 3,4 mm dia⁻¹ em solo com cobertura.

Silva et al. (2020a) determinaram o K_c e compararam diferentes métodos de estimativa e determinação da evapotranspiração do trigo irrigado cultivado no SPD. O K_e representou a maior parte da evapotranspiração da cultura durante o início do desenvolvimento das plantas. Com o crescimento das plantas e aumento do IAF, e a consequente cobertura do solo pelo dossel, a dinâmica da evapotranspiração modificou-se e a transpiração da cultura assumiu maior importância na evapotranspiração a partir da floração. A evapotranspiração da cultura foi de 360 mm nos dois anos em que as avaliações foram realizadas, com valores médios de 3,87 e 4,10 mm dia⁻¹ para as cultivares BRS 254 e BRS 394, respectivamente. O K_{cb} na emergência, perfilhamento, floração, maturação e colheita foi de 0,42; 0,78; 0,94; 0,74; e 0,47 para a cultivar BRS 254, e de 0,28; 0,27; 0,65; 0,98; e 0,66 para a cultivar BRS 394, respectivamente. O K_e do solo foi de 0,72; 0,52; 0,39; 0,58; e 0,13 para a cultivar BRS 254, e de 1,04; 0,96; 0,65; 0,34; e 0,51 para a cultivar BRS 394 na emergência, perfilhamento, floração, maturação e colheita, respectivamente. Assim, a evaporação representou de 22 a 78% da evapotranspiração do cultivo de trigo, com valor médio de 47%, considerando todo o ciclo da cultura. Resultados similares foram obtidos por Zhang et al. (2013), em que a evaporação de água do solo correspondeu a, aproximadamente, 80% da evapotranspiração da cultura do trigo no início do ciclo das plantas, reduzindo para valores de até 5% nas fases seguintes e média de 28% para o ciclo total.

Andrade (2008) avaliou o efeito do SPD com 0, 3 e 6 Mg ha⁻¹ de palha de aveia preta na superfície do solo e do preparo convencional na evaporação na cultura do milho. Na camada de 0 a 10 cm de profundidade, a presença de 3 Mg ha⁻¹ de palha na superfície proporcionou redução de 25 e 20% na evaporação em relação ao preparo convencional e ao plantio direto em solo desnudo, respectivamente. Com 6 Mg ha⁻¹ de palha em superfície, a evaporação foi de 51 e 47% em relação ao preparo convencional e plantio direto em solo desnudo, respectivamente.

Material e Métodos

A elaboração desta proposta teve como base parâmetros e indicadores aplicáveis à cultura da soja no Brasil. A proposição de níveis de manejo para outras culturas vai depender da compatibilização de parâmetros e indicadores que estejam em conformidade com as características agronômicas de cada espécie.

Proposta de níveis de manejo

A proposta refere-se à criação de quatro níveis de manejo (NM) para o Zarc da soja, envolvendo a: 1) Proposição de indicadores e critérios aplicáveis a campo para enquadramento das lavouras em um dado NM; e 2) Parametrização das principais variáveis do balanço hídrico da cultura (BH) alteradas pelos NMs (Ze, infiltração de água e Kc), para geração do Zarc diferenciado em função da qualidade do manejo do solo e da água adotado pelos produtores. O NM2 é a referência, representando o Zarc gerado com os parâmetros e critérios atuais. Foram propostos mais três NMs, sendo um para representar áreas com qualidade de manejo do solo e da água inferior ao NM2, com parâmetros que aumentam o risco de perdas por estresse hídrico no Zarc (NM1), e dois aplicáveis a lavouras de soja que se caracterizam pelo uso de práticas que aumentam a disponibilidade hídrica e o crescimento das raízes em relação ao NM2, com menor risco de perdas de produtividade por seca (NMs 3 e 4).

A proposição dos critérios e indicadores para o enquadramento das lavouras nos NMs, assim como a parametrização diferenciada da Ze, infiltração de água e Kc, foi embasada em informações e dados obtidos em publicações técnicas e científicas, a partir de uma extensiva e detalhada revisão bibliográfica. Também foram utilizados dados organizados em bases internas da Embrapa, bem como foram realizadas diversas reuniões para discussão do tema com o grupo de pesquisadores que compõe a rede Zarc-Embrapa de pesquisa e desenvolvimento. Os parâmetros e critérios foram também submetidos à validação junto a representantes de diversos segmentos do setor produtivo, incluindo instituições de pesquisa, assistência técnica, cooperativas, bancos e seguradoras. Detalhes metodológicos a respeito da parame-

trização das principais variáveis do balanço hídrico alteradas pelos NMs (Ze, infiltração de água e Kc) são apresentados na sequência.

Profundidade efetiva do sistema radicular (Ze)

Para estimar a Ze nos diferentes NMs, o crescimento radicular da soja foi simulado por meio do modelo RootBox (Leitner et al., 2010) de arquitetura radicular em terceira dimensão (3D) descrito em linguagem MATLAB®, aplicado e validado para a cultura da soja em condições brasileiras (Moraes et al., 2018a, 2020). Os parâmetros de arquitetura radicular utilizados para simulação do crescimento do sistema radicular são detalhados para cada tipo de raiz, sendo as raízes principais, raízes laterais de primeira ordem, raízes laterais de segunda ordem e raízes basais (Tabela 4).

As simulações foram realizadas para valores crescentes do parâmetro de redução do estresse total ao alongamento radicular (RE) de cada tipo de raiz, que deriva da combinação dos estresses físicos (hídricos, de aeração, térmico e de impedimento mecânico), químicos (deficiências nutricionais) e biológicos (interações com parâmetros biológicos e microbiológicos no solo). Os valores de RE variaram de 100% (sem estresse, representando o potencial de alongamento radicular) até 5% (ou seja, 95% de redução do alongamento radicular em relação à condição sem estresse). O sistema radicular de referência para cada NM foi simulado a partir dos valores de RE para a cultura da soja obtidos por Moraes et al. (2018a) e Moraes et al. (2020): NM1: 5-10%; NM2 = 15-20%; NM3 = 30-40%; e NM4 = 45-60%.

Tabela 4. Parâmetros de arquitetura radicular de soja utilizados para modelagem do crescimento das raízes no modelo RootBox (Leitner et al., 2010).

Símbolo	Parâmetro	Unidade	Valores ¹ [média; desvio padrão]
Raiz principal			
Name	Tipo de raiz: Raiz principal	-	1
r_e	Taxa inicial de alongamento radicular	cm dia ⁻¹	[10*REstress; 0]
A	Raio radicular	cm	[0,2; 0]
Theta	Ângulo de inserção	rad	[0; 0]
l_b	Comprimento da zona basal	cm	[1,0; 0]
l_a	Comprimento da zona apical	cm	[2,0; 0]
l_n	Espaçamento entre ramificações	cm	[0,65; 0]
n_{ob}	Número máximo de ramificações	und	[600; 0]
Color	Cor da raiz	rgb	[0,5; 0; 0]
Type	Tipo de tropismo	-	1
N	Força do tropismo	-	1,5
Sigma	Alterações angulares do ápice radicular	rad/cm	0,2
Dx	Resolução espacial ao longo do eixo radicular	cm	0,25
Rlt	Tempo máximo de crescimento da raiz	dias	[60; 0]
Gf	Tipo da função de crescimento (1: exponencial negativa, 2: linear)	-	1
Sucessor	Raízes: tipo e probabilidade da raiz sucessora	-	[2; 1]
Laterais de primeira ordem			
Name	Tipo de raiz: Laterais de primeira ordem	-	2
r_e	Taxa inicial de alongamento radicular	cm dia ⁻¹	[2*REstress; 0]
A	Raio radicular	cm	[0,04; 0]
Theta	Ângulo de inserção	rad	[1,22173; 0]
l_b	Comprimento da zona basal	cm	[3; 0]
l_a	Comprimento da zona apical	cm	[20; 0]
l_n	Espaçamento entre ramificações	cm	[1,5; 0]

Tabela 4: Continuação.

Símbolo	Parâmetro	Unidade	Valores ¹ [média; desvio padrão]
Laterais de primeira ordem			
n_{ob}	Número máximo de ramificações	und	[20; 0]
Color	Cor da raiz	rgb	[0; 1; 0]
Type	Tipo de tropismo	-	1
N	Força do tropismo	-	0,8
Sigma	Alterações angulares do ápice radicular	rad cm ⁻¹	0,3
Dx	Resolução espacial ao longo do eixo radicular	cm	0,25
Rlt	Tempo máximo de crescimento da raiz	dia	[60; 0]
Gf	Tipo da função de crescimento (1: exponencial negativa, 2: linear)	-	1
Sucessor	Raízes: tipo e probabilidade da raiz sucessora	-	[3; 1]
Laterais de segunda ordem			
Name	Tipo de raiz: Laterais de segunda ordem	-	3
r_e	Taxa inicial de alongamento radicular	cm dia ⁻¹	[0,7*REstress; 0]
A	Raio radicular	cm	[0,02; 0]
Theta	Ângulo de inserção	rad	[1,22173; 0]
l_b	Comprimento da zona basal	cm	[0; 0]
l_a	Comprimento da zona apical	cm	[8,0; 0]
l_n	Espaçamento entre ramificações	cm	[0; 0]
n_{ob}	Número máximo de ramificações	und	[0; 0]
Color	Cor da raiz	rgb	[0,5; 0,5; 0]
Type	Tipo de tropismo	-	1
N	Força do tropismo	-	0
Sigma	Alterações angulares do ápice radicular	rad cm ⁻¹	0,4
Dx	Resolução espacial ao longo do eixo radicular	cm	0,25
Rlt	Tempo máximo de crescimento da raiz	dia	[30; 0]
Gf	Tipo da função de crescimento (1: exponencial negativa, 2: linear)	-	1
Sucessor	Raízes: tipo e probabilidade da raiz sucessora	-	[3; 1]

Continua...

Tabela 4: Continuação.

Símbolo	Parâmetro	Unidade	Valores ¹ [média; desvio padrão]
Raízes basais			
Name	Tipo de raiz: Raízes basais	-	4
r_e	Taxa inicial de alongamento radicular	cm dia ⁻¹	[5*REstress; 0]
A	Raio radicular	cm	[0,06; 0]
Theta	Ângulo de inserção	rad	[1,5708; 0]
l_b	Comprimento da zona basal	cm	[2; 0]
l_a	Comprimento da zona apical	cm	[30; 0]
l_n	Espaçamento entre ramificações	cm	[2; 0]
n_{ob}	Número máximo de ramificações	und	[60; 0]
Color	Cor da raiz	rgb	[0,5; 0; 0,5]
Type	Tipo de tropismo	-	1
N	Força do tropismo	-	0,5
Sigma	Alterações angulares do ápice radicular	rad cm ⁻¹	0,1
Dx	Resolução espacial ao longo do eixo radicular	cm	0,25
Rlt	Tempo máximo de crescimento da raiz	dia	[60; 0]
Gf	Tipo da função de crescimento (1: exponencial negativa, 2: linear)	-	1
Sucessor	Raízes: tipo e probabilidade da raiz sucessora	-	[2; 1]
basal_first	Primeira ocorrência de raiz basal	dia	[3; 0]
basal_delay	Intervalo de tempo entre emissões de novas raízes	dia	[1; 0]
basal_max	Número máximo de raízes basais	und	20

¹Valores de parâmetros radiculares adaptados de Moraes et al. (2020); s.d.: desvio padrão. REstress: parâmetro de redução do estresse total ao alongamento radicular.

Infiltração de água no solo

Na determinação do risco climático pelo modelo SARRA, a infiltração de água no solo é representada por dois parâmetros: 1) a chuva limite (CL), que representa a lâmina de água precipitada acima do qual ocorrem perdas por escoamento superficial, em mm dia⁻¹; e 2) a porcentagem de perdas de água por escoamento superficial quando o volume de chuva observado ultrapassa o valor de CL. Na parametrização atualmente utilizada no Zarc, a CL equivale a 30 mm dia⁻¹, enquanto que a perda de água por escoamento, para volumes

diários superiores à CL, é de 20%. De acordo com os resultados de pesquisa compilados neste trabalho, os valores de TIE (ou seja, infiltração em solo com umidade tendendo à saturação) medidos em diferentes solos e manejos são consideravelmente superiores, variando em um intervalo aproximado de 10 a 120 mm h⁻¹. Por outro lado, quando a intensidade da precipitação ultrapassa a TIE, toda a quantidade de água adicional é perdida por escoamento, ou na melhor das hipóteses retida nos canais dos terraços. Outro aspecto a ser considerado é que a intensidade da chuva é variável ao longo do tempo, sendo as precipitações de alta intensidade, na ampla maioria dos casos, de curta duração (da ordem de minutos), com a ocorrência de escoamento dependente da umidade inicial do solo. Nesse sentido, a resolução do banco de dados meteorológicos, em escala diária, pode não ser suficiente para refletir as variações de intensidade que ocorrem durante um dado evento de chuva. Todas essas diferenças entre o que de fato acontece na prática e a solução encontrada para representar a infiltração de água no modelo SARRA dificultam o estabelecimento de valores para os NMs propostas neste documento.

Tendo em vista todas essas limitações, optou-se por manter o valor das perdas de água para precipitações acima da CL atualmente utilizado no SARRA, equivalente a 20%. Para diferenciar os valores de CL entre os NMs, a estratégia utilizada foi manter a taxa de 30 mm dia⁻¹ para o NM2 e criar um coeficiente de manejo (Cm) para estimar a CL para os demais NMs. O Cm foi calculado com base em dados da literatura, conforme a equação 1.

$$Cm_{NM1,3,4} = \frac{TIE_{NM1,3,4}}{TIE_{NM2}} \quad (1)$$

Em que:

- Cm = coeficiente de manejo (adimensional), calculado em separado para os NMs 1, 3 ou 4;
- $TIE_{NM1,3,4}$ = faixa de valores de taxa de infiltração (mm h⁻¹) de referência para os NMs 1, 3 e 4, estipulados de acordo com revisão de literatura;
- TIE_{NM2} = faixa de valores de taxa de infiltração (mm h⁻¹) de referência para o NM2, estipulado de acordo com revisão de literatura.

Os valores de CL para os NMs foram então obtidos pela equação 2:

$$CL_{NM} = CL_{NM2} \times Cm \quad (2)$$

Em que:

- CL_{NM} = valores de chuva-limite (mm dia⁻¹) estimados para cada NM;
- CL_{NM2} = valor de chuva-limite para o NM2, equivalente ao padrão utilizado atualmente na modelagem de risco climático pelo SARRA (30 mm dia⁻¹);
- Cm = coeficiente de manejo (adimensional), calculado em separado para cada NM conforme a equação 1.

Coefficiente de cultura (Kc)

O estabelecimento dos valores de Kc em função dos NMs foi realizado conforme as etapas abaixo descritas:

- Etapa 1: obtenção de equação matemática relacionando a quantidade de palha na superfície do solo com a redução das perdas de água por evaporação em relação ao solo descoberto, o que foi realizado por meio da compilação de dados disponíveis na literatura científica. As publicações científicas utilizadas nesta etapa, juntamente com o resumo metodológico das mesmas, são apresentados na Tabela 5.
- Etapa 2: obtenção da equação matemática que modela a participação relativa (%) do Ke no Kc da soja, em função do número de dias após a emergência (DAE) da cultura, com base em dados compilados na literatura científica especializada (Ávila, 2016; Báez, 2017; Antonello, 2019; Basso, 2019; Chechi, 2019; Barbieri et al., 2020; Bariviera et al., 2020). Para a determinação dessa equação, foram considerados os dados obtidos até a fase de máximo IAF da soja, excluindo-se aqueles referentes à fase de senescência da cultura.

Tabela 5. Trabalhos científicos utilizados como fonte de dados para estabelecer a equação relacionando a quantidade de palha na superfície do solo com a redução das perdas de água por evaporação.

Fonte	Classe textural	Espécie vegetal ⁽¹⁾	Quantidade de palha utilizada (t/ha)	Camada de solo avaliada (cm) ⁽²⁾
Andrade (2008)	Franco-arenoso	Aveia preta	0, 3 e 6	0 a 30
Saldanha (2009)	Franco-arenoso	Aveia preta Aveia preta + ervilhaca	0, 3 e 6	0 a 20
Freitas et al. (2006)	Areia franca Muito argiloso	Milho	0, 5 e 10	0 a 45
Bragagnolo e Mielniczuk (1990)	Argila	Trigo	0, 5 e 7	0 a 10
Bond e Willis (1969)	Franco-argilo-arenoso	Centeio	0; 0,56; 1,12; 1,68; 2,14; 3,36; 4,48; e 6,72	0 a 30
Vieira (2017)	Muito argiloso	Braquiária brizantha	0, 4 e 8	0 a 30
Chabat (2010)	Franco-arenoso	Aveia preta	0 e 4	0 a 30
Mariano et al. (2016)	Muito argiloso	Soja Trigo	0, 2, 4 e 6	0 a 130
Chen et al. (2007)	Franco-argiloso	Milho	0, 3 e 6	0 a 20
Almeida (2011)	Muito argiloso Franco-argilo- siltoso Areia franca	Aveia preta	0 e 4	0 a 10
Ji e Unger (2001)	Franco-argiloso Argilo-siltoso	Trigo	0, 2 e 4	0 a 30
Gill e Jalota (1996)	Franco-argilo- siltoso Franco-arenoso	Arroz	0, 2, 4 e 8	0 a 95
Prihar et al. (1996)	Franco-arenoso Areia franca	Trigo	0, 3 e 6	0 a 95
Singh et al. (2011)	Franco-argiloso	Arroz	0 e 8	0 a 20
Mahdavi et al. (2017)	Areia	Arroz	0 e 4	0 a 10
Unger e Parker (1976)	Franco-argiloso	Trigo Sorgo	0, 4 e 8	0 a 56
Singh et al. (2015)	Areia franca	Arroz	0 e 6	0 a 180
Zhang et al. (2009)	-	Trigo	0; 1,5; 4,5; 7,5; e 10,5	0 a 20
Rocha (2016)	Franco	Aveia preta	0, 2 e 4	0 a 10

- Etapa 3: em função da maior facilidade e rapidez de determinação, inclusive com a possibilidade de uso de ferramentas de sensoriamento remoto, a porcentagem de cobertura do solo pela palha é o indicador utilizado para o enquadramento de áreas de soja nos diferentes NMs, e não a massa de palha, que é a única variável independente empregada na quase totalidade dos trabalhos científicos constantes da Tabela 5. Assim, nessa etapa, foi estabelecida uma equação matemática relacionando a porcentagem de cobertura (variável independente) e massa seca de palha (variável dependente) utilizando base de dados referentes a 196 pontos avaliados em trabalhos de campo realizados pela Embrapa Soja.

