

Oswaldo Palma Lopes Sobrinho  
Brenda Abigail Freire de Jesus Coelho  
Wady Lima Castro Júnior  
Valdeci Calixto da Silva Filho  
Marconi Batista Teixeira

# INTERVALO HÍDRICO ÓTIMO E SEUS IMPACTOS NA QUALIDADE FÍSICA DO SOLO EM SISTEMAS AGRÍCOLAS

Oswaldo Palma Lopes Sobrinho  
Brenda Abigail Freire de Jesus Coelho  
Wady Lima Castro Júnior  
Valdeci Calixto da Silva Filho  
Marconi Batista Teixeira

**INTERVALO HÍDRICO ÓTIMO E SEUS IMPACTOS NA QUALIDADE FÍSICA DO  
SOLO EM SISTEMAS AGRÍCOLAS**

1ª edição

Editora Itacaiúnas  
Ananindeua-PA  
2024

©2024 por Oswaldo Palma Lopes Sobrinho, Brenda Abigail Freire de Jesus Coelho, Wady Lima Castro Júnior, Valdeci Calixto da Silva Filho e Marconi Batista Teixeira

*Todos os direitos reservados.*

1ª edição

#### **Conselho editorial / Colaboradores**

Márcia Aparecida da Silva Pimentel – Universidade Federal do Pará, Brasil  
José Antônio Herrera – Universidade Federal do Pará, Brasil  
Márcio Júnior Benassuly Barros – Universidade Federal do Oeste do Pará, Brasil  
Miguel Rodrigues Netto – Universidade do Estado de Mato Grosso, Brasil  
Wildoberto Batista Gurgel – Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Brasil  
André Luiz de Oliveira Brum – Universidade Federal de Rondônia, Brasil  
Mário Silva Uacane – Universidade Licungo, Moçambique  
Francisco da Silva Costa – Universidade do Minho, Portugal  
Ofélia Pérez Montero - Universidad de Oriente – Santiago de Cuba, Cuba

Editora-chefe: Viviane Corrêa Santos – Universidade do Estado do Pará, Brasil  
Editor e web designer: Walter Luiz Jardim Rodrigues – Editora Itacaiúnas, Brasil

Editoração eletrônica e capa: Walter Rodrigues

Revisão textual: dos autores

#### **Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD**

I61i	Intervalo hídrico ótimo e seus impactos na qualidade física do solo em sistemas agrícolas [recurso eletrônico] / Oswaldo Palma Lopes Sobrinho, Brenda Abigail Freire de Jesus Coelho, Wady Lima Castro Júnior, Valdeci Calixto da Silva Filho e Marconi Batista Teixeira. - 1. ed. – Ananindeua: Itacaiúnas, 2024.
	ISBN: 978-85-9535-271-1 (e-book) DOI: 10.36599/itac-978-85-9535-271-1
	1. Agricultura e tecnologias relacionadas. 2. Hidrosfera. Água em geral. Hidrologia. I. Título.
	CDD: 630 CDU: 556

#### **Índice para catálogo sistemático:**

1. Agricultura e tecnologias relacionadas: 630
2. Hidrosfera. Água em geral. Hidrologia: 556

E-book publicado no formato PDF (*Portable Document Format*). Utilize software [Adobe Reader](#) para uma melhor experiência de navegabilidade nessa obra.

---

Todo o conteúdo apresentado neste livro é de responsabilidade do(s) autor(es). Esta publicação está licenciada sob [CC BY-NC-ND 4.0](#)

Esta obra foi publicada pela Editora **Itacaiúnas** em julho de 2024.



## APRESENTAÇÃO

A crescente demanda pela produção de alimentos, impulsionada pelo aumento populacional e pela expansão das atividades agrícolas, coloca a agricultura em um papel central na busca pela sustentabilidade e preservação dos recursos naturais, principalmente o solo e a água. Em meio a esses desafios, a qualidade física do solo emerge como um dos pilares fundamentais para a produtividade agrícola e a saúde dos ecossistemas. É nesse contexto que o conceito de Intervalo Hídrico Ótimo (IHO) se destaca como uma ferramenta importante para a avaliação e o manejo da qualidade física dos solos.

O presente livro intitulado como "Intervalo hídrico ótimo e seus impactos na qualidade física do solo em sistemas agrícolas" tem como propósito aprofundar na compreensão sobre o IHO e sua relevância no contexto agrícola. Por meio de uma revisão minuciosa da literatura científica, buscou-se elucidar as principais descobertas e avanços relacionados ao IHO explorando suas implicações práticas e teóricas.

Neste estudo, abordou-se a importância do IHO como indicador da qualidade física do solo, destacando sua influência direta sobre o crescimento e desenvolvimento das plantas. Discutiu-se como a capacidade de retenção de água, a aeração e a resistência à penetração são afetadas por diferentes práticas de manejo do solo e como esses fatores interagem para determinar o IHO. Além disso, apresentaram-se metodologias para a determinação do IHO e análises comparativas entre diversos estudos, oferecendo um panorama abrangente e atualizado sobre o tema.

A revisão incluída neste livro também revisita as lacunas existentes na literatura e propõe novas direções para pesquisas futuras. Espera-se que este estudo sirva como um recurso valioso para pesquisadores, estudantes, agrônomos e todos aqueles interessados na sustentabilidade dos sistemas agrícolas e na conservação dos recursos naturais.

Ao explorar as complexas interações entre o solo, a água e as plantas, este livro visa contribuir para o desenvolvimento de práticas agrícolas eficientes e sustentáveis. Por meio do entendimento profundo do IHO, espera-se promover a adoção de estratégias de manejo que preservem a qualidade física do solo, garantindo a produtividade agrícola e a saúde ambiental a longo prazo.

Agradecemos a todos os pesquisadores cujos trabalhos foram fundamentais para a elaboração deste livro e dedicamos esta obra a todos que de alguma forma contribuem para a melhoria e sustentabilidade da agricultura.

**Os autores.**

## AUTORES



**Oswaldo Palma Lopes Sobrinho** - Doutor e Mestre em Ciências Agrárias - Agronomia com área de concentração em Produção Vegetal Sustentável no Cerrado e a Linha de Pesquisa em Tecnologias Sustentáveis em Sistemas de Produção e Uso do Solo e Água e Especialista em Formação de Professores e Práticas Educativas pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano - Campus Rio Verde (IF Goiano). Especialista em Saneamento e Saúde Ambiental pela Universidade Federal de Goiás (UFG). Engenheiro Agrônomo e Técnico em Agropecuária pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Maranhão (IFMA). Pesquisador do Grupo de Pesquisa cadastrado no Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico

e Tecnológico (CNPq) em Alimentos, Química, Agronomia e Recursos Hídricos (AQARH) e Integrante do Grupo de Pesquisa em Agricultura Irrigada em áreas de Cerrado do IF Goiano - Campus Rio Verde. Desenvolve pesquisas na grande área de Ciências Agrárias, com ênfase em Agrometeorologia, Engenharia de Água e Solo, Ciência do Solo e Fitotecnia. Além disso, dedica-se a estudos na área da Educação, buscando contribuir para a Formação, Saberes e Práticas Educativas de Professores Agrônomos.



**Brenda Abigail Freire de Jesus Coelho** - Graduada em Licenciatura Interdisciplinar em Ciências Naturais com Habilitação em Biologia pela Universidade Federal do Maranhão (UFMA) e em Ciências Contábeis pelo Centro Universitário da Grande Fortaleza (UNIGRANDE). Integrante do Grupo de Pesquisa cadastrado no Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) em Alimentos, Química, Agronomia e Recursos Hídricos (AQARH) do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Maranhão - Campus Codó (IFMA). Desenvolve pesquisas nas grandes áreas de Ciências da Educação e Biológicas, com ênfase em Botânica, Biologia Geral, Educação Ambiental,

além do interesse em Ciências Agrárias.



**Wady Lima Castro Júnior** - Doutor em Engenharia Agrícola pela Universidade Federal de Viçosa (UFV). Mestre em Agronegócios e Engenheiro Agrônomo pela Universidade de Brasília (UnB). Especialista em Programa Nacional de Integração da Educação Profissional com a Educação Básica na Modalidade de Educação de Jovens e Adultos (PROEJA) pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí (IFPI). Atualmente é Professor do Ensino Básico, Técnico e Tecnológico e Diretor-Geral do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Maranhão - Campus Codó (IFMA). Tem experiência na área de Agronomia, com ênfase em Engenharia de Água e Solo, atuando principalmente nos

seguintes temas: Hidráulica Agrícola, Meteorologia Agrícola, Manejo da Irrigação e Economia Rural.



**Valdeci Calixto da Silva Filho** – Mestre em Agronomia com área de concentração em Produção Vegetal pela Universidade Federal do Piauí (UFPI). Licenciado em Ciências Agrárias pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Maranhão (IFMA). Técnico em Agropecuária pela Escola Agrotécnica Federal de Codó/MA (EAF). Tem experiência nas grandes áreas de Ciências da Educação e Agrárias, com ênfase em Manejo e Tratos Culturais, atuando principalmente nos seguintes temas: Produção de Grandes Culturas, Uso e Manejo do Solo. Atualmente exerce o cargo de Vereador no município de

Codó-MA.



**Marconi Batista Teixeira** - Doutor em Agronomia pela Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" (ESALQ). Engenheiro Agrônomo e Mestre em Engenharia Agrícola pela Universidade Federal de Viçosa (UFV). Professor EBT e Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias - Agronomia PPGCA-Agronomia do Instituto Federal Goiano - Campus Rio Verde (IF Goiano). Tem experiência na área de Engenharia Agrícola, com ênfase em Irrigação e Drenagem, atuando principalmente nos seguintes temas: irrigação por gotejamento, hidráulica de sistemas de irrigação e manejo de irrigação.

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>10</b>
<b>2 QUALIDADE DO SOLO .....</b>	<b>13</b>
<b>3 ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO QUE AFETAM O CRESCIMENTO DE PLANTAS.....</b>	<b>16</b>
<b>4 INTERVALO HÍDRICO ÓTIMO COMO ATRIBUTO DE QUALIDADE FÍSICA .....</b>	<b>18</b>
<b>6 AVALIAÇÃO DA QUALIDADE FÍSICA DO SOLO.....</b>	<b>23</b>
<b>7 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>27</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>28</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O crescimento demográfico global, juntamente com o aumento da demanda por água e uso do solo tem gerado uma pressão significativa nos setores relacionados à produção de alimentos. Para otimizar os recursos naturais, pesquisas apontam para a criação e desenvolvimento de sistemas integrados de produção (Lopes Sobrinho et al., 2020). Essa demanda pode ser atendida por meio da expansão de terras cultivadas e da intensificação dos sistemas de cultivo, visando aumentar o rendimento das culturas.

No entanto, essa tendência também traz desafios significativos, como o aumento populacional, a insegurança alimentar, as mudanças climáticas, a escassez de água, o uso de combustíveis fósseis e a degradação do solo (Pradhan et al., 2015; Suhl et al., 2016; Pinstrup-Andersen, 2017). Estudos recentes, como os realizados por Mrabet (2023), Gamage et al. (2023) e Fayos e Vente (2023), destacam a urgência de adotar práticas agrícolas sustentáveis para atender à demanda global sem comprometer a saúde do solo e a biodiversidade.

Os solos são recursos imprescindíveis enquanto elemento central dos geoeossistemas, por exercer diferentes funções como a sustentação e a manutenção da qualidade ambiental, a produtividade primária de um sistema ecológico, o reservatório do carbono (C), a purificação e regulação da água, o habitat para atividade biológica, a produção de biomassa, o armazenamento e reciclagem de nutrientes dentre outros (Kang et al., 2011; Schulte et al., 2014; Wiesmeiera et al., 2019).

