

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
GOIANO - CAMPUS RIO VERDE
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS -
AGRONOMIA

**INTERVALO HÍDRICO ÓTIMO COMO INDICADOR DE
QUALIDADE FÍSICA DE UM LATOSSOLO VERMELHO,
APÓS 26 ANOS DE ADOÇÃO DE SISTEMAS DE
INTEGRAÇÃO LAVOURA-PECUÁRIA**

Autora: Marlete Ferreira de Brito
Orientador: Prof. Dr. Eduardo da Costa Severiano

Rio Verde - GO
Maio - 2019

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
GOIANO - CAMPUS RIO VERDE
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS -
AGRONOMIA

**INTERVALO HÍDRICO ÓTIMO COMO INDICADOR DE
QUALIDADE FÍSICA DE UM LATOSSOLO VERMELHO,
APÓS 26 ANOS DE ADOÇÃO DE SISTEMAS DE
INTEGRAÇÃO LAVOURA-PECUÁRIA**

Autora: Marlete Ferreira de Brito
Orientador: Prof. Dr. Eduardo da Costa Severiano

Dissertação apresentada, como parte das exigências para obtenção do título de MESTRE EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS – AGRONOMIA, no Programa de Pós-graduação em Ciências Agrárias – Agronomia do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano - Campus Rio Verde - Área de concentração em Produção Vegetal Sustentável no Cerrado.

Rio Verde - GO
Maio - 2019

Sistema desenvolvido pelo ICMC/USP
Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema Integrado de Bibliotecas - Instituto Federal Goiano

B862i Brito, Marlete Ferreira de
Intervalo hídrico ótimo como indicador de qualidade física de um Latossolo Vermelho, após 26 de adoção de sistemas de integração lavoura-pecuária / Marlete Ferreira de Brito; orientador Dr. Eduardo da Costa Severiano; coorientador Dr. Robélio Leandro Marchão. -- Rio Verde, 2019.
65 p.

Dissertação (Mestrado em Ciências Agrárias/Agronomia) -- Instituto Federal Goiano, Campus Rio Verde, 2019.

1. Integração lavoura-pecuária. 2. Sistema plantio direto. 3. Pisoteio animal. 4. Resistência do solo à penetração. I. Severiano, Dr. Eduardo da Costa, orient. II. Marchão, Dr. Robélio Leandro, coorient. III. Título.

TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR PRODUÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS NO REPOSITÓRIO INSTITUCIONAL DO IF GOIANO

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610/98, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano, a disponibilizar gratuitamente o documento no Repositório Institucional do IF Goiano (RIIF Goiano), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, em formato digital para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IF Goiano.

Identificação da Produção Técnico-Científica

- | | |
|--|---|
| <input type="checkbox"/> Tese | <input type="checkbox"/> Artigo Científico |
| <input checked="" type="checkbox"/> Dissertação | <input type="checkbox"/> Capítulo de Livro |
| <input type="checkbox"/> Monografia – Especialização | <input type="checkbox"/> Livro |
| <input type="checkbox"/> TCC - Graduação | <input type="checkbox"/> Trabalho Apresentado em Evento |
| <input type="checkbox"/> Produto Técnico e Educacional - Tipo: _____ | |

Nome Completo do Autor: Marlete Ferreira de Brito

Matrícula: 20171023101I0040

Título do Trabalho: Intervalo hídrico ótimo como indicador de qualidade física de um Latossolo Vermelho, após 26 anos de adoção de sistemas de integração lavoura-pecuária

Restrições de Acesso ao Documento

Documento confidencial: Não Sim, justifique: _____

Informe a data que poderá ser disponibilizado no RIIF Goiano: ___/___/___

O documento está sujeito a registro de patente? Sim Não

O documento pode vir a ser publicado como livro? Sim Não

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O/A referido/a autor/a declara que:

- o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- obteve autorização de quaisquer materiais incluídos no documento do qual não detém os direitos de autor/a, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano.

Local Rio Verde, Data 29/07/2019.

Marlete Ferreira de Brito

Assinatura do Autor e/ou Detentor dos Direitos Autorais

Ciente e de acordo:

Eduardo C. Loureiro

Assinatura do(a) orientador (a)

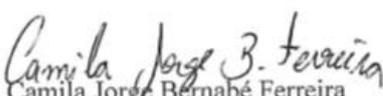
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
GOIANO – CAMPUS RIO VERDE
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS
AGRÁRIAS-AGRONOMIA

INTERVALO HÍDRICO ÓTIMO COMO INDICADOR
DA QUALIDADE FÍSICA DE UM LATOSSOLO
VERMELHO APÓS 26 ANOS DE ADOÇÃO DE SISTEMAS
DE INTEGRAÇÃO LAVOURA-PECUÁRIA

Autora: Marlete Ferreira de Brito
Orientador: Prof. Dr. Eduardo da Costa Severiano

TITULAÇÃO: Mestre em Ciências Agrárias-Agronomia - Área de
Concentração em Produção Vegetal Sustentável no Cerrado

APROVADA em, 31 de maio de 2019.


Prof. Dra. Camila Jorge Bernabé Ferreira
Avaliadora externa
UniRV – Campus Rio Verde


Dr. Robélio Leandro Marchão
Avaliador externo
Embrapa Cerrados (CPAC)/Planaltina-DF


Prof. Dra. Kátia Aparecida de Pinho Costa
Avaliadora interna
IF Goiano – Campus Rio Verde


Prof. Dr. Eduardo da Costa Severiano
Presidente da banca
IF Goiano – Campus Rio Verde

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus Pai, Filho e Espírito Santo, pelo dom da vida, por ser meu porto seguro e fortaleza em todos os momentos da minha existência.

Aos meus pais, Ana e Juracy que distante fisicamente ou não, apoiaram-me e incentivaram a não desistir. Ah! E a minha mãe pelas orações que me fortalece e me acalma.

Aos meus irmãos, Vilton, Idázio, Laurentino, Valteir e Suzia, pelo carinho, paciência, apoio, cuidado e pela responsabilidade que sempre demonstraram.

Ao Programa de Pós-graduação em Ciências Agrárias, pela oportunidade de cursar o Mestrado. E ao Instituto Federal Goiano – Campus Rio Verde, por permitir chegar até aqui, por todo apoio e disponibilidade de transporte.

À Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, unidade Centro de Pesquisa Agropecuária do Cerrado (CPAC), pelo convênio, acolhida e abertura para realização deste projeto.

Aos Laboratórios de Física do Solo da Embrapa Cerrados e do IF Goiano – Campus Rio Verde, pela acolhida e permissão para realização das análises.

Ao meu orientador, professor Dr. Eduardo da Costa Severiano, pela orientação no desenvolvimento deste trabalho, pelos conselhos e ensinamentos.

Ao meu coorientador, Dr. Robélio Leandro Marchão e também ao Me. Lourival Vilela, pela disponibilidade, acolhimento e orientação durante a estadia na Embrapa Cerrados e durante o decorrer do Mestrado.

À pesquisadora Dr^a. Camila Jorge Bernabé Ferreira, pela parceria e contribuição com seus conhecimentos.

À professora Dr^a Kátia Aparecida de Pinho Costa, pois foi via seu intermédio inicial com a Embrapa, que viabilizou a posterior parceria e realização deste projeto.

À Ana Carolina Costa Koch e família, por todo cuidado, apoio e recepção em sua casa no Distrito Federal, que foram fundamentais para execução deste trabalho.

Aos colegas de alojamento da Embrapa, em especial ao Adriano Crozara, Guilherme e Inácio, pelo companheirismo e dinâmica de convivência que fizeram minha estadia mais suave.

Ao senhor Ironei, ao Paulo e Maurivan, e todos os ajudantes de campo da Embrapa, que foram meu braço direito e esquerdo na árdua tarefa de coleta de amostras, faça sol ou faça chuva.

Aos colegas do Laboratório de Física do solo IF Goiano, Josué, Victória, Carlos Alexandre, Leonardo, Jordaanny, Rafaela que me ajudaram de forma direta na laboriosa tarefa de execução, a esses e toda turma do laboratório de Física do solo (egressos ou novatos), obrigada pela companhia no trabalho ou no cafezinho, experiências compartilhadas, conversas distraídas e brincadeiras, trazendo harmonia e leveza para nossa equipe e convivência diária.

Ao Me. Wainer Gomes Gonçalves, Laboratorista do IF Goiano, e bem mais que isso, orientou-me desde a iniciação científica e que até hoje contribui com seus conselhos, orientação e incentivo primordiais na realização deste trabalho.

Aos laboratoristas da Embrapa Cerrados, Lucas pelo suporte e auxílio e Nelson pela realização das análises de forma muito dedicada e precisa, além de todo apoio.

Ao setor de transportes e a todos os motoristas que me acompanharam nesta jornada, cito o Flávio, que fez mais que suas atribuições e se dispôs a ajudar na mais difícil amostragem (área de corredor), e sem ele não teria sido possível alcançar a meta.

Ao meu namorado Paulo Henrique, por todo amor, paciência, torcida, companheirismo durante esse período e por sempre me fazer sorrir.

A todos, que de alguma forma, contribuíram nessa jornada para que eu chegasse até aqui, o meu muito obrigado.

BIOGRAFIA DO AUTOR

Marlete Ferreira de Brito, natural de Carinhanha – Bahia, filha de Juracy Souza de Brito e Ana Ferreira de Brito, nasceu em 24 de abril de 1994. Durante os anos de 2010 e 2011 cursou Técnico em Secretariado, no Instituto Federal Goiano - Campus Rio Verde, juntamente com o ensino médio no Colégio Estadual Martins Borges. No ano de 2012 iniciou a graduação em Bacharelado em Agronomia, concomitante iniciou seu estágio no Programa Bolsa Estágio remunerado, atuando no Laboratório de Cultura de Tecidos Vegetais. Após 2 anos e fim do contrato, migrou para Iniciação Científica como Bolsista, no Laboratório de Física do solo. Terminou a graduação em março/2017, ao mesmo tempo que ingressou no Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Ciências Agrárias – Agronomia, nível mestrado, no Instituto Federal Goiano – Campus Rio Verde em convênio com a Embrapa, Unidade Centro de Pesquisa Agropecuária dos Cerrados (CPAC). Estudo orientado pelo professor Dr. Eduardo da Costa Severiano e coorientado por Dr. Robélio Leandro Marchão, cuja defesa da Dissertação deu-se em 31 de maio de 2019.

ÍNDICE

	Página
ÍNDICE DE TABELAS	vi
ÍNDICE DE FIGURAS	vii
LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS, ABREVIACÕES E UNIDADES	ix
RESUMO	xi
ABSTRACT	xiii
1. INTRODUÇÃO GERAL	15
1.1 Os Latossolos e o processo de compactação	15
1.2 Impacto dos sistemas de integração na estrutura do solo	17
1.3 Avaliação da qualidade física do solo através do intervalo hídrico ótimo	18
1.4 Referências Bibliográficas	21
2. OBJETIVO.....	25
INTERVALO HÍDRICO ÓTIMO COMO INDICADOR DE QUALIDADE FÍSICA DE UM LATOSSOLO VERMELHO, APÓS 26 ANOS DE ADOÇÃO DE SISTEMAS INTEGRAÇÃO LAVOURA-PECUÁRIA	26
3.1INTRODUÇÃO.....	26
3.2 MATERIAL E MÉTODOS.....	28
3.3 RESULTADOS	35
3.4 DISCUSSÃO	47
3.5 CONCLUSÕES	59
3.6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	60

ÍNDICE DE TABELAS

	Página
Tabela 1 – Análise granulométrica e densidade de partículas (Dp) do solo em estudo, média de 32 amostras por camada	29
Tabela 2 –Histórico de uso do solo na área experimental, em estudo desde 1991 até a época da coleta das amostras de solo (2017)	30
Tabela 3 – Média dos valores críticos de resistência do solo à penetração (RP) em MPa para o desenvolvimento da cultura do milho.....	34
Tabela 4 – Coeficientes de ajuste das equações das curvas de retenção de água no solo e de resistência à penetração, em função dos tratamentos nas três profundidades, 0,00-0,05, 0,05-0,10, 0,10-0,20m e camada unificada 0,00-0,20 m em um Latossolo Vermelho Distrófico	36

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
<p>Figura 1 – Perfil do solo nos tratamentos avaliados. PAST (Pastagem contínua); SIL-C (Sistema integrado lavoura-pecuária, fase lavoura em plantio convencional); SIL-D (Sistema integrado lavoura-pecuária, fase lavoura sob plantio direto); SIP-D (Sistema integrado pastagem-lavoura, fase pastagem sob plantio direto); LAV-C (lavoura contínua sob plantio convencional); LAV-D (lavoura contínua sob plantio direto); CN (Cerrado Nativo); COR (Corredor de manejo)</p>	32
<p>Figura 2 – Variação dos teores limite do Intervalo hídrico ótimo de capacidade de campo (θ_{CC}: -6 kPa), ponto de murcha permanente (θ_{PMP}: -1500 kPa), porosidade de aeração a 10% (θ_{PA}) e resistência do solo à penetração de 2,0 MPa (θ_{RP}) nas três profundidades (A) 0,00-0,05, (B) 0,05-0,10 e (C) 0,10-0,20 m, e (D) e camada unificada 0,00-0,20 m para os diferentes sistemas de manejo e preparo adotados em um Latossolo Vermelho Distrófico, na região de Planaltina-DF, Brasil. PAST (Pastagem contínua); SIL-C (Sistema integrado lavoura-pecuária, fase lavoura em plantio convencional); SIL-D (Sistema integrado lavoura-pecuária, fase lavoura sob plantio direto); SIP-D (Sistema integrado pastagem-lavoura, fase pastagem sob plantio direto); LAV-C (lavoura contínua sob plantio convencional); LAV-D (lavoura contínua sob plantio direto); CN (Cerrado Nativo); COR (Corredor de manejo)</p>	38
<p>Figura 3- Intervalo hídrico ótimo absoluto nas camadas amostradas (A) 0,00-0,05, (B) 0,05-0,10 e (C) 0,10-0,20 m, e (D) e camada unificada 0,00-0,20 m, de acordo com o erro padrão da média da densidade do sistema, considerando resistência à penetração padrão de 2,0 MPa. O IHO de cada profundidade (cinza) e o IHO de cada sistema (colorido). PAST (Pastagem contínua); SIL-C (Sistema integrado lavoura-pecuária, fase lavoura em plantio convencional); SIL-D (Sistema integrado lavoura-pecuária, fase lavoura sob plantio direto); SIP-D (Sistema integrado pastagem-lavoura, fase pastagem sob plantio direto); LAV-C (lavoura contínua sob plantio convencional); LAV-D (lavoura contínua sob plantio direto); CN (Cerrado Nativo); COR (Corredor de manejo)</p>	40
<p>Figura 4- Intervalo hídrico ótimo absoluto nas camadas amostradas (A) 0,00-0,05, (B) 0,05-0,10 e (C) 0,10-0,20 m, e (D) e camada unificada 0,00-0,20 m, de acordo com o erro padrão da média da densidade do sistema, considerando resistência à penetração variada em função do sistema (1,5, 2,0 e 3,5 MPa). O IHO de cada camada com RP variada (cinza) e o IHO de</p>	

cada sistema (colorido). PAST (Pastagem contínua); SIL-C (Sistema integrado lavoura-pecuária, fase lavoura em plantio convencional); SIL-D (Sistema integrado lavoura-pecuária, fase lavoura sob plantio direto); SIP-D (Sistema integrado pastagem-lavoura, fase pastagem sob plantio direto); LAV-C (lavoura contínua sob plantio convencional); LAV-D (lavoura contínua sob plantio direto); CN (Cerrado Nativo); COR (Corredor de manejo) ...**42**

Figura 5 – Relativização da densidade do solo, obtida pela relação entre densidade do solo (D_s) e densidade do solo limitante (D_{sL}) ao IHO em cada tratamento, considerando uma RP crítica de 2,0 MPa e RP variável, nas camadas (A) 0,00-0,05, (B) 0,05-0,10 e (C) 0,10-0,20 m, e (D) e camada unificada 0,00-0,20 m para os tratamentos avaliados. As barras representam o erro padrão da média. As letras minúsculas se referem a comparação entre os oito tratamentos considerando RP fixa ou variável, obtidas pelo Teste de Tukey ($p < 0,05$), e as letras maiúsculas se refere a comparação entre D_{sR} no tratamento. PAST (Pastagem contínua); SIL-C (Sistema integrado lavoura-pecuária, fase lavoura em plantio convencional); SIL-D (Sistema integrado lavoura-pecuária, fase lavoura sob plantio direto); SIP-D (Sistema integrado pastagem-lavoura, fase pastagem sob plantio direto); LAV-C (lavoura contínua sob plantio convencional); LAV-D (lavoura contínua sob plantio direto); CN (Cerrado Nativo); COR (Corredor de manejo) **43**

Figura 6– Perfil físico do solo em função da profundidade, 0,00-0,05, 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m para os tratamentos avaliados, com base na densidade média do solo (A); no intervalo hídrico ótimo médio do solo considerando para o IHO RP crítica fixa (B) e variável (C); e com base na densidade do solo relativa, considerando RP fixa (D) e variável (E), sendo que RP fixa em 2,0 MPa e quando variável foi de 1,5MPa, para LAV-C; 2,0 MPa para SIL-C e COR e 3,5 MPa para PAST, SIL-D, SIP-D, LAV-D e CN. As barras horizontais representam o erro padrão da média. PAST (Pastagem contínua); SIL-C (Sistema integrado lavoura-pecuária, fase lavoura em plantio convencional); SIL-D (Sistema integrado lavoura-pecuária, fase lavoura sob plantio direto); SIP-D (Sistema integrado pastagem-lavoura, fase pastagem sob plantio direto); LAV-C (lavoura contínua sob plantio convencional); LAV-D (lavoura contínua sob plantio direto); CN (Cerrado Nativo); COR (Corredor de manejo) . **45**

LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS, ABREVIACÕES E UNIDADES

θ	-----	conteúdo de água no solo ($\text{dm}^3 \text{dm}^{-3}$)
θ_{CC}	-----	conteúdo de água na capacidade de campo ($\text{dm}^3 \text{dm}^{-3}$)
θ_{PMP}	-----	conteúdo de água no ponto de murcha permanente ($\text{dm}^3 \text{dm}^{-3}$)
θ_{RP}	-----	conteúdo de água na resistência do solo à penetração ($\text{dm}^3 \text{dm}^{-3}$)
θ_{PA}	-----	conteúdo de água na porosidade de aeração a 10% ($\text{dm}^3 \text{dm}^{-3}$)
Ψ	-----	Potencial matricial (kPa)
$^{\circ}\text{C}$	-----	graus Celsius
o ‘ ‘	-----	graus minutos segundos
%	-----	por cento
Ag.	-----	<i>Andropogon gayanus</i>
AD	-----	água disponível no solo
LAV-C	-----	lavoura contínua sob plantio convencional
LAV-D	-----	lavoura contínua sob plantio direto
<i>Bb</i>	-----	<i>Brachiaria brizantha</i>
<i>Bd</i>	-----	<i>Brachiaria decumbens</i>
CC	-----	capacidade de campo ($\text{dm}^3 \text{dm}^{-3}$)
cm	-----	centímetro
CN	-----	cerrado nativo
COR	-----	corredor de manejo
CRA	-----	curva de retenção de água
CRP	-----	curva de resistência à penetração
cv.	-----	cultivar
CV	-----	coeficiente de variação
$\text{dm}^3 \text{dm}^{-3}$	-----	decímetro cúbico por decímetro cúbico
Dp	-----	densidade de partículas (kg dm^{-3})
Ds	-----	densidade do solo (kg dm^{-3})
Dsc	-----	densidade do solo crítica (kg dm^{-3})
DsL	-----	densidade do solo limitante (kg dm^{-3})
DsR	-----	densidade do solo relativa (kg dm^{-3})
Eq.	-----	equação
et al.	-----	e colaboradores
g	-----	gramas
g kg^{-1}	-----	grama por quilo
ha	-----	hectare
IHO	-----	intervalo hídrico ótimo (kg dm^{-3})
ILP	-----	integração lavoura-pecuária

K ₂ O	-----	óxido de potássio
kPa	-----	kiloPascal
kg	-----	quilograma
kg dm ⁻³	-----	quilograma por decímetro cúbico
kg ha ⁻¹	-----	quilograma por hectare
kg kg ⁻¹	-----	quilograma por quilograma
m	-----	metro
m ²	-----	metro quadrado
mm	-----	milímetros
mm s ⁻¹	-----	milímetros por minuto
MOS	-----	matéria orgânica do solo
MPa	-----	megaPascal
n	-----	número de amostras
ns	-----	não significativo
p	-----	probabilidade
P ₂ O ₅	-----	pentóxido de fósforo
PAST	-----	pastagem
PMP	-----	ponto de murcha permanente (dm ³ dm ⁻³)
PT	-----	porosidade total do solo (dm ³ dm ⁻³)
RP	-----	resistência do solo à penetração (MPa)
R ²	-----	coeficiente de determinação
S	-----	Sul
SIL-C	-----	sistema integrado lavoura-pastagem, fase lavoura, plantio convencional
SIL-D	-----	sistema integrado lavoura-pastagem fase lavoura, plantio direto
SIP-D	-----	sistema integrado pastagem-lavoura, fase pastagem, plantio direto
SPD	-----	sistema de plantio direto
ton ha ⁻¹	-----	tonelada por hectare
W	-----	Oeste

RESUMO

BRITO, MARLETE FERREIRA DE. Instituto Federal Goiano – Campus Rio Verde – GO, maio de 2019. **Intervalo hídrico ótimo como indicador de qualidade física de um Latossolo Vermelho, após 26 de adoção de sistemas de integração lavoura-pecuária.** Orientador: Dr. Eduardo da Costa Severiano, coorientador: Dr. Robélio Leandro Marchão.

O intervalo hídrico ótimo (IHO) é um indicador de qualidade física do solo amplamente atestado na literatura, mas sua eficiência ainda é contestada. Ademais, a adoção desse indicador em sistemas integrados de produção agropecuária de longa duração, com mais de 20 anos, ainda é escassa. Nesse sentido, objetivou-se avaliar o intervalo hídrico ótimo como indicador da qualidade física de um Latossolo Vermelho Distrófico submetido a sistemas de preparo e manejo integrado de produção, após 26 anos de implantação, bem como a influência de adequações da resistência à penetração crítica nas relações hídricas do solo. O experimento foi conduzido numa área cujos sistemas foram implantados no ano de 1991, na Embrapa Cerrados, em Planaltina – DF. Foram avaliados 8 tratamentos referentes aos sistemas de preparo e manejo do solo com quatro repetições, sendo: Pastagem contínua com gramínea e pastejo animal (PAST); Sistema integrado lavoura-pecuária, fase lavoura em preparo convencional (SIL-C); Sistema integrado lavoura-pecuária, fase a lavoura sob plantio direto (SIL-D); Sistema integrado lavoura-pecuária, fase pastagem sob plantio direto e pastejo animal (SIP-D); Sistema lavoura contínua sob preparo convencional (LAV-C); Sistema lavoura contínua sob plantio direto (LAV-D); Cerrado Nativo (CN) e; Corredor de manejo (COR). Foram coletadas amostras de solo deformadas e indeformadas em três camadas, 0,00-0,05; 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m, e avaliadas a densidade, porosidade, curva de retenção de água no solo (CRA) e de resistência à penetração (CRP) para posterior elaboração do IHO. Além das camadas fragmentadas, foi considerada a camada unificada

0,00-0,20 m, utilizando todas amostras. Para isso, utilizou-se o programa estatístico SAS no ajuste dos modelos da CRA e CRP. Para reflexão crítica em torno da eficiência do IHO na avaliação da qualidade física do solo, adotou-se como critério o uso do valor de resistência à penetração (RP) crítica, em todos os tratamentos de 2,0 MPa por ser este um valor amplamente adotado, independentes do histórico de uso e manejo do solo e, para fins de comparação, variável conforme as características intrínsecas a cada manejo avaliado e considerando-se, para tanto, a literatura citada, em que os valores críticos de RP para o sistema convencional é de 1,5 MPa; 2,0 MPa para sistemas não conservacionistas e 3,5 MPa para sistemas conservacionistas. Foi observada que a CRA e CRP apresentaram igualdade em profundidade, assim, o IHO, nas camadas iniciais, houve comportamentos específicos para cada tratamento em relação aos seus limites críticos, mas em profundidade (0,10-0,20 m), foram semelhantes aos limites do IHO da referida camada. Sistemas com pisoteio animal apresentaram limitações ao IHO com RP crítica de 2,0 MPa, no entanto, o mesmo não foi observado quando se adotou RP de 3,5 MPa. As menores densidades do solo foram observadas na camada superficial, cujo resultado pode ser atribuído para a maior presença de matéria orgânica nessa camada, exceto para o LAV-C e COR.

PALAVRAS-CHAVE: integração lavoura-pecuária, sistema plantio direto, pisoteio animal, resistência do solo à penetração.

ABSTRACT

BRITO, MARLETE FERREIRA DE Federal Goiano Institute – Campus Rio Verde – GO, may 2019. **Least limiting water range as a physical quality indicator of a Red Latosol after 26 crop-livestock integration systems adoption.** Advisor: Dr. Eduardo da Costa Severiano, Co-advisor: Dr. Robélio Leandro Marchão.

The least limiting water range (IHO) is an indicator of soil physical quality widely attested in the literature, but its efficiency is still questioned. In addition, the adoption of this indicator in integrated systems of long-term agricultural production, with more than 20 years, is still scarce. In this sense, the objective was to evaluate the least limiting water range as an indicator of physical quality in a Red Latosol Distrophic soil submitted to systems of preparation and integrated management of production, after 26 years of implantation, as well as the influence of resistance adjustments to critical penetration in soil water relations. The experiment was carried out in an area whose systems were implemented in 1991, at Embrapa Cerrados, in Planaltina - DF. Eight treatments were evaluated for soil preparation and management systems with four replications, including: Continuous pasture with grass and animal grazing (PAST); Integrated crop-livestock system, crop phase conventional tillage (SIL-C); Integrated crop-livestock system, crop phase under no-till (SIL-D); Integrated livestock-crop systems, pasture phase with animal grazing under no-till (SIP-D); Continuous crop under conventional tillage (LAV-C); Continuous crop under no-tillage (LAV-D); Native Cerrado (CN); Handling corridor (COR). Deformed and undisturbed soil samples were collected in three layers, 0.00-0.05; 0.05-0.10 and 0.10-0.20 m, and there were evaluated the density, porosity, soil water retention curve (CRA) and penetration resistance (CRP) for subsequent elaboration of the IHO. In addition to the fragmented layers, the single layer was considered 0.00-0.20 m, using all samples. For this, the SAS statistical program

was used in the adjustment of CRA and CRP models. For critical reflection of IHO efficiency in the soil physical quality evaluation, the criterion was the use of the critical penetration resistance (PR) value, in all treatments of 2.0 MPa, since this value is widely adopted, independent of the use history and soil management and, for comparison purposes, variable according to the intrinsic characteristics of each management evaluated and considering, therefore, the cited literature, in which the PR values for the conventional system is 1.5 MPa; 2.0 MPa for non-conservation systems and 3.5 MPa for conservation systems. It was observed that the CRA and CRP presented in-depth equality, so the IHO, in the initial layers, had specific behaviors for each treatment in relation to its critical limits, but in depth (0,10-0,20 m), they were similar to the IHO boundaries of said layer. Animal trampling systems showed limitations to IHO with critical RP of 2.0 MPa, however, the same was not observed when adopting RP of 3.5 MPa. The lowest soil densities were observed in the surface layer, the result of which can be attributed to the greater presence of organic matter in this layer, except for LAV-C and COR.

KEY WORDS: crop-livestock integration, no-tillage, cattle trampling, soil penetration resistance.

1. INTRODUÇÃO GERAL

O Cerrado é o segundo maior bioma do Brasil, e onde concentra-se grande parte da produção agropecuária brasileira, considerado assim, a nova fronteira agrícola (RADA, 2013). A maior parte do solo recoberto pela classe dos Latossolos (Ker, 1997), cuja mineralogia da fração argila tenha predomínio de óxidos de Ferro (Fe) e alumínio (Al) que garante a organização de estrutura granular com microagregados de solo estáveis, como é o caso daqueles oxídicos do Planalto Central Brasileiro (Reatto et al., 2009). No geral, a mineralogia desses solos predomina argilominerais 1:1 como a caulinita, óxidos de Fe como hematita e Goethita, e os óxidos de alumínio como a gibbsita (Carducci et al., 2011).

Normalmente, o volume do solo ocupado por ar e água, isto é, a porosidade, divide-se em macroporos (diâmetro maior que 50 μm) e microporos (diâmetro menor que 50 μm) (Richards, 1965). No entanto, sob condições naturais, os Latossolos oxídicos são altamente porosos e com predomínio de duas classes contrastantes, macro e microporos, sendo que aproximadamente 2/3 do volume total de poros com diâmetro $> 145 \mu\text{m}$ e 1/3 com diâmetro $< 2,9 \mu\text{m}$, isto é, um reduzido volume de poros intermediários (mesoporos), propriedades que refletem numa baixa disponibilidade de água para planta (Carducci et al., 2011). Somado a isso, são muito intemperizados, profundos e geralmente inseridos em regiões de relevo suave ondulado, que favorece a mecanização agrícola (Ker, 1997).

1.1 Os Latossolos e o processo de compactação

Embora seja a classe de solo mais importante do país quando se considera área cultivada (Ker, 1997), os Latossolos são considerados altamente suscetíveis à compactação, principalmente pela elevada porosidade, conforme afirmado por Severiano et al. (2013). A conexão entre os poros é fundamental para a biota do solo, incluindo crescimento das plantas

e transporte de água e gases (Rabot et al., 2018). No entanto, à medida que o solo é submetido a atividade agrícola, sofre alterações negativas na sua estrutura (Stefanoski et al., 2016), pela redução do seu espaço poroso.

A estrutura do solo governa as funções naturais como retenção de água, infiltração, resistência do solo à penetração das raízes, matéria orgânica e suscetibilidade à erosão (Rabot et al., 2018). A transição de áreas de cerrado nativo para área de produção pode levar à perda da qualidade física do solo (Stefanoski et al., 2016), oriunda principalmente da compactação do solo e degradação da matéria orgânica.

A compactação é um dos processos que mais influencia as alterações estruturais do solo. Refere-se a redução do volume de solo não saturado quando se aplica determinada pressão externa, ocasionando a reorganização das partículas do solo e aumentando a sua densidade (Dias Júnior et al., 2019), que por sua vez aumenta a resistência do solo à penetração. Este aumento, em Latossolos oxidícos submetidos ao uso agropecuário, tem sido o maior fator limitante na disponibilidade de água às plantas (Severiano et al., 2011).

A compactação é resultado principalmente do tráfego e preparo intensivos, bem como do pisoteio animal excessivo, ou ainda o tráfego em condições de elevada umidade do solo (Rossetti e Centurion, 2017).

Por um lado, o preparo do solo altera a sua estrutura, conseqüentemente a porosidade e retenção de água, principalmente o preparo convencional (o qual, de modo geral, envolve sistema de preparo intensivo com aração e gradagem), cujos danos são mais severos à estrutura do solo em relação ao sistema plantio direto, proporcionando mais macroporos na camada superficial pela desagregação (Pires et al., 2017) após o revolvimento. Ademais, solo revolvido se torna mais susceptível à compactação pela quebra da sua estrutura, e conseqüentemente, redução da capacidade de suporte de carga (Guimarães Júnnyor et al., 2019).

Por outro lado, o pisoteio animal no solo pode compactar de forma semelhante a uma máquina, em que a pressão durante o pastejo (98 a 168 KPa) é maior do que a pressão aplicada por um maquinário agrícola (trator - 92 KPa), conforme Greenwood e McKenzie (2001) embora essa compactação seja mais superficial. Ressaltando a importância da busca por sistemas que beneficiam a estrutura do solo, com agregados maiores e estáveis, elevando sua resistência às pressões externas e reduzindo as perdas por erosão (Salton et al., 2008). Neste contexto, o sistema de integração lavoura-pecuária, tecnologia já consolidada no Brasil, quando bem manejado pode promover a sustentabilidade do sistema de produção.

1.2 Impacto dos sistemas de integração na estrutura do solo

Sistemas conservacionistas de produção envolvem conjunto de práticas e manejo que visam a preservação, recuperação e manutenção dos recursos naturais integrando melhoria da qualidade física, química e biológica do solo (Denardin, 2014). Como exemplo, destaca-se sistema plantio direto (SPD) e o sistema de integração lavoura-pecuária (ILP), utilizam plantas de cobertura do solo para formação da palhada e/ou pastejo animal. O sistema ILP sob plantio direto permite aumento da matéria orgânica em profundidade através das raízes das plantas (Salton et al., 2002), auxiliando na manutenção da estrutura do solo e aumentando a atividades microbiológicas e metabólicas do solo (Vezzani et al., 2018). Isso porque o consórcio entre gramíneas e outras espécies permite a exploração de camadas distintas de solo que favorecem grupos da biota a ele associados (Cherr et al., 2006; Hungria et al., 2009), bem como apresenta potencial de descompactação biológica em virtude do seu sistema radicular vigoroso (Flávio Neto et al., 2015). Esses autores afirmam que a *Brachiaria brizantha* cv. Xaraés é uma das forrageiras com maior potencial para descompactação do solo.

Além disso, a permanência de resíduos culturais com menor taxa de decomposição (Carvalho et al., 2013), além de proteger o solo contra o processo erosivo, reduz a temperatura e mantém a umidade do solo (Bertolazi et al., 2017). Somado a isso, tem-se a redução dos impactos do tráfego de máquinas ou pisoteio animal sobre o solo, bem como a intensidade de pastejo bovino (consequente pastagem residual) pode ser decisiva nos impactos do pisoteio na estrutura do solo (Cecagno et al., 2016).

A matéria orgânica possui a função de condicionar a estrutura do solo e as longas cadeias de carbono agregam as partículas minerais (Schimiguel et al., 2014). Porém, a dinâmica da matéria orgânica no solo é um processo que tende a ser lento e que é influenciado pela intensidade de manejo (Souza et al., 2009). Ademais, os teores de matéria orgânica reduzem ao longo do perfil do solo principalmente pelo acúmulo de resíduo vegetal na superfície (Prado e Natale, 2003; Souza e Alves, 2003), independente do manejo aplicado (Gazolla et al., 2015). Todos esses fatores influenciam a estrutura e outros atributos físicos e químicos, refletindo em diferentes respostas ao sistema de manejo.

Sistemas com revolvimento do solo, por exemplo, favorecem a decomposição da matéria orgânica do solo pois destroem os agregados, oferecendo menor proteção da matéria orgânica pela decomposição bacteriana. Por outro lado, a ausência de revolvimento garante melhor preservação da estrutura do solo, com macroagregados mais estáveis (Six et al.,

2000; 2002). Corroborado por Pires et al. (2017), que observaram uniformidade na porosidade do solo em todas as camadas em SPD, demonstrando a manutenção da estrutura do solo ao longo do perfil.

Porém, para Hendrickson e Sanderson (2017), o sistema de ILP pode apresentar efeitos positivos ou negativos sobre os atributos do solo, que são influenciados pelo histórico de manejo e da intensidade de aplicação de pressões externas do solo. Essa relação entre manejo e a qualidade do solo pode ser determinada a partir das alterações nos atributos físicos e quantificada pelos indicadores de qualidade do solo.

1.3 Avaliação da qualidade física do solo através do intervalo hídrico ótimo

Apesar da qualidade física do solo não ter uma definição absoluta (Van Lier e Gubiani, 2015), pode ser entendida como a capacidade de o solo desempenhar suas funções a fim de garantir o crescimento e desenvolvimento das plantas (Tormena et al., 1998). A estrutura do solo que governa suas funções, como retenção de água, infiltração, resistência do solo à penetração das raízes, matéria orgânica e suscetibilidade à erosão (Rabot et al., 2018).

A densidade do solo é o parâmetro mais utilizado para avaliação dos impactos do solo pela facilidade de obtenção (Rabot et al., 2018), mas que também podem ser analisados através de alterações na porosidade e da resistência à penetração (Lima et al., 2017). A mudança de uso do solo pode alterar a qualidade física do solo, como foi observado por Cherubin et al. (2016) na transição de uso do solo de vegetação nativa para área de pastagem e para cana-de-açúcar, em Latossolo, e notaram o aumento da resistência do solo à penetração e a redução da qualidade física do solo.

Nesse sentido, o intervalo hídrico ótimo (IHO) é um indicador de qualidade que abrange várias variáveis em um único parâmetro. É uma expressão inicialmente definida em inglês como *Least limiting water range* (LLWR) (Silva et al., 1994), a qual representa a faixa de água disponível para plantas em que oferece as mínimas restrições ao desenvolvimento radicular (Silva et al., 1994; Tormena et al., 1998).