- Etapa 4: com base na equação obtida na etapa 3, foi estimada a massa de palha de referência, necessária para atingir valores de porcentagem de cobertura dentro dos limites que caracterizam os NMs. Conforme mostrado na Tabela 6, os NMs 1 e 2 foram tratados de maneira conjunta, uma vez que estes se constituem na referência para os parâmetros de redução do Kc nos NMs 3 e 4 a serem utilizados na geração do Zarc. Assim, os valores de porcentagem de cobertura para os NMs 1 e 2 variam de 0 a 59,9, o que representa o intervalo comum aos dois níveis. Nos NMs 3 e 4, o intervalo de variação da porcentagem de cobertura do solo utilizado para o cálculo da massa de palha de referência (Tabela 6) foi definido com amplitude menor que os critérios de enquadramento das áreas em nível de campo, de forma a garantir diferenciação mínima entre o limite superior de redução do Kc no NM3 e o limite inferior do NM4. Esse intervalo foi calculado adicionando-se ou subtraindo-se o valor de 5% ao centro da faixa de variação para enquadramento das áreas nos NMs 3 e 4, equivalente a 67,5% e 87,5%, respectivamente. No caso dos NMs 1 e 2, optou-se por utilizar apenas um valor de porcentagem de cobertura para o cálculo da massa de palha de referência, equivalente ao centro do intervalo comum entre os dois níveis (30%). Essa estratégia foi utilizada com o intuito de simplificar os cálculos posteriores, evitando que o intervalo de redução do Kc nos NMs 3 e 4 apresentasse uma amplitude excessivamente grande.

- Etapa 5: cálculo da porcentagem de redução do Ke (R_{ke}) em relação ao solo descoberto para os NMs, utilizando a equação obtida na Etapa 1 e a massa de palha de referência calculada na Etapa 4.

- Etapa 6: cálculo da participação (%) do K_e no K_c , por meio da equação gerada na Etapa 2, para os seguintes períodos do ciclo da soja: 0-10; 11-20; 21-30; 31-40 DAE. Para fases posteriores do ciclo da cultura, a redução do K_c em função da cobertura do solo foi muito pequena e, assim, desconsiderada.

Tabela 6. Valores de porcentagem de cobertura do solo considerados no cálculo da massa de palha de referência.

Porcentagem de cobertura	Níveis de manejo - NM		
	NM1 e NM2	NM3	NM4
1) Valores para enquadramento nos NMs	0 a 59,9	60 a 74,9	75 a 100
2) Valores considerados para o cálculo da massa de palha de referência ²	30	67,5 ± 5 (62,5 - 72,5)	87,5 ± 5 (82,5 - 92,5)

¹ Para os NMs 3 e 4, a faixa de valores foi estimada adicionando-se ou subtraindo-se o valor de 5% ao centro do intervalo referente ao item 1, enquanto que, para os NMs 1 e 2, o valor corresponde ao centro da faixa de variação do item 1.

- Etapa 7: cálculo da porcentagem de redução do K_c (R_{Kc}) em relação ao solo descoberto para os NMs nos quatro períodos do ciclo da soja especificados na Etapa 6, por meio da equação 3:

$$R_{Kc} = \frac{R_{Ke} \times \%Ke}{100} \quad (3)$$

em que:

- R_{Ke} = porcentagem de redução do coeficiente de evaporação em relação ao solo descoberto, obtido na Etapa 5.

- $\%Ke$ = participação do K_e no K_c , obtida na Etapa 6.

- Etapa 8: cálculo da redução percentual dos valores de K_c nos NMs 3 e 4 em relação aos NMs 1 e 2, para os quatro períodos após a emergência da soja. Esse valor foi obtido para os quatro períodos do ciclo da soja especificados na Etapa 6, subtraindo-se os valores de R_{Kc} obtidos nos NMs 3 e 4 daqueles obtidos nos NMs 1 e 2, os quais foram calculados na Etapa 7.

Análise de sensibilidade

O modelo para cálculo do BH utilizado no Zarc é o SARRA (*Systeme d'Analyse Regionale des Risques Agroclimatiques*), descrito por Baron et al. (1996).

Este modelo é usado para se obter o ISNA, sendo, esta, a principal variável resposta utilizada no Zarc para quantificação do risco hídrico.

Foi realizada uma análise de sensibilidade nos parâmetros do modelo SARRA que melhor refletem as alterações nas propriedades do sistema solo-planta-atmosfera, em função de níveis de manejo, e que afetam os resultados do BH e a variável resposta de interesse, o ISNA. Os parâmetros testados foram o Kc, a Ze e a CL. Utilizou-se como referência a parametrização original usada no Zarc para a cultura da soja, com ciclo de 120 dias, solo de textura média e água disponível de $1,1 \text{ mm cm}^{-1}$. Esta cultura foi utilizada como exemplo geral, já que as respostas do seu balanço hídrico à variação dos parâmetros testados são muito semelhantes às demais culturas anuais.

A Ze de referência, utilizada na cultura exemplo, foi de 50 cm. A CL adotada no Zarc como referência geral para qualquer cultura é de 30 mm dia^{-1} , assumindo-se uma perda de 20% da quantidade precipitada por escoamento superficial do volume que exceder este limite.

Foram testados aumentos de 25, 50 e 75% sobre Ze e CL. A variação relativa resultante no ISNA foi verificada na média dos valores no período de maior consumo de água pela cultura e também mais sensível à deficiência hídrica, entre 60 e 90 dias após emergência, que corresponde ao florescimento e fase inicial de enchimento de grãos.

Na análise de sensibilidade da CL, foi testado também o possível efeito de chuvas mais concentradas, com maior volume em um único dia. Assim, foi gerada uma série artificial de chuva. Essa alteração consistiu em selecionar dois episódios de 4 dias consecutivos de chuva dentro do período de interesse, somando-se o volume total dos 4 dias em 1 único dia. Isso resultou em dois episódios de chuva de aproximadamente 60 mm cada, para posterior análise de sensibilidade a partir dessa série de chuva alterada.

As curvas de Kc, conforme modelo conceitual FAO - 56 (Allen et al., 2006), foram geradas para valores diários por meio de um modelo logístico duplo, ajustado a partir de valores de Kc inicial, máximo e final determinados experimentalmente para a cultura e disponíveis na literatura. Uma vez que o efeito esperado da cobertura morta sobre o solo é de redução da evaporação de água, então o Kc inicial de 0,52 para um solo sem cobertura foi reduzido em

25, 50 e 75% desde o dia da semeadura, com redução progressiva e proporcional até chegar a 0% aos 30 dias após emergência. Tal redução progressiva das diferenças entre curvas de Kc foi adotada de forma a representar a redução do componente evaporação do solo no total da evapotranspiração, à medida que a cultura cresce e o dossel cobre o solo nas entrelinhas. A variação relativa resultante no ISNA foi verificada na média dos valores entre 1 a 10 dias, 1 a 20 dias e 1 a 30 dias após emergência.

Esta análise consistiu em verificar a variação relativa dos resultados de ISNA em relação à variação de cada parâmetro de entrada do modelo individualmente. Ou seja, o parâmetro analisado varia, enquanto os demais são mantidos fixos (McCuen; Snyder, 1986).

Ressalta-se que as alterações nos parâmetros Ze, CL e Kc em função dos NMs, para fins de avaliação de sensibilidade, foram definidas de forma independente das modificações que serão de fato utilizadas na modelagem de risco climático. Essa estratégia foi utilizada para padronizar a variação entre os NMs para os três parâmetros, facilitando assim a interpretação dos resultados de forma a alcançar o objetivo de verificar qual(is) exerce(m) maior impacto no ISNA.

Avaliação de impactos nos resultados do Zarc

Foi realizada uma avaliação de como os resultados do Zarc poderiam ser influenciados a partir das parametrizações propostas para os quatro NMs. As alterações nas propriedades do sistema solo-planta-atmosfera em função dos NMs são representadas pelas parametrizações adotadas, que afetam a variável resposta de interesse, o ISNA, e conseqüentemente, os níveis de risco hídrico e os períodos indicados ou janelas de semeadura Zarc.

Os parâmetros testados foram o Kc, a Ze e a CL, utilizando-se como referência a parametrização original usada no Zarc para a cultura da soja (NM2), com ciclo médio de 120 dias, solos de textura arenosa, média e argilosa (solos tipo 1, tipo 2 e tipo 3), com água disponível 0,7, 1,1 e 1,5 mm cm⁻¹, respectivamente.

Para a geração deste Zarc, utilizou-se o mesmo procedimento padrão adotado para a geração de estudos Zarc conduzidos pela Rede Zarc Embrapa,

e utilizados pelo Mapa, incluindo a base de dados, modelagem, critérios de espacialização e níveis de risco. Os valores dos parâmetros Ze e CL utilizados nos diferentes NMs para fins de análise de impacto são apresentados na Tabela 7. A geração das curvas de Kc foi realizada utilizando procedimento similar ao descrito no item Análise de sensibilidade. Entretanto, o Kc inicial utilizado na presente análise para a condição sem cobertura (0,52) foi reduzido em 15 e 30% (Tabela 7), com diminuição progressiva até se igualarem aos 45 dias após emergência da cultura, o que resultou nos parâmetros constantes na Tabela 8.

Quando da efetiva operacionalização do Zarc Níveis de Manejo (ZarcNM) pelo Mapa, os parâmetros finais, para cada NM, poderão ser diferentes daqueles utilizados neste estudo. Para obter os parâmetros reais do Zarc de cada cultura ou diferenciações por NM, o interessado deverá consultar a Nota Técnica de Zarc específica na ocasião da publicação da Portaria de Zoneamento no Diário Oficial da União, pelo Mapa, e também disponibilizado na página oficial daquele Ministério.

Os resultados aqui apresentados consideram apenas a amostra que incluiu os municípios dos Estados de Alagoas, Piauí, Ceará, Tocantins, Goiás e DF. Estes Estados foram selecionados para compor a amostra pois os resultados do Zarc são definidos apenas pelo risco hídrico, sem interferências significativas de outros fatores de risco como geada e temperaturas muito baixas, temperaturas elevadas, excesso de chuva ou umidade excessiva, que poderiam mascarar os efeitos prováveis.

Tabela 7. Valores de referência dos parâmetros utilizados para representar os níveis de manejo 1 a 4 (NM1 a NM4), incluindo profundidade efetiva do sistema radicular (Ze), percentual de redução do coeficiente de cultura (Kc) inicial e chuva limite (CL) para perdas por escoamento superficial.

Parâmetro	Níveis de Manejo			
	NM1	NM2	NM3	NM4
Ze (cm)	40	50	65	80
Kc	0%	0%	-15%	-30%
CL (mm)	25	30	55	75

Tabela 8. Valores de coeficiente de cultivo (Kc) aplicados aos níveis de manejo (NM) 1 a 4.

Nível de Manejo	Decêndio											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
NM1	0,50	0,60	0,75	0,90	1,00	1,15	1,30	1,15	1,00	0,90	0,85	0,80
NM2	0,50	0,60	0,75	0,90	1,00	1,15	1,30	1,15	1,00	0,90	0,85	0,80
NM3	0,43	0,49	0,62	0,84	1,00	1,15	1,30	1,15	1,00	0,90	0,85	0,80
NM4	0,36	0,43	0,57	0,81	1,00	1,15	1,30	1,15	1,00	0,90	0,85	0,80

Resultados e Discussão

Critérios e indicadores para enquadramento de lavouras de soja nos NMs

Para enquadramento nos NMs, foram selecionados sete indicadores que refletem a qualidade do manejo e a fertilidade do solo sob o ponto de vista de maior disponibilidade de água e crescimento radicular (Tabela 9), utilizando como base ampla revisão bibliográfica em conjunto com resultados de pesquisas obtidos pela Embrapa Soja. Para ser enquadrada nos NMs 2, 3 ou 4, uma determinada área deverá estar em conformidade com os critérios de todos os indicadores da Tabela 9, uma vez que o não atendimento a qualquer um deles já impacta de forma negativa nos parâmetros utilizados para a modelagem no Zarc, aumentando o risco climático. Isso significa que todos os indicadores possuem o mesmo peso e importância para o enquadramento de uma lavoura no NM2 ou superior. É importante salientar que se trata de uma proposta inicial, sujeita a alterações ao longo do tempo conforme forem sendo obtidos mais resultados de trabalhos de pesquisa e **validação de campo**, em diferentes regiões do País.

Os indicadores 1, 2 e 7 refletem diretamente os três pilares que fundamentam o verdadeiro SPD (cobertura do solo, mínimo revolvimento e diversificação de espécies vegetais). Quando adotado em consonância com esses pilares, o SPD se constitui em uma importante estratégia para mitigar o risco climático relacionado à ocorrência de secas (Franchini et al., 2012), o que justifica a

inclusão destes três indicadores. Adicionalmente, a verificação de conformidade a esses critérios é técnica e economicamente viável, sendo possível inclusive de forma remota, por meio da análise e processamento de imagens de satélite. Por sua vez, os indicadores 3, 4 e 5 refletem a acidez do solo em superfície e subsuperfície, fator que, quando não adequadamente corrigido, pode limitar o crescimento e o funcionamento das raízes, aumentando assim o risco de perdas expressivas de produtividade por seca. A verificação deste item no campo exige a realização de análises químicas de solo nas camadas de 0-20 e 20-40 cm, o que também é viável técnica e economicamente, tendo em vista que os laudos não se aplicam exclusivamente ao Zarc, mas podem e devem ser utilizados para fins de recomendação de adubação e correção do solo, visando a garantir produtividades satisfatórias e racionalizar custos de produção. A fertilidade estrutural é inferida a partir do IQEs, obtido pela metodologia DRES (Ralisch et al., 2017), de execução simples e de baixo custo. A utilização de um indicador de fertilidade estrutural é essencial para a correta classificação das áreas em NMs, uma vez que a estrutura do solo determina, em grande parte, processos relacionados à disponibilidade hídrica e a magnitude das limitações físicas ao crescimento das raízes. Como a qualidade estrutural está diretamente relacionada à biologia do solo, o IQEs reflete de maneira indireta o componente biológico da fertilidade (Ralisch et al., 2017), também importante para reduzir os riscos climáticos associados à ocorrência de secas.

O indicador diversidade de culturas em um período de três anos agrícolas é dado pelo arranjo, no espaço e no tempo, das espécies vegetais no âmbito dos sistemas de produção, conforme detalhado previamente no item Manejo do solo. Os requisitos mínimos apresentados na Tabela 9 foram definidos com base nos resultados de diversos trabalhos de pesquisa envolvendo a resposta da cultura da soja em termos de produtividade e estabilidade de produção à diversidade biológica e ao potencial de adição de fitomassa da parte aérea e raízes de diferentes modelos de produção em ensaios de campo de longa duração. Em seguida, são listados alguns esclarecimentos para melhor entendimento dos requisitos mínimos deste indicador para enquadramento de uma área em um dado NM:

Tabela 9. Critérios e indicadores para enquadramento das áreas de soja e milho nos níveis de manejo 2 (NM2), 3 (NM3) e 4 (NM4).

Indicador	Nível de manejo (NM)		
	NM1	NM2	NM3
1) Tempo sem preparo do solo em área total (anos)	< 3	3 a 5	6 a 8
2) Porcentagem de cobertura do solo na semeadura da soja	< 45	45 a 60	61 a 75
3) V% (0-20 cm) ¹ CTC < 7,0 cmol _c dm ⁻³ CTC 7,0 a 10,0 cmol _c dm ⁻³ CTC > 10,0 cmol _c dm ⁻³	< 35 < 40 < 50	35 a 40 40 a 45 50 a 55	41 a 50 46 a 55 56 a 65
4) Teor de Ca ²⁺ (cmol _c dm ⁻³) (20-40 cm)	< 0,5	0,5 a 0,7	0,8 a 1,0
5) m% (20-40 cm) ²	> 20	10 a 20	5 a 9
6) IQEs - DRES ³	< 2,0	2,0 a 3,0	3,0 a 4,0
7) Diversidade de culturas considerando os últimos 3 anos agrícolas	Requisitos dos outros NMs não atendidos ou não informados	- 4 cultivos; E - 2 espécies vegetais; E - 2 famílias botânicas.	- 6 cultivos; E - 2 espécies vegetais; E - 2 famílias botânicas; E - 1 cultivo exclusivo envolvendo plantas de cobertura do solo (solteiro ou consorciado) por mais de 4 meses OU 3 cultivos de consórcio grãos + cobertura OU 3 cultivos de cobertura na janela outonal ou de fim de inverno, com permanência na área por menos de 4 meses.
			Sistemas de integração lavoura-pecuária (ILP) envolvendo o cultivo de pastagens por um ano ou mais na mesma área - 6 cultivos; E - 4 espécies vegetais; E - 2 famílias botânicas; E - 3 cultivos envolvendo plantas de cobertura do solo (solteiro ou consorciado com outras plantas de cobertura ou para produção de grãos), com pelo menos 1 cultivo exclusivo por mais de 4 meses.

¹ V% = saturação por bases [(Ca²⁺+ Mg²⁺+ K⁺/CTC pH 7,0)*100]; ² m% = saturação por alumínio {(Al³⁺/ CTC efetiva)*100}; ³ IQEs = Índice de qualidade estrutural do solo, pelo diagnóstico rápido da estrutura do solo (DRES) - Ralisch et al. (2017).

- No âmbito desta proposta, o termo “cultivo” refere-se à condução de uma cultura agrícola em uma dada área, por um período mínimo 45 dias após a semeadura, para fins de cobertura do solo, pastejo e/ou produção de grãos ou fibras. Lavouras para produção de forragem conservada (silagem de planta inteira, feno) ou via corte não são computadas como cultivo, a menos que sejam consorciados com culturas que permanecem vegetando após a colheita.
- É permitida a utilização das plantas de cobertura, consorciadas ou não, para pastejo em sistemas de integração lavoura-pecuária. O uso como pastagem não invalida plantas de cobertura do solo como requisito para os NMs 3 e 4.
- Com relação ao critério “cultivos exclusivos de cobertura por mais de quatro meses”, estes devem envolver espécies gramíneas, solteiras ou consorciadas com outras gramíneas e/ou com plantas pertencentes a outras famílias botânicas.
- Um cultivo de uma espécie gramínea para produção de grãos em terceira safra (exemplo, trigo ou aveia branca após milho 2ª safra) ou na janela outonal (por exemplo, milheto granífero entre a colheita da soja e a semeadura do trigo) pode substituir um cultivo para cobertura com permanência na área por menos de 4 meses nas janelas outonal ou de fim de inverno, ou um cultivo para cobertura consorciado com espécies de grãos, como requisito para o enquadramento nos NMs 3 e 4.
- No NM4, a rotação entre a soja e espécies gramíneas no verão pode substituir o critério “pelo menos um cultivo exclusivo envolvendo plantas de cobertura do solo por mais de quatro meses”.
- Na Tabela 10, são apresentados alguns exemplos de modelos de produção e seu enquadramento nos NMs de acordo com os critérios constantes da Tabela 9.

Proposta de parametrização de variáveis do balanço hídrico alteradas pelas classes de nível de manejo

Profundidade efetiva do sistema radicular (Ze)

Os resultados da simulação do crescimento das raízes da soja pelo modelo RootBox (Leitner et al., 2010), em função de estresses físicos, químicos e biológicos crescentes, são apresentados na Figura 27. Conforme esperado, o crescimento radicular e, em consequência, a Ze (equivalente à camada contendo 80% do comprimento de raízes) diminuíram com o aumento dos estresses totais aplicados na simulação. Admitindo-se situação hipotética, que não exista nenhum estresse atuando sobre as raízes da soja, os dados mostram que a Ze foi de 1,34 m, porém, esse valor caiu para menos da metade (0,61 m) quando o parâmetro de redução do estresse total ao alongamento radicular (RE) foi de 20% (Figura 28). Além da menor Ze, o comprimento radicular total na camada de 0,5-1,0 m nesse nível de estresse foi reduzido cerca de 44 vezes, comparativamente à condição de referência, ou seja, na ausência de estresse. Nesse contexto, ressalta-se que a melhoria da fertilidade integral do solo em resposta à adoção de boas práticas de manejo reduz a magnitude dos estresses totais que limitam o alongamento radicular, resultando assim em maior RE e, conseqüentemente, maior Ze e maior comprimento de raízes.

