



MANEJO E CONSERVAÇÃO DA ÁGUA E DO SOLO

João de Andrade Bonetti
Jessé Rodrigo Fink



MANEJO E CONSERVAÇÃO DA ÁGUA E DO SOLO

João de Andrade Bonetti
Jessé Rodrigo Fink

MANEJO E CONSERVAÇÃO DA ÁGUA E DO SOLO



Lavras - MG

2020

©Editora UFLA 2020 by João de Andrade Bonetti, Jessé Rodrigo Fink

Este livro é de uso livre e gratuito e pode ser copiado na íntegra ou em partes, desde que se cite a fonte. Qualquer dúvida ou informações, entre em contato conosco pelo e-mail: editora@editora.ufla.br. O conteúdo desta obra, além de autorizações relacionadas à permissão de uso de imagens e/ou textos de outro(s) autor(es), é de inteira responsabilidade do(s) autor(es) e/ou organizador(es). Direitos de publicação reservados à Editora UFLA.

Impresso no Brasil - ISBN: 978-65-86561-08-1

UNIVERSIDADE FEDERAL DE LAVRAS

Reitor: João Chrysostomo de Resende Júnior

Vice-Reitor: José Roberto Soares Scolforo

Pró-Reitora de Pesquisa: Joziana Muniz de Paiva Barçante

UNIDADE RESPONSÁVEL PELA EDIÇÃO DO LIVRO

Conselho editorial responsável pela aprovação da obra:

Marco Aurélio Carbone Carneiro (Presidente), Nilton Curi (Vice-Presidente), Francisval de Melo Carvalho, Alberto Colombo, João Domingos Scalon, Wilson Magela Gonçalves

Referências Bibliográficas: Editora UFLA

Revisão de Português: Maria Aparecida Possato

Revisão Textual: Jacob dos Santos Biziak, Maeli Lorena, Sânderson Reginaldo de Mello, Suzete Reiter, Daiane Padula Paz, Roberto Carlos Bianchi

Projeto Gráfico: Patrícia Carvalho de Moraes

Diagramação: Patrícia Carvalho de Moraes

Capa: Patrícia Carvalho de Moraes

EXPEDIENTE EDITORA UFLA

Flávio Monteiro de Oliveira (Diretor)
Patrícia Carvalho de Moraes (Vice-Diretora)
Alice de Fátima Vilela
Damiana Joana Geraldo Souza
Késia Portela de Assis

Marco Aurélio Costa Santiago
Renata de Lima Rezende
Rosiane Campos de Oliveira
Vítor Lúcio da Silva Naves
Walquíria Pinheiro Lima Bello

Ficha catalográfica elaborada pelo Setor de Processos Técnicos da Biblioteca Universitária da UFLA

Bonetti, João de Andrade.
Manejo e conservação da água e do solo / João de Andrade Bonetti, Jessé Rodrigo Fink. – Lavras : UFLA, 2020.
151 p. : il.

Bibliografia.

1. Sustentabilidade. 2. Hidrologia. 3. Qualidade do solo. 4. Relação solo/água/planta/atmosfera. I. Fink, Jessé Rodrigo. II. Universidade Federal de Lavras. III. Título.

CDD – 631.45

Ficha elaborada por Eduardo César Borges (CRB 6/2832)



EDITORA UFLA

Campus Universitário da UFLA, Andar Térreo do Centro de Eventos, Cx. Postal 3037, CEP 37200-900 - Lavras/MG,
Tel: (35) 3829-1532, E-mail: editora@ufla.br, Homepage: www.editora.ufla.br, facebook: Editora UFLA

Agradecemos à Editora UFLA pela oportunidade de divulgar conhecimento,
e aos autores, pela dedicação à construção e divulgação
dos conhecimentos inseridos nesta obra.

SUMÁRIO

Prefácio	9
Capítulo 1. A importância da água para a produção de alimentos e o meio ambiente	10
1.1 Introdução	11
1.2 Uso da água em sistemas agrícolas	13
1.3 A água e o meio ambiente	16
1.4 Referências bibliográficas	20
Capítulo 2. Relação da água com a fertilidade do solo	24
2.1 Introdução	25
2.2 Disponibilidade de água no solo: Relação com fatores físicos e resposta de plantas	27
2.3 Importância da água para o suprimento de nutrientes às plantas	32
2.4 Considerações finais	36
2.5 Referências bibliográficas	37
Capítulo 3. Relações da água com parâmetros físicos e crescimento radicular das plantas	39
3.1 Introdução	40
3.2 Influência das propriedades dos solos no crescimento radicular	41
3.2.1 Propriedades físicas do solo e o desenvolvimento das plantas	42
3.2.2 Simulações físicas no sistema solo-planta-atmosfera	48
3.2.3 Relações da água com parâmetros físicos e crescimento radicular das plantas: Estudo de caso na cultura da soja	50
3.3 Considerações finais	53
3.4 Referências bibliográficas	54
Capítulo 4. A contribuição da biologia do solo para os processos de agregação e armazenamento da água	59

4.1 Introdução	60
4.2 Influência de organismos do solo na formação e estabilização dos agregados e condicionamento físico-hídrico do solo	61
4.2.1 Macrorganismos como engenheiros do solo	64
4.2.2 Microrganismos na formação e estabilidade de agregados	66
4.3 Considerações finais	69
4.4 Referências bibliográficas	70
Capítulo 5. Matéria orgânica do solo e conservação dos recursos hídricos	73
5.1 Introdução	74
5.2 Desenvolvimento de plantas e organismos, sequestro de carbono e regulação climática	75
5.3 Regulação e compartimentalização dos fluxos hidrológicos na paisagem	78
5.4 Funcionalidades ecossistêmicas relacionadas ao sistema “matéria orgânica do solo – paisagem”	80
5.5 Considerações finais	83
5.6 Referências bibliográficas	83
Capítulo 6. Manejo da água e erosão do solo	88
6.1 Introdução	89
6.2 Princípios da conservação do solo	91
6.2.1 Panorama da conservação do solo no Brasil	92
6.3 Desafios da agricultura conservacionista para o aprimoramento do manejo da água e da erosão do solo	93
6.3.1 Importância da intensificação no manejo de plantas de cobertura e da rotação de culturas no SPD: aplicações	95
6.3.2 Lacunas da agricultura conservacionista e do SPD no manejo do escoamento superficial	98
6.3.3 Terraceamento e a otimização da performance da agricultura conservacionista	98
6.4 Considerações finais	100
6.5 Referências bibliográficas	101

Capítulo 7. Contaminação da água e do solo por resíduos utilizados na agricultura	104
7.1 Introdução	105
7.2 Propriedades do solo que afetam a dinâmica de contaminantes presentes em resíduos utilizados na agricultura	106
7.3 Contaminantes presentes nos resíduos utilizados na agricultura	109
7.3.1 Nutrientes	109
7.3.2 Metais pesados	113
7.3.3 Compostos orgânicos	115
7.3.4 Patógenos	116
7.4 Substâncias amenizantes de contaminantes do solo	116
7.5 Fitorremediação de solos contaminados	118
7.6 Considerações finais	119
7.7 Referências bibliográficas	119
Capítulo 8. Sistemas integrados de produção agropecuária: impactos na água e no solo	123
8.1 Introdução	124
8.2 Contribuição do SIPA para a otimização do uso da água e solo	125
8.2.1 Relações hídricas em SIPA	126
8.2.2 Atributos de solo em SIPA	130
8.3 Considerações finais	135
8.4 Referências bibliográficas	135
Capítulo 9. Eficiência do uso da água em sistemas agroecológicos	138
9.1 Introdução	139
9.2 Agroecologia e gestão sustentável da água	140
9.3 Água e manejo de agroecossistemas	142
9.3.1 Definição das culturas a serem cultivadas	144
9.3.2 Manejo da superfície do solo	144
9.3.3 Manutenção dos níveis de matéria orgânica no solo	145

9.3.4 Instalação de terraços e cordões de vegetação	146
9.3.5 Desenho do agroecossistema à semelhança de ecossistemas naturais	147
9.3.6 Manejo ecológico de pragas e doenças	147
9.4 Considerações finais	149
9.5 Referências bibliográficas	149

PREFÁCIO

A água é um recurso natural essencial para a vida no planeta Terra. A manutenção de sua quantidade e qualidade é tarefa de todos os setores da sociedade. As informações geradas nos estudos desta obra podem ser aplicadas a diversas áreas do saber, sobretudo, às Ciências Agrárias e Ciências Ambientais. Abordar este assunto é desafiador, pois a manutenção de quantidade e qualidade da água, em sistemas agrícolas, pode confrontar práticas de manejo tradicionais que, em curto prazo, têm sido economicamente viáveis. Todavia essas práticas, considerando a sustentabilidade agrícola e ambiental, têm comprometido os recursos hídricos e aumentado os custos da produção de alimentos. Cabe, portanto uma readequação da forma de pensar dos envolvidos, incluindo a academia, os técnicos e a sociedade em geral.

O nascimento desta obra surgiu do diálogo entre os editores quanto à importância de abordagens recentes e independentes relacionadas aos conhecimentos teóricos e práticos sobre o assunto. A partir de então, esta obra teve início graças à dedicação de editores e autores de diversas regiões do Brasil, que encararam o desafio de expor neste livro os resultados e discussões de anos de conhecimento adquiridos. As experiências foram introduzidas, em diversos capítulos, visando a atender a máxima amplitude do conhecimento da área das Ciências Agrárias.

O objetivo deste livro é informar, conscientizar e alertar estudantes, profissionais que atuam nas ciências agrárias e ambientais, agricultores e pesquisadores sobre aspectos de produção e manutenção da quantidade e qualidade da água e do solo, em especial, via práticas agrícolas conservacionistas. O compartilhamento do conhecimento adquirido, na leitura desta obra, fará com que informações relevantes cheguem a maiores distâncias. Se isso ocorrer, será o maior legado desta obra científica. Nesse sentido, buscamos contribuir para a sustentabilidade agrícola e ambiental, preservando a água e o solo para as futuras gerações.

Boa leitura!

Os editores

CAPÍTULO 1

A IMPORTÂNCIA DA ÁGUA PARA A PRODUÇÃO DE ALIMENTOS E O MEIO AMBIENTE

João de Andrade Bonetti¹

Jessé Rodrigo Fink²

Christiano Santos Rocha Pitta²

¹Professor adjunto colaborador da Universidade Estadual de Maringá.

²Professores de Agronomia do Instituto Federal do Paraná (IFPR), Palmas PR.

E-mails: agro.bonetti@gmail.com, jesse.fink@ifpr.edu.br e christiano.pitta@ifpr.edu.br

1.1 INTRODUÇÃO

A partir do século XXI, a humanidade se deparou com o problema da escassez de água como uma ameaça para a saúde humana e a vida do planeta Terra (RANGEL; BRITTO, 2008). Esse quadro vem se agravando pelo aumento populacional, com concentração em áreas urbanas e pelo crescente consumo e uso inadequado de água pelos diferentes setores produtivos. Apesar dos esforços institucionais para a melhoria da qualidade da água e da infraestrutura sanitária, em todo o mundo, aproximadamente, 2,1 bilhões de pessoas não têm acesso à água potável em casa e 4,5 bilhões de pessoas carecem de saneamento básico (UNICEF, 2017).

A água é um elemento essencial à concepção e sustentação de todos os organismos vivos. Estima-se que os recursos totais de água doce no mundo sejam de $43.750 \text{ km}^3 \text{ ano}^{-1}$, sendo que as Américas têm a maior parcela, 45%, a Ásia 28%, a Europa 16% e a África 9% (FAO, 2003). Grande parte da água doce do mundo está em reservatórios subterrâneos, fornecendo quase a metade da água ao consumo humano e animal e 40% da água utilizada na irrigação (IGRAC, 2018).

Sendo assim, aumentar a eficiência no uso da água é importante para a saúde humana e à produção de alimentos. Estima-se que até o ano de 2050 seja necessário um aumento de 70% na produção de alimentos, especialmente, via aumento de produtividade, que deverá atender 9,7 bilhões de pessoas (ALEXANDRATOS; BRUINSMA, 2012; UN DESA, 2017). Portanto os sistemas agrícolas poderão aumentar em 70% o consumo de água para alcançar tal produção de alimentos (BORGHETTI et al., 2017). O aumento do consumo de água pelos sistemas agrícolas agrava a situação de quase 75% da população de baixa renda do mundo, que vive em áreas rurais, e a agricultura é sua fonte de renda mais representativa (LIPPER et al., 2014).

Na atualidade, a demanda mundial por água tem crescido no ritmo de 1% ao ano, em virtude do aumento da população e seus padrões de consumo (WWAP/ONU-ÁGUA, 2018). Segundo dados da UNESCO (WWAP/UNESCO, 2016), caso a eficiência do uso da água seja mantida, nos próximos anos, 40% da produção mundial de grãos estará correndo risco e poderá haver um decréscimo de 45% do PIB mundial. Algumas medidas destinadas a

racionalizar e otimizar a eficiência do consumo de água, no setor agrícola, são urgentes, tendo em vista os grandes volumes de água necessários para a produção de culturas (MANCOSU et al., 2015).

Sistemas de manejo conservacionistas constituem alternativa potencial para a melhoria da eficiência do uso da água e têm sido intensificados nas duas últimas décadas. Todavia estima-se que perto de 40% das bacias hidrográficas do planeta têm moderado nível de degradação (ABELL et al., 2017), comprometendo os recursos hídricos por processos erosivos do solo ou de salinização das águas (ALEXANDRATOS; BRUINSMA, 2012). É inevitável que aspectos relacionados ao uso do solo e ao manejo agrícola e ambiental deverão ser modificados, para diminuir a degradação dos solos e, em consequência, das águas e/ou restaurar aquelas ainda sob processos de degradação (Tabela 1.1).

A produção de alimentos é intensamente conectada às condições climáticas mundiais e regionais. A baixa eficiência à manutenção da água no solo e à demanda atmosférica por água limita e afeta a produtividade das plantas, com maior intensidade em regiões secas e, durante períodos de estresse hídrico, nos estádios reprodutivos das plantas (SCHAEFER et al., 2012). Mudanças nos padrões de chuvas e temperaturas ameaçam a produção agrícola, mesmo em ambientes atualmente produtivos e aumentam a vulnerabilidade da agricultura, incluindo as pessoas que dependem dela (LIPPER et al., 2014). Mantendo-se o ritmo atual, após o ano de 2050, os aumentos de temperatura serão fortes o suficiente para promover déficits hídricos e aumentar a dependência de irrigação nas lavouras (FISCHER et al., 2007).

Nesse sentido, o uso de sistemas agrícolas que reduzem a contaminação da água e aumentam a retenção de água no solo podem proporcionar maior produtividade das plantas com impacto positivo na sustentabilidade agrícola. Questões atuais e futuras relacionadas à água e seu uso na agricultura são revisadas neste capítulo para destacar a necessidade de uma abordagem mais sustentável para a gestão de recursos hídricos.

TABELA 1.1 Práticas agrícolas e ambientais que auxiliam na preservação da conservação da água e do solo.

Ações	Prática para a conservação da água e do solo
Revegetação de áreas degradadas	Revegetação de áreas degradadas por semeadura e replantio de espécies nativas, para diminuir a erosão, a fim de reestabelecer características desejáveis do solo e aumentar a infiltração de água.
Restauração de vegetação ciliar	A mata ciliar é um regulador do escoamento e transporte de água, sedimentos e nutrientes entre os terrenos mais altos da bacia hidrográfica e o ecossistema aquático. Auxilia também na retenção de sedimentos e nutrientes advindos da erosão do solo.
Boas práticas de manejo agrícola	Práticas agrícolas que visam à conservação do solo, como o Sistema Plantio Direto (SPD), por meio da manutenção de cobertura vegetal, diminuição da mobilização do solo, rotação de culturas, uso eficiente de fertilizantes, semeadura e plantio em nível e terraceamento.
Boas práticas de manejo agropecuário	Manejo da lavoura e pecuária, como os Sistemas Integrados de Produção Agropecuária (SIPA), que visam à não degradação do solo, como ajuste de carga animal quanto à oferta/crescimento de forrageiras, controle de entrada e saída de animais, fertilização adequada para forrageiras.
Restauração e criação de zonas úmidas	Restauração da vegetação de zonas de nascentes ou úmidas, por meio do isolamento de área, revegetação ou restauração da vegetação natural, aumenta a ocorrência de vida silvestre e restabelece o escoamento de águas superficiais em períodos secos.
Gestão das infraestruturas viárias	A organização e a distribuição da malha viária, principalmente na zona rural, tendem a impactar de modo direto o manejo e qualidade da água, pois direcionam a água e alteram a dinâmica hídrica normal do solo.

Adaptado: Abell et al. (2017).

1.2 USO DA ÁGUA EM SISTEMAS AGRÍCOLAS

A disponibilidade de água, para as plantas em sistemas agrícolas, é uma condição essencial para se obter eficiência na produção de alimentos, tanto em termos de rendimento

unitário, como de qualidade (MANCOSU et al., 2015). A água tem função de solvente universal e é importante aos processos físicos, químicos e biológicos que ocorrem na natureza. A configuração assimétrica da molécula de água, com os dois hidrogênios formando ângulos de 105 graus na ligação com o oxigênio, causa um desequilíbrio das cargas. Em decorrência da formação de dipolo elétrico, a água adquire propriedades físicas e químicas, como a capacidade de solvente, hidratação e adsorção aos colóides do solo.

Nas plantas, a água constitui-se de até 95% do protoplasma, participando de processos como a fotossíntese e fosforilação oxidativa (REICHARDT; TIMM, 2012). Quimicamente, é um reagente na fotossíntese, reação química que é a base da cadeia alimentar. Dentro do cloroplasto da planta, a energia da luz solar é usada para converter dióxido de carbono e água em carboidratos e oxigênio. Independente das espécies, as plantas requerem do solo um volume de água que supere suas necessidades metabólicas e pelo processo de transpiração as plantas transmitem à atmosfera a maior parte da água absorvida do solo (geralmente em torno de 90%) (CHAVARRIA; SANTOS, 2012).

O estado de energia pelo qual a água é retida no solo afeta o seu reservatório, interferindo na solução do solo e na disponibilidade de nutrientes, com impacto no crescimento e produtividade das plantas. O teor de água no solo exerce grande influência sobre algumas propriedades físicas e químicas do solo, como o teor de oxigênio, que interfere na respiração da raiz, na atividade microbiana e no estado químico do solo (CHAVARRIA; SANTOS, 2012). As propriedades químicas e físicas serão abordadas com maior ênfase, nos Capítulos 2 e 3, relacionados à fertilidade e à física do solo.

Os sistemas de manejo do solo utilizados podem impactar diretamente na disponibilidade, eficiência do uso e qualidade da água (Tabela 1.2).

TABELA 1.2 Sistemas agrícolas de manejo e seus impactos na conservação da água e do solo em diferentes ambientes.

Uso	Ambiente	Impacto na água e nos atributos	Autores
SIPA ¹	Tropical (Brasil)	Maior retenção de água no solo; melhoria da qualidade física do solo; aumento dos teores de carbono no solo; aumento da infiltração de água em intensidade de pastejo moderada.	Bonetti et al., (2015); Bonetti et al. (2017); Cecagno et al. (2016).
SIPA	Mediterrâneo e subtropical (Austrália)	Menor dependência das variações climáticas; equilíbrio hidrológico; menor salinidade; aumento dos estoques de carbono; menor uso de herbicidas; maior produtividade; melhorias ambientais.	Bell, Moore e Kirkegaard (2014).
SIPA	Temperado (Estados Unidos da América)	Aumento da infiltração de água para promover produtividade de pastagens; menor contaminação ambiental e escoamento superficial.	Franzluebbers, Stuedemann e Franklin (2011).
SPD ²	Tropical (Brasil)	Melhoria da qualidade física do solo; maior retenção e disponibilidade de água para as plantas; maior infiltração e água.	Almeida et al. (2018); Moraes et al. (2016).
SPD	Temperado/subtropical e semiárido (China)	Aumento dos teores de água no solo; maior produtividade; melhorias na qualidade física e química do solo, incluindo área de irrigações.	Li et al. (2015); Sun et al. (2018).
SPD	Temperado (Estados Unidos da América)	Menor escoamento superficial e erosão do solo; maior conservação do solo e da água; menor contaminação do solo; aumento da infiltração; maior eficiência no uso/armazenamento da água no solo.	Devlin; Barnes (2009); Williams; Wuest, (2011).
SPD ³	Mediterrâneo (Itália)	Redução do escoamento superficial de água e solo; redução do transporte de sedimentos e de N para os rios.	Napoli et al. (2017)
PC ⁴	Tropical (Brasil)	Baixa agregação, maior compactação e menor porosidade no perfil.	Moraes et al. (2016)

¹Sistema Integrado de Produção Agropecuária. ²Sistema Plantio Direto - culturas de grãos. ³Sistema de manejo com plantas de cobertura (gramas) na entrelinha de videiras. ⁴Plantio Convencional.

Sistemas de manejo com rotação de culturas, manutenção do solo coberto e não revolvimento do solo aumentam os teores de matéria orgânica e proporcionam maior retenção e infiltração de água no solo. A maior infiltração de água está relacionada à redução da compactação e à maior agregação do solo (MORAES et al., 2018; BONETTI et al., 2019). A presença de matéria orgânica aumenta as cargas negativas do solo (dissociação dos grupos funcionais carboxílicos), o qual aliado à capacidade de o material orgânico reter água, melhora o estado hídrico do solo. Em adição, fatores relacionados ao correto uso de sistemas de irrigação, para os cultivos (p. ex., irrigação por gotejamento em hortaliças), são considerados medidas a fim de melhorar a eficiência do uso da água (GEBREHIWOT; GEBREWAHID, 2016).

Assim, o aumento na eficiência do uso da água, via sistemas de manejo do solo e da irrigação, pode significar o sucesso da atividade agrícola. A maior eficiência em reter a água no solo pode contribuir para superar “veranicos” (períodos curtos de ausência de precipitação, p. ex., 10 dias). Esse fato, em conjunto com a melhoria das características físicas e químicas do solo, proporciona aumento da produtividade das plantas.

1.3 A ÁGUA E O MEIO AMBIENTE

A manutenção da qualidade da água é um fator que impacta diretamente os seres vivos do planeta Terra. A contaminação da água (discutido com maior ênfase no Capítulo 7) pelas atividades antrópicas, especialmente, via sistemas agrícolas com manejo inadequado, impacta diretamente os recursos hídricos. A deposição de sedimentos, contendo nutrientes como o nitrogênio fósforo, metais pesados e produtos fitossanitários causam a contaminação da água, a qual pode afetar animais, como anfíbios e peixes, reduzindo suas populações (MANN et al., 2009), além de atingir a qualidade de vida dos seres humanos (PALMA, 2011). O uso inadequado de produtos fitossanitários proporcionou a contaminação do leite humano proveniente das nutrizes residentes, em Lucas do Rio Verde-MT, que apresentou evidente contaminação multiresidual por agrotóxicos organoclorados, piretroides e dinitroanilinas (PALMA, 2011). Nesse sentido, a regulação do uso de produtos fitossanitários demanda conscientização e fiscalização.

O órgão governamental que regulamenta políticas sobre padrões de qualidade das águas no Brasil é o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). O órgão estabelece limites paramétricos para a balneabilidade (permissão para tomar banhos nas praias), à água

doce de consumo humano, ou até as águas de devolução ao meio ambiente, ao licenciamento de atividades potencialmente poluidoras, estabelecer normas, estabelecer critérios ao controle e à manutenção da qualidade do meio ambiente e ao uso racional dos recursos ambientais, em especial, os hídricos, entre outros relacionados à política nacional do meio ambiente. Tais critérios são estabelecidos para prevenir a contaminação ou poluição das águas por características físicas, químicas e biológicas.

Os principais focos de contaminação ambiental da água são os efluentes de indústrias e esgotos urbanos, por elevada carga de contaminantes. Os efluentes industriais, tais como refinarias, gaseificadores de coque e plantas petroquímicas, com frequência, contêm elevados teores de compostos orgânicos, entre eles, os compostos fenólicos (PHU et al., 2001). A toxicidade desses compostos, em ambientes aquáticos, tem sido intensamente estudada e está bem estabelecido que a sua presença, em níveis de partes por milhão (ppm), afeta, significativamente, a qualidade da água (GUERRA, 2001). Outra característica indesejável desses contaminantes é o fato de que, no processo de cloração da água potável, a sua reação com cloro produz clorofenóis e policlorofenóis, que são substâncias carcinogênicas (COLARIETI et al., 2002).

Em adição, o CONAMA também regulamenta os parâmetros que os efluentes devem ter para serem lançados aos corpos hídricos (CONAMA, 2005). Bavaresco e Spier (2017) destacam os principais tratamentos que podem ser utilizados, para diminuir a carga contaminante de efluentes: *a*) filtração (utilizada para remover os materiais sólidos); *b*) aeração de lagoas de estabilização (aumenta o teor de O₂ na água e permite a decomposição de resíduos orgânicos); *c*) floculação (utilizada para reter coloides); e *d*) estabilização do pH próximo a sete (pela adição de ácidos ou bases). Salienta-se que a contaminação por mercúrio, cádmio, chumbo e outros pode demandar medidas mais complexas e em longo prazo.

Estima-se que os riscos à qualidade da água sejam maiores com o passar do tempo, como na projeção até o ano de 2050 na América do Sul (Figura 1.1).

Além de práticas de manejo agrícola, as políticas públicas visando manter a qualidade da água em áreas urbanas devem ser implementadas. O uso dos solos urbanos afeta negativamente a proporção de macroagregados, aumenta a perda de carbono associado a solos superficiais e diminui a condutividade hidráulica do solo (CHEN et al., 2014). Assim,

em altas precipitações, a baixa infiltração de água facilita o arraste de resíduos de origem urbana, que são transportados pelos rios, atingindo os mananciais em áreas urbanas e rurais. Alternativas para reduzir esses problemas passam pelo plantio de árvores e o respeito às áreas verdes, que melhoram substancialmente as propriedades do solo compactado em profundidade, proporcionando maior infiltração de água.

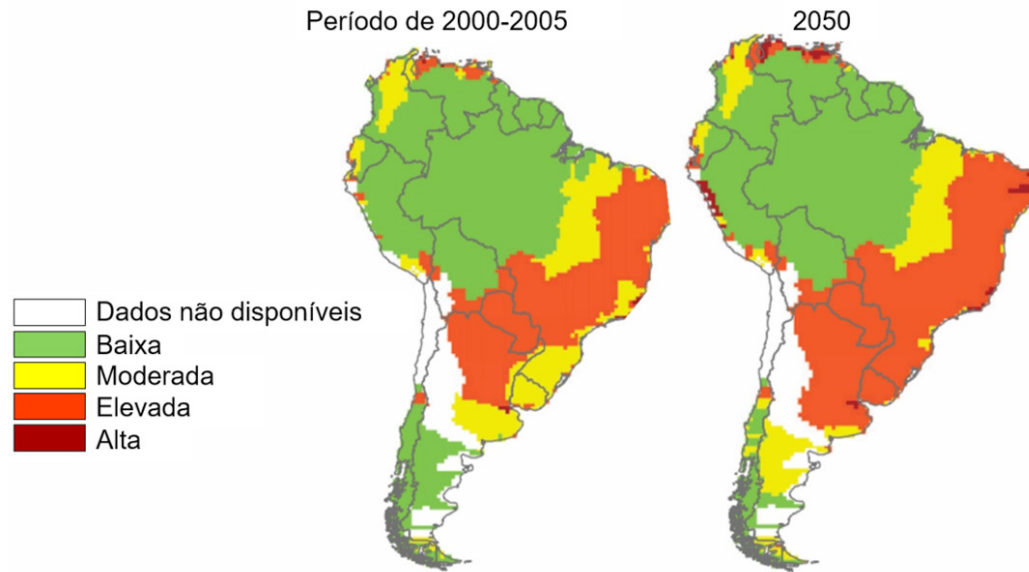


FIGURA 1.1 Níveis de risco de comprometimento da qualidade da água nas principais bacias hidrográficas da América do Sul, utilizando o período-base 2000-2005 e comparando com a projeção para o ano de 2050. Adaptado: (WWAP/UNESCO, 2016).

As atividades antrópicas ainda podem influenciar na distribuição das chuvas. As alterações climáticas observadas, nas últimas décadas, podem afetar a precipitação pluvial em diferentes regiões do planeta. Essa mudança afetará de maneira negativa muitas espécies de animais de água doce e a composição das comunidades e habitats (MANCOSU et al., 2015). Segundo o relatório da UNESCO (WWAP/UNESCO, 2016), haverá uma provável diminuição de 20% de acesso aos recursos hídricos pelo aumento da temperatura média global. Esse fato impactará diretamente na economia. Quase US\$ 500 bilhões anuais são os custos da insegurança hídrica para a economia mundial. Abaixo, na Tabela 1.3, estão algumas funções do solo que podem ser influenciadas pelas práticas agrícolas adotadas.

TABELA 1.3 Funções ambientais do solo e práticas que podem favorecer ou prejudicar o seu desempenho.

Função	Descrição	Prática que influencia na função
Armazenamento de águas pluviais	O solo funciona como um absorvente de água, reduzindo o escoamento superficial/erosão e armazenando água para as plantas.	Práticas que afetam características envolvidas na infiltração e retenção de água (tráfego de máquinas/animais com excesso de umidade no solo, mobilização excessiva e solo sem cobertura vegetal).
Controle do nível de lençóis freáticos	A água pluvial pode chegar ao lençol freático quando está acima da capacidade de retenção das camadas superficiais. A água pode ascender no solo a partir do lençol freático em solo seco.	Tal função está relacionada às características do solo, que influenciam a retenção de água, como a agregação do solo beneficiada pelo SPD e por características intrínsecas do solo, como a textura.
Fornecimento de nutrientes para plantas e organismos	O solo tem capacidade de adsorver nutrientes no solo e disponibilizá-los lentamente às plantas ou organismos, evitando que tais elementos sejam perdidos por lixiviação.	Tal função tem maior desempenho se forem realizadas práticas que incrementam o conteúdo de matéria orgânica do solo, como o SPD, ou que ajustam o pH do solo a valores desejados (5,5 a 7,0).
Sustentação da vegetação e da agricultura	O solo tem a função de servir de base para o cultivo de plantas/ produção de alimentos, fornecendo-lhes água e nutrientes.	Práticas agrícolas que influenciam o armazenamento de águas pluviais e fornecimento de nutriente para as plantas são comuns à essa função do solo.
Retenção de carbono	No solo encontra-se o segundo maior estoque de C do planeta, por meio do acúmulo de matéria orgânica.	Práticas que favorecem a decomposição da matéria orgânica, como o sistema preparo convencional, aumentam a emissão de C para a atmosfera.

Continua ...

TABELA 1.3 Continuação.

Função	Descrição	Prática que influencia na função
Suporte de obras civis	O solo compactado desempenha o papel de sustentação e transforma-se em um corpo sólido que suporta grande quantidade de carga.	Tal papel é desempenhado com aptidão diferenciada, em função de características específicas de cada solo, como a mineralogia predominante do solo.
Neutralização de substâncias tóxicas ou potencialmente tóxicas	O solo, por meio de suas características químicas, tem a capacidade de reter elementos químicos potencialmente tóxicos que comprometem a qualidade de águas	Práticas que favorecem o aumento da capacidade de o solo reter esses elementos, como aumento da matéria orgânica. Além disso, conhecimento sobre o material (fertilizante/resíduo) está sendo aplicado no solo.

Adaptado de Giasson, Nascimento e Inda (2006).

Finalmente, todos os aspectos relacionados com qualidade e quantidade de água estão conectados com atividades antrópicas. As práticas adotadas sobre o solo podem influenciar positiva ou negativamente o desempenho das funções do solo. O manejo e a conservação da água e do solo são de responsabilidade da população urbana e rural e demandam conhecimento e técnicas para manejo sustentável. Desta forma, o solo poderá desenvolver suas funções ambientais, servindo de fonte econômica para as gerações futuras.

1.4 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABELL, R. et al. **Beyond the Fuente: The Environmental, Economic, and Community Benefits of Source Water Protection**. Arlington: The Nature Conservancy, 2017. 20p.

ALEXANDRATOS, N.; BRUINSMA, J. World agriculture towards 2030/2050. **Land Use Policy**, v. 20, n. 4, p. 375, 2012.

ALMEIDA, W. S. et al. Effect of soil tillage and vegetal cover on soil water infiltration. **Soil and Tillage Research**, v. 175, p. 130-138, 2018.

BAVARESCO, J.; SPIER, V. C. **Química ambiental**. Curitiba: IFPR. 2017. 113p.

BELL, L. W.; MOORE, A. D.; KIRKEGAARD, J. A. Evolution in crop – livestock integration systems that improve farm productivity and environmental performance in Australia. **European Journal of Agronomy**, v. 57, p. 10-20, 2014.

BONETTI, J. A. et al. Influência do sistema integrado de produção agropecuária no solo e na produtividade de soja e braquiária. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 45, n.1, p. 104-112, 2015.

BONETTI, J. A. et al. Resilience of soils with different texture, mineralogy and organic matter under long-term conservation systems. **Soil and Tillage Research**, v. 174, p. 104-112, 2017.

BONETTI, J. A. et al. Impact of a long-term crop-livestock system on the physical and hydraulic properties of an Oxisol. **Soil and Tillage Research**, v. 186, p. 280-291, 2019.

BORGHETTI, J. R. et al. **Agricultura Irrigada Sustentável no Brasil: Identificação de Áreas Prioritárias**. Brasília: FAO, 2017. 244p.

CECAGNO, D. et al. Least limiting water range and soybean yield in system under different grazing different grazing intensities. **Soil and Tillage Research**, v. 156, p. 54-62, 2016.

CHAVARRIA, G.; SANTOS, H. P. dos. Plant water relations: Absorption, transport and control mechanisms. In: MONTANARO, G. (Ed.). **Advances in Selected Plant Physiology Aspects**. 1. ed. Rijeka: Masa Vidovic, 2012. p. 105-132.

CHEN, Y. et al. Influence of urban land development and subsequent soil rehabilitation on soil aggregates, carbon, and hydraulic conductivity. **Science of the Total Environment**, v. 494-495, p. 329-336, 2014.

COLARIETI, M. L. et al. Soil-catalyzed polymerization of phenolics in polluted waters, **Water Research**, v. 36, n. 12, p. 3015-3022, 2002.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE - CONAMA. **Resolução nº 357, de 17 de março de 2005**. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Poder Executivo, Brasília, DF, 18 mar. 2005. Seção 1, p. 58-63.

DEVLIN, D. L.; BARNES, P. L. **Impacts of no-till water quality**. 1. ed. Kansas: Kansas State University, 2009. 4p.

FISCHER, G. et al. Climate change impacts on irrigation water requirements: Effects of mitigation, 1990-2080. **Technological Forecasting and Social Change**, v. 74, n. 7, p. 1083-1107, 2007.

FOOD AGRICULTURE ORGANIZATION - FAO. **Review of world water resources by country**. 23. ed. Roma: FAO, 2003. v. 23. 124p.

FRANZLUEBBERS, A. J.; STUEDEMANN, J. A.; FRANKLIN, D. H. Water infiltration and surface-soil structural properties as influenced by animal traffic in the Southern Piedmont USA. **Renewable Agriculture and Food Systems**, v. 27, n. 4, p. 256-265, 2011.

GEBREHIWOT, K. A.; GEBREWAHID, M. G. The need for agricultural water management in sub-saharan Africa. **Journal of Water Resource and Protection**, v. 08, n. 9, p. 835-843, 2016.

GIASSON, E.; NASCIMENTO, P. C.; INDA, A. V. Solos urbanos: funções, impactos e planejamento de uso. In: DALMOLIN, R. S. D.; PEDRON, F. A.; AZEVEDO, A. C. (Eds). **Solos e Ambiente: os solos e as cidades**. 1. ed. Santa Maria: Orium, 2006. 141p.

GUERRA, R. Ecotoxicological and chemical evaluation of phenolic compounds in industrial effluents. **Chemosphere**, v. 44, n. 8, p. 1737-1747, 2001.

INTERNATIONAL GROUNDWATER RESOURCES ASSESSMENT CENTRE – IGRAC. **Roundwater overview making the invisible visible**. 2018. Disponível em <https://www.unwater.org/publications/groundwater-overview-making-the-invisible-visible/>. Acesso em: outubro de 2018.

LI, H. et al. The effect of conservation tillage on crop yield in China. **Frontiers of Agricultural Science and Engineering**, v. 2, n. 2, p. 179-185, 2015.

LIPPER, L. et al. Climate-smart agriculture for food security. **Nature Climate Change**, v. 4, n. 12, p. 1068-1072, 2014.

MANCOSU, N. et al. Water scarcity and future challenges for food Production. **Water**, v. 7, n. 3, p. 975-992, 2015.

MANN, R. M. et al. Amphibians and agricultural chemicals: Review of the risks in a complex environment. **Environmental Pollution**, v. 157, n. 11, p. 2903-2927, 2009.

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

NAPOLI, M. et al. Assessment of soil and nutrient losses by runoff under different soil management practices in an Italian hilly vineyard. **Soil and Tillage Research**, v. 168, p. 71-80, 2017.

PALMA, D. C. A. **Agrotóxicos em leite humano de mães residentes em Lucas do Rio Verde – MT**. Dissertação (Mestrado em Saúde Coletiva). Pós-Graduação em Saúde Coletiva, Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, p. 103, 2011.

PHU, N. et al. Characterization and activity of Fe-ZSM-5 catalysts for the total oxidation of phenol in aqueous solutions. **Applied Catalysis B: Environmental**, v. 34, n. 267, p. 267-275, 2001.

RANGEL, M. C.; BRITTO, J. M. Processos avançados de oxidação de compostos fenólicos em efluentes industriais. **Química Nova**, São Paulo, v. 31, n.1, p. 114-122, 2008.

REICHARDT, K.; TIMM, L. C. **O solo, planta e atmosfera: Conceitos, processos e aplicações**. 2. ed. Barueri: Manole, 2012. 524p.

SCHAEFER, K. et al. A model-data comparison of gross primary productivity: Results from the north American carbon program site synthesis. **Journal of Geophysical Research: Biogeosciences**, v. 117, n. 3, p. 1-15, 2012.

SUN, H. et al. The long-term impact of irrigation on selected soil properties and grain production. **Journal of Soil and Water Conservation**, v. 73, n. 3, p. 310-320, 2018.

UN DESA. **World Population Prospects: Key findings and advance tables**. New York: United Nations, 2017. 46p.

WILLIAMS, J. D.; WUEST, S. B. Tillage and no-tillage conservation effectiveness in the intermediate precipitation zone of the inland Pacific Northwest, United States. **Journal of Soil and Water Conservation**, v. 66, n. 4, p. 242-249, 2011.

WORLD WATER ASSESSMENT PROGRAM/ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS PARA A EDUCAÇÃO, A CIÊNCIA E A CULTURA - WWAP/UNESCO. **Relatório Mundial das Nações Unidas sobre Desenvolvimento dos Recursos Hídricos 2016**. Disponível em: <<http://unesdoc.unesco.org/images/0024/002440/244041por.pdf>>. Acesso em: outubro de 2018.

CAPÍTULO 2

RELAÇÃO DA ÁGUA COM A FERTILIDADE DO SOLO

Amanda Posselt Martins¹

Luiz Gustavo de Oliveira Denardin²

Murilo Veloso Gomes³

¹Professora do Departamento de Solos da Faculdade de Agronomia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre - RS

²Doutorando do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo da UFRGS, Porto Alegre - RS

³Pós-doutorando do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo da UFRGS, Porto Alegre - RS

E-mails: amanda.posselt@ufrgs.br, luizgdenardin@gmail.com, murilo.veloso@ufrgs.br

2.1 INTRODUÇÃO

O conceito mais atual de fertilidade do solo ressalta a capacidade do solo em suprir (ter e fornecer) nutrientes às plantas, deixando-as livre de elementos potencialmente tóxicos e suportando altas produtividades das culturas. Durante muito tempo, o conceito esteve estritamente relacionado a fatores de natureza química, embasado em um conceito químico e mineralista de fertilidade do solo. No entanto a produtividade das culturas é dependente de inúmeras variáveis relacionadas com fatores climáticos e inerentes à própria planta, além de diversos atributos, propriedades e características do próprio solo. Assim, avaliando-se sob uma visão integral e dinâmica dos fatores relacionados à fertilidade do solo, um solo fértil deve conter nutrientes em quantidades suficientes e balanceadas, em formas assimiláveis, estar livre de elementos tóxicos, além de também possuir boas características físicas e microbiológicas (MEURER, 2007).

O crescimento vegetal resulta da ação interativa de muitos fatores. Dos relacionados ao solo, as características físicas, químicas e biológicas condicionam a aptidão do solo para a obtenção de altos rendimentos. Cada um desses fatores, além de afetarem diretamente o crescimento das plantas, estão relacionados entre si (Figura 2.1). Exemplificando, a água e o ar ocupam o espaço poroso do solo, e os fatores que afetam as relações de água necessariamente influenciam o ar do solo. Por sua vez, mudanças no teor de umidade afetam não só o conteúdo de ar, mas também atributos químicos e microbiológicos do solo, diretamente relacionados ao crescimento e desenvolvimento das plantas.

Para que uma planta inicie um adequado desenvolvimento e, em consequência, possa produzir, ela necessita de requisitos indispensáveis, como uma base (solo) adequada para a fixação das raízes, temperatura, luz solar, ar, água e quantidade adequada de nutrientes. De todos eles, a água é um dos fatores de fundamental importância à produção vegetal, sendo tanto seu excesso quanto sua falta decisivos ao crescimento e desenvolvimento das plantas (REICHARDT, 1978). O crescimento de uma planta só inicia, a partir da germinação da semente, se houver um nível adequado de água, que permita o progresso do embrião. Ainda, posterior a isso, a plântula formada possui uma estrutura frágil, que necessita de uma alta disponibilidade de água para sobreviver (FLOSS, 2011).