Os ciclos de transformações e os processos distintos que ocorrem no solo e suas interfaces fazem desse recurso um componente fundamental para os agroecossistemas em que o seu desempenho depende dos atributos utilizados como indicadores de qualidade física dos solos, os quais conforme o uso e práticas de manejo adotado podem ser conservados, melhorados ou degradados (Silva et al., 2016; García-Tejero et al., 2020; Kumar et al., 2020). Por conseguinte, a capacidade que o solo tem de garantir ao sistema radicular condições físicas propícias para o crescimento e desenvolvimento das culturas agrícolas denomina-se qualidade física do solo.

O conhecimento sobre os processos que comprometem a qualidade física do



solo (QFS), é importante para o sucesso no uso de práticas e determinar quais as mais adequadas à manutenção dos sistemas de produção agrícolas e definir o manejo mais eficiente para uma determinada região, tendo em vista que o cultivo pode ter interferência em qual seria a estratégia mais apropriada (Olibone et al., 2010; Cecagno et al., 2016; Skaf et al., 2019). Dessa forma, a QFS está relacionada com a aptidão do solo em exercer funções de aceitar, estocar e reciclar água, nutrientes e energia visando garantir o crescimento e desenvolvimento dos sistemas de produção agrícola (Tormena et al., 1998; Carter, 2001).

O processo gradual iniciado pela deterioração da estrutura do solo e o término na perda diferencial de partículas, por meio da erosão, é chamado de perda da qualidade do solo, associado também aos danos causados pelo uso e manejo. Logo, essa perda associam-se as modificações nos arranjos de agregados e poros do solo com a redução na disponibilidade de ar, água e nutrientes necessários à produção de biomassa (Six et al., 2004; Hubert et al., 2007; Omuto, 2008). Rabot et al. (2018) mencionam que a ligação entre os poros é importante para a biota do solo, crescimento e desenvolvimento das plantas e transporte de águas e gases. Em contrapartida, Stefanoski et al. (2016) relatam que o solo pode sofrer alterações negativas em sua estrutura, a medida em que é submetido a qualquer atividade agrícola devido à redução do seu espaço poroso.

As condições físicas do solo possuem estreita relação com a estrutura do solo e são determinadas por fatores como a disponibilidade de água, a aeração, a temperatura, práticas intensivas de cultivo, além da resistência que a matriz do solo proporciona à penetração das raízes (Lapen et al., 2004; Silva et al., 2016; Trevisan et al., 2017), o que irá influenciar na produtividade das culturas agrícolas. Com isso, um dos processos que mais altera a estrutura do solo é a compactação ou revolvimento (Rabot et al., 2018).

A identificação sobre as modificações de indicadores da qualidade física, estrutural e a avaliação dos impactos que as práticas de manejo causam no solo, se faz necessário levando em consideração os diferentes atributos deste recurso que expressem o ambiente, na qual as culturas estão inseridas (Doran; Parkin, 1994). Na caracterização das condições físicas do solo, os atributos mais comuns são a densidade do solo, a distribuição de poros, a resistência tênsil de agregados, a retenção e disponibilidade de água e índice S (Dexter, 2004; Reynolds et al., 2008; Tormena et al., 2008; Guimarães et al., 2009), mas as respostas das plantas são



dependentes da interação entre esses atributos dificultando estabelecer de forma isolada o efeito sobre o crescimento das plantas (Kaiser, 2009).

Partindo desse pressuposto, o Intervalo Hídrico Ótimo (IHO) inicialmente definido em inglês como *Least limiting water range* (LLWR) (Silva et al., 1994), se caracteriza como um indicador da qualidade física do solo, por integrar diversas variáveis em um único parâmetro essenciais para o crescimento e desenvolvimento das plantas oferecendo as mínimas restrições ao desenvolvimento radicular (Silva et al., 1994; Tormena et al., 1998). O estudo do IHO tem ganhado relevância crescente nas últimas décadas devido à sua importância na determinação da qualidade física do solo e no manejo eficiente dos recursos hídricos na agricultura. Historicamente, a gestão da água na agricultura tem sido um desafio constante, especialmente em regiões com variabilidade climática acentuada.

A motivação para esta obra partiu da necessidade de promover práticas agrícolas mais sustentáveis e eficientes, capazes de garantir a segurança alimentar e a conservação dos recursos naturais. O objetivo deste estudo foi investigar o conceito de Intervalo Hídrico Ótimo (IHO) e sua aplicação como um indicador da qualidade física do solo, particularmente no contexto da produção agrícola.

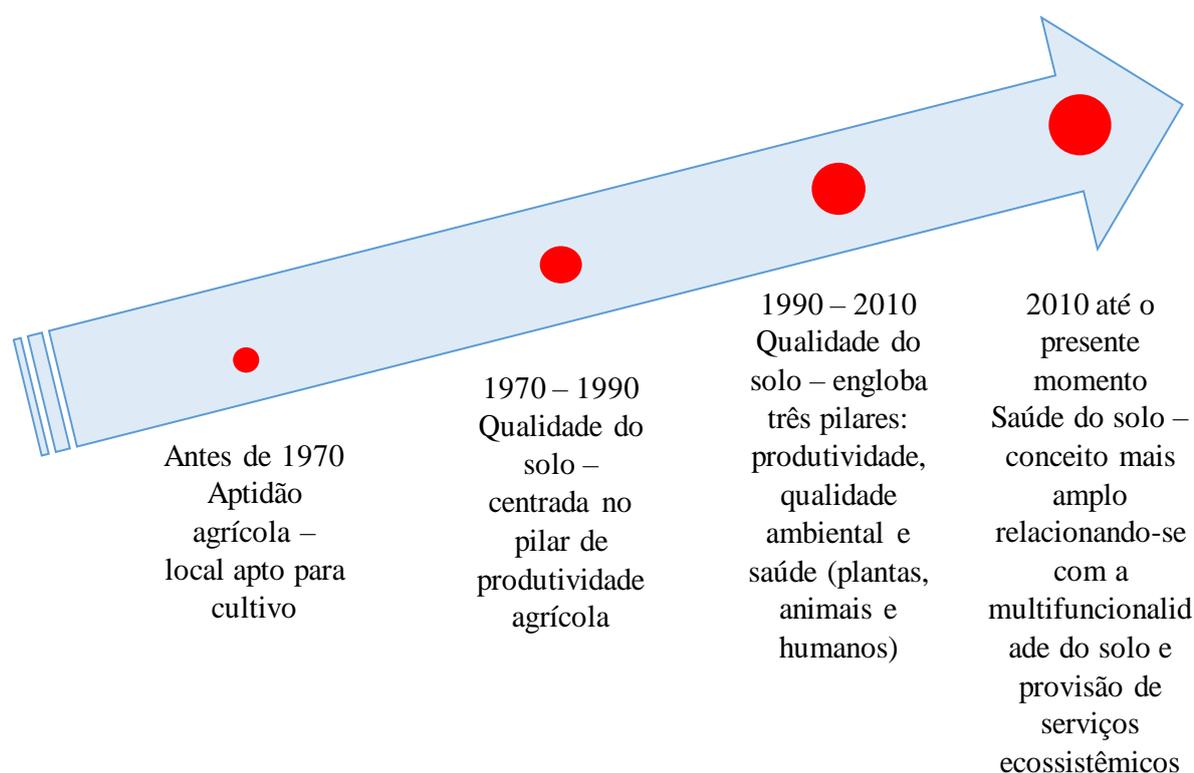
Esta análise visa entender como os atributos físicos do solo influenciados pelo IHO afetam o crescimento e desenvolvimento das plantas, além de identificar práticas de manejo que possam otimizar a qualidade física do solo, promovendo a sustentabilidade dos sistemas de cultivo e fornecer uma visão abrangente sobre o IHO, explorando suas aplicações práticas, benefícios e desafios.



## 2 QUALIDADE DO SOLO

Antes de definir o que é qualidade do solo (QS), é importante entender que esse conceito tem sido aprimorado desde seu surgimento na década de 1990. Nas últimas décadas, o termo "qualidade do solo" tem sido gradualmente substituído por "saúde do solo" (Cherubin; Carvalho; Rodrigues, 2023) (Figura 1).

**Figura 1.** Conceitos sobre saúde do solo e sua evolução de 1970 até os dias atuais.



Fonte: Cherubin; Carvalho; Rodrigues (2023)

Desde os anos 1970, quando o termo foi introduzido, a qualidade do solo em 1970 estava relacionado ao conceito de aptidão agrícola, que estabelece o potencial da área para uso agrícola com base em informações do meio físico, como relevo, tipo de solo e condições climáticas. O termo “qualidade do solo” surgiu em 1971, sendo definido como a capacidade do solo de suportar altas produtividades de grãos em condições de altos níveis tecnológicos. Por isso, este termo ficou associado por muito tempo à produtividade agrícola (Cherubin; Schiebelbein, 2022; Cherubin; Carvalho; Rodrigues, 2023). Estudos como os de Hartmann e Six (2023), Silvero et al. (2023),

Philippot et al. (2024) têm contribuído para expandir a compreensão da qualidade do solo, incluindo aspectos físicos, químicos e biológicos.

Na década de 1990 têm sido constante as preocupações da comunidade científica e foram incorporados os pilares ambiental e de saúde humana ao conceito de QS. Assim, uma nova definição passou a ser adotada: a capacidade de um tipo específico de solo funcionar, dentro dos limites do ecossistema natural ou manejado, para sustentar a produtividade biológica (plantas e animais), manter a qualidade ambiental e promover a saúde humana e habitação. Por fim, o papel dos componentes biológicos do solo foi incluído no conceito, que evoluiu para "saúde do solo" (Sans, 2000; Tótola e Chaer, 2002; Dexter, 2004; Vezzani e Mielniczuk, 2009). Apesar da evolução conceitual, os termos "qualidade do solo" e "saúde do solo" têm sido amplamente utilizados na literatura como sinônimos. Da mesma forma, pode-se considerá-los como sinônimos ao pensar na avaliação da qualidade dos solos nas propriedades agrícolas (Cherubin; Schiebelbein, 2022; Cherubin; Carvalho; Rodrigues, 2023).

O termo "qualidade do solo" vem sendo utilizado por diversas vezes como sinônimo de saúde do solo (Doran e Parkin, 1994; Bünemann et al., 2018), sendo importante devido à capacidade do solo em exercer determinadas funções, buscando dentro dos limites do uso da terra e do ecossistema natural, a sustentação da produtividade e da diversidade biológica, manter a qualidade do ar e da água e a contribuição para a saúde das plantas (Sposito e Zabel, 2003; Lal e Shukla, 2004). Partindo desse pressuposto, esse termo pode ser compreendido pela interação entre os condicionantes hidrológicos, geológicos, químicos, físicos e biológicos do solo (Bruggen e Semenov, 2000; Sposito e Zabel, 2003).

Estudos e avanços científicos e tecnológicos sobre a temática QS resultaram na caracterização do solo em função de sua qualidade, por meio da capacidade de sustentar e garantir a produtividade, a sustentabilidade ambiental, à prevenção da degradação do solo e a maximização da saúde vegetal e animal, ou seja, não se limita apenas a produção agrícola (Doran, 2002; Freitas et al., 2012; Bünemann et al., 2018).

Preocupados com o número excessivo de áreas com degradação física e química e contaminadas pelo uso de agrotóxicos, Lal e Pierci (1991) mencionaram a relação existente entre o manejo do solo e a sustentabilidade agrícola e concluem o solo não como um meio para maximização da produção, mas para otimização do uso e sustentação da produtividade por um determinado período (Karlen et al., 1997).



Por outro lado, Araújo (2012), Matchavariani (2019), Shamilishvili; Abakumov; Andersen (2020) trazem definições correlacionando a QS com os fatores de formação do solo (material de origem, relevo, organismos vivos, clima e tempo) e destacando como o ramo da pedologia, que trabalha com as características do solo e alterações oriundas da intervenção humana e natural com uma visão mais globalizada dos ecossistemas, tornando a avaliação da QS complexa.