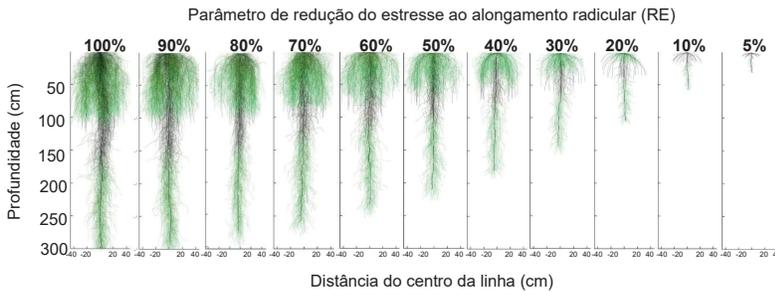


Figura 27. Crescimento e distribuição do sistema radicular da soja em profundidade aos 90 dias após a emergência da cultura simulados pelo modelo RootBox, e sua relação com o parâmetro de redução do estresse total ao alongamento radicular (RE). Para RE=100%, o estresse é nulo, representando o potencial máximo de crescimento radicular da cultura.

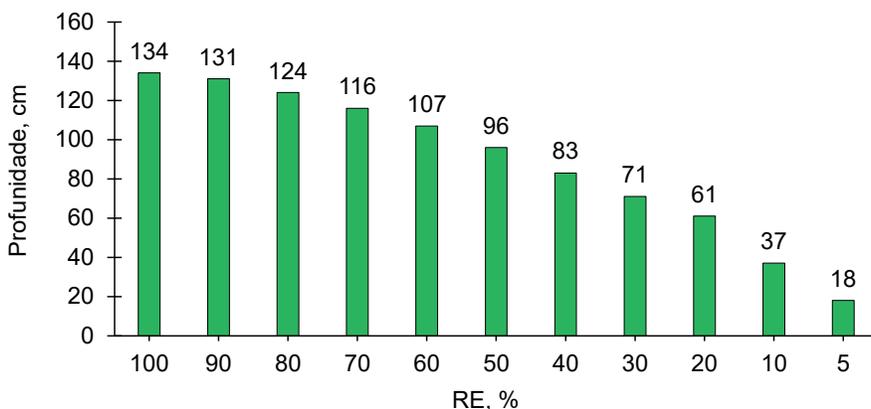


Figura 28. Profundidade efetiva (80% do comprimento das raízes) do sistema radicular da soja aos 90 dias após a emergência da cultura, em função do parâmetro de redução do estresse total ao alongamento radicular (RE), simulada pelo modelo RootBox. Para RE=100%, o estresse é nulo, representando o potencial máximo de crescimento radicular da cultura.

A partir de resultados obtidos em experimentos de campo (Moraes et al., 2018a, 2020), foram atribuídas faixas de variação para o parâmetro RE ao longo do ciclo da soja para cada nível de manejo e, a partir disso, estimou-se o respectivo intervalo de variação da Ze (Tabela 11), para uso no modelo SARRA. Os valores de Ze propostos nessa Tabela são coerentes com os resultados encontrados na literatura e previamente discutidos. O potencial das raízes da soja em alcançar valores de Ze maiores do que 1,0 m, sob condições de baixa limitação ao crescimento radicular, foi demonstrado em diversos trabalhos (Allmaras et al., 1975a; Stone et al., 1976; Kaspar et al., 1978; Righes, 1980; Garay; Wilhelm, 1983; Sako et al., 2016). Adicionalmente, algumas pesquisas demonstraram a utilização, pelas plantas, da água armazenada abaixo da profundidade máxima do sistema radicular em consequência dos fluxos ascendentes de água (Stone et al., 1976; Righes, 1980) o que, na prática, aponta para a possibilidade de aumento da espessura da camada de solo que contém água disponível às culturas. Por outro lado, valores de Ze significativamente menores em lavouras com problemas de manejo do solo foram encontradas por Sako et al. (2016) e Dantas (2018). Salienta-se ainda que o intervalo de variação da Ze no NM2 contempla o valor atualmente empregado no Zarc para a soja, equivalente a 50 cm.

Tabela 10. Exemplos de sistemas de produção (3 anos agrícolas) e seu enquadramento nos níveis de manejo de acordo com os critérios da Tabela 9.

Modelo	Ano 1		Ano 2		Ano 3		Nível de manejo
	Outono/inverno	Verão	Outono/inverno	Verão	Outono/inverno	Verão	
1	Pousio	Soja	Pousio	Soja	Pousio	Soja	3 cultivos, 1 espécie, 1 família = NM1
2	Aveia (feno)	Milho (silagem) Milho (silagem) ¹	Aveia (feno)	Soja	Aveia (cobertura)	Soja	3 cultivos, 2 espécies, 2 famílias = NM1
3	Trigo	Soja	Trigo	Soja	Trigo	Soja	6 cultivos, 2 espécies, 2 famílias = NM2
4	Milho 2ª safra	Soja	Milho 2ª safra	Soja	Milho 2ª safra	Soja	6 cultivos, 2 espécies, 2 famílias = NM2
5	Milho 2ª safra + braquiária	Soja	Milho 2ª safra + braquiária	Soja	Milho 2ª safra + braquiária	Soja	6 cultivos, 3 espécies, 2 famílias, 3 anos de consórcio grãos + cobertura = NM3
6	Braquiária	Soja	Milho 2ª safra	Soja	Milho 2ª safra	Soja	6 cultivos, 2 espécies, 2 famílias, pelo menos um cultivo de cobertura > 4 meses envolvendo gramíneas = NM3
7	Braquiária	Soja	Braquiária	Soja	Braquiária	Soja	6 cultivos, 2 espécies, 2 famílias, pelo menos um cultivo de cobertura > 4 meses envolvendo gramíneas = NM3
8	Milheto-trigo ²	Soja	Milheto-trigo	Soja	Milheto-trigo	Soja	9 cultivos, 3 espécies, 2 famílias, 3 anos de uso da janela outonal = NM3
9	Milheto-trigo	Soja	Milho 2ª safra + braquiária	Soja	Milho 2ª safra + braquiária	Soja	7 cultivos, 5 espécies, 2 famílias, com uso da janela outonal (1 ano) e consórcio grãos + cobertura (2 anos) = NM3
10	Milheto-trigo	Soja	Aveia + nabo	Soja	Milho 2ª safra + braquiária	Soja	7 cultivos, 7 espécies, 3 famílias, 1 cultivo para cobertura envolvendo gramínea > 4 meses, 1 cultivo consórcio grãos + cobertura, 1 cultivo cobertura outonal = NM4
11	Milho 2ª safra-trigo ³	Soja	Aveia + nabo	Soja	Milho 2ª safra + braquiária	Soja	7 cultivos, 6 espécies, 3 famílias, 1 cultivo para cobertura envolvendo gramíneas > 4 meses, 1 cultivo consórcio grãos + cobertura, 1 cultivo de 3ª safra (gramínea) = NM4
12	Nabo-trigo ²	Milho 1ª safra	Crotalaria- trigo ²	Soja	Milheto-aveia branca ²	Soja	9 cultivos, 7 espécies, 3 famílias, rotação soja/milho no verão, 3 cultivos de cobertura outonal = NM4
13	Aveia + azevém	Milho silagem + braquiária	Trigo	Soja	Aveia + Azevém	Soja	6 cultivos, 6 espécies, 2 famílias, 2 cultivos para cobertura > 4 meses, 2 cultivos consórcio silagem + cobertura = NM4

¹Dois cultivos de milho para silagem, em sequência, no período entre setembro a maio; ² Uso da janela outonal, entre a colheita da soja ou milho verão e a implantação do cereal de inverno, com uma espécie vegetal para cobertura do solo; ³ Cultivo do trigo em 3ª safra após a colheita do milho 2ª safra.

Tabela 11. Faixa de valores de profundidade efetiva do sistema radicular da soja (*Ze*) propostos para os quatro níveis de manejo (NM), calculados com base nos parâmetros de redução do estresse total ao crescimento radicular (RE) estabelecidos a partir dos resultados de Moraes et al. (2018c, 2020).

	Níveis de manejo - NM			
	NM1	NM2	NM3	NM4
RE, %	5-10	15-20	30-40	45-60
<i>Ze</i> (cm)	18-37	47-61	71-83	92-107

As diferenças entre os NMs ficam ainda mais evidentes comparando-se os perfis de distribuição de raízes que representam aproximadamente a média do intervalo de variação do parâmetro RE (Tabela 11) para cada um dos referidos níveis (Figura 29). Essa Figura demonstra claramente que, além do aumento na *Ze*, a melhoria das práticas de manejo do solo do NM1 ao NM4 implica em incremento expressivo do comprimento total das raízes da soja, otimizando, assim, a exploração do perfil do solo em busca de água e nutrientes.

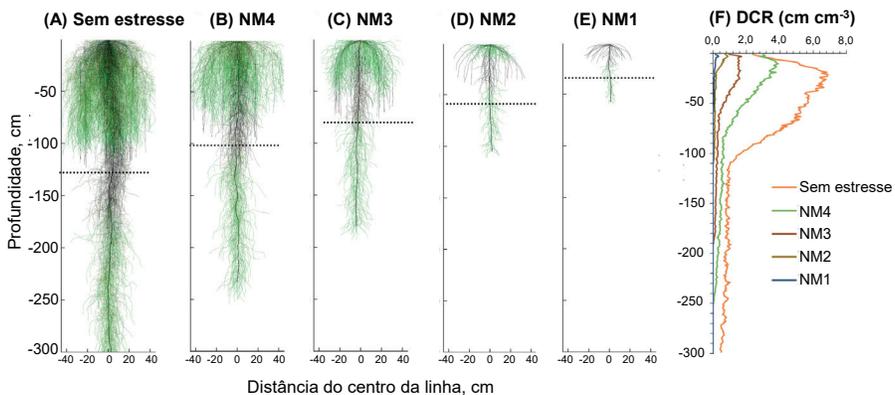


Figura 29. Sistema radicular da soja simulado considerando ausência de estresses (A) e os níveis de manejo NM4 (B), NM3 (C), NM2 (D) e NM1 (E); adicionalmente, os valores de densidade de comprimento radicular (DCR) foram calculados no perfil do solo para cada condição simulada (F). Linhas pontilhadas indicam a profundidade efetiva do sistema radicular (*Ze*), a qual concentra 80% do comprimento de raízes.

Embora a faixa de valores de *Ze* proposta para cada NM (Tabela 11) tenha sido estimada com base em modelos adaptados e validados para as condições brasileiras, sendo os resultados obtidos compatíveis com os apresentados na literatura científica, é necessária a realização de estudos de validação

nas diferentes regiões produtoras de soja no Brasil. Esses estudos devem focar na quantificação do perfil de distribuição das raízes de soja (pelo menos até 2 m de profundidade) sob diferentes manejos e condições edafo-climáticas, preferencialmente utilizando lavouras comerciais com históricos contrastantes em termos de potencial produtivo. Com esses estudos de validação, será possível aperfeiçoar e adaptar os valores de Ze de acordo com as particularidades regionais, melhorando a precisão e exatidão dos riscos determinados para cada NM.

Infiltração de água no solo

As faixas de CL para os quatro NMs propostos são apresentadas na Tabela 12. Observa-se que, para o NM1, a faixa de CL foi de 30 a 40% inferior à referência de 30 mm dia⁻¹, atualmente utilizada na modelagem de risco climático, e que na presente proposta equivale ao NM2. Por outro lado, os valores de CL foram de 40 a 60% e de 130 a 170% superiores ao NM2 nos NMs 3 e 4, respectivamente. De acordo com a metodologia utilizada, essas diferenças na CL refletem de maneira proporcional o efeito do manejo sobre a TIE, conforme dados obtidos em levantamento realizado na bibliografia especializada (item Infiltração de água no solo). É importante ressaltar ainda que as perdas de água para precipitações com intensidade superior à CL não foram alteradas, mantendo-se assim a taxa atualmente utilizada para todos os NMs (20%).

Tabela 12. Faixa de valores de chuva limite (CL) propostos para os quatro níveis de manejo (NM).

Parâmetros ⁽¹⁾	Níveis de manejo - NM			
	NM1	NM2	NM3	NM4
TIE, mm h ⁻¹	20-30	35-45	50-70	80-120
Cm	0,6-0,7	1	1,4-1,6	2,3-2,7
CL _{NM} , mm dia ⁻¹	18-21	30	42-48	69-81

⁽¹⁾ TIE = taxa de infiltração estável de água no solo; Cm = coeficiente de manejo (adimensional), calculado conforme equação 1; e CL_{NM} = chuva-limite para os níveis de manejo propostos.

A exemplo da Ze, os valores de CL_{NM} (Tabela 12) devem ser validados para diferentes condições de clima e solo por estudos específicos. Em etapa posterior de aprimoramento dos NMs, as variáveis atualmente utilizadas para

representar a infiltração nos modelos de simulação do risco climático devem ser reavaliadas para refletir de maneira mais precisa o processo que ocorre em condições de campo.

Coefficiente de cultura (Kc)

A relação entre a massa de palha na superfície do solo e a redução percentual nas perdas de água por evaporação em comparação ao solo descoberto é apresentada na Figura 30. A equação obtida indica uma redução média de 6,63% nas perdas de água por evaporação a cada tonelada de palha presente na superfície do solo. A dispersão dos dados ao longo da reta que representa a equação pode ser associada às diferenças de metodologia e às variações de clima, solo e características dos restos vegetais presentes na superfície, entre os trabalhos utilizados para o estabelecimento dessa relação (Tabela 5). Por exemplo, dentro do universo de dados da Figura 30, constatou-se que a menor porcentagem de redução da evaporação por tonelada de palha ocorreu para restos culturais provenientes de espécies em que a maior parte da fitomassa da parte aérea se concentra em colmos ou caules, como por exemplo o milho e o sorgo. Restos culturais com essas características apresentam menor capacidade de cobrir o solo, ou seja, necessitam de uma maior quantidade para atingir a mesma porcentagem de cobertura em comparação à palha produzida por espécies que apresentam maior proporção da fitomassa concentrada nas folhas e colmos/caules finos, como os cereais de inverno.

A Figura 31 mostra a variação da participação do K_e no K_c em função do tempo transcorrido após a emergência da soja (DAE). Os resultados mostram que a porcentagem da água perdida por evaporação (expressa em termos de K_e), em relação ao total evapotranspirado pela cultura diminuiu exponencialmente em função do tempo transcorrido após a emergência da soja. Aos 10 DAE, a evaporação correspondia a cerca de 70% do total evapotranspirado, valor que caiu pela metade aos 20 DAE. A partir dos 60 DAE, a participação da evaporação passa a ser desprezível, com valores inferiores a 5% do total de água evapotranspirada pela soja. Cabe salientar que, para a elaboração da Figura 31, foram considerados dados obtidos até a fase de máximo IAF da soja. Na fase de senescência, a redução do IAF implica em menor transpiração e menor sombreamento do solo acarretando maior evaporação, o que se traduz em maior participação do K_e no K_c .

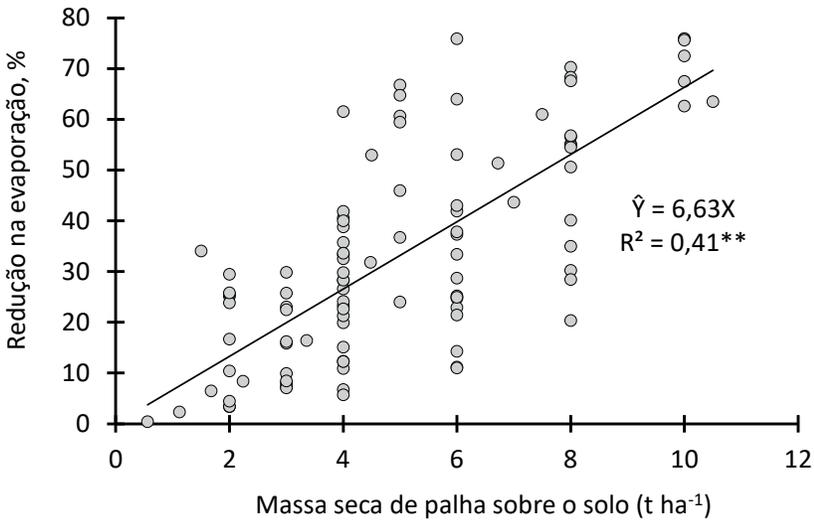


Figura 30. Porcentagem (%) de redução das perdas de água por evaporação pela cobertura do solo em relação ao solo nu, em função da massa seca de palha presente sobre o solo. ** Equação estatisticamente significativa (teste F, $p < 0,01$).

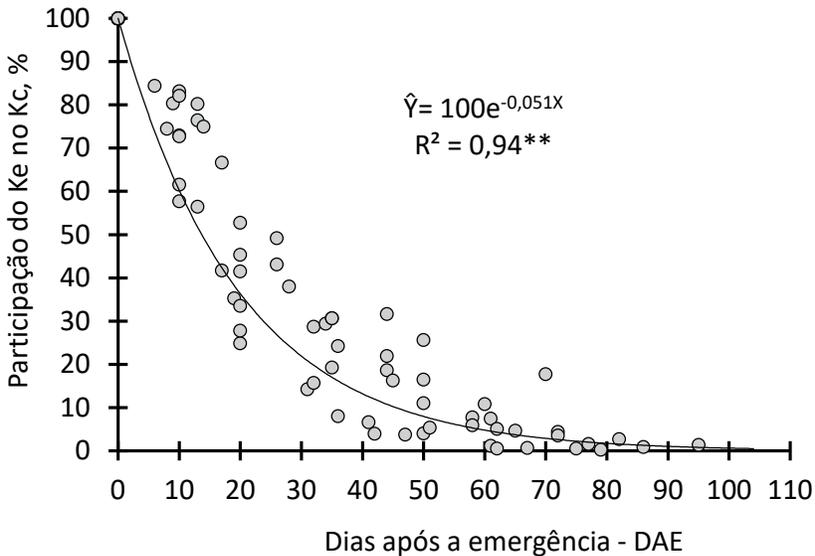


Figura 31. Porcentagem (%) de participação do coeficiente de evaporação (Ke) no coeficiente de cultura (Kc), em função do número de dias após a emergência (DAE) da cultura da soja. ** Equação estatisticamente significativa (teste F, $p < 0,01$).