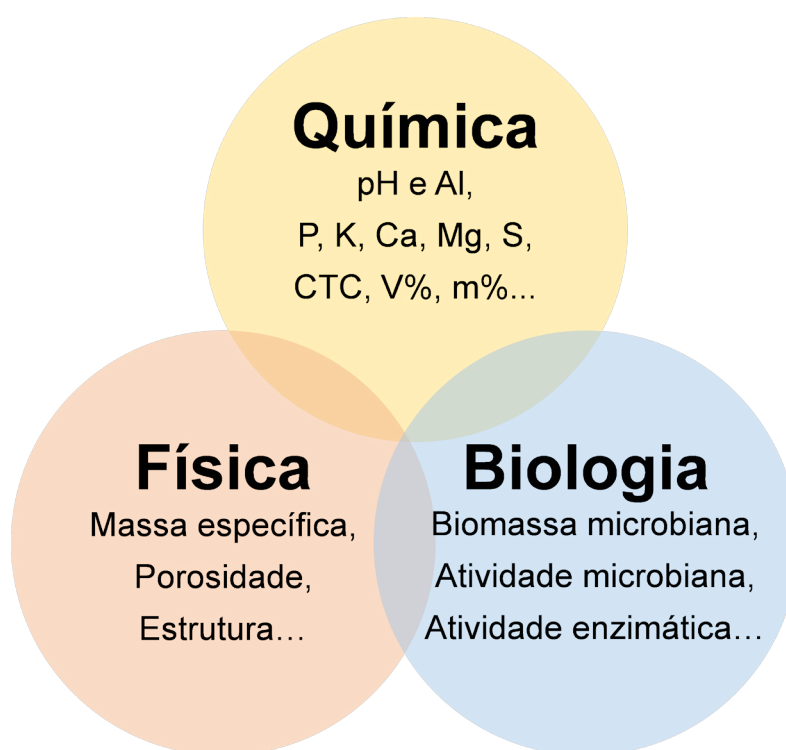


FIGURA 2.1 Fertilidade do solo, com base no conceito atual, sendo resultado da interação de fatores e características químicas, físicas e biológicas do solo.

As culturas utilizam expressivos volumes de água, durante todo o ciclo vegetativo e reprodutivo, necessários ao funcionamento de todos os processos, como a turgidez dos tecidos, o transporte de nutrientes e fotossintatos ou fotoassimilados, substrato metabólico na fotossíntese, entre outros (FLOSS, 2011). De todas as substâncias absorvidas pelas plantas, a água é a requerida em maior quantidade, sendo o principal constituinte dos tecidos vegetais e, algumas vezes, corresponde a 95% do peso total de massa verde (SUTCLIFE, 1980). Embora 98% da água que é absorvida retorne ao ambiente via transpiração, esse movimento de água é de extrema necessidade, para o crescimento vegetal e, portanto sua taxa deve ser mantida dentro dos limites ótimos para cada cultura (REICHARDT, 1976).

Relacionando a fertilidade do solo com o conteúdo de água, infere-se que cabe a um solo fértil possuir uma estrutura adequada capaz de armazenar água, em quantidades adequadas, por um maior período de tempo, além de viabilizar o desenvolvimento radicular das plantas, a fim de que possam explorar ao máximo o perfil do solo, garantindo taxas

constantes de absorção hídrica (MEURER, 2007). No solo, a água está sempre presente no espaço poroso em proporção complementar ao ar. A quantidade de água armazenada no solo irá depender da porosidade, do teor de matéria orgânica e da natureza dos minerais de argila e, por isso, devem ser preconizados manejos do solo que favoreçam incrementos e melhorias dessas estruturas.

Além da influência direta da água ao funcionamento dos processos biológicos das plantas, a água também atua como um fator-chave à nutrição de plantas, a qual é altamente dependente da disponibilidade de água no solo, influenciando na decomposição da matéria orgânica (reciclagem de nutrientes); no crescimento radicular (alongação das células); no transporte; na redistribuição e na assimilação de nutrientes pelas culturas, caracterizando-se por ser um dos fatores que mais influenciam na absorção de nutrientes (FLOSS, 2011). Todos os elementos essenciais (nutrientes) às plantas são majoritariamente absorvidos de um meio aquoso, por meio da solução do solo. O suprimento (transporte) desses nutrientes até a superfície das raízes é decorrente da ação conjunta de três mecanismos, sendo eles a interceptação radicular, o fluxo de massa e a difusão (BARBER, 1995). Por essa razão, as deficiências hídricas podem determinar também deficiências minerais nas culturas e a redução da eficiência de uso dos fertilizantes.

Nesse sentido, será abordada, no presente capítulo, a relação da água com o adequado crescimento e desenvolvimento de plantas, em outras palavras, traduz-se em um solo fértil (ou na fertilidade de um solo), que supra ar, água e nutrientes em quantidades e proporções adequadas. Para tanto, será, a princípio, tratado do papel da “fertilidade física”, que condiciona a disponibilidade de água no solo e, em seguida, a sua relação com o suprimento de nutrientes às plantas.

2.2 DISPONIBILIDADE DE ÁGUA NO SOLO: RELAÇÃO COM FATORES FÍSICOS E RESPOSTA DE PLANTAS

A fertilidade física do solo é um dos componentes que abrangem a qualidade do solo e está relacionada à sua fertilidade química, que é o objeto de estudo deste capítulo (Figura 1). A água, o oxigênio, a temperatura e a resistência mecânica afetam a emergência da semente ou crescimento radicular que, por conseguinte, afetam o crescimento da planta (LETEY,

1985) e serão abordados novamente e com maior ênfase no Capítulo 3. O conteúdo de água no solo pode também influenciar a troca de gases, bem como a temperatura do solo e a resistência mecânica. Das quatro condições físicas diretamente relacionadas ao crescimento das plantas, a água é o fator controlador dominante, afetando os outros três fatores. Dessa forma, a fertilidade física do solo tem um papel importante à fertilidade química do solo, visto que a disponibilidade de água no solo é fundamental às plantas, e os microrganismos, para a regulação de trocas gasosas e para o suprimento de nutrientes.

O conteúdo de água no solo está constantemente mudando por causa da evapotranspiração, precipitação, irrigação, percolação e os movimentos ascensionais da água. A água não é extraída uniformemente pela zona das raízes. Então, diferenças no potencial de água no solo ocorrem em posições diferentes na zona da raiz. Nenhum valor único de potencial de água pode descrever a condição à qual a planta é exposta.

A importância do parâmetro que liga a água do solo com o crescimento da planta, entretanto não é o conteúdo de água no solo, mas o potencial de água no solo (LETEY, 1985). O potencial de água no solo refere-se à energia necessária, para a água ser movida de um lugar com maior energia potencial para um de menor, podendo-se determinar o potencial de movimento da água no solo. Tipos diferentes de solo contêm diferentes conteúdos de água em um dado potencial. Há uma relação entre o conteúdo de água no solo e o potencial para um dado solo, sendo possível mensurar o conteúdo de água e inferir o valor do potencial de água no solo se a relação entre os dois é conhecida. Modificações na disponibilidade de água, na difusão de oxigênio e na resistência do solo à penetração das raízes (discutido com maior profundidade no Capítulo 3) podem prejudicar a capacidade do solo em promover condições físicas adequadas ao crescimento do sistema radicular e desenvolvimento das plantas (TORMENA; SILVA; LIBARDI, 1998). Exemplos de deterioração da qualidade física do solo, afetando o aproveitamento da água pelas culturas, podem ser a má infiltração de água, escoamento superficial da água, endurecimento do solo, aeração deficiente, pouca capacidade de enraizamento e baixa trabalhabilidade do solo. Em geral, um solo exhibe vários ou todos esses problemas físicos, ao mesmo tempo, sendo que todos esses sintomas têm uma causa comum: a deterioração da estrutura do solo. Por outro lado, a melhoria da qualidade física do solo ocorre quando o solo exhibe o oposto ou a ausência dessas condições.

Na ausência de limitações térmicas (como é o caso dos solos brasileiros), há um impacto direto da estrutura do solo sobre a relação entre o conteúdo de água e o crescimento de plantas. A faixa de conteúdo de água no solo, que não restringe o crescimento das plantas, pode ser integrada a um único parâmetro, conhecido como intervalo hídrico ótimo (IHO), que reflete os efeitos de diferentes propriedades físicas, em processos biológicos, como, por exemplo, o crescimento das plantas.

O IHO define uma região delimitada por limites superior e inferior de conteúdos de água, na qual são mínimas as limitações, para o crescimento das plantas, associadas com o potencial matricial ou disponibilidade de água, aeração e a resistência do solo à penetração das raízes (Figura 2.2). O limite superior é usualmente associado ao conteúdo de água na capacidade de campo, e o limite inferior é associado ao conteúdo de água no ponto de murcha ou o menor potencial de água que não reduzirá o crescimento da planta. Entretanto o IHO pode ser afetado pela aeração e/ou resistência mecânica, sobretudo, em solos pobremente estruturados com alta massa específica do solo (TORMENA; SILVA; LIBARDI, 1998).

Considerando que diferentes solos retêm diferentes conteúdos de água, em dado potencial, é necessário utilizar o conceito do potencial em que a água está retida no solo, para definir os limites de disponibilidade de água às culturas (SILVA et al., 2010). Em teoria, logo após uma chuva ou uma irrigação, estando o solo completamente saturado, parte da água estaria livre no solo, ou seja, o potencial seria igual a zero. Nessa condição, a água no solo está sujeita à ação do campo gravitacional. No momento em que o fluxo de drenagem se tornar desprezível, o solo atinge o limite superior de disponibilidade de água às plantas, o qual tem sido estabelecido como capacidade de campo. Para solos tropicais, assume-se, usualmente, que nesse ponto a água no solo está retida num potencial de $-0,01$ MPa (SILVA et al., 2010).

Seguindo a condição de capacidade de campo, o conteúdo de água no solo decresce, gradualmente, em virtude da evapotranspiração pela superfície e da absorção pelas raízes das plantas. Com o decréscimo do conteúdo de água, verifica-se uma redução gradual do potencial até que a energia com a qual a água é retida pelo solo supera a capacidade das plantas em absorvê-la, e a planta murcha permanentemente. Nessa condição, define-se o conteúdo de água no ponto de murcha permanente, o qual possui boa correlação com o potencial da água no solo de $-1,5$ MPa (SILVA et al., 2010).

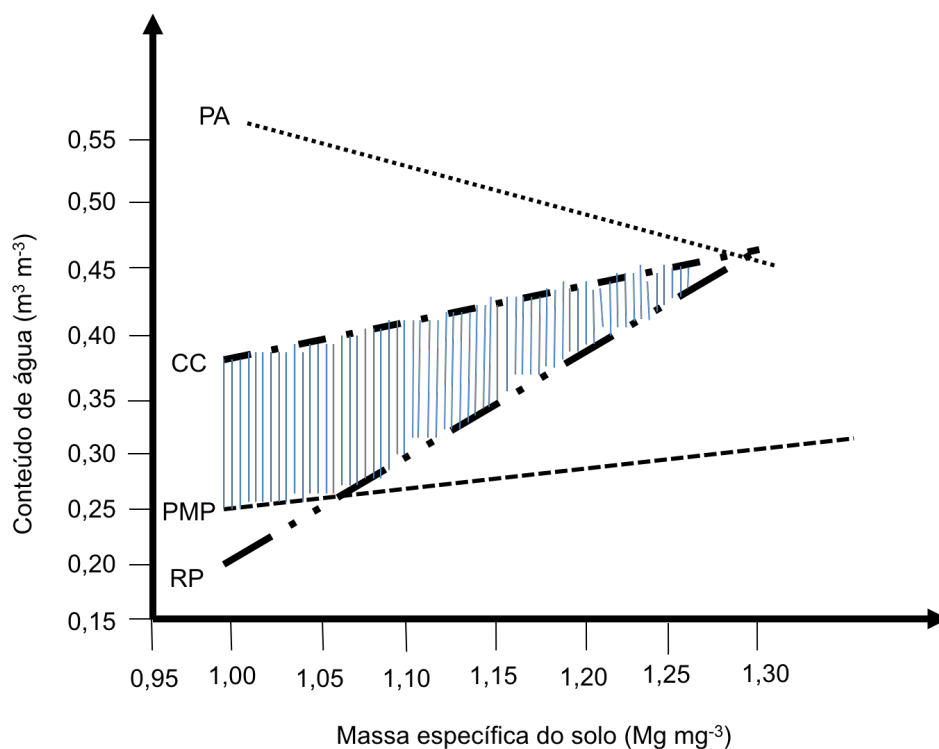


FIGURA 2.2 Variação do conteúdo de água com a massa específica do solo nos níveis críticos da capacidade de campo (CC), ponto de murcha permanente (PMP), porosidade de aeração de 10% (PA) e resistência à penetração de 2,0 MPa (RP). A área hachurada representa o intervalo híbrido ótimo (IHO). Fonte: Tormena, Silva e Libardi, (1998).

Em solos com estrutura preservada, em geral, em condições naturais ou bem manejados, a disponibilidade de água é igual à água disponível, ou seja, a diferença entre a capacidade de campo e o ponto de murcha permanente. Contudo o IHO diminui, quando o limite de porosidade de aeração (10%) é atingido, em umidade menor que a de capacidade de campo, e/ou o potencial de resistência à penetração é maior que o ponto de murcha permanente. Esse efeito ocorre por destruição de macroporos, oxidação da matéria orgânica e pela compactação, o que pode ser observado pelo aumento da massa específica do solo. Assim, o aumento na massa específica do solo pela compactação provoca modificações, nas propriedades físicas, principalmente, na porosidade de aeração e resistência à penetração diminuindo o IHO, podendo atingir o valor crítico, que indica um limitado crescimento das culturas acima desse valor.

Entretanto, ao limitar a porosidade de aeração a 10%, descartam-se as diferenças nos fluxos de ar que existem entre solos diferentes ou até mesmo em um solo sob manejos diferentes. A distribuição e a conformação dos poros influenciam diretamente no fluxo de gases e água no solo, por exemplo: um solo em Sistema Plantio Direto pode facilitar a difusão/distribuição de ar e água no solo pela continuidade de poros/bioporos, inexistentes em sistema convencional. Estudos de características dinâmicas do solo, descrevendo parâmetros de transporte de água e oxigênio, que possam ser integrados na quantificação do IHO, são necessários. A resistência à penetração também é supervalorizada como propriedade limitante ao desenvolvimento das plantas. No IHO, o limite para a RP é a umidade na qual atinge 2,0 MPa. Todavia, em muitos casos de solos compactados, mas com abundância de bioporos contínuos, esse valor não é limitante ao crescimento de raízes, pois funcionam como rotas alternativas à área compactada (SILVA et al., 2010; DE JONG VAN LIER; GUBIANI, 2015).

Os impactos da atividade humana (compactação do solo, preparo do solo) não apenas modificam a morfologia dos poros dos solos agrícolas, mas também alteram sua anisotropia, o que pode ter impactos nos principais processos e serviços ecossistêmicos vitais, como transporte e armazenamento de água, troca gasosa e aeração do solo. Esse fato, por sua vez, afeta a relação da fertilidade física com o transporte de nutrientes para as raízes, atingindo a produtividade das culturas como um todo. Os gradientes de potenciais, no sistema solo-planta-atmosfera, dão origem a um fluxo de água nessa mesma direção. A intensidade desse fluxo é determinada pelos próprios potenciais, bem como pelas resistências encontradas no caminho do escoamento. A condutividade hidráulica diminui enquanto o solo seca. Em decorrência, a resistência ao fluxo de água aumenta e, para a manutenção do fluxo de água, o potencial da raiz diminuirá, gerando uma diferença de potencial maior entre solo e raiz (DE JONG VAN LIER, 2010). No entanto existe um limite de potencial de água na raiz. Próximo a esse limite, mecanismos fisiológicos causam o fechamento de estômatos nas folhas, órgão em que ocorrem as trocas gasosas com a atmosfera. Dessa forma, aumenta a resistência total do caminho solo-planta-atmosfera e diminui o fluxo de água (transpiração). Ao mesmo tempo em que diminui a transpiração, por causa do fechamento dos estômatos, a entrada de dióxido de carbono fica prejudicada, afetando negativamente a taxa fotossintética da planta (DE JONG VAN LIER, 2010).

2.3 IMPORTÂNCIA DA ÁGUA PARA O SUPRIMENTO DE NUTRIENTES ÀS PLANTAS

A fertilidade química do solo é aquela “mais conhecida”, advinda do conceito químico e mineralista, ao apontar que um solo fértil é aquele capaz de suprir as plantas de nutrientes, em quantidades e proporções adequadas e na ausência de elementos tóxicos. Conforme explanado anteriormente, diversos outros fatores interferem no crescimento e desenvolvimento das plantas e devem ser considerados, para definir a fertilidade de um solo, sendo a maioria deles ligados à dinâmica da água no solo.

Para as plantas apresentarem adequado crescimento e desenvolvimento, devem ser supridas de 14 elementos essenciais (nutrientes), majoritariamente pelo solo, via suprimento e absorção radicular. Para os processos de suprimento e absorção ocorrerem, faz-se necessário que tais nutrientes estejam dissolvidos na solução do solo. De forma sintetizada e simples, pode-se resumir o conceito de solução do solo como a fase líquida aquosa do solo ou, ainda, em outras palavras, como a água do solo com solutos dissolvidos. Na solução do solo, grande parte dos solutos são íons que ocorrem tanto na forma livre e hidratada como na forma complexada com ligantes orgânicos e inorgânicos. Desta maneira, fica visível a importância da água, no processo de suprimento e absorção de nutrientes, pois se não há disponibilidade de água, não há suprimento e/ou absorção de nutrientes.

Assim, a baixa disponibilidade hídrica no solo pode se tornar um fator limitante para o suprimento de nutrientes até a superfície das raízes. No entanto alguns trabalhos demonstram que, em condições de déficit hídrico, menos de 5% da massa total de raízes é capaz de absorver, no subsolo, mais de 60% do total de nutrientes absorvidos pelas plantas (FOX; LIPPS, 1960). Quanto menor a disponibilidade de água no solo, maior será o desenvolvimento radicular da planta em subsuperfície, conforme exemplificado na Figura 2.3. Isso ocorre, porque, em subsuperfície, as perdas por evaporação são menores, mantendo maiores teores de água, durante mais tempo, nessas camadas do solo. Sendo assim, as raízes respondem, quando há ocorrência do déficit hídrico, maior produção, em busca tanto por água como por nutrientes.

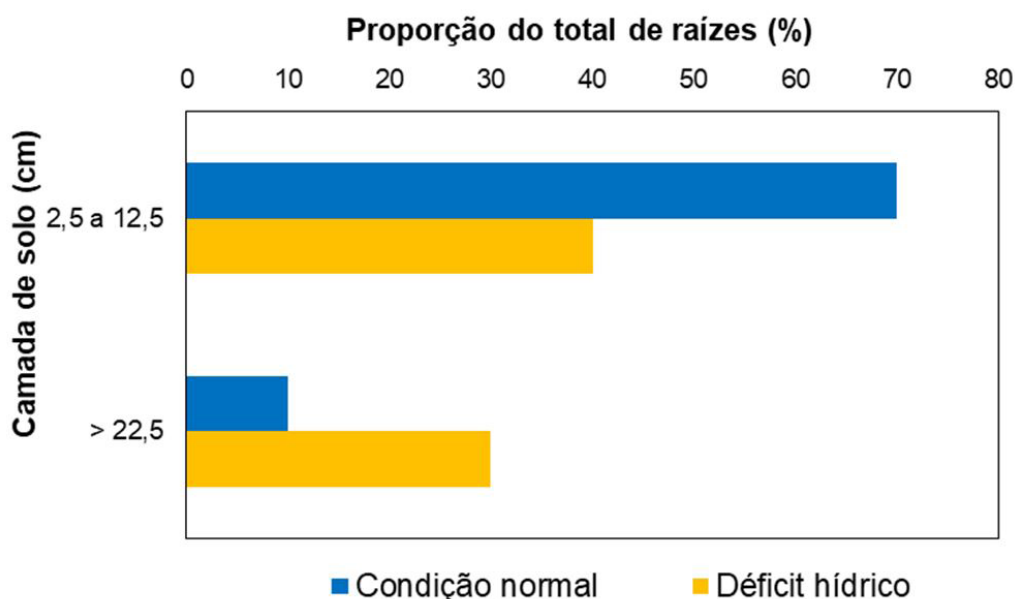


FIGURA 2.3 Distribuição em camadas do solo da proporção do total de raízes produzidas por plantas de cevada em condição normal de precipitação e na ocorrência de déficit hídrico. Fonte: adaptado de Scott-Russell (1977).

Dessa forma, fica claro que a água tem um papel primordial, no aproveitamento dos nutrientes, pois irá delimitar a abrangência do principal órgão de absorção de nutrientes minerais das plantas, que são as raízes. Para os nutrientes serem supridos até a superfície das raízes, existem, basicamente, três diferentes formas ou mecanismos, já citados, ou seja, a interceptação radicular, o fluxo de massa e a difusão. Todos esses mecanismos de suprimento são maximizados, quando há maior crescimento de raízes das plantas que, conforme explanado, responde diretamente à função da disponibilidade de água no solo. Assim, pode-se afirmar também que a água do solo influencia diretamente no maior ou menor suprimento de nutrientes.

Na interceptação radicular, com o crescimento das raízes no solo, ocorrerá a interceptação dos íons (nutrientes) em solução, ou seja, as raízes obtêm os nutrientes fisicamente, entrando em contato com eles na solução do solo ou, mais raramente, na superfície da fase sólida. Portanto é um mecanismo que é função direta da superfície de raiz por superfície de solo, e a quantidade máxima absorvida será dada pela quantidade de nutrientes

disponíveis nos espaços porosos ocupados pelas raízes (MARSCHNER, 1995). Em média, as raízes ocupam em torno de 1% do volume total de solo, mas algumas espécies, sobretudo plantas forrageiras e, quando adequadamente pastejadas, podem ocupar volumes maiores, de 3 a 5% na camada superficial do solo. Conforme demonstrado na Figura 2.3, o crescimento absoluto e o local de crescimento das raízes também serão afetados pela disponibilidade hídrica, afetando assim o suprimento de nutrientes por interceptação radicular no perfil do solo. Algumas associações da planta com microrganismos podem maximizar o suprimento de nutrientes por esse mecanismo. Um exemplo disso é a associação micorrízica. Augé (2004) demonstrou que a associação com micorrizas é afetada e pode impactar a disponibilidade de água no solo, aumentando o contato raiz-solo e, em consequência, a absorção de nutrientes por esse mecanismo.

O fluxo de massa consiste do suprimento do nutriente pelo seu movimento, em uma fase aquosa móvel, por diferença de potencial exercida pela planta. Assim, o fluxo de massa segue o fluxo transpiratório e alguns trabalhos registram que a quantidade de água mobilizada pelas plantas pode chegar a até 300 L por kg de matéria seca produzida. Dessa maneira, o fluxo de massa é uma função direta da concentração do nutriente em solução e do volume de água absorvido pela planta (MARSCHNER, 1995). Percebe-se que, nos dois fatores que fazem com que o suprimento de nutrientes às plantas por fluxo de massa seja maior ou menor, a água está envolvida: como solvente para a dissolução dos solutos (nutrientes) e diretamente sendo absorvida pelas plantas. Indiretamente, também se tem a água envolvida pela sua influência na produção de raízes (Figura 2.3), que poderá determinar o maior desenvolvimento vegetal e as taxas de transpiração, aumentando o suprimento de nutrientes via fluxo de massa.

Por fim, o suprimento de nutrientes, via processo de difusão, ocorre pelo movimento do íon, em distâncias muito curtas, em uma fase aquosa estacionária, ou seja, os nutrientes se movem na solução, de um local de alta concentração para um local de baixa concentração (superfície da raiz). A lei que rege o transporte difusivo é conhecida como lei de Fick, cujo modelo do fluxo por difusão é diretamente dependente do coeficiente de difusão molecular do soluto e do gradiente de concentração (razão entre a diferença de concentração e a distância a ser percorrida pelo soluto) (MARSCHNER, 1995). Nesse mecanismo de suprimento, a

importância e a contribuição da água é, ainda, mais relevante, pois o nutriente, além de precisar estar dissolvido na solução (água do solo), também, precisa se movimentar pelo meio aquoso do solo, em resposta ao gradiente de concentração. Por essa razão, solos que tendem a reter mais água, formando filmes d'água entre as partículas do solo, tendem a ter plantas mais bem nutridas. O fósforo e o potássio são dois nutrientes, em que há maior contribuição da difusão, para o seu respectivo suprimento às plantas.

Essa inter-relação entre água, distribuição de raízes e suprimento de nutrientes às plantas, principalmente, no mecanismo da difusão, pode ser melhor entendida, observando a Figura 2.4. Nota-se que a contribuição de camadas superficiais do solo, durante o estágio vegetativo das plantas, em que a taxa de transpiração é muito alta, é maior do que no período reprodutivo. No caso do fósforo e neste estudo, a absorção desse nutriente, durante o período vegetativo, foi oriunda quase 80% da camada superficial e apenas 20% de camadas subsuperficiais (Figura 2.4). Dessa forma, o estágio vegetativo é um período em que a planta determina um status de “déficit hídrico”, na superfície do solo, para o seu próprio período reprodutivo posterior, diminuindo tanto a quantidade de água quanto de nutrientes das camadas superficiais.

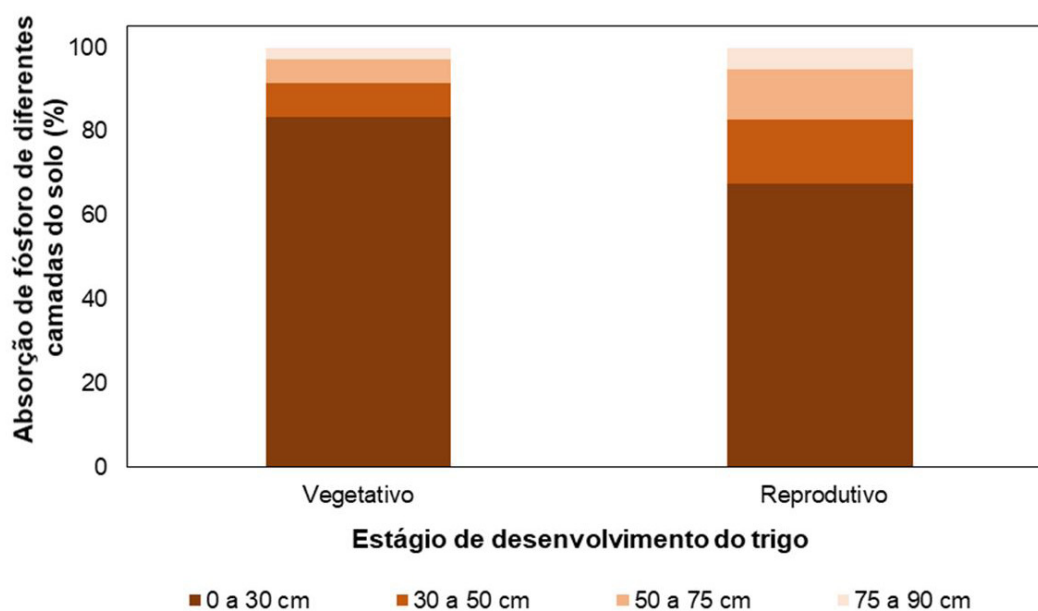


FIGURA 2.4 Absorção de fósforo de diferentes camadas do solo durante o desenvolvimento de plantas de trigo. Fonte: desenhado pelos autores a partir de Fleige et al. (1981).

A partir daí, muda-se completamente a contribuição das diferentes camadas de solo, para os nutrientes que são absorvidos, no estágio reprodutivo, com 65% oriundos da camada superficial e 35% de camadas subsuperficiais (Figura 2.4), denotando a importância de raízes mais profundas e de condições de solo que propiciem esse aprofundamento. Vale salientar que os teores de fósforo em subsuperfície são de 2 a 5 vezes menor que aqueles observados em superfície (FLEIGE et al., 1981) e, ainda assim, tem uma importância muito grande, para a nutrição das plantas e o fornecimento dos elementos químicos essenciais ao seu adequado desenvolvimento e finalização de ciclo vital. Em toda essa dinâmica, a água é um fator essencial e determinante e, por isso, tem grande importância à percepção tanto da fertilidade do solo como da nutrição mineral de plantas, no que tange à compreensão da resposta que é observada nas plantas a campo.

2.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Percebe-se, pelo exposto no presente capítulo, ao entendimento dos fatores e pela lógica dos processos de crescimento e desenvolvimento vegetal, que é impossível dissociarem a fertilidade de um solo com a sua capacidade de armazenar e fornecer água às plantas. A utilização eficiente dos nutrientes que estão no solo, bem como aqueles que são adicionados via adubação, depende diretamente do estado hídrico da planta que, por sua vez, depende diretamente do estado hídrico do solo. Esse estado é determinado por inúmeros fatores, principalmente aqueles referentes aos fatores físicos, como estrutura e agregação, que também impactam diretamente no crescimento e na arquitetura das raízes das plantas, órgão responsável pela absorção de praticamente todos os nutrientes.

Além disso, ainda são raras as recomendações de calagem e de adubação (principais práticas pelas quais se maneja a fertilidade do solo) que levam em consideração os fatores físicos do solo, ou ainda, o estado hídrico. A compartimentalização das disciplinas e subdisciplinas da ciência do solo e da fisiologia vegetal abordam o que é usual, sem o entendimento das relações entre o solo e a planta, que se dá com estudos interdisciplinares e/ou transdisciplinares. Esse é um dos principais desafios para os profissionais que atuam no ramo, seja técnico, científico ou acadêmico, à busca de sistemas mais sustentáveis de produção de alimentos, com viabilidade econômica e ambiental.

2.5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AUGÉ, R. M. Arbuscular mycorrhizae and soil/plant water relations. **Canadian Journal of Soil Science**, v. 84, p. 373-381, 2004.

BARBER, S. A. **Soil nutrient bioavailability: A mechanistic approach**. 2.ed. New York, John Wiley and Sons, 1995. 414p.

DE JONG VAN LIER, Q. Disponibilidade de água às plantas. In: DE JONG VAN LIER, Q. (Ed.). **Física do solo**. Viçosa, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2010. p. 283-298.

DE JONG VAN LIER, Q.; GUBIANI, P. I. Beyond the “Least Limiting Water Range”: rethinking soil physics research in Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 39, n. 4, p. 925-939, 2015.

FLEIGE, H. et al. Die potentielle P-Anlieferung durch Diffusion als Funktion von Tiefe, Zeit und Durchwurzelung bei einer Parabraunerde au Löss. **Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft**, v. 32, p. 305-310, 1981.

FLOSS, E. L. **Fisiologia das plantas cultivadas**. 4. ed. Passo Fundo: UPE, 2011. 734p.

FOX, R. L.; LIPPS, R. C. Distribution and activity of roots in relation to soil properties. Trans. **Integrate Congress Soil Science**, v. 7, p. 260-267, 1960.

REICHARDT, K. **A água na produção agrícola**. São Paulo, McGraw-Hill do Brasil, 1978. 120p.

REICHARDT, K. Disponibilidade e absorção de nutrientes em relação às condições físicas do sistema solo-planta-atmosfera. In: MALAVOLTA, E. org. **Manual de química agrícola**. São Paulo, Agronômica Ceres, 1976. p. 134-135.

SUTCLIFE, J. F. **As plantas e a água**. São Paulo: EPU/Edusp, 1980. 123p.

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

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

MEURER, E. Fatores que influenciam o crescimento e o desenvolvimento das plantas. In: NOVAIS, R. F. et al. (Ed.). **Fertilidade do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p. 65-90.

SCOTT-RUSSELL, R. **Plant Root Systems:** Their function and interaction with the soil. New York: McGraw-Hill, 1977. 272p.

SILVA, A. P. et al. Indicadores de qualidade física do solo. In: DE JONG VAN LIER, Q. J. de. (Ed.). **Física do solo.** Viçosa, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2010. p. 241-281.

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**, Viçosa, v. 22, n.4, p. 573-581, 1998.

CAPÍTULO 3

RELAÇÕES DA ÁGUA COM PARÂMETROS FÍSICOS E CRESCIMENTO RADICULAR DAS PLANTAS

Moacir Tuzzin de Moraes¹

João de Andrade Bonetti²

Maurício Roberto Cherubin³

¹Professor, Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Câmpus Francisco Beltrão, Departamento de Ciências Agrárias, Francisco Beltrão - PR

²Professor, Universidade Estadual de Maringá, Departamento de Agronomia, Maringá - PR

³Professor, Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (ESALQ/USP), Departamento de Ciência do Solo, Piracicaba - SP

E-mails: moacir.tuzzin@gmail.com, agro.bonetti@gmail.com, cherubin@usp.br

3.1 INTRODUÇÃO

A dinâmica da água no solo está diretamente relacionada à produção vegetal (COLOMBI et al., 2018) e, deste modo, a caracterização dos fatores que interferem no movimento de água no solo se torna imprescindível para entender as interações no sistema solo-planta-atmosfera (DALY et al., 2017). Dentre os principais fatores, destacam-se a infiltração, o escoamento superficial, a redistribuição de água no perfil do solo, a drenagem profunda e a absorção de água pelas plantas (RITCHIE, 1981). O aperfeiçoamento do entendimento deste sistema dinâmico facilita a compreensão das interações solo-planta-atmosfera, relacionando os atributos de solo, de planta e da atmosfera com os processos biofísicos no sistema solo.

O movimento da água no solo, para posterior absorção pelas plantas, em geral, é não saturado (CARMINATI et al., 2010). Isso faz com que os processos relacionados com o movimento de água em meio não saturado, sejam mais complicados e de difícil descrição quantitativa, visto que, em muitos casos, há mudanças no estado e no teor de água do solo durante o fluxo (VAN DAM; FEDDES, 2000). Em estudos de dinâmica da água em meios porosos, a primeira equação de fluxo foi introduzida por (DARCY, 1856), o qual trabalhou com colunas de areia saturada de água. Essa equação, conhecida como equação de Darcy, estabelece que a quantidade de água que passa por unidade de tempo e de área, por meio de um meio poroso, é proporcional ao gradiente hidráulico. Portanto a constante de proporcionalidade, denominada condutividade hidráulica, caracteriza o meio poroso quanto à transmissão de água.

Os conceitos de condutividade hidráulica do solo não saturado e de potencial mátrico foram introduzidos por Buckingham (1907), com isso, verificou-se a relação funcional entre a condutividade hidráulica (K) e o conteúdo de água (θ) e entre potencial matricial (ϕ_m) e o θ , com base em equações de fluxo de calor e de eletricidade (NIMMO; LANDA, 2005). Buckingham (1907) teorizou uma equação de fluxo de água semelhante à de Darcy, para solo não saturado, entretanto desconsiderando o efeito da gravidade.

A consideração do efeito da gravidade só foi realizada por Richards (1928) com a definição do potencial total, pela soma do potencial mátrico com o potencial gravitacional.

Atualmente essa equação é denominada equação de Darcy-Buckingham. Richards (1931), também, combinou a equação de Darcy-Buckingham com a equação da continuidade, obtendo a equação diferencial geral, que descreve o movimento da água no solo, conhecida pelo seu nome, a equação de Richards.

Richards, ainda, apresentou a metodologia de determinação da condutividade hidráulica em solo não saturado. Esse procedimento consistiu em utilizar uma pequena coluna de solo, entre duas placas de cerâmica, mantendo um gradiente de potencial constante entre essas extremidades, por meio de colunas de água (PREVEDELLO; ARMINDO, 2015). Ou seja, uma vez atingido o regime estacionário, a condutividade hidráulica, em condição não saturada, pode ser estimada por meio da equação de Darcy-Buckingham.

Avanços nessa área de conhecimento da biofísica em relações solo-planta-atmosfera podem ser evidenciados, por meio de modelos que considerem as inter-relações da água no solo com as propriedades físicas que afetam diretamente o crescimento radicular das culturas.

3.2 INFLUÊNCIA DAS PROPRIEDADES DOS SOLOS NO CRESCIMENTO RADICULAR

O crescimento radicular, em particular, a taxa de alongamento radicular das culturas, pode ser limitado por vários fatores no solo, incluindo a deficiência ou toxicidade de elementos químicos (FOY, 1992), presença de patógenos ou pragas de solo, temperatura (LICHT; AL-KAISI, 2005), disponibilidade hídrica (BENGOUGH et al., 2011), aeração (VALENTINE et al., 2012) e resistência à penetração (BENGOUGH, 1997). Em termos de restrições físicas ao crescimento radicular, o estresse hídrico (falta de água para o crescimento radicular), hipóxia (deficiência de oxigênio) e o impedimento mecânico (solo duro para a penetração rápida das raízes) são os principais motivos para a formação de sistemas radiculares pequenos e superficiais (BENGOUGH et al., 2011).

Plantas com sistema radicular menos vigoroso exploram menor volume de solo e tornam-se mais suscetíveis a estresses bióticos, como ataques de pragas de solo. Desta forma, para uma mesma população de pragas, plantas com sistema radicular menos vigoroso sofrerão impactos maiores em relação a plantas com sistema radicular vigoroso e profundo.

O mesmo vale para fatores abióticos, cujas plantas com sistema radicular menos desenvolvido exploram menor volume de solo, reduzindo a zona de absorção de água e nutrientes, tornando-se mais suscetíveis ao estresse hídrico, em períodos de estiagem e às deficiências nutricionais em solos pobres quimicamente.

O crescimento de plantas está relacionado, em parte, com as características intrínsecas do solo (textura, estrutura, mineralogia, profundidade do perfil, entre outras), as quais estão associadas ao processo de formação do solo e, portanto não se alteraram em curto prazo. A maior parte das propriedades dos solos, que afetam tais relações, comportam-se de forma dinâmica no solo, com intensas modificações, em curto prazo, em resposta às práticas de manejo adotadas. Desta forma, no que se refere à complexidade do sistema solo, é difícil estabelecer relações estáticas entre propriedades ou processos do solo e o crescimento de plantas. Logo deve-se buscar compreender a dinâmica das propriedades do solo, em especial, da água, seja exclusivamente a partir de medições de campo ou por simulações numéricas, de fácil execução e baixo custo (MORAES; DEBIASI; FRANCHINI, 2018a), as quais podem facilitar a obtenção de resultados da dinâmica da água no solo (ALVES et al., 2012), melhorando o entendimento quanto às relações do sistema solo-planta-atmosfera.

3.2.1 Propriedades físicas do solo e o desenvolvimento das plantas

O adequado crescimento e desenvolvimento das plantas dependem da integração favorável de condições físicas, químicas e biológicas do solo. Sob o ponto de vista físico, são muitos os atributos (p. ex. massa específica, macroporosidade, microporosidade, textura, estrutura) passíveis de serem quantificados e monitorados, ao longo de um ou mais cultivos, incluindo aquelas que expressam a capacidade do solo desempenhar suas funções físicas (CHERUBIN et al., 2016) e outras que expressam a intensidade com esses processos e funções que estão ocorrendo no solo (CHERUBIN et al., 2017). No entanto é importante salientar que nem todas esses atributos afetam diretamente o crescimento e desenvolvimento das plantas. Conforme Letey (1985), os fatores que afetam diretamente o crescimento radicular são: água, oxigênio, temperatura e resistência mecânica do solo (Figura 3.1).

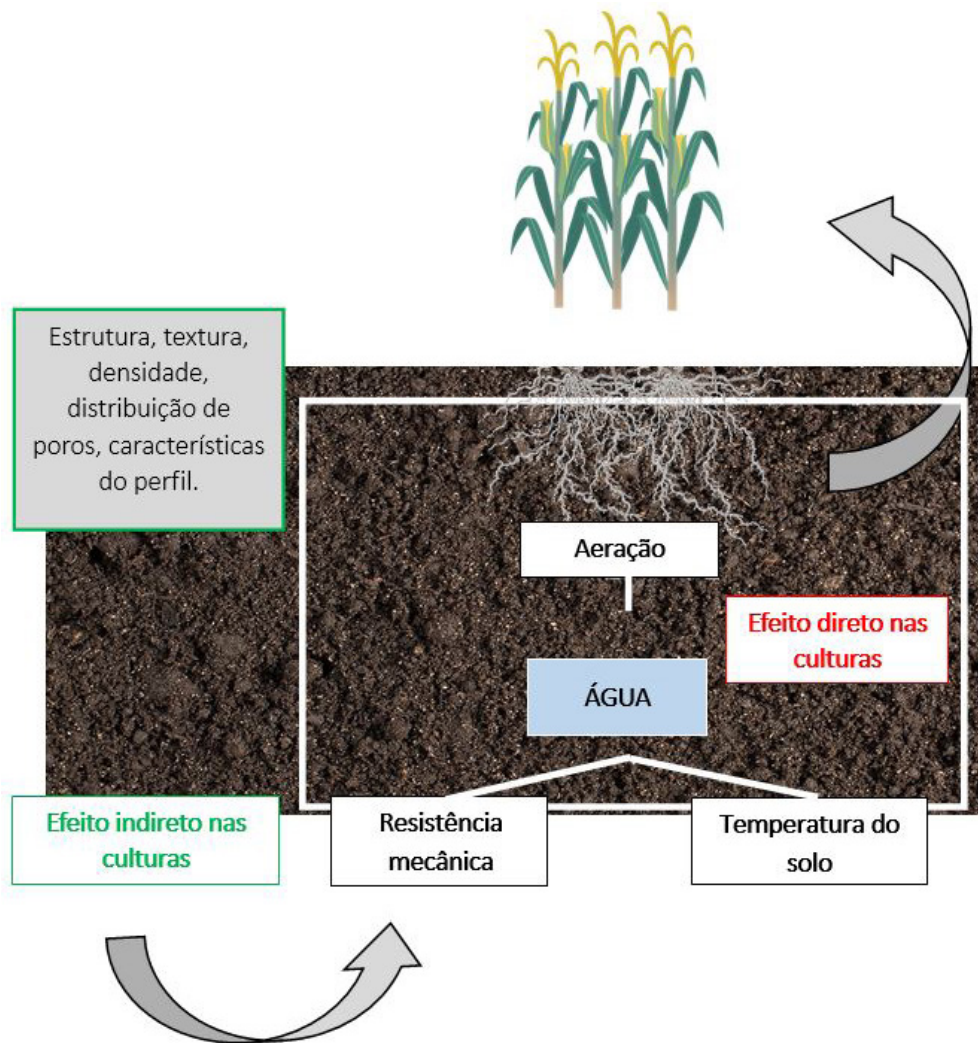


FIGURA 3.1 Relações entre condições físicas do solo e o desenvolvimento das culturas. Fonte: Adaptado: Letey (1985).