Essa faixa de água é obtida entre os limites superior e inferior de água no solo. O limite superior é definido pela porosidade de aeração do solo limitada a 10% e/ou a umidade da capacidade de campo [(CC) - tensão de 6 kPa, considerando o solo em estudo], enquanto, o limite inferior é o ponto de murcha permanente [(PMP) que se refere a umidade do solo na tensão de 1500 kPa] e/ou resistência do solo à penetração (RP).

No que tange à aeração, apesar da elevada suscetibilidade à compactação, os Latossolos oxídicos são altamente porosos de modo que este atributo não se revela limitante para o intervalo hídrico ótimo, apenas em casos de compactação extrema (Silva et al., 2017).

Por outro lado, a resistência à penetração é um dos maiores limitantes do IHO nos Latossolos da região do Cerrado (Severiano et al., 2011). No entanto, cada sistema de manejo imprime alterações estruturais distintas ao longo do perfil do solo. Sabendo disso, quando se fixa o valor de resistência à penetração crítica para desenvolvimento das plantas, como por exemplo 2,0 MPa proposto por Tormena et al. (1998), pode-se estimar de forma errônea as limitações ao desempenho das funções edáficas do solo. Diante disso, tem-se levado em conta as particularidades de cada sistema de manejo, através da variação da resistência à penetração crítica (Betioli Junior et al., 2012; Moreira et al., 2014).

De modo geral, os trabalhos da literatura apontam que Latossolos de diferentes texturas manejados predominam como limite inferior do IHO a resistência à penetração. Em outras palavras, a resistência à penetração (RP) substituiu o ponto de murcha permanente, assumindo o limite inferior do IHO em quase sua totalidade, restringindo a amplitude deste (Betioli Júnior et al., 2012; Gonçalves et al., 2014; Moreira et al., 2014).

Sob condições naturais, a variação do teor de água no solo predomina entre capacidade de campo e ponto de murcha permanente, em outras palavras, o IHO é igual a água disponível no solo. Logo, a resistência do solo à penetração e a porosidade de aeração não são limitantes nessas condições (Guimarães et al., 2013), ou ainda, quando o solo é revolvido ocorre a destruição da estrutura e ao mesmo tempo redução da densidade e da resistência à penetração (Serafim et al., 2008). Pode-se dizer, portanto, que sob condições estruturais distintas, seja condições naturais ou antrópicas (revolvimento), é possível obter valores de IHO parecidos.

Nesse sentido, Calonego et al. (2011) discutem o uso do valor de 2,0 MPa para resistência à penetração crítica em sistema plantio direto, sugerindo que esse valor pode estar subestimado, haja vista que despreza os canais formados pela morte das raízes e que funcionam como caminhos alternativos para o crescimento e desenvolvimento de novas raízes. Assim, nem sempre se utiliza um único valor de resistência do solo à penetração para todos os uso e manejo do solo (Betioli Júnior et al., 2012; Moreira et al., 2014).

Apesar de o IHO ser considerado indicador agrônomico da qualidade física do solo, no qual integra propriedades do solo relacionadas com o desenvolvimento das plantas, muitas pesquisas não demonstram relação de dependência entre o IHO e o crescimento e produção das culturas (Cecagno et al., 2016; Gubiani et al., 2013; Mishra et al., 2015),

gerando controversas quanto à sua eficiência. Neste sentido, Van Lier e Gubiani (2015) apontam que a ampla utilização do IHO é meramente pela aplicabilidade metodológica e não pela eficiência.

No entanto, há trabalhos mais complexos, avaliando não só o conteúdo de água no solo disponível para plantas através do IHO, bem como sua associação com o potencial hídrico, crescimento e desenvolvimento das plantas (Silva et al., 2019), bem como proposições de avanços metodológicos na tónica do IHO (Silva et al., 2015).

Ademais, na literatura apresenta vários trabalhos em diferentes sistemas de preparo e manejo do solo que aderiram ao IHO como indicador da qualidade física do solo. Isso porque as variáveis consideradas na definição do IHO, densidade, porosidade de aeração, capacidade de campo, ponto de murcha permanente e resistência à penetração, são atributos do solo que mudam com o manejo e preparo do solo, indicando, pois, que esse indicador é altamente influenciado pela compactação do solo (Guimarães Júnnyor et al., 2015).

Numa transição de vegetação nativa para áreas de pastagem sob pastejo, Leão et al. (2006) observaram a influência do pastejo animal excessivo na estrutura do solo utilizando como indicador o IHO, corroborando a eficiência desse indicador de qualidade física do solo. Sensibilidade atestada também por Nascimento et al. (2019) em sistemas de integração lavoura-pecuária e Lavoura-pecuária-floresta.

No entanto, o efeito do pastoreio sobre o solo é inerente ao contexto em que está inserido (Zhang et al., 2019) e nem sempre é possível avaliação científica da compactação nesses sistemas. Dessa forma, a resposta de sistemas integrados de longa duração e com pastejo animal na compactação do solo avaliada pelo IHO, ainda são escassos.

É interessante ressaltar que o solo é resiliente, isto é, capaz de recuperar sua estrutura. Ambus et al. (2018) avaliando um sistema de integração lavoura pecuária de 15 anos de duração afirmam que, se por um lado, o sistema com pastejo animal sofre compactação na camada superficial do solo, por outro, apenas um ciclo de lavoura é suficiente para recuperar a estrutura do solo. Os autores atribuem essa resiliência do solo à atividade biológica e decomposição das raízes das gramíneas do ciclo anterior.

A recuperação do solo depende de fatores como o tipo de solo, manejo adotado e a atividade biológica (Ambus et al., 2018). No entanto, melhor compreensão do IHO do solo sob sistemas de integração lavoura-pecuária de longa duração se faz necessária, tanto em fase pecuária como lavoura, bem como a comparação com outros sistemas, como sistema plantio direto, pastagem contínua adotados em larga escala na agropecuária brasileira.

1.4 Referências Bibliográficas

- Ambus, J.V., Reichert, J.M., Gubiani, P.I., Carvalho, P.C.F., 2018. Changes in composition and functional soil properties in long-term no-till integrated crop-livestock system. *Geoderma*, 330, 232–243. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.06.005>
- 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. *Rev. Bras. Ciênc. Solo* 36, 971–982. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832012000300027>
- Bertolazi, V.T., Inda, A.V., Caner, L., Martins, A.P., Vaz, M.A.B., Bonnet, M., Anghinoni, I., Carvalho, P.C.F., 2017. Impact of an integrated no-till soybean–beef cattle production system on Oxisol mineralogy in southern Brazil. *Appl. Clay Sci.* 149, 67–74. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2017.08.028>
- Calonego, J.C.; Borghi, E.; Crusciol C.A.C. Intervalo hídrico ótimo e compactação do solo com o cultivo de milho e braquiária. *Rev. Bras. Ciênc. Solo*, v. 35, p. 2183-2190, 2011. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832011000600033>
- Carducci, C.E., Oliveira, G.C., Severiano, E.C., Seviani, W.M., 2011. Modelagem da curva de retenção de água de latossolos utilizando a equação duplo Van Genuchten. *Rev. Bras. Ciênc. Solo* 35, 77–86. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832011000100007>
- Carvalho, W.P., Carvalho, G.J., Abbade Neto, D.O., E Teixeira, L.G.V., 2013. Desempenho agrônomo de plantas de cobertura usadas na proteção do solo no período de pousio. *Pesq. agropec. bras.* 48, 157–166. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-204X2013000200005>
- 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 Tillage Res.*, 156, 54–62. <https://doi.org/10.1016/j.still.2015.10.005>
- Cherr, C.M., Scholberg, J.M.S., Mcorley, R., 2006. Green manure approaches to crop production: a synthesis. *Agronomy Journal*, 98, 302–319. <http://dx.doi.org/10.2134/agronj2005.0035>
- Cherubin, M.R., Karlém, D.L., Franco, A.L.C., Tormena, C.A., Cerri, C.E.P., Davies, C.A., Cerri, C.C., 2016. Soil physical quality response to sugarcane expansion in Brazil. *Geoderma*, 267, 156–168. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.01.004>.
- Denardim, J.E., 2014. Práticas conservacionista complementares em sistema plantio direto. Embrapa Trigo. 14º Encontro Nacional de Plantio Direto na palha. https://www.febrapdp.org.br/14enpdp/arquivos14/1308_Aditorio_GuaicurusPraticas_Conservacionistas_complementares_em_SPD_Jose_Eloir_Denardin.pdf (Acesso em 23 de maio de 2019)
- Dias Júnior, M.S., Tassinari, D. Martins, P.C.C. Compactação Do Solo – Atualização In: Severiano, E.C., Moraes, M.F., Paula, A.M., 2019. Tópicos em ciência do solo. Viçosa, Minas Gerais: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 10 (no prelo).
- Flávio Neto, J., Severiano, E.C., Costa, K.A.P., Guimarães Júnnyor, W.S., Gonçalves, W.G., Andrade, R., 2015. Biological soil loosening by grasses from genus *Brachiaria* in crop-livestock integration. *Acta Sci. Agron.* 37, 375–383. <https://doi:10.4025/actasciagron.v37i3.19392>

- Gazolla, P.R., Guareschi, R.F., Perin A., Pereira, M.G., Rossi, C.Q., 2015. Frações da matéria orgânica do solo sob pastagem, sistema plantio direto e integração lavoura-pecuária. *Semina: Ciênc. Agrár.* 36, 693–704. <http://dx.doi.org/10.5433/1679-0359.2015v36n2p693>
- Gonçalves, W.G., Severiano, E.C., Silva, F.G., Costa, K.A.P., Guimarães Junnyor, W.S., Melo, G.B., 2014. Least limiting water range in assessing compaction in a Brazilian Cerrado Latosol growing sugarcane. *Rev. Bras. Ciênc. Solo* 38, 432–443. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832014000200008>
- Greenwood, K.L., McKenzie, B.M., 2001. Grazing effects on soil physical properties and the consequences for pastures: a review. *Australian Journal Express Agricola*, 42, 1231–1250. <http://dx.doi.org/10.1071/EA00102>
- 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. <http://dx.doi.org/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. <http://dx.doi.org/10.1590/01000683rbc20150121>
- Guimarães Júnnyor, W.S.; De Maria, I.C., Araujo-Junior, Lima, C.C, Vitti, A.C., Figueiredo, G.C., Dechen, S.C.F., 2019. Soil compaction in the traffic lane due to soil tillage and sugarcane mechanical harvesting operations. *Sci. Agric.* 76, 509–517. No prelo.
- Guimarães R.M.L., Tormena, C.A., Blainski, E., Fidalski, J., 2013. Intervalo hídrico ótimo para avaliação da degradação física do solo. *Rev. Bras. Ciênc. Solo* 37, 1512–1521. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832013000600008>
- Hendrickson, J., Sanderson, M., 2017. Chapter 7 – Perennial-Based Agricultural Systems and Livestock Impact on Soil and Ecological Services. In: al-kaisi, M.M. Lowery, B. Soil Health and Intensification of Agroecosystems, Academic Press, pp.151–171. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-805317-1.00007-5>
- Hungria, M., Franchini, J.C., Brandão-Júnior, O., Kaschuk, G., Souza, R.A., 2009. Soil microbial activity and crop sustainability in a long-term experiment with three soil-tillage and two crop-rotation systems. *Appl. Soil Ecol.* 42, 288–296. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2009.05.005>
- 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. <http://dx.doi.org/10.1590/01000683rbc20140596>
- Ker, J.C., 1997. Latossolos do Brasil: Uma revisão. *Geonomos*, 5, 17–40. <http://dx.doi.org/10.18285/geonomos.v5i1.187>
- Leão, T.P., Silva, A.P., Macedo, M.C.M., Imhoff, S., Euclides, V.P.B., 2006. Least limiting water range: A potential indicator of changes in near-surface soil physical quality after the conversion of Brazilian Savanna into pasture. *Soil Tillage Res.* 88, 279–285. <https://doi.org/10.1016/j.still.2005.06.014>
- Lima, R.P., Silva, A.P., Giarola, N.F.B., Silva, A.R., Rolim, M.M., 2017. Changes in soil compaction indicators in response to agricultural field traffic. *Biosyst. Eng.* 162, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2017.07.002>

- 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. <https://doi.org/10.1016/j.still.2015.01.003>
- 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. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832014000100011>
- Nascimento, D.M., Cavalieri-Polizeli, K.M.V., Silva, A.H., Favaretto, N., Parron, L.M., 2019. Soil physical quality under long-term integrated agricultural production systems. *Soil Tillage Res.* 189, 292–299. <https://doi.org/10.1016/j.still.2018.08.016>
- Pires, L.F., Borges, J.A.R., Rosa, J.A., Cooper, M., Heck, R.J., Passoni, S., Roque, W.L., 2017 Soil structure changes induced by tillage systems. *Soil Tillage Res.* 165, 66–79. <https://doi.org/10.1016/j.still.2016.07.010>
- Prado, R.M., Natale, W., 2003. Alterações na granulometria, grau de floculação e propriedades químicas e de um Latossolo Vermelho distrófico, sob plantio direto e reflorestamento. *Acta Sci. Agron.* 25, 45–52.
- Rada, N., 2013. Assessing Brazil's Cerrado agricultural miracle. *Food Policy*, 38, 146–155. <https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2012.11.002>
- Rabot, E., Wiesmeier, M., Schlüter, S., Vogel, H.-J., 2018. Soil structure as an indicator of soil functions: A review. *Geoderma*, 314, 122–137. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.11.009>
- Reatto, A., Bruand, A., Martins, E.S., Muller, F., Silva, E.M., Carvalho Jr., O.A., Brossard, M., Richard, G., 2009. Development and origin of the microgranular structure in Latosols of the Brazilian Central Plateau: significance of texture, mineralogy, and biological activity. *Catena*, 76, 122–134. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2008.10.003>
- Richards, L.A., 1965. Physical conditions of water in soil. In: Black, C. A. (Ed.). *Methods of soil analysis*. Madison: American Society for Testing and Materials, pp. 128–152.
- Rossetti, K.V., Centurion, J.F., 2017. Compactação em Latossolos e suas relações com o crescimento radicular do milho. *Rev. Agroambiente on-line*, 11, 181–190.
- Salton, J.C., Fabrício, A.C., Machado, L.A.Z., Oliveira, H., 2002. Pastoreio de aveia e compactação do solo. *Rev. Plantio Direto* 69, 32–34.
- Salton, J.C., Mielniczuk, J., Bayer, C., Boeni, M., Conceição, P.C., Fabrício, A.C., Macedo, M.C.M., E Broch, D.L., 2008. Agregação e estabilidade de agregados do solo em sistemas agropecuários em Mato Grosso do Sul. *Rev. Bras. Ciênc. Solo* 32, 11–21. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832008000100002>
- Schimiguel, R., Sá, J.C.M., Briedis, C., Hartman, D.C., Zuffo, J., 2014. Estabilidade de agregados do solo devido a sistemas de cultivo. *Synergismus scyentifica UTFPR*, Pato Branco, 09.
- Serafim, M.E.; Vitorino, A.C.T.; Peixoto, P.P.P; Souza, C.M.A.; Carvalho, D.F., 2008. Intervalo hídrico em um Latossolo vermelho distrófico sob diferentes sistemas de produção. *Eng. agríc.* 28, 654–665. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-69162008000400005>
- Severiano E.C, Oliveira G.C, Dias Júnior M.S, Costa K.A.P, Silva F.G., Ferreira Filho, S.M., 2011. Structural changes in Latosols of the Cerrado Region: I – Relationships between soil

physical properties and Least Limiting Water Range. *Rev. Bras. Ciênc. Solo* 35, 773–782. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832011000300013>

Severiano, E.C., Oliveira, G.C., Dias Junior, M.S., Curi, N., Costa, K.A.P., Carducci, C.E., 2013. Preconsolidation pressure, soil water retention characteristics, and texture of Latosols in the Brazilian Cerrado. *Soil Res.* 51, 193–202. <https://doi.org/10.1071/SR12366>

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

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 potential, initial growth and yield of coffee as affected by soil management system. *Soil Tillage Res.* 189, 36–43. <https://doi.org/10.1016/j.still.2018.12.016>

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. <https://doi.org/10.1016/j.still.2015.06.013>

Silva, L.F.S., Marinho, R.S.B., Matsura, E.E., 2017. Intervalo hídrico ótimo para avaliação de sistemas de produção e rendimento do feijão. *Irriga*, v.22, p.383–399. <https://doi.org/10.15809/irriga.2017v22n2p383-399>

Six, J. Eliot, E.T., Paustian, K., 2000. Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: a mechanisms for C sequestration under no-tillage agriculture. *Soil Biol. Biochem.* 32, 2099–2103. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(00\)00179-6](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(00)00179-6)

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. <https://DOI:10.1023/A:1016125726789>

Souza, D.E., Costa, S.E.V.G.A., Anghinoni, I., Carvalho, P.C.F., Andrigueti, M., Cao, E., 2009. Estoques de carbono orgânico e de nitrogênio no solo em sistema de integração lavoura-pecuária em plantio direto, submetido a intensidades de pastejo. *Rev. Bras. Ciênc. Solo* 33, 1829–1836. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832009000600031>

Souza, Z.M., Alves, M.C., 2003. Propriedade físicas e teor de matéria orgânica em um Latossolo Vermelho de cerrado sob diferentes usos e manejos. *Acta Sci. Agron.* 25, 27–34. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832003000100014>

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

Stefanoski, D.C., Figueiredo, C.C., Santos, G.G., Marchão, R.L., 2016. Selecting soil quality indicators for differen soil management systems in the Brazilian Cerrado. *Pesq. Agropec. Bras.* 51, 1643–1651. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-204X2016000900064>

Vezzani, F.M., Anderson, C., Meenken, E., Gillespie, R., Peterson, M., Beare, M.H., 2018. The importance of plants to development and maintenance of soil structure, microbial communities and ecosystem functions. *Soil Tillage Res.* 175, 139–149. <https://doi.org/10.1016/j.still.2017.09.002>

Zhang, B., Beck, R., Pan, Q., Zhao, M. Hao, X., 2019. Soil physical and chemical properties in response to long-term cattle grazing on sloped rough fescue grassland in the foothills of the Rocky Mountains, Alberta. *Geoderma*, 346, 75–83. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.03.029>

2. OBJETIVO

Avaliar o intervalo hídrico ótimo como indicador da qualidade física de um Latossolo Vermelho Distrófico submetido à sistemas de preparo e manejo integrado de produção, após 26 anos de duração, bem como a influência de adequações da resistência à penetração crítica no conteúdo de água no solo.