Segundo a Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (FAO, 1991), o sistema que integra o manejo e a conservação dos recursos naturais com a prevenção da degradação do solo e da água face à combinação de tecnologias e atividades com princípios socioeconômicos e a preocupação ambiental define-se a sustentabilidade dos solos. Em contrapartida, mesmo buscando respeitar as perspectivas das gerações presentes e futuras sem comprometer o desenvolvimento de políticas ambientais sempre haverá riscos de que o crescimento econômico cause ao ambiente, tem em vista, a pressão exercida perante os recursos naturais, como exemplo, Rheinheimet et al. (2003) mencionam as atividades agropecuárias, por meio do mau uso do solo associadas ao emprego de pacotes tecnológicos, sem a devida preocupação ecológica (Costa et al., 2020).

No que se diz respeito à retenção e permeabilidade de água, à disponibilidade de nutrientes, dentre outros parâmetros, cada tipo de solo é responsável por proporcionar comportamentos distintos. Em função disso, a QS envolve os atributos físicos, químicos e biológicos relacionados ao crescimento das plantas, a regulação e distribuição de água no meio ambiente e a atuação como tampão ambiental. Em que, qualquer indicador de maneira individual não obtém êxito na descrição e na quantificação de todos os aspectos da QS devendo haver relação entre todos os atributos (Stenberg, 1999; Lisboa et al., 2016). Pois, a relação entre a QS e o manejo do solo pode ser mensurada pelo comportamento dos atributos do solo visando à melhoria no uso, no manejo e na conservação (Rahmanipour et al., 2014; Nabiollahi et al., 2017, Khadem e Raiesi, 2017).

Visando manter e/ou melhorar a qualidade física do solo, é necessário adotar técnicas de semeadura e cultivo que causem o mínimo possível de danos à estrutura do solo, ao manejo dos resíduos, à conservação de água e ao manejo da irrigação. Com isso, o manejo físico do solo consiste em melhorar os atributos edafológicos da zona radicular em relação à estrutura, a porosidade e a distribuição do tamanho de poros, a resistência mecânica, a taxa de infiltração, a capacidade de armazenamento



e a disponibilidade de água e temperatura (Lal, 2000). Assim, melhoria da produtividade por meio de valores ótimos relativos à qualidade física do solo em boas condições ambientais ainda são pouco conhecidos (Reynolds et al., 2002). Logo, a partir do conhecimento de limites críticos, delimitam-se faixas de umidade do solo com mínimos impedimentos físicos à produção das culturas (Carlesso, 2008).

### **3 ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO QUE AFETAM O CRESCIMENTO DE PLANTAS**

A qualidade física do solo em relação ao crescimento das plantas pode ser afetada não só pela disponibilidade de água, temperatura e aeração, mas também pela resistência que a matriz do solo proporciona à penetração das raízes. Por outro lado, a densidade do solo, a estabilidade de agregados, a estrutura, a textura e a distribuição do tamanho de poros são constituídas nos fatores indiretos (Hamblin, 1985; Letey, 1985; Boone et al., 1986; Rabot et al., 2018).

A retenção de água no solo, a aeração, disponibilidade de água e a resistência baseiam-se na condição estrutural do solo e, por conseguinte, no estado atual em que o solo é submetido a um determinado sistema de manejo. Pois, uma vez modificadas, essas propriedades ocasionadas pelo manejo incorreto irão causar queda de produção, aumento do processo erosivo e da potência necessária para o preparo do solo (Radford et al., 2001; Canillas e Salokhe, 2002; Beutler et al., 2008; Silva et al., 2017; Melo, 2018). O aumento na resistência do solo à penetração das raízes, na densidade do solo e a diminuição da macroporosidade podem ocasionar limitação da disponibilidade hídrica, de aeração e nutrientes e, conseqüentemente, restrições ao crescimento das culturas (Arcoverde, 2018).

A estrutura, a porosidade e a retenção de água no solo podem ainda ser alteradas pelo preparo do solo, principalmente o preparo convencional (aração e gradagem), as quais são mais rigorosas a estrutura do solo quando contrastadas ao sistema de plantio direto com a proporção de macroporos na camada superficial pela desagregação após o revolvimento. Portanto, quando o solo é revolvido, torna-se mais suscetível à compactação pela quebra da sua estrutura e redução da capacidade de suporte de carga (Guimarães Júnnyor et al., 2019). Esse sistema é responsável por favorecer a decomposição da matéria orgânica do solo, devido à destruição dos agregados com menor proteção da matéria orgânica pela decomposição bacteriana.



Conforme Six et al. (2002), a ausência de revolvimento garante melhor preservação da estrutura do solo com macroagregados mais estáveis.

A disponibilidade de água para culturas é mensurada pelo potencial da água no solo, determinada pelo tamanho dos poros estando relacionada com o estado de energia em que a água encontra-se retida no solo e, por conseguinte, a energia imprescindível para a água ser absorvida do solo pelas plantas (Letey, 1985). Assim, uma amostra compactada em baixas tensões retém menos água do que uma amostra que não estar compactada e o que pode influenciar nessa compactação são as modificações na condutividade hidráulica do solo, o que irá refletir na infiltração, na evaporação, na redistribuição e na ascensão capilar da água (Blum et al., 2014).

A aeração é influenciada pela porosidade de aeração e incide na troca de gases entre a raiz e a atmosfera, a qual é necessária para que as plantas atinjam uma ótima atividade metabólica. A maioria dos poros preenchidos com o processo de compactação some e são substituídos pelos pores menores responsáveis pela retenção da água e redução da taxa de difusão do oxigênio (Boone e Veen, 1994). A aeração em condições de alta umidade do solo pode ser deficiente e acabar prejudicando tanto as trocas gasosas quanto a respiração das raízes das plantas (Drew, 1983; Morard; Silvestre, 1996). Por outro lado, o crescimento radicular em condições de solo seco pode ser restringido a determinadas camadas ou bioporos do solo, devido à alta resistência oferecida pelas camadas compactadas (Montagu et al., 2001).

A germinação e emergência das plantas são determinadas pela temperatura do solo e esse regime térmico depende da cobertura vegetal superficial, do conteúdo de água, da intensidade e da duração da radiação solar (Zwirtes et al., 2017). Já a resistência à penetração estar relacionada com a matriz do solo em relação a sua resistência contra a deformação por uma raiz em crescimento (Panayiotopoulos; Papadopoulou e Hatjioannidou, 1994), podendo ser influenciada pela umidade e densidade, que aumenta à medida que a umidade do solo diminui devido ao aumento da resistência de fricção entre as partículas do solo e entre as partículas e as hastes dos penetrômetros (Ijima e Kato, 2007).

Segundo Taylor e Brar (1991), o comportamento de raízes das plantas pode sofrer modificações devidas às alterações nos fluxos e armazenamento de oxigênio e calor. Logo, a diminuição do tamanho das raízes é resultante do processo de compactação do solo, concentrada na camada mais superficial, com baixo volume de



raízes em profundidade (Lipiec et al., 2003). Para tanto, o aumento do diâmetro de raízes é resultante do aumento da resistência mecânica do solo e para adaptações em relação às mudanças na estrutura do solo são induzidas nas plantas modificações morfológicas e fisiológicas, como diminuição do diâmetro das raízes e proliferação de raízes laterais (Materchera et al., 1992).

As mobilizações mínimas do solo realizadas por meio de sistemas de cultivo, uma vez manejados de maneira correta contribuem para a qualidade física do solo, pois nesses sistemas o tempo é suficiente para o desenvolvimento da estrutura do solo e a formação de bioporos que apesar de uma matriz densa e com maior resistência mecânica podem atuar como rotas alternativas para o crescimento das raízes (Ehlers et al., 1983; Jimenez et al., 2008; Severiano et al., 2010; Bengough et al., 2011).

#### **4 INTERVALO HÍDRICO ÓTIMO COMO ATRIBUTO DE QUALIDADE FÍSICA**

Os pesquisadores Masle e Passioura (1987), Passioura e Gardner (1990), Davies e Zhang (1991), por meio de seus estudos têm demonstrado a interação entre as condições físicas do solo e o crescimento das plantas, já que as raízes dispõem de mecanismos responsáveis por detectar essas condições enviando sinais à parte aérea em controle ao crescimento e a expansão foliar. Pois, essas condições são mensuradas por atributos relacionados à estrutura do solo enfatizando a necessidade de um número mínimo que integrem tais condições levando em consideração os problemas que envolvem a redução de complexas interações para um único atributo (Boone et al., 1987; Boone, 1988; Dexter, 1988; Topp et al., 1994; Dexter, 2004).

De acordo com Reichert et al. (2003) diversos atributos são utilizados visando a caracterização e a qualificação da estrutura do solo, mas a resposta das plantas é dependente da interação entre esses atributos, o que dificulta estabelecer de forma isolada seu efeito. Partindo desse pressuposto, o IHO baseado nas pressuposições de Letey (1985) é um indicador de qualidade física do solo considerado como um “semáforo” por integrar as propriedades físicas imprescindíveis do solo para o crescimento e desenvolvimento das culturas, as quais correspondem ao intervalo entre os limites superior pela umidade do solo na capacidade de campo ou no conteúdo de água em que a aeração do solo se torna limitante e no limite inferior pelo



conteúdo de água no ponto de murcha permanente ou no conteúdo de água em que a resistência do solo à penetração torna-se fator limitante (Silva et al., 1994; Leão et al., 2004; Beutler et al., 2005; Klein e Camara, 2007; Tormena et al., 2007; Freddi et al., 2008).

Na concepção de Brito (2019), a variação do teor de água no solo em condições naturais predomina entre capacidade de campo e o ponto de murcha permanente, ou seja, o IHO tende ser igual à água disponível no solo. Tanto a resistência do solo à penetração quanto à porosidade de aeração não são limitantes nessas condições ou ainda o solo revolvido ocasionará destruição da estrutura, redução da densidade e da resistência à penetração (Serafim et al., 2013). Logo, sob diferentes condições estruturais, ou seja, naturais ou antrópicas (revolvimento) é possível obter valores de IHO semelhantes (Brito, 2019).

Para o desenvolvimento e crescimento das plantas, as condições de umidade são ideais quando ocorrem entre limites superior e inferior do IHO. Em contrapartida, essas condições tornam-se limitantes quando estão acima ou abaixo dos limites do IHO, além de críticas ao crescimento das culturas, quando a densidade do solo encontra-se acima da densidade crítica, o IHO é nulo (Silva e Kay, 1997; Collares et al., 2008). Por conseguinte, a obtenção da densidade crítica por meio do IHO pode auxiliar na tomada de decisões diante das condições de uso e práticas de manejo adotadas ou a serem adotadas em um determinado tipo de solo (Kaiser et al., 2009; Dias et al., 2016).

A densidade crítica pode variar conforme o nível de compactação e textura do solo; alta densidade faz com que os solos alcancem elevados níveis de resistência à penetração com menor variação de umidade e redução no crescimento das raízes das plantas (Goodman e Ennos, 1999; Wu et al. 2003; Reichert et al., 2009). No início do ciclo vegetativo, as plantas em ótimas condições mantem o sistema radicular de maneira superficial. Para tanto, em períodos de estiagem o acesso à água é limitado devido o solo seco e compactado oferecer alta resistência à penetração das raízes (Clark et al., 2003). Durante esse ciclo, quando a umidade do solo encontra-se fora dos limites do IHO incide menor crescimento radicular e da parte aérea com a possibilidade de redução na produtividade das culturas (Silva e Kay, 1996; Collares et al., 2006).

Solos com boa estrutura, densidade abaixo da crítica e macroporosidade acima de 10% proporcionam menor efeito sobre o crescimento radicular ainda que a



resistência do solo à penetração seja acima de 2 Mpa, uma vez que os poros são representados pelos caminhos preferenciais ao crescimento do sistema radicular com permissão da ocupação das camadas mais profundas em busca de água e nutrientes (Stirzaker et al., 1996; Rasse e Smucker, 1998; Collares et al., 2006). Ressalta-se ainda que, nem sempre é possível observar a resposta das plantas, quando o solo mantém resistência de 2 MPa por determinado período (Silva, 2003).