Dentre os principais fatores que afetam diretamente o crescimento radicular das culturas, a dinâmica da água no solo pode ser considerada como principal parâmetro. Portanto, além de conhecer o conteúdo de água no solo, é importante determinar o potencial com que está retida na matriz do solo e, conseqüentemente, a disponibilidade desta água para absorção radicular das plantas (DE JONG VAN LIER et al., 2008).

Outros importantes atributos físicos dos solos, comumente determinados em estudos de qualidade física do solo, tais como a textura, massa específica, estabilidade de agregados e

distribuição e o tamanho de poros afetam indiretamente o crescimento das plantas (LETEY, 1985). Esses atributos alteram os fluxos de calor, de gases, de água e de nutrientes no solo (KUNCORO et al., 2014). Assim, apesar de não afetar diretamente o crescimento de plantas, essas propriedades governam as alterações, na retenção de água, resistência à penetração, aeração e temperatura do solo, as quais são atributos que se relacionam diretamente com o crescimento radicular e parte aérea das plantas.

As plantas estão sempre expostas a uma complexa combinação de estresses atribuídos à variação do conteúdo de água, resistência mecânica do solo e aeração (BENGOUGH et al., 2011), afetando o crescimento radicular, especialmente, em solos compactados (LIPIEC et al., 2012).

Assim, pergunta-se qual é o valor ideal de cada atributo físico para o desenvolvimento e a produção das culturas? A resposta a essa questão não é simples, pois esses atributos variam conforme o tempo e a posição no solo (LETEY, 1985). Por exemplo, o conteúdo de água no solo está sempre variando em virtude da evapotranspiração, irrigação e/ou precipitação. A água é extraída, ao longo do perfil do solo, de forma a depender do volume radicular presente em cada camada e da disponibilidade hídrica, a qual está relacionada com o potencial de água no solo e à condutividade hidráulica não saturada do solo. Portanto um valor médio de conteúdo de água não representa todas as condições a que a planta pode ter sido exposta ao longo do ciclo de desenvolvimento da cultura. Além disso, os quatro fatores físicos do solo (água, aeração, temperatura e resistência mecânica) que afetam diretamente o crescimento das plantas estão inter-relacionados (LETEY, 1985), ou seja, a alteração do conteúdo de água do solo impacta em alterações na resistência mecânica, na aeração e nos fluxos de calor no perfil solo. Por exemplo, em condições de mínima resistência do solo à penetração das raízes, que ocorreria em solo saturado, haveria severa deficiência de aeração. Em termos gerais, maior conteúdo de água no solo está associado à menor resistência do solo à penetração (MORAES et al., 2013), menor porosidade de aeração (VALENTINE et al., 2012) e à taxa de difusividade térmica do solo (Figura 3.2).

Relações do crescimento, desenvolvimento e produtividade das culturas com as condições físicas do solo dependem de variáveis ambientais e genéticas. Neste contexto, Letey (1985) ressalta os seguintes aspectos: *i*) as espécies de plantas diferem em suas respostas

a propriedades físicas; *ii*) os diferentes estágios fenológicos de uma cultura podem ter diferentes valores limitantes de atributos físicos; e *iii*) os limites físicos impostos podem ser alterados pelas condições climáticas (clima temperado ou subtropical) e de tempo (excesso ou deficiência hídrica).

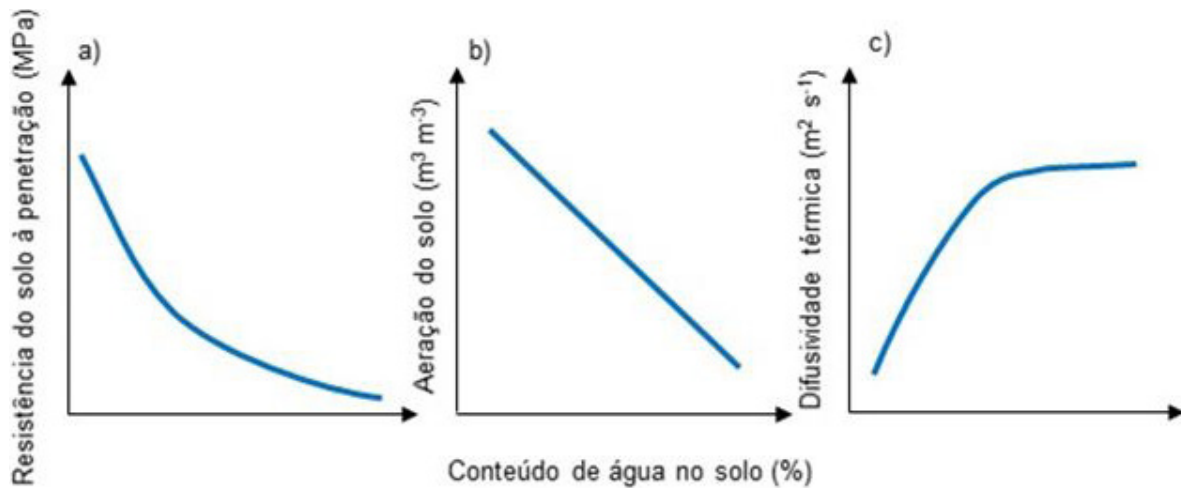


FIGURA 3.2 Relações teóricas do conteúdo de água no solo com a resistência do solo à penetração (a), aeração (b) e difusividade térmica no solo (c). Fonte: (a) adaptado de Moraes et al. (2012), (b, c) adaptado de Hillel (2004).

Como exposto, estabelecer relações diretas entre propriedades físicas do solo e crescimento das plantas. É evidente que não é uma tarefa fácil, entretanto, nas últimas décadas, tem sido crescente o esforço dos pesquisadores, para elucidar tais relações, buscando definir valores críticos ou limitantes ao crescimento de plantas. O potencial mátrico do solo governa a disponibilidade de água às plantas e afeta diretamente a sua taxa de crescimento (Figura 3.3). Quando o potencial mátrico é próximo a zero, o solo encontra-se saturado, portanto a taxa de crescimento das plantas é, na prática, nula por condições anóxicas do solo e conseqüente hipóxia (deficiência de O_2) (Figura 3.3a).

Ressalta-se que existem plantas adaptadas, para situações de solos encharcados e inundados (p. ex. arroz cultivado em áreas inundadas ou plantas de manguezais) e, portanto não são afetadas pelas condições de hipóxia e anóxia, conforme descrito na Figura 3.3. À medida que o solo é drenado, é natural que reduza o conteúdo de água, a partir da saturação

para valores próximos à capacidade de campo. O potencial matricial torna-se mais negativo, e o crescimento radicular das plantas aumenta linearmente até atingir um intervalo ótimo de disponibilidade de água às plantas, regulada pelo potencial matricial entre -6 e -10 kPa (MORAES et al., 2018a), que é comum ser descrita como potenciais próximos da capacidade de campo dos solos. Nesta faixa, o solo apresenta equilíbrio entre alta disponibilidade de água e adequado suprimento de oxigênio às plantas, portanto os estresses hídrico e de hipóxia atuando sobre as plantas são mínimos. À medida que o solo continua secando, a disponibilidade de água começa a ficar restrita e, assim, a taxa de crescimento das plantas começa a reduzir novamente, pelo estresse hídrico. Em termos conceituais, estima-se que o crescimento radicular das plantas se reduz, de forma gradual e chega a cessar completamente os valores próximos de -1000 kPa (BENGOUGH et al., 2011; MORAES et al., 2018a), os quais podem levar a planta à morte quando o potencial mátrico do solo atinge -1500 kPa, no chamado ponto de murcha permanente.

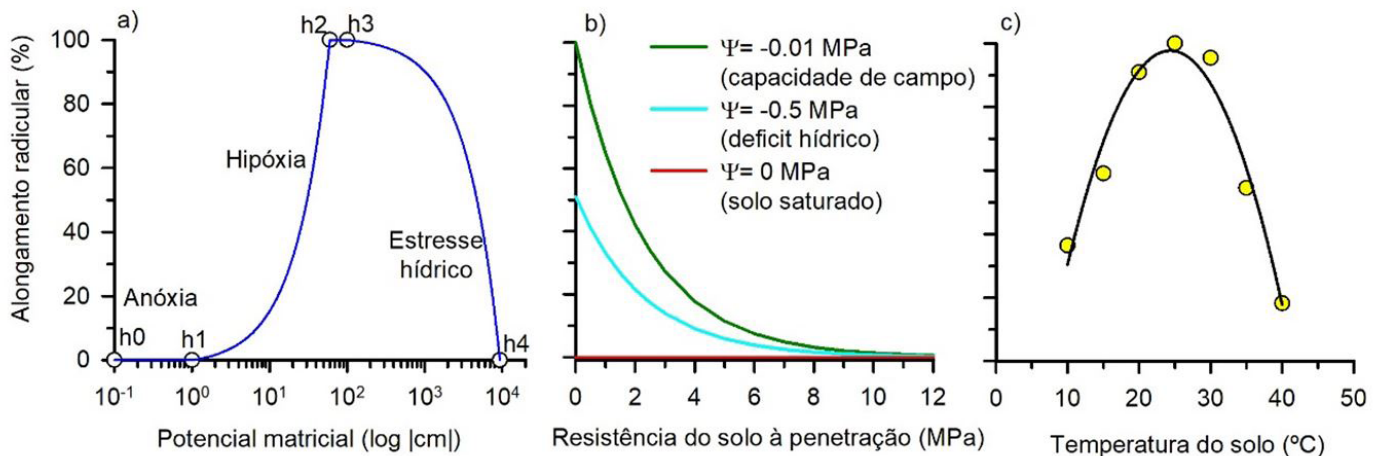


FIGURA 3.3 Relações teóricas do crescimento radicular de soja (a,b) e girassol (c) com a disponibilidade hídrica e de oxigênio (a), resistência do solo à penetração (b) e temperatura do solo (c). h_0 , h_1 , h_2 , h_3 e h_4 são limites dos potenciais matriciais que definem os intervalos dos estresses hídricos por anóxia (h_0 e h_1), hipóxia (h_1 e h_2) e déficit hídrico (h_3 e h_4) ao alongamento radicular das culturas. Fonte: Adaptado de Moraes et al. (2018b) (a,b) e McMichael e Burke (1998) (c).

A resistência mecânica do solo à penetração das raízes é outro fator muito debatido tanto na academia como no campo. Estudos pioneiros (TAYLOR; GARDNER, 1963; TAYLOR; RATLIFF, 1969; TAYLOR; ROBERSON; PARKER, 1966) evidenciaram que a relação entre a resistência mecânica e a taxa de alongamento radicular das plantas segue um comportamento exponencial negativo (Figura 3.3b). Assim, valores de resistência do solo à penetração acima de 2 MPa ocorrem, em geral, em solos agrícolas e, com frequência, causam redução de 50% na taxa de alongamento radicular das culturas, em comparação aos valores observados, em condições de ausência de impedimento mecânico (p. ex. taxa de alongamento em condição de ausência do solo, em cultivos com papel filtro ou algodão, ou dentro de um bioporos contínuo ou em uma rachadura no solo) (BENGOUGH et al., 2011). Desta forma, deve-se ter muito cuidado com o uso dessa informação, evitando propagar que valores de resistência do solo à penetração acima de 2 MPa são críticos ou limitantes ao crescimento das plantas, independente da espécie cultivada, características físicas e umidade do solo e práticas de manejo adotadas. Além disso, é importante salientar que o crescimento radicular das culturas somente será influenciado pela compactação do solo quando o estresse hídrico ou mecânico estiver atuando sobre o alongamento radicular. Portanto torna-se relevante identificar a disponibilidade de água associada com a difusividade e disponibilidade de oxigênio ao longo do perfil dos solos. Rickman, Letey e Stolzy (1966) mantiveram a taxa de difusão de oxigênio, em níveis adequados para culturas e verificaram que as raízes de tomates desenvolveram, igualmente, em solos com baixos e altos valores de massa específica do solo (em geral, quanto maior a massa específica de um dado solo maiores serão os valores de resistência mecânica do solo à penetração). Neste sentido, além da identificação de valores de resistências do solo à penetração, é importante identificar a difusão e concentração de oxigênio no perfil solo (DE JONG VAN LIER, 2001).

A temperatura do solo também exerce influência direta no crescimento radicular das plantas (Figura 3.3c), conforme detalhadamente discutido em trabalhos clássicos como Kaspar e Bland (1992) e McMichael e Burke (1998). Em resumo, a sensibilidade térmica da planta varia, de acordo com a espécie vegetal, mas, em termos gerais, pequenas mudanças na temperatura do solo podem promover alterações na taxa de crescimento radicular, dependendo do estágio de desenvolvimento das plantas, da sazonalidade e duração com que essas mudanças ocorrem.

Apesar da faixa de temperatura ótima do solo, para o crescimento das plantas variar de cultura para cultura, a maioria das culturas comerciais cultivadas na safra de verão (milho, soja, algodão, girassol, arroz), em regiões tropicais e subtropicais, atingem taxas máximas de alongamentos radiculares em solos com temperatura entre 20 e 30 °C (Figura 3.3c). A baixa temperatura reduz a taxa de absorção de água e nutrientes, por consequência, o metabolismo torna-se mais lento e a taxa de crescimento radicular decresce. Além disso, alterações morfológicas são observadas, como, por exemplo, a redução da emissão de raízes laterais e secundárias. Em casos extremos, as baixas temperaturas causam a ruptura da membrana plasmática e morte das células podendo evoluir para a morte das plantas. Por outro lado, temperaturas excessivamente altas, também, podem reduzir o metabolismo das células e impactar negativamente a taxa de alongamento radicular e, em consequência, o desenvolvimento da planta.

3.2.2 Simulações físicas no sistema solo-planta-atmosfera

Existem diversos modelos para simular as interações da água com o solo no sistema solo-planta-atmosfera. Um desses modelos é o *Soil Water Atmosphere Plant* (SWAP) (KROES et al., 2008; VAN DAM et al., 2008) e simulador do fluxo de água e do crescimento de plantas no solo (KROES et al., 2008). Nesse modelo de embasamento físico que descreve o fluxo de água, emprega-se a equação de Richards, unidimensional, vertical e transitório (VAN DAM et al., 2008). A equação de Richards é um modelo não linear, com diferencial parcial, que possibilita descrição dos fluxos de água no perfil do solo, tendo como função do conteúdo volumétrico de água do solo ou gradientes do potencial da água no solo (BIGGS; MISHRA; TURRAL, 2008).

Estudos do fluxo de água associados com condições físicas dos solos podem favorecer o entendimento das alterações, no sistema solo-planta-atmosfera, os quais são dependentes do manejo do solo (MORAES; DEBIASI; FRANCHINI, 2018). Neste sentido, destaca-se o problema da compactação do solo que, além de aumentar sua resistência à penetração das raízes (MORAES et al., 2014b), limita a profundidade e o volume de solo explorado pelas raízes em busca de água e nutrientes (MORAES et al., 2018a), reduz a porosidade total, a macroporosidade, a aeração (MORAES et al., 2016a), interferindo diretamente

na capacidade de infiltração de água e na condutividade hidráulica do solo (SILVA et al., 2009). Como reflexo, as plantas tornam-se susceptíveis a estresses bióticos e abióticos, como excesso ou deficiência hídrica, podendo culminar em redução da produtividade das culturas (FRANCHINI et al., 2017; MORAES et al., 2018a; SENTELHAS et al., 2015). Em solos cultivados em Sistema Plantio Direto (SPD), os espaços deixados pelas raízes das culturas produzem poros contínuos (bioporos) que facilitam o fluxo de água e as trocas gasosas (REICHERT et al., 2016). Ao contrário dos poros produzidos pela mobilização mecânica do solo, os bioporos são longos e contínuos e de alta efetividade para a transmissão de água e ar (DORNER; SANDOVAL; DEC, 2010; OADES, 1993).

A compactação do solo é uma das principais causas de redução da produtividade das plantas em áreas manejadas sob SPD. Entretanto, considerando que a agricultura brasileira é praticada em diferentes classes de solo, não há clareza se existem e quais são os níveis críticos de compactação do solo, os quais as plantas toleram sem que ocorra redução do potencial produtivo. Isso favorece a indicação de uso periódico de práticas mecânicas, tais como a escarificação do solo (CAMARA; KLEIN, 2005), para atenuar a compactação, mesmo que, em muitos casos, ainda não haja comprovação científica da eficiência dessas práticas. A escarificação interfere na estruturação do solo e na dinâmica da água e de nutrientes para as plantas (MORAES et al., 2016a). Solos desestruturados tornam-se susceptíveis a um novo processo de compactação, principalmente, por redução da força de ligação dos agregados e do suporte de carga (MORAES et al., 2019) e, portanto pode até mesmo ser agravada a degradação física do solo em médio e longo prazo. Além disso, a compactação do solo favorece aumentos dos efeitos negativos de práticas de manejo inadequadas no ambiente, ou seja, em solos compactados, há aumentos das perdas de água e de nutrientes, contaminação dos recursos hídricos pelos escoamentos superficiais, incrementos das emissões de gases causadores do efeito estufa (LIPIEC; ARVIDSSON; MURER, 2003). Assim, uma das medidas preconizadas, para recuperar a qualidade física de solos compactados, é a adoção de sistemas de rotação de culturas que contemplem plantas com elevado potencial de produção de biomassa com sistema radicular abundante, profundo e que supere as limitações físicas dos solos (MORAES et al., 2016b).

Existem diversos indicadores do estado de compactação do solo, sendo a resistência do solo à penetração (MORAES et al., 2014a), à macroporosidade (RABOT et al., 2018) e à

massa específica do solo (ALVAREZ; STEINBACH, 2009) os mais utilizados. Atualmente, diversos estudos têm buscado estabelecer, para esses indicadores, valores considerados críticos ou restritivos ao crescimento das plantas (MORAES et al., 2018b). Contudo há pequena sensibilidade dos indicadores físicos tradicionais utilizados, (massa específica do solo, porosidades, resistência do solo à penetração) a detectar alterações no volume, geometria e continuidade dos poros que afetam diretamente a resistência do solo ao crescimento radicular das culturas (PIRES et al., 2017). O uso de valores estáticos, para descrever processos físicos, não tem se mostrado adequado, sendo que as condições físicas dos solos são afetadas pelo conteúdo de água que varia durante o ciclo das culturas (MORAES et al., 2018a).

Assim sendo, na ausência de outras limitações ao crescimento das culturas, os processos físicos de transferência de água e de nutrientes, de gases e fluxo de calor no solo, que afetam diretamente o crescimento das culturas (LETEY, 1985), podem ser descritos por modelos de base física. Ainda existem, no entanto poucos modelos que integram os atributos físicos dos solos com o crescimento radicular das culturas. Apenas recentemente os estresses mecânicos foram incorporados aos estresses hídricos e de aeração em um modelo para predição do crescimento radicular de culturas agrícolas (MORAES et al., 2018a). Na maior parte dos modelos agro-hidrológicos, com relações solo-planta-atmosfera, apenas a absorção de água que é igual numericamente à transpiração das culturas (DE JONG VAN LIER et al., 2008) tem sido considerada como “ligação” entre os fatores de solo com a planta e a atmosfera. Até o momento, os modelos de crescimento radicular, com exceção do conteúdo de água do solo, não consideravam as demais condições físicas dos solos, em especial, a dinâmica da resistência do solo à penetração radicular, a qual foi incorporada no modelo RootBox descrito em Moraes et al. (2018b).

3.2.3 Relações da água com parâmetros físicos e crescimento radicular das plantas: estudo de caso na cultura da soja

Nesta sessão, será apresentada a síntese de um estudo de caso com simulações e medições do crescimento radicular de soja (Cultivar BRS-282) até os 70 dias de desenvolvimento, observado em condições de safra agrícola com déficit (safra 2008/09) ou com adequada disponibilidade hídrica (safra 2009/10). Esse estudo foi realizado em condições

de experimento de campo, cultivadas em SPD desde 1997, em um Latossolo Vermelho distroférico com textura muito argilosa (75% de argila) em Londrina - PR, Brasil (MORAES et al., 2018a). Na safra com déficit hídrico, a cultura da soja foi semeada em 24 de novembro de 2008, e as raízes foram amostradas em 2 de fevereiro de 2009. O principal período com estresse hídrico ocorreu, durante os primeiros 54 dias após a semeadura e período que foi utilizado para caracterizar a safra com déficit hídrico. Na safra com adequada disponibilidade hídrica, o período de crescimento radicular da cultura da soja foi de 12 de novembro de 2009 (semeadura) até 20 de janeiro de 2010 (amostragem de raízes). Informações adicionais sobre o manejo do solo, da cultura e demais avaliações neste experimento podem ser consultadas em Franchini et al. (2017) e Moraes et al., (2018b).

A simulação do crescimento radicular de soja foi realizada, conforme modelo descrito em (MORAES et al., 2018a), no qual são estimados os efeitos diários dos estresses mecânicos e hídricos no solo, associado com as condições diárias do tempo. A densidade de comprimento radicular foi convertida por unidade de área em 1D assumindo a área de cada planta referente a uma população de 30 plantas por m², com 0,45 m entre linhas (7 cm de espaçamento entre plantas). O fluxo de água foi simulado, dia a dia, empregando a solução numérica da equação de Richards e incorporando os estresses hídricos e mecânicos ao crescimento radicular da cultura (MORAES et al., 2018a).

Na safra com déficit hídrico em 2008/09, a precipitação pluviométrica, durante 70 dias de crescimento radicular, foi de 306 mm, sendo 32 dias com ocorrência de chuvas. Na safra com adequada disponibilidade hídrica (2009/10), ocorreram 46 dias com precipitações, totalizando 515 mm de chuva. Durante os primeiros 54 dias após a semeadura da soja, na safra em 2008/09, precipitaram 131 mm (2,4 mm dia⁻¹) comparado aos 354 mm (6,5 mm dia⁻¹) no mesmo período em 2009/10. A distribuição pluviométrica foi irregular na estação com déficit hídrico e afetou o desenvolvimento radicular da soja, sobretudo, pelo aumento dos valores de resistência do solo à penetração.

O parâmetro que agrupa os estresses hídricos e mecânicos (Figuras 3.4c e 3.4f) representa as limitações diárias que as raízes de soja enfrentaram para crescer no perfil do solo nas safras com (Figura 3.4a) ou sem déficit hídrico (Figura 3.4d). O sistema radicular foi alterado, por estresses hídricos e mecânicos, mas cresceu, lentamente, em específico, na

safrinha com déficit hídrico. A redução na precipitação hídrica em 2008/09 aumentou o estresse hídrico e mecânico ao crescimento radicular.

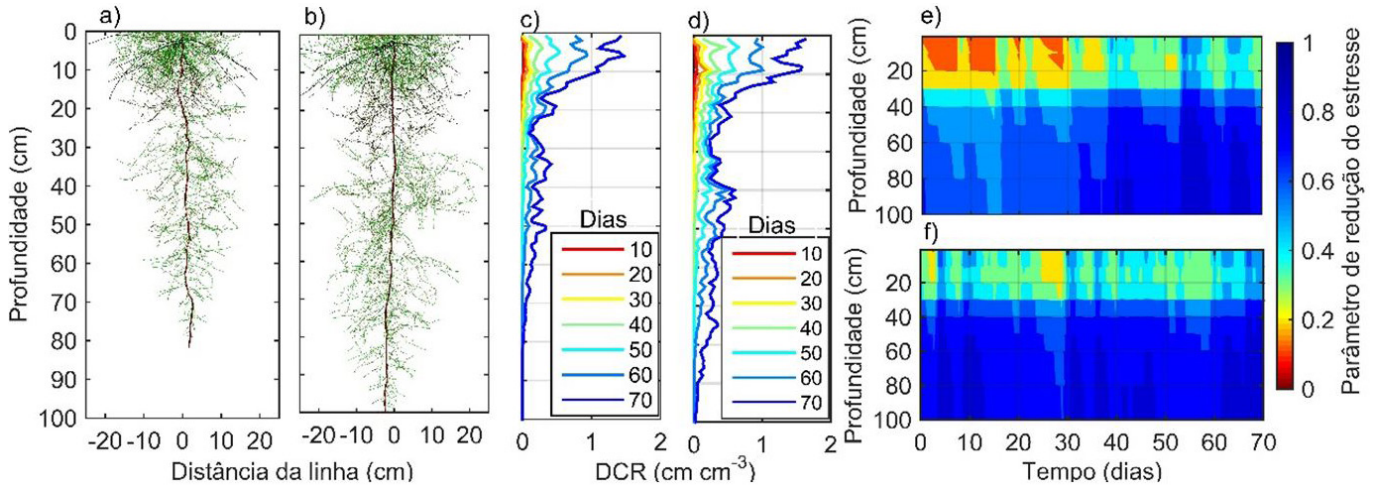


FIGURA 3.4 Sistema radicular de soja (a,b), densidade de comprimento radicular (DCR) (c,d) e parâmetro de redução do estresse (e,f) em safra com déficit hídrico (a,c,e) ou em condição de boa disponibilidade hídrica (b,d,f). Fonte: Adaptado de Moraes et al. (2018b).

A profundidade radicular da soja em 2008/09 foi de 52 cm, aos 54 dias após a semeadura, representa 48% menor que a profundidade radicular observada neste mesmo período em 2009/10 (77 cm). Durante tal período, a densidade de comprimento radicular, nos primeiros 30 cm, foi reduzida em 46% (passando de 0,41 cm cm⁻³ na safra de 2009/10 para 0,28 cm cm⁻³ em 2008/09). Assim, a profundidade e o volume de solo explorados pelas raízes da soja foram menores na safra com déficit hídrico (2008/09) em relação à safra com boa disponibilidade hídrica (2009/10).

A profundidade e a densidade de comprimento radicular foram limitadas pelos estresses hídricos e mecânicos causados pela estiagem ocorrida na safra de 2008/09. Esse fato indica que, durante a safra com déficit hídrico, foi observado incremento no estresse mecânico e hídrico que reduziu fortemente a profundidade efetiva de absorção de água e nutrientes pela soja. Desta forma, as raízes da soja cresceram mais profundamente (25 cm mais profundo) neste Latossolo Vermelho bem drenado em condições de boa disponibilidade hídrica (safra chuvosa). Esses resultados demonstram que o crescimento

radicular da soja responde diretamente ao somatório dos estresses hídricos e mecânicos durante todo o período de crescimento e desenvolvimento da cultura (MORAES et al., 2018a). Um dos principais fatores que influenciam a profundidade de crescimento radicular da soja é a taxa de alongamento radicular (MANAVALAN et al., 2009) e, especialmente, a sua relação com as condições físicas dos solos, com presença ou ausência de bioporos e poros contínuos no perfil do solo (MORAES et al., 2018a). Em solos com impedimento físico ao crescimento radicular (p. ex., elevada resistência do solo à penetração), sucessivos crescimentos radiculares, alternando o cultivo de espécies com diferentes sistemas radiculares, tendem a reduzir o impedimento mecânico para as próximas culturas (PIERRET et al., 2007), assim como a presença de rachaduras e bioporos (JIN et al., 2013) no SPD favorecem a penetração das raízes das culturas mais suscetíveis aos estresses hídricos e mecânicos.

3.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O adequado monitoramento das condições hídricas e das propriedades físicas do solo que afetam diretamente o crescimento das plantas é chave para definir estratégias de manejo para atingir altas produtividades. Práticas de manejo, como o Sistema Plantio Direto, no qual são utilizadas obrigatoriamente práticas de rotação de culturas, associado a práticas complementares de conservação do solo e ao controle de tráfego de máquinas na lavoura, promovem a melhoria da estrutura do solo e, em decorrência, minimizam os estresses (mecânico, hídrico, hipóxia e térmico) que restringem o crescimento radicular. Desta forma, as plantas tornam-se menos suscetíveis a fatores bióticos e abióticos responsáveis pelas perdas de produtividades.

A modelagem do crescimento radicular, por meio das interações das condições físicas dos solos com as taxas de alongamento radicular, pode ser alternativa para a caracterização da qualidade física dos solos. Os modelos mecanísticos que relacionam as limitações físicas dos solos (resistência mecânica, aeração, disponibilidade hídrica e difusividade térmica) com o alongamento radicular, associados com a dinâmica da água no solo e a absorção de água pelas raízes, em função do potencial de fluxo matricial, apresentam grandes avanços no entendimento dos processos do sistema solo-planta-atmosfera.

Somente com muito empenho e visão sistêmica dos processos e mecanismos envolvidos nas relações solo-raízes será possível avançar no conhecimento, elucidando os efeitos de diferentes sistemas de preparo, manejo e de cultivo na qualidade física dos solos e no crescimento e produtividade das plantas.

3.4 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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 and Tillage Research**, v. 104, n. 1, p. 1-15, 2009.

ALVES, E. M. et al. Simulação da Dinâmica da Água em Solo Cultivado com Feijão Caupi no Brejo Paraibano. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 17, n. 3, p. 175-186, 2012.

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

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

BIGGS, T. W.; MISHRA, P. K.; TURRAL, H. Evapotranspiration and regional probabilities of soil moisture stress in rainfed crops, southern India. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 148, n. 10, p. 1585-1597, 2008.

BUCKINGHAM, E. **Studies on the Movement of Soil Moisture**. Bulletin n ed. Washington: USDA: Government Printing Office, 1907. 66p.

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

CARMINATI, A. et al. Dynamics of soil water content in the rhizosphere. **Plant and Soil**, v. 332, n. 1, p. 163-176, 2010.

CHERUBIN, M. R. et al. A Soil Management Assessment Framework (SMAF) Evaluation of Brazilian Sugarcane Expansion on Soil Quality. **Soil Science Society of America Journal**, v. 80, n. 1, p. 215-226, 2016.

CHERUBIN, M. R. et al. Assessing soil structural quality under Brazilian sugarcane expansion areas using Visual Evaluation of Soil Structure (VESS). **Soil and Tillage Research**, v. 173, n. 11, p. 64-74, 2017.

COLOMBI, T. et al. Feedbacks between soil penetration resistance, root architecture and water uptake limit water accessibility and crop growth – A vicious circle. **Science of The Total Environment**, v. 626, n. 6, p. 1026-1035, 2018.

DALY, K. R. et al. Modelling water dynamics in the rhizosphere. **Rhizosphere**, v. 4, p. 139-151, 2017.

DARCY, H. **Les fontaines publiques de la ville de Dijon: exposition et application des principes à suivre et des formules à employer dans les questions de distribution d'eau**. 1. ed. Dijon, Paris: Victor Dalmont, 1856. 647p.

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

DORNER, J.; SANDOVAL, P.; DEC, D. The role of soil structure on the pore functionality of an Ultisol. **Journal of Soil Science Plant Nutrition**, v. 10, n. 4, p. 495-508, 2010.

FOY, C. D. Soil Chemical Factors Limiting Plant Root Growth. In: HATFIELD, J. L.; STEWART, B. A. (Eds.). **Limitations to Plant Root Growth**. Advances in Soil Science. New York, NY: Springer New York, 1992. v. 19, p. 97-131.

FRANCHINI, J. C. et al. Root growth of soybean cultivars under different water availability conditions. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 38, n. 2, p. 715-724, 2017.

HILLEL, D. **Introduction to environmental soil physics**. Amsterdam: Elsevier Academic Press, 2004. 494p.

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

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

KASPAR, T. C.; BLAND, W. L. Soil temperature and root growth. **Soil Science**, v. 154, n. 4, p. 290-299, 1992.

KROES, J. G. et al. **SWAP version 3.2. Theory description and user manual**. Wageningen, Netherlands: Alterra, 2008. 266p.

KUNCORO, P. H. et al. A study on the effect of compaction on transport properties of soil gas and water. II: Soil pore structure indices. **Soil and Tillage Research**, v. 143, n. 11, p. 180-187, 2014.

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

LICHT, M. A.; AL-KAISI, M. Strip-tillage effect on seedbed soil temperature and other soil physical properties. **Soil and Tillage Research**, v. 80, n. 1-2, p. 233-249, 2005.

LIPIEC, J. et al. Effects of soil compaction on root elongation and anatomy of different cereal plant species. **Soil and Tillage Research**, v. 121, n. 5, p. 74-81, 2012.

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

MANAVALAN, L. P. et al. Physiological and Molecular Approaches to Improve Drought Resistance in Soybean. **Plant and Cell Physiology**, v. 50, n. 7, p. 1260-1276, 2009.

MCMICHAEL, B. L.; BURKE, J. J. Soil temperature and root growth. **HortScience**, v. 33, n. 6, p. 947-950, 1998.

MORAES, M. T. et al. Correction of resistance to penetration by pedofunctions and a reference soil water content. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 36, n. 6, p. 1704-1713, 2012.

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

MORAES, M. T. et al. Use of penetrometers in agriculture: a review. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 34, n. 1, p. 179-193, 2014a.

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

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

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

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

MORAES, M. T. et al. Corn crop performance in an Ultisol compacted by tractor traffic. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 53, n. 4, p. 464-477, 2018b.

MORAES, M. T. et al. Soil load support capacity increases with time without soil mobilization as a result of age-hardening phenomenon. **Soil & Tillage Research**, v. 186, n. 3, p. 128-134, 2019.

MORAES, M. T.; DEBIASI, H.; FRANCHINI, J. C. Modelling of soil water dynamics under tillage systems in a Rhodic Eutrudox. **Scientia Agraria**, v. 19, n. 1, p. 142-152, 2018.

NIMMO, J. R.; LANDA, E. R. The Soil Physics Contributions of Edgar Buckingham. **Soil Science Society of America Journal**, v. 69, n. 2, p. 328-342, 2005.

OADES, J. M. The role of biology in the formation, stabilization and degradation of soil structure. **Geoderma**, Amsterdam, v. 56, n. 1-4, p. 377-400, 1993.

PIERRET, A. et al. Root Functional Architecture: A Framework for Modeling the Interplay between Roots and Soil. **Vadose Zone Journal**, v. 6, n. 2, p. 269-281, 2007.

PIRES, L. F. et al. Soil structure changes induced by tillage systems. **Soil and Tillage Research**, v. 165, p. 66-79, 2017.

PREVEDELLO, C. L.; ARMINDO, R. A. **Física do Solo com Problemas Resolvidos**. 2ª Edição, Curitiba: UFPR, 2015. 474p.

RABOT, E. et al. Soil structure as an indicator of soil functions: A review. **Geoderma**, Amsterdam, v. 314, n. 6, p. 122-137, 2018.

REICHERT, J. M. et al. Conceptual framework for capacity and intensity physical soil properties affected by short and long-term (14 years) continuous no-tillage and controlled traffic. **Soil and Tillage Research**, v. 158, p. 123-136, 2016.

- RICHARDS, L. A. The usefulness of capillary potential to soil-moisture and plant investigators. **Journal of Agriculture Research**, v. 37, n. 12, p. 719-742, 1928.
- RICHARDS, L. A. Capillary conduction of liquids through porous mediums. **Journal of Applied Physics**, v. 1, n. 5, p. 318-333, 1931.
- RICKMAN, R. W.; LETEY, J.; STOLZY, L. H. Plant Responses to Oxygen Supply and Physical Resistance in the Root Environment. **Soil Science Society of America Journal**, v. 30, n. 3, p. 304-307, 1966.
- RITCHIE, J. T. Water dynamics in the soil-plant-atmosphere system. **Soil Water and Nitrogen in Mediterranean-type Environments**, v. 96, n. 1-3, p. 81-96, 1981.
- SENTELHAS, P. C. et al. The soybean yield gap in Brazil – magnitude, causes and possible solutions for sustainable production. **The Journal of Agricultural Science**, v. 153, n. 8, p. 1394-1411, 2015.
- SILVA, V. R. et al. Soil water dynamics related to the degree of compaction of two brazilian oxisols under no-tillage. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, n. 5, p. 1097-1104, 2009.
- TAYLOR, H. M.; GARDNER, H. R. Penetration of cotton seedling tap roots as influenced by bulk density, moisture content and strength of soil. **Soil Science**, v. 96, n. 3, p. 153-156, 1963.
- TAYLOR, H. M.; RATLIFF, L. F. Root elongation rates of cotton and peanuts as a function of soil strength and water content. **Soil Science**, v. 108, n. 2, p. 113-119, 1969.
- TAYLOR, H. M.; ROBERSON, G. M.; PARKER, J. J. Soil strength-root penetration relations for medium- to coarse-textured soil materials. **Soil Science**, v. 102, n. 1, p. 18-22, 1966.
- VALENTINE, T. A. et al. Soil strength and macropore volume limit root elongation rates in many UK agricultural soils. **Annals of Botany**, v. 110, n. 2, p. 259-270, 2012.
- VAN DAM, J. C. et al. Advances of Modeling Water Flow in Variably Saturated Soils with SWAP. **Vadose Zone Journal**, v. 7, n. 2, p. 640-653, 2008.
- VAN DAM, J. C.; FEDDES, R. A. Numerical simulation of infiltration, evaporation and shallow groundwater levels with the Richards equation. **Journal of Hydrology**, v. 233, n. 1-4, p. 72-85, 2000.
-

CAPÍTULO 4

A CONTRIBUIÇÃO DA BIOLOGIA DO SOLO PARA OS PROCESSOS DE AGREGAÇÃO E ARMAZENAMENTO DA ÁGUA

Pedro Henrique de Castro Borges¹

Marco Aurélio Carbone Carneiro¹

Helder Barbosa Paulino²

¹Universidade Federal de Lavras, Departamento de Ciência do Solo, Lavras - MG

²Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Campus Iturama, Iturama, MG

E-mails: pedrohborgesufv@gmail.com, marcocarbone@ufla.br, helderlino51@yahoo.com.br

4.1 INTRODUÇÃO

A água é uma das substâncias essenciais à existência e manutenção da vida de animais e plantas. Pode ser utilizada como fonte de elétrons para organismos fotossintetizantes, habitat para organismos aquáticos, meio de reação aos processos metabólicos, entre tantas outras funções. Portanto é fundamental a compreensão dos processos que envolvem a conservação da água e dos fatores que interferem nos componentes que participam do ciclo hidrológico.

No solo, o qual se apresenta como um sistema trifásico (possui componentes sólidos, líquidos e gasosos), a água compõe a fase líquida desse sistema e ocupa o volume denominado volume de poros. Dentre outras atribuições, esses poros são responsáveis pelos processos de infiltração, redistribuição, armazenamento e drenagem de água no solo. Nesse sentido, o estudo das características e propriedades físicas do solo (discutido com maior ênfase no Capítulo 3) permite o entendimento sobre o seu comportamento hídrico. Além disso, o solo é um sistema aberto e dinâmico e pode ser condicionado, ou melhorado, por diversos fatores, dentre eles, a ação da biota, tema deste capítulo.

O tamanho e a distribuição dos poros influenciam diretamente o movimento de água no solo. De forma geral, os poros maiores, denominados de macroporos, proporcionam maior movimentação da água, uma vez que nesses poros ocorre maior susceptibilidade à força gravitacional. Em contrapartida, os poros menores, denominados microporos, proporcionam a retenção de água pela maior interação das moléculas de água com as cargas das partículas. A distribuição da água, por outro lado, dependerá da continuidade e descontinuidade e da orientação vertical e horizontal do espaço poroso.

Os poros também podem ser classificados em poros texturais e poros estruturais (Figura 4.1). Basicamente, os poros texturais são poros formados pelo arranjo das partículas primárias do solo, como areia, silte e argila, enquanto os poros estruturais são formados pelo arranjo dos agregados. Para o estudo das relações hídricas, os poros estruturais são mais relevantes que os texturais, porque são afetados pelo manejo e dependem da atividade dos organismos que habitam o solo. Além disso, conferem aos solos uma porosidade mais complexa, como, por exemplo, macroporos formados no espaço entre e microporos dentro de agregados.

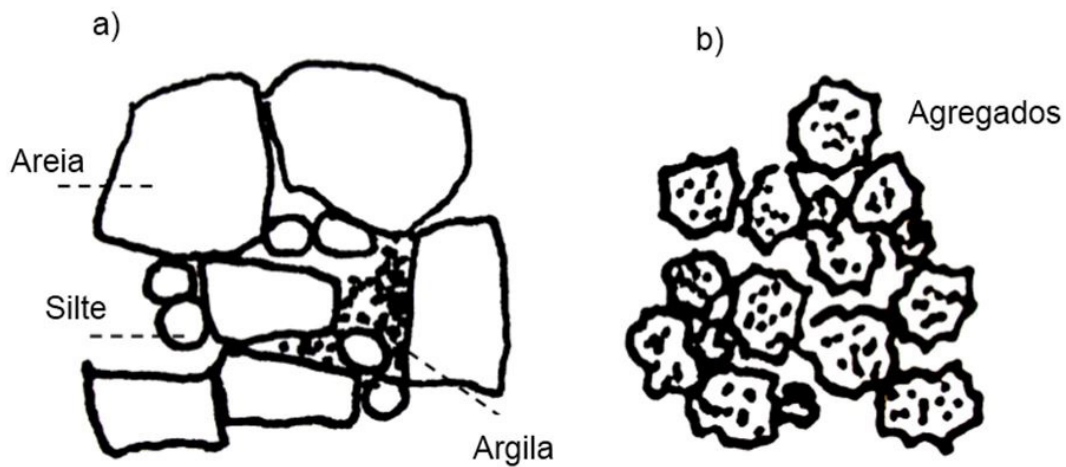


Figura 4.1 Poros texturais (a) provenientes dos espaços entre partículas de areia, silte e argila; e poros estruturais (b) provenientes dos espaços entre e dentro dos agregados do solo.

O conhecimento das propriedades físicas do solo, na formação e estabilização dos agregados e poros, encontra-se bastante avançado, no entanto, somente nos últimos anos, a contribuição da parte viva do solo à agregação tem merecido destaque. Considerando a plataforma de busca SCOPUS e utilizando a palavra-chave *SOIL AGGREGATION*, recuperaram-se 5.110 documentos, sendo em sua maioria artigos científicos e, adicionando as palavras *SOIL MICROBIAL*, recuperaram-se somente 633 documentos. Ainda nessa busca, percebe-se que o interesse dos pesquisadores nessa área é recente, sendo a maioria das publicações com data após o ano de 2006. Esses dados reforçam a importância deste capítulo e demonstra a busca de melhor entendimento sobre a estrutura do solo e a contribuição dos organismos para esse processo de formação e estabilização dos agregados.