Para calcular a porcentagem de redução do Ke e, em seguida, do Kc no NMs 3 e 4, foi necessário estabelecer a relação entre a porcentagem de cobertura do solo e massa seca de palha (Figura 32). Verifica-se que os dados se ajustaram a um modelo linear (teste F, $p < 0,01$), o qual demonstra que são necessários, em média, 920 kg de massa seca de palha para aumentar a porcentagem de cobertura em 10%. De maneira similar ao observado na Figura 30, o modelo apresenta um R^2 baixo (0,39), o que indica grande dispersão dos dados ao longo da reta, principalmente nas porcentagens de cobertura mais elevadas. Isso demonstra que a relação porcentagem de cobertura x massa de palha varia significativamente com a espécie vegetal, com aquelas caracterizadas por colmos ou caules grossos (milho e sorgo, por exemplo) apresentando menor eficiência em cobrir o solo.

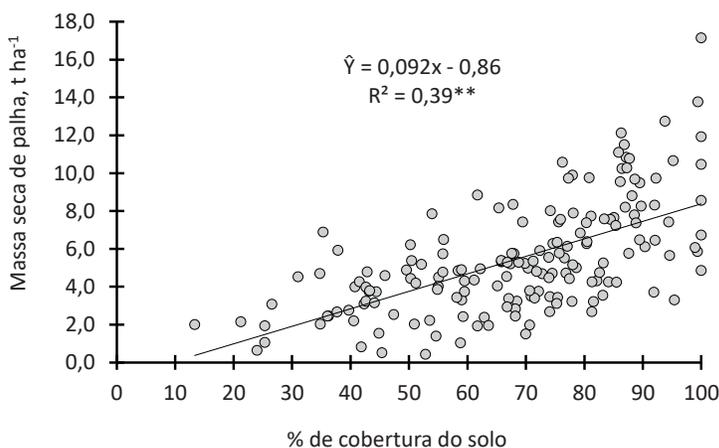


Figura 32. Relação entre a porcentagem (%) de cobertura do solo e a massa seca de palha presente na superfície do solo. ** Equação estatisticamente significativa (teste F, $p < 0,01$).

A memória de cálculo da porcentagem de redução do Kc da soja em relação ao solo nu para os diferentes NMs é apresentada na Tabela 13. Na Tabela 14, são apresentadas as faixas de redução percentual dos valores de Kc nos NMs 3 e 4 em relação aos NMs 1 e 2, em quatro períodos durante os primeiros 40 DAE da soja, para serem utilizados na geração do Zarc. Conforme esperado, os efeitos de redução do Kc pela adoção dos NMs 3 e 4 diminuem

à medida que a cultura avança no ciclo de desenvolvimento, de forma a tornarem-se desprezíveis após os 40 DAE. Considerando os limites máximos das faixas apresentadas, a redução do Kc varia de 4 a 20% no NM3, e de 6 a 30% no NM4. Observa-se ainda que as diferenças entre os percentuais de redução dos NMs 3 e 4 diminuem ao longo do ciclo, passando de 10% nos primeiros 10 DAE para 2% no período de 31 a 40 DAE.

Tabela 13. Estimativa dos parâmetros utilizados para o cálculo da faixa de redução do coeficiente de cultura (Kc) inicial da cultura da soja nos níveis de manejo (NM) 3 e 4.

Parâmetros	Níveis de manejo - NM		
	NM1 e NM2	NM3	NM4
1) Massa seca de palha de referência (t ha ⁻¹) ¹	1,9	4,8 - 5,8	6,7 - 7,7
2) % de redução do Ke em relação ao solo nu (R _{ke}) ²	12,6	31,8-38,5	44,4-51,1
3) Participação (%) do Ke no Kc ³			
0 a 10 DAE ⁴		77,5	
11 a 20 DAE		46,5	
21 a 30 DAE		27,9	
31 a 40 DAE		16,8	
4) % de redução do Kc em relação ao solo nu (R _{Kc}) ⁵			
0 a 10 DAE	9,8	24,7 - 29,8	34,4 - 39,6
11 a 20 DAE	5,9	14,8 - 17,9	20,7 - 23,8
21 a 30 DAE	3,5	8,9 - 10,7	12,4 - 14,3
31 a 40 DAE	2,1	5,3 - 6,5	7,5 - 8,6

¹ Massa seca de palha na superfície do solo necessária para atingir os valores de porcentagem (%) de cobertura constantes do item 2 da Tabela 7, estimada a partir da equação apresentada na Figura 32;

² Calculada a partir da massa seca de palha indicada no item 1, utilizando a equação da Figura 30; ³ Refere-se a participação relativa do coeficiente de evaporação (Ke) no Kc, calculada a partir da equação constante da Figura 31; ⁴ DAE = dias após a emergência; ⁵ Calculado a partir da equação 3.

Tabela 14. Faixa de redução percentual dos valores de coeficiente de cultura (Kc) inicial nos níveis de manejo (NM) 3 e 4 em relação aos NMs 1 e 2, para quatro períodos após a emergência da soja.

Período ^{1,3}	Níveis de manejo - NM			
	NM1	NM2	NM3	NM4
0 a 10 DAE	0	0	15-20 ²	25-30
11 a 20 DAE	0	0	9-12	15-18
21 a 30 DAE	0	0	5-7	9-11
31 a 40 DAE	0	0	3-4	5-6

¹ DAE = dias após a emergência; ² Redução calculada pela equação 3. ³ Após esses quatro períodos, a redução do Kc inicial foi considerada nula.

Análise de Sensibilidade

A análise de sensibilidade permitiu identificar os parâmetros de maior peso no modelo, indicando que esses devem ser mais detalhadamente amostrados e caracterizados com exatidão, sendo também os mais importantes para a calibração do modelo.

A CL foi o parâmetro analisado que menos influenciou na variação do ISNA. Nenhum dos percentuais de alteração do parâmetro (25, 50 e 75%) provocou alterações no resultado final do ISNA (Figura 33). Isso ocorreu principalmente devido à baixa frequência de dias com precipitação maior que 30 mm, valor a partir do qual se considera perda de água por escoamento superficial. Outro motivo é que, mesmo para precipitações mais intensas como, por exemplo, 40 ou 50 mm por dia, isso normalmente ocorre em períodos que o solo já se encontra com níveis elevados de armazenamento hídrico. Ou, mesmo que ainda não esteja, a ocorrência da chuva eleva o armazenamento de água de forma que a perda por escoamento superficial não chega a afetar significativamente a disponibilidade hídrica para a cultura, inferida por meio do ISNA.

Apenas no teste baseado na série de chuva alterada é que foi possível identificar um pequeno efeito da variação da CL no resultado do ISNA. A série alterada foi modificada intencionalmente para reduzir o número de dias com chuva menor que 30 mm de forma que o volume precipitado nesses dias foi transferido ou concentrado para um único dia de precipitação. Dessa forma, concentrou-se o total precipitado em poucos dias de forma a maximizar o efeito esperado de aumento de perdas de água por escoamento superficial. Observou-se um aumento de apenas 2% no ISNA para os três níveis de alteração no parâmetro (Figura 33).

Apesar do efeito aparentemente pequeno da CL na disponibilidade hídrica para a cultura no curtíssimo prazo (mesma safra), há outro aspecto a ser considerado. Ou seja, a erosividade das chuvas e seu caráter cumulativo ao longo dos anos não podem ser desprezados. Em outras palavras, pode-se dizer que haveria poucos efeitos imediatos da CL sobre o risco hídrico para a cultura em um solo preservado e em boas condições, assim como pressuposto nas simulações Zarc. Porém, no longo prazo, a perda de sedimento e nutrientes por erosão pode ser extremamente prejudicial para a fertilidade física e química do solo, agravando o risco da cultura. Conforme descrito em

diversos estudos, a erosão hídrica é determinada pela quantidade, intensidade e duração das chuvas, por características do solo, do relevo, pela umidade antecedente, pela cobertura vegetal, pelo sistema de preparo do solo e uso de práticas conservacionistas (Moura; Medeiros, 1987; Merten et al., 2015; Freitas et al., 2021). Dessa forma, a CL seria um parâmetro pouco útil para a diferenciação do risco climático nos NMs para fins de Zarc quando avaliada pelo ISNA. Ainda assim, a formação de cobertura do solo aliada à melhoria de sua estrutura aumenta a TIE com a consequente redução das perdas por erosão, o que deve continuar sendo um dos objetivos principais em qualquer estratégia de manejo de solos, de aumento da produtividade e de redução de riscos.

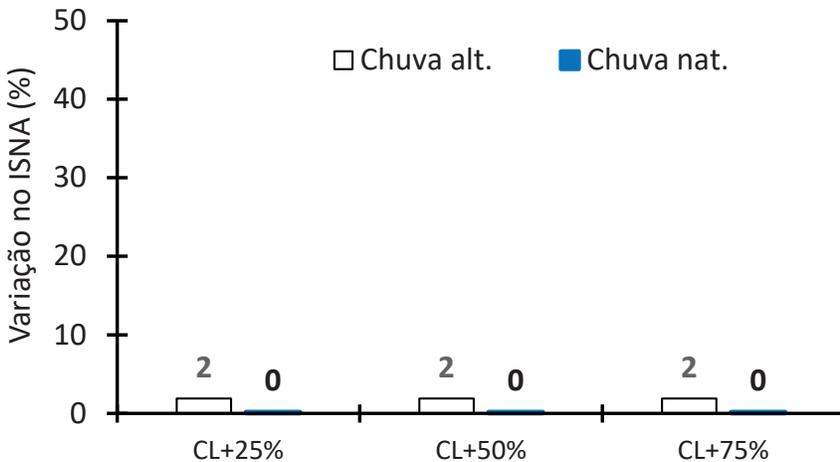


Figura 33. Variação percentual do índice de satisfação das necessidades de água (ISNA) para a cultura da soja em função dos aumentos de 25, 50 e 75% na chuva limite (CL) considerada no modelo de balanço hídrico. Simulação considerando a série de dados de chuva natural (chuva nat.) e a série de chuva alterada (chuva alt.).

A sensibilidade do modelo foi um pouco maior a partir da variação do Kc (Figura 34), com aumento de 2 a 11% no ISNA, para reduções de 25 e 75% no Kc. Porém, vale destacar que esse efeito está limitado à fase inicial da cultura. O Kc consiste na soma do Kcb, que representa a perda de água para a atmosfera através da transpiração, e do Ke que representa a perda de água pelo solo (Allen, 2000). Dessa forma, o Kc é normalmente reduzido na fase inicial da cultura em função do baixo IAF. Nessa fase, a ETc resultante é composta basicamente pela evaporação do solo, com pequena contribuição da transpiração das plantas. Nesse contexto, a cobertura do solo desempenha-

ria papel na redução do K_e , responsável pela maior parte da evapotranspiração da cultura nessa fase, mas perderia importância à medida que o dossel crescesse e o K_{cb} aumentasse.

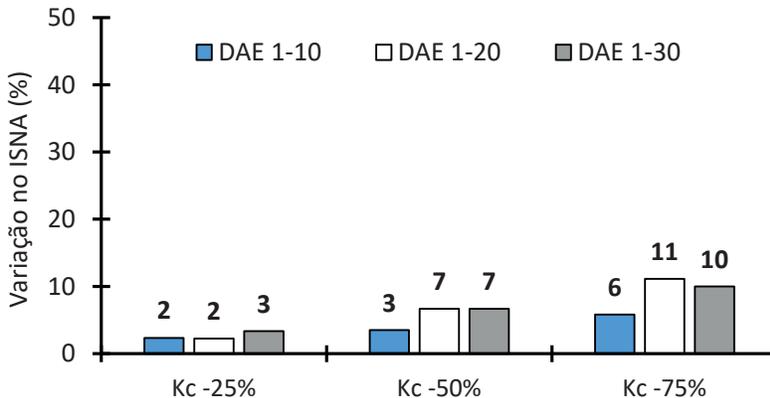


Figura 34. Variação percentual de índice de satisfação das necessidades de água (ISNA) para a cultura da soja em função das reduções de 25, 50 e 75% no coeficiente de cultura (K_c) inicial, para os períodos de 1 a 10, 1 a 20 e 1 a 30 dias após emergência (DAE).

Ainda assim, vale destacar que a redução da perda de água nos momentos iniciais, após a emergência da cultura, bem como a redução da temperatura na superfície do solo, podem ser importantes para a sobrevivência das plântulas sob condições de déficit hídrico, sobretudo em regiões de clima tropical. A temperatura na superfície de um solo nu com plântulas recém emergidas pode ultrapassar os 50 °C com certa frequência, enquanto raramente ultrapassa os 30 °C, nas mesmas condições, porém coberto por palhada (Oliveira; Borrozzino, 2018).

O modelo de balanço hídrico apresentou maior sensibilidade ao Ze do que aos demais parâmetros testados. O ISNA apresentou um aumento de 16, 33 e 44% para incrementos de 25, 50 e 75% na Ze, respectivamente (Figura 35), o que representa um efeito quatro a oito vezes maior do que o segundo parâmetro mais significativo, K_c .

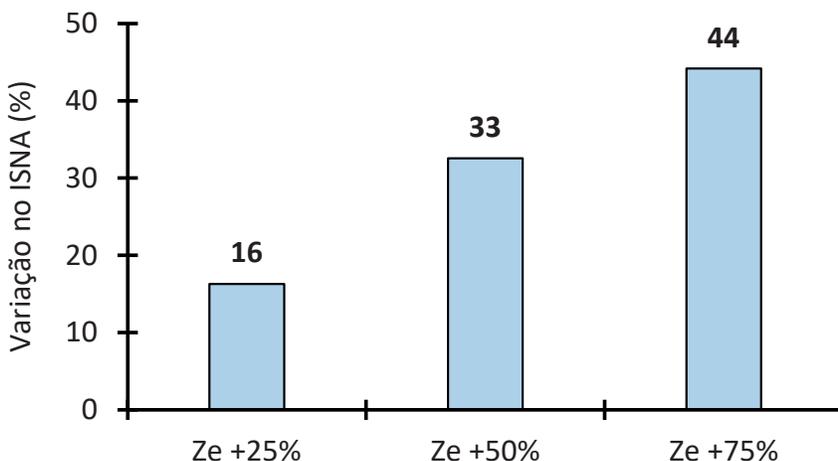


Figura 35. Variação percentual do índice de satisfação das necessidades de água (ISNA) para a cultura da soja em função dos aumentos de 25, 50 e 75% na profundidade efetiva do sistema radicular (Ze) considerado no modelo de balanço hídrico.

Estes resultados estão conformes com as avaliações geradas em outros estudos. De acordo com Franchini et al. (2009) e Pivetta et al. (2011), as práticas de manejo agrícola mais eficientes, aquelas associadas ao aprofundamento e melhor distribuição do sistema radicular, permitem criar melhores condições para as culturas em decorrência do aumento da disponibilidade de água e nutrientes. Isso reduz os estresses decorrentes do déficit hídrico, melhora a absorção de nutrientes e aumenta a produtividade em relação aos solos com restrições químicas e ou físicas.

No mesmo sentido, Battisti et al. (2016) estimaram o incremento de produtividade da soja com o aumento da profundidade radicular da cultura por meio de simulações com o modelo CSM-CROPGRO-Soybean, devidamente calibrado para três localidades do estado do Paraná. Nesse estudo os autores concluíram que o manejo dos solos para aumentar a profundidade de exploração das raízes é uma das principais formas de se alcançar altas produtividades na cultura da soja, o que vem sendo efetivamente observado nos Desafios Nacionais de Máxima Produtividade do CESB. Ainda de acordo com os autores, a forma eficiente de se obter tais resultados é por meio da ação conjunta de melhores práticas de manejo do solo e do uso de cultivares que apresentem alto potencial de desenvolvimento radicular.

Sendo assim, quanto maior for a Ze, maior será a disponibilidade hídrica para cultura, aumentando a reserva de água para períodos de estiagem. Considerando-se como exemplo os solos de textura média, com uma disponibilidade hídrica de 1,1 mm de água para cada centímetro de solo e uma profundidade efetiva do sistema radicular da soja de 50 cm, utilizado no referencial médio do Zarc Soja, a cultura teria uma reserva de até 55 mm, total que corresponde a um consumo hídrico de cerca de 9 dias sob uma demanda de 6 mm dia⁻¹. Ou seja, a planta não sofreria deficiência hídrica significativa por um período de até 9 dias sem chuva. Em uma condição mais favorável, com sistema radicular de 120 cm, como observado nas áreas campeãs de produtividade do CESB (Battisti et al., 2016), tem-se um total de 132 mm disponíveis para a cultura, reserva suficiente para 22 dias de estiagem sem perdas significativas por deficiência hídrica.

Avaliação de impactos nos resultados do Zarc

Os resultados aqui apresentados consideram apenas uma amostra do Brasil que inclui os municípios dos estados de Alagoas, Piauí, Ceará, Tocantins, Goiás e do DF. Esses Estados foram selecionados como exemplo por apresentarem riscos variados, conforme o município, e pelo fato de seus períodos de semeadura e níveis de risco serem definidos unicamente pelo risco hídrico. Ou seja, não há interferências significativas de outros fatores de risco como geadas e temperaturas muito baixas, temperaturas muito elevadas ou umidade excessiva.

Dessa forma, foram avaliados um total de 896 municípios onde os períodos de semeadura e níveis de risco são definidos pelo risco hídrico, sendo as diferenças, entre NMs, aquelas que ocorreriam de fato em um Zoneamento sem interferências de impedimentos diferentes do risco hídrico. Porém, cabe enfatizar que os parâmetros finais para cada NM para um Zoneamento real da soja podem apresentar algumas variações em relação aos utilizados nesta avaliação. Para saber os parâmetros reais do Zarc de cada cultura ou diferenciações por NM, o interessado deverá consultar a Nota Técnica de Zarc publicada no DOU na Portaria de Zoneamento pelo Mapa.

No Solo 1, o período médio de semeadura da amostra passou de 6,3 decên-dios no NM1 para 7,3, 8,6 e 9,5 decên-dios em NM2, NM3 e NM4, respectiva-

mente. Tendência similar foi observada nos demais tipos de solo (Figura 36), com uma diferença média de 1 a 1,3 decêndios entre um NM e o seguinte. Disso resulta que a diferença observada entre o pior e o melhor NM chegou a 3,2 decêndios no solo 1; 2,8 decêndios no solo 2; e 3,3 decêndios no solo 3.

Esse tipo de resposta, ou seja, alongamento dos períodos de semeadura, representa uma vantagem significativa para os sistemas de produção baseados em 1ª safra e 2ª safra, especialmente quando é comum a implantação da 2ª safra no final do período viável de semeadura, configurando safra sob condições de elevado risco hídrico. Frequentemente, em anos que ocorre atraso na 1ª safra, a 2ª safra pode ser mais comprometida. Vale ressaltar que municípios onde o final do período de semeadura é definido pelo aumento do risco térmico ou, eventualmente, excesso de chuva, então não ocorrerá mudança na duração do período em função dos NMs, uma vez que os critérios envolvidos no enquadramento nos referidos níveis (Tabela 9) não alteram de forma direta a suscetibilidade da cultura a estes eventos adversos.