O efeito da alta resistência depende da fase em que a cultura se encontra e geralmente, o crescimento radicular cessa a partir do florescimento das plantas e a deficiência de água e oxigênio poderá ser fator limitante à produção das culturas, já que o seu desenvolvimento é alterado quando a água atinge potenciais menores que -1,5 MPa (Taiz et al., 2017). Em diversos estudos Klein e Libardi (2000), Beutler et al. (2005), Leão et al. (2004) foi considerado o valor de 2 Mpa como crítico ao crescimento das raízes e, em contrapartida, esse valor tem sido motivo de discussões pelos estudos de Klein e Camara (2007) e Calonego et al. (2011). Nem sempre é utilizado um único valor de resistência do solo à penetração para os diferentes usos e manejos do solo (Betioli Júnior et al., 2012; Moreira et al., 2014).

Diversos estudos Gubiani et al. (2013), Mishra et al. (2015), Cecagno et al. (2016), não evidenciam a relação existente de dependência entre o IHO, crescimento e desenvolvimento das culturas, causando controversas sobre a sua eficiência. Por outro lado, Van Lier e Gubiani (2015) relataram que a vasta utilização do IHO é simplesmente pela aplicabilidade metodológica e não pela sua eficiência. Para tanto, há estudos mais complexos que avaliam não só do conteúdo de água no solo disponível para as plantas por meio do IHO, mas também a associação com o potencial hídrico, o crescimento e desenvolvimento das culturas e as proposições de avanços metodológicos na tônica do IHO (Silva et al., 2015; Silva et al., 2019).

Diferentes estudos aderiram o IHO como indicador da qualidade física do solo, isso pode ser justificado devido às variáveis densidade do solo, porosidade de aeração, capacidade de campo, ponto de murcha permanente e a resistência à penetração serem atributos do solo que sofrem mudanças conforme o manejo e preparo do solo (Guimarães Júnnyor et al., 2015).

A densidade do solo é uma medida da compactação e está relacionada à massa do solo por unidade de volume. Solos com alta densidade são mais compactados, o que pode dificultar o crescimento das raízes e reduzir a infiltração de água e aeração. Este atributo é influenciado pelo manejo do solo, como o uso de



máquinas pesadas e a intensidade do cultivo (Shaheb; Venkatesh; Shearer, 2021).

A porosidade de aeração refere-se à quantidade de espaços vazios no solo que permitem a troca de gases entre o solo e a atmosfera, sendo importante para a respiração das raízes e dos microrganismos do solo. Os macroporos (com diâmetro maior que 0,08 mm) são essenciais para a aeração da matriz do solo e a condução da água durante a infiltração (Brown, 2021).

A capacidade de campo é a quantidade máxima de água que o solo pode reter após a drenagem livre ter cessado. Este atributo é importante para a disponibilidade de água às plantas. Práticas de manejo que aumentam a matéria orgânica e melhoram a estrutura do solo podem aumentar a capacidade de campo (Lal, 2020).

O ponto de murcha permanente é o teor de água no solo no qual as plantas não conseguem mais extrair água suficiente para atender suas necessidades, resultando em murcha permanente. Este atributo é influenciado pela textura do solo e pelo conteúdo de matéria orgânica. Manejos que melhoram a estrutura do solo podem ajudar a manter um teor de água adequado para as plantas (Torres et al., 2021)

A resistência à penetração mede a resistência do solo à penetração de raízes e ferramentas agrícolas. Solos compactados têm alta resistência à penetração, dificultando o crescimento radicular e a infiltração de água. O manejo adequado do solo, como a minimização do tráfego de máquinas pesadas pode reduzir a resistência à penetração (Souza et al., 2021).

Essas variáveis são essenciais para avaliar a qualidade física do solo porque refletem a sua capacidade de suportar a vida vegetal e a atividade biológica. Alterações no manejo e preparo do solo impactam diretamente esses atributos, influenciando a produtividade agrícola e a sustentabilidade dos agrossistemas.

## **5 INDICADORES DE QUALIDADE FÍSICA DO SOLO**

Os principais indicadores físicos do solo são textura, estrutura, resistência à penetração, plasticidade e capacidade de retenção de nutrientes, profundidade, capacidade de água disponível, percolação ou transmissão da água e sistema de cultivo (Santana e Bahia-Filho, 1999; Lal, 2000; Reynolds et al., 2002; Rucks et al., 2004) permitindo discorrer sobre as características de infiltração, a retenção e a disponibilidade de água, como o solo corresponde ao manejo e se tem resistência à degradação e ainda, a permissão de trocas de calor e gases e crescimento das raízes



(Reichert et al., 2003) (Tabela 1). A maneira como esses atributos se mostram propicia ou não condições adequadas para o desenvolvimento das culturas e manutenção da diversidade de organismos que habitam o solo (Araújo e Monteiro, 2007).

**Tabela 1.** Indicadores físicos que contribuem na avaliação da qualidade do solo.

<b>Indicadores</b>	<b>Descrição</b>	<b>Autor</b>
Textura	É responsável pela fertilidade potencial, aeração, permeabilidade, profundidade efetiva e umidade	Reichert; Reinert; Braida (2003) e Barrios; Coutinho; Medeiros (2012),
Estrutura	Influencia os fenômenos de germinação, crescimento das raízes, tráfego terrestre e erosão	Kibblewhite et al. (2008), Barrios; Coutinho; Medeiros (2012)
Profundidade	É influenciada e influencia o nível freático (acumulação/armazenamento de água/umidade).	Uberti (2011), Barrios; Coutinho; Medeiros (2012)
Porosidade	Influencia a ventilação do solo, a condução de água e nutrientes, o crescimento radicular	Hillel (1982), Carvalho; Goedert; Armando (2004), Barrios; Coutinho; Medeiros (2012)
Umidade	Influencia a consistência do solo (pegajosa, plástica, dura ou rígida)	Rucks et al. (2004)
Permeabilidade	Permite conhecer o tipo de drenagem, recalques de água e rebaixamento do nível de água	Caputo (1996), Braja (2007)
Capacidade de infiltração de água	Indica o risco de erosão e o desenvolvimento da planta	Mahilum (2004) Miller (2007)
Resistência mecânica à penetração	Influenciada pelo tipo de uso e manejo do solo	Carvalho; Goedert; Armando (2004) e Tavares; Ribon (2008)



## 6 AVALIAÇÃO DA QUALIDADE FÍSICA DO SOLO

A avaliação da qualidade do solo é realizada por meio do monitoramento dos atributos físicos, tais como densidade e porosidade, estado de agregação e de compactação, conteúdo de matéria orgânica e nível de atividade biológica, não podendo ser quantificados diretamente e sim estimados a partir de indicadores de qualidade (Bahia-Filho, 1998; Andrews et al., 2004; Silva et al., 2010). Por conseguinte, a qualidade do solo é importante por estar atrelada ao uso, à produtividade e à sustentabilidade global de agrossistemas visando à obtenção de informações sobre o manejo do solo e assegurar a tomada de decisões (Arcoverde, 2013).

A agregação do solo é a formação de grânulos ou agregados que são mantidos juntos por partículas de argila, matéria orgânica e substâncias adesivas. A boa agregação melhora a infiltração de água, reduz a erosão e facilita o crescimento radicular. Métodos como a estabilidade de agregados e a análise de distribuição de tamanhos de agregados são utilizados para avaliar a qualidade da agregação do solo (Ali et al., 2024).

A compactação ocorre quando as partículas do solo são pressionadas juntas, reduzindo o espaço poroso e aumentando a densidade do solo. A compactação pode ser causada por tráfego de máquinas agrícolas, pastoreio intensivo e práticas inadequadas de manejo. Solos compactados têm menor infiltração de água e maior risco de erosão. Técnicas como a penetrometria são usadas para avaliar a resistência do solo à penetração e identificar camadas compactadas (GÜRSOY et al., 2021).

A atividade biológica do solo, incluindo a presença de microorganismos, fauna do solo e raízes, é crucial para a decomposição da matéria orgânica e a ciclagem de nutrientes. Indicadores biológicos, como a respiração do solo, a biomassa microbiana e a atividade enzimática, são utilizados para avaliar a saúde biológica do solo (WOŁEJKO et al., 2020).

É necessária a inclusão dos atributos físicos que influenciam diretamente no desenvolvimento das plantas, sinalizando quando as propriedades de armazenamento e transmissão de fluidos no solo não estiverem mais com comportamentos adequados (Imhoff, 2002). Pois, as determinações desses atributos envolvem a obtenção de dados de difícil obtenção com dispêndio de tempo e recursos



para serem determinadas com necessidade de serem analisados em conjunto (Carlesso, 2008; Silva et al., 2009).

A matéria orgânica do solo é fundamental para a formação e estabilidade dos agregados, a retenção de água e nutrientes, ciclagem de nutrientes e a atividade biológica. A presença de matéria orgânica melhora a estrutura do solo e sua capacidade de sustentar a vida vegetal (Tisdal, 2020). Métodos de avaliação incluem a medição do teor de carbono orgânico total e a análise de frações de matéria orgânica.

Entre os diversos métodos de avaliação da qualidade do solo, a medição do teor de carbono orgânico total e a análise de frações de matéria orgânica são particularmente importantes. A medição do teor de carbono orgânico total (COT) é um indicador chave da qualidade do solo, pois está diretamente relacionado à matéria orgânica do solo, que influencia muitos de seus atributos físicos, químicos e biológicos. A medição do teor de COT é um método amplamente utilizado para avaliar a saúde do solo e pode ser realizada por meio de diferentes técnicas laboratoriais, como (Bessereau et al., 1991; Jarvie, 1991):

**Combustão seca:** esse método envolve a queima da amostra de solo a altas temperaturas (geralmente acima de 900 °C) em um analisador de carbono. O carbono presente na amostra é convertido em dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), que é medido para determinar o teor de COT. Este método é preciso e amplamente utilizado devido à sua confiabilidade.

**Combustão úmida:** neste método, a amostra de solo é tratada com um agente oxidante forte, como dicromato de potássio (K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub>) em presença de ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>). O carbono orgânico é oxidado e o CO<sub>2</sub> liberado é medido indiretamente (Afonso; Foltin, 2023). Este método é menos utilizado atualmente devido à presença de produtos químicos perigosos.

Na análise de frações de matéria orgânica, a matéria orgânica do solo não é homogênea, pois consiste em várias frações que variam em termos de composição química, tamanho de partícula e labilidade (Goveia, 2020). A análise dessas frações auxilia entender melhor a dinâmica da matéria orgânica no solo e seus efeitos na qualidade do solo. As principais frações da matéria orgânica do solo incluem:

**Matéria Orgânica Particulada (MOP):** consiste em partículas maiores de matéria orgânica que são menos decompostas e mais recentes. A MOP é geralmente separada por peneiramento úmido após a dispersão do solo. Ela é uma fração



importante para a estrutura do solo e a retenção de nutrientes (Oliveira et al., 2021).

**Carbono Orgânico Leve (COL):** inclui matéria orgânica leve que flutua quando o solo é misturado com um líquido de densidade conhecida, como água ou uma solução de densidade ajustada. Esta fração é facilmente disponível para a decomposição microbiana e é uma fonte rápida de nutrientes (Chan et al., 2022).

**Carbono Orgânico Mineral-Associado (COMA):** esta fração está associada às partículas minerais do solo e é mais resistente à decomposição. O COMA é importante para a estabilidade de longo prazo da matéria orgânica no solo (Guo et al., 2022)

Com relação a importância da análise de carbono orgânico total e frações de matéria orgânica, a medição do teor de COT fornece uma visão geral da quantidade de matéria orgânica presente no solo, enquanto a análise das frações de matéria orgânica ajuda a entender a qualidade e a estabilidade dessa matéria orgânica (Silva et al., 2022). Ambas as análises são essenciais para a avaliação da fertilidade do solo, pois, solos com altos níveis de COT e frações equilibradas de matéria orgânica geralmente têm melhor estrutura, maior capacidade de retenção de água e nutrientes e maior atividade microbiana.