Neste tópico, pretende-se demonstrar como a parte viva do solo atua na formação e estabilização de seus agregados, refletindo diretamente em seu comportamento hídrico.

4.2 INFLUÊNCIA DE ORGANISMOS DO SOLO NA FORMAÇÃO E ESTABILIZAÇÃO DOS AGREGADOS E CONDICIONAMENTO FÍSICO-HÍDRICO DO SOLO

Os agregados do solo podem ser classificados em cinco grupos em função do tamanho: $< 2 \mu\text{m}$; 2 a $20 \mu\text{m}$; 20 a $250 \mu\text{m}$; $250 \mu\text{m}$ a 2 mm; e $> 2 \text{ mm}$. Aqueles que apresentam tamanho

inferior a 250 μm são denominados microagregados e os maiores são os macroagregados (TISDALL; OADES, 1982).

O processo de formação dos agregados no solo segue uma ordem hierárquica, sendo que a união de agregados de uma classe inferior, ou seja, de menor tamanho, origina os agregados das classes ou tamanhos superiores. Essa teoria, porém não se aplica estritamente a solos com altos teores de óxidos de ferro e alumínio, os quais têm forte ação cimentante, de ocorrência em solos cauliniticos, bem como em alguns Latossolos. A formação de um agregado ocorre, em razão de diversos fatores, como atividade de organismos, composição mineralógica, textura, carbono orgânico, íons trocáveis, umidade, etc. (KAY; LAL, 1998). No processo de agregação do solo, há um rearranjo das partículas individualizadas, floculação e cimentação das partículas do solo pela interação com substâncias orgânicas e inorgânicas (DUIKER et al., 2003). Os agregados ainda poderão ter estabilidades e tamanhos distintos, em função dos agentes cimentantes, como alguns compostos orgânicos e estabilizantes como as raízes finas e hifas de fungos e exsudados.

Em situação natural, os horizontes superficiais dos solos tendem a sofrer eluviação dos seus materiais suspensos ou solúveis. Esses materiais podem migrar e acumular em horizontes subsuperficiais. Exemplo disso é a eluviação de argila de um horizonte superficial para um horizonte subsuperficial, que, por processo pedogenético, gera um gradiente textural entre os horizontes e provoca adensamento dos horizontes subsuperficiais. Essa argila translocada vai sendo depositada nos poros do solo e reduz sua porosidade, afetando a drenagem de água.

A presença e a atividade de organismos (raízes, macrofauna e microrganismos) podem reduzir esse efeito direta e indiretamente. De forma geral, os organismos do solo, como formigas, cupins, insetos e outros, contribuem na formação de canais, aumentando a macroporosidade, além da liberação de compostos orgânicos e da sua decomposição liberando húmus que atuam como agente cimentante. Já os microrganismos, principalmente fungos e bactérias, atuam de forma indireta. As bactérias produzem polissacarídeos que podem orientar as partículas do solo, e as hifas fúngicas ao envolverem essas partículas e permitem a estabilidade do agregado. Com o aumento do espaço poroso, proporcionado pela maior agregação, há maior infiltração e drenagem de água.

Os organismos do solo contribuem ativamente no processo de agregação das partículas. O mecanismo principal é pela adição de moléculas orgânicas, como carboidratos, polissacarídeos, lipídeos, compostos fenólicos, substâncias húmicas, entre outros, que atuam como agente

cimentante e interagem com cátions polivalentes e partículas do solo, proporcionando a formação de agregados (SHEPHERD et al., 2001; TARCHITZKY et al., 2000; MARTENS, 2000). Somado a esse mecanismo, a exploração do solo pelas raízes de plantas, atividade de coleópteros, formigas, minhocas e térmitas, por exemplo, provoca a abertura de galerias, aumentando, sobretudo, o volume de macroporos, além de aproximar as partículas, favorecendo a agregação. De forma semelhante, as hifas de fungos envolvem as partículas do solo, em virtude de o crescimento micelial desses organismos e potencializam, também, a agregação (Figura 4.2).

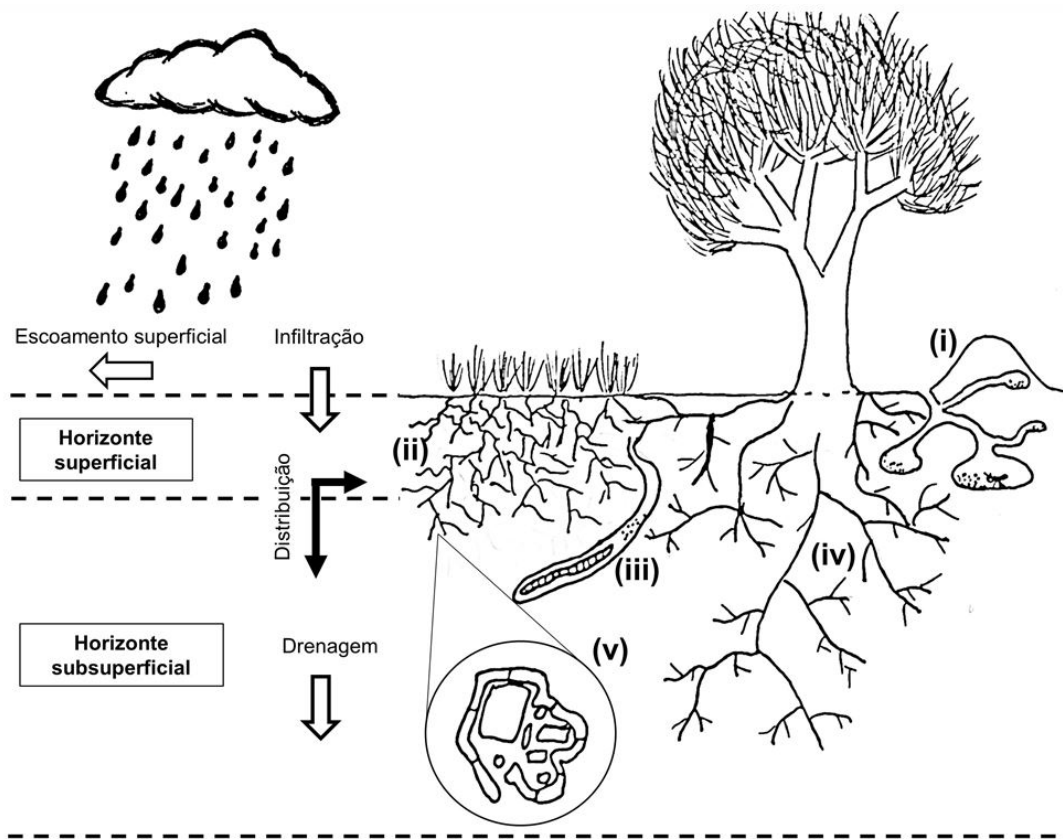


FIGURA 4.2 Movimento de água e principais funções dos organismos na agregação e qualidade do solo. (i) atividade de formigas ou térmitas na formação de galerias e transporte de partículas do solo; (ii) crescimento de raízes finas em alta densidade, conferindo uma rizosfera ativa, com adição de metabólitos essenciais à agregação das partículas do solo; (iii) abertura de galerias por invertebrados, principalmente por anelídeos, os quais participam ativamente na produção de húmus e agregação de partículas; (iv) crescimento de raízes mais espessas, proporcionando aeração do solo em subsuperfície; e (v) crescimento micelial de fungos, ao redor de partículas do solo, liberação de exsudatos e interação com cargas de células bacterianas e das partículas, proporcionando a formação de agregados.

O solo abriga uma biodiversidade de organismos muito rica, que limita a abordagem detalhada, em nível de espécies, sobre a influência dos organismos nos aspectos relacionados ao comportamento físico-hídrico, mencionados anteriormente. Em contrapartida, existe sobreposição de funções entre espécies de organismos. Portanto serão discutidos os mecanismos de agregação das partículas, em relação aos principais macro e microrganismos, ambos conectados com a água no solo.

4.2.1 Macrorganismos como engenheiros do solo

O termo macrorganismo ou macrofauna é uma classificação utilizada para se referir aos animais que têm entre 2 - 20 mm de espessura ou diâmetro corporal (ORGIAZZI et al., 2016). Esses macrorganismos que promovem revolvimento e deslocamento do solo, processo denominado bioturbação, têm como principais representantes as minhocas, formigas e térmitas (cupins) também conhecidos como os engenheiros do solo, “*soil engineers*” ou “*ecosystem engineers*”. Esse termo é muito coerente pela função desempenhada por esses organismos.

A bioturbação é um processo-chave para a funcionalidade dos ecossistemas, por meio do desenvolvimento dos solos. A percepção da influência de macrorganismos, em especial, das minhocas foi registrada por Charles Darwin, a qual, no processo de formação dos poros, resulta da modificação de sua atividade e capacidade de alteração do tamanho das partículas e incremento de material orgânico. Esse autor descreveu sobre as misturas de material vegetal e solo, realizadas por minhocas e conseqüente modificação e agregação desses materiais com bioturbação em subsuperfície chegando a 2,5 m de profundidade (DARWIN, 1881). Além disso, o mesmo autor, Charles Darwin, observou, em experimentos, que a coloração avermelhada do solo desaparecia, após partículas passarem pelo trato intestinal das minhocas, talvez, pela conseqüente ação de enzimas ácidas na dissolução do ferro do solo. Esse fato indica a função desses organismos, também, como agentes do intemperismo. Carpenter et al. (2007) demonstraram que o intemperismo de alguns minerais, como anortita, biotita, esmectita e caulinita, pode ser acelerado pela ação de minhocas.

As principais funções das minhocas no solo estão relacionadas ao: *a*) hábito alimentar, que regula a produção de húmus e à humificação, *b*) deslocamento de massa do solo pela

movimentação das minhocas, as quais abrem galerias e o agregam; e *c*) pela interação com microrganismos, principalmente os decompositores primários, como os fungos e bactérias. Todas essas funções favorecem o condicionamento físico-hídrico do solo.

A atividade de minhocas pode, na prática, dobrar a ocorrência de agregados maiores que dois mm de diâmetro, incrementar agregados maiores que 10 mm e reduzir os de dimensões menores que dois mm (ALEGRE; PASHANASI; LAVELLE, 1996). Tais evidências sugerem que a atividade de minhocas, ao aumentar a macroporosidade do solo, poderia afetar, principalmente, a capacidade de armazenamento de água como relatado em alguns estudos, aumento de 25% nessa propriedade (BOUCHÉ; AL-ADDAN, 1997; EHLERS, 1975). O potencial de ação das minhocas no solo é elevado podendo alcançar mais de 100 t ha⁻¹ ano⁻¹ (WATANABE; RUAYSOONGNERN, 1984; MADGE, 1969).

Os térmitas e formigas também apresentam efeito de bioturbação, mas em menor escala que o das minhocas. Esse efeito pode variar entre 1 e 10 t ha⁻¹ ano⁻¹ (MADGE, 1969; HUMPHREYS, 1981) com alguns casos isolados que são superiores à essa faixa e podem equivaler ao das minhocas (GUPTA; RAJVANSHI; SINGH, 1981). Embora os térmitas e as formigas sejam considerados, de modo geral, menos efetivos à bioturbação, quando comparados às minhocas, ainda assim, são essenciais ao condicionamento dos solos. Na fitofisionomia e campos de murundus, a atividade de térmitas é essencial ao processo de formação e estruturação do solo, que garante a aeração e a capacidade de desenvolvimento das plantas.

Os térmitas atuam no solo, favorecendo a cimentação das partículas pela liberação de excrementos ou secreções, que permitem a cimentação das galerias (canais e canalículos contínuos do solo) e incorporando carbono e argila ao perfil do solo favorecendo o fluxo de água e ar. Os efeitos da atividade desses organismos influenciam diretamente o comportamento físico-hídrico do solo. Segundo Cheik et al. (2018), a infiltração de água foi três vezes maior em solos com atividade de térmitas. Estas galerias, contínuas, atuam como dutos de água e ar, no interior do solo, promovendo maior infiltração, redistribuição e armazenamento de água.

4.2.2 Microrganismos na formação e estabilidade de agregados

Os microrganismos do solo exercem importante papel no processo de formação e estabilização dos agregados. Possuem ação física na adesão entre as partículas, atuando como agentes ligantes físicos e produzem agentes colantes, agregantes e cimentantes, como polissacarídeos de alta viscosidade e substâncias húmicas, advindas do processo de decomposição dos compostos orgânicos promovidos pelos microrganismos heterotróficos.

A estabilização dos agregados é controlada por agentes cimentantes permanentes, representados pelos aluminosilicatados e óxidos amorfos, polímeros orgânicos adsorvidos na superfície das argilas e agentes orgânicos que se decompõem rapidamente. Açúcares e polissacarídeos, quando adicionados ao solo, aumentam a estabilidade, mas têm efeito de curta duração, enquanto materiais como resíduos orgânicos, que se decompõem lentamente, têm efeitos mais persistentes.

Nesse sentido, existem três grupos de agentes orgânicos envolvidos na estabilização dos agregados citados por Bastos et al. (2005), sendo eles definidos quanto à sua resistência à ação microbiana: os transitórios, os temporários e os persistentes. Os transitórios são polissacarídeos facilmente decompostos pelos microrganismos e estão associados à estabilidade dos macroagregados do solo. As hifas de fungos e raízes, que permanecem no solo por semanas, meses ou até anos e estão associados aos macroagregados, correspondem aos agentes temporários. Por fim, temos os agentes persistentes que são os materiais orgânicos humificados, principalmente, associados aos óxidos de ferro e alumínio de baixa cristalinidade, constituindo a parte mais importante na formação de microagregados.

Os fungos do solo apresentam crescimento micelial e desempenham funções bem específicas como decomposição de material orgânico. Além disso, certos fungos se associam com as raízes da maioria das plantas vasculares (micorrizas), atuando na absorção de água e nutrientes, por aumento da área de contato solo/micélio/raiz, entre outros efeitos. A rede de hifas fúngicas, no solo, criada pelo crescimento micelial de fungos micorrízicos arbusculares, ectomicorrizas, saprofíticos e outros tipos de fungos, opera como mecanismo direto na agregação do solo, pela aproximação e envolvimento das partículas e aumento das forças que as mantêm unidas (ZHENG; MORRIS; RILLIG, 2014; PENG; GUO; LIU, 2013).

Os fungos liberam exsudatos orgânicos como glomalina, polissacarídeos, hidrofobinas entre outras substâncias, durante a exploração do solo, os quais podem atuar como agentes cimentantes e proporcionar a formação e estabilização dos agregados, resultado de um mecanismo indireto à agregação.

Ademais, os fungos micorrízicos arbusculares (FMAs), em interação com as raízes das plantas, promovem benefícios tanto quanto ao aspecto ecológico quanto nutricional, os quais acontecem, por meio das hifas extrarradiculares que atuam como uma extensão das raízes, explorando uma área maior de solo inacessível ao sistema radicular das plantas e à formação e estabilização de agregados do solo. Os FMAs, também, desempenham funções importantes na dinâmica de ciclagem de nutrientes, atuando como dreno e estoque de C orgânico, melhorando a estrutura e funcionamento no solo. Os FMAs favorecem o sequestro e estoque de carbono orgânico, por meio da produção de hifas extrarradiculares e liberam glomalina e, por estimular a maior atividade fotossintética das plantas, atuando como dreno de dióxido de carbono da atmosfera.

A glomalina é uma glicoproteína recalcitrante, hidrossolúvel, rica em carbono orgânico, que é produzida pelas hifas extrarradiculares dos FMAs. Além de auxiliar no estoque de carbono, a glomalina também favorece a agregação, por suas propriedades de pegajosidade ou “cola”, que auxilia na ligação das partículas primárias, favorecendo a formação dos agregados e melhorando a estrutura do solo (PENG; GUO; LIU, 2013). As hifas extrarradiculares atuam na absorção e transporte de água e nutrientes e no envelhecimento das partículas, exercendo efeito físico que pode reduzir a erosão das partículas primárias, atuando de forma direta na agregação do solo.

A produção de glomalina e das hifas extrarradiculares podem variar, de acordo com as características da espécie de FMAs, em que membros de diferentes famílias podem produzir hifas de forma e quantidade distintas e, principalmente, pelas modificações ambientais. Assim como outros grupos de microrganismos, os FMAs também respondem às mudanças ambientais, proporcionadas pelas diferentes formas de uso e manejo do solo, que influenciam diretamente na estrutura da comunidade desses microrganismos.

Cerca de 80% da glomalina está presente na parede das hifas, com a função de facilitar o transporte de água e nutrientes aos fungos. Ela favorece ainda a fusão dos minerais do solo e a

matéria orgânica pela deposição de glomalina, também, proveniente da decomposição das hifas (BORIE; RUBIO; MORALES, 2008; DRIVER; HOLBEN; RILLIG, 2005). Efeitos semelhantes aos da glomalina podem ser observados pela adição de polissacarídeos e hidrofobinas, que conferem maior estabilidade aos agregados, afetam a molhabilidade do solo e aumentam a repelência de água dos agregados (DIEHL, 2013; DAYNES et al., 2012; AMBRIZ et al., 2010).

Apesar de serem microrganismos menores que os fungos, as bactérias estão em maior densidade no solo, sendo consideradas decompositoras primárias e habitam-no, na forma de células individualizadas, colônias e na forma de biofilmes na superfície dos poros. Atuam na decomposição de materiais orgânicos e incrementam formas organominerais de partículas no solo além de estarem diretamente relacionadas à produção de microagregados estáveis. As bactérias liberam substâncias denominadas de polissacarídeos, as quais possuem alta superfície específica de cargas negativas, podendo proporcionar a interação e aumento das forças de coesão dos microagregados, resultando na formação de macroagregados. Ressalta-se a importância desses microrganismos, na orientação das partículas do solo pelos polissacarídeos produzidos, no entanto, como essa substância é hidrossolúvel, esses agregados formados são pouco estáveis.

A função das bactérias na formação e estabilidade dos agregados está associada principalmente à produção de polissacarídeos. Os polissacarídeos atribuídos são classificados como substâncias poliméricas extracelulares, as quais constituem entre 0,1 e 1,5% da matéria orgânica do solo e 10 a 50% da biomassa de células bacterianas (CHENU, 1995; 1993).

A produção de polissacarídeos é variável e depende da diversidade de bactérias presentes no solo. Segundo Chenu (1995), dentre as bactérias do solo avaliadas em seu estudo, os gêneros *Klebsiella*, *Xanthomonas* e *Pseudomonas* apresentaram-se como maiores produtoras de polissacarídeos.

Além da ação como agente aglomerante de partículas do solo, aumentando as forças de coesão entre partículas e agregados, os polissacarídeos produzidos pelas bactérias favorecem diretamente a retenção de água. O efeito direto dos polissacarídeos na umidade do solo é atribuído à capacidade matricial dessas moléculas em reter a água e reduzir perdas por evaporação (AHMED et al., 2016; OR; PHUTANE; DECHESENE, 2007). Esse feito deve-se à complexidade da matriz dos polissacarídeos, que, além de ter estrutura polimérica

filamentosa ou em cadeias, medindo mais de 100 nm de comprimento, pode fazer conexões entre si, formando uma rede tridimensional rígida e estável (STRATHMANN; GRIEBE; FLEMMING, 2001; XIA et al., 2000; CHENU, 1995).

4.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nota-se que, ao estabelecer a importância da agregação dos solos, sua estabilidade e o efeito de práticas de manejo sobre ela são esquecidos, pois, além do manejo mecânico, que é rápido e eficaz, o manejo da biota do solo tem um papel relevante à agregação e à sua manutenção em ambientes agrícolas. Como resultado final, tem-se um ambiente mais adequado para o desenvolvimento das plantas e, sobretudo, com uma estrutura que oferece melhor distribuição dos poros, com consequente disponibilidade de água para as plantas.

Os sistemas de manejo conservacionistas, do ponto de vista físico, reduzem a mobilização dos solos, o que é de grande valia para a não alteração da estrutura do solo, entretanto muitos desses sistemas não apresentam uma manutenção ou evolução da biota, o que pode reduzir a sua contribuição à estabilidade dos agregados, impondo ao solo alterações no processo de infiltração e armazenamento de água.

Assim, deve-se avaliar, dentro dos diferentes sistemas de manejo, a sua contribuição à preservação, formação e estabilidade dos agregados, oriundos da atividade da biota. A redução da atividade biológica pode induzir a um prejuízo imperceptível, ano após ano no solo das áreas agrícolas, o que, em situações de alterações extremas (como revolvimento para incorporação de calcário), pode induzir a prejuízos pela não contribuição da biota no processo de reorganização deste solo.

Espera-se que o leitor compreenda a biota que possui, como visto, uma contribuição preponderante na agregação e, em consequência, na capacidade de armazenamento de água do solo. A contribuição da biota do solo não é apenas ao aumento da absorção de nutrientes e de águas (FMAs) e ou à decomposição de materiais orgânicos, mas, sim, em outros processos e serviços ecossistêmicos de grande relevância à manutenção da sustentabilidade do solo. Deve-se pensar na importância da biota como promotora de efeitos benéficos, para a organização e manutenção de uma estrutura do solo, que tem como contribuição um aumento de, como citado no texto, 25% da capacidade de armazenamento de água.

4.4 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AHMED, M. A. et al. A. Drying of mucilage causes water repellency in the rhizosphere of maize: measurements and modelling. **Plant and soil**, v. 407, n. 1-2, p. 161-171, 2016.

ALEGRE, J.; PASHANASI, B.; LAVELLE, P. Dynamics of soil physical properties in Amazonian agroecosystems inoculated with earthworms. **Soil Science Society of America Journal**, v. 60, n. 5, p. 1522-1529, 1996.

AMBRIZ, E. et al. Fraxinus-Glomus-Pisolithus symbiosis: Plant growth and soil aggregation effects. **Pedobiologia**, Jena, v. 53, n. 6, p. 369-373, 2010.

BASTOS, R. S. et al. Formação e estabilização de agregados do solo influenciados por ciclos de umedecimento e secagem após adição de compostos orgânicos com diferentes características hidrofóbicas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, n. 1, p. 21-31, 2005.

BORIE, F.; RUBIO, R.; MORALES, A. Arbuscular mycorrhizal fungi and soil aggregation. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 8, n. 2, p. 9-18, 2008.

BOUCHÉ, M. B.; AL-ADDAN, F. Earthworms, water infiltration and soil stability: some new assessments. **Soil biology and biochemistry**, v. 29, n. 3-4, p. 441-452, 1997.

CARPENTER, D. et al. Earthworm induced mineral weathering: preliminary results. **European Journal of Soil Biology**, v. 43, n. 1, p. 176-183, 2007.

CHEIK, S. et al. Fungus-growing termite foraging activity increases water infiltration but only slightly and temporally impacts soil physical properties in southern Indian woodlands. **European Journal of Soil Biology**, v. 89, p. 20-24, 2018.

CHENU, C. Clay or sand polysaccharide associations as models for the interface between micro-organisms and soil: water related properties and microstructure. In: BRUSSAARD, L.; KOOISTRA, M. J. (Ed.). **Methods of Research on Soil Structure/Soil Biota Interrelationships**. p. 143-156, 1993.

CHENU, C. Extracellular polysaccharides: an interface between microorganisms and soil constituents. **Environmental impact of soil component interactions**, v. 1, p. 217-233, 1995.

DARWIN, C. **The formation of vegetable mould through the action of worms, with observations on their habits**. John Murray, London, 1881, 326p.

DAYNES, C. N. et al. Soil aggregates formed *in vitro* by saprotrophic Trichocomaceae have transient water-stability. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 48, p. 151-161, 2012.

DIEHL, D. Soil water repellency: Dynamics of heterogeneous surfaces. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, v. 432, p. 8-18, 2013.

DRIVER, J. D.; HOLBEN, W. E.; RILLIG, M. C. Characterization of glomalin as a hyphal wall component of arbuscular mycorrhizal fungi. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 37, n. 1, p. 101-106, 2005.

DUIKER, S. W. et al. Iron (hydr)oxide crystallinity effects on soil aggregation. **Soil Science Society of America Journal**, v. 67, n. 2, p. 606-611, 2003.

EHLERS, W. Observations on earthworm channels and infiltration on tilled and untilled loess soil. **Soil Science**, v. 119, n. 3, p. 242-249, 1975.

GUPTA, S. R.; RAJVANSHI, R.; SNGH, J. S. The role of the termite *Odontotermes gurdaspurensis* (Isoptera: Termitidae) in plant decomposition in a tropical grassland. **Pedobiologia**, Jena, v. 22, n. 4, p. 254-261, 1981.

HUMPHREYS, G. S. The rate of ant mounding and earthworm casting near Sydney, new-South-Wales. **Search**, v. 12, n. 5, p. 129-131, 1981.

KAY, B. D.; LAL, R. Soil structure and organic carbon: a review. **Soil processes and the carbon cycle**, v. 198, p. 169-197, 1998.

MADGE, D. S. Field and laboratory studies on the activities of two species of tropical earthworms. **Pedobiologia**, v. 9, p. 188-214, 1969.

MARTENS, D. A. Plant residue biochemistry regulates soil carbon cycling and carbon sequestration. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 32, n. 3, p. 361-369, 2000.

OR, D.; PHUTANE, S.; DECHESNE, A. Extracellular polymeric substances affecting pore-scale hydrologic conditions for bacterial activity in unsaturated soils. **Vadose Zone Journal**, v. 6, n. 2, p. 298-305, 2007.

ORGIAZZI, A. et al. **Global Soil Biodiversity Atlas**. European Commission, Publications Office of the European Union, Luxembourg. 2016, 176p.

PENG, S.; GUO, T.; LIU, G. The effects of arbuscular mycorrhizal hyphal networks on soil aggregations of purple soil in southwest China. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 57, p. 411-417, 2013.

SHEPHERD, T. G. et al. Tillage-induced changes to soil structure and organic carbon fractions in New Zealand soils. **Soil Research**, v. 39, n. 3, p. 465-489, 2001.

STRATHMANN, M. T.; GRIEBE, H. C.; FLEMMING. Agarose hydrogels as EPS models. **Water Science and Technology**, v. 43, n. 6, p. 169-175, 2001.

TARCHITZKY, J.; HATCHER, P. G.; CHEN, Y. Properties and distribution of humic substances and inorganic structure-stabilizing components in particle-size fractions of cultivated Mediterranean soils. **Soil science**, v. 165, n. 4, p. 328-342, 2000.

TISDALL, J. M.; OADES, J. M. Organic matter and water-stable aggregates in soils. **Journal of soil science**, v. 33, n. 2, p. 141-163, 1982.

XIA, F. et al. The swelling behavior and wet morphology of water-absorbable polymer materials. **Scanning**, v. 22, n. 6, p. 366-369, 2000.

WATANABE, H.; RUAYSOONGNERN, S. Cast production by the megascolecid earthworm *Pheretima* sp. in northeastern Thailand. **Pedobiologia**, v. 26, p. 37-44, 1984.

ZHENG, W.; MORRIS, E. K.; RILLIG, M. C. Ectomycorrhizal fungi in association with *Pinus sylvestris* seedlings promote soil aggregation and soil water repellency. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 78, p. 326-331, 2014.

CAPÍTULO 5

MATÉRIA ORGÂNICA DO SOLO E CONSERVAÇÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS

Daniel Hanke¹

¹Professor da Universidade Federal do Pampa(UNIPAMPA) Dom Pedrito - RS
E-mail: hankesolos@gmail.com.

5.1 INTRODUÇÃO

A matéria orgânica do solo pode ser definida como uma estrutura amorfa, de caráter supramolecular, sem fórmula química definida e constituída por: a) materiais derivados de resíduos vegetais e animais em diferentes estágios de decomposição; e b) substâncias sintetizadas por organismos edáficos e por processos abióticos durante a humificação (STEVENSON, 1994; PICCOLO, 2001; KLEBER; SOLLINS; SUTTON, 2007; KLEBER et al., 2011; DICK et al., 2009). Essa diversidade de compostos orgânicos de pequeno peso molecular e pedaços de macromoléculas (peptídeos, hidrocarbonetos e ligninas) encontram-se, geralmente, organizada por interações fracas e forças de curto alcance. A momentânea estabilidade estrutural da matéria orgânica do solo deve-se às condições (químicas, físicas e físico-químicas) muito específicas do solo. Alterações dessas condições, sobretudo por meio do uso e manejo do sistema, podem alterar substancialmente o teor e composição da matéria orgânica do solo. Um exemplo de grupamentos químicos de carbono, existentes na estrutura da matéria orgânica do solo, pode ser observado na Figura 5.1.

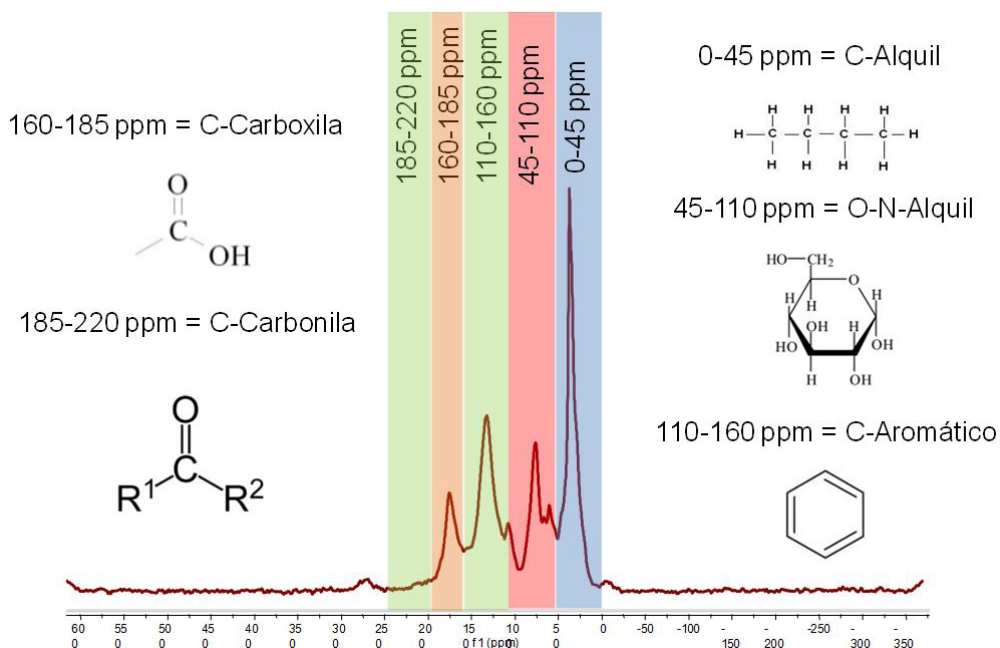


FIGURA 5.1 Espectro de Ressonância Magnética Nuclear de ^{13}C (^{13}C RMN CP/MAS) da matéria orgânica do solo. Adaptado de Hanke, (2016).

A matéria orgânica do solo cumpre um importante papel no fornecimento de energia e nutrientes, para a manutenção da diversidade biológica, que, por sua vez, determina o funcionamento do sistema solo (DORAN; PARKIN, 1994; BALOTA et al., 2004; SHUKLA; LAL; EBINGER, 2006; CAUSARANO et al., 2008; VIEIRA et al., 2009). A matéria orgânica do solo pode ser metodologicamente fracionada física e quimicamente. Ambos os compartimentos químicos e físicos podem apresentar diferentes níveis de interação com os minerais, organismos e componentes da solução. Esses compartimentos químicos e físicos apresentam diferentes funções, sendo alguns deles bastante sensíveis às alterações do sistema, como, por exemplo, a matéria orgânica particulada e matéria orgânica ativa (biomassa microbiana) (CHAN; HEENAN; OATES, 2002; FRANZLUEBBERS, 2002; CONCEIÇÃO et al., 2005; DIEKOW et al., 2005; XAVIER et al., 2006).

A grande diversidade de compostos e de grupos funcionais que compõem a estrutura da matéria orgânica do solo permite que ela cumpra um papel singular na interação com outros componentes dos ecossistemas, admitindo um papel extremamente importante no desenvolvimento do ciclo da água. A influência da matéria orgânica do solo sobre a qualidade da água pode ser avaliada, a partir do controle exercido pelos compostos orgânicos sobre diferentes componentes do solo, tais como: a) estrutura do solo e condutividade hidráulica; b) mecanismos de interação da matéria orgânica do solo com íons e compostos xenobióticos e; c) sequestro de carbono e regulação mesoclimática.

A discussão, a seguir, tem por finalidade realizar algumas breves reflexões sobre os diferentes aspectos que relacionam a matéria orgânica do solo com a conservação dos recursos hídricos, tendo como foco a apresentação de mecanismos e uma análise de paisagem.

5.2 DESENVOLVIMENTO DE PLANTAS E ORGANISMOS, SEQUESTRO DE CARBONO E REGULAÇÃO CLIMÁTICA

A matéria orgânica particulada caracteriza a fração da matéria orgânica do solo que possui dimensões superiores a 53 µm. Essa fração é constituída por resíduos de fungos, animais e plantas, sendo sua permanência no solo condicionada à proteção física desempenhada pelos agregados (DIEKOW et al., 2005) que se dá pela oclusão física dos tecidos orgânicos pelas partículas minerais (OADES; WATERS, 1991; SIX et al., 2004; HANKE; DICK, 2017a).

Em razão de e caracterizar enquanto uma fonte primária de carbono e nutrientes, a matéria orgânica particulada exerce grande controle sobre a dinâmica dos organismos heterotróficos no solo, apresentando maior potencial de mineralização em comparação a outras frações em estágio mais avançado de degradação (CONCEIÇÃO et al., 2005). Essa fração orgânica favorece o aumento da biomassa microbiana e de sua atividade no solo (FRANZLUEBBERS, 2002; CONCEIÇÃO et al., 2005).

A matéria orgânica particulada e a fração ativa da matéria orgânica do solo são fundamentais ao processo de estabelecimento de plantas e organismos edáficos, o que se deve à sua influência sobre a dinâmica nutricional e estrutura do solo. Além da fração particulada, existem, na estrutura da matéria orgânica do solo, frações em maior grau de humificação chamadas de substância húmicas (STEVENSON, 1994). Essas substâncias húmicas podem ser separadas, de acordo com seu grau de solubilidade, em meio ácido/alcalino, representando os compartimentos conhecidos por: a) ácidos fúlvicos; b) ácidos húmicos e; c) huminas. Os compartimentos ácidos fúlvicos e ácidos húmicos, além de agirem enquanto supramoléculas capazes de complexar íons metálicos, podem atuar enquanto promotores de crescimento por apresentarem um efeito similar ao hormônio auxina. Isso se deve à elevada densidade de grupos carboxílicos na estrutura dessas frações (VISSER, 1985; NANNIPIERI, 1993; CANELLAS et al., 1999; CANELLAS et al., 2002; CANELLAS et al.; 2006; CANELLAS et al., 2009). Dessa forma, a proporção desses compartimentos na matéria orgânica do solo também pode beneficiar o desenvolvimento vegetal e, conseqüentemente, o nível de cobertura vegetal.

A cobertura do solo tem importante relação com a conservação dos recursos hídricos, uma vez que quanto maior a densidade da cobertura vegetal menor será a taxa de perda do solo pelos processos erosivos, assim como também ocorrerá maior taxa de infiltração de água no perfil. O aumento do volume de raízes tende a se refletir em um aumento da condutividade hidráulica do solo como função do aumento da densidade dos poros estruturais. Esse aumento do volume de tecidos radiculares também desempenha uma função enquanto filtro ambiental. Esse fato ocorre pela existência de cargas elétricas nas paredes e membranas das células radiculares que podem interagir com íons e outros compostos. Assim sendo, o controle exercido pela matéria orgânica do solo sobre o desenvolvimento de organismos

apresenta um efeito combinado que propicia maior resistência do solo contra a erosão e maior taxa de infiltração e retenção de água no perfil. Alguns desses aspectos serão melhor abordados mais adiante.

O aumento do teor de matéria orgânica do solo é resultado de um desbalanço positivo entre os processos de entrada de carbono (via fotossíntese) e da saída de carbono via mineralização de compostos orgânicos e erosão (ZACCONE et al., 2011). Em grande parte dos sistemas naturais e produtivos conservacionistas, ocorre um uso eficiente do carbono, advindo aumento e posterior estabilização do teor de matéria orgânica do solo. Essa condição, como já abordado, é benéfica ao desenvolvimento de plantas, mas também possui implicações ao controle da emissão dos gases do efeito estufa, bem como à estocagem de água no sistema solo-planta.

A mitigação das emissões dos gases de efeito estufa tem efeito positivo no que se refere ao controle do aquecimento global. Essa é uma das pautas ambientais mais importantes da atualidade e tem movido esforços de muitos grupos de pesquisa em todo o mundo. Basicamente, os três gases de efeito estufa mais importantes são o dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) e óxido nitroso (N_2O), sendo que os dois últimos possuem, respectivamente, 28 e 298 vezes o potencial de aquecimento atmosférico em relação ao CO_2 (IPCC, 2001). Todas essas moléculas possuem relação direta com a matéria orgânica do solo, sendo que o uso, manejo e conservação do solo podem determinar a produção e influenciar na taxa de emissão desses gases.

O uso conservacionista do solo tende a diminuir a taxa de emissão dos gases de efeito estufa por menor mineralização da matéria orgânica e perda pela volatilização de compostos orgânicos contendo carbono e nitrogênio em sua estrutura. A diminuição da concentração de CO_2 , CH_4 e N_2O , em função do aumento da taxa de sequestro de carbono e nitrogênio, na forma de matéria orgânica do solo, pode contribuir com a regulação climática (CERRI et al., 2007). Em ambientes que naturalmente acumulam grandes quantidades de carbono ocorre um aumento da capacidade de estocagem de água (BENITES et al., 2005; BENITES et al., 2007; SCHEER; CURCIO; RODERJAN, 2011; HANKE; DICK 2017b), que se deve, em geral, à combinação de menores temperaturas com a alta capacidade de armazenagem hidráulica da matéria orgânica do solo (sorção por grupos funcionais e poros orgânicos).

Muitos desses ambientes ocorrem em condições montanas e altomontanas (acima de 800 e 1100 metros de altitude, respectivamente) e, por sua grande capacidade em armazenar água sob condições de baixas temperaturas, influenciam a precipitação regional em função dos aspectos relacionados à evapotranspiração. Além disso, esse processo também exerce controle sobre a distribuição da água das zonas mais altas para as posições inferiores das bacias hidrográficas (BENITES et al., 2005; SCHEER; CURCIO; RODERJAN, 2011). A maior ocorrência de chuvas orogênicas nesses ambientes também contribui à manutenção de menores médias de temperatura.

A perda dos teores de matéria orgânica do solo desses ambientes, resultado do uso indevido dessas áreas, produz alteração do regime de chuva e da distribuição do fluxo hidrológico em escala regional. Sendo assim, a matéria orgânica do solo apresenta grande importância para a manutenção das características mesoclimáticas e da quantidade de água dispersada em diferentes compartimentos ambientais.

5.3 REGULAÇÃO E COMPARTIMENTALIZAÇÃO DOS FLUXOS HIDROLÓGICOS NA PAISAGEM

Como já abordado, o desenvolvimento vegetal afeta positivamente a condutividade hidráulica do perfil, em razão do aumento da densidade dos poros estruturais, sobretudo, os poros de maior tamanho que são responsáveis pela drenagem e aeração do solo. Além disso, a existência de poros/compartimentos de diferentes tamanhos, bem como a ocorrência de grande densidade de grupos funcionais na matéria orgânica do solo permitem que a fase orgânica do solo contribua estruturalmente com a condução e armazenamento de água e adsorção de íons e compostos xenobióticos. Em função dessas características, a matéria orgânica do solo tende a funcionar como uma espécie de “esponja”, por aumento do seu volume pela retenção de água.

A dinamização da retenção, infiltração e redistribuição de água, no sistema poroso pela matéria orgânica do solo, controla a disponibilidade de água para os organismos edáficos e processos biogeoquímicos no ambiente. A retenção de compostos iônicos pela interação da solução do solo com os compartimentos da matéria orgânica do solo permite a filtragem da água. A regulação hídrica do ambiente pela matéria orgânica do solo é essencial para a

conservação de bacias hidrográficas (GUADAGNIN et al., 2005; WISEMAN; PÜTTMANN, 2006; MORI et al., 2009; HANKE; DICK, 2017a). Sistemas conservacionistas de produção possuem taxas de infiltração e de condutividade hidráulica maiores comparados aos sistemas convencionais e ambientes degradados (ASSIS; LANÇAS, 2005), pelos maiores teores de matéria orgânica do solo.

A agregação é a condição que afeta diretamente a proporção e a estabilidade dos poros estruturais do perfil (macroporos, microporos ou criptoporos). A formação dos agregados se deve a diferentes processos que se estruturam em um sistema hierárquico que promove a aproximação de partículas (minerais e orgânicas), por agentes responsáveis pela floculação, cimentação e enredamento de componentes (hifas e raízes). Esses agentes podem variar de acordo com o nível hierárquico (tamanho da estrutura produzida) e também são conhecidos como mecanismos de agregação. Alguns exemplos desses mecanismos são apresentados, a seguir: a) mecanismo de cimentação por óxidos de ferro e alumínio – atuantes em nível de nano e microescala; b) mecanismos de interação organomineral (carboxilas e estruturas do tipo carboidrato com grupos ferrol e aluminol) – atuante em nível de nano e microescala; c) autoassociação de compostos orgânicos (interações hidrofóbicas e eletrostáticas) – atuante em nível de nano e microescala; d) mecanismos de encapsulamento e oclusão de frações da matéria orgânica do solo por partículas minerais (polissacarídeos e gomas adesivas) – atuante em nível de microescala; e) envolvimento e proteção de estruturas maiores por hifas e raízes – atuante em nível de macroescala (TISDAL; OADES, 1982; DEXTER, 1988; OADES; WATERS, 1991; SIX et al., 2004; DIEKOW et al., 2005; CONCEIÇÃO et al., 2005; ARAÚJO; GOEDERT; LACERDA, 2007; LOSS et al., 2009; HANKE et al., 2015; HANKE; DICK, 2017a). Dessa forma, as diferentes frações da matéria orgânica do solo exercem controle sobre a maior parte dos mecanismos de agregação conhecidos na atualidade.