(Normas de acordo com a Revista Soil & Tillage Research)

INTERVALO HÍDRICO ÓTIMO COMO INDICADOR DE QUALIDADE FÍSICA DE UM LATOSSOLO VERMELHO, APÓS 26 ANOS DE ADOÇÃO DE SISTEMAS INTEGRAÇÃO LAVOURA-PECUÁRIA

3.1 INTRODUÇÃO

A região do Cerrado recoberta principalmente pelo Latossolos, ricos em óxidos de Fe e Al, os quais são solos excessivamente porosos pela sua estrutura granular com microagregados estáveis (Reatto et al, 2009). Com a expansão da agricultura brasileira a partir da década de 1970, passou a ganhar destaque e é considerado a fronteira agrícola na atualidade (Rada, 2013). Com isso, cresceu também a preocupação com a produção sustentável, surgindo assim em 1991 o primeiro sistema integrado de produção, denominado sistema Barreirão (Oliveira, 1996). Desde então, outras alternativas de produção integrada foram criadas com adaptações diferentes, outros solos e/ou para introdução de outras culturas, somando-se a isto, a entrada do componente animal para pastejo.

A agricultura conservacionista traz como vantagem, o aporte de carbono orgânico do solo que, por sua vez, é considerada ação mitigadora de gases de efeito estufa. Pela vocação por parte dos agricultores e pela viabilidade técnica de adoção destes sistemas em extensas áreas, é que o Brasil assumiu como compromisso o este modelo de produção no âmbito do acordo climático internacional de Paris – COP 21 (Lal, 2016; Medina e Santos, 2017; Sá et al., 2017).

No entanto, encontra-se muita resistência pelos produtores na adoção dos sistemas integrados, por um lado, a necessidade de mudança na estrutura física da fazenda, por outro lado, pela possível compactação superficial do solo pelo pisoteio animal, que é considerada

um dos entraves nesse sistema (Vilela et al., 2011). Todavia, sistema de integração agricultura-pecuária (ILP) possibilita a utilização de espécies forrageiras que apresentam capacidade de descompactação biológica em virtude do seu sistema radicular vigoroso (Flávio Neto et al., 2015). Somado a isso, a cobertura contínua nesses sistemas, além de proteger ininterruptamente a superfície do solo contra o processo erosivo, reduz a temperatura e mantém a umidade do solo (Bertolazi et al., 2017).

Para Hendrickson e Sanderson (2017) esse sistema pode ter efeitos positivos ou negativos sobre os atributos do solo, que são influenciados pelo histórico de manejo e intensidade de pastejo. A compactação nesses sistemas advém quando há pastejo animal excessivo ou tráfego de maquinário em condições inadequadas de água no solo, que aumenta a densidade do solo dificultando crescimento radicular (Moreira et al., 2012) e afetando negativamente a qualidade física do solo. Resultados encontrados por Cecagno et al. (2016) num sistema de IAP de 11 anos, ressaltam que um pastejo moderado pode levar a uma compactação do solo, porém não atinge níveis prejudiciais à qualidade física do solo, seja superficial ou em profundidade.

Apesar da qualidade física do solo não ter definição absoluta (Van Lier e Gubiani, 2015), pode ser entendida a capacidade de o solo desempenhar suas funções a fim de garantir o crescimento e desenvolvimento das plantas (Tormena et al., 1998). A estrutura do solo que governa suas funções, como retenção de água, infiltração, resistência do solo à penetração das raízes, matéria orgânica e suscetibilidade à erosão (Rabot et al., 2018). Nesse sentido, o intervalo hídrico ótimo (IHO) tem sido um indicador muito utilizado, o qual é multifatorial, pois em um único parâmetro abrange vários fatores que afetam a produção vegetal, aeração, disponibilidade hídrica e resistência mecânica, geralmente definida em função da densidade do solo (Tormena et al., 1998; 2007).

Na literatura há muitos trabalhos que caracterizam a qualidade física do solo considerando como indicador o IHO para sistemas de longa duração em cultivo plantio direto (Betioli Júnior et al., 2012; Moraes et al., 2016; Moreira et al., 2014). No entanto, trabalhos avaliando sistema integração lavoura-pecuária com mais de 20 anos de duração ainda são escassos. Somando-se a isso, nem sempre os benefícios desse sistema são observados em curto espaço de tempo (Vilela et al., 2011). Para Ambus et al. (2018), a recuperação do solo depende de fatores como o tipo de solo, o manejo adotado e a atividade biológica.

Ademais, o sistema de manejo influencia de maneira direta a estrutura do solo, em que sistemas conservacionistas, tem-se formação de bioporos, que funcionam como rotas alternativas, maior estado de compactação do solo, e por fim tolera maior RP crítica. Sistema

de preparo convencional, por sua vez, promove destruição da estrutura e bioporos (Pires et al., 2017), o solo revolvido se torna mais susceptível à compactação (Guimarães Júnnyor et al., 2019) fazendo com que a RP limitante seja aquela que restringe a cultura mais sensível à compactação do solo inserida no sistema. Por esse motivo, deve-se levar em consideração o histórico de uso e manejo do solo na definição dos teores limites críticos do IHO, em contraposição aos teores limites fixos.

Calonego et al. (2011) discutem o uso do valor de 2,0 MPa, o qual é amplamente adotado, para resistência à penetração crítica em sistema plantio direto, pode estar subestimado, haja vista que despreza os canais formados pela morte das raízes e que funcionam como caminhos alternativos para o crescimento e desenvolvimento de novas raízes.

Assim, para reflexão crítica em torno da eficiência do IHO na avaliação da qualidade física do solo, para fins de comparação, adotou-se como critério o uso do valor de resistência à penetração (RP) crítica variável, conforme as características intrínsecas de cada manejo avaliado e considerando-se, para tanto, a literatura citada. Para o sistema convencional foi de 1,5 MPa (Torino, 2017); 2,0 MPa (Tormena et al., 1998) para sistemas não conservacionistas e 3,5 MPa para sistemas conservacionistas (Betioli Júnior et al., 2012).

Diante disso, não se sabe se diferentes formas de expor e interpretar o IHO resultaria em conclusões diferentes para os mesmos sistemas de manejo, mas que o aumento da RP considerada crítica ao desenvolvimento das plantas, nesses solos tende a ampliar o intervalo hídrico ótimo.

Portanto, objetivou-se avaliar o IHO como indicador da qualidade física de um Latossolo Vermelho Distrófico submetido à sistemas de preparo e manejo integrado de produção, após 26 anos de duração, bem como a influência de adequações da resistência à penetração crítica no conteúdo de água no solo.

3.2 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido na Embrapa Cerrados - Centro de Pesquisa Agropecuária dos Cerrados (CPAC), Planaltina- DF, no Planalto Central Brasileiro e altitude de 1200 m. A média pluviométrica é de 1500 mm e o solo é classificado em Latossolo Vermelho Distrófico (Santos et al., 2018), cuja mineralogia da fração argila no horizonte Bw é predominantemente composta por gibbsita (50%), goethita (18%), caulinita

(14%), hematita (7%) e quartzo e outros óxidos de ferro (10%) (Marchão et al., 2009a). A granulometria do solo e valores de densidade de partículas (Dp) encontram-se na Tabela 1.

É um experimento de sistemas integrados conduzido desde 1991. O histórico de uso do solo encontra-se na Tabela 2. Para sua instalação, foi primeiramente removida a vegetação e o seguiu com o preparo de solo utilizando arado de disco e correção do solo com calcário dolomítico (5,8 Mg ha⁻¹), P₂O₅ (98 kg ha⁻¹); K₂O (98 kg ha⁻¹); micronutrientes (63 kg ha⁻¹) e gesso (2,8 Mg ha⁻¹). Na sequência, a área foi submetida à aplicação em área total de 1,7, 1,1 e 2,0 Mg ha⁻¹ de calcário em 1999, 2006 e 2013, além de 1,5 Mg ha⁻¹ de gesso agrícola incorporado nos sistemas em plantio convencional e em superfície nos sistemas em plantio direto.

Tabela 1 – Análise granulométrica ⁽¹⁾ e densidade de partículas (Dp) ⁽²⁾ do solo em estudo.

Camada (m)	Areia	Silte g kg ⁻¹	Argila	Dp kg dm ⁻³
0,0-0,05	251±7*	177±10	572±13	2,65±0,01
0,05-0,10	268±10	149±7	583±12	2,67±0,01
0,10-0,20	262±9	137±7	601±11	2,69±0,01

⁽¹⁾ Obtida pelo Método de pipeta; ⁽²⁾ Dp pelo método do picnômetro. Média de 32 amostras por camada. *Erro padrão da média.

O delineamento adotado foi em blocos ao acaso, contendo 8 tratamentos, com quatro repetições. A área de cada parcela experimental foi de 50 m de comprimento e 40 m de largura (2000 m²). Os tratamentos foram definidos pelo sistema de preparo e manejo do solo, estabelecidos e mantidos na área há 26 anos por ocasião da amostragem de solo. Os tratamentos implantados no momento da amostragem são descritos a seguir:

- Pastagem contínua com gramínea (PAST) – *Brachiaria brizantha* cv Piatã, com pastejo bovino;
- Sistema integrado lavoura-pecuária, fase lavoura sob preparo convencional (SIL-C) – amostragem realizada após o revolvimento do solo;
- Sistema integrado lavoura-pecuária, fase lavoura sob plantio direto (SIL-D) – soja;
- Sistema integrado lavoura-pecuária, fase pastagem sob plantio direto (SIP-D) – *Brachiaria brizantha* cv Piatã, com pastejo bovino;
- Sistema lavoura contínua sob sistema convencional (LAV-C) – soja;
- Sistema lavoura contínua sob sistema plantio direto (LAV-D) – soja;
- Cerrado Nativo (CN) – adjacente à área de cultivo, como referência em estrutura do solo preservada;

- Corredor de manejo (COR) – entre os blocos, considerado como referência de degradação estrutural do solo.

Tabela 2 – Histórico de uso do solo dos sistemas cultivados na área experimental em estudo desde 1991 até a época da coleta das amostras de solo (2017).

Ano	Pastagem contínua	Sistemas Integrados		Lavoura contínua
	PAST	Pastagem/Lavoura (SIP)	Lavoura/Pastagem (SIL)	Direto/Convencional (LAV)
1991		<i>A. gayanus</i>	Soja	Soja
1992		<i>A. gayanus</i>	Soja	Soja
1993		<i>A. gayanus</i>	Milho	Milho
1994	<i>Andropogon gayanus</i>	<i>A. gayanus</i>	Soja	Soja
1995		Milho	<i>A. gayanus</i>	Milho
1996		Soja	<i>A. gayanus</i>	Soja
1997		Milho	<i>A. gayanus</i>	Milho
1998		Soja	<i>A. gayanus</i>	Soja
1999		<i>P. maximum</i>	Soja	Soja
2000		<i>P. maximum</i>	Milheto	Milheto
2001		<i>P. maximum</i>	Soja	Soja
2002		<i>P. maximum</i>	Milheto	Milheto
2003		<i>P. maximum</i>	Soja/ <i>B. decumbens</i> Marandu	Soja
2004		Soja	<i>B. decumbens</i> cv. Marandu	Soja
2005	<i>Brachiaria decumbens</i> cv. Basilisk	Sorgo	<i>B. decumbens</i> cv. Marandu	Sorgo
2006		Soja	<i>B. decumbens</i> cv. Marandu	Soja RR
2007		Milheto+ <i>B. brizantha</i> cv. Piatã	Soja RR	Soja RR
2008		<i>B. brizantha</i> cv. Piatã	Milho	Milho
2009		<i>B. brizantha</i> cv. Piatã	Soja RR	Soja RR
2010		<i>B. brizantha</i> cv. Piatã	Soja RR / Milho + <i>B. brizantha</i> cv. Piatã	Milho+ <i>B. brizantha</i> cv. Piatã*
2011		Soja	<i>B. brizantha</i> cv. Piatã	Soja RR
2012		Milho+ <i>B. brizantha</i> cv. Piatã	<i>B. brizantha</i> cv. Piatã	Milho+ <i>B. brizantha</i> cv. Piatã*
2013		Soja	<i>B. brizantha</i> cv. Piatã / Soja	Soja
2014	<i>Brachiaria brizantha</i> cv. Piatã	Sorgo + <i>B. brizantha</i> cv. Piatã	Sorgo + <i>B. brizantha</i> Cv. Piatã/Soja	Milho + <i>B. brizantha</i> cv. Piatã/Soja
2015		<i>B. brizantha</i> cv. Piatã	Milho+ <i>B. brizantha</i> . cv. Paiaguás/Soja	Milho+ <i>B. brizantha</i> cv. Paiaguás/Soja
2016		<i>B. brizantha</i> cv. Piatã	Soja/milho+fornageiras	Soja/milho+fornageiras as
2017		<i>B. brizantha</i> cv. Piatã	Soja/Sorgo+ <i>P. maximum</i> cv. Tamani	Soja/Sorgo

A. gayanus=*Andropogon gayanus* cv Planaltinha; *B.decumbens*, *Brachiaria decumbens*; RR, roundup ready; *B. brizantha*, *Brachiaria brizantha*; Pm., *Panicum maximum* cv. Tanzânia; * *Bb.* cv. Piatã.

Os sistemas de integração lavoura-pecuária são mantidos por quatro anos com lavoura, alternando para pastagem na sequência, de forma que a introdução da lavoura no sistema recupere a fertilidade das pastagens e, na fase pecuária, tem-se o pastejo bovino.

A taxa de lotação animal é definida por meio da disponibilidade de forragem, esta por sua vez, é avaliada pelo método do quadrado aleatório. O sistema de pastejo que vem sendo utilizado é o alternado entre os blocos, com animais bovinos da raça nelore, variando categoria para atender a taxa de lotação dimensionada.

Os sistemas de integração, fase lavoura, tiveram os mesmos manejo e implantação da mesma cultura utilizada nos sistemas de lavoura contínua. Os sistemas com lavoura e preparo convencional são revolvidos anualmente com grade aradora após colheita na camada 0,00-0,25 m e niveladora antes do plantio. Ressalta-se, porém, que a frequência de revolvimento do solo para o sistema integrado (SIL-C) é menor, apenas nos quatro anos da fase lavoura, alternado, posteriormente com 4 anos de pecuária, sem revolvimento.

Foi avaliada a produtividade da soja dos sistemas na fase lavoura, na safra 2016/2017, coletando-se 3 linhas de dois metros em cada repetição, e posteriormente, extrapolando para a área em hectare. O perfil do solo amostrado se encontra na Figura 1).

As amostras foram coletadas em fevereiro de 2017, que é durante estação chuvosa. No entanto, o tratamento sistema integrado lavoura-pastagem, fase lavoura sob preparo convencional (SIL-C) foi coletado no mês de novembro/2017, uma semana após o revolvimento do solo, na transição de lavoura para pastagem.

Foram coletadas oito amostras indeformadas, isto é, duas por repetição, utilizando anéis volumétricos, em três profundidades (0,00-0,05; 0,05-0,10; e 0,10-0,20 m) nos oito tratamentos, sendo quatro utilizadas para geração da curva de resistência à penetração (CRP) e quatro para caracterização da curva de retenção de água no solo (CRA), nos laboratórios de Física do solo do IF Goiano – Campus Rio Verde e CPAC, respectivamente. No entanto, para a densidade do solo foram consideradas as determinações das 8 amostras. Dessa forma, tanto para CRP quanto para CRA, totalizaram 96 amostras (8 tratamentos x 3 profundidades x 4 repetições) e para Ds, 192 amostras.

Foram coletadas, ainda, amostras deformadas de forma aleatórias para determinação da densidade de partícula e textura do solo, nos tratamentos e camadas descritas anteriormente. A textura do solo foi determinada pelo método de pipeta, conforme Donagemma et al. (2017), enquanto a densidade de partícula foi determinada pelo método

do picnômetro utilizando água destilada (Viana et al., 2017). Depois foi calculada a média dos tratamentos por camada, supracitado na tabela 1.

Para geração da CRA do solo, as amostras inicialmente foram levadas à mesa de tensão e submetidas às tensões matriciais 1; 3; 6 e 10 kPa na coluna de areia e as tensões 33; 60; 800 e 1500 kPa no extrator de Richards (Richards e Weaver, 1943). Por conseguinte, foram levadas à estufa 105°C por 48 horas, para determinação da densidade e umidade.

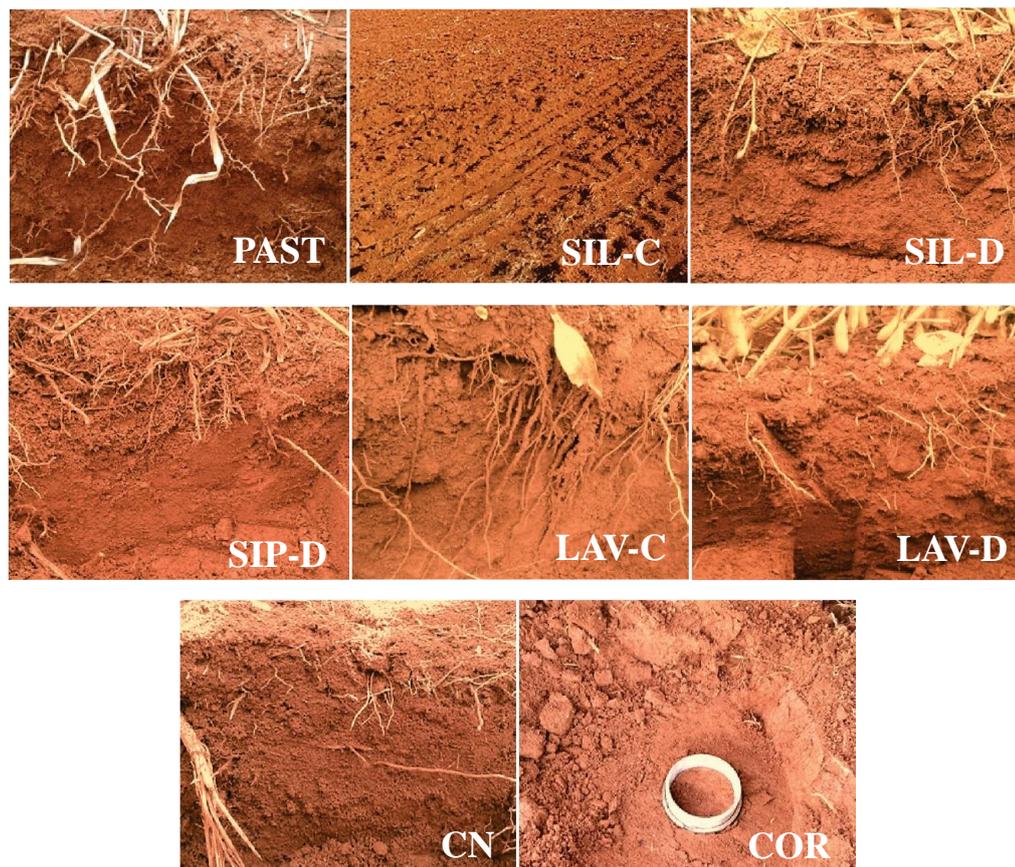


Figura 1 – Perfil do solo nos tratamentos avaliados. PAST (Pastagem contínua); SIL-C (Sistema integrado lavoura-pecuária, fase lavoura em plantio convencional); SIL-D (Sistema integrado lavoura-pecuária, fase lavoura sob plantio direto); SIP-D (Sistema integrado pastagem-lavoura, fase pastagem sob plantio direto); LAV-C (lavoura contínua sob plantio convencional); LAV-D (lavoura contínua sob plantio direto); CN (Cerrado Nativo); COR (Corredor de manejo).