**Gestão do Solo:** conhecer o teor de COT e a distribuição das frações de matéria orgânica ajuda os agricultores e gestores de terras a adotar práticas de manejo que mantenham ou melhorem a saúde do solo, como a adição de matéria orgânica, o uso de culturas de cobertura e a minimização do revolvimento do solo (Silva et al., 2022).

**Sustentabilidade Ambiental:** solos ricos em carbono orgânico ajudam a sequestrar carbono, contribuindo para a mitigação das mudanças climáticas. Além disso, a matéria orgânica do solo desempenha um papel crucial na purificação da água e na redução da erosão do solo (Tisdal, 2020). Essa abordagem fornece uma explicação abrangente sobre os métodos de avaliação do carbono orgânico total e a análise de frações de matéria orgânica, destacando sua importância para a qualidade do solo e a sustentabilidade agrícola.

Os métodos tradicionais de avaliação da qualidade física do solo envolvem análises laboratoriais e de campo. A coleta de amostras de solo e a realização de testes físicos, como a medição de densidade e porosidade são práticas comuns. Embora precisos, esses métodos podem ser laboriosos e dispendiosos. Recentemente, tecnologias emergentes têm sido desenvolvidas para melhorar a avaliação da qualidade do solo. Sensores de solo, imagens de satélite e técnicas de espectroscopia são algumas das ferramentas modernas que permitem uma análise



mais rápida e detalhada dos atributos físicos do solo (Abdulraheem et al., 2023). Esses métodos oferecem a vantagem de monitoramento contínuo e em tempo real, proporcionando dados mais abrangentes e acessíveis.

Estudos como Gonçalo Filho et al. (2018), Rahman et al. (2020), Pessina et al. (2021) na região Nordeste do Brasil demonstraram que práticas de manejo sustentável, como a adição de matéria orgânica e a redução do tráfego de máquinas, melhoraram significativamente a qualidade física do solo, aumentando a produtividade das culturas locais.

A implementação de técnicas de agricultura de precisão, utilizando sensores de solo para monitoramento contínuo, resultou em um uso mais eficiente de água e nutrientes, promovendo a sustentabilidade dos sistemas agrícolas. A principal dificuldade na avaliação da qualidade física do solo é a necessidade de dados detalhados e a complexidade das interações entre os diferentes atributos do solo (Oliveira et al., 2021). No entanto, a integração de novas tecnologias e a adoção de práticas de manejo sustentável apresentam grandes oportunidades para a melhoria da qualidade do solo e a produtividade agrícola.

A avaliação da qualidade física do solo é um componente essencial para a gestão sustentável dos recursos naturais e a promoção da produtividade agrícola. O entendimento e monitoramento dos atributos físicos do solo, como densidade, porosidade, agregação, compactação, matéria orgânica e atividade biológica são importantes para a tomada de decisões informadas e eficazes no manejo do solo.



## 7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este livro oferece uma contribuição significativa para o campo da gestão hídrica na agricultura, apresentando um panorama abrangente sobre o IHO e suas aplicações práticas. A aplicação do IHO pode melhorar a eficiência do uso da água e a produtividade agrícola, porém, observa-se a necessidade de desenvolver metodologias mais acessíveis para a sua determinação

O IHO por ser um dos principais indicadores na avaliação da qualidade e condições físicas do solo integra os atributos físicos de importância para o crescimento e desenvolvimento das culturas e efeitos do conteúdo de água no solo sobre as variações do potencial mátrico, aeração e resistência mecânica do solo, podendo sofrer influência pelo uso e manejo de práticas intensivas no solo.

A necessidade da quantificação na avaliação da influência do uso e práticas de manejo sobre as condições físicas do solo evidencia o conhecimento e reconhecimento da ocorrência desta interação e a interferência de que as plantas estão propícias, sendo que o intervalo hídrico ótimo vem sendo utilizado cada vez mais nas pesquisas visando monitoramento da qualidade física do solo.

Futuros estudos devem explorar a aplicação do IHO em diferentes contextos climáticos e tipos de solo, recomendando a investigação entre a relação entre o IHO e a qualidade do solo em longo prazo e os impactos econômicos da adoção dessas práticas para os agricultores.



## REFERÊNCIAS

Abdulraheem, M. I. et al. Advancement of remote sensing for soil measurements and applications: A comprehensive review. *Sustainability*, v. 15, n. 21, p. 15444, 2023.

Afonso, A. R. E.; Foltin, J. P. A Substituição da Análise de Demanda Química de Oxigênio (DQO) pela de Carbono Orgânico Total (TOC) e Elaboração de um Fator (K) para Conversão dos Resultados das Técnicas em Efluentes Industriais. *Revista Brasileira de Processos Químicos*, v. 4, n. 1, p. 26-50, 2023.

ALI, Numan et al. Microbial extracellular polymeric substance and impacts on soil aggregation. In: *Bacterial Secondary Metabolites*. Elsevier, 2024. p. 221-237.

Andrews, S. S.; Karlen, D. L.; Cambardella, C. A. The soil management assessment framework: a quantitative soil quality evaluation method. *Soil Science Society of America Journal*, v. 68, p. 1945-1962, 2004.

Araújo, A. S. F.; Monteiro, R. T. R. Indicadores biológicos de qualidade do solo. *Journal Biosci*, v. 23, n. 3, p. 66-75, 2007.

Araújo, Edson Alves et al., Qualidade do solo: conceitos, indicadores e avaliação. *Applied Research & Agrotechnology*, v. 5, n. 1, p. 187-206, 2012.

Arcoverde, S. N. S. *Atributos físicos e desempenho de cultivares de cana-de-açúcar em um Latossolo Vermelho Distroférrico submetido a dois sistemas de preparo*. 2018. 136f. Tese (Doutorado em Agronomia – Produção Vegetal) – Universidade Federal da Grande Dourados - UFGD, Dourados.

Arcoverde, S. N. S. *Qualidade de solos sob diferentes usos agrícolas na região do entorno do lago de Sobradinho-BA*. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal do Vale do São Francisco, Campus Juazeiro, 2013.

Barrios, E.; Coutinho, H. L. C.; Medeiros, C. A. B. InPaC-S: Participatory knowledge integration on indicators of soil quality, methodological guide. *World agroforestry, Embrapa and Centro Internacional de Agricultura Tropical*. 180p. 2012.

Bengough, A. G.; Mckenzie, B. M.; Hallett, P. D.; Valentine, T. A. Root elongation, water stress, and mechanical impedance: A review of limiting stresses and beneficial root tip traits. *J. Exper. Bot.*, 62:59-68, 2011.

Bessereau, G.; Carpentier, B.; Huc, A. et al. *Wireline logging and source rock estimation of organic carbon content by the carbolbg@ method*. *The Log Analyst*, 32(03), 1991.

Betioli Júnior, E.; Moreira, W. H.; Tormena, C. A.; Ferreira, C. J. B.; Silva, A. P.; Giarola, N. F. B. 2012. Intervalo hídrico ótimo e grau de compactação de um Latossolo vermelho após 30 anos sob plantio direto. *Revista Brasileira Ciência do Solo*, 36, 971–982. DOI: 0.1590/S0100-06832012000300027

Beutler, A. N.; Centurion, J. F.; Silva, A. P. Soil resistance to penetration and least



limiting water range for soybean yield in a haplustox from Brazil. *Braz. Arch. Biol. Technol.*, 48:863-871, 2005.

Beutler, A. N.; Centurion, J. F.; Silva, A. P.; Centurion, M. A. P. C.; Leonel, C. L.; Freddi, O. S. Soil compaction by machine traffic and least limiting water range related to soybean yield. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 43, n. 11, p. 1591- 1600, 2008.

Blum, J.; Giarola, N. F. B.; Silva, A. P.; Guedes Filho, O.; Silva, S. G. C.; Eberhardt, D. N.; Araujo, S. R. Assessment of soil physical attributes at sowing row and inter-row under no-till system. *Revista Ciência Agronômica*, v. 45, p. 888-895, 2014. DOI: 0.1590/S1806-66902014000500004

Boone, F. R.; Van Der Werf, H. M. G.; Kroesbergen, B.; Ten Hag, B.A. & Boers, A. The effect of compaction of the arable layer in sandy soils on the growth of maize for silage. II. Soil conditions and plant growth. *Neth. J. Agric. Res.*, 35:113-128, 1987.

Boone, F. R.; Veen, B. W. Mechanisms of crop responses to soil compaction. In: Soane, B. D.; Van Ouwerkerk, C. (Ed.). *Soil compaction in crop production*. Amsterdam: Elsevier, 1994. p. 237-264. (Developments in Agricultural Engineering, 11).

Boone, F.R. Wheater and other enviromental factors influencing crop responses to tillage and traffic. *Soil Till., Res.*, 11:283- 324, 1988.

Boone, F.R.; Van Der Werf, H.M.G.; Kroesbergen, B.; Ten Haag, B.A. & Boers, A. The effect of compaction of arable layer in a sandy soils on the growth of maize for silage. I. Critical potentials in relation to soil aeration and mechanical impedance. *Neth. J. Agric. Res.*, 34:155-171, 1986.

Braja, M. D. *Fundamentos de Engenharia Geotécnica*. São Paulo: Thomson Learning, 561p. 2007.

Brito, M. F. *Intervalo hídrico ótimo como indicador de qualidade física de um Latossolo Vermelho, após 26 de adoção de sistemas de integração lavoura-pecuária*. Mestrado em Ciências Agrárias – Agronomia. Rio Verde, 2019. 65 p.

BROWN, Sandra et al. Soil Physics. *Digging into Canadian Soils*, 2021.

Bruggen, A. H. C; Semenov, A. M. In search of biological indicators for soil health and disease suppression. *Applied soil Ecology*, 15, n. 1, p. 13-24, 2000.

Bünemann, E. K.; Bongiorno, G.; Bai, Z.; Creamer, R. E.; Deyn, G.; Goede, R.; Fleskens, L.; Geissen, V.; Kuyper, T. W.; Mäder, P.; Pulleman, M.; Sukkel, W.; van Groenigen, J. W.; Brussaard, L. Soil quality – A critical review. *Soil Biol. Biochem.*, 120, 2018, pp. 105-125.

Calonego, J. C.; Borghi, E.; Crusciol, C. A. C. Intervalo hídrico ótimo do solo com cultivo consorciado de milho e braquiária. *R. Bras. Ci. Solo*, 35:2183-2190, 2011.

Canillas, E. C.; Salokhe, V. M. A decision support system for compaction assessment



in agricultural soils. *Soil Tillage Research*, v. 65, n. 2, p. 221-230, 2002.

Caputo, H. P. Mecânica dos Solos e Suas Aplicações. Rio de Janeiro: *Livros Técnicos e Científicos*, 6ª edição, 234p. 1996.

Carlesso, R. La Agricultura de Precisión y los Sistemas de Riego. In. III Congreso Nacional – II Congreso Iberoamericano de Riego y Drenaje. *Anais...* 2008, Lima-Peru.

Carter, M. R. Organic matter and sustainability. In: Rees, B. C.; Ball, B. C.; Campbell, C. D. & Watson, C. A., eds. *Sustainable management of soil organic*. Wallingford, CAB International, p. 9-22, 2001.

Carvalho, R.; Goedert, W. J.; Armando, M. S. Atributos físicos da qualidade de um solo sob sistema agroflorestal. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 39, n.11, p.1153-1155. 2004.