O tamanho, morfologia e estabilidade dos agregados determinam a condutividade hidráulica, retenção de água e a taxa de perda de sedimentos via erosão. A fração orgânica dos agregados que compõe os poros do solo também é responsável pela interceptação de íons e substâncias xenobióticas, agindo como uma armadilha seletiva na filtragem de água. Entretanto, de acordo com a posição na paisagem, essa ação de filtro será diferenciada. Esse assunto será brevemente abordado no ponto, a seguir.

5.4 FUNCIONALIDADES ECOSISTÊMICAS RELACIONADAS AO SISTEMA “MATÉRIA ORGÂNICA DO SOLO – PAISAGEM”

Em função da relação estabelecida entre o regime hídrico e a paisagem, pode-se determinar a ocorrência de diferentes compartimentos geopedológicos em uma encosta (topossequência). Esses compartimentos podem variar, de acordo com o sistema geológico e geomorfológico regional, sendo a discussão realizada, a seguir, uma generalização para as encostas mais frequentes ocorrentes na região Sul do Brasil. A Figura 5.2 mostra um esquema de separação desses compartimentos e suas características gerais.

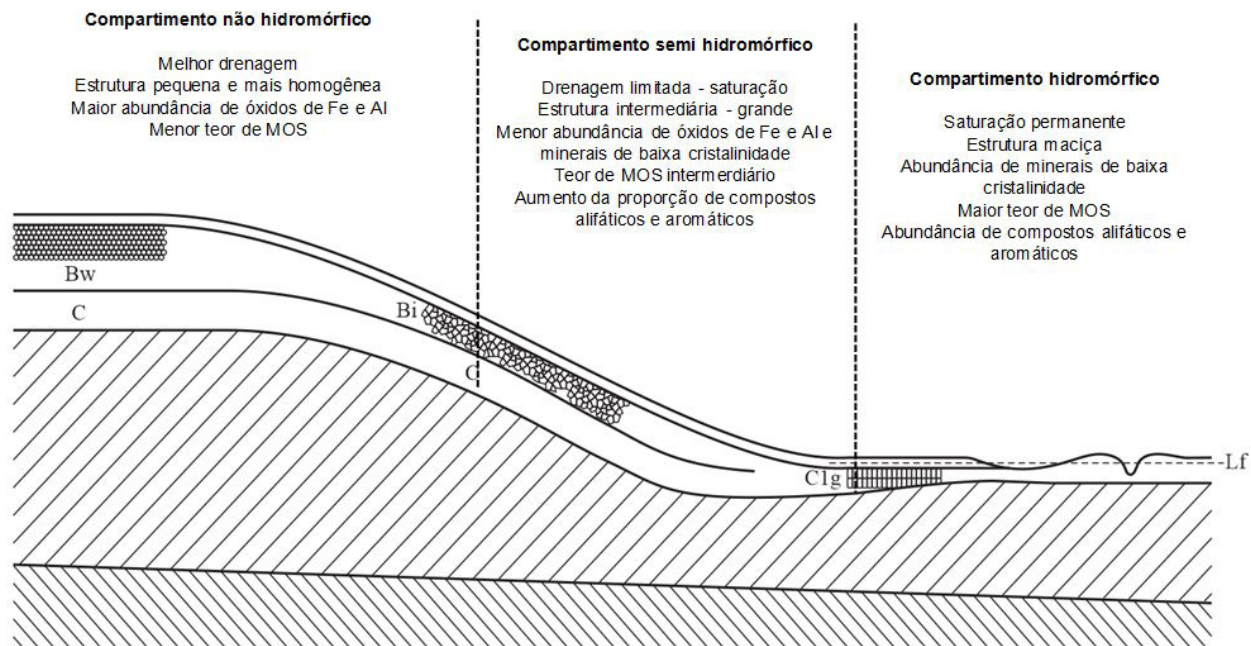


FIGURA 5.2 Esquema mostrando a separação dos compartimentos geopedológicos da encosta e suas principais características. Fonte: adaptado de Hanke, (2016).

As posições superiores da encosta (Figura 5.2) de declividade mais suave, tendem, em geral, a apresentar solos de maior profundidade que, por estrutura e espessura dos horizontes pedogenéticos, propiciam uma melhor drenagem do perfil, ocasionando maiores taxas de intemperismo dos minerais primários e secundários e menor acúmulo de matéria orgânica do solo – excluindo-se os sistemas altomontanos. A matéria orgânica do solo

desses perfis mais intemperizados, que caracterizam um compartimento “mesófilo - não hidromórfico”, tende a apresentar menor proporção de material alifático (cadeias alquílicas) e maior proporção de grupos carboxílicos e estruturas do tipo carboidrato, que se deve à interação desses grupamentos com os óxidos de ferro e alumínio da fração argila (HANKE, 2016; HANKE; DICK, 2017a).

Em posições intermediárias da vertente (Figura 5.2), em que ocorre diferenciação do regime hídrico para sistemas que caracterizam um compartimento “higrófilo – semi-hidromórfico” (saturação de água em um ou mais horizontes pedogenéticos em, pelo menos, uma estação do ano), o teor de matéria orgânica do solo tende a crescer comparativamente às posições superiores da encosta pela menor taxa de decomposição dos grupamentos orgânicos. Essa ocorrência se deve, em função de que, em solos anóxicos, há uma necessidade de maior especialização dos mecanismos enzimáticos utilizados pelos organismos heterotróficos, na ausência de oxigênio que, em geral, são menos eficientes na degradação de compostos orgânicos. Além disso, nesses solos, há menor favorecimento termodinâmico dos processos de quebra das ligações dos compostos orgânicos, ou seja, menor quantidade de kcal gerada pela quebra de um mol de uma substância, comparativamente ao mesmo processo em meio aeróbico (NELSON; COX, 2002). No compartimento “semi-hidromórfico”, a composição da matéria orgânica do solo tende a apresentar maior proporção de compostos alifáticos (cadeias alquílicas saturadas e insaturadas) e aromáticos, por maior recalcitrância desses grupamentos à degradação, sobretudo, em meio anaeróbico (HANKE; DICK, 2017b).

Por sua vez, em ambientes completamente saturados por água nas posições mais baixas da paisagem (compartimento “hidrófilo - hidromórfico”, Figura 5.2) ocorrem solos orgânicos ou perfis em transição para Organossolos. Dessa forma, o teor de matéria orgânica do solo, nessa posição da vertente, é substancialmente maior que nas posições superiores da encosta e apresenta, em geral, uma predominância de grupos alifáticos e aromáticos. Entretanto, sob regime de saturação hídrica, também, já foram observadas proporções importantes de estruturas do tipo carboidrato (grupos C-O-alquil) em decorrência da preservação de açúcares, em ambientes completamente anóxicos e com baixo potencial redox, por menor eficiência da via fermentativa utilizada pelos organismos decompositores.

A interconexão entre esses três compartimentos da encosta (não hidromórfico, semi - hidromórfico e hidromórfico; Figura 5.2) permite a dinamização do escoamento na paisagem e o filtro desse material por diferentes mecanismos de sorção de íons e compostos xenobióticos. No topo, em virtude de melhor drenagem e de maior proporção de grupos funcionais reativos à matéria orgânica do solo (carboxílicos e cadeias alquílicas substituídas com oxigênio), permite a condução da água mais rapidamente, para as posições subjacentes e filtragem dos íons e xenobióticos polares pelos mecanismos de sorção (adsorção específica e não específica e interações fracas de curto alcance), propiciados pelas cargas terminais dos carboxilatos e hidroxilas fenólicas e elevada polaridade dos oxigênios glicosídicos. Ainda, as cargas terminais superficiais dos oxigênios pertencentes aos óxidos de ferro e alumínio (abundantes em perfis mais intemperizados), também, contribuem para a imobilização desses compostos por mecanismos semelhantes aos ocorrentes com a matéria orgânica do solo.

Quando o fluxo hídrico atinge as posições intermediárias da paisagem (Figura 5.2), nas quais ocorrem os sistemas semi-hidromórficos, compostos de menor polaridade, podem ser imobilizados por outros tipos de mecanismos relacionados à matéria orgânica do solo (particionamento hidrofóbico, interações de Vander Walls e ligações do tipo π - π), sendo que os mecanismos predominantes, na posição superior da encosta, ainda, continuam ocorrendo, mesmo que com menor importância. Por sua vez, ao atingir a posição inferior da vertente, na qual ocorrem os sistemas hidromórficos, a velocidade do escoamento da água, proveniente das posições mais elevadas da encosta, diminui pelos seguintes aspectos: a) declividades mais suaves; e b) estrutura pedogenética menos condutiva, composta por blocos angulares e subangulares de maior tamanho, prismas e por matriz maciça. Quanto à diminuição da taxa de escoamento, a água que chega a esse compartimento geopedológico tende a permanecer mais tempo em interação com os grupamentos alifáticos e aromáticos da matéria orgânica do solo antes de ser dispersado para o sistema de recarga de rios e corpos d'água. No que diz respeito ao maior tempo de contato solução – matéria orgânica do solo (bem como com a superfície dos minerais de baixa cristalinidade que ocorrem em maior abundância nessas posições) – parte expressiva dos demais íons e compostos xenobióticos que escaparam dos compartimentos anteriores da encosta são imobilizados pelo mecanismo

de particionamento e outros tipos de interação hidrofóbica, bem como pelas cargas elétricas de outros grupamentos de carbono e das hidroxilas monocoordenadas dos minerais de baixa cristalinidade da matriz do perfil.

Esse processo de filtragem e regulação do escoamento hídrico na paisagem é dependente da estrutura do solo e, principalmente, da composição química da matéria orgânica do solo. O escoamento superficial tem menor contato com a estrutura funcional da matéria orgânica do solo e argilominerais. Dessa forma, o escoamento subsuperficial representa a parcela do fluxo hídrico que será mais efetivamente filtrado por esses mecanismos. Assim, maiores taxas de infiltração são importantes, para a ampliação do volume de água, que se movimenta por dentro do corpo pedogênico.

5.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A matéria orgânica do solo cumpre inúmeras funções no meio ambiente e apresenta estreita relação com a conservação dos recursos hídricos. A influência dos compostos orgânicos nesse processo pode se dar a partir de efeitos indiretos (agregação, controle dos processos erosivos, fonte de nutrientes e promoção do crescimento de organismos) e diretos (interação de grupos e compartimentos químicos da matéria orgânica do solo com íons e compostos xenobióticos). Entretanto esses processos diretos e indiretos dependem do teor e, sobretudo, da composição química da matéria orgânica do solo.

De forma geral, tanto o teor como a composição química da matéria orgânica do solo tendem a se diferenciar de acordo com a posição na paisagem. Isso significa que, dependendo da posição da encosta, a matéria orgânica do solo pode atuar sobre a conservação dos recursos hídricos de forma distinta, pois os mecanismos de interação dependem da proporção de grupamentos de carbono na estrutura do húmus.

5.6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARAÚJO, R.; GOEDERT, W. J.; LACERDA, M. P. C. Qualidade de um solo sob diferentes usos e sob cerrado nativo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, n. 5, p. 1099-1108, 2007.

ASSIS, R. L.; LANÇAS, K. P. Avaliação dos atributos físicos de um Nitossolo Vermelho Distrófico sob Sistema Plantio Direto, preparo convencional e mata nativa. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, n. 4, p. 515-522, 2005.

BALOTA, E. L. et al. Long-term tillage and crop rotation effects on microbial biomass and C and N mineralization in a Brazilian Oxisol. **Soil and Tillage Research**, v. 77, p. 137-145, 2004.

BENITES, V. M. et al. Properties of black soil humic acids from high altitude rocky complexes in Brazil. **Geoderma**, Amsterdam, v. 127, p. 104-113, 2005.

BENITES, V. M. et al. Soils associated with rock outcrops in the Brazilian mountain ranges Mantiqueira and Espinhaço. **Revista Brasileira de Botânica**, São Paulo, v. 30, n. 4, p. 569-577, 2007.

CANELLAS, L. P. et al. Adsorção de Cu^{2+} e Cd^{2+} em ácidos húmicos extraídos de resíduos orgânicos de origem urbana. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 29, n. 1, p. 21-26, 1999.

CANELLAS, L. P. et al. Humic acids isolated from earthworm induces root mitotic sites and plasma membrane H^+ -ATPase. **Plant Physiology**, v. 130, n. 4, p. 1951-1957, 2002.

CANELLAS, L. P. et al. Efeitos fisiológicos de substâncias húmicas - o estímulo às H^+ -ATPases. In: FERNANDES, M. S. (Ed.). **Nutrição mineral de plantas**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, p. 175-200, 2006.

CANELLAS, L. P. et al. Relationships between chemical characteristics and root growth promotion of humic acids isolated from Brazilian oxisols. **Soil Science**, v. 174, n.11, p. 611-620, 2009.

CAUSARANO, H. J. et al. Soil organic carbon fractions and aggregation in the southern Piedmont and Coastal Plain. **Soil Science Society of American Journal**, v. 72, n. 1, p. 221-230, 2008.

CERRI, C. E. P. et al. Tropical agriculture and global warming: impacts and mitigation options. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 64, n. 1, p. 83-99, 2007.

CHAN, K. Y.; HEENAN, D. P.; OATES, A. Soil carbon fractions and relationship to soil quality under different tillage and stubble management. **Soil and Tillage Research**, v. 63, n. 3-4, p. 133-139, 2002.

CONCEIÇÃO, P. C. et al. Qualidade do solo em sistemas de manejo avaliada pela dinâmica da matéria orgânica e atributos relacionados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, n. 5, p. 777-788, 2005.

DEXTER, A. R. Soil physical quality. Part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. **Geoderma**, Amsterdam, v. 120, n. 3-4, p. 201-214, 2004.

DICK, D. P. et al. Química da Matéria orgânica do Solo. In: MELO, V. F.; ALLEONI, L. R. F. (Eds.). **Química e Mineralogia do solo: Parte II – Aplicações**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do solo, p. 428-436, 2009.

DIEKOW, J. et al. Carbon and nitrogen stocks in physical fractions of a subtropical Acrisol as influenced by long-term no-till cropping systems and N fertilization. **Plant and Soil**, v. 268, p. 319-328, 2005.

DORAN, J. W.; PARKIN, T. B. Defining and assessing soil quality. In: DORAN, J. W. et al. (Eds.). **Defining soil quality for a sustainable environment**. Madison: Soil Science Society of America, p. 3-21, 1994.

FRANZLUEBBERS, A. J. Soil organic matter stratification ratio as an indicator of soil quality. **Soil and Tillage Research**, v. 66, n. 2, p. 95-106, 2002.

GUADAGNIN, J. C. et al. Perdas de solo, água e nitrogênio por erosão hídrica em diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, n. 2, p. 277-286, 2005.

HANKE, D. et al. Influência da matéria orgânica no diâmetro médio de minerais da fração argila de solos desenvolvidos de basalto no sul do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 39, n. 6, p. 1611-1622. 2015.

HANKE, D. **Matéria Orgânica de solos com horizontes húmicos e hísticos sob Floresta Ombrófila Mista: mecanismos de estabilização e traçador de páleo-ambiente**. 201p. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre/RS, 2016.

HANKE, D.; DICK, D. P. Aggregate stability in soil with humic and histic horizons in a toposequence under Araucaria forest. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 41, n. 3, p. 1603-1615, 2017a.

HANKE, D.; DICK, D.P. Organic matter stocks and the interactions of humic substances with araucaria moist forest soil metals with humic and hístic horizons. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 41, n. 3, p. 1616-1628, 2017b.

IPCC. **Climate change 2001**: working group II: Impacts, adaptations and vulnerability, 2001. 23p. <<https://www.ipcc.ch/report/ar3/wg2/>>. Acesso em: 8 de março de 2018.

KLEBER, M.; SOLLINS, P.; SUTTON, R. A conceptual model of organo-mineral interactionc in soils: Self-assembly of organic molecular fragments into zonal structures on mineral surfaces. **Biogeochemistry**, Drodrecht, v. 85, n. 1, p. 9-24, 2007.

KLEBER, M. et al. Old and stable soil organic matter is not necessarily chemically recalcitrant: implications for modeling concepts and temperature sensitivity. **Global Change Biology**, Oxford, v. 17, n. 2, p. 1097-1107, 2011.

LOSS, A. et al. Carbono e frações granulométricas da matéria orgânica do solo sob sistemas de produção orgânica. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 39, n. 4, p. 1067-1072, 2009.

MORI, H. F. et al. Perda de água, solo e fósforo com aplicação de dejetos líquido bovino em latossolo sob plantio direto e com chuva simulada. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, n. 1, p. 189-198, 2009.

NANNIPIERI, O. et al. Proprietá biochimichee fisiologiche della sostanza organica. In: NANNIPIERI, P. **Ciclo della sostanza orgânica del suolo**. Bologna: Pátron, p. 67-78, 1993.

NELSON, D. L.; COX, M. M. **Princípios de bioquímica**. São Paulo: Sarvier. 2002, 975p.

OADES, J. M.; WATERS, S. G. Aggregate hierarchy in soils. **Australian Journal of Soil Research**, Melbourne, v. 29, n. 6, p. 815-828, 1991.

PICCOLO, A. The supramolecular structure of humic substances. **Soil Science**, Baltimore, v. 166, p. 810-832, 2001.

SCHEER, M. B.; CURCIO, G. R.; RODERJAN, C. V. Funcionalidades ambientais de solos altomontanos da Serra da Igreja, Paraná. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, n. 2, p. 1113-1126, 2011.

SIX, J. et al. A history of research on the link between (micro)aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 79, n.1, p. 7-31, 2004.

SHUKLA, M. K.; LAL, R.; EBINGER, M. Determining soil quality indicators by factor analysis. **Soil and Tillage Research**, v. 87, n. 2, p. 194-204, 2006.

STEVENSON, F. J. **Humus chemistry: genesis, composition, reactions**. 2^a ed. John Wiley, New York, USA. 1994. 496p.

TISDALL, J. M.; OADES, L. Organic matter and water stable aggregates in soil. **The Journal of Soil Science**, Oxford, v. 33, n. 2, p. 141-163, 1982.

VIEIRA, F. C. B. et al. Building Up Organic Matter in a Subtropical Paleudult under Legume Cover-Crop-Based Rotations. **Soil Science Society of America Journal**, v. 73, n. 5, p. 1699-1706, 2009.

VISSER S. A. Effect of humic acids on numbers and activities of microbes within physiological groups. **Organic Geochemistry**, v. 8, n. 1, p. 81-85, 1985.

WISEMAN, C. L. S.; PÜTTMANN, W. Interactions between mineral phases in the preservation of soil organic matter. **Geoderma**, Amsterdam, v. 134, n. 1-2, p. 109-118, 2006.

XAVIER, F. A. S. et al. Biomassa microbiana e matéria orgânica leve em solos sob sistemas agrícolas orgânico e convencional na Chapada da Ibiapaba-CE. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, n. 2, p. 247-258, 2006.

ZACCONE, C. et al. Evaluating the 'conservative' behavior of stable isotopic ratios ($\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$, and $\delta^{18}\text{O}$) in humic acids and their reliability as paleoenvironmental proxies along a peat sequence. **Chemical Geology**, v. 285, n. 1-4, p. 124-132, 2011.

CAPÍTULO 6

MANEJO DA ÁGUA E EROSÃO DO SOLO

Tiago de Andrade Neves Hörbe¹

Jean Paolo Gomes Minella¹

Ana Lúcia Londero¹

¹Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Departamento de Solos, Santa Maria – RS
E-mails: jminella@gmail.com; tiagohorbe@hotmail.com; londeroanalucia@gmail.com.

6.1 INTRODUÇÃO

Manejar a água e compreender a dinâmica dos processos que envolvem a erosão e a degradação dos solos são essenciais para o aprimoramento de estratégias que aumentem a produtividade das culturas em equilíbrio com a sustentabilidade do ambiente. Cenários indicam que a produção de grãos deverá ser incrementada para atender a demanda global de alimentos até 2050 (ALEXANDRATOS; BRUINSMA, 2012; TILMAN et al., 2011). Para que essa demanda seja atendida, sem expansão de áreas agrícolas, o desafio estará em melhorar a qualidade dos solos já cultivados, de forma a reduzir a lacuna entre a produtividade potencial de um solo e a sua produtividade atual, ou seja, o objetivo é otimizar a conversão de kg de grãos/mm de chuva, por meio de melhorias no manejo do solo e da água.

Na Figura 6.1, podem-se observar duas áreas agrícolas com distinta produtividade potencial do solo, para a produção de grãos, sendo a primeira manejada sobre o conceito de Plantio Direto (PD) e a segunda sobre o conceito de Sistema Plantio Direto (SPD), que serão discutidos no decorrer deste capítulo. A Figura 6.1a representa um solo com camada compactada, baixa atividade biológica e radicular, indicando um solo de baixa qualidade. Na Figura 6.1b, evidencia-se uma situação oposta, em que se tem uma boa qualidade de solo, com restos culturais em decomposição na camada superficial, restos culturais de raízes em decomposição, atividade biológica e grande atividade radicular na camada de enraizamento.

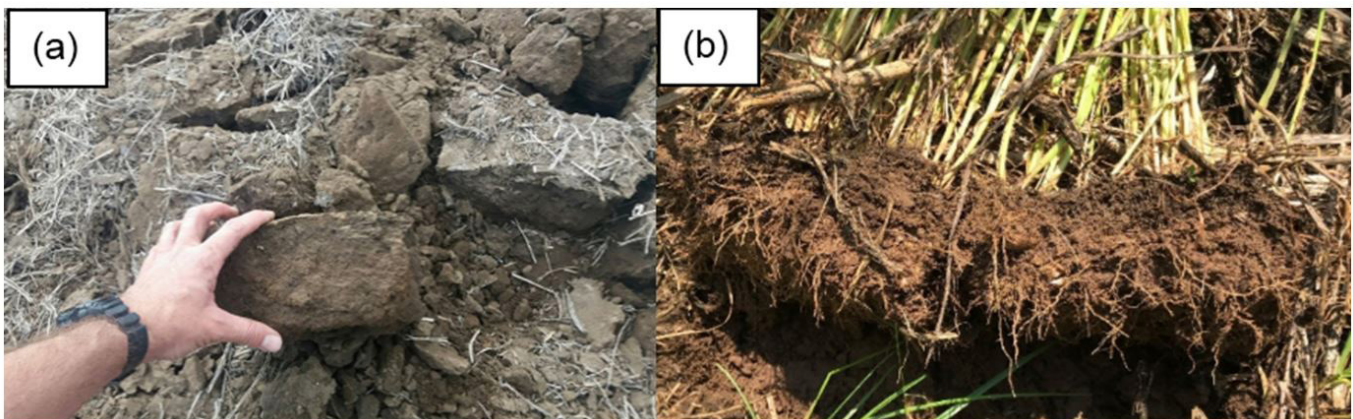


FIGURA 6.1 Representação de área agrícola indicando baixa qualidade do solo (a); e área agrícola indicando uma boa qualidade do solo (b). Foto: Adriano Fernandes (a) e arquivo pessoal (b).

As causas para a distinção entre estas duas áreas passam pelas escolhas nas ações de manejo do solo (SPD, calagem, adubação química, adubação orgânica), de manejo de plantas (rotação de culturas, intensificação de plantas de cobertura, adubação verde) e de manejo da água (terraceamento agrícola, cultivo em contorno e cordões vegetados). Adicionalmente, essas ações influenciam direta e indiretamente as interações físicas, químicas e biológicas do solo (compactação do solo, infiltração e armazenamento de água no solo, fertilidade do solo, ciclagem de nutrientes, profundidade da camada de enraizamento das culturas, matéria orgânica do solo e atividade biológica), demonstrando, assim, a complexidade de conhecimento necessária à adequação correta do uso e do manejo, a partir dos processos que conduzem à degradação ou à conservação dos solos.

Atualmente, a temática do manejo da água, para o controle da erosão e da transferência de solutos (nutrientes e contaminantes, discutidas com maior ênfase no Capítulo 7) tem sido fortemente debatido nos encontros técnicos de produtores e fóruns científicos. Tal fato é reflexo de problemas relacionados com a formação de escoamento superficial e de seus processos relacionados, de modo que a erosão do solo voltou a ser uma realidade nas lavouras do Brasil, especialmente, na região Sul (Figura 6.2), sob área de PD. Esse mecanismo de degradação é preocupante, pois põe em risco os solos e o atual sistema produtivo. Áreas como a ilustrada, na Figura 6.1a, a compactação e a reduzida taxa de infiltração favorecem o aumento do escoamento superficial e da erosão do solo. Nessas áreas, a perda da camada fértil pela erosão, e o depauperamento das atividades biológicas, físicas e químicas do solo determinam uma redução da produtividade potencial do solo.

Na atualidade, há uma tendência dos produtores em não aceitar que as produtividades atuais, que estão sendo atingidas, as quais eles consideram adequadas, sejam decorrente de um uso intenso de tecnologias, tais como: genética das cultivares, adubações elevadas, agricultura de precisão, utilização de bioestimulantes no tratamento de sementes e na parte aérea, condicionadores de solo e ainda uma grande revolução tecnológica nos equipamentos agrícolas (semeadoras pneumáticas, piloto automático, pulverizações com desligamento de seções, entre outros). Nesse sentido, este capítulo tem como objetivo demonstrar que o aprimoramento e sinergismo, no sistema de manejo do solo, planta e água, objetivando a sua conservação e melhoria de qualidade, além dos benefícios ambientais à sociedade, conduz

a incrementos de produtividade de forma mais sustentável. Para isso, são apresentados: a) princípios da conservação do solo; e b) os desafios da agricultura conservacionista para o aprimoramento do manejo da água e da erosão do solo.



FIGURA 6.2 Área de Plantio Direto no Noroeste do Rio Grande do Sul - RS, tradicionalmente manejada com monocultivo da cultura da soja no verão e a cultura do trigo em sua sucessão. Foto: Leonardo Losso.

6.2 PRINCÍPIOS DA CONSERVAÇÃO DO SOLO

Os princípios da conservação do solo são dependentes da utilização em conjunto das estratégias de manejo do solo, planta e água, os quais formam um “tripé da conservação do solo”. É importante compreender a contribuição e os elos existentes entre cada estratégia de manejo, de modo a compor um sistema mais eficiente, num círculo contínuo e “virtuoso”, em que uma estratégia de manejo se torna dependente da outra para que os princípios da conservação sejam atendidos. Neste sentido, sugerem-se quatro princípios norteadores à

definição dos manejos, os quais são específicos para cada caso. Os princípios são percepções gerais que definirão as estratégias de manejo, a serem escolhidas, considerando as especificidades de cada propriedade e agricultor (Figura 6.3).



FIGURA 6.3 Ilustração dos quatro princípios da conservação da água e do solo.

6.2.1 Panorama da conservação do solo no Brasil

No Brasil, o SPD tem sido utilizado como a principal estratégia à conservação dos solos, abrangendo uma área de, aproximadamente, 32,8 milhões de hectares (FEBRAPDP, 2018), o que representa perto de 86% dos campos agrícolas cultivados com as culturas da soja, milho e feijão (CONAB, 2016). Neste sistema de produção, a semeadura das culturas é realizada com a mínima mobilização do solo sobre os restos culturais (DERPSCH et al., 2014). Sua grande adoção se deve ao fato de que, quando comparado ao sistema de cultivo

convencional, anteriormente utilizado, esses restos culturais aumentam a atividade biológica e o sequestro de carbono no solo (PEIRETTI; DUMANSKI, 2014; STURNY et al., 2007). Adicionalmente, também é observado um aumento na taxa de infiltração de água no solo, reduzindo o escoamento superficial (KARLEN et al., 2009; VERHULST et al., 2010) e, por conseguinte, a erosão do solo (GOVAERTS et al., 2007).

Todos esses benefícios citados fazem com que esse sistema seja considerado um importante exemplo de agricultura conservacionista para regiões tropicais e subtropicais (DERPSCH et al., 2010). De fato, o conceito de SPD, adotado no Brasil, utiliza como essência os mesmos conceitos da agricultura conservacionista descritos pela FAO (FRIEDRICH et al., 2012; HOBBS; SAYRE; GUPTA, 2008): a) solo continuamente coberto com mínima perturbação; b) permanente cobertura orgânica sobre o solo; e c) diversificação de espécies de culturas em desenvolvimento na sequência ou em associação (rotação de culturas, adubação verde e intensificação de plantas de cobertura).

No entanto, após a sua consolidação nas lavouras brasileiras, o que se observa é uma gradual e negligente simplificação, nas estratégias de manejo de planta e da água, de modo que o atual sistema de cultivo é, neste contexto, apresentado sobre o conceito de PD, no qual há uma insuficiente cobertura do solo, sem restos culturais, caracterizado pela falta de rotação de culturas (DIDONÉ et al., 2014) e recorrentes problemas relacionados à compactação superficial (DRESCHER et al., 2011; SUZUKI et al., 2008). Associado a isso, durante este processo de consolidação, muitos produtores e técnicos passaram a acreditar que o PD ou até SPD sozinhos seria suficiente para o controle das perdas de água e solo. Desta forma, encorajados por essa convicção, passaram a retirar parcial ou totalmente os terraços de suas lavouras (CAVIGLIONE et al., 2010; PRUSKI, 2009).

Esse panorama demonstra o grande desafio existente, para o aprimoramento da agricultura conservacionista, quanto a um atual sistema produtivo com a formação de um “círculo vicioso” de degradação dos solos, imposto pela violação dos princípios da conservação do solo no Brasil.

6.3 DESAFIOS DA AGRICULTURA CONSERVACIONISTA PARA O APRIMORAMENTO DO MANEJO DA ÁGUA E DA EROSÃO DO SOLO

A princípio, é preciso compreender que o ato de apenas realizar o PD não caracteriza uma agricultura conservacionista (REICOSKY, 2015), a qual, conforme

citado, depende necessariamente de um conjunto simultâneo de outras práticas. Ainda, em uma recente meta-análise global de resultados a respeito dos impactos da agricultura conservacionista, Pittelkow et al. (2015) demonstraram que o potencial de contribuição isolado do PD ao aprimoramento da agricultura seria mais limitado que se presume. Isso, porque apenas o ato de não revolver o solo na semeadura (PD) não seria capaz de melhorar a qualidade do solo e incrementar a produção das culturas, principalmente, em regiões de clima quentes.

Além disso, pesquisas no Sul do Brasil, investigando os efeitos do atual sistema produtivo nos processos hidrológicos e erosivos, em bacias hidrográficas, têm evidenciado perdas significativas de água e de solo em áreas manejadas com PD (DIDONÉ et al., 2014; DIDONÉ; MINELLA; MERTEN, 2015; TIECHER et al., 2015). Essas perdas têm potencial de mobilizar pesticidas e nutrientes, para os recursos hídricos, causando uma série de problemas ambientais, como a eutrofização e contaminação da água (WALLING, 2013; HOROWITZ; CLARKE; MERTEN, 2015; TIECHER et al., 2017).

Preocupados com esse panorama, o Grupo Interdisciplinar de Hidrologia de Superfície e Erosão (GIPEHS) da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) tem monitorado os processos que comandam as perdas de água, solo e solutos na escala de encosta agrícola e de bacias, as quais estão mais próximas da escala real e de interesse do produtor rural. O objetivo é caracterizar, por meio do monitoramento a magnitude dos processos erosivos e hidrológicos, em distintas condições de manejo de solo, planta e água. Diferentes bacias hidrográficas experimentais têm sido monitoradas, entretanto um foco maior ao PD e SPD tem sido dado numa unidade experimental localizada no município de Júlio de Castilhos, região central do estado do Rio Grande do Sul, na área experimental do Centro de Pesquisa de Sementes do Departamento de Diagnóstico e Pesquisa Agropecuária e da Secretária da Agricultura, Pecuária e Irrigação do Rio Grande do Sul. As sucessões e rotações de culturas adotadas, nas parcelas manejadas sem rotação de culturas (PD) e com rotação de culturas e intensificação de plantas de cobertura (SPD), são apresentadas na Figura 6.4. Os principais resultados obtidos até o momento nesta pesquisa são apresentados neste capítulo, de forma que, para maiores informações, podem ser consultadas as dissertações de mestrado de Londero (2015) e Deuschle (2016).

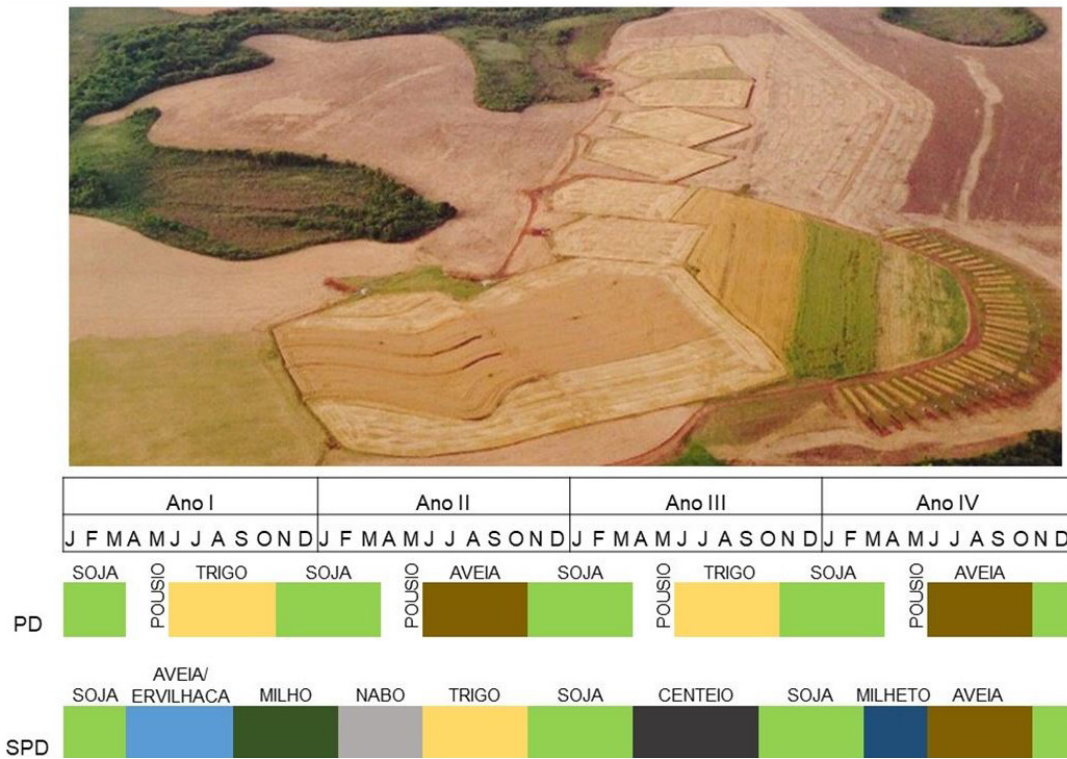


FIGURA 6.4 Imagem aérea com design experimental das parcelas de monitoramento na escala da encosta agrícola avaliando as praticas de manejo do solo, planta e água e a representação esquemática da sucessão em Plantio Direto (PD) e rotação de culturas em Sistema Plantio Direto (SPD) utilizadas nas parcelas.

6.3.1 Importância da intensificação no manejo de plantas de cobertura e da rotação de culturas no SPD: aplicações

O monitoramento das parcelas na escala de encosta agrícola demonstra a fragilidade do atual sistema produtivo, caracterizado pelo PD (sem rotação de culturas), no controle da erosão do solo (Figura 6.5). Durante o monitoramento de nove eventos de chuva, com acumulado de 550 mm, 182 mm foram perdidos pelo processo de escoamento superficial e 664 kg ha⁻¹ de solo foram perdidos pelo processo erosivo. Os resultados são preocupantes, pois, mesmo nos eventos de menor intensidade de chuva (I30), o PD apresentou perdas significativas de solo (Figura 6.5a). A intensificação de plantas de cobertura e a rotação de culturas evidenciaram a necessidade do resgate dos princípios da agricultura conservacionista, para o aprimoramento do PD, como estratégia para conservação do solo, visto que a erosão foi reduzida em 82% e o escoamento superficial em 18%.

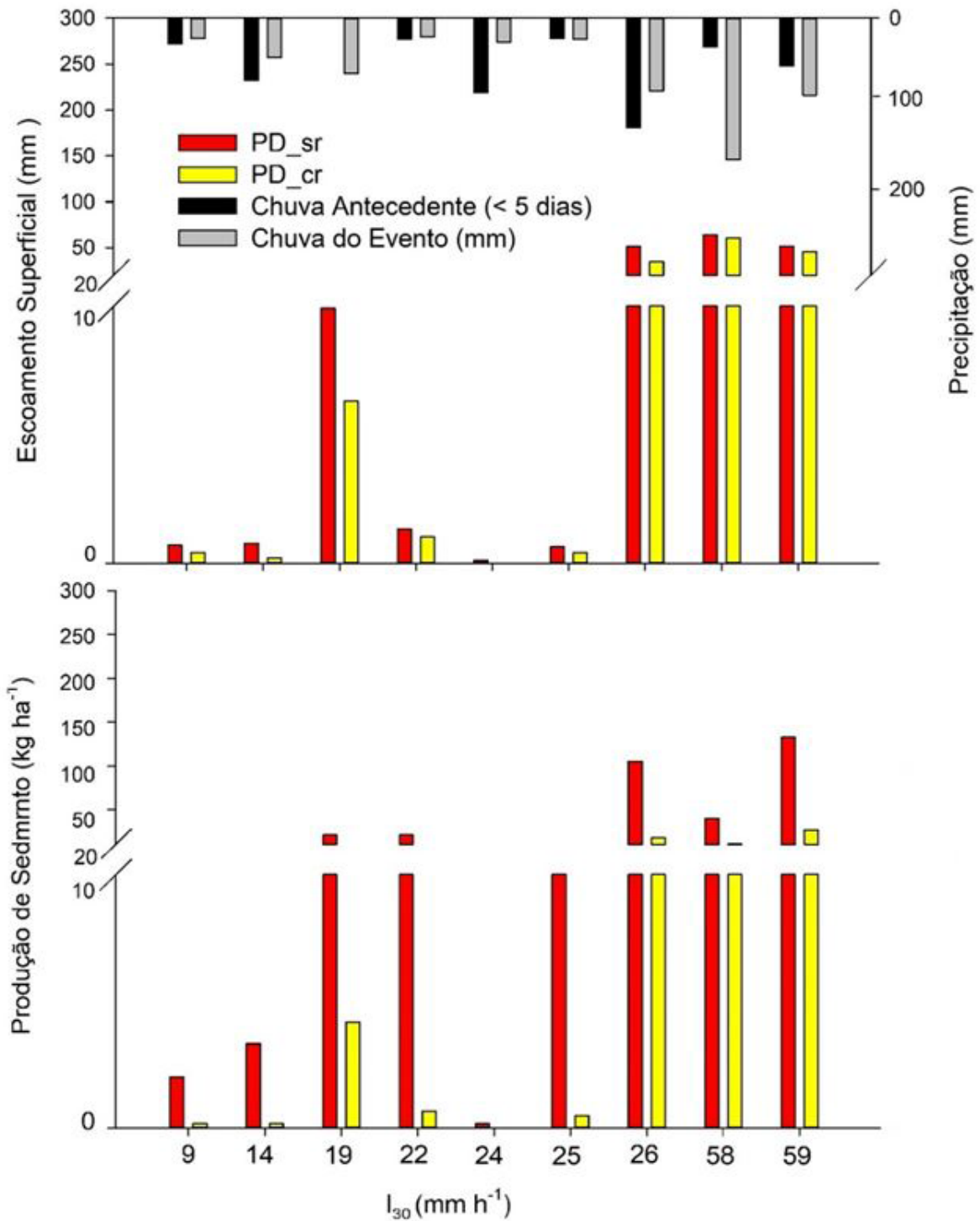


FIGURA 6.5 Escoamento superficial (mm) e produção de sedimento (kg ha^{-1}) sobre diferentes intensidades máximas de chuva, durante 30 minutos (I_{30}), chuva acumulada e chuva antecedente nas parcelas manejadas sobre PD (PD_sr) e SPD (PD_cr).

Os fatores que conduzem essa maior eficiência ao controle da erosão incluem a maior adição de resíduos culturais pela intensificação das plantas de cobertura no sistema e a utilização da cultura do milho. Desta forma, tem-se uma grande diversidade de plantas com características distintas, de raízes (atuando de formas distintas na camada de enraizamento) e de parte aérea (relação carbono/nitrogênio). Além disso, o solo sob SPD está permanentemente coberto com plantas, o que não se observa em PD, que tem um “vazio outonal”, o período de transição entre a colheita da cultura da soja e a implantação da cultura de inverno (Figura 6.4).

Além do monitoramento das perdas de água e de solo, neste experimento, também, foi quantificada a produtividade de grãos da cultura da soja, de modo que o emprego da rotação de culturas e a intensificação de plantas de cobertura no SPD incrementou a produtividade da cultura em 15%, quando em comparação à parcela sem rotação de culturas (PD) (Figura 6.6).

Esse incremento está relacionado à otimização da produtividade da água, com o incremento da produtividade potencial do solo pelo fato de melhorias na qualidade deste solo.