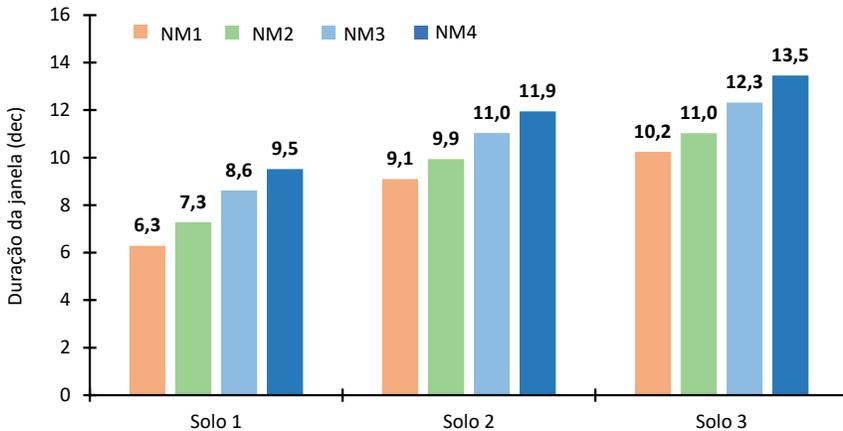


Figura 36. Duração média, em decêndios (dec), dos períodos de semeadura por tipo de solo e nível de manejo (NM) em AL, PI, CE, TO e DF.

Um segundo aspecto positivo é a redução do nível de risco em determinados decêndios do período de semeadura (Figura 37). Com a melhoria das condições hídricas do solo, alguns decêndios de semeadura mudam de nível de risco, passando de 40% para 30%, 30% para 20% e até 40% para 20% dependendo do NM considerado. No solo 1, por exemplo, a proporção de decêndios com risco de 20% muda de 58% em NM1 para 70% em NM4. No

solo tipo 3, o impacto é bem menor. Este solo naturalmente apresenta uma condição bem mais favorável de armazenamento hídrico, de forma que a proporção de decêndios com baixo risco passa de 71% em NM1 para 78% em NM4.

O terceiro aspecto positivo é o aumento de produtividade auferido em função da melhoria do manejo de solo. Apesar da resposta em termos de produtividade não estar explicitamente quantificada nesta avaliação, é amplamente conhecida a relação entre produtividade e fertilidade química e física do solo (Michalovicz et al., 2014; Li et al., 2021). Os NMs 3 e 4 se baseiam em indicadores que refletem uma evidente melhoria nas propriedades físicas e químicas do solo, que influi diretamente no vigor vegetativo da cultura e resulta em maior produtividade.

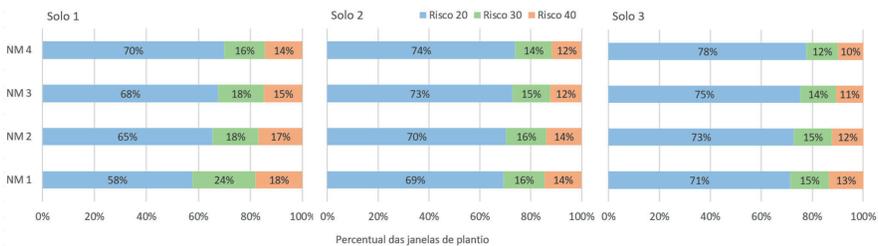


Figura 37. Percentual das janelas de semeadura de acordo com o nível de risco e nível de manejo (NM), nos estados de AL, PI, CE, TO e DF.

Tendo como parâmetro de comparação os resultados obtidos com NM1 e agrupando os municípios em subconjuntos em função do tamanho dos períodos de semeadura, percebe-se um aumento mais significativo no conjunto de municípios com períodos mais curtos do que em municípios com períodos mais longos (Tabela 15). No caso do solo 1, o agrupamento de municípios com períodos entre 1 e 3 decêndios em NM1 apresentou um aumento médio de 4,3 decêndios em NM4. Em municípios com períodos entre 11 e 12 decêndios em NM1, o aumento em NM4 foi de 3,1 decêndios. No solo 2, essa diferença chegou a 5,2 entre NM1 e NM4 nos municípios com períodos de 1 a 3 decêndios.

Tabela 15. Número de municípios com duração de períodos de semeadura de 1 a 3, 4 a 6, 7 a 9, 11 a 12 e > 12 decêndios, e duração média dos períodos de semeadura em cada grupamento, considerando o nível de manejo 1 (NM1), e incrementos de períodos pelas médias observadas em NM2, NM3 e NM4.

Solo	NM1			NM2	NM3	NM4
	Períodos (decêndios)	Núm. de municípios	Período médio (decêndios)	Incremento sobre NM1 (decêndios)		
Solo 1	1 a 3	83	2,3	1,6	3,3	4,3
	4 a 6	146	4,7	1,1	2,3	3,1
	7 a 9	185	8,5	1,2	2,3	3,3
	11 a 12	254	10,8	0,9	2,4	3,1
	> 12	35	13,0	0,8	1,9	2,3
Solo 2	1 a 3	37	2,4	2,6	4,3	5,2
	4 a 6	164	5,3	1,0	2,1	3,0
	7 a 9	155	7,9	0,7	1,7	2,6
	11 a 12	170	11,2	0,6	1,7	2,3
	> 12	295	13,8	0,6	1,4	2,3
Solo 3	1 a 3	35	2,2	2,0	4,5	6,0
	4 a 6	111	5,3	1,1	2,5	3,7
	7 a 9	222	8,0	0,7	1,8	2,9
	11 a 12	164	11,3	0,8	2,0	2,9
	> 12	338	14,5	0,6	1,8	3,0

Os municípios que apresentam períodos de semeadura naturalmente longos encontram-se em regiões com período chuvoso mais extenso. Nessa condição, os níveis de risco são determinados especialmente pela condição climática favorável, de forma que a importância relativa do reservatório hídrico do solo para o resultado final do risco é menor. Por outro lado, justamente onde o regime pluviométrico tende a ser menos favorável, seja em quantidade ou regularidade das chuvas, o reservatório hídrico do solo passa a ter uma importância relativa maior.

O regime pluviométrico também é determinante para a forma de abertura ou fechamento dos períodos ou janelas de semeadura. Alguns municípios po-

senta a parametrização atualmente utilizada no Zarc, com os mesmos riscos climáticos por déficit hídrico. Os NMs 3 e 4 pressupõem melhorias na fertilidade química, física e biológica do solo via aprimoramento das práticas de manejo utilizadas, de forma a aumentar a disponibilidade de água e, assim, reduzir os riscos hídricos. Por sua vez, o NM1 é aplicável a áreas manejadas de forma inadequada, apresentando degradação dos atributos físicos, químicos e biológicos do solo e, conseqüentemente, maiores riscos de perdas por déficit hídrico.

Três parâmetros da metodologia do Zarc utilizados na determinação do risco hídrico para a cultura da soja, a Ze, a CL e o Kc inicial foram ajustados para melhor representar as condições da lavoura nos quatro NMs. Nesse sentido, a análise de sensibilidade indica que a Ze é o parâmetro que proporciona o maior impacto no ISNA e, por consequência, no risco hídrico associado à cultura da soja. Diante disso, a formação de um ambiente de solo favorável ao crescimento das raízes de soja é o principal fator que leva à redução do risco de perdas de produtividade por seca. Considerando que a variação da Ze é responsável por 90% das alterações nos resultados do Zarc, e que, em geral, as práticas que favorecem o desenvolvimento radicular são as mesmas que melhoram o armazenamento e os fluxos de água no solo, a modelagem para os NMs pode ser feita somente considerando a alteração na Ze, o que reduz o custo de processamento do Zarc em escala nacional, tornando-o mais ágil.

A análise de impacto da proposta, nos resultados do Zarc, demonstra redução do risco hídrico com maior duração do período de semeadura da soja em função do aperfeiçoamento das práticas de manejo do solo utilizadas nos NMs 3 e 4. Por analogia, e respeitadas as devidas proporções, é natural supor resultados semelhantes para outras culturas anuais de grãos em sequeiro, como o milho, por exemplo.

A magnitude da redução dos riscos de perdas por déficit hídrico, assim como do aumento do período de semeadura, é proporcionalmente maior em solos de textura mais arenosa e em localidades com menor quantidade ou maior irregularidade de distribuição de chuvas, ou seja, em regiões que naturalmente oferecem maiores riscos de perdas de produtividade por déficit hídrico. Assim, alterações realizadas nos parâmetros de modelagem resultam em diferenciação de risco hídrico entre os NMs no Zarc, o que certamente coloca em evidência as vantagens e estimula a adoção de boas práticas de manejo

do solo, auxiliando na definição de estratégias do planejamento da produção e da gestão de riscos.

Para tipificação das áreas de produção de soja nos NMs, são propostos sete indicadores com seus respectivos critérios, diretamente associados à qualidade do manejo e à fertilidade do solo, o que resulta em maior disponibilidade de água e maior crescimento radicular. Os indicadores refletem os três pilares que caracterizam o verdadeiro SPD (cobertura do solo, mínimo revolvimento e diversificação de espécies vegetais), amplamente reconhecido como tecnologia mitigadora de risco hídrico. São contemplados ainda indicadores relacionados à acidez superficial e subsuperficial (0-20 e 20-40 cm) e à fertilidade estrutural do solo. Adicionalmente, a verificação de conformidade aos critérios inerentes a cada um dos indicadores é técnica e economicamente viável, sendo possível por meio do acompanhamento do histórico da área, de análises químicas de solo de rotina e do DRES.

Referências

- ADEGAS, F. S.; VOLL, E.; GAZZIERO, D. L. P. Aspectos da biologia e manejo de plantas daninhas em plantio direto. In: SIMPÓSIO SOBRE MANEJO DE PLANTAS DANINHAS NO NORDESTE, 2., 2013, Campina Grande. **Desafios, avanços e soluções no manejo de plantas daninhas**: palestras. Brasília: Embrapa: SBCPD, 2013. p. 85-90. 1 CD-ROM.
- ADL, S. M.; COLEMAN, D. C.; READ, F. Slow recovery of soil biodiversity in sandy loam soils of Georgia after 25 years of no-tillage management. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 114, p. 323-334, 2005.
- ALLEN, R. G. Using the FAO-56 dual crop coefficient method over an irrigated region as part of an evapotranspiration intercomparison study. **Journal of Hydrology**, v. 229, p. 27-41, 2000.
- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Evapotranspiración del cultivo**: guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Roma: FAO, 2006. 298 p. (FAO. Irrigation and Drainage Paper, 56).
- ALLEONI, L. R. F.; CAMBRI, M. A.; CAIRES, E. F.; GARBUJO, F. J. Acidity and aluminum speciation as affected by surface liming in tropical no-till soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 74, n. 3 p. 1010-1017, 2010.
- ALLMARAS, R. R.; HALLAUER, E. A.; NELSON, W. W.; EVANS, S. D. **Surface energy balance and soil thermal property modifications by tillage-induced soil structure**. Minnesota: Agricultural Experiment Station, University of Minnesota, 1977. 40 p. (University of Minnesota. Technical Bulletin 306).

ALLMARAS, R. R.; NELSON, W. W.; VOORHEES, W. B. Soybean and corn rooting in Southwestern Minnesota: I. Water-uptake sink. **Soil Science Society of America Journal**, v. 39, p. 764-771, 1975a.

ALLMARAS, R. R.; NELSON, W. W.; VOORHEES, W. B. Soybean and corn rooting in Southwestern Minnesota: II. Root distributions and related water inflow. **Soil Science Society of America Journal**, v. 39, p. 772-777, 1975b.

ALMEIDA, A. M. R.; SEIXAS, C. D. S. **Soja: doenças radiculares e de hastes e inter-relações com o manejo do solo e da cultura**. Londrina: Embrapa Soja, 2010. 399 p.

ALMEIDA, A. M. R.; SEIXAS, C. D. S.; FARIAS, J. R. B.; OLIVEIRA, M. C. N. de; FRANCHINI, J. C.; DEBIASI, H.; COSTA, J. M. da; GAUDÊNCIO, C. de A. **Macrophomina phaseolina em soja**. Londrina: Embrapa Soja, 2014. 55 p. (Embrapa Soja. Documentos, 346).

ALMEIDA, C. D. S.; SOUZA, D. S. L.; SARTO, R. P.; FIRMINO, A. A. P.; SILVA, T. S.; MAGALHÃES, J. C. C.; SÁ, M. F. G.; ROCHA, T. L. **Fracionamento de extrato aquoso de sementes de *Crotalaria spectabilis* efetivo no controle de juvenis de segundo estágio (J2) de *Meloidogyne incognita***. Brasília: Embrapa Recursos Genéticos e Biotecnologia, 2008. 10 p. (Embrapa Recursos Genéticos e Biotecnologia. Circular Técnica, 78).

ALMEIDA, R. E. de. **Evaporação de temperatura em solos mantidos com diferentes quantidades de resíduos em superfície**. 2011. 116 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

ALVAREZ, R.; STEINBACH, H. S. A review of the effects of tillage systems on some soil physical properties, water content, nitrate availability and crops yield in the Argentine Pampas. **Soil & Tillage Research**, v. 104, p. 1-15, 2009.

ANDRADE, J. G. **Perdas de água por evaporação de um solo cultivado com milho nos sistemas de plantio direto e convencional**. 2008. 93 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

ANDREA, M. C. da S.; VIEIRA, F. F.; DALLACORT, R.; BARBIERI, J. D.; FREITAS, P. S. L. de; TIEPPO, R. C.; ZOLIN, C. A.; KRAUSE, W.; DANIEL, D. F. Effect of soil coverage on dual crop coefficient of maize in a region of Mato Grosso, Brazil. **Journal of Agricultural Science**, v. 11, p. 143-155, 2019.

ANDREOLLA, V. R. M.; GABRIEL FILHO, A. Demanda de potência de uma semeadora com dois tipos de sulcadores em áreas compactadas pelo pisoteio de animais no sistema integração lavoura-pecuária. **Engenharia Agrícola**, v. 26, p. 768-776, 2006.

ANGHINONI, I.; BARBER, S. A. Phosphorus application rate and distribution in the soil and phosphorus uptake by corn. **Soil Science Society of America Journal**, v. 44, p. 1041-1044, 1980b.

ANGHINONI, I.; BARBER, S. A. Phosphorus influx and growth characteristics of corn roots as influenced by phosphorus supply. **Agronomy Journal**, v. 72, p. 685-688, 1980a.

ANTONELLO, M. C. **Simulação do balanço hídrico e rendimento de grãos de soja em condição irrigada e de sequeiro no Rio Grande do Sul**. 2019. 66 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

ARIAS, D.; MENDES, P.; ABEL, P. **Revisão rápida e integrada da gestão de riscos agropecuários no Brasil**. Brasília: Banco Mundial, 2015. 76 p.

ASABE - AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL AND BIOLOGICAL ENGINEERS. **Procedures for using and reporting data obtained with the soil cone penetrometer**. Saint Joseph: ASABE, 2006b. p. 1052-1055. (ASABE standard. ASAE EP542 FEB99).

ASABE - AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL AND BIOLOGICAL ENGINEERS. **Soil cone penetrometer**. Saint Joseph: ASABE, 2006a. p. 902-904. (ASABE standard. ASAE S313.3 FEB04).

ÁVILA, A. M. H.; FARIAS, J. R. B.; PINTO, H. S.; PILAU, F. G. Climatic restrictions for maximizing soybean yields. In: BOARD, J. E. (ed.). **A comprehensive survey of international soybean research** - Genetics, Physiology, Agronomy and Nitrogen Relationships. 1 ed. Croatia: In Tech, 2013. v. 1, p. 367-375.

ÁVILA, V. S. de. **Balço hídrico do solo e partição da evapotranspiração de soja, milho e feijão submetidos à irrigação deficitária no Sul do Brasil**. 2016. 89 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

BABUJIA, L. C.; HUNGRIA, M.; FRANCHINI, J. C.; BROOKES, P. C. Microbial biomass and activity at various soil depths in a Brazilian Oxisol after two decades of no-tillage and conventional tillage. **Soil Biology & Biochemistry**, v. 42, p. 2174-2181, 2010.

BÁEZ, M. S. A. **Partição da evapotranspiração, rendimento de grãos e retorno econômico da soja cultivada sob diferentes estratégias de irrigação**. 2017. 82 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

BARBIERI, J. D.; FREITAS, P. S. L. de; DALLACORT, R.; REZENDE, R.; SILVA, A. L. B. R. da; FENNER, W.; CARVALHO, M. A. C. de. Influence of soil coverage on evapotranspiration and dual crop coefficients on soybean. **Journal of Experimental Agriculture International**, v. 42, p. 111-125, 2020.

BCB - BANCO CENTRAL DO BRASIL. **Matriz de dados do Proagro**, 2022b. Disponível em: <https://www.bcb.gov.br/estabilidade/financeira/proagro>. Acesso em: 20 ago. 2022.

BCB - BANCO CENTRAL DO BRASIL. **Programa de Garantia da Atividade Agropecuária – PROAGRO: relatório circunstanciado - 1991 a 1998**. 2022a. Disponível em: <https://www.bcb.gov.br/htms/proagro/1998/rel01.asp?frame=1>. Acesso em: 20 ago. 2022.

BARVIERA, G.; DALLACORT, R.; FREITAS, P. S. L. de; BARBIERI, J. D.; DANIEL, D. F. Dual crop coefficient for the early-cycle soybean cultivar SoyTech 815 RR. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 24, p. 75-81, 2020.

BARON, C.; CLOPES, A.; PEREZ, P.; MULLER, B.; MARAUX, F. **Manuels d'utilisation de: SARRAMET, SARRABIL et SARRAZON**. Montpellier: CIRAD, 1996.

BARROS, L. C. G.; HANKS, K. J. Evapotranspiration and yield of beans as affected by mulch and irrigation. **Agronomy Journal**, v. 85, p. 692-697, 1993.