Cecagno, D., Costa, S. E. V. G. A., Anghinoni, I., Junrath, T. R., Martins, A. P., Reichert, J. M., Gubiani, I., Balerini, F., Fink, J. R., Carvalho, P. C. F., 2016. Least limiting water range and soybean yield in a long-term, no-till, integrated crop-livestock system under different grazing intensities. *Soil Tilage Res.*, 156, 54–62. DOI: 10.1016/j.still.2015.10.005

CHAN, Sook Sin et al. Recent advances biodegradation and biosorption of organic compounds from wastewater: Microalgae-bacteria consortium-A review. *Bioresource Technology*, v. 344, p. 126159, 2022.

Cherubin, M. R.; Carvalho, M. L.; Rodrigues, M. Saúde do solo: entendendo os conceitos, relevância e suas aplicações na agricultura e meio ambiente. *Informações Agrônomicas: Nutrição de plantas*, NPCT, nº 18. Junho de 2023. p. 15-23.

Cherubin, M. R.; Schiebelbein, B. E. *Saúde do solo: múltiplas perspectivas e percepções*. 1.ed. Piracicaba: ESALQ-USP, 2022. v.1. 126 p.

Clark, L. J.; Whalley, W. R.; Barraclough, P. B. How do roots penetrate strong soil? *Plant Soil*, 255:93-104, 2003.

Collares, G. L.; Reinert, D. J.; Reichert, J. M.; Kaiser, D. R. Compactação de um Latossolo induzida pelo tráfego de máquinas e sua relação com o crescimento e produtividade de feijão e trigo. *R. Bras. Ci. Solo*, 32:933-942, 2008.

Collares, G. L.; Reinert, D. J.; Reichert, J. M.; Kaiser, D. R. Qualidade física do solo na produtividade da cultura do feijoeiro num Argissolo. *Pesq. Agropec. Bras.*, 41:1663-1674, 2006.

Costa, S. A. T. C.; Bezerra, A. C.; Silva-Ferreira, M.; Nascimento, A. H. C.; Pessoa, L. G. M. Extensão rural para conservação do solo na agricultura familiar. *Revista Extensão em Foco*, n. 20, p. 18-30, 2020.

Davies, W. J. & Zangh, J. Root signals and the regulation of growth and development of plants in drying soil. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*,



42:55-76, 1991.

Dexter, A. R. Advances in characterization of soil structure. *Soil Till., Res.*, 11:199-238, 1988.

Dexter, A. R. Soil physical quality. Part I - Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. *Geoderma*, 120:201-214, 2004.

Dias, C. B.; Rocha, G. C.; Assis, I. R.; Fernandes, R. B. A. Intervalo hídrico ótimo e densidade crítica de um Latossolo Amarelo coeso sob diferentes usos no ecossistema Tabuleiro Costeiro. *Revista Ceres*, v. 63, n. 6, p. 868-878, 2016. DOI: 10.1590/0034-737X201663060017

Doran, J. W. (2002). Soil health and global sustainability: translating science into practice. *Agriculture, ecosystems & environment*, 88, 119-127.

Doran, J. W.; Parkin, T. B. *Defining and assessing quality*. In: Doran, J. W. et al. (Ed.), *Defining soil quality for a sustainable environment*. Baltimore: SSSA, 1994.p. 3-21. (Spec. Publ. 35).

Drew, M.C. Plant injury and adaptation to oxygen deficiency in the root environment: A review. *Plant Soil*, 75:179-199, 1983.

Ehlers, W.; Kopke, U.; Hesse, F.; Bohm, W. Penetration resistance and root growth of oats in the tilled and untilled loess soil. *Soil Tillage Res.*, 3:261-275, 1983.

FAO (Food and Agriculture Organization). The den Bosh declaration and agenda for action on sustainable agriculture and rural development. FAO, Rome: 1991. Report of the conference.

Fayos, C. B.; Vente, J. de. Challenges and potential pathways towards sustainable agriculture within the European Green Deal. *Agricultural Systems*, v. 207, p. 103634, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2023.103634>

Freddi, O. S.; Centurion, J. F.; Aratani, R. G.; Beutler, A. N. Compactação do solo e intervalo hídrico ótimo no crescimento da parte aérea e produtividade da cultura do milho. *Irriga*, 13:272-287, 2008.

Freitas, D. A. F. et al., Índices de qualidade do solo sob diferentes sistemas de uso e manejo florestal e cerrado nativo adjacente. *Revista de Ciências Agronômicas*, Fortaleza, v. 43, p. 417-428, 2012.

Gamage, A. et al. Role of organic farming for achieving sustainability in agriculture. *Farming System*, v. 1, n. 1, p. 100005, 2023.

García-Tejero, I. F.; Carbonell R.; Ordoñez, R.; Torres, F. P.; Durán Zuazo, V. H. Conservation Agriculture Practices to Improve the Soil Water Management and Soil Carbon Storage in Mediterranean Rainfed Agro-Ecosystems. In: Meena R. (eds) *Soil Health Restoration and Management*. Springer, Singapore, 2020. 10.1007/978-981-13-8570-4\_6



GONÇALO FILHO, Francisco; FERREIRA NETO, Miguel; FERNANDES, Cleyton dos Santos; DIAS, Nildo da Silva; CUNHA, Rutilene Rodrigues da; MESQUITA, Francisco de Oliveira. Efeitos do manejo sustentável da Caatinga sob os atributos físicos do solo. *Pesquisa Florestal Brasileira*, [S. l.], v. 38, 2018.

Goodman, A. M.; Ennos, A. R. The effects of soil bulk density on the morphology and anchorage mechanics of the root systems of sunflower and maize. *Ann. Bot.*, 83:293-302, 1999.

GOVEIA, Danielle. *Metais em sistemas aquáticos: biodisponibilidade e influência da matéria orgânica*. 1ª ed. – Curitiba, Editora Appris, 2020, 157p.

Gubiani, P. I.; Goulart, R. Z.; Reichert, J. M.; Reinert, D. J. 2013. Crescimento e produção de milho associados com o intervalo hídrico ótimo. *Rev. Bras. Ciênc. Solo*, 37, 1502–1511. DOI: 10.1590/S0100-06832013000600007.

Guimarães Júnnyor, W. S., Severiano, E. C., Silva, A. G., Gonçalves, W. G., Andrade, R., Martins, B. R. R., Custódio, G. D., 2015. Sweet sorghum performance affected by soil compaction and sowing time as a second crop in the Brazilian cerrado. *Rev. Bras. Ciênc. Solo*, 39, 1744–1754. DOI: 10.1590/01000683rbcs20150121

Guimarães, R. M. L.; Tormena, C. A.; Alves, S. J.; Fidalski, J.; Blainski, E. Tensile strength, friability and organic carbon in an Oxisol under a crop-livestock system. *Sci. Agric.*, 66:499-505, 2009.

GUO, Xiaowei et al. Particulate and mineral-associated organic carbon turnover revealed by modelling their long-term dynamics. *Soil Biology and Biochemistry*, v. 173, p. 108780, 2022.

GÜRSOY, Songül. Soil compaction due to increased machinery intensity in agricultural production: its main causes, effects and management. *Technology in Agriculture*, p. 1-18, 2021.

Hamblin, A. P. The influence of soil structure on water movement, crop root growth and water uptake. *Advances in Agronomy*, 38:95-158, 1985.

Hartmann, M.; Six, J. Soil structure and microbiome functions in agroecosystems. *Nature Reviews Earth & Environment*, v. 4, n. 1, p. 4-18, 2023.

Hillel, D. *Introduction to soil physics*. Department of Plant and Soil Sciences, University of Massachusetts, Amherst, Massachusetts. Academic Press., 364p. 1982.

Hubert, F.; Hallaire, V.; Sardini, P.; Caner, L. & Heddadj, D. Pore morphology changes under tillage and no-tillage practices. *Geoderma*, 142:226-236, 2007.

Ijima, M.; Kato, J. Combined soil physical stress of soil drying, anaerobiosis and mechanical impedance to seedling root growth of four crop species. *Plant Production Science*, v. 10, p. 451-459, 2007.



Imhoff, S. D. C. *Indicadores de qualidade estrutural e trafegabilidade de Latossolos e Argissolos Vermelhos*. Tese de doutorado, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002. 104p.

Jarvie, D. M. (1991). Total organic carbon (toc) analysis: *Chapter 11: geochemical methods and exploration*.

Jimenez, R. L.; Gonçalves, W. G.; Araújo Filho, J. V.; Assis, R. L.; Pires, F. R. & Silva, G. P. Crescimento de plantas de cobertura sob diferentes níveis de compactação em um Latossolo Vermelho. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 12:116-121, 2008.

Kaiser, D. R.; Reinert, D. J.; Reichert, J. M.; Collares, G. L.; Kunz, M. Intervalo hídrico ótimo no perfil explorado pelas raízes de feijoeiro em um Latossolo sob diferentes níveis de compactação. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 33:845-855, 2009.

Kang, X.; Hao, Li, C.; Cui, X.; Wang, J.; Rui, Y.; Niu, H.; Wang, Y. Modeling impacts of climate change on carbon dynamics in a steppe ecosystems in Inner Mongolia, China *Journal Soils Sediments*, v. 11, p. 562-576. 2011. DOI: 10.1007/s11368-011-0339-2

Karlen, D. L.; Mausbach, M.J.; Doran, J. W.; Cline, R.G.; Harris, R. F.; Schuman, G. E. Soil quality: a concept, definition, and framework for evaluation (a guest editorial). *Soil Science Society of American Journal*, 61: 4-10, 1997.

Khadem, Allahyar; Raiesi, Fayed. Responses of microbial performance and community to corn biochar in calcareous sandy and clayey soils. *Applied Soil Ecol.* 2017; 114: 16-27.

Klein, V. A.; Camara, R. K. Rendimento da soja e intervalo hídrico ótimo em Latossolo Vermelho sob plantio direto escarificado. *R. Bras. Ci. Solo*, 31:221-227, 2007.

Klein, V. A.; Libardi, P.L. Faixa de umidade menos limitante ao crescimento vegetal e sua relação com a densidade do solo ao longo do perfil de um Latossolo Roxo. *Ci. Rural*, 30:959-964, 2000.

Kumar N.; Kumar A.; Jeena N.; Singh R.; Singh H. (2020) Factors Influencing Soil Ecosystem and Agricultural Productivity at Higher Altitudes. In: Goel R., Soni R., Suyal D. (eds) *Microbiological Advancements for Higher Altitude Agro-Ecosystems & Sustainability*. Rhizosphere Biology. Springer, Singapore. DOI: 10.1007/978-981-15-1902-4\_4

Lal, R. Physical management of soils of the tropics: Priorities for the 21ST Century. *Soil Science*. 165:191-207, 2000.

Lal, R. Physical management of soils of the tropics: priorities for the 21st century. *Soil Science*, v. 165, n.3, p. 191-207. 2000.

Lal, R., & Shukla, M. K. Principles of soil physics. CRC Press, 2004.



Lal, R.; Pierce, F. J. The vanishing resource. In: Lal, R.; Pierce, F.J., eds. *Soil management for sustainability*. Ankeny, Soil Water Conservation Society, 1991, p. 1-5.

Lal, Rattan. Soil organic matter and water retention. *Agronomy Journal*, v. 112, n. 5, p. 3265-3277, 2020.

Lapen, D. R.; Topp, G. C.; Gregorich, E. G. & Curnoe, W. E. Least limiting water range indicators of soil quality and corn production, eastern Ontario, Canada. *Soil Till. Res.*, 78:151-170, 2004.

Leão, T. P.; Silva, A. P.; Macedo, M. C. M.; Imhoff, S.; Euclides, V. P. B. Intervalo hídrico ótimo na avaliação de sistemas de pastejo contínuo e rotacionado. *R. Bras. Ci. Solo*, 28:415-423, 2004.

Letey, J. Relationship between soil physical properties and crop production. *Adv. Soil Sci.*, 1:277-294, 1985.