A curva de retenção de água foi ajustada para cada tratamento com auxílio do software estatístico SAS, utilizando o modelo não linear proposto por Ross et al. (1991), adaptado por Leão et al. (2005) com a adição da densidade do solo, descrito na equação 1:

$$\theta = \exp(a + bDs) * (\Psi^c) \quad \text{Eq. (1)}$$

Em que, θ = umidade volumétrica ($\text{dm}^3 \text{dm}^{-3}$);

Ds = Densidade do solo (kg dm^{-3});

Ψ = Potencial matricial (kPa);

a, b e c = coeficientes de ajuste do modelo

Para análises da curva de resistência do solo à penetração [CRP], inicialmente as amostras foram preparadas, saturadas por 48 horas por capilaridade e, na sequência, tiveram o seu conteúdo de água ajustado através da secagem ao valor de umidade dentro da amplitude de 0,50 a 0,05 kg kg⁻¹. A resistência à penetração foi através de um penetrômetro de bancada MARCONI MA 933/30, com ponteira específica de 4 mm de diâmetro e velocidade constante de 10 mm s⁻¹. Após o procedimento, as amostras foram secas em estufa a 105°C por 48 horas para determinação do solo seco e densidade e umidade do solo.

A CRP foi obtida a partir do ajuste da RP em função do conteúdo de água no solo (θ) e da Ds, seguindo o modelo não linear proposto por Busscher (1990) (Equação 2), através do programa estatístico SAS (SAS, 2002).

$$RP = dDs^e\theta^f \quad \text{Eq. 2}$$

Em que, RP = Resistência à penetração (MPa);

Ds = Densidade do solo (kg dm⁻³);

θ = umidade volumétrica (dm³ dm⁻³);

d, e e f = coeficientes de ajuste do modelo.

O ajuste da CRA e CRP foi determinado seguindo as rotinas PROC GLM e PROC REG (SAS, 2002). No procedimento, foram consideradas as 4 repetições, viabilizando o ajuste de uma curva para cada tratamento e para camada analisada.

O Intervalo Hídrico Ótimo (IHO) foi obtido de acordo com Silva et al. (1994), que considera como limites superiores o conteúdo de água no solo retido na tensão de 6 kPa como sendo a capacidade de campo (θ_{CC}) (Severiano et al., 2011) e/ou a porosidade de aeração, descontando 10% da porosidade total (θ_{PA}) (Grable e Siemer, 1968). Para limites inferiores, foram considerados o conteúdo de água retido na tensão de 1500 kPa, que se refere ao ponto de murcha permanente (θ_{PMP}) (Richards and Weaver, 1943), e/ou o conteúdo de água que corresponde à resistência do solo à penetração limitante (θ_{RP}).

Assim, foram considerados valores críticos conforme a cultura e/ou sistemas de preparo e manejo do solo, sendo de 1,5 MPa (Tabela 3 - a partir de compilação de trabalhos na literatura para a cultura do milho em sistema convencional), 2,0 MPa [(valor considerado como alto, segundo Soil Survey Manual (2017) e de crítico ao IHO, de acordo com Tormena et al. (1998)] e 3,5 MPa para sistemas conservacionistas de produção agropecuária (Betioli Júnior. et al., 2012).

Tabela 3 – Média dos valores críticos de resistência do solo à penetração (RP) em MPa para o desenvolvimento da cultura do milho.

RP (MPa)	Tipo de solo	Sistema de cultivo	Referência
0,91	Argissolo Vermelho-Amarelo Arenoso	Convencional	Beutler et al. (2009)
1,53	Argissolo Amarelo Arenoso	Convencional	Deperon Jr. et al. (2016)
1,40	Latossolo Vermelho Textura Média	Vaso	Foloni et al. (2003)
1,16	Latossolo Vermelho Argiloso	Convencional	Freddi (2007)
1,65	Latossolo Vermelho Textura Média	Convencional	Freddi et al. (2007)a
1,65	Latossolo Vermelho Textura Média	Convencional	Freddi et al. (2007)b
2,15	Latossolo Vermelho Textura Média	Convencional	Freddi et al. (2009)a
1,23-1,43	Latossolo Vermelho Textura Média	Convencional	Freddi et al. (2009)b
1,50		Média	

Fonte: Torino (2017).

A θ_{CC} e θ_{PMP} foram obtidas por meio da substituição dos referidos valores de Ψ na CRA (Eq. 1) e a θ_{RP} pela CRP (Eq. 2). A θ_{PA} , foi descontada da porosidade total, calculada pela equação 3:

$$PT = 1 - \left(\frac{Ds}{Dp} \right) \quad \text{Eq. 3}$$

Em que PT = porosidade total;

Ds = Densidade do solo;

Dp = Densidade de partículas, considerando os valores médios apresentados na tabela 1

Os resultados de IHO foram apresentados das seguintes formas:

- Teores-limite críticos em função da densidade do solo, para cada camada e tratamento avaliados. Conforme descrito por Wu et al. (2003), existem quatro possibilidades para calcular o IHO (Eqs. 4 a 7). Dessa forma:

(a) Se $\theta_{PA} \geq \theta_{CC}$ e $\theta_{RP} \leq \theta_{PMP}$:

$$IHO = \theta_{CC} - \theta_{PMP} \quad \text{Eq. (4)}$$

(b) Se $\theta_{PA} \geq \theta_{CC}$ e $\theta_{RP} \geq \theta_{PMP}$:

$$IHO = \theta_{CC} - \theta_{RP} \quad \text{Eq. (5)}$$

(c) Se $\theta_{PA} \leq \theta_{CC}$ e $\theta_{RP} \leq \theta_{PMP}$:

$$IHO = \theta_{PA} - \theta_{PMP} \quad \text{Eq. (6)}$$

(d) Se $\theta_{PA} \leq \theta_{CC}$ e $\theta_{RP} \geq \theta_{PMP}$:

$$IHO = \theta_{PA} - \theta_{RP} \quad \text{Eq. (7)}$$

- Valor absoluto em função da densidade do solo, para cada camada e tratamento avaliados, considerando ainda a resistência à penetração crítica fixa 2,0 MPa ou variável conforme as particularidades de cada tratamento [1,5, 2,0 e 3,5 MPa, para sistemas de cultivo convencional (LAV-C), não conservacionistas (SIL-C e COR) e conservacionistas (PAST, SIL-D, SIP-D, LAV-D e CN, respectivamente)];

- Valor relativo de D_s em função da densidade limitante (D_{SR}), considerada como o valor de D_s em que se inicia as restrições estruturais do solo em decorrência da primeira inversão dentre as possibilidades expressas nas equações 4 ou 6;

- Densidade do solo, intervalo hídrico ótimo e densidade do solo relativa no perfil avaliado.

Os resultados de D_{SR} foram submetidos à análise de variância utilizando o software estatístico SISVAR 5.6 (Ferreira, 2011) e ao teste de Tukey ($p < 0,05$) quando constatada significância. Todos os ajustes gráficos foram realizados pelo software Sigma Plot 11.0 (Jandel Scientific), considerando a dispersão das médias pelo seu erro padrão.

3.3 RESULTADOS

A Tabela 4 apresenta as equações de ajustes da curva de retenção de água (CRA) e curva de resistência à penetração (CRP) com os respectivos coeficientes ajustados em função dos tratamentos e camadas. As equações apresentaram significância para as camadas, sistemas ou ambos fatores ($p < 0,05$), refletido no elevado R^2 observado (Tabela 4).

Na camada de 0,00-0,05 m os tratamentos apresentaram significância nos coeficientes b e c da curva de retenção de água no solo (CRA), mantendo o intercepto fixo (coeficiente a significativo apenas para a regressão) enquanto para a curva de resistência à penetração (CRP) os ajustes para os tratamentos também apresentaram significância, no entanto apenas o coeficiente f foi variável entre os tratamentos. Estes resultados foram para todos os tratamentos, exceto o COR que não apresentou significância para CRP, desta forma, a aplicação da CRP no referido tratamento na modelagem do intervalo hídrico ótimo (IHO) (Figura 2 e 3) adotou-se a CRP da camada de 0,00-0,05 m.

Tabela 4 – Coeficientes de ajuste das equações das curvas de retenção de água no solo e de resistência à penetração em função dos tratamentos nas três profundidades, 0,00-0,05, 0,05-0,10, 0,10-0,20 m e camada unificada 0,00-0,20 m em um Latossolo Vermelho Distrófico.

Sistema	Curva de retenção de água ¹		Curva de resistência à penetração ²	
	0,00-0,05 m			
Camada ^A	$\theta = (exp^{-1,06480+0,28932Ds}) * \Psi^{-0,11690}$		$RP = 0,24986Ds^{5,30667} \theta^{-0,86417}$	
PAST ^B	$\theta = (exp^{-1,23707+0,43565Ds}) * \Psi^{-0,13087}$		$RP = 0,22980Ds^{6,12958} \theta^{-0,99686}$	
SIL-C	$\theta = (exp^{-1,23707+0,41245Ds}) * \Psi^{-0,13255}$		$RP = 0,22980Ds^{6,12958} \theta^{-0,84038}$	
SIL-D	$\theta = (exp^{-1,23707+0,48318Ds}) * \Psi^{-0,11125}$		$RP = 0,22980Ds^{6,12958} \theta^{-1,21290}$	
SIP-D	$\theta = (exp^{-1,23707+0,43704Ds}) * \Psi^{-0,11222}$		$RP = 0,22980Ds^{6,12958} \theta^{-0,99798}$	
LAV-C	$\theta = (exp^{-1,23707+0,41604Ds}) * \Psi^{-0,10619}$		$RP = 0,22980Ds^{6,12958} \theta^{-0,64735}$	
LAV-D	$\theta = (exp^{-1,23707+0,48315Ds}) * \Psi^{-0,11781}$		$RP = 0,22980Ds^{6,12958} \theta^{-0,92222}$	
CN	$\theta = (exp^{-1,23707+0,53692Ds}) * \Psi^{-0,12024}$		$RP = 0,22980Ds^{6,12958} \theta^{-0,86743}$	
COR	$\theta = (exp^{-1,23707+0,37094Ds}) * \Psi^{-0,09788}$		ns	
0,05 – 0,10 m				
Camada ^C	$\theta = (exp^{-0,83253+0,11349Ds}) * \Psi^{-0,11655}$		$RP = 0,12904Ds^{6,20638} \theta^{-1,21728}$	
PAST ^D			$RP = 0,11715Ds^{7,10355} \theta^{-1,22032}$	
SIL-C			$RP = 0,11715Ds^{7,10355} \theta^{-1,06989}$	
SIL-D			$RP = 0,11715Ds^{7,10355} \theta^{-1,46729}$	
SIP-D			$RP = 0,11715Ds^{7,10355} \theta^{-1,03801}$	
LAV-C	ns		$RP = 0,11715Ds^{7,10355} \theta^{-1,10118}$	
LAV-D			$RP = 0,11715Ds^{7,10355} \theta^{-1,35049}$	
CN			$RP = 0,11715Ds^{7,10355} \theta^{-1,31712}$	
COR			$RP = 0,11715Ds^{7,10355} \theta^{-1,11825}$	
0,10-0,20 m				
Camada ^E	$\theta = (exp^{-0,94492+0,19411Ds}) * \Psi^{-0,11485}$		$RP = 0,14453Ds^{4,1851} \theta^{-1,25341}$	
Sistemas ^F	ns		ns	
0,00-0,20 m				
Geral ^G	$\theta = (exp^{-1,01918+0,25984Ds}) * \Psi^{-0,11610}$		$RP = 0,16880Ds^{5,16827} \theta^{-1,08812}$	
PAST ^H	$\theta = (exp^{-1,08875+0,32932Ds}) * \Psi^{-0,13591}$		$RP = 0,16812Ds^{4,62728} \theta^{-1,19512}$	
SIL-C	$\theta = (exp^{-1,08875+0,32910Ds}) * \Psi^{-0,13162}$		$RP = 0,16812Ds^{4,62728} \theta^{-0,98857}$	
SIL-D	$\theta = (exp^{-1,08875+0,35348Ds}) * \Psi^{-0,11253}$		$RP = 0,16812Ds^{4,62728} \theta^{-1,22145}$	
SIP-D	$\theta = (exp^{-1,08875+0,31540Ds}) * \Psi^{-0,11337}$		$RP = 0,16812Ds^{4,62728} \theta^{-1,17807}$	
LAV-C	$\theta = (exp^{-1,08875+0,29773Ds}) * \Psi^{-0,10797}$		$RP = 0,16812Ds^{4,62728} \theta^{-0,92572}$	
LAV-D	$\theta = (exp^{-1,08875+0,32820Ds}) * \Psi^{-0,11049}$		$RP = 0,16812Ds^{4,62728} \theta^{-1,02391}$	
CN	$\theta = (exp^{-1,08875+0,32809Ds}) * \Psi^{-0,11132}$		$RP = 0,16812Ds^{4,62728} \theta^{-1,04922}$	
COR	$\theta = (exp^{-1,08875+0,26990Ds}) * \Psi^{-0,09761}$		$RP = 0,16812Ds^{4,62728} \theta^{-1,30627}$	
	^A F= 1468,47; p < 0,01; R ² =0,88; n=256		^A F= 37,14; p < 0,01; R ² =0,66; n=32	
	^B F= 254,96; p < 0,01; R ² =0,91; n=256		^B F= 8,79; p < 0,01; R ² =0,71; n=32	
	^C F= 2216,05; p < 0,05; R ² =0,92; n=256		^C F=73,85; p < 0,01; R ² =0,79; n=32	
	^D ns		^D F= 16,46; p < 0,01; R ² =0,82; n=32	
	^E F= 1584,06; p < 0,01; R ² =0,89; n=256		^E F=42,76; p < 0,01; R ² =0,69; n=32	
	^F ns		^F ns	
	^G F=5005,11; p < 0,01; R ² =0,89; n=768		^G F=146,73; p < 0,01; R ² =0,70; n=96	
	^H F=794,33; p < 0,01; R ² =0,91; n=768		^H F= 34,48; p < 0,01; R ² =0,73; n=96	

θ (conteúdo de água, $dm^3 dm^{-3}$); Ψ (potencial mátrico do solo, kPa); D_s (densidade do solo, $kg dm^{-3}$); RP (Resistência a penetração, MPa). PAST (Pastagem contínua); SIL-C (Sistema integrado lavoura-pecuária, fase lavoura em plantio convencional); SIL-D (Sistema integrado lavoura-pecuária, fase lavoura sob plantio direto); SIP-D (Sistema integrado pastagem-lavoura, fase pastagem sob plantio direto); LAV-C (lavoura contínua sob plantio convencional); LAV-D (lavoura contínua sob plantio direto); CN (Cerrado Nativo); COR (Corredor de manejo).

Os tratamentos tenderam a se igualar a camada (CRA da camada = CRA dos sistemas para 0,05 a 0,10 m; CRA, e CRP não significativa para os sistemas em 0,10 a 0,20 m). Para a camada de 0,05-0,10 m, houve variação apenas para o coeficiente f da CRP, mantendo-se o fixo d e e , semelhante ao que houve em 0,00-0,05 m.

Por outro lado, para a CRA, não houve diferença significativa entre os tratamentos nesta camada, adotando-se para modelagem do IHO a CRA da referida camada.

Para a camada 0,10-0,20m, não houve significância dos coeficientes para nenhum tratamento. Logo na modelagem do IHO, aplicou-se a CRP e CRA da camada. Por outro lado, quando se utilizou a média na camada 0,00-0,20 m, obteve-se significância para os coeficientes b e c da CRA, mantendo o intercepto sempre fixo, a , e coeficiente f da CRP, com d e e fixos.

A Figura 2 apresenta a variação dos limites críticos do intervalo hídrico ótimo em função da densidade do solo, nos sistemas de manejo adotados para as camadas estratificadas (0,00-0,05, 0,05-0,10, 0,10-0,20 m) e camada unificada (0,00-0,20 m), sendo este último considerado todos os dados. Os limites superiores e inferiores do IHO (colorido) em cada sistema de uso e manejo são ditados de acordo com as equações supracitadas na Tabela 4 e sobrepostas à figura padrão (coloração cinza) que se refere ao IHO da camada analisada.

Foram considerados apenas os intervalos de densidade do referido tratamento, a partir do erro padrão da média.

Pela análise da Figura 2, é possível constatar que os sistemas integrados afetaram não só a dispersão da D_s (abscissa) mas também dos teores limites do IHO (ordenada), refletindo na estrutura do solo em todo seu aspecto. Considerou-se para classificação da qualidade física do solo, as igualdades do erro padrão da média da D_s , e de acordo com a densidade do solo, $COR > PAST \geq SIP-D > LAV-D \geq LAV-C > CN \geq SIL-C > SIL-D$, na camada de 0,00-0,05 m (a faixa de igualdade da densidade sobreposta é representada pela mistura das cores). Nesta camada, o IHO da maioria dos tratamentos foi semelhante à água disponível para plantas (AD), entendida como a água que é retida entre a capacidade de campo (CC) e ponto de murcha permanente (PMP), exceto para PAST e COR.