BASSO, L. J. **Estimativa de rendimento e viabilidade econômica da soja irrigada**. 2019. 66 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

- BATTISTI, R.; SENTELHAS, P. C. Improvement of soybean resilience to drought through deep root system in Brazil. **Agronomy Journal**, v. 109, p. 1612-1622, 2017.
- BATTISTI, R.; SENTELHAS, P. C.; SAKO, H.; SHIOZAKI, E. A. **Incremento de produtividade da soja**: Redução do déficit hídrico associado à melhor distribuição e profundidade do sistema radicular. Sorocaba: CESB, 2016. 14 p. (CESB. Circular Técnica 1).
- BAYER, C.; GOMES, J.; ZANATTA, J. A.; VIEIRA, F. C. B.; DIECKOW, J. Mitigating greenhouse gas emissions from a subtropical Ultisol by using long-term no-tillage in combination with legume cover crops. **Soil & Tillage Research**, v. 161, p. 86-94, 2016.
- BAYON, R. C. le; WEISSKOPF, L.; MARTINOIA, E.; JANSÁ, J.; FROSSARD, E.; KELLER, F.; FÖLLMI, K. B.; GOBAT, J. M. Soil phosphorus uptake by continuously cropped *Lupinus albus*: a new microcosm design. **Plant and Soil**, v. 283, p. 309-321, 2006.
- BENGOUGH, A. G.; BRANSBY, M. F.; HANS, J.; MCKENNA, S. J.; ROBERTS, T. J.; VALENTINE, T. A. Root responses to soil physical conditions: growth dynamics from field to cell. **Journal of Experimental Botany**, v. 57, p. 437-447, 2006.
- BENGOUGH, A. G.; MCKENZIE, B. M.; HALLETT, P. D.; VALENTINE, T. A. Root elongation, water stress, and mechanical impedance: a review of limiting stresses and beneficial root tip traits. **Journal of Experimental Botany**, v. 62, p. 59-68, 2011.
- BERGAMASCHI, H.; BERLATO, M. A.; MATZENAUER, R.; FONTANA, D. C.; CUNHA, G. R.; SANTOS, M. L. V.; FARIAS, J. R. B.; BARNI, N. A. **Agrometeorologia aplicada à irrigação**. 2. ed. Porto Alegre: Ed. Universidade/UFRGS, 1999. 125 p.
- BERGAMASCHI, H.; DALMAGO, G. A.; BERGONCI, J. I.; BIANCHI, C. A. M.; HECKLER, B. M. M.; COMIRAN, F. Solar radiation intercepted by maize crops as function of soil tillage systems and water availabilities. In: INTERNATIONAL SOIL CONSERVATION ORGANISATION CONFERENCE, 13., 2004, Brisbane. **Proceedings...** Brisbane: ASSS/IECA, 2004.
- BERGAMIN FILHO, A. Epidemiologia: conceitos e benefícios. In: BERGAMIN FILHO, A.; KIMATI, H.; AMORIM, L. (ed.). **Manual de fitopatologia**: princípios e conceitos. São Paulo: Agronômica Ceres, 1995. v. 1, p. 540-553.
- BERTOLLO, A. M.; MORAES, M. T.; FRANCHINI, J. C.; SOLTANGHEISI, A.; BALBINOT JUNIOR, A. A.; LEVIEN, R.; DEBIASI, H. Precrops alleviate soil physical limitations for soybean root growth in an Oxisol from southern Brazil. **Soil & Tillage Research**, v. 206, 104820, 2021.
- BETIOLI JUNIOR, E.; MOREIRA, W. H.; TORMENA, C. A.; FERREIRA, C. J. B.; SILVA, A. P. da; GIAROLA, N. F. B. Intervalo hídrico ótimo e grau de compactação de um Latossolo Vermelho após 30 anos sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, p. 971-982, 2012.
- BOND, J. J.; WILLIS, W. O. Soil water evaporation: surface residue rate and placement effects. **Soil Science Society of America Journal**, v. 33, p. 445-448, 1969.
- BONETTI, J. de A.; ANGHINONI, I.; GUBIANI, P. I.; CECAGNO, D.; MORAES, M. T. de. Impact of a long-term crop-livestock system on the physical and hydraulic properties of an Oxisol. **Soil & Tillage Research**, v. 186, p. 280-291, 2019.
- BOOTE, K. J.; JONES, J. W.; BATCHELOR, W. D.; NAFZIGER, E. D.; MYERS, O. Genetic coefficients in the CROPGRO-Soybean model: Link to field performance and genomics. **Agronomy Journal**, v. 95, p. 32-51, 2003.

BORU, G.; VANTOAI, T.; ALVES, J.; HUA, D.; KNEE, M. Responses of soybean to oxygen deficiency an elevated root-zone carbon dioxide concentration. **Annals of Botany**, v. 91, p. 447-453, 2003.

BRADFORD, J. M. Penetrability. In: KLUTE, A. (ed.) **Methods of soil analysis: physical and mineralogical methods**, Madison: American Society of Agronomy, 1986. p. 463-478.

BRAGAGNOLO, N.; MIELNICZUK, J. Cobertura do solo por palha de trigo e seu relacionamento com a temperatura e umidade do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 14, p. 367-374, 1990.

BRANDÃO, V. dos S.; CECÍLIO, R. A.; PRUSKI, F. F.; SILVA, D. D. da. **Infiltração da água no solo**. 3. ed. Viçosa: Editora UFV, 2006. 120 p.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Programa Nacional de Zoneamento Agrícola de Risco Climático** - Zarc. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/riscos-seguro/programa-nacional-de-zoneamento-agricola-derisco-climatico/zoneamento-agricola>. Acesso em: 05 dez. 2021.

BUSSCHER, W. J.; BAUER, P. J.; CAMP, C. R.; SOJKA, R. E. Correction of cone index for soil water content differences in a coastal plain soil. **Soil & Tillage Research**, v. 43, p. 205-217, 1997.

CAIRES, E. F.; BARTH, G.; GARBUIO, F. J.; CHURKA, S. Soil acidity, liming and soybean performance under no-till. **Scientia Agricola**, v. 65, p. 532-540, 2008.

CALEGARI, A.; TIECHER, T.; HARGROVE, W. L.; RALISCH, R.; TESSIER, D.; TOURDONNETF, S. de; GUIMARÃES, M. de F.; RHEINHEIMER, D. S. Long-term effect of different soil management systems and winter crops on soil acidity and vertical distribution of nutrients in a Brazilian Oxisol. **Soil & Tillage Research**, v. 133, p. 32-39, 2013.

CHABAT, M. **Influência dos resíduos vegetais na superfície do solo na dinâmica de evaporação de água e temperatura do solo**. 2010. 92 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

CHARDON, W. J.; OENEMA, O.; CASTILHO, R.; VRIESEMA, R.; JAPENGA, J.; BLASUV, D. Organic phosphorus in solutions and leachates from soils treated with animal slurries. **Journal of Environmental Quality**, v. 26, p. 372-378, 1997.

CHAVARRÍA, D. N.; VERDENELLI, R. A.; SERRI, D. L.; RESTOVICH, S. B.; ANDRIULO, A. E.; MERILES, J. M.; VARGAS-GIL, S. Effect of cover crops on microbial community structure and related enzyme activities and macronutrient availability. **European Journal of Soil Biology**, v. 76, p. 74-82, 2016.

CHECHI, V. S. de. **Monitoramento do requerimento hídrico e rendimento de soja e milho via combinação de modelo de balanço hídrico do solo e sensoriamento remoto**. 2019. 99 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

CHEN, S. Y.; ZHANG, X. Y.; PEI, D.; SUN, H. Y.; CHEN, S. L. Effects of straw mulching on soil temperature, evaporation, and yield of winter wheat: field experiments on the North China Plain. **Annals of Applied Biology**, v. 150, p. 261-268, 2007.

CONTE, O.; FRANCHINI, J. C.; DEBIASI, H.; BALBINOT JUNIOR, A. A. Manejo do solo. In: SEIXAS, C. D. S.; NEUMAIER, N.; BALBINOT JUNIOR, A. A.; KRZYZANOWSKI, F. C.; LEITE, R. M. V. B. de C. (ed.). **Tecnologias de produção de soja**. Londrina: Embrapa Soja, 2020. p. 55-80. (Embrapa Soja. Sistemas de Produção, 17).

COSTA, C. H. M. da; CRUSCIOL, C. A. C. Long-term effects of lime and phosphogypsum application on tropical no-till soybean-oat-sorghum rotation and soil chemical properties. **European Journal of Agronomy**, v. 74, p. 119-132, 2016.

COSTA, S. E. V. G. de A.; SOUZA, E. D. de; ANGHINONI, I.; FLORES, J. P. C.; CAO, E. G.; HOLZSCHUH, M. J. Phosphorus and root distribution and corn growth as related to long-term tillage systems and fertilizer placement. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, p. 1237-1247, 2009.

DALMAGO, G. A.; BERGAMASCHI, H.; COMIRAN, F.; BIANCHI, C. A. M. Reflectância para a radiação fotossinteticamente ativa e fluxo de calor em solo sob plantio direto e preparo convencional. In: REUNIÓN ARGENTINA DE AGROMETEOROLOGÍA, 10.; REUNIÓN LATINOAMERICANA DE AGROMETEOROLOGÍA 4., 2004, Mar del Prata. **Anais...** Mar del Prata: FCEyN/UBA/INTA, 2004.

DALMAGO, G. **Dinâmica da água no solo em cultivos de milho sob plantio direto e preparo convencional**. 2004. 245 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

DANTAS, J. P. de S. **Perfil de extração de água do solo pela cultura da soja de alta e baixa produtividade de grãos**. 2018. 59 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Ciências, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade Estadual de São Paulo, Piracicaba.

DEBIASI, H.; FRANCHINI, J. C.; BALBINOT JUNIOR, A. A. Estratégias essenciais de manejo do solo como fator determinante da produtividade e renda. In: FANCELLI, A. L. (org.). **Feijão: condicionantes da produtividade**. 1. ed. Piracicaba: ESALQ, 2017, p. 41-76.

DEBIASI, H.; FRANCHINI, J. C.; BALBINOT JUNIOR, A. A.; CONTE, O. **Diversificação de espécies vegetais como fundamento para a sustentabilidade da cultura da soja**. Londrina: Embrapa Soja, 2015. 60 p. (Embrapa Soja. Documentos, 366).

DEBIASI, H.; FRANCHINI, J. C.; BALBINOT JUNIOR, A. A.; CONTE, O. Diversificação de espécies vegetais em sistemas de produção. In: SEIXAS, C. D. S.; NEUMAIER, N.; BALBINOT JUNIOR, A. A.; KRZYZANOWSKI, F. C.; LEITE, R. M. V. B. de C. (ed.). **Tecnologias de produção de soja**. Londrina: Embrapa Soja, 2020. p. 93-118. (Embrapa Soja. Sistemas de Produção, 17).

DEBIASI, H.; FRANCHINI, J. C.; CONTE, O.; BALBINOT JUNIOR, A. A.; TORRES, E.; SARAIVA, O. F.; OLIVEIRA, M. C. N. de. **Sistemas de preparo do solo: trinta anos de pesquisas na Embrapa Soja**. Londrina: Embrapa Soja, 2013. 72 p. (Embrapa Soja. Documentos, 342).

DEBIASI, H.; FRANCHINI, J. C.; GONÇALVES, S. L. **Manejo da compactação do solo em sistemas de produção de soja sob semeadura direta**. Londrina: Embrapa Soja, 2008. 20 p. (Embrapa Soja. Circular Técnica, 63).

- DENARDIN, J. E.; KOCHHANN, R. A. Desafios à caracterização de solo fértil em manejo e conservação do solo e da água. In: REUNIÃO SULBRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO, 6., 2006, Passo Fundo. **Fertilidade em solo... (re)emergindo sistêmica**: resumos e palestras. Passo Fundo: Embrapa Trigo: SBCS - Núcleo Regional Sul, 2006. 8 p. 1 CD-ROM.
- DENARDIN, J. E.; SATTTLER, A.; SANTI, A. A erosão está de volta? **Boletim Informativo Federação Brasileira de Plantio Direto na Palha**, v. 7, n. 31, p. 6, 2008. Disponível em: http://www.febrapdp.org.br/informativos/ed31_febra.pdf. Acesso em: 05 ago. 2021.
- DERPSCH, R.; SIDIRAS, N.; ROTH, C. H. Results of studies made from 1977 to 1984 to control erosion by cover crops and no-tillage techniques in Paraná, Brazil. **Soil & Tillage Research**, v. 8, p. 253-263, 1986.
- DEXTER, A. R. Advances in characterization of soil structure. **Soil & Tillage Research**, v. 11, p. 199-238, 1988.
- DEXTER, A. R.; CZYZ, E. A.; GAT, O. P. A method for prediction of soil penetration resistance. **Soil & Tillage Research**, v. 93, p. 412-419, 2007.
- DIAS, W. P.; ASMUS, G. L.; SILVA, J. F. V.; GARCIA, A.; CARNEIRO, G. E. S. Nematoides. In: ALMEIDA, A. M. R.; SEIXAS, C. D. S. (ed.) **Soja**: doenças radiculares e de hastes e inter-relações com o manejo do solo e da cultura. Londrina: Embrapa Soja, 2010. p. 173-206.
- DREW, M. C. Comparison of the effects of a localized supply of phosphate, nitrate, ammonium, and potassium on the growth of the seminal root system, and the shoot, in barley. **New Phytologist**, v. 75, p. 479-490, 1975.
- FAÉ, G. S.; KEMANIAN, A. R.; ROTH, G. W.; WHITE, C.; WATSON, J. E. Soybean yield in relation to environmental and soil properties. **European Journal of Agronomy**, v. 118, 126070, 2020.
- FARIAS, J. R. B.; NEPOMUCENO, A. L.; NEUMAIER, N. **Ecofisiologia da Soja**. Londrina: Embrapa Soja, 2007. 9 p. (Embrapa Soja. Circular Técnica, 48).
- FARIAS, J. R. B.; NEUMAIER, N.; NEPOMUCENO, A. L. Soja. In: MONTEIRO, J. E. B. A. (ed.) **Agrometeorologia dos cultivos**: o fator meteorológico na produção agrícola. Brasília: INMET, 2009. p. 261-278.
- FONTOURA, S. M. V.; BAYER, C. **Trinta anos do experimento de manejo de solo, Guarapuava, PR**. Guarapuava: FAPA, 2008. 55 p.
- FRANCHINI, J. C.; BALBINOT JUNIOR, A. A.; DEBIASI, H.; NEPOMUCENO, A. L. Root growth of soybean cultivars under different water availability conditions. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 38, p. 715-724, 2017.
- FRANCHINI, J. C.; BALBINOT JUNIOR, A. A.; JORGE, L. A. de C.; DEBIASI, H.; DIAS, W. P.; GODOY, C. V.; OLIVEIRA JUNIOR, A. de; CORREA, F. B.; OLIVEIRA, M. C. N. de **Uso de imagens aéreas obtidas com drones em sistemas de produção de soja**. Londrina: Embrapa Soja, 2018. 39 p. (Embrapa Soja. Documentos, 408).
- FRANCHINI, J. C.; DEBIASI, H.; BALBINOT JUNIOR, A. A.; TONON, B. C.; FARIAS, J. R. B.; OLIVEIRA, M. C. N. de; TORRES, E. Evolution of crop yields in different tillage and cropping systems over two decades in southern Brazil. **Field Crops Research**, v. 137, p. 178-185, 2012.

- FRANCHINI, J. C.; DEBIASI, H.; SACOMAN, A.; NEPOMUCENO, A. L.; FARIAS, J. R. B. **Manejo do solo para redução das perdas de produtividade pela seca**. Londrina: Embrapa Soja, 2009. 39 p. (Embrapa Soja. Documentos, 314).
- FRANCHINI, J. C.; PAVAN, M. A.; MIYAZAWA, M. Redistribution of phosphorus in soil through cover crop roots. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, v. 47, p. 381-386, 2004.
- FRANCHINI, J. C.; VILA, F. G.; CABRERA, F.; MIYAZAWA, M.; PAVAN, M. A. . Rapid transformations of plant water soluble organic compounds in relation to cation mobilization in an acid soil. **Plant and Soil**, v. 231, p. 55-63, 2001.
- FREITAS, L. da R.; GUBIANI, P. I.; MULLAZZANI, R. P.; MINELLA, J. P. G.; LONDERO, A. L. Terracing increases soil available water to plants in no-tillage. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 45, e0210046, 2021.
- FREITAS, P. S. L. de; GAVA, R.; FARIA, R. T. de; REZENDE, R.; VIEIRA, P. V. D. Soil evaporation under different straw mulch fractions. **African Journal of Agricultural Research**, v. 10, p. 1793-1800, 2014.
- FREITAS, P. S. L. de; MANTOVANI, E. C.; SEDIYAMA, G. C.; COSTA, L. C. Efeito da cobertura de resíduo da cultura do milho na evaporação da água do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 8, p. 85-91, 2004.
- FREITAS, P. S. L. de; MANTOVANI, E. C.; SEDIYAMA, G. C.; COSTA, L. C. Influência da cobertura de resíduos de culturas nas fases da evaporação direta da água do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 10, p. 104-111, 2006.
- FUENTES-LLANILLO, R.; TELLES, T. S.; SOARES JUNIOR, D.; MELO, T. R. de; FRIEDRICH, T.; KASSAM, A. Expansion of no-tillage practice in conservation agriculture in Brazil. **Soil & Tillage Research**, v. 208, 104877, 2021.
- FUKAMI, J.; CERZINI, P.; HUNGRIA, M. *Azospirillum*: benefits that go far beyond biological nitrogen fixation. **AMB Express**, v. 8, 73, 2018. 12 p.
- GARAY, A. F.; WILHELM, W. Root System characteristics of two soybean isolines undergoing water stress condition. **Agronomy Journal**, v. 75, p. 973-977, 1983.
- GASPARIM, E.; RICIERI, R. P.; SILVA, S. de L.; DALLACORT, R.; GNOATTO, E. Temperatura no perfil do solo utilizando duas densidades de cobertura e solo nu. **Acta Scientiarum**, v. 27, p. 107-115, 2005.
- GAVA, R.; FARIA, R. T. de; FREITAS, P. S. L. de; LENA, B. P. Retenção de umidade pela cobertura morta em sistema de plantio direto. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 38., 2009, Juazeiro e Petrolina. **Anais...** Jaboticabal: SBEA, 2009.
- GAVA, R.; FREITAS, P. S. L. de; FARIA, R. T. de; REZENDE, R.; FRIZZONE, J. A. Soil water evaporation under densities of coverage with vegetable residue. **Engenharia Agrícola**, v. 33, p. 89-98, 2013.
- GEBRIM, F. de O.; NOVAIS, R. F.; SILVA, I. R. da; SCHULTHAIS, F.; VERGÜTZ, L.; PROCÓPIO, L. C.; MOREIRA, F. F.; JESUS, G. L. de. Mobility of inorganic and organic phosphorus forms under different levels of phosphate and poultry litter fertilization in soils. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, p. 1195-1205, 2010.

GILL, B. S.; JALOTA, S. K. Evaporation from soil in relation to residue rate, mixing depth, soil texture and evaporativity. **Soil Technology**, v. 8, p. 293-301, 1996.

GOLDCHIN, A.; BALDOCK, J. A.; OADES, J. M. A model linking organic matter decomposition, chemistry, an aggregate dynamic. In: LAL, R.; KIMBLE, J. M.; FOLLET, R. F.; STEWART, B. **Soil process and the carbon cycle**. Boca Raton: CRC Press, 1997. p. 245-266.

GRAUER, U. E.; HORST, W. J. Modeling cation amelioration of aluminium phytotoxicity. **Soil Science Society of America Journal**, v. 56, p. 166-172, 1992.

GUIMARÃES, M. F.; NOGUEIRA, J. M. A experiência norte-americana com o seguro agrícola: lições ao Brasil? **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 47, p. 27-58, 2009.

HAMZA, M. A.; ANDERSON, W. K. Soil compaction in cropping systems: A review of the nature, causes and possible solutions, **Soil & Tillage Research**, v. 82, p. 121-145, 2005.

HANSEL, F. D.; AMADO, T. J. C.; DIAZ, D. A. R.; ROSSO, L. H. M.; NICOLOSO, F. T.; SHORR, M. Phosphorus fertilizer placement and tillage affect soybean root growth and drought tolerance. **Agronomy Journal**, v. 109, p. 2936-2944, 2017.

HERZOG, R. L. S. **Resposta da soja em semeadura direta após aveia preta implantada em campo nativo, influenciada por quantidade de resíduo, irrigação e profundidade de atuação do sulcador da semeadora-adubadora**. 2003. 95 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

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

HILLEL, D. **Introduction to soil physics**. New York: Academic Press, 1982. 364 p.