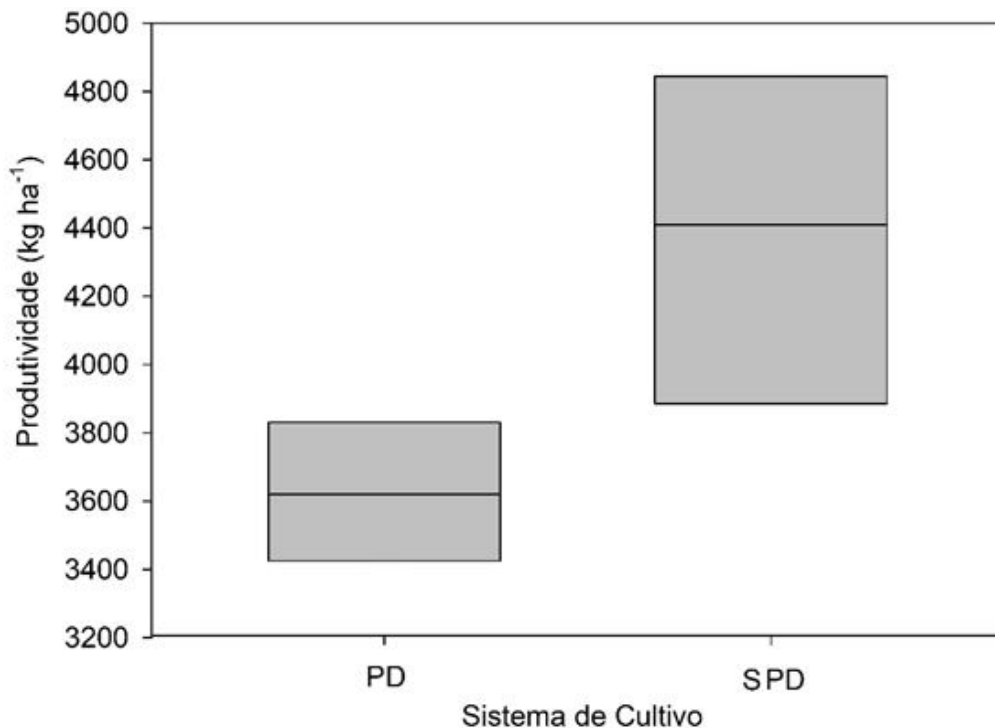


FIGURA 6.6 Produtividade de grãos da cultura da soja nas parcelas manejadas sobre Plantio Direto (PD) e Sistema Plantio Direto (SPD).

6.3.2 Lacunas da agricultura conservacionista e do SPD no manejo do escoamento superficial

Os resultados apresentados na Figura 6.5 demonstram claramente a necessidade do resgate dos princípios da agricultura conservacionista (SPD) para o melhor desempenho do PD como prática para conservação do solo. No entanto, também, evidenciam a fragilidade deste sistema, para o controle do escoamento superficial, principalmente, para os eventos mais extremos (Figura 6.3), em que os três primeiros princípios seriam atingidos com a utilização do SPD, seguindo as premissas da agricultura conservacionista e nos faltaria ainda seguir o último dos princípios da conservação do solo, que, neste caso, está permitindo essa lacuna para o controle do escoamento superficial.

O volume de água perdido nas lavouras é importante, se considerarmos que, na agricultura de sequeiro, pesquisas globais indicam que um dos principais responsáveis pela lacuna de produtividade das culturas é o déficit hídrico. Além disso, o volume de água perdido por escoamento também tem um potencial de mobilizar pesticidas e nutrientes até os recursos hídricos, podendo causar uma série de problemas ambientais, com eutrofização e contaminação dos recursos hídricos.

6.3.3 Terraceamento e a otimização da performance da agricultura conservacionista

Como exposto, a prática do terraceamento agrícola contempla o quarto princípio da conservação do solo. Dentro dos estudos do grupo de pesquisa (Figura 6.4) pelo monitoramento de 31 eventos de chuva, em que o escoamento foi evidenciado nas bacias pareadas com e sem terraço (Figura 6.7), a prática do terraceamento indicou uma redução de 71% no escoamento superficial (LONDERO et al., 2017), o que demonstra o sucesso dessa prática como quarto princípio da conservação do solo.

Como na agricultura de sequeiro, o solo é utilizado como reservatório natural de água para as plantas, o seu recarregamento para criar condições de umidade na zona radicular das culturas será dependente da infiltração da água da chuva.

A redução do escoamento superficial, na bacia com a prática mecânica de terraceamento, incrementou o recarregamento de água disponível na camada de 0 a 1,5 m,

durante o ciclo das culturas da soja e do milho em 13,7 e 7,8%, respectivamente. Além disso, no acompanhamento do desempenho produtivo dessas culturas, evidenciou-se um incremento da produtividade de grãos de 13 e 9%, para as culturas da soja e milho, respectivamente, aumentando a sustentabilidade nesse sistema de manejo (Figura 6.8).

Dessa forma, demonstra-se a possibilidade de que uma grande quebra de paradigma no meio rural mostra que o pensamento “produtivista” caminha em lado oposto ao pensamento “ambientalista”. Na verdade, seguir os princípios da conservação do solo e da água, por uma agricultura conservacionista, além da preservação dos recursos (solo), ambiente (recursos hídricos), vai proporcionar ao campo maior estabilidade e rentabilidade das atividades agrícolas.



FIGURA 6.7 Visão geral das bacias pareadas de ordem zero manejadas sobre Plantio Direto com e sem a prática do terraceamento e uma representação da dinâmica do escoamento superficial nas bacias num evento de chuva de grande magnitude.

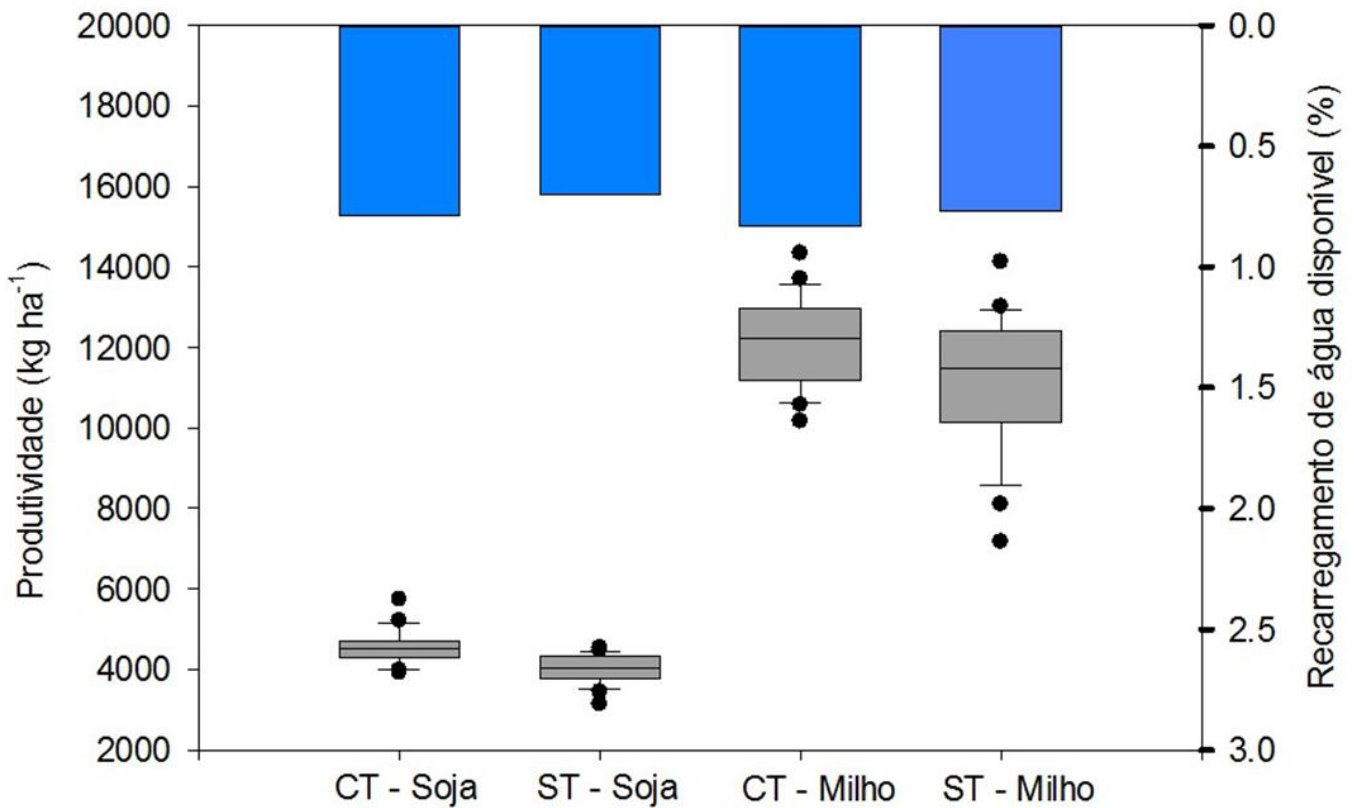


FIGURA 6.8 Produtividade média de grãos de soja e de milho nas bacias pareadas com (CT) e sem (ST) a prática do terraceamento e o recarregamento médio de água disponível durante todo o ciclo de cada cultura.

6.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Manejar a água e compreender a dinâmica dos processos que envolvem a erosão e a degradação dos solos são essenciais para o aprimoramento de estratégias que incrementem a produtividade das culturas em equilíbrio com a sustentabilidade do ambiente. Para isso, enfatiza-se a importância da utilização dos quatro princípios da conservação do solo como norteadores na definição das estratégias de manejo de solo, planta e água. Nos estudos de monitoramento de perdas de água e solo, na escala de encosta agrícola, demonstramos a importância da rotação de culturas e da intensificação das plantas de cobertura ao aprimoramento da performance do Plantio Direto, como prática de conservação do solo, tornando-o, de fato, Sistema

de Plantio Direto. Além disso, evidencia-se que o uso do terraceamento é essencial à redução do escoamento superficial, possibilitando incrementos no recarregamento de água disponível na camada de enraizamento e a otimização da produtividade das culturas.

6.5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALEXANDRATOS, N.; BRUINSMA, J. World agriculture towards 2030/2050: the 2012 revision Global Perspective Studies Team FAO Agricultural Development Economics Division. **Agricultural Development Economics (ESA) The Food and Agriculture Organization of the United Nations Viale delle Terme di Caracalla 00153 Rome, Italy**, n. Query date: 2017-11-06, 2012.

CAVIGLIONE, J. H. et al. Espaçamentos entre terraços em Plantio Direto. **Boletim técnico IAPAR**, v. 71, 2010. 59p.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - CONAB. Disponível em:<<http://www.conab.gov.br/conteudos.php?a=1253&t=>>. Acesso em: 8 de março de 2017.

DERPSCH, R. et al. Current status of adoption of no-till farming in the world and some of its main benefits. **International Journal of Agricultural and Biological Engineering**, v. 3, n. 1, p. 1-25, 2010.

DERPSCH, R. et al. Why do we need to standardize no-tillage research? **Soil and Tillage Research**, v. 137, p. 16-22, 2014.

DEUSCHLE, D. **Controle do escoamento superficial e das perdas de solo em sistema plantio direto na escala de lavoura**. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo). Programa de Pós Graduação em Ciência do Solo, Universidade Federal em Santa Maria, Santa Maria, p. 84, 2016.

DIDONÉ, E. J. et al. Impact of no-tillage agricultural systems on sediment yield in two large catchments in Southern Brazil. **Journal of Soils and Sediments**, v. 14, n. 7, p. 1287-1297, 2014.

DIDONÉ, E. J.; MINELLA, J. P. G.; MERTEN, G. H. Quantifying soil erosion and sediment yield in a catchment in southern Brazil and implications for land conservation. **Journal of Soils and Sediments**, v. 15, n. 11, p. 2334-2346, 2015.

DRESCHER, M. S. et al. Persistência do efeito de intervenções mecânicas para a descompactação de solos sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, Viçosa, v. 35, n. 5, p. 1713-1722, 2011.

FEDERAÇÃO BRASILEIRA DE PLANTIO DIRETO NA PALHA - FEBRAPDP. **Area do Sistema Plantio Direto**. Disponível em: <<https://febrapdp.org.br/area-de-pd>>. 2018. Acesso: 8 de outubro de 2018.

FRIEDRICH, T.; DERPSCH, R.; KASSAM, A. **Visão geral da disseminação global da Agricultura de Conservação**. Relatório Facts. Edição Especial, nº6, 2012. 20p.

GOVAERTS, B. et al. Infiltration, soil moisture, root rot and nematode populations after 12 years of different tillage, residue and crop rotation managements. **Soil and Tillage Research**, v. 94, n. 1, p. 209-219, 2007.

HOBBS, P. R.; SAYRE, K.; GUPTA, R. Role of biotechnology in sustainable agriculture. **Integrated Pest Management: Concepts, Tactics, Strategies and Case Studies**, n. 4, 2016, p. 260-272, 2008.

HOROWITZ, A. J.; CLARKE, R. T.; MERTEN, G. H. The effects of sample scheduling and sample numbers on estimates of the annual fluxes of suspended sediment in fluvial systems. **Hydrological Processes**, v. 29, n. 4, p. 531-543, 2015.

KARLEN, D. L. et al. Is No-Tillage Enough? A Field-Scale Watershed Assessment of Conservation Effects. **Electronic Journal of Integrative Biosciences**, v. 7, n. 2, p. 1-24, 2009.

LONDERO, A. L. **Perdas de água e sedimento de bacias pareadas de ordem zero sob plantio direto com e sem terraço**. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo). Programa de Pós Graduação em Ciência do Solo. Universidade Federal em Santa Maria, Santa Maria, 2015, 156p.

LONDERO, A. L. et al. Impact of broad-based terraces on water and sediment losses in no-till (paired zero-order) catchments in southern Brazil. **Journal of Soils and Sediments**, v. 18, p. 1-17, 2017.

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

PEIRETTI, R.; DUMANSKI, J. The transformation of agriculture in Argentina through soil conservation. **International Soil and Water Conservation Research**, v. 2, n. 1, p. 14-20, 2014.

PITTELKOW, C. M. et al. Productivity limits and potentials of the principles of conservation agriculture. **Nature**, v. 517, n. 7534, p. 365-368, 2015.

PRUSKI, F. **Conservação do solo e água: Práticas mecânicas para o controle da erosão hídrica**. 2ª ed., UFV, 2009. 279p.

REICOSKY, D. C. Conservation tillage is not conservation agriculture. **Journal of Soil and Water Conservation**, v. 70, n. 5, p. 103A-108A, 2015.

STURNY, W.G. et al. Direktsaat und Pflug im Systemvergleich – eine Synthese. **Agrarforschung (Schweiz)**, v. 14, n. 8, p. 350-357, 2007.

SUZUKI, L. E. A. S. et al. Estimativa da susceptibilidade à compactação e do suporte de carga do solo com base em propriedades físicas de solos do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 3, p. 963-973, 2008.

TIECHER, T. et al. Cover crops affecting soil phosphorus dynamics in Brazilian highly weathered soils. **Cover Crops: Cultivation, Management and Benefits**, v. 55, n. 55, p. 23-52, 2015.

TIECHER, T. et al. Quantifying land use contributions to suspended sediment in a large cultivated catchment of Southern Brazil (Guaporé River, Rio Grande do Sul). **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 237, p. 95-108, 2017.

TILMAN, D. et al. Global food demand and the sustainable intensification of agriculture. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 108, n. 50, p. 20260-20264, 2011.

VERHULST, N. et al. Conservation agriculture, improving soil quality for sustainable production systems? **Advances in Soil Science: Food Security and Soil Quality**, v. CRC Press, p. 137-208, 2010.

WALLING, D. E. The evolution of sediment source fingerprinting investigations in fluvial systems. **Journal of Soils and Sediments**, v. 13, n. 10, p. 1658-1675, 2013.

CAPÍTULO 7

CONTAMINAÇÃO DA ÁGUA E DO SOLO POR RESÍDUOS UTILIZADOS NA AGRICULTURA

Tales Tiecher¹

Tadeu Luis Tiecher²

¹Professor do Departamento de Solos da Faculdade de Agronomia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Interdisciplinary Research Group on Environmental Biogeochemistry (IRGEB), Porto Alegre – RS

²Professor do Instituto Federal Farroupilha, Campus Alegrete, Alegrete – RS
E-mails: tales.tiecher@ufrgs.br, tadeu.t@hotmail.com

7.1 INTRODUÇÃO

O crescimento populacional tem aumentado a demanda mundial por alimentos que pode ser alcançada de duas formas: a) pelo aumento da área de produção agropecuária; e/ou b) pela intensificação dos atuais sistemas de produção para produzir mais alimentos e fibras por unidade de área. Embora a expansão agrícola, em muitos países ou regiões, já não seja mais possível, em algumas regiões do Brasil a expansão de área agrícola ainda pode ser alcançada. Contudo a diminuição de florestas e outros recursos naturais em detrimento dessa expansão tem causado questionamentos e debates, nas mais diversas esferas da sociedade, pois pode gerar impactos ambientais irreversíveis.

A conversão de áreas naturais em sistemas agrícolas necessita de grande quantidade de fertilizantes e corretivos, especialmente, em solos com baixa fertilidade natural, como a maioria dos solos tropicais e subtropicais fortemente intemperizados. Além disso, a intensificação dos sistemas de produção agropecuários também aumenta a exportação de nutrientes do solo e a necessidade de insumos externos para, pelo menos, repor os nutrientes exportados via grãos, carne ou fibras.

Nas próximas décadas, aliada às restrições das duas vias possíveis de aumento da produção de alimentos, está a previsão da escassez iminente das reservas minerais de alguns nutrientes essenciais para as plantas, especialmente o fósforo (ASHLEY; CORDELL; MAVINIC, 2011; CORDELL; DRANGERT; WHITE, 2009), o que tem forçado a busca de fontes alternativas de fertilizantes. Nesse cenário, o uso de resíduos na agricultura tem recebido atenção especial e maior, nas últimas décadas, pois é uma alternativa interessante visando à reutilização de nutrientes em sistemas de produção de alimentos mais sustentáveis.

Os resíduos, como os dejetos animais (bovinos, suínos e aves), resíduos urbanos (composto de lixo e lodos de estação de tratamento de esgoto) e resíduos industriais, possuem composição e características químicas que podem ser interessantes do ponto de vista agrônomo, pois possuem potencial fertilizante (fonte de nutrientes) e, em alguns casos, potencial corretivo da acidez do solo. Todavia o solo, muitas vezes, tem sido utilizado como simples meio de descarte desses resíduos. Além disso, o uso indiscriminado desses resíduos, sem estimar a sua composição e as características físico-químicas do solo, pode resultar em contaminação do solo e da água com nutrientes, metais pesados, patógenos e outros

compostos orgânicos. Dada a importância deste tópico, neste capítulo, serão apresentadas as propriedades do solo que afetam a dinâmica de contaminantes, presentes em resíduos utilizados na agricultura, os principais contaminantes presentes nestes resíduos e alguns aspectos relacionados com a fitorremediação e recuperação de áreas contaminadas, com o intuito de preservar a qualidade da água e do solo.

7.2 PROPRIEDADES DO SOLO QUE AFETAM A DINÂMICA DE CONTAMINANTES PRESENTES EM RESÍDUOS UTILIZADOS NA AGRICULTURA

A fase sólida mineral e orgânica do solo controla a disponibilidade, mobilidade e o efeito tóxico de contaminantes na solução do solo pelo mecanismo de adsorção/dessorção (Figura 7.1). Os solos mais argilosos possuem maior quantidade de sítios reativos capazes de adsorver elementos químicos e/ou moléculas (solutos). A natureza dos minerais presentes na fração argila também condiciona a capacidade do solo em adsorver os solutos que são adicionados via resíduos. Os argilominerais do tipo 2:1 (esmectita e vermiculita) possuem alta capacidade de troca de cátions e geram carga negativa independentemente da condição de pH do solo. Este tipo de argilomineral também pode reter moléculas orgânicas (pesticidas, medicamentos), no seu espaço entre-camadas, além de contribuir para a adsorção de

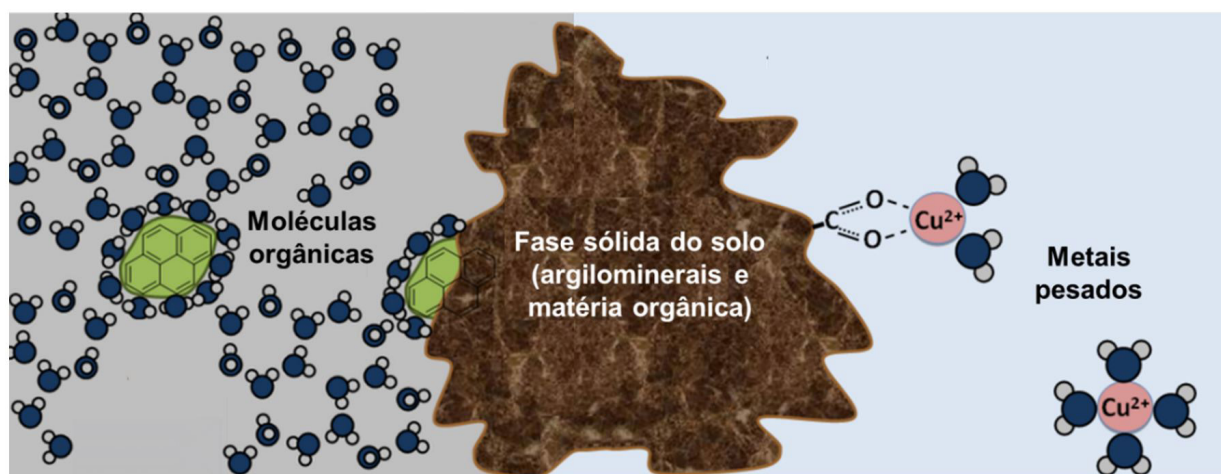


FIGURA 7.1 Representação da adsorção de moléculas orgânicas e metais pesados pela fase sólida do solo.

grandes quantidades de metais pesados e cátions básicos (Ca, Mg, K e Na). Os óxidos de ferro e alumínio possuem ponto de carga zero mais alto, gerando cargas predominantemente positivas em condições de baixo pH (<8,0). A goethita e a hematita possuem certa seletividade na adsorção de metais, seguindo a seguinte ordem de preferência: Cu>Pb>Cd>Co>Ni>Mn (SPARKS, 2003). Já a caulinita, embora presente em grande quantidade nos solos brasileiros, possui capacidade de troca de cátions muito baixa (cerca de 5,0 cmol_c kg⁻¹) e tem menor importância na dinâmica de contaminantes no solo.

Os solos com textura mais fina, ou seja, com maiores teores de argila promovem maior acúmulo de matéria orgânica do solo pela maior proteção físico-química da fração orgânica pela fração mineral. Por isso, solos arenosos possuem uma capacidade limitada de acumular carbono. A matéria orgânica, por sua vez, é um dos componentes do solo com maior densidade de cargas elétricas. Estima-se que a matéria orgânica contribua, em média, com 30-70% da capacidade de troca de cátions do solo (ESSINGTON, 2003). A partir de valores de pH acima de 3,0, os grupos funcionais oxigenados (carboxilas, enóis, fenóis) da matéria orgânica começam a deprotonar, gerando carga elétrica negativa. Nessas cargas, podem ser adsorvidos cátions e moléculas orgânicas, carregadas pelas atrações eletrostáticas, também conhecidos como complexos de esfera externa. A energia de ligação desses complexos é dependente das características dos grupos funcionais e do elemento em questão, notadamente, sua valência e raio iônico hidratado. Os complexos de esfera externa estão sujeitos a um equilíbrio estequiométrico rápido, em que há reversibilidade da reação.

A matéria orgânica do solo pode também reter moléculas orgânicas apolares neutras por atrações moleculares como a força de van der Waals, dipolo-dipolo ou dipolo-induzido. Além disso, pode complexar metais pesados, formando complexos mono, bi, tri, tetra, penta e hexadentadas (quelação), com ligações químicas com caráter covalente de alta energia. Esse tipo de ligação forma complexos estáveis, não solúveis e menos reversíveis, o que diminui o potencial tóxico e poluente desses elementos.

Portanto a composição da fase sólida do solo determina a capacidade de o solo receber determinado contaminante. É importante enfatizar que o solo possui capacidade finita na adsorção de solutos e, à medida que aumentamos a quantidade de resíduos adicionados, há uma diminuição na energia de ligação dos contaminantes com o solo, ou seja, aumenta

a sua biodisponibilidade e seu potencial efeito tóxico e contaminante. Para conhecer a capacidade máxima de retenção de contaminantes no solo, é comum realizar experimentos em laboratório, tais como as isotermas de adsorção. Já a biodisponibilidade e o potencial efeito tóxico dos contaminantes, presentes na água e no solo, são comumente avaliados, utilizando-se fracionamentos químicos sequenciais com diferentes extratores químicos.

A solução do solo constitui a sua fase líquida ou aquosa, cuja composição é influenciada por fluxos de matéria e energia com suas adjacências e pelo campo gravitacional da terra (SPOSITO, 2008). Não é uma entidade distinta, mas segue o contínuo de fases que exibem indistintas interfaces em nível molecular. Nessa solução ocorre a maior parte das reações químicas que controlam a biodisponibilidade de contaminantes de importância agrícola e ambiental, tais como hidratação-hidrólise, ácido-base, oxidação-redução e complexação. A solução do solo atua, ainda, como mediadora de reações que controlam a retenção de substâncias pela fase sólida do solo, como precipitação-dissolução, adsorção-dessorção e troca iônica. São essas as reações que determinam o comportamento de nutrientes e contaminantes na água e no solo em ambientes agrícolas.

Na solução do solo, há uma grande quantidade de cátions, ânions e moléculas orgânicas, sendo que as suas concentrações e atividades dependem de três principais propriedades físico-químicas que são a força iônica, o potencial redox e o pH (concentração de H^+). Além de ter efeito direto na forma em que o elemento ou molécula se encontra na solução do solo, o pH também modifica a superfície sólida do solo e determina a reatividade de seus grupos funcionais. Com isso, pode-se aumentar ou diminuir as cargas elétricas positivas e negativas presentes, em componentes com cargas pH dependentes, tais como óxidos, bordas de argilominerais e matéria orgânica. Os óxidos de ferro, por exemplo, apresentam carga elétrica líquida positiva, em condições de $pH < 8-9$, enquanto no $pH > 8-9$ possuem carga elétrica líquida negativa (Equação 1).



ou seja, a mudança de pH pode favorecer ou desfavorecer a adsorção de determinado contaminante, de acordo com a sua natureza iônica (catiônica ou aniônica) e de acordo com o grupo funcional de superfície existente no solo.

7.3 CONTAMINANTES PRESENTES NOS RESÍDUOS UTILIZADOS NA AGRICULTURA

7.3.1 Nutrientes

Os resíduos orgânicos possuem apreciáveis concentrações de alguns nutrientes essenciais ao desenvolvimento das plantas (N, P, K, Ca, Mg, S e micronutrientes). A concentração desses nutrientes varia muito, de acordo com o tipo de resíduo, sendo que o mesmo tipo de resíduo pode também apresentar grande variação na concentração de nutrientes (Figura 7.2a, b, c). Por isso, é necessária uma análise química confiável do resíduo, antes de sua utilização no solo ou utilizar algum parâmetro, para estimar a concentração de nutrientes, como é o caso da utilização da densidade, para estimar a concentração de nitrogênio, fósforo e potássio, em dejetos líquidos de suínos, ou o número de lotes para estimar a concentração desses nutrientes na cama de aviário (CQFS-RS/SC, 2016).

Um dos principais limitantes da utilização de resíduos como fonte de nutriente é a falta de informação sobre a quantidade exata de nutrientes neles contidos. Mesmo conhecendo a concentração exata em determinado resíduo, dificilmente a quantidade de nutrientes nele presente atenderá a demanda do solo e da cultura cultivada. Por isso, são considerados fertilizantes “desequilibrados” (Figura 7.2d), sendo comum observar o enriquecimento desnecessário de alguns nutrientes no solo, quando a aplicação de resíduos é feita de forma indiscriminada, ao longo de vários anos, visando suprir aquele nutriente com menor concentração no resíduo. Para evitar possíveis contaminações, faz-se necessário utilizar os resíduos combinados com fertilizantes minerais concentrados, em que a dose mínima de resíduo utilizada é calculada, para satisfazer a necessidade de um dos macronutrientes e, logo após, a complementação dos demais macronutrientes é realizada com alguma fonte mineral.

Elementos como cálcio, potássio e enxofre dificilmente geram risco de contaminação da água e do solo. Mas a adição excessiva de determinado cátion básico pode promover desbalanço nutricional de outros, em virtude da competição pelos sítios de troca no solo e/ou pela inibição competitiva na absorção de cátions pelas plantas. Por outro lado, a adição de fósforo e nitrogênio em excesso gera grande risco de contaminação das águas superficiais e subterrâneas. Ambos os elementos têm potencial de eutrofizar corpos d’água, mas o seu caminho até os recursos hídricos difere sobremaneira.

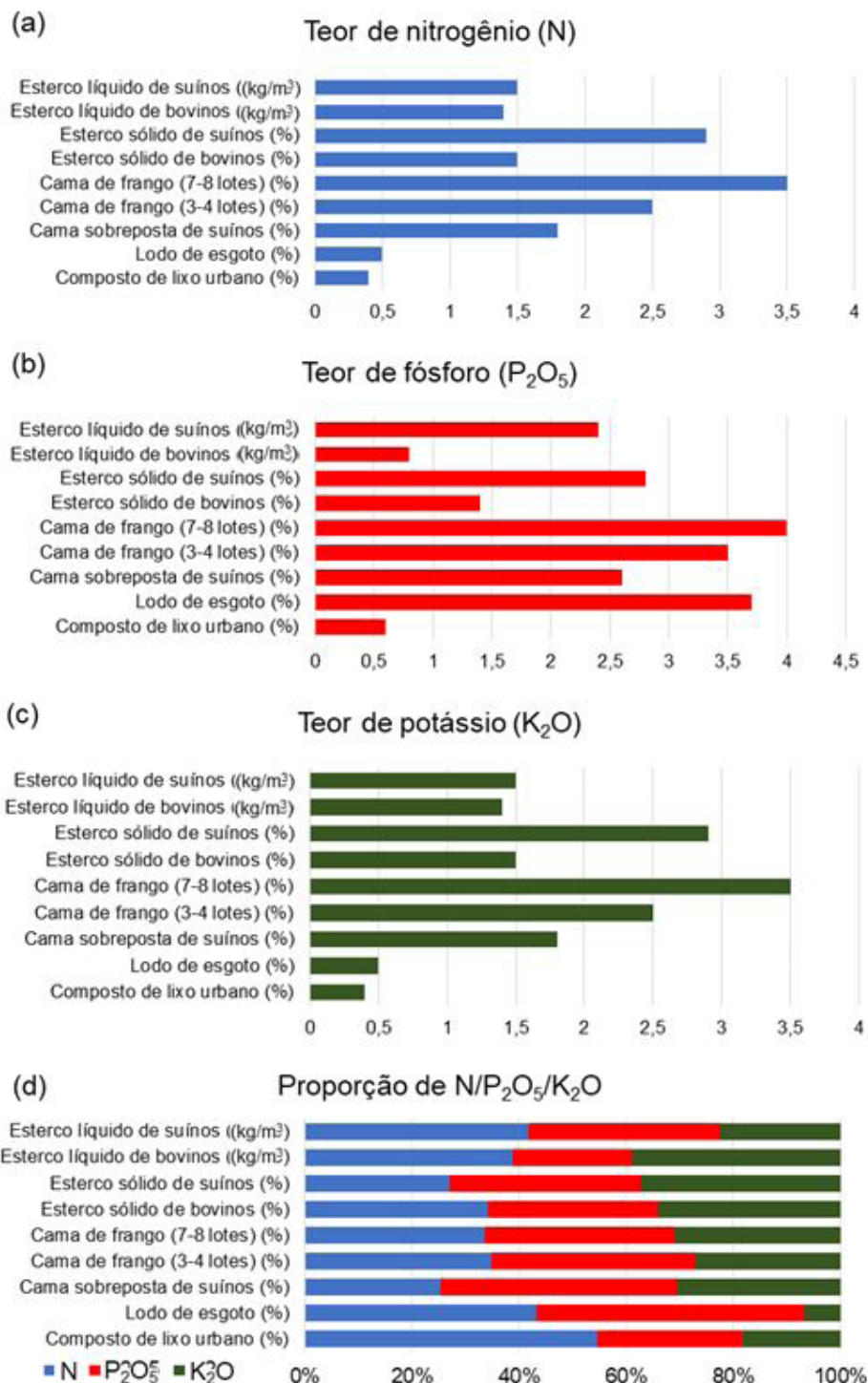


FIGURA 7.2 Teor médio de nitrogênio (N) (a), fósforo (P) (b), potássio (K) (c) e proporção de N/P/K (d) em diferentes resíduos orgânicos utilizados na agricultura. Fonte: dados obtidos em (CQFS-RS/SC, 2016).

No solo, a principal forma de fósforo é o ânion fosfato (H_2PO_4^-), que é fortemente retido pela fração mineral do solo, especialmente, pelos óxidos de ferro (FINK et al., 2016). Por isso, a sua principal via de transporte até os corpos d'água é pelo escoamento superficial e erosão do solo (Figura 7.3). As perdas de fósforo pelo escoamento superficial estão diretamente relacionadas ao volume de precipitações pluviais durante o ciclo das culturas e à quantidade de resíduos aplicados na superfície do solo (LOURENZI et al., 2015). Além disso, as perdas de fósforo e o potencial contaminante são maiores, nos primeiros eventos de chuva, que ocorrem após a aplicação dos resíduos sobre o solo.

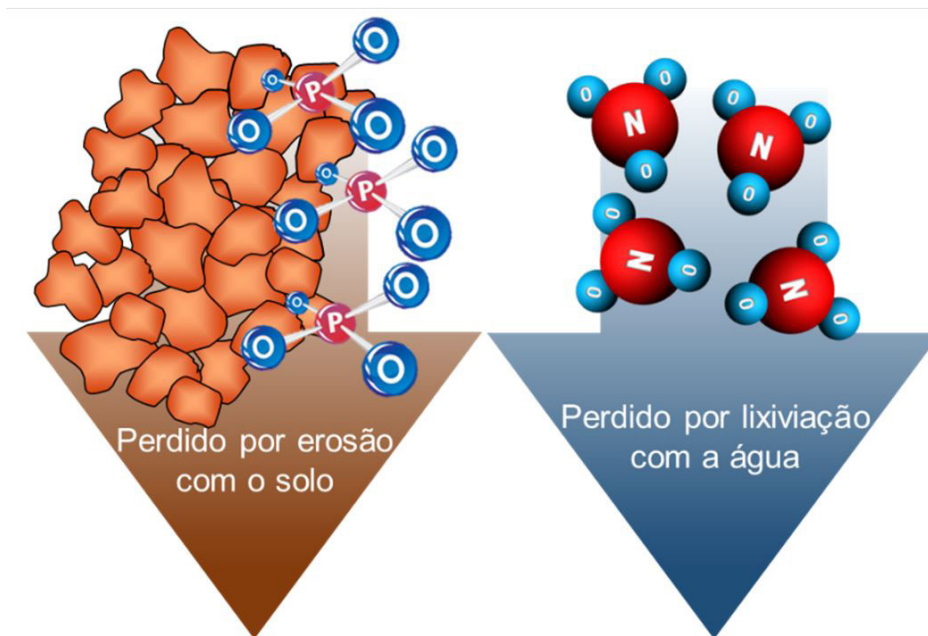


FIGURA 7.3 Formas preferenciais de transferência de fósforo e nitrogênio dos ambientes terrestres para os ambientes aquáticos.

Além das perdas por escoamento superficial, a aplicação sucessiva de resíduos pode levar à saturação dos sítios de sorção de fósforo do solo, promovendo a migração do elemento, ao longo do perfil do solo e ocasionar, inclusive, perdas por lixiviação em solos arenosos com baixa capacidade de adsorção de fósforo. Esse fato foi observado por Giroto et al. (2013) que constataram concentrações de até $3,52 \text{ mg L}^{-1}$ de fósforo solúvel lixiviado na profundidade de 60 cm em um Argissolo, após 18 aplicações de $80 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ de dejetos líquidos de suínos.

Esses mesmos autores observaram que, em todos os cultivos avaliados, ao longo de cinco anos agrícolas, ocorreram vários eventos de chuva com teores de fósforo na solução lixiviada superior a $0,15 \text{ mg L}^{-1}$, que é o limite máximo permitido para a água de classe três (água que pode ser utilizada para consumo humano após o tratamento), de acordo com a resolução 357 do CONAMA (2005). Demonstra-se que, mesmo o fósforo, que é retido fortemente pela matriz sólida do solo, pode apresentar alto potencial poluidor das águas subsuperficiais em certas circunstâncias.

No Sul do Brasil, recentemente, foi estabelecido um limite crítico de fósforo de fácil adoção com o intuito de monitorar e limitar os riscos de contaminação ambiental com fósforo. Esse limite foi proposto por Gatiboni et al. (2015) e é calculado utilizando o teor de argila do solo e o teor de fósforo extraído por Mehlich 1 (Equação 2).

$$\text{Teor crítico de fósforo (mg kg}^{-1}\text{)} = \text{Teor de argila (\%)} + 40 \quad \text{Equação 2}$$

À diferença do fósforo, o nitrogênio pode ser facilmente perdido por lixiviação e contaminar o lençol freático (Figura 7.3), pois o nitrato (NO_3^-), que é a forma de nitrogênio predominante em ambientes oxidados, é retido com baixa energia pelos coloides orgânicos e inorgânicos do solo (GIROTTTO et al., 2013). A transferência de nitrogênio por lixiviação é maior nas chuvas que ocorrem, logo após a aplicação de resíduos, ocorrendo uma drástica redução, de acordo com o distanciamento temporal da aplicação.

Além disso, a quantidade de nitrogênio transferida pela lixiviação também está diretamente associada à dose de resíduo aplicada e a seu conteúdo de nitrogênio. Em estudo com a aplicação de 20, 40 e $80 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ de dejetos líquidos de suínos, a perda acumulada de NO_3^- por lixiviação, ao longo de cinco anos de avaliação, foi de 23, 25 e 19 kg ha^{-1} , respectivamente (GIROTTTO et al., 2013), o que representa 3,4, 2,0 e 0,7% do total de nitrogênio aplicado, respectivamente. Embora a transferência de nitrogênio por escoamento superficial possa ser considerada pequena, em comparação com a quantidade total adicionada via resíduos, no mesmo período descrito acima, as quantidades de nitrogênio mineral perdidas, via escoamento superficial, foram de 16, 19 e 33 kg ha^{-1} , com a aplicação de 20, 40 e $80 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ de dejetos líquidos de suínos, respectivamente (CERETTA et al., 2010), tornando-as uma fonte expressiva de contaminação de corpos hídricos por nitrogênio.

7.3.2 Metais pesados

Os termos elementos/metais “pesados”, “traços” ou “tóxicos” são comumente utilizados para se referir a um genérico grupo de elementos com potencial risco à saúde, como As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb e Zn. Apesar de alguns deles serem essenciais ao desenvolvimento de plantas e animais (p.ex. Cu e Zn), seu acúmulo em excesso pode contaminar a água e o solo, podendo causar toxidez severa às plantas cultivadas. Essas nomenclaturas são utilizadas por vezes como sinônimos, porém, em geral, com diferentes intuitos, sobretudo, quando se trata do comparativo com valores naturais ou em ambientes impactados pelas atividades antrópicas (ANDRADE; TIECHER, 2016).

Metal pesado é definido como elemento com massa atômica maior que $23 \approx 40$ e/ou massa específica maior que $3,5 \approx 7 \text{ g cm}^{-3}$, mas essa definição não abrange todo o grupo de metais e semimetais (metaloídes) em questão. **Elemento traço** é mais utilizado aos elementos que ocorrem naturalmente em quantidades menores que 0,01 ou 0,1% (correspondente a 100 ou 1000 mg kg^{-1}). Contudo, com frequência, elementos como o cobre e o zinco, por exemplo, podem ser encontrados naturalmente, em altas concentrações, como em alguns locais do estado do Rio Grande do Sul (RS), em solos desenvolvidos sobre o basalto, ou seja, não ocorrem em quantidades “traço”. Já os **metais tóxicos** referem-se à potencialidade de danos agudos ou crônicos desses elementos à biota do solo e às plantas, sendo estimada como variável, de acordo com sua biodisponibilidade no ambiente e, por isso, esse conceito abrange de maneira adequada a definição de contaminação ambiental (ANDRADE; TIECHER, 2016).

O cobre e o zinco são metais repetidas vezes encontrados em resíduos, como o dejetos líquido de suínos (Figura 7.4a, b), numa concentração média de 1,1 e $1,4 \text{ kg m}^{-3}$, respectivamente (GIROTTTO et al., 2010). Essa ocorrência acontece, porque, com o intuito de garantir a absorção adequada desses micronutrientes, esses elementos são adicionados em altas doses às rações fornecidas aos animais. Contudo a maior parte do cobre e o zinco ingeridos não são absorvidos e são excretados nas fezes dos animais. Como é produzido um grande volume de dejetos, nas propriedades suinícolas, as quais possuem pequenas áreas para a sua disposição, normalmente, são realizadas aplicações sucessivas de dejetos na mesma área, ocasionando o incremento dos teores desses metais no solo.