Para a camada de 0,05-0,10 m, haja visto que somente a CRP foi variável dentro dos sistemas (Tabela 4), logo apenas os limites da RP diferenciaram os tratamentos, em que $COR > SIP-D > PAST \geq LAV-D \geq LAV-C \geq SIL-D \geq SIL-C > CN$. Houve alterações estruturais refletindo nas limitações ao IHO, tem-se que o IHO foi igual à AD apenas para os dois tratamentos sob plantio convencional (SIL-C e LAV-C) e CN. Para a camada de 0,10-0,20m,

os limites do IHO em todos os tratamentos foram semelhantes ao IHO geral da camada, sendo afetados somente pela densidade do solo em cada tratamento em ordem crescente $COR > SIP-D \geq PAST \geq LAV-D \geq LAV-C > SIL-D > SIL-C > CN$, sendo que os três primeiros tiveram o IHO limitado pela RP e o restante o $IHO=AD$, cujo comportamento se repete na camada unificada (0,00-0,20 m). Para camada unificada, quanto à densidade, tem-se que, $COR > SIP-D \geq PAST > LAV-D \geq LAV-C > SIL-C \geq SIL-D > CN$.

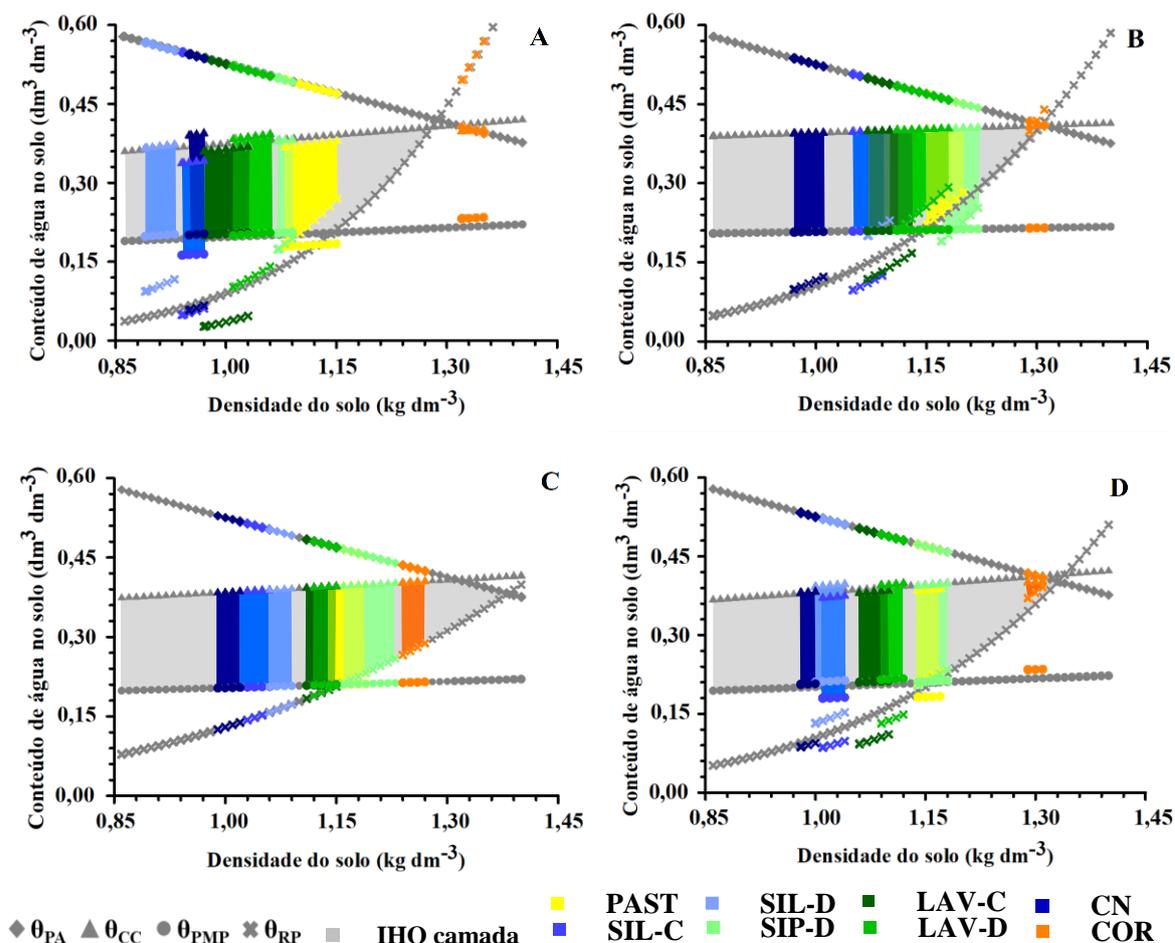


Figura 2 – Variação dos teores limite do Intervalo hídrico ótimo de capacidade de campo (θ_{CC} : -6 kPa), ponto de murcha permanente (θ_{PMP} : -1500 kPa), porosidade de aeração a 10% (θ_{PA}) e resistência do solo à penetração de 2,0 MPa (θ_{RP}) nas três profundidades (A) 0,00-0,05, (B) 0,05-0,10 e (C) 0,10-0,20 m, e (D) e camada unificada 0,00-0,20 m para os diferentes sistemas de manejo e preparo adotados em um Latossolo Vermelho Distrófico, na região de Planaltina-DF, Brasil. PAST (Pastagem contínua); SIL-C (Sistema integrado lavoura-pecuária, fase lavoura em plantio convencional); SIL-D (Sistema integrado lavoura-pecuária, fase lavoura sob plantio direto); SIP-D (Sistema integrado pastagem-lavoura, fase pastagem sob plantio direto); LAV-C (lavoura contínua sob plantio convencional); LAV-D (lavoura contínua sob plantio direto); CN (Cerrado Nativo); COR (Corredor de manejo).

Quando se considera o IHO de cada camada, observa-se que a densidade do solo limitante (D_{SL}), referente a primeira inversão de limites (conforme equações 4 ou 6), foi em torno de $1,15 \text{ kg dm}^{-3}$, neste caso restringido pela θ_{RP} . Enquanto para os sistemas tem-se deslocamentos dos limites críticos, exceto para a camada 0,10-0,20 m cujos limites foram semelhantes ao da referida camada (Figura 2C), haja vista que tanto a CRA quanto a CRP (Tabela 3) não teve significância entre os tratamentos e adotou-se as curvas da camada.

Nesse sentido, levando em consideração o IHO dos sistemas, a D_{SL} mínima observada entre os tratamentos avaliados na camada, foi de 1,05, 1,08, 1,16 e 1,01 kg dm^{-3} e máxima foi de 1,22, 1,19, 1,16 e 1,27 respectivamente para 0,00-0,05; 0,05-0,10; 0,10-0,20 e 0,00-0,20 m. Enquanto para estas mesmas camadas, a densidade do solo crítica (D_{Sc}) observada, isto é, quanto o $IHO=0$, os menores valores em cada camada foi de 1,21, 1,19, 1,39, 1,32 kg dm^{-3} e os maiores 1,30, 1,31, 1,39, 1,40 kg dm^{-3} , respectivamente.

É perceptível o deslocamento do IHO à direita em função da profundidade, sendo que na camada superficial as densidades dos tratamentos variaram de $0,89 \text{ kg dm}^{-3}$ a $1,15 \text{ kg dm}^{-3}$, exceto o corredor de manejo (COR), cuja densidade foi superior a $1,30 \text{ kg dm}^{-3}$. Para a camada de 0,05-0,10 m as densidades variaram entre $0,97 \text{ kg dm}^{-3}$ a $1,22 \text{ kg dm}^{-3}$, e COR encontra-se no limite da densidade crítica ($IHO=0$) que é 1,30 nessa camada. E na camada 0,10-0,20m a menor densidade é $0,99 \text{ kg dm}^{-3}$ e a máxima menor que $1,27 \text{ kg dm}^{-3}$. Dessa forma, a camada com menores valores de densidade foi a superficial, exceto no tratamento COR.

A Figura 3 apresenta os valores de IHO absoluto em função da densidade do solo, utilizando-se a resistência à penetração de 2,0 MPa. Para todos as profundidades, a variação do comprimento de cada tracejado colorido, que representa os sistemas, é reflexo do erro padrão da média das densidades em cada caso.

A camada de 0,00-0,05m nota-se comportamento distinto no que tange os limites do IHO, capacidade de campo e ponto de murcha permanente (Figura 2A), resultando na oscilação do IHO absoluto em relação ao IHO da camada (Figura 3A), no entanto, com o aprofundamento do perfil do solo essas diferenças foram minimizadas (Figura 3 B e C). Ao passo que na camada unificada 0,00-0,20 m observa-se proximidade dos valores de densidade, na qual a maioria dos valores de IHO dos tratamentos estão dentro da faixa de densidade de 1,00 e $1,18 \text{ kg dm}^{-3}$ (Figura 3D).

Ademais, a variação do IHO para os tratamentos avaliados, com base no erro padrão da média das ordenadas, seguiu a seguinte ordem: $CN > LAV-D > SIL-C > SIP-D > SIL-D >$

LAV-C > PAST > COR para a camada de 0,00-0,05 m, sendo que o IHO do COR foi nulo. Para 0,05-0,10 m observa-se que LAV-C = SIL-C \geq CN > SIL-D > SIP-D > PAST \geq LAV-D > COR e, 0,10-0,20 m, LAV-D = LAV-C \geq SIL-C = SIL-D \geq CN \geq PAST > SIP-D > COR. Por último, considerando uma camada unificada 0,00-0,20 m, tem-se que o SIL-C > SIL-S > LAV-D > CN = SIP-D > LAV-C > PAST > COR.

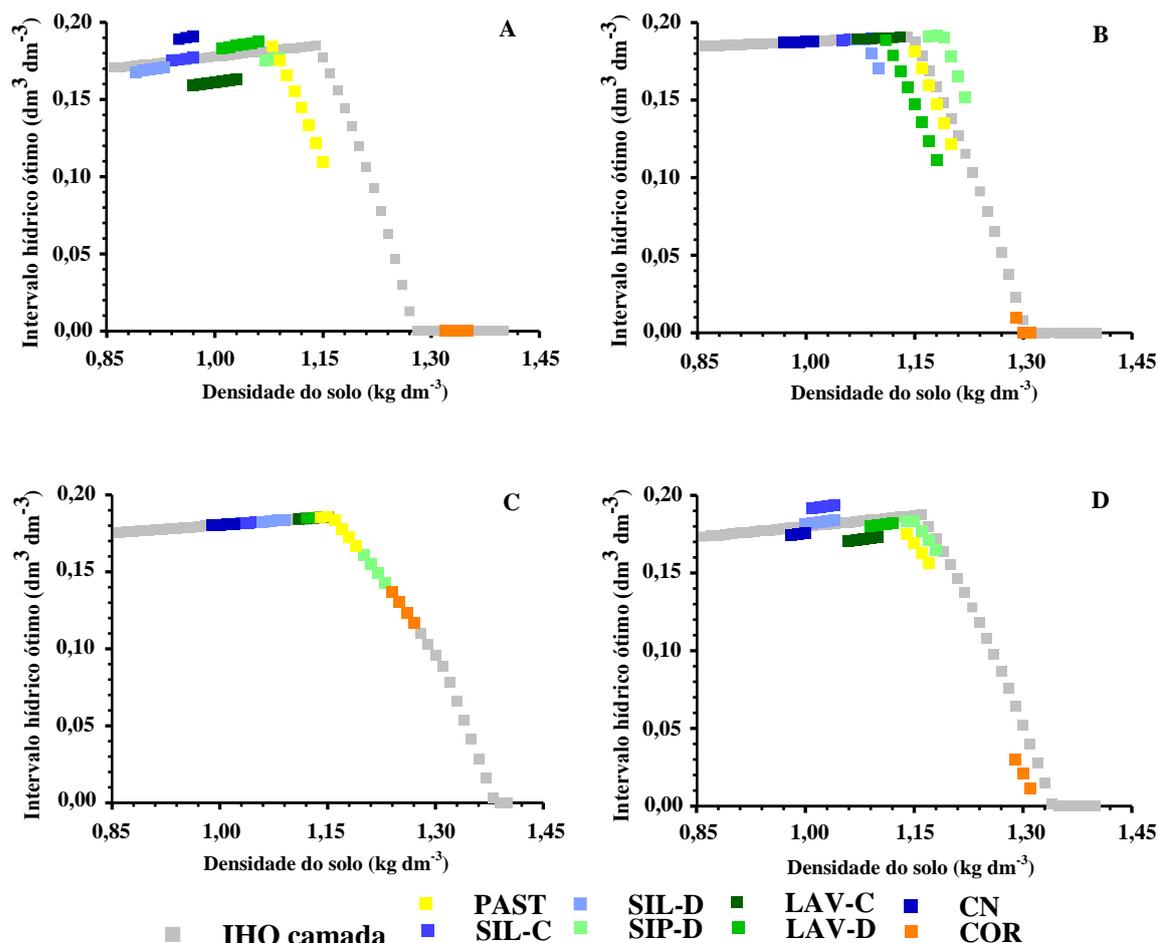


Figura 3- Intervalo hídrico ótimo absoluto nas camadas amostradas (A) 0,00-0,05, (B) 0,05-0,10 e (C) 0,10-0,20 m, e (D) e camada unificada 0,00-0,20 m, de acordo com o erro padrão da média da densidade do sistema, considerando resistência à penetração padrão de 2,0 MPa. O IHO de cada profundidade (cinza) e o IHO de cada sistema (colorido). PAST (Pastagem contínua); SIL-C (Sistema integrado lavoura-pecuária, fase lavoura em plantio convencional); SIL-D (Sistema integrado lavoura-pecuária, fase lavoura sob plantio direto); SIP-D (Sistema integrado pastagem-lavoura, fase pastagem sob plantio direto); LAV-C (lavoura contínua sob plantio convencional); LAV-D (lavoura contínua sob plantio direto); CN (Cerrado Nativo); COR (Corredor de manejo).

Para as camadas, as maiores dispersões em relação ao comportamento da profundidade da camada analisada (coloração cinza), seguiram a ordem 0,00-0,05 > 0,05-

0,10 > 0,10-0,20m. Na camada mais profunda, pela ausência de significância da CRA e CRP (Tabela 3), o intervalo hídrico ótimo de cada sistema apresentou os mesmos limites críticos e valores absoluto (Figuras 2 e 3). Em profundidade, houve a dispersão do IHO entre os sistemas de uso e manejo do solo, apresentando, entretanto, a menor diferença de D_s entre os tratamentos (1,00 a 1,18 kg dm⁻³, exceto o corredor de manejo) Em relação a densidade do solo crítica, ou seja, quando o IHO se torna nulo, foi observado aumento em profundidade, sendo 1,28, 1,30, 1,39 kg dm⁻³, respectivamente, nas três camadas amostradas; e na camada 0,00-0,20m, 1,34 kg dm⁻³, no que se refere à média da profundidade avaliada (Figuras 2 e 3).

Mas ao considerar resistência à penetração do solo variável de acordo com as particularidades de cada sistema de manejo adotado (Figura 4), obtêm-se comportamento do valor absoluto do IHO em função da densidade do solo mais próximo ao IHO médio da camada, diferente do anteriormente apresentado (Figura 3). Neste caso, o IHO na camada de 0,05-0,10 m foi CN > PAST > LAV-D > SIL-C = SIP-D > SIL-D > LAV-C > COR, 0,05-0,10 foi SIP-D = PAST = LAV-D ≥ LAV-C = SIL-D = SIL-C ≥ CN > COR, 0,10-0,20 m foi SIP-D = PAST = LAV-D ≥ SIL-D = SIL-C = CN > LAV-C > COR e para a camada de 0-20 foi PAST > SIL-C > SIP-D = SIL-D > LAV-D > CN > LAV-C > COR.

Foi adotado os valores de 1,5, 2,0 e 3,5 MPa, para sistema convencional (Tabela 3 - considerando a cultura do milho como a de maior suscetibilidade à compactação do solo), sistemas não conservacionistas (Soil Survey Manual, 2017) e sistemas conservacionista (Betioli Júnior et al., 2012), respectivamente. Para o sistema convencional foi considerado somente o LAV-C, para os sistemas não conservacionista foram considerados os sistemas COR e SIL-C e para conservacionista os tratamentos PAST, SIL-D, SIP-D, LAV-D e CN.

Interessante observar que, considerando a RP crítica para cada sistema, o intervalo hídrico ótimo absoluto foi menos limitado pela RP, notadamente apenas o COR em todas as camadas, m LAV-D na camada 0,05-0,10m e LAV-C na camada 010-0,20m.

À medida que aumenta a RP limitante, eleva-se os valores de densidade do solo limitante (D_{sL} - visualizada no gráfico pela queda acentuada do conteúdo de água) e crítica ($D_{sc} - IHO = 0$). Nas camadas de 0,10-0,20 m e 0,00-0,20 m não foi possível observar a D_{sc} da camada quando a RP foi 3,5 MPa, revelando que a mesma é maior que a amplitude de densidade do solo encontrada neste estudo.

A figura 5 apresenta a relativização das densidades, que é a relação entre densidade do solo (D_s) do tratamento e densidade do solo limitante (D_{sL}) ao IHO, considerando a RP fixa de 2,0 MPa e também variável, obtendo-se assim a densidade relativa (D_{sR}). Na camada

0,00-0,05m a densidade relativa obedeceu a seguinte ordem: COR > PAST > SIP-D > LAV-D > SIL-D ≥ SIL-C ≥ CN = LAV-C.