Lipiec, J.; Medvedev, V.V.; Birkas, M.; Dumitru, E.; Lyndina, T.E. ; Rousseva, S.; Fulajtár, E. Effect of soil compaction on root growth and crop yield in Central and Eastern Europe. *International Agrophysics*, v. 17, p. 61–69, 2003.

Lisboa, F.M. et al. 2016. Indicadores de qualidade de Latossolo relacionados à degradação de pastagens. *Pesquisa agropecuária brasileiro* 9, p.1184-1193.

Lopes Sobrinho, O. P.; Santos, L. N. S.; Santos, G. O.; Cunha, F. N.; Soares, F. A. L.; Teixeira, M. B. Balanço hídrico climatológico mensal e classificação climática de Köppen e Thornthwaite para o município de Rio Verde, Goiás. *Revista Brasileira de Climatologia*, v. 27, p. 19-33, 2020. <http://dx.doi.org/10.5380/abclima.v27i0.68692>

Mahilum, B. C. *Basic Soil Science and Concepts in Tropical Soils*. Trop Ag Hawaii, Inc., Honoka, 284p. 2004.

Masle, A.; Passioura, J. B. Effect of soil strength on the growth of young wheat plants. *Australian Journal of Plant Physiology*, 14:634-656, 1987.

Matchavariani L. (2019) Soil-Forming Factors. In: Matchavariani L. (eds) *The Soils of Georgia*. The Soils of Georgia. World Soils Book Series. Springer, Cham. pp 19-50. DOI: 10.1007/978-3-030-18509-1\_3

Materechera, S. A.; Alston, A. M.; Kirby, J. M.; Dexter, A. R. Influence of root diameter on the penetration of seminal roots into a compacted subsoil. *Plant and Soil*, v. 144, p. 297-303, 1992.

Melo, N. C. *Atributos físicos do solo, crescimento e produtividade de cana-deaçúcar em solos submetidos à escarificação*. 2018. 58f. Tese (Doutorado em agronomia – Ciência do solo) – Universidade Estadual Paulista – UNESP, Jaboticabal.

Miller, G. T. *Ciencia ambiental: Desarrollo sostenible, un enfoque integral*. Thomson. Octava edición. México, 323p. 2007.



Mishra, A. K., Aggarwal, P., Bhattaacharyya, R., Das, T. K., Sharma, A. R., Singh, R., 2015. Least limiting water range for two conservation agriculture cropping systems in India. *Soil Tillage Res.* 150, 43–56. DOI: 10.1016/j.still.2015.01.003

Montagu, K. D.; Conroy, J. P.; Atwell, B. J. The position of localized soil compaction determines root and subsequent shoot growth responses. *J. Exper. Bot.*, 52:2127-2133, 2001.

Morard, P.; Silvestre, J. Plant injury due to oxygen deficiency in the root environment of soilless culture: A review. *Plant Soil*, 184:243-254, 1996.

Moreira, F. R., Dechen, S. C., Silva, A. P., Figueiredo, G. C., Maria, I. C., Pessoni, P. T., 2014. Intervalo hídrico ótimo em um latossolo vermelho cultivado em sistema semeadura direta por 25 anos. *Rev. Bras. Ciênc. Solo*, 38, 118–127. DOI: 10.1590/S0100-06832014000100011

Mrabet, R. Sustainable agriculture for food and nutritional security. In: *Sustainable Agriculture and the Environment*. Academic Press, 2023. p. 25-90.

Nabiollahi, K. et al. Assessment of soil quality indices for salt-affected agricultural land in Kurdistan Province, Iran. *Ecological Indicators*, v. 83, n. July, p. 482–494, 2017.

Olibone, D., E, A.P., R, C.A., 2010. Least limiting water range and crop yields as affected by crop rotations and tillage. *Soil Use Manag.* 26, 485–493. DOI: 10.1111/j.1475-2743.2010.00301.x

OLIVEIRA, Alan Figueiredo et al. *Estoques de carbono em sistemas agropecuários ocupados com pastagem e lavoura*. OLIVEIRA, Alan Figueiredo de; GONÇALVES, Lúcio Carlos (org.). Produção de ruminantes em sistemas integrados. Belo Horizonte: FEPE, 2021.

Oliveira, S. M. et al. Qualidade do solo: indicadores biológicos para um manejo sustentável. *Brazilian Journal of Development*, v. 7, n. 1, p. 6853-6875, 2021.

Omuto, C.T. Assessment of soil physical degradation in Estern Kenya by use of a sequential soil testing protocol. *Agric. Ecosyst. Environ.*, 128:199-211, 2008.

Panayiotopoulos, K. P.; Papadopoulou, C. P.; Hatjioannidou, A. Compaction and penetration resistance of na Alfisol and Entisol and their influence on root growth of maize seedlings. *Soil and Tillage Reseach*, v. 31, p. 323-337, 1994.

Passioura, J. B.; Gardner, P. A. Control of leaf expansion in wheat seedlings growing in drying soil. *Australian Journal of Plant Physiology*, 17:149-157, 1990.

Pessina, Domenico et al. Sustainability of machinery traffic in vineyard. *Sustainability*, v. 13, n. 5, p. 2475, 2021.

Philippot, Laurent et al. The interplay between microbial communities and soil properties. *Nature Reviews Microbiology*, v. 22, n. 4, p. 226-239, 2024.



Pinstrup-Andersen, P. Is it time to take vertical indoor farming seriously? *Global Food Security*, v. 17, n. 1, p. 233-235, 2017. DOI: 10.1016/j.gfs.2017.09.002.

Pradhan, P.; Fischer, G.; Van Velthuisen, H.; Reusser, D. E.; Kropp, J. P. 2015. Closing yield gaps: How sustainable can we be? *PLoS One*, 10, 1–18. DOI: 10.1371/journal.pone.0129487

Rabot, E.; Wiesmeier, M.; Schlüter, S.; Vogel, H.-J. 2018. Soil structure as an indicator of soil functions: A review. *Geoderma*, 314, 122–137. DOI: 10.1016/j.geoderma.2017.11.009

Radford, B. J.; Yule, D. F.; MCGarry, D.; Playford, C. Crop response to applied soil compaction and to compaction repair treatment. *Soil and Tillage Research*, v. 61, n. 3/4, p. 155-170, 2001.

Rahman, Md Mizanur et al. Organic sources and tillage practices for soil management. *Resources Use Efficiency in Agriculture*, p. 283-328, 2020.

Rahmanipour, F.; Marzaioli, R.; Bahrami, H. A.; Fereidouni, Z.; Bandarabadi, S. R. Assessment of soil quality indices in agricultural lands of Qazvin Province, Iran. *Ecological Indicators*, 40:19-26. 2014.

Rasse, D. P.; Smucker, A. J. M. Root recolonization of previous root channels in corn and alfalfa rotations. *Plant Soil*, 204:203-213, 1998.

Reichert, J. M.; Reinert, D. J.; Braida, J. A. Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. *Ciência e Ambiente*, v. 27, p. 29-48. 2003.

Reichert, J. M.; Suzuki, L. E. A. S.; Reinert, D. J.; Horn, R.; Hakansson, I. Reference bulk density and critical degree-of-compactness for no-till crop production in subtropical highly weathered soils. *Soil Till. Res.*, 102:242- 254, 2009.

Reynolds, W. D.; Bowman, B. T.; Drury, C. F.; Tan, C. S. & Lu, X. Indicators of good physical quality: density and storage parameters. *Geoderma*, 110:131- 146, 2002.

Reynolds, W. D.; Drury, C. F.; Yang, X. M. & Tan, C. S. Optimal soil physical quality inferred through structural regression and parameter interactions. *Geoderma*, 146:466-474, 2008.

Rucks, L.; García, F.; Kaplán, A.; Ponce De León, J.; Hill, M. *Propiedades Físicas del Suelo*. Facultad de Agronomía, Universidad de la República, Departamento de Suelos y Aguas. Montevideo, Uruguay. 68p. 2004.

Sans, L. M. A. *Avaliação da qualidade do solo*. In: Oliveira, T. S.; Assis Júnior, R. N.; Romero, R. E.; Silva, J. E. C. (eds). *Agricultura, Sustentabilidade e o Semi-árido*. Fortaleza, UFC, SBCS, p. 170-213, 2000.

Santana, D. P.; Bahia Filho, A. C. *Qualidade do solo: Uma visão holística*. B. Inf. SBCS, 27:15-18, 2002.



Santos, M. J. P. L. Smart cities and urban areas-Aquaponics as innovative urban agriculture. *Urban Forestry & Urban Greening*, v. 20, n. 1, p. 402-406, 2016. DOI:10.1016/j.ufug.2016.10.004.

Schulte, R. P. O.; Creamer, R. E.; Donnellan, T.; Farrelly, N.; Fealy, R.; O'Donoghue, C.; O'hUallachain, D. Functional land management: A framework for managing soil-based ecosystem services for the sustainable intensification of agriculture. *Environmental Science & Policy*, v. 38, p. 45-58, 2014.

Serafim, M. E.; Oliveira, G. C.; Vitorino, A. C. T.; Silva-Montoani, B.; Carducci, C. E. Qualidade física e intervalo hídrico ótimo em latossolo e cambissolo, cultivados com cafeeiro, sob manejo conservacionista do solo. *R. Bras. Ci. Solo*, 37:733-742, 2013.

Severiano, E. C.; Oliveira, G. C.; Dias Junior, M.; Costa, K. A. P.; Castro, M. B.; Magalhães, E. N. Potencial de descompactação de um Argissolo promovido pelo capim-tifton 85. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 14, n. 1, p. 39-45, 2010.

SHAHEB, Md Rayhan; VENKATESH, Ramarao; SHEARER, Scott A. A review on the effect of soil compaction and its management for sustainable crop production. *Journal of Biosystems Engineering*, p. 1-23, 2021.

SHAHEB, Md Rayhan; VENKATESH, Ramarao; SHEARER, Scott A. A review on the effect of soil compaction and its management for sustainable crop production. *Journal of Biosystems Engineering*, p. 1-23, 2021.

Shamilishvili G., Abakumov E.V., Andersen D. (2020) Biogenic-Abiogenic Interactions and Soil Formation in Extreme Conditions of Untersee Oasis, Surroundings of Lake Untersee, Central Queen Maud Land, East Antarctica. In: Frank-Kamenetskaya O., Vlasov D., Panova E., Lessovaia S. (eds) Processes and Phenomena on the Boundary Between Biogenic and Abiogenic Nature. Lecture Notes in Earth System Sciences. Springer, Cham. pp 457-479. DOI: 10.1007/978-3-030-21614-6\_25

Silva, A. P.; Kay, B. D. Estimating the least limiting water range of soil from properties and management. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 61:877-883, 1997.

Silva, A. P.; Kay, B. D.; Perfect, E. Characterization of the least limiting water range. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58, 1775-1781, 1994. DOI: 10.2136/sssaj1994.03615995005800060028x

Silva, A. P.; Tomenna, C. A.; Dias Junior, M. S.; Imhoff, S.; Klein, V. A. *Indicadores da qualidade física do solo*. IN: Física do solo. Jong Van Lier. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2010.

Silva, A. P.; Tormena, C. A.; Imhoff, S.; Fidalski, J.; Neves Junior, A. F. Intervalo hídrico ótimo e sua importância para as plantas. *Tópicos em Ciência do Solo*. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2009, v. 6, p. 1-30.

Silva, A.P.; Kay, B. D.; Perfect, E. Characterization of the least limiting water range.



*Soil Sci. Soc. Am. J.*, 58:1775- 1781, 1994.

Silva, A.P.; Kay, B.D. The sensitivity of shoot growth of corn to the least limiting water range of soils. *Plant Soil*, 184:323-329, 1996.