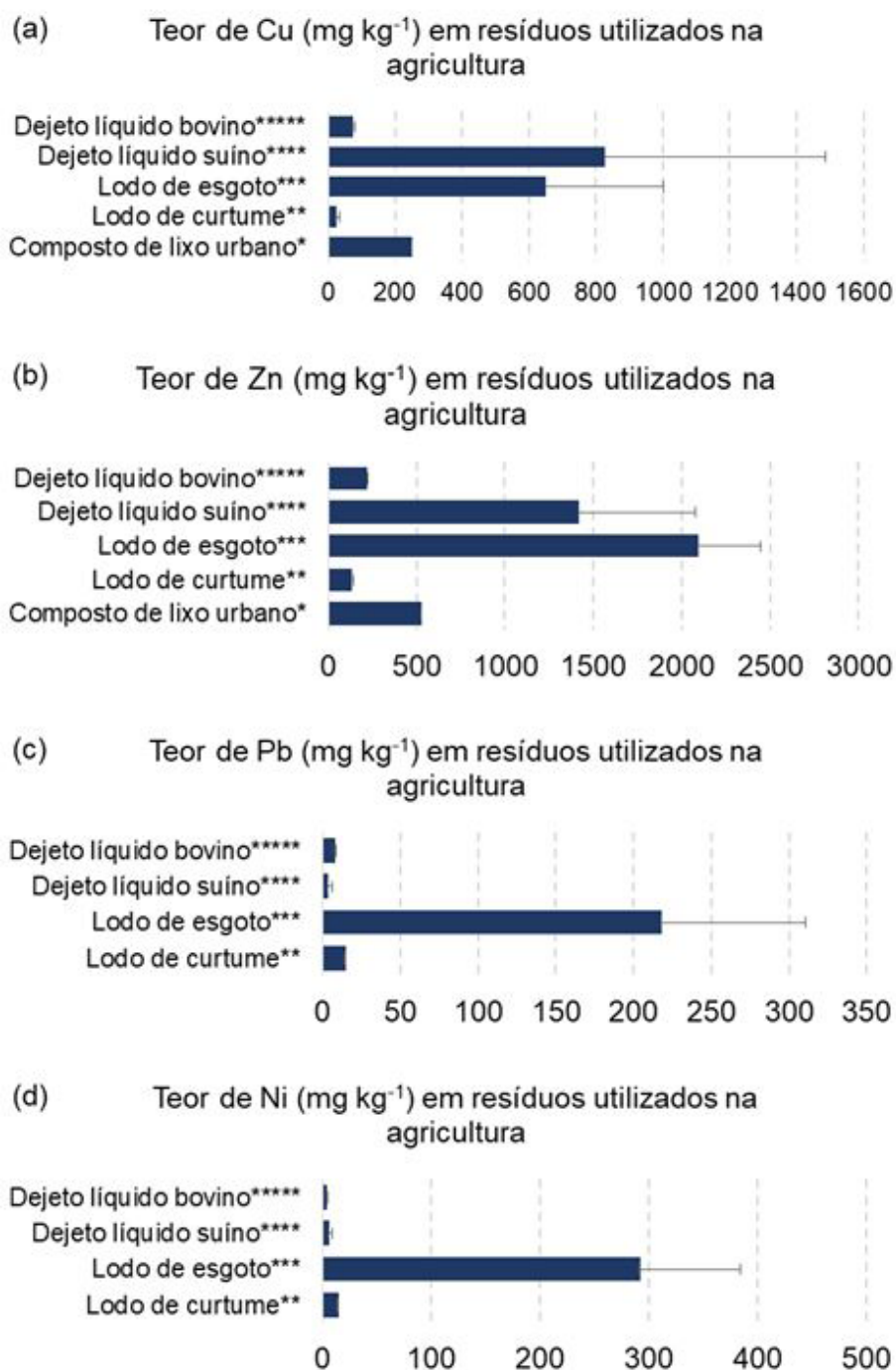


FIGURA 7.4 Teor médio de cobre (Cu) (a), zinco (Zn) (b), chumbo (Pb) (c) e níquel (Ni) (d) em resíduos orgânicos utilizados na agricultura. Fonte: *(STROJAKI et al., 2013); **(KRAY et al., 2008); ***(OLIVEIRA; MATTIAZZO, 2001; RANGEL et al., 2006); *****(FAVERSANI, 2015; GIROTTO et al., 2010; MATTIAS, 2006); *****(FAVERSANI, 2015).

Embora em menores proporções, quando comparado ao dejetos líquido de suínos, o dejetos líquido de bovinos também pode ocasionar o incremento nos teores de cobre e o zinco do solo após sucessivas aplicações (FAVERSANI, 2015). Por outro lado, para os demais metais pesados avaliados neste estudo (As, Cd, Cr, Ni e Pb), os teores foram idênticos aos do solo sem aplicação de resíduos.

Além do cobre e do zinco, os dejetos de animais podem conter ainda outros metais pesados, como o manganês, chumbo e níquel (MATTIAS, 2006), os quais, da mesma forma, podem se acumular e contaminar a água e o solo até níveis tóxicos às plantas e animais. Uma breve compilação das concentrações desses metais pesados, em diferentes tipos de resíduos, está apresentada na Figura 7.4.

Dentre os resíduos listados como fonte de nutrientes neste capítulo, o lodo de esgoto é o único que possui uma normatização mais contundente, tendo os seus limites críticos definidos pela Resolução 375 do CONAMA (2006). Essa resolução estabelece critérios e procedimentos, para o uso em áreas agrícolas de lodo de esgoto gerado em estação de tratamento, visando benefícios à agricultura e evitando riscos à saúde pública e ao ambiente.

7.3.3 Compostos orgânicos

O uso de compostos orgânicos com fins medicinais, em especial, hormônios e antibióticos, tem aumentado significativamente, nos últimos anos, tanto em animais quanto em humanos. Mesmo quando esses compostos são utilizados, em pequenas doses, parte dessas moléculas e/ou seus metabólitos, de forma obrigatória, serão perdidos com urina ou fezes de humanos e animais, pois é bioquimicamente impossível metabolizar por completo esses compostos que podem causar impactos negativos aos organismos terrestres e aquáticos (BASTOS et al., 2017).

A contaminação da água com medicamentos pode ocorrer de forma direta, quando adicionados na água (aquicultura), ou de forma indireta, pelas fezes e urina de animais em criações ao ar livre ou pela aplicação de resíduos no solo como fertilizante (dejetos animais, compostagens, lodo de estação de tratamento de esgoto, entre outros). Dessa forma, esses compostos podem ser introduzidos na cadeia trófica e serem bioacumulados nos organismos,

podendo desencadear diversos distúrbios à fauna do solo, bem como a animais e seres humanos.

7.3.4 Patógenos

Os patógenos presentes na urina e fezes de humanos e animais possuem o potencial de contaminar a água, o solo e o ar. Em relação ao consumo humano, os principais patógenos que podem afetar a qualidade da água são bactérias, protozoários e vírus. Diversas categorias de bactérias têm sido utilizadas como indicadores da qualidade da água, tais como coliformes totais, coliformes fecais, enterococos total e *Escherichia coli* (CAPOANE et al., 2017). A *Escherichia coli* tem sido mais utilizada como indicador da contaminação de origem fecal na água. Embora a maioria das cepas de *Escherichia coli* sejam inofensivas e vivam no intestino de humanos e animais saudáveis, algumas estirpes produzem toxinas potentes que podem causar doenças graves e até a morte.

Por isso, quando os resíduos são aplicados no solo como fertilizante, sem tratamento adequado, aumenta substancialmente o risco de contaminação da água, solo e inclusive das plantas. Além disso, alguns agentes patogênicos têm capacidade de sobrevivência grande, variando de dias, meses e até anos, sendo necessário um correto tratamento via compostagem ou estabilização por fermentação antes de sua aplicação no solo.

7.4 SUBSTÂNCIAS AMENIZANTES DE CONTAMINANTES DO SOLO

Em áreas que apresentam algum tipo de contaminação do solo, a revegetação deve ser precedida do uso de amenizantes que diminuam a biodisponibilidade dos contaminantes, especialmente, quando se trata de metais pesados. Amenizantes são materiais adsorventes e imobilizadores de metais pesados no solo, empregados para diminuir a toxidez e facilitar a revegetação de áreas contaminadas, com destaque aos corretivos de acidez e materiais orgânicos (DOS SANTOS; RODELLA, 2007).

Uma forma eficiente de reduzir a absorção de metais pesados pelas plantas e microrganismos em solos com elevada acidez é a aplicação de calcário para a elevação do pH do solo. Aumenta a deprotonação dos grupos funcionais dos argilominerais e óxidos, desenvolvendo a adsorção de metais, conforme discutido anteriormente neste capítulo.

Além disso, pode reduzir a solubilidade pela precipitação com carbonatos e fosfatos e aumentar a porcentagem das espécies químicas de metais complexadas com compostos orgânicos dissolvidos e hidroxilas, reduzindo as espécies livres na solução do solo, as quais são preferencialmente absorvidas pelas plantas (DE CONTI et al., 2016).

Da mesma forma, a adição de resíduos orgânicos estabilizados, como compostos orgânicos, tende a aumentar a capacidade de sorção de metais e outros compostos orgânicos na fase sólida do solo, reduzindo a biodisponibilidade e o potencial fitotóxico (DOS SANTOS; RODELLA, 2007). Isso, porque esses compostos possuem baixo ponto de carga zero, ou seja, possuem cargas negativas mesmo em pH baixo e um grande número de grupos funcionais de superfície que geram uma alta capacidade de troca de cátions e grande capacidade de reter contaminantes.

A aplicação de fósforo no solo, via adubação, também pode contribuir para a redução da contaminação por metais pesados a partir da formação de ligações fosfato-metal insolúveis no solo. Além disso, o ânion fosfato pode ser adsorvido às superfícies de partículas reativas do solo, como os óxidos, aumentando o número de cargas negativas (PÉREZ-NOVO et al., 2009) e permitindo a formação de complexos ternários do tipo óxido-fosfato-metal, o que diminui a disponibilidade do metal na solução do solo. O fósforo pode ainda formar compostos insolúveis com metais, nas raízes das plantas, promovendo a retenção de cobre nesses órgãos, diminuindo o transporte de metais até a parte aérea, em que os efeitos tóxicos seriam mais agudos.

Outra estratégia que tem sido difundida, para reduzir a toxidez de metais pesados às plantas, é o emprego de fungos micorrízicos arbusculares (discutido com maior ênfase no Capítulo 4), que podem estabelecer simbiose radicular com as plantas. Desta forma, os fungos micorrízicos arbusculares podem exercer efeito fitoprotetor, em solos com altos teores de metais, a partir de mecanismos como a exclusão da absorção, por meio da precipitação ou quelação dos elementos na rizosfera, além de diminuir a absorção de metais, pela retenção e pela imobilização de metais pesados nas estruturas fúngicas (CABRAL et al., 2015). Contudo esses efeitos positivos dos fungos micorrízicos arbusculares na fitoproteção são diferenciados entre os isolados fúngicos, o metal pesado e a espécie vegetal (MEYER et al., 2016). Há, ainda, algumas dificuldades na viabilidade da adoção da inoculação de plantas com fungos micorrízicos arbusculares em maiores escalas.

7.5 FITORREMEDIAÇÃO DE SOLOS CONTAMINADOS

Em solos contaminados com metais pesados, além de suspender as aplicações de resíduos que contenham metais em sua composição, é necessário desenvolver estratégias de remediação desses solos, mantendo-os férteis e produtivos. Isso contribui à redução do risco de contaminação ambiental pela transferência desses elementos a outros ambientes, além de ser uma forma de reduzir o risco de contaminação de animais e das pessoas que habitam as regiões próximas ao local contaminado. Dentre as estratégias de remediação dos solos contaminados, as principais incluem o uso de plantas para fitorremediação dos solos contaminados com metais pesados. Neste sentido, a utilização de plantas, para a cobertura do solo, possui grande importância na conservação do solo e ciclagem de nutrientes. Além disso, essas plantas também podem reduzir os efeitos fitotóxicos do excesso de metais no solo, por absorção e pelo acúmulo no tecido e, também, pela exsudação de íons e compostos orgânicos, como aminoácidos e ácidos orgânicos de baixo peso molecular, que influenciam no valor de pH, solubilidade e distribuição das espécies solúveis (LI et al., 2013).

A fitorremediação é o processo em que as plantas e os microrganismos da rizosfera sequestram, degradam ou imobilizam poluentes do solo (PILON-SMITS, 2005). Dentre as técnicas de fitorremediação, a fitoextração baseia-se no uso de plantas, para a remoção de metais dos solos, mediante a absorção pelas raízes, transporte e concentração na parte aérea. Para isso, é essencial que o solo não apresente altos níveis de contaminação e que a planta seja tolerante ao metal, tenha um sistema radicular abundante, uma taxa de crescimento rápido, grande produção de biomassa e acúmulo de grandes quantidades do metal na parte aérea (MARQUES; RANGEL; CASTRO, 2009). Após o crescimento no campo, as plantas devem ser retiradas da área e destinadas a um aterro sanitário ou incineradas.

A fitoestabilização é outra técnica de fitorremediação, utilizada principalmente em solos com elevados níveis de contaminação. Nesses casos, o tempo necessário para a remediação seria muito longo e, então, com o intuito de diminuir o risco ambiental, as plantas são utilizadas, para estabilizar o metal no solo, proporcionando a redução da movimentação pela erosão e percolação, a exposição aos animais e a probabilidade de entrarem na cadeia alimentar (WONG, 2003).

7.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os solos apresentam diversas características físico-químicas que interferem diretamente no comportamento e na dinâmica dos nutrientes, elementos tóxicos e moléculas orgânicas com potencial contaminante. Por isso, apresentam diferentes capacidades para suportar o aporte de resíduos de origem animal ou oriundos de atividades industriais e urbanas. Tais resíduos, geralmente, são utilizados como fertilizantes para as plantas e são uma excelente estratégia ao reaproveitamento dos seus nutrientes, visando à sustentabilidade do sistema produtivo. Contudo a sua utilização necessita de parâmetros e indicações técnicas para o seu uso racional, sem a ocorrência de desequilíbrios nutricionais na água, no solo e nas plantas.

Como esses resíduos apresentam concentrações desequilibradas de nutrientes e, muitas vezes, elevadas concentrações de elementos tóxicos, há diversos relatos da ocorrência de contaminação da água e de solos que recebem sucessivas aplicações de resíduos com os mais variáveis tipos de contaminantes. Por isso e com o intuito de melhorar o potencial produtivo dessas áreas contaminadas, algumas medidas remediativas podem ser adotadas, como a aplicação de amenizantes no solo ou técnicas de fitorremediação, para reduzir a biodisponibilidade e os potenciais riscos de contaminação ambiental, especialmente, da água e do solo.

7.7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRADE, L. C. de; TIECHER, T. A terminologia dos elementos: pesados, traços ou tóxicos? Boletim Informativo do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo da UFRGS. **Anais...** 2016. Disponível em: <<http://www.faeq.com.br/boletim/bi997/encarte/encbi997pag02.htm>>. Acesso em: 8 de junho de 2019..

ASHLEY, K.; CORDELL, D.; MAVINIC, D. A brief history of phosphorus: From the philosopher's stone to nutrient recovery and reuse. **Chemosphere**, v. 84, n. 6, p. 737-746, 2011.

BASTOS, M. C. et al. Contaminação do solo e da água com medicamentos veterinários. In: TIECHER, T. (Org.). **Manejo e conservação do solo e da água em pequenas propriedades rurais no sul do Brasil**: Impacto das atividades agropecuárias na contaminação do solo e da água. Frederico Westphalen (RS): URI – Frederico Westph, 2017. 181p.

CABRAL, L. et al. Arbuscular mycorrhizal fungi in phytoremediation of contaminated areas by trace elements: mechanisms and major benefits of their applications. **World Journal of Microbiology and Biotechnology**, v. 31, n. 11, p. 1655-1664, 2015.

CAPOANE, V. et al. Impacto da atividade de suinocultura intensiva na qualidade da água de uma bacia hidrográfica do Médio Alto Uruguai. In: TIECHER, T. (Org.). **Manejo e conservação do solo e da água em pequenas propriedades rurais no sul do Brasil: Impacto das atividades agropecuárias na contaminação do solo e da água**. Frederico Westphalen (RS): URI – Frederico Westph, 2017. 181p.

CERETTA, C. A. et al. Nutrient transfer by runoff under no tillage in a soil treated with successive applications of pig slurry. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 139, n. 4, p. 689-699, 2010.

CONAMA. **Resolução No 357 de 17 de Março de 2005**. Brasil Ministério do Meio Ambiente, 2005. Disponível em: <<http://acguasana.com.br/legislacao/resolucao-357-conama.pdf>>. Acesso em: 08/06/2019.

CONAMA. **Resolução nº 375, de 29 de agosto de 2006**. Brasil Ministério do Meio Ambiente, 2006. <http://www2.mma.gov.br/port/conama/res/res06/res37506.pdf> Acesso em 08/06/2019.

COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO – CQFS; NÚCLEO REGIONAL SUL - RS; SOCIEDADE BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO - SC. **Manual de calagem e adubação para os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina. (Liming and fertilizing manual for Rio Grande do Sul and Santa Catarina States)**. Frederico Westphalen, Núcleo Regional Sul da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. 404p.

CORDELL, D.; DRANGERT, J. O.; WHITE, S. The story of phosphorus: Global food security and food for thought. **Global Environmental Change**, v. 19, n. 2, p. 292–305, 2009.

DE CONTI, L. et al. Soil solution concentrations and chemical species of copper and zinc in a soil with a history of pig slurry application and plant cultivation. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 216, p. 374-386, 2016.

DOS SANTOS, G. C. G.; RODELLA, A. A. Efeito da adição de fontes de matéria orgânica como amenizantes do efeito tóxico de B, Zn, Cu, Mn e Pb no cultivo de Brassica juncea. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, Viçosa, v. 31, n. 4, p. 793-804, 2007.

ESSINGTON, M. E. **Soil and water chemistry: An integrative approach**. Boca Raton, Flórida: CRC Press, 2003. 534p.

FAVERSANI, J. C. **Metais pesados em solo e plantas em área com histórico de aplicações de fontes orgânicas e mineral de nutrientes**. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Solos), Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2015, 37p.

FINK, J. R. et al. Iron oxides and organic matter on soil phosphorus availability. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 40, n. 4, p. 369-379, 2016.

GATIBONI, L. C. et al. Soil phosphorus thresholds in evaluating risk of environmental transfer to surface waters in Santa Catarina, Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 39, n. 4, p. 1225-1234, 2015.

GIROTTO, E. et al. Acúmulo e formas de cobre e zinco no solo após aplicações sucessivas de dejetos líquidos de suínos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 34, n. 3, p. 955-965, 2010.

GIROTTO, E. et al. Nutrient transfers by leaching in a no-tillage system through soil treated with repeated pig slurry applications. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 95, n. 1, p. 115-131, 2013.

KRAY, C. H. et al. Tannery and coal mining waste disposal on soil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. spe, p. 2877-2882, 2008.

LI, T. et al. Complexation with dissolved organic matter and mobility control of heavy metals in the rhizosphere of hyperaccumulator *Sedum alfredii*. **Environmental Pollution**, v. 182, p. 248-255, 2013.

LOURENZI, C. R. et al. Forms of phosphorus transfer in runoff under no-tillage in a soil treated with successive swine effluents applications. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 187, n. 4, p. 209-225, 2015.

MARQUES, A. P. G. C.; RANGEL, A. O. S. S.; CASTRO, P. M. L. Remediation of Heavy Metal Contaminated Soils: Phytoremediation as a Potentially Promising Clean-Up Technology. **Critical Reviews in Environmental Science and Technology**, v. 39, n. 8, p. 622-654, 2009.

MATTIAS, J. L. **Metais pesados em solos sob aplicação de dejetos líquidos de suínos em duas microbacias hidrográficas de Santa Catarina**. Tese (Doutorado em Ciência do Solo), Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2006. 164p.

MEYER, S. T. et al. Heavy-metal-contaminated industrial soil: Uptake assessment in native plant species from Brazilian Cerrado. **International Journal of Phytoremediation**, v. 18, n. 8, p. 832-838, 2016.

OLIVEIRA, F. C.; MATTIAZZO, M. E. Heavy metals in an Oxisol treated with sewage. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 58, n. 3, p. 581-593, 2001.

PÉREZ-NOVO, C. et al. The effect of phosphate on the sorption of copper by acid soils. **Geoderma**, Amsterdam v. 150, n. 1-2, p. 166-170, 2009.

PILON-SMITS, E. Phytoremediation. **Annual Review of Plant Biology**, v. 56, n. 1, p. 15-39, 2005.

RANGEL, O. J. P. et al. Efeito de aplicações de lodos de esgoto sobre os teores de metais pesados em folhas e grãos de milho. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, Viçosa, v. 30, n. 3, p. 583-594, 2006.

SPARKS, D. L. **Environmental Soil Chemistry**. San Diego, California: Elsevier, Academic Press, 2003. 352p.

SPOSITO, G. **The chemistry of soils**. Oxford University Press, Inc, New York, 2008. 342p.

STROJAKI, T. V. et al. Atributos químicos do solo e produtividade de girassol e milho em função da aplicação de composto de lixo urbano. **Pesquisa Agropecuaria Tropical**, Goiânia, v. 43, n. 3, p. 278-285, 2013.

WONG, M. H. Ecological restoration of mine degraded soils, with emphasis on metal contaminated soils. **Chemosphere**, Oxford, v. 50, n. 6, p. 775-780, 2003.

CAPÍTULO 8

SISTEMAS INTEGRADOS DE PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA: IMPACTOS NA ÁGUA E NO SOLO

Edicarlos Damacena de Souza¹

Rafael Loverde Oliveira²

Leandro Pereira Pacheco¹

¹Professores do Instituto de Ciências Agrárias e Tecnológicas da Universidade Federal de Rondonópolis (UFR), Rondonópolis - MT

²Mestrando em Gestão e Tecnologia Ambiental pela Universidade Federal de Rondonópolis (UFR), Rondonópolis - MT

E-mails: edicarlos@ufr.edu.br, leandropacheco@gmail.com, rafa-loverde@hotmail.com

8.1 INTRODUÇÃO

O modelo de agricultura contemporâneo e, em menor escala de pecuária, tem sido baseado na especialização de sistemas de produção com crescente uso de insumos agrícolas. Desta forma, observa-se que as práticas agropecuárias vêm se desconectando da natureza, tornando-se atividades baseadas em tecnologias de insumos e não de processos (CARVALHO, 2018). Moraes et al. (2018) destacam resultados adversos desse processo de especialização que têm sido relatados com frequência, por meio de impactos ambientais, causados pela diminuição na diversificação dos sistemas de produção vigentes.

Os Sistemas Integrados de Produção Agropecuária (SIPA) apresentam potencialidades, para mitigar esses efeitos, o que, segundo a FAO (2010), é uma prática que pode auxiliar na redução dos impactos causados pelas atividades agropecuárias. Nessa linha, Moraes et al. (2018) citam que os SIPA estão sendo difundidos, em um contexto, em que a pauta principal da produção de alimentos seguros se baseia na sustentabilidade dos sistemas produtivos agrícolas.

Assim, os SIPA estão reassumindo sua importância, pois têm sido reconhecidos como alternativa aos atuais sistemas intensivos e pouco sustentáveis de produção agrícola. Entre as principais preocupações ambientais acerca da agricultura moderna estão as perdas na diversidade, a poluição do ambiente por nutrientes e resíduos de defensivos agrícolas, bem como a fragmentação de habitats. Por outro lado, os SIPA têm resultado em ganhos ambientais e econômicos, uma vez que a agricultura conservacionista é potencializada pela diversidade dos sistemas integrados, na qual emergem novas rotas de ciclagem de nutrientes e processos ecossistêmicos.

Os SIPA são associações entre plantas, animais e/ou o componente arbóreo na mesma área ou em áreas distintas, de forma concomitante ou sequencial (MORAES et al., 2018) e se caracterizam por serem planejados para explorar sinergismo e propriedades emergentes, em razão da interação entre os componentes solo-planta-animal-atmosfera. Entretanto, para que esses sistemas tenham seus efeitos benéficos potencializados, surge a necessidade de que sejam conduzidos sob bases conservacionistas com a adoção do Sistema Plantio Direto (SPD), das boas práticas de manejo, com uso eficiente de insumos e, principalmente, com intensidades adequadas de pastejo (ANGHINONI et al., 2013).

As propriedades que emergem em SIPA são resultados, sobretudo, da maior eficiência e diversificação dos SIPA. A eficiência nas propriedades rurais pode ser traduzida pelo menor uso de insumos por unidade de produto produzido (melhor aproveitamento de insumos e nutrientes), maior aproveitamento de mão de obra e máquinas e implementos pela maior liquidez financeira e, principalmente, pelo menor risco nas operações agrícolas. Por outro lado, a diversificação ocorre, em função da maior possibilidade de rotações de culturas com uma fase pastagem eficiente, promovendo a ciclagem de nutrientes de forma mais efetiva, além de diminuir a incidência de pragas e plantas invasoras. A interação desses componentes resulta em um sinergismo com resultados econômicos e ambientais ampliados, maior produção de alimentos seguros e sustentáveis, os quais não seriam possíveis sem a interação entre os componentes individuais presentes no SIPA.

Desta forma, pode-se inferir que os SIPA são sistemas mais resilientes que sistemas puros de produção (ANGHINONI et al., 2013) e têm maior capacidade de prover propriedades emergentes ou ampliar as já existentes. Esse fato resulta do melhor aproveitamento da água nesses sistemas o que favorece diretamente melhorias em atributos de solo. Assim, o presente capítulo abordará a dinâmica da água em SIPA e, por conseguinte, as melhorias na qualidade do solo nesses sistemas.

8.2 CONTRIBUIÇÃO DO SIPA PARA A OTIMIZAÇÃO DO USO DA ÁGUA E SOLO

O SIPA é um sistema de manejo que visa à melhoria dos atributos relacionados à qualidade do solo. Islam e Weil (2000) consideram três grupos de atributos nesta avaliação: o primeiro grupo está relacionado com os atributos que apresentam oscilações, em curto espaço de tempo (dias a semanas), denominados efêmeros, que são aqueles dentre os quais podem ser citados temperatura, pH, conteúdo de água, respiração do solo (raízes e organismos) e teores de nutrientes; em outro extremo, são classificados atributos denominados permanentes, propriedades do solo relativamente imutáveis, como inclinação, textura e mineralogia, os quais são de pouco valor para indicar o impacto do manejo sobre a qualidade do solo. Entre esses extremos de estabilidade, encontram-se várias propriedades-chave do solo que são afetadas pelas práticas de manejo, em questão de anos e podem ter uma influência crítica sobre como

o solo desempenha suas funções ecossistêmicas, atributos denominados intermediários, os quais são alterados com o manejo. Após alguns anos, incluem-se conteúdo de matéria orgânica e biomassa microbiana, resistência à penetração do solo e atributos relacionados à água do solo.

Serão apresentados alguns atributos relacionados à água e ao solo, de forma a se ter maior compreensão de como os SIPA influenciam esses atributos, em relação a sistemas puros de produção.

8.2.1 Relações hídricas em SIPA

O uso de SIPA, quando bem planejado e executado, pode reduzir a vulnerabilidade e aumentar a resiliência do solo às variações climáticas, tais como períodos de estiagem, durante a safra (veranico), comuns nas regiões meridionais do Brasil. Desta forma, entender a dinâmica de atributos relacionados à água do solo são fundamentais para o manejo adequado dos SIPA.

A infiltração da água no solo é afetada por grande número de fatores relacionados ao solo e ao modo que ele é manejado, dentre os quais, podem-se citar a porosidade, a massa específica e a condutividade hidráulica do solo. Beutler (2001) encontrou correlações significativas entre matéria orgânica e os atributos físicos do solo e a condutividade hidráulica do solo. As plantas de cobertura, rotação de culturas com diversidade de espécies e pastejo (características dos SIPA) proporcionam aporte diferenciado de resíduos vegetais de parte aérea e comportamento radicular, em quantidade e qualidade, o que propiciam a manutenção da matéria orgânica no solo, a qual está ligada, principalmente, à criação de poros biológicos de alta funcionalidade na aeração e infiltração de água no solo. Segundo Cubilla (2002), esses poros, normalmente, não representam 3% do volume do solo, implicando redução da massa específica somente na ordem de centésimos, muitas vezes, não detectados pelas metodologias convencionais de análise.

No SIPA têm sido observadas melhorias nos atributos físicos, químicos e biológicos do solo. A intensificação da utilização da área agrícola com cultivos realizados, durante todo o ano, em que a rotação de culturas permite a inclusão de diversidade de sistemas radiculares, além de resíduos vegetais com diferentes compostos recalcitrantes, contribui para alterações das taxas

de decomposição e na ciclagem de nutrientes (COSTA et al., 2015). Entretanto a possibilidade de haver compactação superficial do solo, em razão do pisoteio imposto pelos animais criados no SIPA, é a principal preocupação dos produtores, uma vez que a compactação altera a estrutura do solo, contribuindo, principalmente, à diminuição dos macroporos e ao aumento da microporosidade, em consequência, à menor infiltração de água no solo.

Nessa linha, diversos estudos apontam que, na camada de 0-5 cm, o pisoteio animal tende a aumentar a massa específica na área sob SPD, em algumas situações (SILVA, 2000; TENFEN, 2014; COSTA, 2014), reduzindo assim a infiltração de água. Desta forma, em SIPA, o correto manejo do pasto é essencial, sendo necessário o dimensionamento adequado da pressão de pastejo, manutenção de palhada, pois está além de proteger o solo quando perdas hídricas também atuam na absorção das cargas aplicadas pelo pisoteio. Ademais, Balbinot (2009) sugere práticas que podem ser utilizadas com sucesso no SIPA, para reduzir a deformação plástica decorrente do pisoteio, tais como: semeadura direta da pastagem, uso de quantidade adequada de sementes forrageiras, retirada dos animais da área 20 a 30 dias antes da dessecação realizada, para o estabelecimento de culturas destinadas à produção vegetal e a retirada dos animais da área conduzida sob SIPA, em dias em que o solo possui umidade acima da capacidade de campo. O manejo correto do sistema é necessário, para manter a estrutura física com porosidade adequada, aumentar os teores de matéria orgânica e possibilitar o desenvolvimento radicular.

O pastejo intensivo promove menor retenção de água, nas camadas superficiais, pela baixa quantidade de resíduo remanescente sobre o solo, sendo necessária a utilização de pressões de pastejo adequada. Contudo Martins et al. (2018) enfatizam a necessidade de se avaliar as camadas mais profundas do solo, para o correto entendimento do fluxo hídrico em SIPA, que ocorre, pois o desenvolvimento das plantas, quando pastejadas, é modificado. Em decorrência do maior perfilhamento das raízes, obtém-se, assim, maior massa de raízes em profundidade no solo que, após a dessecação dessas plantas, mantém-se continuidade de poros. Esse fato favorece a ascensão hídrica das camadas mais profundas, para a superfície seca, por meio do processo de redistribuição hídrica, via refluxo que ocorre das raízes presentes em camadas de solo com baixa disponibilidade de água para as com menor disponibilidade (COSTA, 2014).

O intervalo hídrico ótimo (discutido nos Capítulos 2 e 3) é um indicador, baseado no conceito de faixa de teores de água no solo, na qual não há restrições ao crescimento das plantas, seja pela deficiência de oxigênio, pela deficiência de água no solo ou quando a resistência do solo inibe o crescimento radicular, sendo que estão intimamente relacionados com a massa específica. Em estudo realizado por Costa (2014), foi constatado que o pastejo em SIPA, apesar de aumentar a compactação das camadas superficiais do solo, por conseguinte, aumentando também a massa específica, não foi suficiente, para que se atingisse a densidade crítica do intervalo hídrico ótimo, quando em pastejo moderado. Além disso, o mesmo autor demonstrou que a umidade do solo, durante a safra de soja subsequente ao pastejo (Figura 8.1), apesar da compactação superficial pelo pisoteio, manteve-se sempre no intervalo hídrico ótimo, entre o ponto de murcha permanente e a capacidade de campo, com exceção do manejo com pastejo intenso, o qual comprometeu o volume de água no solo em todo o ciclo da soja.

Em estudo desenvolvido por Bonetti et al. (2019), foi constatado que o pastejo intenso reduz a matéria orgânica e a macroporosidade do solo e aumenta a sua massa específica, especialmente na camada superficial, enquanto a maior infiltração de água no solo, por depender diretamente da porosidade e da matéria orgânica, ocorreu em pastejo moderado e leve, indicando-o, assim, como de intensidades mais favoráveis à infiltração e retenção de água pelo solo. Tenfen (2014) demonstrou resultado semelhante, em que, apesar da menor infiltração de água no solo, o pastejo em SIPA apresentou um maior volume de água retida no solo.

Nesse sentido, quando se considera a eficiência no aproveitamento da água, seja proveniente de chuvas ou irrigação, há maior tendência que os SIPA otimizem esse recurso natural, uma vez que as melhorias na qualidade do solo irão promover retenção hídrica entre diferentes fases do sistema. Martins et al. (2018) ressaltam que estudos nessa temática em SIPA ainda são incipientes e devem avançar para uma melhor compreensão de como esses sistemas podem auxiliar na otimização do uso da água.

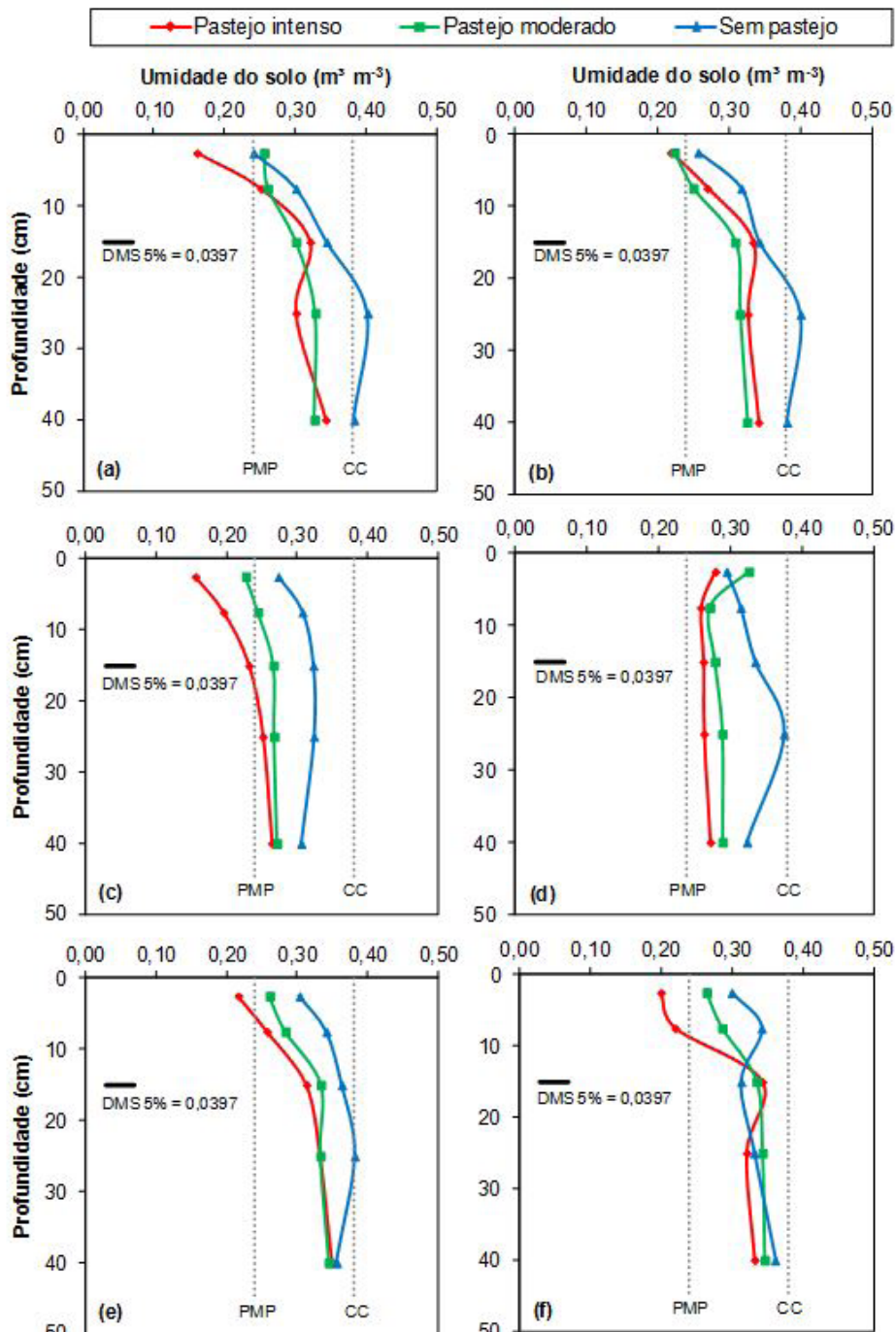


FIGURA 8.1 Umidade volumétrica do solo, ao longo do ciclo da soja, nos meses de novembro (semeadura; a), dezembro (b), janeiro (c), fevereiro (d), março (e) e abril (colheita; f), no perfil de um Latossolo Vermelho distroférico em Sistema Integrado de Produção Agropecuária com diferentes intensidades de pastejo. CC: capacidade de campo. PMP: ponto de murcha permanente. Fonte: (COSTA, 2014).

8.2.2 Atributos de solo em SIPA

O solo centraliza os fluxos de matéria e energia no sistema, pois é nele que se observam as maiores alterações, as quais são causadas pelo homem. Desta forma, a produtividade vegetal e animal será reflexo dos fluxos (positivos e negativos) que foram impostos ao sistema solo, dentre eles, os fluxos de água.

A água tem papel fundamental, nos demais fluxos do sistema, pois somente com a sua presença é possível o evento da fotossíntese e respiração, decomposição de resíduos e mineralização de nutrientes, visto que afeta diretamente a atividade de microrganismos no solo, entre outros diversos processos que ocorrem no sistema solo-planta-atmosfera. Sendo assim, podem-se avaliar os atributos de solo como reflexo dos fluxos positivos na dinâmica da água nos sistemas de produção, entre eles, nos SIPA.

O solo catalisa todos os processos derivados dos diferentes manejos ao qual este é submetido. Assim sendo, é necessária a adoção de uma filosofia de manejo baseada não apenas na eficiência dos sistemas de produção, mas, sim e principalmente, naqueles envolvidos com a sustentabilidade desses sistemas. Nessa linha, o solo, representando a “memória física” dos sistemas de produção, pode ser avaliado como um componente-chave da indicação da qualidade do sistema de manejo adotado. Isso, porque o pisoteio animal promove alterações positivas na estrutura do solo com reflexos na produtividade das culturas de grãos cultivadas.

Nesse contexto, avaliar o efeito da presença do animal em pastejo é extremamente importante para a definição adequada de manejos. Portanto diversos autores têm estudado essa temática no Cerrado onde se obtiveram resultados positivos da presença do animal em atributos químicos (SILVA, 2013), físicos (BONETTI et al., 2015) e biológicos do solo (TERRA, 2013), desde que em intensidades moderadas.

Em SIPA, a intensidade de pastejo não só interfere na quantidade de biomassa remanescente, mas também no efeito dessa biomassa sobre a massa específica, porosidade total e resistência à penetração (Tabela 8.1).

TABELA 8.1 Massa específica, porosidade total, resistência à penetração, biomassa remanescente e produtividade de soja em Sistemas Integrados de Produção Agropecuária com intensidades de pastejo em Latossolo Vermelho.

Intensidade de pastejo	Ms	PT	RP	Biomassa remanescente	Produtividade
---- cm ----	Mg m ⁻³	m ³ m ⁻³	Mpa	-----Mg ha ⁻¹ -----	
25	1,22	0,57	1,81	6,94	3,47
35	1,22	0,57	1,63	8,86	3,42
45	1,23	0,61	1,74	11,21	3,76
Sem pastejo	1,20	0,61	1,53	13,66	3,67

Adaptado: Bonetti et al. (2015). Ms: massa específica; PT: porosidade total; RP: resistência à penetração.

Bonetti et al. (2015) observaram que, em pasto de *Urochloa ruziziensis* manejada acima de 25 cm de altura, não há efeito negativo do pastejo sobre esses atributos e a produtividade da cultura da soja em sucessão. No mesmo experimento citado, a presença de animais em pastejo favoreceu a movimentação vertical dos produtos da dissolução do calcário, em apenas 12 meses após a aplicação, quando comparado com o PD sem pastejo (SILVA, 2013). Esse efeito foi verificado tanto pelos indicadores de acidez (capacidade de troca de cátions efetiva e saturação por bases), como pelos teores de cálcio trocável no solo (Figura 8.2).

Segundo Anghinoni et al. (2011), uma diversidade de fatores pode contribuir para essa rápida movimentação vertical do calcário, como: ação conjunta do pastejo, alterando os atributos físicos do solo, da grande quantidade de biomassa vegetal sobre o solo e os ligantes orgânicos presentes nos excrementos dos animais. Ainda, a liberação de compostos orgânicos pela gramínea, sob influência do pastejo favorece a remoção de parte aérea juntamente com senescência de componentes morfológicos da parte aérea e de raiz, que pode ser responsável por um efeito mais homogêneo, nas áreas pastejadas, uma vez que a distribuição de resíduos dos animais é heterogênea.

O carbono e nitrogênio são bons indicadores de alterações no manejo adotado no solo. Além disso, a biomassa microbiana do solo, por ser a fração viva do solo, é alterada

rapidamente, à medida que ocorre mudanças nos fluxos de matéria e energia no sistema solo. Por esse motivo, esses atributos podem ser considerados como excelentes indicadores da qualidade do solo, sendo de fácil mensuração, porém devem ser avaliados, ao longo do tempo, a fim de se ter informações mais precisas sobre o manejo adotado.

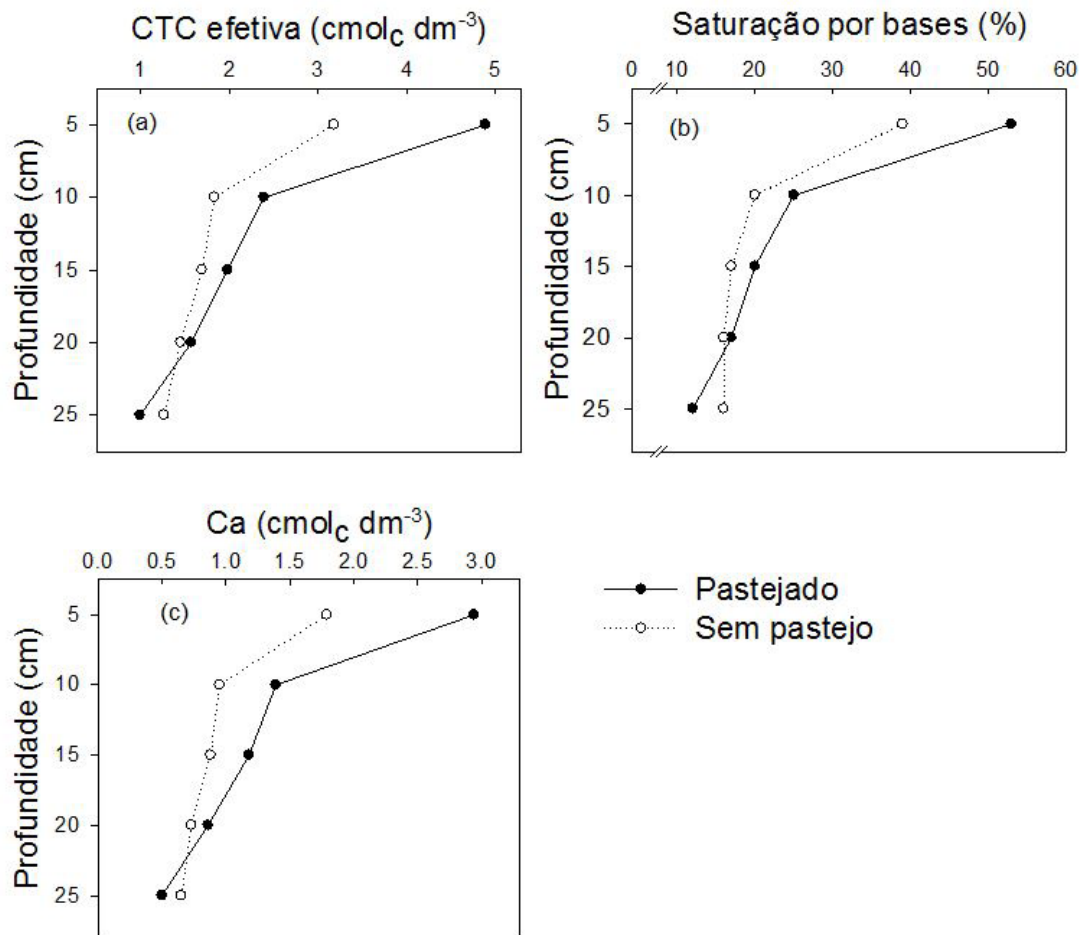


FIGURA 8.2 CTC efetiva (a), saturação por bases (b) e Ca trocável (c) em Sistema Integrado de Produção Agropecuária (pastejado) e Plantio Direto (sem pastejo), 12 meses após a aplicação superficial de calcário em solo do Cerrado. CTC: capacidade de troca de cations. Ca: Cálcio. Fonte: Adaptado de (SILVA, 2013).