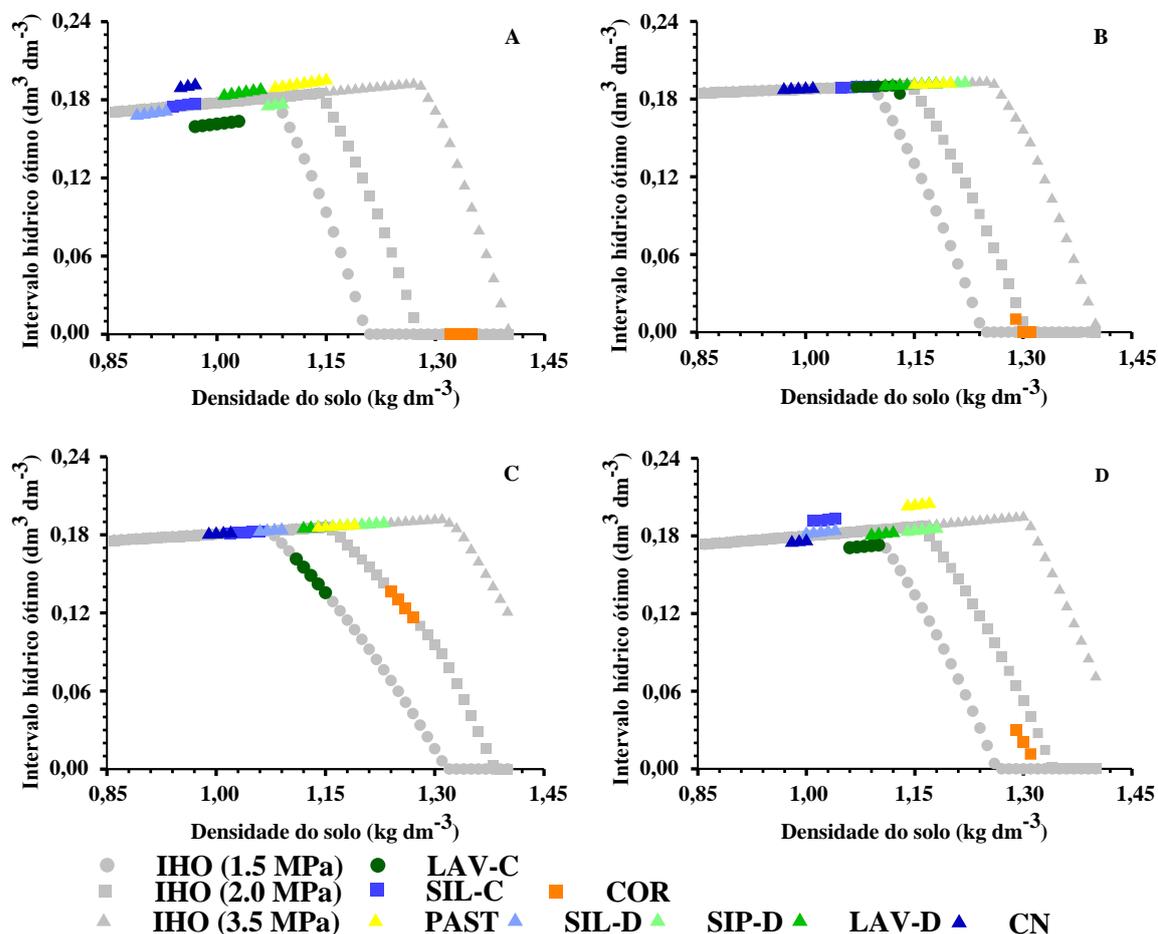


Figura 4- Intervalo hídrico ótimo absoluto nas camadas amostradas (A) 0,00-0,05, (B) 0,05-0,10 e (C) 0,10-0,20 m, e (D) e camada unificada 0,00-0,20 m, de acordo com o erro padrão da média da densidade do sistema, considerando resistência à penetração variada em função do sistema (1,5, 2,0 e 3,5 MPa). O IHO de cada camada com RP variada (cinza) e o IHO de cada sistema (colorido). PAST (Pastagem contínua); SIL-C (Sistema integrado lavoura-pecuária, fase lavoura em plantio convencional); SIL-D (Sistema integrado lavoura-pecuária, fase lavoura sob plantio direto); SIP-D (Sistema integrado pastagem-lavoura, fase pastagem sob plantio direto); LAV-C (lavoura contínua sob plantio convencional); LAV-D (lavoura contínua sob plantio direto); CN (Cerrado Nativo); COR (Corredor de manejo).

Para a camada de 0,05-0,10 tem-se COR > SIP-D = PAST = LAV-D = SIL-D > LAV-C ≥ SIL-C ≥ CN, ocorrendo os maiores valores, os quais na maioria dos tratamentos são ≥ 1. Apenas os sistemas sob plantio convencional e o cerrado nativo, foram menores que 1 nesta camada, ao mesmo tempo que os sistemas conservacionistas, sob plantio direto, foram estatisticamente iguais.

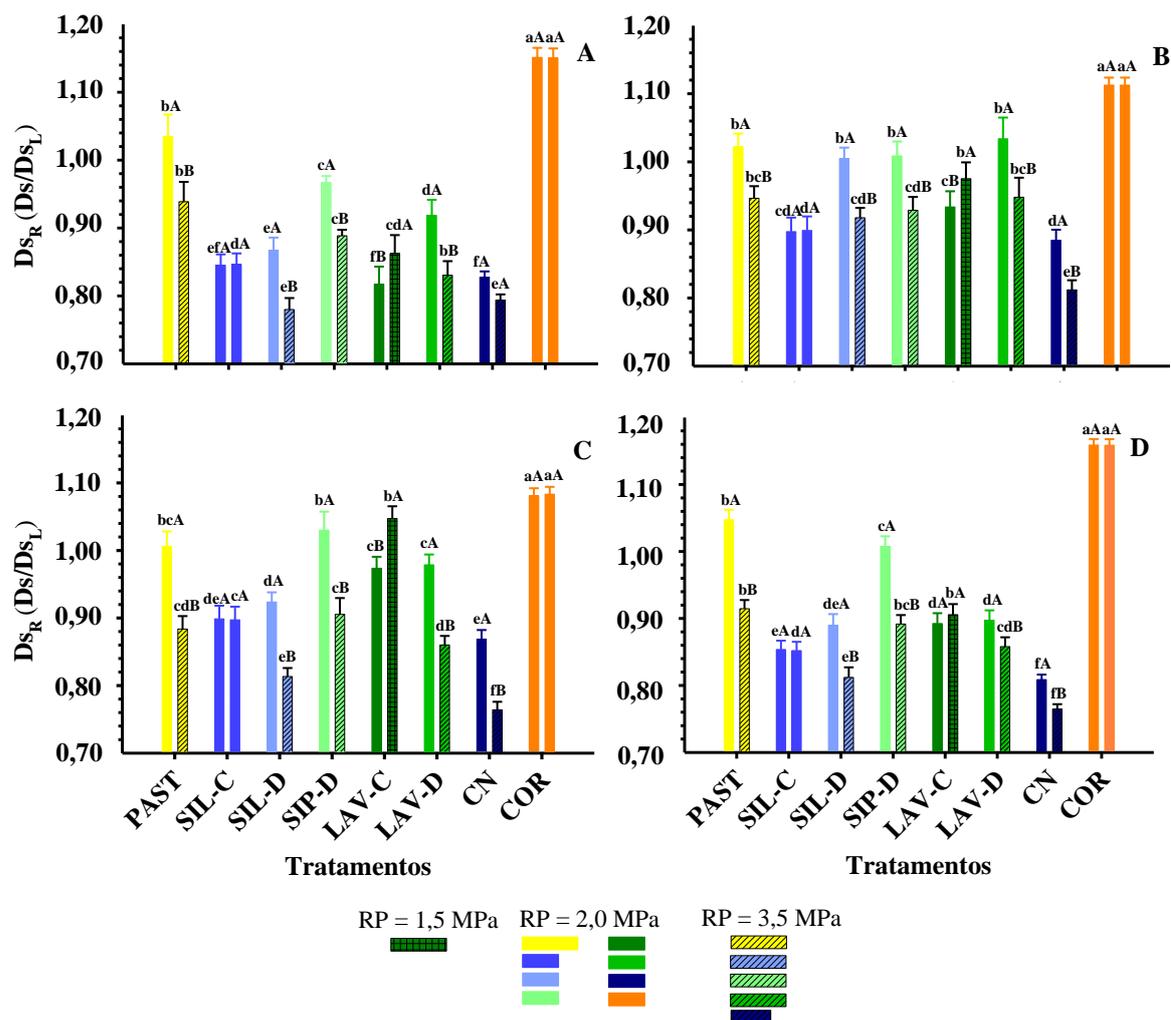


Figura 5 – Relativização da densidade do solo, obtida pela relação entre densidade do solo (D_s) e densidade do solo limitante (D_{sL}) ao IHO em cada tratamento, considerando uma RP crítica de 2,0 MPa e RP variável, nas camadas (A) 0,00-0,05, (B) 0,05-0,10 e (C) 0,10-0,20 m, e (D) e camada unificada 0,00-0,20 m para os tratamentos avaliados. As barras representam o erro padrão da média. As letras minúsculas se referem a comparação entre os oito tratamentos, considerando RP fixa ou variável, obtidas pelo Teste de Tukey ($p < 0,05$); e as letras maiúsculas se referem à comparação entre D_{sR} no tratamento. PAST (Pastagem contínua); SIL-C (Sistema integrado lavoura-pecuária, fase lavoura em plantio convencional); SIL-D (Sistema integrado lavoura-pecuária, fase lavoura sob plantio direto); SIP-D (Sistema integrado pastagem-lavoura, fase pastagem sob plantio direto); LAV-C (lavoura contínua sob plantio convencional); LAV-D (lavoura contínua sob plantio direto); CN (Cerrado Nativo); COR (Corredor de manejo).

Observa-se que, na camada de 0,10-0,20m (Figura 5C), todos os tratamentos com presença de animais apresentaram $D_{sR} \geq 1$, sendo que a diferença entre os sistemas segue, $COR > SIP-D \geq PAST \geq LAV-D = LAV-C > SIL-D \geq SIL-C \geq CN$. Por último, considerando a média geral 0,00-0,20m, tem-se em ordem decrescente o, e novamente somente os dois sistemas com pastejo e o COR apresentaram $D_{sR} \geq 1$.

No entanto, considerando a relativização da D_s em função dos tratamentos com RP variável entre os tratamentos, tem-se que na camada 0,00-0,05m (5A) a D_{sR} obedeceu a seguinte ordem: $COR > PAST > SIP-D \geq LAV-C \geq LAV-D = SIL-C > SIL-D = CN$. Para a camada de 0,05-0,10 m (5B), a densidade relativa foi $COR > LAV-C \geq PAST = LAV-D \geq SIP-D = SIL-D \geq SIL-C > CN$. Assim, apesar de serem observados os maiores valores médios de D_s/D_{sL} , apenas o corredor teve D_{sR} maior que 1,0.

Por último, quando se considera a camada unificada 0,00-0,20m com RP fixa, de acordo a análise de variância, a densidade relativa apresentou três grupos com proximidade dos resultados, sendo o corredor de manejo em destaque de maior densidade relativa, posteriormente os dois sistemas com pastejo animal ($PAST > SIP-D$) com D_{sR} maior do que 1. E o terceiro grupo engloba os outros tratamentos ($LAV-D = LAV-C \geq SIL-D \geq SIL-C = CN$) na fase lavoura, seja em plantio direto ou convencional, além do Cerrado nativo, cuja $D_{sR} < 1$. Por fim, considerando uma RP variável, para essa camada, tem-se que $COR > PAST = LAV-C = SIP-D > LAV-D \geq SIL-C > SIL-D > CN$.

A Figura 6 apresenta o perfil físico com base na densidade do solo (A) e no intervalo hídrico ótimo com RP fixa (6B) e com RP crítica variável para o IHO em cada sistema de 1,5, 2,0 e 3,5 MPa (6C), e a densidade do solo relativa com RP crítica fixa (6D) e variável (E) em profundidade, considerando as três camadas 0,00-0,05; 0,05-0,10 e 0,10 e 0,20 m.

De modo geral, o comportamento da D_s seguiu um padrão, em que se observa o menor valor na camada mais superficial e incremento na camada de 0,05-0,10 m e se mantém quase inalterada até a camada de 0,10-0,20 m. Porém, houve comportamento contrário para o COR, redução da D_s em profundidade. O cerrado nativo (referência de ausência de manejo agropecuário do solo) apresentou a menor densidade nas camadas subsuperficiais, cuja D_s média não ultrapassou $1,00 \text{ kg dm}^{-3}$, enquanto o Corredor de manejo (referência de degradação estrutural do solo), as maiores densidades do solo em todas as camadas.

O IHO no perfil reflete as variações da densidade (6B) supracitadas quando se considera uma RP fixa de 2,0 MPa para todos os sistemas. Na camada de 0,00-0,05 m, PAST distinguiu dos outros sistemas de cultivos, cujo IHO foi $0,12 \text{ dm}^3 \text{ dm}^{-3}$, ao passo que no corredor, referência de degradação física do solo, foi observado o menor IHO em todas as profundidades, sendo na camada superficial $IHO=0$.

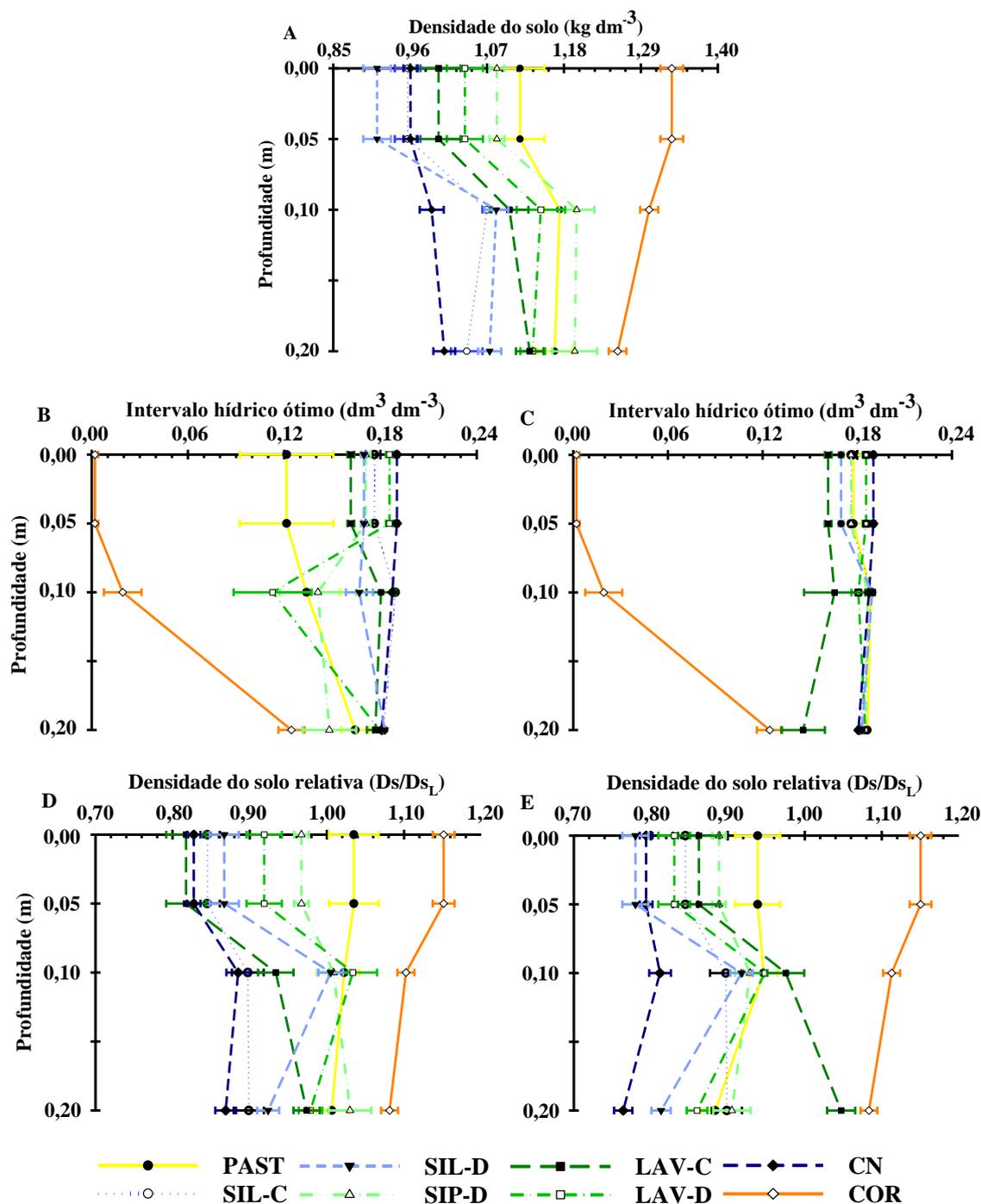


Figura 6 – Perfil físico do solo em função da profundidade, 0,00-0,05, 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m para os tratamentos avaliados, com base na densidade do solo média (A); no intervalo hídrico ótimo do solo médio considerando para o IHO RP crítica fixa (B) e variável (C); e com base na densidade do solo relativa, considerando RP fixa (D) e variável (E), sendo que RP fixa em 2,0 MPa e quando variável foi de 1,5MPa, para LAV-C; 2,0 MPa para SIL-C e COR e 3,5 MPa para PAST, SIL-D, SIP-D, LAV-D e CN. As barras horizontais representam o erro padrão da média. PAST (Pastagem contínua); SIL-C (Sistema integrado lavoura-pecuária, fase lavoura em plantio convencional); SIL-D (Sistema integrado lavoura-pecuária, fase lavoura sob plantio direto); SIP-D (Sistema integrado pastagem-lavoura, fase pastagem sob plantio direto); LAV-C (lavoura contínua sob plantio convencional); LAV-D (lavoura contínua sob plantio direto); CN (Cerrado Nativo); COR (Corredor de manejo).

Pode-se observar que os dois sistemas com pisoteio animal (PAST e SIP-D) e lavoura convencional (LAV-C), entre os sistemas manejados, apresentaram os menores valores de IHO na camada de 0,05-0,10 m, sendo esta a camada em que foi observada maiores valores de D_s (6A). No entanto, na camada de 0,10-0,20 m, o IHO de todos os sistemas foi menos restritivo, detectado na tendência de igualdade entre os tratamentos (6B). Além disso, observa-se que para os sistemas LAV-D e SIP-D, o IHO teve notável redução entre as camadas de 0,00-0,05 e 0,05-0,10 m.

No entanto, levando em conta as particularidades dos sistemas e variando a resistência à penetração (Figura 6), o COR destacou com elevadas RP limitando o IHO, principalmente nas camadas superficiais (Figura 6C), cujo efeito mais drástico foi na camada superficial. Por outro lado, de maneira geral houve leve aumento do IHO em decorrência do aprofundamento do solo, mas nas outras camadas foi semelhante à maioria dos tratamentos.

Embora se observa pelos teores-limites do IHO o sistema LAV-C próximos aos demais (Figura 1) com RP fixa em 2,0 MPa, quando se considera as influências do manejo na adoção dos valores de RP em cada sistema (figura 6C), neste caso, de 1,5 MPa, o IHO revela que este tratamento em profundidade foi menor que os demais, aproximando-se ao COR a 0,20 m.

Além disso, nota-se que apesar da ampla faixa da densidade do solo observada nos tratamentos, 0,86 a 1,40 kg dm⁻³, em termos absolutos, o IHO médio gira em torno de 0,18 dm dm⁻³, com ressalva do COR, o qual foi mais divergente. Somado a isso, na camada de 0,10-0,20m, exceto o COR e LAV-C, apresentaram valores semelhantes de IHO.