HOOGENBOOM, G.; HUCK, M. G.; PETERSON, C. M. Root growth rate of soybean as affected by drought stress. **Agronomy Journal**, v. 79, p. 607-614, 1987.

HÖRBE, T.; MINELLA, J. P. G.; SCHNEIDER, F. J. A.; LONDERO, A. L.; GUBIANI, P. I.; MERTEN, G. H.; SCHLESNER, A. Managing runoff in rainfed agriculture under no-till system: potential for improving crop production. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 45, e0210015, 2021.

HUBER, K.; VANDERBORGHT, J.; JAVAUX, M.; VEREECKEN, H. Simulating transpiration and leaf water relations in response to heterogeneous soil moisture and different stomatal control mechanisms. **Plant and Soil**, v. 394, p. 109-126, 2015.

HUE, N. V.; CRADDOCK, G. R.; ADAMS, F. Effect of organic acids on aluminum toxicity in subsoils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 50, p. 28-34, 1986.

HUNGRIA, M.; NOGUEIRA, M. A. Fixação biológica de nitrogênio. In: SEIXAS, C. D. S.; NEUMAIER, N.; BALBINOT JUNIOR, A. A.; KRZYZANOWSKI, F. C.; LEITE, R. M. V. B. de C. (ed.). **Tecnologias de produção de soja**. Londrina: Embrapa Soja, 2020. p. 185-195 (Embrapa Soja. Sistemas de Produção, 17).

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change. **Climate Change 2021: The physical science basis. Part A: Global and Sectoral Aspects. Working Group I - Contribution to the sixth assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.** [Richard P. Allan; Paola A. Arias; Sophie Berger; Josep G. Canadell; Christophe Cassou; Deliang Chen; Annalisa Cherchi; Sarah L. Connors; et al. Approved Version. 3949 p. 2021. Disponível em: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_Full_Report.pdf. Acesso em: 09 ago. 2021.

JI, S.; UNGER, P. W. Soil water accumulation under different precipitation, potential evaporation, and straw mulch conditions. **Soil Science Society of America Journal**, v. 65, p. 442-448, 2001.

JIN, H.; HONGWEN, L.; RASAILY, R. G.; QINGJIE, W.; GUOHUA, C.; YANBO, S.; XIAODONG, Q.; LIJIN, L. Soil properties and crop yields after 11 years of no tillage farming in wheat-maize cropping system in North China Plain. **Soil & Tillage Research**, v. 113, p. 48-54, 2011.

JONES, J. W.; HOOGENBOOM, G.; PORTER, C. H.; BOOTE, K. J.; BATCHELOR, W. D.; HUNT, L. A.; WILKENS, P. W.; SINGH, U.; GIJSMAN, A. J.; RITCHIE, J. T. 2003. The DSSAT cropping system model. **European Journal of Agronomy**, v. 18, p. 235-265, 2003.

KASPAR, T. C.; STANLEY, C. D.; TAYLOR, H. M. Soybean root growth during the reproductive stages of development. **Agronomy Journal**, v. 70, p. 1105-1107, 1978.

KELTJENS, W. G.; TAN, K. Interactions between aluminium, magnesium and calcium with different monocotyledonous and dicotyledonous plant species. **Plant and Soil**, v. 155/156, p. 458- 488, 1993.

KIM, K.; PREZZI, M.; SALGADO, R.; LEE, W. Effect of penetration rate on cone penetration resistance in saturated clayey soils. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v.134, p.1142-1153, 2008.

KINRAIDE, T. B.; PARKER, D. R. Cation amelioration of aluminum toxicity in wheat. **Plant Physiology**, v. 84, p. 546-551, 1987.

KLEPKER, D.; ANGHINONI, I. Phosphate uptake and corn root distribution as affected by fertilizer placement and soil tillage. **Agronomy Trends In Agricultural Science**, v. 1, p. 111-115, 1993.

KOCHHANN, R. A.; DENARDIN, J. E.; FLORES, C. A.; FERREIRA, T. N.; CASSOL, E. A.; MONDARDO, A.; SCHWARZ, R. A. Enxurrada em sistema plantio direto. In: DENARDIN, J. E.; KOCHHANN, R. A.; FLORES, C. A.; FERREIRA, T. N.; CASSOL, E. A.; MONDARDO, A.; SCHWARZ, R. A. (ed.). **Manejo de enxurrada em sistema plantio direto**. Porto Alegre: Fórum Estadual de Solo e Água, 2005. p. 47-54.

KOVALESKI, S.; HELDWEIN, A. B.; DALMAGO, G. A.; CUNHA, G. R. da; FOCESATTO, E.; GOUVÊA, J. A. de; LISKA, B. Temperatura e fluxo de calor no solo em dossel de canola em função da distribuição da palha na superfície, em noites de ocorrência de geada. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 19., 2015, Lavras. **Agrometeorologia no século 21: o desafio do uso sustentável dos biomas brasileiros: anais...** Lavras: Sociedade Brasileira de Agrometeorologia, 2015. p. 317-323.

KUNZE, A.; COSTA, M. D.; EPPING, J.; LOFFAGUEN, J. C.; SCHUH, R.; LOVATO, P. E. Phosphatase activity in sandy soil influenced by mycorrhizal and non-mycorrhizal cover crops. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, p. 705-711, 2011.

LAL, R. Constraints to adopting no-till farming in developing countries. **Soil & Tillage Research**, v. 94, p. 1-3, 2007.

LEITNER, D.; KLEPSCH, S.; KNIEB, A.; SCHNEPF, A. The algorithmic beauty of plant roots - an L-System model for dynamic root growth simulation. **Mathematical and Computer Modelling of Dynamical Systems**, v. 16, n. 6, p. 575-587, 2010.

LEITNER, D.; MEUNIER, F.; BODNER, G.; JAVAUX, M.; SCHNEPF, A. Impact of contrasted maize root traits at flowering on water stress tolerance - a simulation study. **Field Crops Research**, v. 165, p. 125-137, 2014.

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

LI, H.; SHEN, J.; ZHANG, F.; CLAIROTTE, M.; DREVON, J. J.; LE CADRE, E.; HINSINGER, P. Dynamics of phosphorus fractions in the rhizosphere of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) and durum wheat (*Triticum turgidum durum* L.) grown in monocropping and intercropping systems. **Plant and Soil**, v. 312, p.139-150, 2008.

LI, X. F.; WANG, Z. G.; BAO, X. G.; SUN, J. H.; YANG, S. C.; WANG, P.; WANG, C. B.; WU, J. P.; LIU, X. R.; TIAN, X. L.; WANG, Y.; LI, J. P.; WANG, Y.; XIA, H. Y.; MEI, P. P.; WANG, X. F.; ZHAO, J. H.; YU, R. P.; ZHANG, W. P.; CHE, Z. X.; GUI, L. G.; CALLAWAY, R. M.; TILMAN, D.; LI, L. Long-term increased grain yield and soil fertility from intercropping. **Nature Sustainability**, v. 4, p. 943-950, 2021.

LIBARDI, P. L. **Dinâmica da água no solo**. Piracicaba: ESALQ/USP, 1995. 497 p.

LOPES, A. da S. **Manejo do solo e da irrigação na cultura do feijoeiro sob pivô central**. 2006. 141 f. Tese (Doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal.

LYRA, G. B.; SOUZA, J. L. de; TEODORO, I.; LYRA, G. B.; MOURA FILHO, G.; ARAÚJO JUNIOR, R. F. Conteúdo de água no solo em cultivo de milho sem e com cobertura morta na entrelinha na região de Arapiraca - AL. **Irriga**, v. 15, p. 173-183, 2010.

MAHDAVI, S. M.; NEYSHABOURI, M. R.; FUJIMAKI, H.; HERIS, A. M. Coupled heat and moisture transfer and evaporation in mulched soils. **Catena**, v. 151, p. 34-48, 2017.

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

MANFRON, P. A.; BACCHI, O. O. S.; DOURADO NETO, D.; PEREIRA, A. R.; MEDEIROS, S. L. P.; PILAU, F. G. Modelo da profundidade efetiva do sistema radicular na cultura de milho em função de graus-dia acumulados. **Revista Brasileira Agrometeorologia**, v. 11, p. 327-332, 2003.

MARIANO, D. C.; FREITAS, P. S. L. de; FARIA, R. T.; REZENDE, R.; DALLACORT, R.; SILVA, A. L. B. da. Evaporation of soil water based on the quantity and uniformity of crop waste distribution in soil superficies. **African Journal of Agricultural Research**, v. 11, p. 4726-4734, 2016.

MARQUES, D. V. **Evapotranspiração e biomassa de culturas agrícolas em sistema convencional e plantio direto via sensoriamento remoto em Uruçuí - PI**. 2017. 37 f. Monografia (Curso de Agronomia) - Universidade Federal da Paraíba, Areia.

- MARTINAZZO, R. **Diagnóstico da fertilidade de solos em áreas sob plantio direto consolidado**. 2006. 82 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.
- McCUEN, R. R.; SNYDER, W. M. **Hydrologic modeling statistical methods and applications**. New York: Prentice Hall and Englewood Cliffs, 1986. 586 p.
- McGREGOR, K. C.; CULLUM, R. F.; MUTCHLER, C.K.; JOHNSON, J. R. **Long-term no-till and conventional-till soybean yields (1983-1999)**. Mississippi State, USA: MAFES, 2006. 14 p. (MAFES. Bulletin, 1146).
- MERTEN, G. H.; ARAÚJO, A. G.; BISCAIA, R. C. M.; BARBOSA, G. M. C.; CONTE, O. No-till surface runoff and soil losses in southern Brazil. **Soil & Tillage Research**, v. 152, p. 85-93, 2015.
- MICHALOVICZ, L. M.; MÜLLER, M. M. L.; FOLONI, J. S. S.; KAWAKAMI, J.; NASCIMENTO, R. do; KRAMER, L. F. M. Soil fertility, nutrition and yield of maize and barley with gypsum application on soil surface in no-till. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, p.1496-1505, 2014.
- MODOLO, A. J.; FRANCHIN, M. F.; TROGELLO, E.; ADAMI, P. F.; SCARSI, M.; CARNIELETTO, R. Semeadura de milho com dois mecanismos sulcadores sob diferentes intensidades de pastejo. **Engenharia Agrícola**, v. 33, p. 1200-1209, 2013.
- MOLIN, J. P.; MAGALHÃES, R. P. de; FAULIN, G. D. C. Análise espacial da ocorrência do índice de cone em área sob semeadura direta e sua relação com fatores do solo. **Engenharia Agrícola**, v. 26, p. 442-452, 2006.
- MONTEIRO, J. E. B. A. **Agrometeorologia dos cultivos: o fator meteorológico na produção agrícola**. Brasília, DF: INMET, 2009. 530 p.
- MORAES, M. T. de; BENGOUGH, A. G.; DEBIASI, H.; FRANCHINI, J.C.; LEVIEN, R.; SCHNEPF, A.; LEITNER, D. 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, p. 1-26, 2018a.
- MORAES, M. T. de; DEBIASI, H.; CARLESSO, R.; FRANCHINI, J. C.; SILVA, V. R. da; LUZ, F. B. da. Age-hardening phenomena in an oxisol from the subtropical region of Brazil. **Soil & Tillage Research**, v. 170, p. 27-37, 2017.
- MORAES, M. T. de; DEBIASI, H.; CARLESSO, R.; FRANCHINI, J. C.; SILVA, V. R. da; LUZ, F. B. da. Soil physical quality on tillage and cropping systems after two decades in the subtropical region of Brazil. **Soil & Tillage Research**, v. 155, p. 351-362, 2016.
- MORAES, M. T. de; DEBIASI, H.; CARLESSO, R.; FRANCHINI, J. C.; SILVA, V. R. da. Critical limits of soil penetration resistance in a Rhodic Eutrudox. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, p. 288-298, 2014b.
- MORAES, M. T. de; DEBIASI, H.; FRANCHINI, J. C. Modelagem da dinâmica da água em sistemas de preparo de um Latossolo Vermelho. **Scientia Agraria**, v. 19,p. 142-152, 2018c.
- MORAES, M. T. de; DEBIASI, H.; FRANCHINI, J. C. Soybean and wheat response to cropping and tillage system after two decades in an Oxisol. **Scientia Agraria**, v. 18, p. 146, 2017.

- MORAES, M. T. de; DEBIASI, H.; FRANCHINI, J. C.; BONETTI, J. de A.; LEVIEN, R.; SCHNEPF, A.; LEITNER, D. Mechanical and hydric stress effects on maize root system development at different soil compaction levels. **Frontiers in Plant Science**, v. 10, 1358, 2019.
- MORAES, M. T. de; DEBIASI, H.; FRANCHINI, J. C.; MASTROBERTI, A. A.; LEVIEN, R.; LEITNER, D.; SCHNEPF, A. Soil compaction impacts soybean root growth in an Oxisol from subtropical Brazil. **Soil & Tillage Research**, v. 200, 104611, 2020.
- MORAES, M. T. de; DEBIASI, H.; FRANCHINI, J. C.; SILVA, V. R. Correction of resistance to penetration by pedofunctions and a reference soil water content. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, p. 1395-1406, 2012.
- MORAES, M. T. de; GUSMÃO, A. G. How do water, compaction and heat stresses affect soybean root elongation? A review. **Rizosphere**, v. 19, 100493, 2021.
- MORAES, M. T. de; LEVIEN, R.; TREIN, C. R.; BONETTI, J. A.; DEBIASI, H. Corn performance in an Ultisol compacted by tractor traffic. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 53, p. 464-477, 2018b.
- MORAES, M. T. de; SILVA, V. R. da; ZWIRTES, A. L.; CARLESSO, R. Use of penetrometers in agriculture: a review. **Engenharia Agrícola**, v. 34, p.179-193, 2014a.
- MOURA, A. R. B.; MEDEIROS, J. F. Determinação inicial da erosividade da chuva (fator R) em 1985, em Mossoró (RN). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 11 p. 229-231, 1987.
- MURGA-ORRILLO, H.; ARAÚJO, W. F.; ABANTO-RODRIGUEZ, C.; SAKAZAKI, R. T.; BARDALES-LOZANO, R. M.; POLO-VARGAS, A. R. Influência da cobertura morta na evapotranspiração, coeficiente de cultivo e eficiência de uso de água do milho cultivado em cerrado. **Irriga**, v. 21, p. 352-364, 2016.
- NIELSEN, K. F. Roots and root temperature. In: CARLSON, E. W. (ed.). **The plant root and its environment**. Charlottesville: University Press of Virginia, 1974. 691 p.
- NOLLA, A.; ANGHINONI, I. Atividade e especiação química na solução afetadas pela adição de fósforo em Latossolo sob plantio direto em diferentes condições de acidez. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 30, p. 955-963, 2006.
- NRCS - NATURAL RESOURCES CONSERVATION SERVICE. **National engineering handbook**. Part 652 - Irrigation Guide. NRS, United States Department of Agriculture, 1997. Disponível em: <https://directives.sc.egov.usda.gov/viewerFS.aspx?hid=21431>. Acesso em: 06 abr. 2021.
- NUNES, M. R.; DENARDIN, J. E.; FAGANELLO, A.; PAULETTO, E. A.; PINTO, L. F. S. Efeito de semeadora com haste sulcadora para ação profunda em solo manejado com plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, p. 627-638, 2014.
- NUNES, M. R.; KARLEN, D. L.; DENARDIN, J. E.; CAMBARDELLA, C. A. Corn root and soil health indicator response to no-till production practices. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 285, 106607, 2019.
- NUNES, R. de S.; SOUSA, D. M. G. de; GOEDERT, W. J.; VIVALDI, L. J. Distribuição de fósforo no solo em razão do sistema de cultivo e manejo da adubação fosfatada. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, p. 877-888, 2011.

- OLIVEIRA JUNIOR, A.; CASTRO, C. de; OLIVEIRA, F. A. de; KLEPKER, D. Fertilidade do solo e avaliação do estado nutricional da soja. In: SEIXAS, C. D. S.; NEUMAIER, N.; BALBINOT JUNIOR, A. A.; KRZYZANOWSKI, F. C.; LEITE, R. M. V. B. de C. (ed.). **Tecnologias de produção de soja**. Londrina: Embrapa Soja, 2020. p. 133-184. (Embrapa Soja. Sistemas de Produção, 17).
- OLIVEIRA, D.; BORROZZINO, E. Temperatura do solo sob três condições de cobertura em Londrina, Paranaíba e Guarapuava, no estado do Paraná. **Agrometeoros**, v. 26, p.131-137, 2018.
- OLIVEIRA, E. L.; PAVAN, M. A. Control of acidity in no-tillage system for soybean production. **Soil & Tillage Research**, v. 38, p. 47-57, 1996.
- ORTIGARA, C. **Propriedades físicas e hídricas de um Latossolo em diferentes sistemas de cultivo de longa duração**. 2017. 75 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Agronomia - Agricultura e Ambiente, Universidade Federal de Santa Maria, Frederico Westphalen.
- PETRY, M. T.; ZIMMERMANN, F. L.; CARLESSO, R.; MICHELON, C. J.; KUNZ, J. H. Disponibilidade de água do solo ao milho cultivado sob sistemas de semeadura direta e preparo convencional. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, p. 531-539, 2007.
- PHOCAIDES, A. **Handbook on pressurized irrigation technique**. Rome: FAO, 2007. 26 p.
- PIVETTA, L. A.; CASTOLDI, G.; SANTOS, G. dos; ROSOLEM, C. A. Crescimento e atividade de raízes de soja em função do sistema de produção. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 46, p. 1547-1554, 2011.
- PREVEDELLO, C. L. Energia térmica do solo. In: VAN LIER, Q. de J. (ed.). **Física do solo**. Viçosa: SBCS, 2010. p. 177-211.
- PREVEDELLO, C. L.; MAGGIOTTO, S. R.; LOYOLA, J. M. T.; DIAS, N. L.; BEPLER NETO, G. Balanço de água por aquisição automática de dados em cultura de trigo (*Triticum aestivum* L.). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, p. 1-8, 2007.
- PRIHAR, S. S.; JALOTA, S. K.; STEINER, J. L. Residue management for reducing evaporation in relation to soil type and evaporativity. **Soil Use & Management**, v. 12, p. 150-157, 1996.
- PUSHKALA, S.; YAGARAJARAO, Y. Influence of different soil temperatures on water use, growth, and internal water status of soybean. **Plant and Soil**, v. 109, p. 288-290, 1988.
- RAAIJMAKERS, J. M.; PAULITZ, T. C.; STEINBERG, C.; ALABOUVETTE, C.; MÖENNE-LOCCOZ, Y. The rhizosphere: a playground and battlefield for soilborne pathogens and beneficial microorganisms. **Plant and Soil**, v. 321, p. 341-361, 2009.
- RALISCH, R.; DEBIASI, H.; FRANCHINI, J. C.; TOMAZI, M.; HERNANI, L. C.; MELO, A. da S.; SANTI, A.; MARTINS, A. L. da S.; BONA, F. D. de. **Diagnóstico rápido da estrutura do solo - DRES**. Londrina: Embrapa Soja, 2017. 63 p. (Embrapa Soja. Documentos, 390).
- RAY, D. K.; GERBER, J. S.; MACDONALD, G. K.; WEST, P. C. Climate variation explains a third of global crop yield variability. **Nature Communications**, v. 6, 5989, 2015.
- REICHARDT, K.; TIMM, L. C. **Solo, planta e atmosfera: conceitos, processos e aplicações**. Barueri: Manole, 2004. 478 p.