Silva, B. M., Oliveira, G. C., Serafim, M. E., Silva, E. A., Ferreira, M. M., Norton, L. D., Curi, N., 2015. Critical soil moisture range for a coffee crop in an oxidic latosol as affected by soil management. *Soil Tillage Res.* 154, 103–113. DOI: 10.1016/j.still.2015.06.013

Silva, B. M., Oliveira, G. C., Serafim, M. E., Silva, E. A., Guimarães, P. T., Melo, L. B. B., Norton, L.D., Curi, N., 2019. Soil moisture associated with least limiting water range, leaf water potencial, initial growth and yield of coffee as affected by soil management system. *Soil Tillage Res.* 189, 36–43. DOI: 10.1016/j.still.2018.12.016

SILVA, F. P. G. et al. Physical fractions of organic matter and mineralizable soil carbon as quality indicators in areas under different forms of use in the Cerrado-Pantanal Ecotone. *Environmental Monitoring and Assessment*, v. 194, n. 7, p. 517, 2022.

Silva, L. F. S.; Marinho, M. A.; Boschi, R. S.; Matsura, E. E. Intervalo hídrico ótimo para avaliação de sistemas de produção e rendimento do feijão. *Irriga*, v. 22 n. 2, p. 383-399. 2017.

Silva, T. L.; Aguiar-Netto, A. O.; Gonzaga, M. I. S.; Pacheco, E. P.; Lucas, A. A. T. Intervalo Hídrico Ótimo utilizado como indicador da qualidade física do solo em perímetro irrigado. *Revista Agrogeoambiental*, v. 8, n. 4, p. 71-81, 2016. DOI: 10.18406/2316-1817v8n42016907

Silva, V. R. *Propriedades físicas e hídricas em solos sob diferentes estados de compactação*. Santa Maria, Universidade Federal de Santa Maria, 2003. 171p. (Tese de Doutorado).

Silvero, Nélide EQ et al. Sensing technologies for characterizing and monitoring soil functions: A review. *Advances in Agronomy*, v. 177, p. 125-168, 2023.

Six, J.; Bossuyt, H.; Degryze, S. & Deneff, K. A history of research on the link between (micro)aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. *Soil Till. Res.*, 79:7-31, 2004.

Six, J.; Conant, R. T.; Paul, E. A.; Paustian, K. 2002. Stabilization mechanisms of soil organic matter: implications for C-saturation of soils. *Plant Soil*. 241, 155–176. DOI: 10.1023/A:1016125726789

Skaf, L.; Buonocore, E.; Dumontet, S.; Caponte, R.; Franzese, P. P. Food security and sustainable agriculture in Lebanon: An environmental accounting framework. *Journal of Cleaner Production*, v. 209, 1 February, p. 1025-1032, 2019.

SOUZA, Rodolfo et al. Dynamics of soil penetration resistance in water-controlled environments. *Soil and Tillage Research*, v. 205, p. 104768, 2021.

Sposito, G.; Zabel, A. The assessment of soil quality. *Geoderma*, v. 114, n. 3/4, p. 143-



144, 2003.

Stefanoski, D. C., Figueiredo, C. C., Santos, G. G., Marchão, R. L. 2016. Selecting soil quality indicators for different soil management systems in the Brazilian Cerrado. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 51, 1643–1651.

Stenberg, B. Monitoring soil quality of arable land: Microbiological indicators. *Soil Plant Sci.*, 49:1-24, 1999.

Stirzaker, R. J.; Passioura, J. B.; Wilms, Y. Soil structure and plant growth: Impact of bulk density and biopores. *Plant Soil*, 185:151-162, 1996.

Taiz, L.; Zeiger, E.; Moller, I. M.; Murphy, A. *Fisiologia e Desenvolvimento Vegetal*. Artmed, 6ª ed. Porto Alegre-RS, 888 p. 2017.

Tavares, J. F.; Ribon, A. A. Resistência do solo à penetração em resposta ao número de amostras e tipo de amostragem. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 32, n. 2, p. 487-494. 2008.

Taylor, H. M.; Brar, G. S. Effect of soil compaction on root development. *Soil and Tillage Research*, v. 19, p. 111-119, 1991.

TISDALL, J. M. Formation of soil aggregates and accumulation of soil organic matter. In: *Structure and organic matter storage in agricultural soils*. CRC Press, 2020. p. 57-96.

Topp, G. C.; Galganov, Y. T.; Wires, K. C. & Culley, J. L. B. *Non limiting water range (NLWR): an approach for assessing soil structure*. - Soil Quality Evaluation Program. Ottawa, Agriculture and Agri-Food Canada, 1994. 36p. (Technical report, 2).

Tormena, C. A., Silva, A. P., Libardi P.L., 1998. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo roxo sob plantio direto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 22, p. 573–581. DOI: 10.1590/S0100-06831998000400002

Tormena, C. A.; Araújo, M. A.; Fidalski, J.; Costa, J. M. Variação temporal do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Vermelho distroférrico em sistemas de plantio direto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 31:211-219, 2007.

Tormena, C. A.; Fidalski, J. & Rossi Júnior, W. Resistência tênsil e friabilidade de um Latossolo sob diferentes sistemas de uso. *R. Bras. Ci. Solo*, 32:33-42, 2008.

Tormena, C. A.; Silva, A. P.; Libardi P. L. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo roxo sob plantio direto. *Rev. Bras. Ciênc. Solo*, 22, 573–581, 1998. DOI: 10.1590/S0100-06831998000400002

TORRES, Lorena Chagas et al. Impacts of soil type and crop species on permanent wilting of plants. *Geoderma*, v. 384, p. 114798, 2021.

Tótola, M. R.; Chaer, G. M. *Microrganismos e processos microbiológicos como indicadores da qualidade dos solos*. Tópicos em Ciências do Solo, Sociedade Brasileira de Ciências do Solo, 2. 195-276, 2002.



Trevisan, R. G.; Freddi, O. da S.; Wruck, F. J.; Tavanti, R. R.; Peres, F. S. C. 2017. Variabilidade de atributos físicos do solo e do arroz cultivado sob plantas de cobertura em sistema de integração lavoura-pecuária. *Bragantia*, 76, 145–154. DOI: 10.1590/1678-4499.596

Uberti, A. A. A. Estudos para a elaboração do mapa de fragilidade ambiental do município de Joinville – Santa Catarina. *Boletim Técnico de Conceitos e Metodologias*. 51p. 2011.

Van Lier, J. Q.; Gubiani, P. I., 2015. Beyond the “Least Limiting Water Range”: rethinking soil physics research in Brazil. *Rev. Bras. Ciênc. Solo*, 39, 925–9939.

Vezzani, F. M.; Mielniczuk, J. Uma visão sobre qualidade do solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. v. 33, n. 4, p. 743-755, 2009.

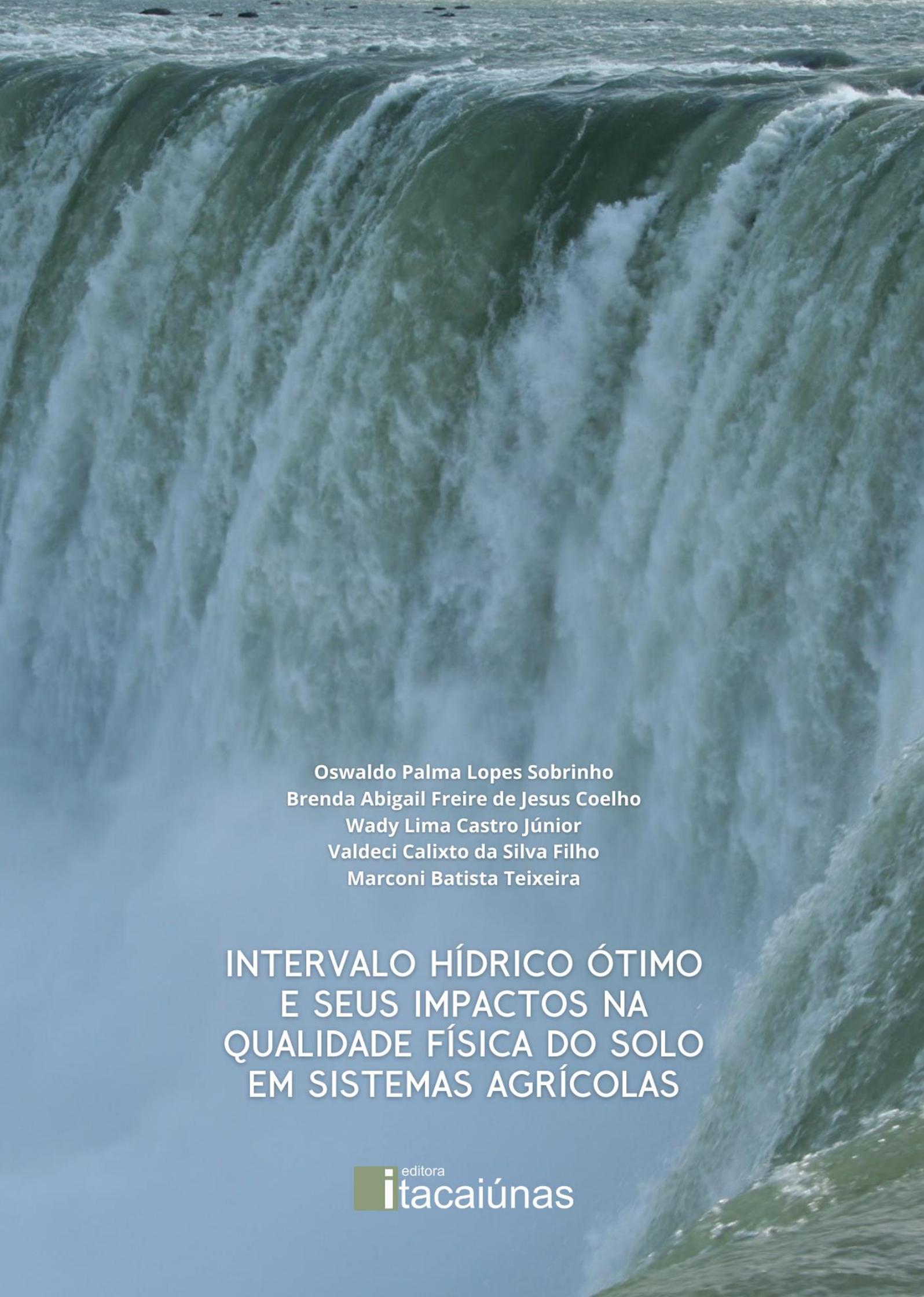
Wiesmeiera, M.; Urbanskia, L.; Hogleya, E.; Langc, B.; Lützowa, MV.; Marin-Spiottad, E.; Wesemael, B. V.; Rabot, E.; Ließ, M.; Franco, N. G.; Wollschläger, U.; Vogel, H. J.; Knabner, I. K. Soil organic carbon storage as a key function of soils – A review of drivers and indicators at various scales. *Geoderma*, v. 333, p. 149-162, 2019.

Wolejko, E. et al. Soil biological activity as an indicator of soil pollution with pesticides—a review. *Applied Soil Ecology*, v. 147, p. 103356, 2020.

Wu, L.; Feng, G.; Letey, J.; Ferguson, L.; Mitchell, J.; Mccullough-Sanden, B. & Markegard, G. Soil management effects on the nonlimiting water range. *Geoderma*, 114:401-414, 2003.

Zwirtes, A. L. et al. Temperature changes in soil covered by black oat Straw. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 52, n. 11, p.1127-1130, 2017.



A large, powerful waterfall cascading down a rocky ledge, with white foam and spray at the base. The water is a deep blue-green color, and the overall scene is dynamic and natural.

Oswaldo Palma Lopes Sobrinho  
Brenda Abigail Freire de Jesus Coelho  
Wady Lima Castro Júnior  
Valdeci Calixto da Silva Filho  
Marconi Batista Teixeira

# INTERVALO HÍDRICO ÓTIMO E SEUS IMPACTOS NA QUALIDADE FÍSICA DO SOLO EM SISTEMAS AGRÍCOLAS

 editora  
**itacaiúnas**