A atividade microbiana é favorecida em SIPA com incrementos consideráveis no carbono e no nitrogênio na biomassa microbiana (Tabela 8.2) com a presença dos animais em pastejo. Além disso, o gasto metabólico da biomassa microbiana é menor quando se

tem o pastejo pelos animais (mais detalhes sobre a biologia do solo podem ser obtidos no capítulo 4). Com a utilização do SIPA, ocorrem incrementos de 23 e 52% no carbono da biomassa microbiana e nitrogênio da biomassa microbiana, respectivamente, em relação ao PD sem pastejo.

TABELA 8.2 Carbono na biomassa microbiana do solo, nitrogênio na biomassa microbiana do solo, respiração basal diária, quociente microbiano e quociente metabólico em Sistema Integrado de Produção Agropecuária com pastejo e sem pastejo no Cerrado.

Tratamento	C-BM	N-BM	C-CO ₂	BM/COT	qCO ₂
	-----mg kg ⁻¹ -----			%	mg CO ₂ /mg C dia ⁻¹ x 10 ⁻³
Pastejo	825	38	19,5	1,6	23,7
Sem pastejo	671	25	19,3	1,1	28,7

Adaptado de Terra (2013). C-BM: biomassa microbiana do solo; N-BM: nitrogênio na biomassa microbiana do solo; C-CO₂: respiração basal diária; BM/COT: quociente microbiano; qCO₂: quociente metabólico.

O conhecimento do quociente metabólico é importante para detectar o efeito das condições de estresse ambiental. Em condições, em que o quociente metabólico se eleva, há uma indicação de que a população de microorganismos esteja gastando mais energia para a sua manutenção, fato ocorrido no PD sem pastejo, indicando perda de qualidade nesse sistema, em relação ao SIPA.

Em SIPA ocorre aporte diferenciado de resíduos vegetais, em relação aos sistemas puros de produção de grãos, tanto na superfície quanto no perfil do solo pelas raízes. Com a presença dos animais em pastejo, há maior perfilhamento das gramíneas e também maior crescimento do sistema radicular, tanto do pasto como da cultura de grãos cultivada em sucessão e, com isso, o aporte de matéria orgânica do solo em SIPA pode ser maior.

Na Tabela 8.3 são apresentados resultados de diversos trabalhos que compararam o carbono orgânico total entre PD e SIPA em condições Tropicais e Subtropicais no Brasil.

O acúmulo de matéria orgânica do solo é menos pronunciado, em região com clima Subtropical, em relação ao clima Tropical. No subtropico brasileiro, os SIPA mantêm os mesmos teores e estoques de carbono orgânico total que o PD, mesmo após nove anos de implantação desses sistemas. No subtropico, a variação no carbono orgânico total entre PD

e SIPA foi de -11,0% a 1,7%, demonstrando pouca influência do SIPA no incremento de matéria orgânica do solo nessa região.

TABELA 8.3 Teores e estoques de carbono orgânico total em Plantio Direto e em Sistemas Integrados de Produção Agropecuária em diferentes regiões do Brasil.

Indicador	Sistema		Clima	Argila (%)
	PD	SIPA		
COT (Mg ha ⁻¹) ¹	58,0	59,0	Subtropical	54
COT (g kg ⁻¹) ¹	13,2	11,8	Subtropical	17
COT (Mg ha ⁻¹) ¹	59,4	59,6	Subtropical	62
COT (g kg ⁻¹) ⁴	46,9	46,2	Subtropical	51
COT (g kg ⁻¹) ³	18,2	24,5	Subtropical	63
COT (g kg ⁻¹) ²	21,9	23,0	Tropical	>60
COT (g kg ⁻¹) ²	8,9	10,0	Tropical	5
COT (Mg ha ⁻¹) ¹	43,0	51,0	Tropical	66
COT (g kg ⁻¹) ¹	36,4	55,6	Tropical	48
COT (Mg ha ⁻¹) ⁵	104,2	101,0	Tropical	71
COT (g kg ⁻¹) ¹	19,7	19,5	Tropical	49
COT (g kg ⁻¹) ³	22,4	30,0	Tropical	54
COT (g kg ⁻¹) ³	25,2	21,9	Tropical	36
COT (Mg ha ⁻¹)	42,9	48,0	Tropical	62
COT (Mg ha ⁻¹) ¹	48,4	54,2	Tropical	52

¹Teores ou estoques na camada de 0-20 cm; ²Teores ou estoques na camada de 0-10 cm; ³Estoque na camada de 0-5 cm; ⁴Teor na camada de 0-15 cm; ⁵Estoque na camada de 0-30 cm. COT: carbono orgânico total; PD: plantio direto. SIPA: sistema integrado de produção agropecuária. Adaptado: Souza et al. (2018).

Por outro lado, em solos de Cerrado, há um considerável aumento nos teores e estoques de carbono orgânico total no SIPA, em relação ao PD, em praticamente todos os estudos. Dos 10 trabalhos avaliados, três não apresentaram incremento da matéria orgânica do solo

em SIPA, com incrementos entre 1,1 e 13,1% no PD em relação ao SIPA. Por outro lado, em sete estudos, os teores e estoques de carbono orgânico total em SIPA variaram desde baixo incremento (5,0%) até altíssimo incremento (52,7%) em relação ao PD.

Verifica-se que não há efeito negativo da presença dos animais, em intensidades moderadas de pastejo sobre atributos de solo, o que reflete na produtividade de soja, a qual não é afetada negativamente pela presença de animais em pastejo (Tabela 8.1). Além de resultados de pesquisa, os autores possuem relatos de diversas propriedades no Cerrado que estão conseguindo altas produtividades da cultura da soja na safra e ganho de peso animal na fase pastagem, utilizando SIPA, com manejo adequado de pasto. Por outro lado, há alguns relatos de diminuição de até 10 sacas/ha na produtividade de soja, quando a intensidade de pastejo adotada é elevada e, também, em anos que as precipitações em safrinha e entressafra limitam o desenvolvimento da fase pastagem. Isso é reflexo da baixa quantidade de resíduos deixada sob o solo, comprometendo um bom estabelecimento e condução da cultura da soja em sucessão ao pasto.

8.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os Sistemas Integrados de Produção Agropecuária são caracterizados por serem planejados de modo a explorar sinergismo e propriedades emergentes e que possuem alta resiliência. Têm-se observado melhorias, em atributos de solo, o que reverbera em maior infiltração e acúmulo de água no solo.

Desta forma, espera-se que a adoção desses sistemas promova incrementos na qualidade do solo e, como consequência, a produtividade das culturas sejam afetadas de forma positiva. Assim, adotar manejos que promovam melhorias nesses atributos é fator essencial para a sustentabilidade produtiva e ambiental dos sistemas agrícolas.

8.4 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANGHINONI, I. et al. Benefícios da integração lavoura-pecuária sobre a fertilidade do solo em sistema plantio direto. In: FONSECA, A.F.; CAIRES, E. F.; BARTH, G. (Org.). **Fertilidade do Solo e Nutrição de Plantas no Sistema Plantio Direto**. 1ed. Ponta Grossa: EUEPG, p. 273-310, 2011.

ANGHINONI, I. et al. Abordagem sistêmica do solo em sistemas integrados de produção agrícola e pecuária no subtropical brasileiro. In: ARAÚJO, A. P.; AVELAR, B. J. R. (Eds.), **Tópicos em Ciência do Solo**, 8ª ed. UFV, Viçosa, p. 221-278, 2013.

BALBINOT, J. et al. Integração lavoura-pecuária: intensificação de uso de áreas agrícolas. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 39, n. 6, p. 1925-1933, 2009.

BEUTLER, A. N. et al. e Resistência à penetração e permeabilidade de latossolo vermelho distrófico típico sob sistemas de manejo na região dos cerrados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25, n. 1, p. 167-178, 2001.

BONETTI, J. de A. et al. 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.

BONETTI, J. A. et al. Influência do sistema integrado de produção agropecuária no solo e na produtividade de soja e braquiária. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 45, n. 1, p. 104-112, 2015.

CARVALHO, P. C. F. Reconectando a natureza com a produção agrícola: a via da intensificação sustentável. In: CARMONA, F. C. et al. (Eds.) **Sistemas integrados de produção agropecuária em terras baixas: A integração lavoura-pecuária como o caminho da intensificação sustentável da lavoura arroseira**. Porto Alegre: UFRGS, p. 17-24, 2018.

COSTA, N. R. et al. Atributos do Solo e Acúmulo de Carbono na Integração Lavoura-Pecuária em Sistema Plantio Direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 39, n. 3, p. 852-863, 2015

COSTA, S. **Intervalo hídrico ótimo do solo e estado hídrico das plantas em Sistema Integrado de Produção Agrícola e Pecuária no subtropical brasileiro**. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2014, 237p.

CUBILLA, M. et al. Plantas de cobertura do solo: uma alternativa para aliviar a compactação em sistema plantio direto. **Revista Plantio Direto**, v. 71, p. 29-32, 2002.

FAO. **An international consultation on integrated croplivestock systems for development: The way forward for sustainable production intensification**. Integrated Crop Management, v. 13, 2010, 64p.

ISLAM, K. R.; WEIL, R. R. Soil quality indicator properties in mid-Atlantic soils as influenced by conservation management. **Journal Soil Water Conservation**, v. 55, n. 1, p. 69-78, 2000.

MARTINS, A. et al. Melhorias ambientais proporcionadas pelos sistemas integrados de produção agropecuária. In: SOUZA, E. D. et al. (Org.). **Sistemas de produção agropecuária no Brasil**. Tubarão: Copiart, 2018. 354p.

MORAES, A. et al. Sistemas integrados de produção agropecuária: conceitos básicos e histórico no Brasil. In: SOUZA, E. D. et al. (Org.). **Sistemas de produção agropecuária no Brasil**. Tubarão: Copiart, 2018. 354p.

SILVA, G. N. **Atributos químicos do solo após aplicação superficial de calcário em sistema de integração lavoura-pecuária sob plantio direto no cerrado**. Dissertação (Mestrado em Agronomia) Universidade Federal de Goiás, Jataí, 2013. 51p.

SILVA, V. R. et al. Densidade do solo, atributos químicos e sistema radicular do milho afetados pelo pastejo e manejo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 24, p. 191-199, 2000.

SOUZA, E. D. et al. Matéria orgânica do solo em sistemas integrados de produção agropecuária no Brasil. In: SOUZA, E. D. et al. (Org.). **Sistemas de produção agropecuária no Brasil**. Tubarão: Copiart, 2018. 354p.

TENFEN, J. **Infiltração de água e atributos físicos de um latossolo vermelho sob sistemas de manejo**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Faculdade de Ciências Agrárias, Universidade Federal Da Grande Dourados, Dourados. 2014. 36p.

TERRA, F. D. **Matéria orgânica do solo sob sistemas de manejo e uso no cerrado**. Dissertação (Mestrado em agronomia) Programa de Pós-Graduação Em Agronomia. Universidade Federal de Goiás, Jataí, 2013. 104p.

CAPÍTULO 9

EFICIÊNCIA DO USO DA ÁGUA EM SISTEMAS AGROECOLÓGICOS

Frank Silvano Lagos¹

¹Professor do Curso de Agronomia do Instituto Federal do Paraná (IFPR), Palmas – PR
E-mail: frank.lagos@ifpr.edu.br

9.1 INTRODUÇÃO

Mais de dois terços da superfície do planeta é ocupada por água doce ou salgada, além da água armazenada no subterrâneo, estimada em um volume 100 vezes maior que a totalidade da água armazenada na superfície. A quantidade total de água existente é de $1,36 \times 10^{21}$ kg, porém, deste quantitativo, menos de 1% é água doce, que representa 0,63% (GRASSI, 2001). Considerando os estoques existentes e o crescente aumento da população, a preservação da água é alvo de preocupação de diversos organismos internacionais, estando no centro de importantes iniciativas relacionadas à sustentabilidade planetária. A Agenda 21, documento aprovado na 2ª Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento - ECO 92, dedicou um de seus capítulos diretamente à proteção da qualidade e do abastecimento dos recursos hídricos, definindo aplicação de critérios para o desenvolvimento, manejo e uso dos recursos hídricos.

Nos debates internos, para a construção do documento relacionado à Agenda 21 Brasileira, foram definidos 21 objetivos estratégicos, sendo um deles relativo à preservação da quantidade e melhoria da qualidade da água nas bacias hidrográficas e outro à promoção da agricultura sustentável. No ano de 2000, por ocasião da Cúpula do Milênio das Nações Unidas, elaborou-se um documento denominado Declaração do Milênio das Nações Unidas, o qual desencadeou diversas atividades relacionadas a oito objetivos internacionais para o desenvolvimento, dentre os quais figura a garantia da sustentabilidade ambiental.

Ainda, de acordo com a ONU (2018), a água potável limpa, segura e adequada é vital para a sobrevivência de todos os organismos vivos e para o funcionamento dos ecossistemas, comunidades e economias. Mas a qualidade da água, em todo o mundo, é cada vez mais ameaçada à medida que as populações humanas crescem, as atividades agrícolas e industriais se expandem e as mudanças climáticas ameaçam o ciclo hidrológico global.

Segundo a Agência Europeia do Ambiente (2016), um terço da água doce consumida na Europa é oriunda de sua utilização na agricultura. O excesso de bombeamento de água subterrânea excede a capacidade de reposição em pelo menos 160 bilhões $\text{m}^3 \text{ano}^{-1}$. A atividade agrícola pode impactar de duas formas o estoque de água doce apta à utilização humana: a) quantitativamente, pela diminuição dos estoques localizados, em função de sua utilização

direta, por exemplo, em sistemas de irrigação; e b) qualitativamente, pela possibilidade de contaminação por agrotóxicos ou fertilizantes.

Dessa forma, a adoção de práticas agrícolas sustentáveis é uma importante estratégia, no sentido de manter a disponibilidade de água em quantidade e qualidade suficientes, para atender a demanda das atuais e futuras gerações.

9.2 AGROECOLOGIA E GESTÃO SUSTENTÁVEL DA ÁGUA

A Agroecologia é entendida como um enfoque científico destinado a apoiar a transição dos atuais modelos de desenvolvimento rural e de agriculturas convencionais para estilos de desenvolvimento rural e de agriculturas sustentáveis (CAPORAL; COSTABEBER, 2001). De acordo, especialmente, de escritos de Altieri (2002), observa-se que a Agroecologia constitui um enfoque teórico e metodológico que, ao considerar diversas disciplinas científicas, pretende estudar a atividade agrícola e, por consequência, a produção de alimentos, sob uma perspectiva ecológica e ambientalmente sustentável.

A agroecologia tem na agronomia, ecologia, sociologia, antropologia e economia os sustentáculos a uma ciência interdisciplinar, caminhando para a transdisciplinaridade (GLIESSMAN, 2000).

Segundo Altieri (2002), os princípios da agroecologia fundamentam-se no manejo dos agroecossistemas pela prática de uma agricultura ecologicamente correta, sem a utilização de insumos químicos (agrotóxicos e fertilizantes solúveis), sobretudo justa, priorizando a produção de alimentos e respeitando as condições adequadas de trabalho, a economia viável, garantindo a produção adequada ao sustento da família e à geração de excedentes, para a comercialização, de forma culturalmente aceitável, respeitando as características históricas e culturais de cada grupo.

Para Gliessman (2000), o enfoque agroecológico corresponde à aplicação dos conceitos e princípios da ecologia no manejo e desenho de agroecossistemas sustentáveis. Em resumo, a agroecologia constitui-se na base científica que norteia os aspectos técnicos, sociais, culturais e econômicos com vista a sistemas sustentáveis de produção de alimentos, que, neste contexto, denominaremos sistema orgânico de produção.

A Lei Federal nº10.831 de 23 de dezembro de 2003 dispõe sobre a agricultura orgânica, define o sistema orgânico de produção e aponta suas nove finalidades. Uma das finalidades expressas no texto é o de promover um uso saudável da água, do solo e do ar, reduzindo, ao máximo, a contaminação desses elementos pelas práticas agrícolas. Essa lei foi regulamentada pelo Decreto da Presidência da República do Brasil, Nº 6.323 de 27 de dezembro de 2007, que define 16 diretrizes da agricultura orgânica brasileira, sendo uma delas a adoção de práticas, na unidade de produção, que contemple o uso saudável do solo, da água e do ar, de modo a reduzir, ao mínimo, todas as formas de contaminação e desperdícios desses elementos. Este decreto (Nº 6.323), ainda, indica que uma das atribuições dos agentes fiscalizadores da implantação das normas e diretrizes do sistema orgânico de produção, nas propriedades rurais, é colher amostras necessárias e efetuar determinações microbiológicas, biológicas, físicas e químicas de matéria-prima, insumos, subprodutos, resíduos de produção, beneficiamento e transformação de produtos orgânicos, assim como de solo, água, tecidos vegetais e animais e de produto acabado, lavrando o respectivo termo (BRASIL, 2003; BRASIL, 2007).

Ao verificar como é tratada, internacionalmente, a questão da água em sistemas orgânicos de produção, é preciso considerar o que aponta a Federação Internacional de Movimentos da Agricultura Orgânica (IFOAM - International Federation of Organic Agriculture Movements), a qual é uma organização de representação mundial da agricultura orgânica que estabelece normas e diretrizes, para a certificação de produtos orgânicos, as quais são seguidas por todas as suas 800 afiliadas, presentes em 117 países. Essa organização tem o entendimento de que a água é uma necessidade básica à saúde humana e ao ecossistema, sendo um recurso natural necessário, para a resiliência ecológica e socioeconômica em longo prazo de nossos sistemas de agricultura e alimentação.

Ainda, segundo a IFOAM, como o setor agroalimentar tem uma grande parcela de responsabilidade pelo consumo e contaminação da água, deve mostrar liderança na conservação e proteção dos recursos hídricos. Diante dessa premissa, a instituição estabelece, em suas normas e diretrizes para a certificação de produtos orgânicos, a obrigatoriedade de realização do manejo sustentável dos recursos hídricos da unidade de produção que deseja receber certificação por alguma das organizações afiliadas. O manejo sustentável da

água é cobrado pelas diretrizes em razão de o entendimento de que o uso de agrotóxicos e fertilizantes são agentes deteriorantes da qualidade da água (IFOAM, 2018).

Considerando as diretrizes nacionais e internacionais de produção orgânica, bem como os princípios ecológicos envolvidos no manejo desse sistema de produção, percebe-se que a gestão sustentável da água é um processo intrínseco à agroecologia. Diversas práticas agronômicas propostas, nessa perspectiva, promovem conservação da água e a Agroecologia oferece soluções para muitos dos efeitos negativos que a agricultura convencional deposita na água.

Carneiro (2013), ao pesquisar as experiências agroecológicas de famílias agricultoras, no município de Araponga-MG, observou que aqueles que aderiram ao processo de transição agroecológica identificaram impactos positivos de suas práticas nos recursos naturais locais, tais como o aumento na biodiversidade local, maior conforto térmico proporcionado pelas árvores e mudanças na disponibilidade de água. A pesquisa apontou, ainda, que, em propriedades sob manejo agroecológico, essa circunstância contribuiu ao processo de recuperação de microbacias hidrográficas, em longo prazo, levando à maior estabilidade da vazão de águas, ao longo do ano, pela maior infiltração de água e recarga dos lençóis freáticos que abastecem as nascentes. As práticas agroecológicas identificadas como importantes no processo de regulação hídrica foram: lotação animal reduzida, não utilização de agrotóxicos, controle de invasoras por meio de roçadas e implantação de sistemas agroflorestais.

Dentre as técnicas utilizadas por essas famílias de agricultores que praticam a agroecologia, em sistemas orgânicos de produção e promovem a gestão sustentável da água, podem-se destacar a rotação de culturas, adubação verde, cobertura do solo, a ênfase na melhoria da qualidade estrutural do solo e manejo da matéria orgânica, culturas em faixa, manutenção de áreas florestadas na propriedade, além do não uso de agrotóxicos e fertilizantes minerais de alta solubilidade que são potenciais poluidores de águas superficiais e subterrâneas.

9.3 ÁGUA E MANEJO DE AGROECOSSISTEMAS

O desafio de criar agroecossistemas sustentáveis é o de alcançar características semelhantes aos ecossistemas naturais, mantendo uma produção a ser colhida, ou seja,

considerando-se a retirada de nutrientes do sistema (GLIESSMAN, 2000). Assim, o correto manejo de um agroecossistema deverá incorporar as qualidades de um sistema natural, como: resiliência, estabilidade, produtividade e equilíbrio, sem comprometer a fertilidade do sistema em médio e longo prazo.

Khatounian (2001) aponta que, dentre os fatores determinantes para a produtividade em sistemas agrícolas ou naturais no planeta, a luz, a água e a temperatura adequada são mais determinantes que os nutrientes minerais. Esse autor pondera que determinadas culturas conseguem se desenvolver em ambientes quimicamente muito pobres. Por outro lado, as culturas agrícolas não conseguem se desenvolver no mesmo nível de restrição de luz, água e temperatura. Também, ao realizar uma análise sistêmica da fertilidade do solo, destaca que o manejo da fertilidade não deve se limitar à fertilização mineral ou ao controle da erosão, mas estender-se ao manejo de todos os recursos da propriedade que poderão contribuir para suprir água, luz, temperatura, ar e nutrientes minerais. Ante esse pressuposto, o manejo eficiente da água deve levar em conta sua dinâmica, no sistema solo-planta-atmosfera, sendo o início o manejo do agroecossistema e a manutenção de umidade suficiente no solo.

Em ecossistemas naturais, o aporte de água no solo dá-se, em princípio, pelas chuvas; já nos agroecossistemas, o aporte pode ser natural, via chuva, ou artificial, via irrigação. A água adicionada ao sistema do solo na zona de ação das raízes (seja por chuva ou irrigação), sai dele, via escoamento superficial, drenagem profunda e evapotranspiração (evaporação do solo mais a transpiração dos vegetais). O manejo do agroecossistema, seguindo uma estratégia de uso eficiente da água, é feito de forma a assegurar que a principal rota de saída de água do solo seja via cultura, ou seja, via transpiração. Nessa lógica, o manejo deve ser direcionado de forma a reduzir, principalmente, a evaporação e as perdas por escoamento superficial, além de medidas que visam ampliar seu fluxo via transpiração. Assim, trabalha-se um conceito chamado eficiência da evapotranspiração, o qual é determinado pela quantidade de matéria seca produzida pela planta por unidade de água evapotranspirada. A alteração de práticas de manejo de solo pode alterar a eficiência da evapotranspiração, sobretudo, na diminuição das perdas de água pela evaporação. Nessa lógica, serão descritas, a seguir, as principais estratégias de manejo eficiente da água que são inerentes aos sistemas agroecológicos.

9.3.1 Definição das culturas a serem cultivadas

Deve-se dar preferência a culturas e variedades com menores necessidades hídricas para plantio em épocas ou locais com pouca disponibilidade de água. Considerando que as perdas por evapotranspiração são reduzidas, quando se faz um desenho do agroecossistema, proporcionando maior cobertura vegetal, Altieri (2001) recomenda que a combinação de plantas com diferentes hábitos de crescimento, arquiteturas de copa e estruturas de raízes possibilitam um uso mais adequado dos recursos ambientais, como nutrientes, água e radiação solar e proporciona melhor cobertura do solo, diminuindo as perdas por evaporação. Essa situação fica mais próxima do ideal pela consorciação de culturas, sobretudo, em sistemas agroflorestais.

9.3.2 Manejo da superfície do solo

A utilização de cobertura orgânica, como serragens, capins, resíduos vegetais ou alguns resíduos orgânicos industriais de uso agrícola permitido são recomendações importantes. A cobertura morta vegetal diminui as perdas por evaporação, por evitar o contato direto da radiação solar com o solo, visto que o aquecimento da camada superficial do solo acelera a perda de água, deixando-o seco, podendo causar a morte das raízes na camada atingida, o que tanto pode ocasionar a morte da planta como diminuir a absorção de nutrientes. Outra maneira por que a cobertura morta diminui a perda de água via evaporação é pela quebra da continuidade do fluxo de água no solo, mantendo a umidade mais elevada nas camadas superficiais e mantendo a tensão da água no solo, nessas camadas, em níveis menores que em solo descoberto. Também diminui perdas de água via erosão, pela proteção do solo em desencadear a erosão (impacto das gotas de chuva), pela diminuição do escoamento superficial via aumento da rugosidade e aumento da capacidade de infiltração da água no solo. Além disso, altera o albedo da superfície, dificulta o processo de difusão gasosa e aumenta, gradativamente, os teores de matéria orgânica do solo, aumentando assim a sua retenção de água. Importante ressaltar que o solo com cobertura morta também retém mais água que o solo descoberto, quanto à melhoria na estruturação do solo. Essa prática pode ser, em pequena escala, como, por exemplo, em uma horta, ou em grande escala, como em Sistema de Plantio Direto.

Outra possibilidade de manejo da superfície do solo é a cobertura verde, que consiste em sempre deixar o solo coberto com vegetação viva, utilizando-se das plantas denominadas adubos verdes, semeadas de preferência na forma de coquetéis, contendo uma mistura de gramíneas e leguminosas. É recomendado, ainda, o plantio de leguminosas e cereais ou qualquer outra mistura apropriada no estrato inferior das plantações de porte alto, como frutíferas e café. Essa cobertura, nas entrelinhas das culturas, contribui à melhoria da estrutura do solo e a consequente melhoria da infiltração da água, além de acrescentar matéria orgânica e raízes que aumentam a aeração e elevam os teores de agregados estáveis no solo. Também dificultam o processo de erosão do solo, por evitar o impacto direto das gotas da chuva, diminuir a velocidade da água que possa escoar na superfície dificultando o arraste de solo que ficam agregados no emaranhado de raízes.

9.3.3 Manutenção dos níveis de matéria orgânica no solo

A matéria orgânica é o ponto de partida da fertilidade do solo na agricultura de base ecológica. A matéria orgânica do solo é formada por materiais vivos (raízes, microorganismos, meso e microfauna) e matéria morta (restos vegetais como raízes, galhos e folhas, metabólitos microbianos e substâncias húmicas), sendo importante fonte de nutrientes para o desenvolvimento das plantas e composição do ecossistema do solo. Tem a capacidade de alterar de forma positiva as características físicas (massa específica e porosidade), químicas (decomposição e mineralização de resíduos orgânicos, fornecendo nutrientes e regulação do pH pelo poder tampão) e biológicas (fonte de alimento e substrato para o desenvolvimento de microorganismos) do solo. A matéria orgânica do solo consiste em componente-chave da formação da estrutura do solo, contribuindo para a retenção da água e proteção mecânica da superfície do solo contra a desagregação das partículas. Um solo rico em matéria orgânica terá maior quantidade de macroporos e microporos. Os macroporos favorecem a infiltração da água no solo e os microporos favorecem a retenção da água no perfil do solo. A matéria orgânica aumenta a capacidade de retenção de água no solo, pois a água é mantida por forças adesivas e coesivas, e um aumento na quantidade de macro e microporos (mantendo a relação macro e microporos de 1/3) levará a um incremento na capacidade de retenção de água.

Reicosky (2005) verificou que certos tipos de matéria orgânica do solo podem reter até 20 vezes seu peso em água. Hudson (1994) observou que solos com elevados teores de matéria orgânica possuem maior capacidade de retenção de água que solos com textura igual, porém com menores teores de matéria orgânica. Seu estudo demonstrou que um solo siltoso argiloso com 4% de matéria orgânica apresentou o dobro de retenção de água que um solo com a mesma característica, porém com 1% de matéria orgânica.

9.3.4 Instalação de terraços e cordões de vegetação

Recomenda-se a implantação de terraços, em terrenos com declividade superior a 5%, para diminuir as perdas de água por escoamento superficial e aumentar a infiltração. Ao se implantar terraços, em uma área declivosa, ocorre o parcelamento da rampa em rampas menores. Terraço é a combinação de um corte, formando um canal e de um aterro imediatamente abaixo do corte, construído no sentido transversal ao declive, em nível ou com pequeno gradiente, alocados a intervalos dimensionados, conforme a declividade do terreno, o regime de chuvas da região, características e uso do solo. Os terraços, dependendo da sua função, podem reter e infiltrar ou escoar lentamente a água, de forma a minimizar o poder erosivo das enxurradas, cortando o declive no sentido transversal. Permite a contenção de enxurradas, forçando a absorção da água da chuva pelo solo ou a drenagem lenta e segura do excesso de água (EMBRAPA, 2013).

No caso de implantação de terraços em gradiente, as vias de escoamento das águas deverão ser cobertas por vegetação, principalmente gramas. Como forma de ampliar a diversidade vegetal do agroecossistema, orientam-se plantar sobre os terraços (nível ou gradiente) espécies vegetais perenes ou semiperenes, formando cordões de vegetação, como sugestão: capim-napier, capim-limão, citronela ou cana de açúcar ou outras plantas com boa densidade foliar e radicular que sejam adaptadas ao local. Esses cordões também podem ser plantados, em nível ou em pequenos gradientes, sem a necessidade de alocação dos terraços. Esses cordões diminuem as enxurradas, aumentando a infiltração de água e diminuindo a erosão. Com o tempo, esses cordões, desde que manejados corretamente, atuam com a mesma função dos terraços. Essas faixas devem ser estreitas de forma a não diminuir muito a área a ser plantada, e o espaçamento entre uma faixa e outra é definido pelos mesmos critérios utilizados na alocação dos terraços.

9.3.5 Desenho do agroecossistema à semelhança de ecossistemas naturais

Na agroecologia, a paisagem agrícola deve ser desenhada a fim de se aproximar o máximo possível dos ecossistemas naturais. Nessa dinâmica, toda a área da unidade de produção deve estar coberta com vegetação, em todo o ano, mesmo na entressafra das chamadas culturas de interesse econômico. As faixas de quebra-ventos aumentam a eficiência da água existente no sistema, pela diminuição da perda de água por evapotranspiração, pela proteção direta das plantas em relação aos ventos.

O manejo dos agroecossistemas na abordagem agroecológica também pressupõe a manutenção de áreas com mata nativa na unidade produtiva, como forma de interação ecológica entre os inimigos naturais e eventuais pragas. A manutenção ou a ampliação dessas áreas florestadas trarão a conseqüente preservação dos cursos d'água existentes na propriedade e respectivas nascentes d'água. As áreas florestadas protegem os recursos hídricos em relação à manutenção e ampliação da oferta de água quantitativa e qualitativamente. Essa situação é demonstrada por Bortoluzzi et al. (2006) que realizaram um trabalho com o objetivo de quantificar a presença de moléculas de agrotóxicos, em águas superficiais, numa microbacia hidrográfica de cabeceira no município de Agudo-RS. Os autores observaram que nos pontos de coleta de água, em áreas com a presença de lavouras de fumo e reduzida mata ciliar, apareceu pelo menos um princípio ativo de agrotóxico. Por outro lado, não foi detectado agrotóxico na área que se apresentou totalmente coberta com vegetação permanente ou com proteção dos córregos pela mata ciliar.

9.3.6 Manejo ecológico de pragas e doenças

No Brasil, realizou-se um estudo visando identificar e avaliar o cenário de uso e presença de produtos fitossanitários e fertilizantes nitrogenados com destaque para o nitrato (N-NO_3^-). O estudo realizado, em todas as regiões do Brasil, mostrou que resíduos de produtos fitossanitários e de nitratos são detectados em poucos monitoramentos já realizados. O estudo aponta, ainda, a necessidade de construir padrões aceitáveis (concentração) no ambiente para várias moléculas de compostos aplicados à agricultura brasileira (GOMES; BARIZON, 2014).

Outros estudos indicam a contaminação, poluição e consequente degradação da qualidade do ar, do solo e dos recursos hídricos, em função do uso intensivo de produtos fitossanitários na agricultura, incluindo águas subterrâneas e superficiais, amplificando o risco de contaminação para além das áreas de plantio (STEFFEN; STEFFEN; ANTONIOLLI, 2011; MOREIRA et al., 2012; RUY; REIS, 2012; PORTUGAL; PATRÍCIA BURTH; FORTUNA, 2017).

O manejo ecológico de pragas e doenças promovem a diminuição ou até a supressão da utilização dos insumos causadores desses processos de contaminação e poluição da água. A estratégia de manejo considera os fatores citados a seguir: conhecer as doenças ou pragas-chave das principais culturas a serem trabalhadas, bem como seu nível de dano econômico, a partir do qual se desenvolvem estratégias para a construção de um ambiente desfavorável a esses organismos e favorável aos inimigos naturais dos agentes causais. Com base no conhecimento das espécies que atuam como inimigos naturais (sejam insetos, fungos ou bactérias), atividades que envolvam adubação orgânica, preservação de fragmentos florestais, manejo de plantas invasoras e cordões vegetativos devem ser colocados em prática. A presença das pragas nas lavouras deve ser constantemente monitorada, via contagem de ovos, larvas e organismos adultos, como também vistoria das plantas para determinar o nível de dano em caso de doenças.

Em relação às culturas, é importante a seleção de material genético adaptado às condições de clima e solo da região, que apresente tolerância ou resistência aos organismos relacionados às pragas ou a doenças-chave dessas culturas.

O solo deve ser manejado a fim de promover uma nutrição equilibrada das plantas, utilizando-se de estratégias de adubação que valorizem a manutenção da biota, via práticas de Sistema Plantio Direto, adubação verde e uso de adubação orgânica via compostagem e biofertilizantes.

Deve-se respeitar as datas de plantio ou semeadura ótimas, para cada cultivar, bem como utilizar a correta densidade de plantas. Cada cultura deve ser implantada em um esquema planejado de rotação de culturas. A consorciação de culturas também deve ser priorizada, observando-se as espécies compatíveis entre si. Plantas e partes de cultura doentes devem ser eliminadas da lavoura.

O último passo é conhecer quais as estratégias curativas, dando-se preferência à utilização de insumos de baixa capacidade de contaminação ambiental. Como está sendo

abordado o manejo agroecológico, extratos vegetais podem ser utilizados, além de insumos com baixo impacto ambiental, como leite e urina de vaca, água de cinza e silicatos. No caso de insetos ou ácaros, podem-se utilizar armadilhas. As caldas fitoprotetoras (sulfocálcica, bordalesa, viçosa) podem ser utilizadas, quando necessário, porém de forma criteriosa, tomando-se o cuidado de evitar aplicações frequentes e sistemáticas (calendários de aplicação), principalmente as caldas que possuem cobre em sua composição.

9.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O agroecossistema, ao ser manejado dentro dos princípios da agroecologia, terá assegurado o equilíbrio dinâmico necessário à preservação e ao uso eficiente da água, visto que as práticas agrícolas indicadas nesse sistema são intrinsecamente vinculadas à utilização sustentável dos recursos naturais. A chave da questão está na diversidade, manejo da matéria orgânica, cobertura permanente do solo e a presença de áreas florestadas como parte integrante do sistema. É importante ressaltar que, no manejo dos agroecossistemas, em uma perspectiva agroecológica, a manutenção das áreas florestadas na propriedade rural não ocorre apenas pela exigência de cumprimento da legislação, mas pela sua inserção, em uma estratégia diferenciada de desenho do sistema, seja pelo abrigo de inimigos naturais, pela regulação climática, efeito quebra-ventos ou pela inerente importância à manutenção e preservação da água a partir da mata ciliar.

Altieri (2001) aponta que a preservação e a ampliação da biodiversidade dos agroecossistemas são o primeiro princípio utilizado na abordagem agroecológica para produzir autorregulação e sustentabilidade, buscando restituir a biodiversidade dos agroecossistemas. Quando essa meta é atingida, assim como nos ecossistemas naturais, diversas e complexas interações sinérgicas passam a estabelecer-se no sistema solo-planta, resultando em efeitos ambientalmente favoráveis, tais como a conservação do solo e recursos hídricos.

9.5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA EUROPEIA DO AMBIENTE (EEA). **Water for agriculture**. 31 de agosto de 2016. Disponível em: <<https://www.eea.europa.eu/articles/water-for-agriculture>>. Acesso em : 8 de outubro de 2018.

ALTIERI, M. **Agroecologia: A dinâmica produtiva da agricultura sustentável**. 3. ed. Porto Alegre: UFRGS, 2001. 110p.

ALTIERI, M. **Agroecologia: Bases científicas para uma agricultura sustentável**. Guaíba: Agropecuária, 2002. 592p.

BORTOLUZZI, E. C. et al. Contaminação de águas superficiais por agrotóxicos em função do uso do solo numa microbacia hidrográfica de Agudo, RS. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 10, n. 4, p. 881-887, 2006.

BRASIL. Lei nº 10.831, de 23 de dezembro de 2003. **Dispõe sobre a agricultura orgânica e dá outras providências**. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/2003/110.831htm>. Acesso em : 16 de outubro de 2018.

BRASIL. Decreto nº 6.323, de 27 de dezembro de 2007. **Regulamenta a Lei n.º 10.831, de 23 de dezembro de 2003, que dispõe sobre a agricultura orgânica, e dá outras providências**. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2007/Decreto/D6323.htm>. Acesso em: 16 de outubro de 2018

CAPORAL, F. R.; COSTABEBER, J. A. **Agroecologia e desenvolvimento rural sustentável: perspectivas para uma nova Extensão Rural**. In: ETGES, V. E. (org.). Desenvolvimento rural: potencialidades em questão. Santa Cruz do Sul: EDUSC, p. 19-52, 2001.

CARNEIRO, J. J. **Sistemas Agroecológicos Conservam Solo e Água**. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solos). Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas. Universidade Federal de Viçosa. UFV - Viçosa, MG, 2013. 104p.

EMBRAPA. **Práticas Conservacionistas de solos e águas. Levantamento e Conservação do Solo**. 45p. 2013. Disponível em: <<http://www.cpatc.embrapa.br/conservasolo/imagens/9.pdf>>. Acesso em: 28 janeiro, 2020.

GLIESSMAN, S. R. **Agroecologia: Processos agroecológicos em agricultura sustentável**. Editora da Universidade. Porto Alegre. UFRGS. 2000. 640p.

GOMES, M. A. F. G.; BARIZON, R. R. M. **Panorama da contaminação ambiental por agrotóxicos e nitrato de origem agrícola no Brasil: cenário 1992/2011**. Jaguariúna, SP: Embrapa Meio Ambiente, 2014. 36p.

GRASSI, M. T. As águas do planeta terra. **Cadernos Temáticos de Química Nova na Escola**. Ed. Esp. p. 31-40, 2001.

HUDSON, B. D. Soil organic matter and available water capacity. **Journal of Soil and Water Conservation, Ankeny**, v. 49, n.2, 189-194, 1994.

INTERNATIONAL FEDERATION OF ORGANIC AGRICULTURE MOVEMENTS – IFOAM. **Water**. Disponível em: <<https://www.ifoam.bio/organic-agriculture-pesticides>>. Acesso em: 17 de outubro de 2018.

KHATOUNIAN, C. A. **A reconstrução ecológica da agricultura**. Botucatu: Ed. Agroecológica, 2001. 345p.

MOREIRA, J. C. et al. Contaminação de águas superficiais e de chuva por agrotóxicos em uma região do estado do Mato Grosso. **Ciência e Saúde Coletiva**, Rio de Janeiro, v. 17, n. 6, p. 1557-1568, 2012.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS - ONU. **Water**. Disponível em: <<http://www.un.org/en/sections/issues-depth/water/index.html>>. Acesso em: 16 de outubro de 2018.

REICOSKY, D. C. Alternatives to mitigate the greenhouse effect: emission control by carbon sequestration. In: Simpósio sobre Plantio Direto e Meio ambiente; Sequestro de carbono e qualidade da água,. **Anais**. Foz do Iguaçu, 18-20 de maio 2005. p. 20-28.

RUY, R.; REIS, T. E. S. Risco de contaminação por agrotóxicos das águas subterrâneas em áreas cultivadas com cana-de-açúcar. **Pesticidas: Revista de Ecotoxicologia e Meio Ambiente**, Curitiba, v. 22, p. 77-84, 2012.

STEFFEN, G. P. K.; STEFFEN, R. B.; ANTONIOLLI, Z. I. Contaminação do solo e da água pelo uso de agrotóxicos. **Tecno-Lógica**, Santa Cruz do Sul, v. 15, n. 1, p. 15-21, 2011.

PORTUGAL, E. J.; PATRÍCIA BURTH, P.; FORTUNA, J. L. A contaminação por agrotóxicos em fontes de água de uma comunidade agrícola no Extremo Sul da Bahia. **Revinter**, v. 10, n. 2 p. 85-102. 2017.



ISBN: 978-65-86561-08-1



9 786586 561081