- REICHERT, J. M.; SUZUKI, L. E. A. S.; REINERT, D. J. Compactação do solo em sistemas agropecuários e florestais: Identificação, efeitos, limites críticos e mitigação. **Tópicos em Ciência do Solo**, v. 5, p. 49-134, 2007.
- REICOSKY, D. C.; SAXTON, E. The Benefits of No-tillage. In: BAKER, C. J.; K. SAXTON, E.; RITCHIE, W. R.; CHAMEN, W. C. T.; REICOSKY, D. C.; RIBEIRO, F.; JUSTICE, S. E.; HOBBS, P. R. **No-tillage seeding in conservation agriculture**. 2nd edition. Rome, Italy: CAB/FAO, 2007. p. 11-20.
- RHEINHEIMER, D. dos S.; SOMAVILLA, A.; OLIVEIRA, L. B. de; TIECHER, T. **Ciclo biogeoquímico do fósforo, diagnóstico de disponibilidade e adubação fosfatada**. Porto Alegre: Ed. Autores, 2020. 71 p.
- RHEINHEIMER, D. S.; TIECHER, T.; GONZATTO, R.; ZAFAR, M.; BRUNETTO, G. Residual effect of surface-applied lime on soil acidity properties in a long-term experiment under no-till in a Southern Brazilian sandy Ultisol. **Geoderma**, v. 313, p. 7-16, 2018.
- RIGHES, A. A. **Water uptake and root distribution of soybeans, grain sorghum and corn**. 1980. 125 f. Thesis (Ph.D) - Iowa State University, Ames.
- RIO, A. do; SENTELHAS, P. C.; FARIAS, J. R. B.; SIBALDELLI, R. N. R.; FERREIRA, R. C. Alternative sowing dates as a mitigation measure to reduce climate change impacts on soybean yields in southern Brazil. **International Journal of Climatology**, v. 36, p. 3664-3672, 2016.
- ROBERTSON, W. K.; HAMMOND, L. C.; JOHNSON, J. T.; BOOTE, K. J. Effects of plant-water stress on root distribution of corn, soybeans, and peanuts in sandy soil. **Agronomy Journal**, v. 72, p. 548-550, 1980.
- ROCHA, M. R. da. **Retenção e armazenamento da água chuva na camada evaporativa do solo com e sem resíduos vegetais**. 2016. 78 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.
- RODRIGUES, M.; WITHERS, P. J. A.; SOLTANGHEISI, A.; VARGAS, V.; HOLZSCHUH, M.; PAVINATO, P. S. Tillage systems and cover crops affecting soil phosphorus bioavailability in Brazilian Cerrado Oxisols. **Soil & Tillage Research**, v. 205, 104770, 2021.
- ROGGIA, S.; BUENO, A. de F.; CÔRREA-FERREIRA, B. S.; SOSA-GÓMEZ, D. R.; HOFFMANN-CAMPO, C. B.; HIROSE, E.; GAZZONI, D. L.; PITTA, R. M.; PEREIRA, P. R. V. da S.; OLIVEIRA, C. M. de; OLIVEIRA, F. T. de. Manejo integrado de pragas. In: SEIXAS, C. D. S.; NEUMAIER, N.; BALBINOT JUNIOR, A. A.; KRZYZANOWSKI, F. C.; LEITE, R. M. V. B. de C. (ed.). **Tecnologias de produção de soja**. Londrina: Embrapa Soja, 2020. p. 197-226. (Embrapa Soja. Sistemas de Produção, 17).
- RONDINA, A. B. L.; SANZOVO, A. W. S.; GUIMARÃES, G. S.; WENDLING, J. R.; NOGUEIRA M. A.; HUNGRIA, M. Changes in root morphological traits in soybean co-inoculated with *Bradyrhizobium* spp. and *Azospirillum brasilense* or treated with *A. brasilense* exudates. **Biology and Fertility of Soils**, v. 56, p. 537-549, 2020.
- SÁ, J. C. de M.; SEGUY, L.; SÁ, M. F. M.; FERREIRA, A. de O. J. Gestão da matéria orgânica e da fertilidade do solo visando sistemas sustentáveis de produção. In: PROCHNOW, L. I.;

CASARIN, V. C.; STIPP, S. R. (ed.). **Boas práticas para uso eficiente de fertilizantes**. São Paulo: IPNI, 2010. p. 383-420.

SAKO, H.; SOARES, J. E.; SILVA, L. A. DA; BALARDIN, R. **Relações de enraizamento e cálcio no solo para alta produtividade da safra 14/15**. Sorocaba: CESB, 2016. 15 p. (CESB. Boletim Técnico, 1).

SALDANHA, G. S. **Evaporação de água do solo na fase inicial de desenvolvimento das culturas do milho e soja**. 2009. 93 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

SALISBURY, F. B.; ROSS, C. W. **Plant physiology, hormones and plant regulators**: auxins and gibberellins. 4th ed. Belmont: Wadsworth Publishing, 1992. p. 357-381.

SALTON, J. C. **Relações entre sistemas de preparo, temperatura e umidade do solo**. 1991. 92 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Agronomia - Ciência do Solo, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

SALTON, J. C.; MIELNICUK, J.; BAYER, C.; FABRÍCIO, A. C.; MACEDO, M. C. M.; BROCH, D. L. Teor e dinâmica do carbono no solo em sistemas de integração lavourapecuária. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 46, p. 1349-1356, 2011.

SALTON, J. C.; MIELNICZUK, J.; BAYER, C.; BOENI, M.; CONCEIÇÃO, P. C.; FABRÍCIO, A. C.; MACEDO, M. C. M.; BROCH, D. L. Agregação e estabilidade de agregados do solo em sistemas agropecuários no Mato Grosso do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 11-21, 2008.

SANTOS, H. P.; REIS, E. M. **Rotação de culturas em plantio direto**. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2001. 212 p.

SANTOS, R. D. dos; LEMOS, R. C. de; SANTOS, H. G. dos; KER, J. C.; ABJOS, L. H. C. dos. **Manual de descrição e coleta de amostras de solo no campo**. 5. ed. rev. e ampl. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo/Editora da UFV; Rio de Janeiro: Embrapa Solos/Editora da UFRRJ, 2005. 100 p.

SANTOS, W. G.; MARTINS, J. I. F. O Zoneamento Agrícola de Risco Climático e sua contribuição à agricultura brasileira. **Política Agrícola**, v. 25, p. 73-94, 2016.

SCHLINDWEIN, J. A.; NOLLA, A.; ANGHINONI, I.; MEURER, E. J. Redução da toxidez de alumínio em raízes de soja por culturas antecessoras no sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Agrociência**, v. 9, p. 85-88, 2003.

SCHRÖDER, N.; LAZAROVITCH, N.; VANDERBORGHT, J.; VERECKEN, H.; JAVAUX, M. Linking transpiration reduction to rhizosphere salinity using a 3D coupled soil-plant model. **Plant and Soil**, v. 377, p. 277-293, 2014.

SCOPEL, E.; MACENA, F.; CORBEELS, M.; AFFHOLDER, F.; MARAUX, F. Modelling crop residue mulching effects on water use and production of maize under semi-arid and humid tropical conditions. **Agronomie**, v. 24, p. 1-13, 2004.

SEIXAS, C. D. S.; SOARES, R. M.; GODOY, C. V.; MEYER, M. C.; COSTAMILAN, L. M.; DIAS, W. P.; ALMEIDA, A. M. R. Manejo de doenças. In: SEIXAS, C. D. S.; NEUMAIER, N.; BALBINOT JUNIOR, A. A.; KRZYŻANOWSKI, F. C.; LEITE, R. M. V. B. de C. (ed.). **Tecnologias de produção de soja**. Londrina: Embrapa Soja, 2020. p. 227-263. (Embrapa Soja. Sistemas de Produção, 17).

SENTELHAS, P. C.; BATTISTI, R.; CÂMARA, G. M. S.; FARIAS, J. R. B.; HAMPF, A.; NENDEL, C. The soybean yield gap in Brazil - magnitude, causes and possible solutions for a sustainable production. **Journal of Agriculture Science**, v. 153, p. 1394-1411, 2015.

SILVA, A. J. D.; COELHO, E. F.; MIRANDA, J. H. de; WORKMAN, S. R. Estimating water application efficiency for drip irrigation emitter patterns on banana. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 44, p.730-737, 2009.

SILVA, F. A. M. da; PINTO, H. S.; SCOPEL, E.; CORBEELS, M.; AFFHOLDER, F. Dinâmica da água nas palhadas de milho, milheto e soja utilizadas em plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 41, n.5, p. 717-724, 2006.

SILVA, F. A. M. da; SCOPEL, E.; CORBEELS, M.; AFFHOLDER, F. Ajuste e calibração do módulo balanço hídrico do modelo STICS, num sistema de plantio direto de milho-milheto, em condições do Cerrado brasileiro. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 16, p. 203-213, 2011.

SILVA, G. S.; FERRAZ, S.; SANTOS, J. M. Atração, penetração e desenvolvimento de larvas de *Meloidogyne javanica* em raízes de *Crotalaria* spp. **Nematologia Brasileira**, v. 13, p. 151-163, 1989.

SILVA, I. R.; FERRUFINO, A.; SANZONOWICZ, C.; SMYTH, T. J.; ISRAEL, D. W.; CARTER JÚNIOR, T. E. Interactions between magnesium, calcium, and aluminum on soybean root elongation. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, p. 747-754, 2005.

SILVA, M. R. R. da; VANZELA, L. S.; VAZQUEZ, G. H.; SANCHES, A. C. Influência da irrigação e cobertura morta do solo sobre as características agronômicas e produtividade de milho. **Irriga**, Edição Especial, p. 170-180, 2012.

SILVA, P. C. G. da; TIRITAN, C. S.; ECHER, F. R.; CORDEIRO, C. F. dos S.; REBONATTI, M. D.; SANTOS, C. H. dos. No-tillage and crop rotation increase crop yields and nitrogen stocks in sandy soils under agroclimatic risk. **Field Crops Research**, v. 258, 107947, 2020b.

SILVA, P. R. A. **Mecanismos sulcadores de semeadora-adubadora na cultura do milho (*Zea mays* L.) no sistema de plantio direto**. 2003. 84 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Agronomia, área de concentração Energia na Agricultura, Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Botucatu.

SILVA, S. G. C.; SILVA, A. P. da; GIAROLA, N. F. B.; TORMENA, C. A.; SÁ, J. C. M. de. Temporary effect of chiseling on the compaction of a Rhodic Hapludox under no-tillage. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, p. 547-556, 2012.

SILVA, T. J. A. da; BOMFIM-SILVA, E. M.; FENNER, W.; DUARTE, T. F.; JOSÉ, J. V.; CASTAÑÓN, T. H. F. M.; Evapotranspiration and crop coefficients in two irrigated wheat cultivars. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 24, p. 252-257, 2020a.

SINGER, M.; EWING, S. Soil quality. In: SUMNER, M. E. (ed.). **Handbook of soil science**. Boca Raton: CRC Press, 2000. p. 271-298.

SINGH, B.; EBERBACH, P. L.; HUMPHREYS, E.; KUKAL, S. S. The effect of rice straw mulch on evapotranspiration, transpiration and soil evaporation of irrigated wheat in Punjab, India. **Agricultural Water Management**, v. 98, p. 1847-1855, 2011.

SINGH, K. B.; GUPTA, R. K.; JALOTA, S. Soil water balance and response of spring maize (*Zea mays*) to mulching and differential irrigation in Punjab. **Indian Journal of Agronomy**, v. 60, p. 279-284, 2015.

SÖHNE, W. Fundamentals of pressure distribution and soil compaction under tractor tires. **Agricultural Engineering**, v. 39, p. 276-290, 1958.

SOLTANGHEISI, A.; RODRIGUES, M.; COELHO, M. J. A.; GASPERINIM, A. M.; SARTOR, L. R.; PAVINATO, P. S. Changes in soil phosphorus lability promoted by phosphate sources and cover crops. **Soil & Tillage Research**, v. 179, p. 20-28, 2018.

SORIANI, R. **Índice de qualidade estrutural do solo e sua relação com atributos físicos de um Latossolo Vermelho**. 2020. 71 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Universidade Estadual de Londrina, Londrina.

SPONCHIADO, B. N.; WHITE, J. W.; CASTILLO, J. A.; JONES, P. G. Root growth of four common bean cultivars in relation to drought tolerance in environments with contrasting soil types. **Experimental Agriculture**, v. 25, p. 249-257, 1989.

STONE, J. A.; TAYLOR, H. M. Temperature and the development of the taproot and lateral roots of four indeterminate soybean cultivars. **Agronomy Journal**, v. 75, p. 613-618, 1983.

STONE, L. F.; MOREIRA, J. A. A. Efeitos de sistemas de preparo do solo no uso da água e na produtividade do feijoeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 35, p. 835-841, 2000.

STONE, L. F.; MOREIRA, J. A. A. **Irrigação do arroz de terras altas em função da porcentagem de cobertura do solo pela palhada, no sistema plantio direto**. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2005. 4 p. (Embrapa Arroz e Feijão. Circular Técnica, 69).

STONE, L. F.; SILVEIRA, P. M.; MOREIRA, J. A. A. **Efeito de palhadas de culturas de cobertura na evapotranspiração do feijoeiro irrigado**. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2008. 4p. (Embrapa Arroz e Feijão. Circular Técnica, 158).

STONE, L. F.; SILVEIRA, P. M.; MOREIRA, J. A. A.; BRAZ, A. J. B. P. Evapotranspiração do feijoeiro irrigado em plantio direto sobre diferentes palhadas de culturas de cobertura. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 41, p. 577-582, 2006.

STONE, L. R.; TEARE, I. D.; NICKELL, C. D.; MAYAKI, W. C. Soybean root development and soil water depletion. **Agronomy Journal**, v. 68, p. 677-680, 1976.

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

TEDESCO, M. J.; BISSANI, C. A. Acidez do solo e seus efeitos nas plantas. In: BISSANI, C. A.; BISSANI, C. A.; GIANELLO, C.; TEDESCO, M. J.; CAMARGO, F. A. O. (Org.). **Fertilidade dos solos e manejo da adubação de culturas**. Porto Alegre: Gênese, 2004. p. 75-92.

TIECHER, T.; CALEGARI, A.; CANER, L.; RHEINHEIMER, D. dos S. Soil fertility and nutrient budget after 23-years of different soil tillage systems and winter cover crops in a subtropical Oxisol. **Geoderma**, v. 308, p. 78-85, 2017.

TORMENA, C. A.; ARAÚJO, M. A.; FIDALSKI, J.; COSTA, J. M. Variação temporal do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Vermelho distroférrico em sistemas de plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, p. 211-219, 2007.

- TORMENA, C. A.; SILVA, A. P.; LIBARDI, P. L. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Roxo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 22, p. 573-581, 1998.
- TORRES, E.; DEBIASI, H.; FRANCHINI, J. C.; SARAIVA, O. F.; ALMEIDA, A. M. R. Manejo do solo na prevenção de doenças radiculares. In: ALMEIDA, A. M. R.; SEIXAS, C. D. S. (ed.). **Soja: doenças radiculares e de hastes e inter-relações com o manejo do solo e da cultura**. Londrina: Embrapa Soja, 2010. p. 207-279.
- UNGER, P. W.; PARKER, J. J. Evaporation reduction from soil with wheat, sorghum, and cotton residues. **Soil Science Society of America Journal**, v. 40, p. 938-942, 1976.
- VAZ, C. M. P.; MANIERI, J. M.; DE MARIA, I. C.; TULLER, M. Modeling and correction of soil penetration resistance for varying soil water content. **Geoderma**, v. 166, p. 92-101, 2011.
- VEIGA, M.; HORN, R.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Soil compressibility and penetrability of an Oxisol from southern Brazil, as affected by long-term tillage systems. **Soil & Tillage Research**, v. 92, p. 104-113, 2007.
- VIEIRA, F. F. **Efeito da cobertura do solo no Kc dual e na produtividade do milho safrinha na região sudeste de Mato grosso**. 2017. 79 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação *Stricto Sensu* em Ambiente e Sistemas de Produção Agrícola, Universidade do Estado de Mato Grosso, Tangará da Serra.
- WAGNER-RIDDLE, C.; GILLESPIE, T. J.; SWANTON, C. J. Rye mulch characterization for the purpose of microclimatic modeling. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 78, p. 67-81, 1996.
- WANG, K. H.; SIPES, B. S.; SCHMITT, D. P. Crotalaria as a cover crop for nematode management: a review. **Nematropica**, v. 32, p. 35-57, 2002.
- WHALLEY W. R.; BENGOUGH A. G.; DEXTER A. R. Water stress induced by PEG decreases the maximum growth pressure of the roots of pea seedlings. **Journal of Experimental Botany**, v. 49, p. 1689-1694, 1998.
- WHALLEY W. R.; LEEDS-HARRISON, P. B.; CLARK, L. J.; GOWING, D. J. G. Use of effective stress to predict the penetrometer resistance of unsaturated agricultural soils. **Soil & Tillage Research**, v. 84, p. 18-27, 2005.
- WISSUWA, M.; GAMAT, G.; ISMAIL, A. M. Is root growth under phosphorus deficiency affected by source or sink limitations? **Journal of Experimental Botany**, v. 56, p. 1943-1950, 2005.
- XU, X.; NIEBER, J. L.; GUPTA, S. C. Compaction effect on the gas diffusion coefficient in soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 56, p. 1743-1750, 1992.
- ZANATTA, J. A.; BAYER, C.; DIECKOW, J.; VIEIRA, F. C. B.; MIELNICZUK, J. Soil organic carbon accumulation and carbon costs related to tillage, cropping systems and nitrogen fertilization in a subtropical Acrisol. **Soil & Tillage Research**, v. 94, p. 510-519, 2007.
- ZHANG, B.; LIU, Y.; XU, D.; ZHAO, N.; LEI, B.; ROSA, R. D.; PAREDES, P.; PAÇO, T. A.; PEREIRA, L. S. The dual crop coefficient approach to estimate and partitioning evapotranspiration of the winter wheat-summer maize crop sequence in North China Plain. **Irrigation Science**, v. 31, p. 1303-1316, 2013.

ZHANG, J. P.; SUN, J. S.; LIU, Z. G.; LI, X. D.; LIU, X. F. Effects of different straw mulching quantity on soil evaporation and soil temperature in summer maize field. **Agricultural Research in the Arid Areas**, v. 27, p. 95-100, 2009.

ZHANG, Z.; LIU, K.; ZHOU, H.; LIN, H.; LI, D.; PENG, X. Three dimensional characteristics of biopores and non-biopores in the subsoil respond differently to land use and fertilization. **Plant and Soil**, v. 428, p. 453-467, 2018.

Embrapa

Soja