Quando se observa a densidade do solo relativa (D_{SR}) em profundidade, com RP fixa em 2,0 MPa (6D) tem-se que o comportamento da curva ao longo do perfil foi semelhante ao comportamento da densidade do solo, exceto que houve redução dos valores de D_{SR} do tratamento PAST ao longo do perfil e de LAV-D e SIP-D na camada 0,10-0,20 m. A maioria dos tratamentos apresentaram valores de D_{SR} menores que 1,0, enquanto a camada 0,05-0,10 m em que se obteve maiores valores em relação à camada anterior. E na camada mais profunda esses valores tenderam a se aproximar.

Todavia, quando considera a RP crítica variável para D_{SR} , tem-se maior proximidade dos valores de D_{SR} , a camada 0,00-0,05 m a variação foi menor que a RP fixa, com $D_{SR} < 1,0$, exceto para o corredor. E na camada 0,05-0,10 m, para os sistemas cultivados (isto é, exceto corredor de manejo e cerrado nativo) os valores de D_{SR} foram semelhantes, em torno de 0,9, mas que para a camada mais profunda, houve ampliação desses valores. A LAV-C

apresenta crescente valor de D_{SR} ao longo do perfil, enquanto o CN os menores valores com o aprofundamento do solo.

No que se refere a produtividade desses sistemas, para os sistemas na fase pecuária, a produção de massa seca da forragem, avaliada durante o pastejo, na época das amostragens de solo foi de 3407,2 e 3935,4 kg ha⁻¹ para os dois sistemas na fase pastagem (PAST e SIP-D, respectivamente), justificando ser um sistema de produção sustentável. Enquanto para os sistemas avaliados na fase lavoura ou lavoura contínua, a produção de soja não teve significância entre os tratamentos avaliados na fase lavoura, cuja produtividade foi em torno de 4,3 ton ha⁻¹.

3.4 DISCUSSÃO

Os atributos intrínsecos à estrutura do solo (teores e frações orgânicas, estado de agregação e cimentação, dentre outros) afetaram de maneira diferenciada os sistemas avaliados. Fato constatado pelos procedimentos estatísticos empregados no ajuste das CRA e CRP, que permitiram quantificar o efeito individualizado de cada sistema de manejo sob os atributos avaliados e explicando mais de 88% da variação do conteúdo de água no solo (θ) e entre 66 e 82% das variações dos dados de resistência (Tabela 3).

No ajuste da CRA, os efeitos foram restritos à primeira camada avaliada (0,00-0,05 m). Logo, considera-se que a significância dos sistemas de manejo para a camada unificada (0,00-0,20 m) seja pela estrutura do solo da superfície.

Assim, tem-se variabilidade estrutural associada principalmente à variação da D_s . Nota-se, que a camada superficial, para a mesma D_s , momentos diferentes de IHO (1,0 kg dm⁻³, por exemplo entre SIL-C e CN - Figura 3). Esse efeito pode ser resultante do acúmulo de matéria orgânica, como avaliado por, Sant'Anna et al. (2016), na mesma área em estudo após 22 anos de cultivo. Estes autores observaram maiores teores na camada 0,00-0,05 m, decrescendo em profundidade. Os teores de matéria orgânica do solo (MOS) apresentaram variações de 20 a 40 g kg⁻¹, aproximadamente.

Estes resultados expressam o efeito do histórico de uso e manejo nos diferentes sistemas. Pela Figura 2, o tratamento CN apresentou a maior capacidade de retenção de água [tratamento com maior teor de carbono, segundo Sant'Anna et al. (2016) e considerado referência de preservação da estrutura neste estudo]. Por outro lado, o LAV-C apresentou a menor água disponível ($AD = \theta_{CC} - \theta_{PMP}$), refletindo a oxidação orgânica acelerada e a destruição mecânica da capilaridade do solo, ambos fatores decorrentes das sucessivas

operações de aração e gradagem. Marchão et al. (2007) observaram mudanças nas CRA em relação à degradação física do solo, avaliando a mesma área em estudo.

No que diz respeito ao comportamento físico do solo, contudo, os sistemas de manejo não provocaram grandes mudanças nas relações hídricas do solo. Além de restritas à camada superficial de maneira geral, e com exceção o LAV-C, pelos motivos supracitados, as alterações estruturais do solo afetaram em mesma magnitude os limites superiores e inferiores da água, permanecendo razoavelmente constante o valor absoluto da água disponível. Estes resultados sugerem maior ação na matéria orgânica do solo sob as forças de adsorção de água no solo, fato elucidado ao analisar o deslocamento dos teores-limites do IHO no tratamento SIL-C, por exemplo. Este tratamento foi amostrado logo após a operação de preparo do solo que é ocasional e, provavelmente, ainda possuía o estoque de carbono próximo aos demais sistemas conservacionistas, entretanto um dos efeitos pós-preparo é aumento da porosidade e consequente redução da D_s (Silva et al., 2019).

Este comportamento torna-se relevante para a compreensão dos fatores que afetam a retenção de água nos Latossolos oxidícos que recobrem o Cerrado brasileiro, isto é, em solos altamente intemperizados. A mineralogia da fração argila constituída em quase sua totalidade por minerais de baixa atividade (como é o caso do solo em estudo, cuja proporções dos seus constituintes estão expressas na seção “material e métodos”) e sua associação ao desenvolvimento de estrutura morfológica granular muito pequena (Ajayi et al., 2009; Reatto et al., 2009) faz com que a retenção de água seja naturalmente baixa (Severiano et al., 2013). Em contrapartida, o incremento do carbono orgânico, portanto, não foi efetivo à capilaridade.

Devido a isto, a adoção de sistemas conservacionistas de produção agropecuária assume a tônica das discussões em torno das ações mitigadoras de déficit hídrico e irregularidades climáticas. Resultados indicam que a dinâmica do carbono não seja o ponto crucial para o uso eficiente da água nos cultivos agrícolas sob estes solos, já que mesmo após 26 anos de manejo não são elevados os incrementos/reduções do conteúdo de água no solo. Talvez se tenha na cobertura vegetal, quando da realização de semeadura direta, uma importante contribuição para a relação solo-água-planta-atmosfera, pela significativa redução da evaporação em decorrência da palhada em superfície (Flávio Neto et al., 2015).

Se por um lado, ocorreu pouca influência dos sistemas de uso, manejo e preparo do solo na CRA, o mesmo não pode ser afirmado para a CRP, como também observado por outros autores (Betioli Júnior et al., 2012; Tormena et al., 2017). Embora as alterações também ocorressem no âmbito da superfície do solo (neste caso em 0-0,5 e 0,05 a 0,10 e,

consequentemente, refletindo na camada unificada de 0-0,2 m), os fatores implícitos aos sistemas de uso e manejo adotados foram intensos pela ação compressiva do solo pelo pisoteio animal nos tratamentos com pecuária e ao tráfego de máquinas agrícolas nas áreas com lavoura. Nessas camadas, os coeficientes d e e foram sempre fixos para todos os tratamentos. Assim, o coeficiente f foi responsável pela variabilidade da resistência mecânica do solo entre os tratamentos nas camadas, cuja D_s expressa a magnitude da resposta da matriz sólida ao estado de compactação em função das mudanças do conteúdo de água no solo.

Estes dois fatores, incremento da densidade do solo e da resistência à penetração, são os principais responsáveis para a redução da amplitude do IHO em Latossolos oxídicos da região do Cerrado (Silva et al., 2014; Flávio Neto et al., 2015), já que o limite superior de água geralmente é limitado pelo potencial mátrico (Figura 2). A aeração comumente não é deficiente pelo fato da estrutura morfológica granular muito pequena predispor a formação de elevada porosidade, a qual se mantém superior a 10% mesmo em níveis elevados de D_s , corroborando as observações de Severiano et al. (2011) em estudos sobre as alterações estruturais de solos representativos desta região do Brasil.

A Figura 2, portanto, representa-se o IHO para os respectivos sistemas de uso e manejo, nas três camadas estratificadas e na camada unificada, em analogia ao que é adotado no manejo da fertilidade do solo no Brasil (pelas dimensões do cilindro de amostragem não foi possível a obtenção de única amostra). Assim, torna-se possível constatar que o preparo e manejo do solo impactam de maneira expressiva a qualidade física do solo na camada cultivada (0,00-0,20 m), corroborado por Pires et al. (2017). Entretanto, os efeitos do uso da terra são diluídos quando analisada a camada unificada (Figura 2D). Em sistemas conservacionistas, as maiores alterações são superficiais e a estratificação demonstra com maior acuracidade as diferenças nos limites críticos.

De modo geral, com a variação da densidade do solo, houve incremento na água disponível, em decorrência da conversão de parte dos macroporos em microporos com o aumento da compactação do solo (Figuras 2, 3 e 4), resultando em maior capilaridade (Leão et al., 2004). Severiano et al. (2011) modelaram a ocorrência de compactação benéfica dos Latossolos oxídicos associada a este fato.

Na camada 0,00-0,05m, os limites críticos do IHO em função dos tratamentos variaram, quando comparados ao IHO dessa camada (área hachurada cinza, considerando o conjunto de dados de todos os tratamentos para ajuste das CRP e CRA na referida camada –

Figura 2). No CN houve expansão dos teores-limites, sendo o IHO calculado pela equação 4 e que superam o da camada.

Por outro lado, nos tratamentos SIL-C e LAV-C, ambos sob preparo convencional, ocorreram redução da CC e PMP, sendo inferior ao da camada. A estrutura do solo é o fator que governa as funções naturais do solo, como retenção de água, infiltração, resistência mecânica do solo, conteúdo orgânica e suscetibilidade à erosão (Rabot et al., 2018). O revolvimento do solo predispõe à degradação estrutural, aqui refletida pelas relações hídricas do solo, cuja tendência é reduzir a qualidade física, química e biológica (Arriaga et al., 2017).

Ainda na camada superficial, os demais tratamentos de manejo agropecuário se comportaram de maneira semelhante à camada (o que também pode ser visualizado na Figura 3), à exceção da pastagem contínua (PAST) que, em decorrência das forças de compressão superficial do solo, apresentaram os maiores valores de densidade de solo e de resistência à penetração. Observa-se neste tratamento e camada, a máxima restrição ao IHO promovido pela RP. Por fim, tem-se o corredor de manejo (COR) com a pior qualidade física (IHO definido pela equação 7, cujo valor é nulo) e que foi considerado referência de degradação, já que $D_s > D_{sc}$ da camada.

No geral, as maiores restrições ao IHO se deram principalmente pelo incremento da D_s , sendo a camada 0,05-0,10m, podendo classificá-la como a de maior suscetibilidade à compactação, estando de acordo com Severiano et al. (2009) em estudo com Latossolo próximo ao Planalto Central Brasileiro (Reatto et al., 2007). Entre os sistemas cultivados, na camada 0,00-0,05 m, a maior restrição ao IHO está associada ao tratamento com pisoteio animal, com pastagem contínua. No entanto, com a conversão de áreas de pastagem para lavoura de maneira direta (sem revolver o solo, isto é, no sistema de plantio direto) essas camadas se recuperaram, como acontece com os sistemas integrados avaliados. Nesse sentido, é notável a redução da D_s superficial e subsuperficial na fase lavoura, quando se compara os sistemas SIP-D e SIL-D, fase pecuária e fase lavoura, respectivamente, (Figura 6A), indicando melhorias nas condições superficiais do solo.

A conversão de áreas de pastagens degradadas [cuja estimativa seja que aproximadamente 70% do total de áreas sob pastagem se encontrem em algum grau de degradação (Dias Filho, 2014)], para áreas de produção de grãos tem sido apontada como uma das saídas para o incremento da produção agropecuária do Brasil. Dessa forma, pastagem bem manejada, como as deste estudo, cuja produção média de massa seca, em um único corte, durante o pastejo nas águas (mês de março), foi aproximadamente 3,4 e 3,9 ton ha^{-1} nos sistemas PAST e SIP-D, respectivamente. Estes sistemas mesmo com maior D_s e,

portanto, com maiores restrições ao IHO, podem ser considerados resiliente, pois esse efeito é superficial e amenizado pela lavoura em sucessão. Ademais, faz-se necessária consideração crítica adicional em torno dos valores críticos de RP limitante, tanto em termos de plantas cultivadas quanto em relação aos sistemas de manejo do solo adotados.

Os fatores intrínsecos à estrutura do solo, quantificados na tabela 1 e que geralmente não são considerados na modelagem do IHO segundo os procedimentos estabelecidos por Silva et al. (1994), tornam-se mais explícitos na Figura 3. Na camada 0,00-0,05m (Figura 3A), o cerrado nativo (CN) não é o que apresenta a menor densidade do solo, a qual é observada no sistema de integração lavoura-pastagem, fase lavoura sob plantio convencional (SIL-C). Entretanto, o CN é o que apresenta os maiores valores de IHO absoluto. Em termos de sequestro de carbono, Sant'Anna et al. (2016) demonstram que o sistema SIL-D apresentava conteúdos equivalentes à área sob vegetação nativa. Por outro lado, a provável ausência de intervenção antrópica, associada a estabilização de moléculas orgânicas recalcitrantes, podem ter sido responsáveis pela maior capilaridade do solo e maior disponibilidade hídrica.

Com a quantificação do efeito individualizado em cada sistema de manejo sobre o IHO, é possível elucidar a sua relação com a densidade do solo no tocante as controversas quanto à sua eficiência no diagnóstico estrutural do solo. É inegável que a ampla e atual utilização do IHO se dá pelo fato de englobar várias propriedades do solo em um único parâmetro (Van Lier e Gubiani, 2015), e não significa que o mesmo não necessita ainda de avanços metodológicos que visem acuracidade, a exemplo dos trabalhos desenvolvidos por Betioli Júnior. et al., (2012) e Silva et al. (2015). Resultados permitem maior compreensão do IHO como indicador robusto nas relações agronômicas e, por este motivo deve ser levado em consideração para diagnose das relações hídricas do solo e do seu estado de compactação.

Como pode ser observado no tratamento de lavoura contínua com preparo convencional (LAV-C) há deslocamento do IHO absoluto inferior aos demais (Figura 3), sendo que nessa faixa de densidade, a Figura 2 mostra que ainda não tem limitações físicas ao conteúdo de água disponível. Esse deslocamento não ocorre na mesma proporção no SIL-C, que também há revolvimento do solo, mas que, devido ao efeito residual da fase anterior (histórico de uso da terra), pastagem durante quatro anos (Tabela 2).

O tratamento PAST foi o único sistema que foi limitado pela resistência à penetração fixa de 2,0 MPa, em todas as camadas, refletido na redução do IHO absoluto em função do aumento da densidade (Figura 2 e 3). Ao mesmo tempo, apresentou maior variabilidade de densidade do solo (notável pela maior quantidade de pontos amarelos) estimada pelo erro

padrão da média. Sistemas com pastejo animal, não se tem uniformidade de pisoteio sobre toda a superfície da área em decorrência da estacionalidade da produção da forragem, que em épocas de maior oferta de forragem os animais pastejam exploram poucas estações de pastejo (a área atingida pelo animal que pastoreia sem mover suas patas dianteiras.). Por outro lado, em anos mais seco e com menos oferta de pastagem, os animais tendem a maior movimentação pelo piquete (aumento do número de passos tomados por unidade de tempo na tentativa de encontrar mais forragem para consumir), dissipando a compactação (Carvalho et al., 2018). Ademais, é um efeito acumulado de 26 anos de histórico de uso de solo nesses sistemas.

Os sistemas de manejo conservacionista de integração lavoura-pecuária e de plantio direto, nem sempre apresentam as menores densidades do solo, enquanto o plantio convencional tende a diminuir a densidade do solo superficial, mas a custa da perda da disponibilidade de água (Figuras 2 e 3). Ou seja, o revolvimento mecânico de fato minimiza o valor da densidade do solo superficial, mas leva a redução das propriedades físico-hídricas do solo (Arriaga et al., 2017).

Dessa forma, considerando apenas a resistência à penetração crítica ao desenvolvimento das plantas fixa em 2,0 MPa, independente do sistema adotado, pode mascarar as restrições impostas ao IHO. Portanto, ao considerar as características dos sistemas conservacionistas de produção agropecuária, tem-se variação na RP crítica e, neste trabalho, considerados valores mais altos de RP (3,5 MPa, para PAST, SIL-D, SIP-D, LAV-D e CN), conforme proposto por Betioli Júnior et al. (2012). Por sua vez o IHO sofreu menor influência da RP (Figura 4). Diante disso, em sistemas conservacionistas de manejo do solo que envolve múltiplas culturas, foi considerado a resistência à penetração crítica do sistema, cujas culturas implantadas na rotação se beneficiam pela presença de alternativas ao crescimento radicular e continuidade dos poros oriundas da decomposição das raízes de cultivos anteriores, e galerias oriundas a atividade da fauna do solo (cupins, formigas, minhocas, etc). Assim, estes sistemas suportam valores de RP mais elevados sem haver limitações hídricas à cultura.

Neste estudo, o sistema de lavoura contínua sob preparo convencional (LAV-C), cuja RP crítica adotada foi de 1,5MPa, considerando a cultura do milho (Tabela 3) que apresenta a baixa RP crítica, dentre as principais culturas implantadas na área experimental (Tabela 2), haja vista, que o valor de RP crítica para a cultura da soja é superior ao observado para o milho (Girardello et al., 2014). Portanto, considera-se que em sistemas de produção em cultivo convencional, a máxima restrição ao desenvolvimento das plantas seja baseada na

maior sensibilidade às camadas de impedimento mecânico do solo. Em adição, para os sistemas não conservacionistas, SIL-C e COR, foram adotados RP crítica 2,00 MPa, sendo classificada como RP alta pelo Soil Survey Manual (2017).

Nota-se que possíveis limitações na LAV-D, camada de 0,05-0,10 m, bem como aqueles decorrentes do pastejo bovino em PAST e SIP-D, quando considerada a RP fixa de 2,0MPa, levam a concluir que o efeito da compactação pelo pisoteio bovino é mais expressivo do que o tráfego de máquinas e implementos em SPD, nas condições deste estudo. Para Greenwood e McKenzie (2001) o pisoteio animal no solo pode compactar de forma semelhante a uma máquina, em que a pressão durante o pastejo (98 a 168 KPa) é maior do que a pressão aplicada por um trator agrícola (92 KPa).

No entanto, quando adota RP crítica 3,5 MPa (Figura 4) nenhuma camada foi limitada para os referidos tratamentos. Isso porque o pastejo bovino estimula a rebrota da pastagem e o crescimento radicular, acúmulo de fezes no solo, por conseguinte, acúmulo de carbono orgânico no solo (Sato et al., 2019) e melhoria das condições edáficas ao desenvolvimento das plantas. Refletida na elevada densidade radicular, observada em campo no momento da amostragem nesses sistemas.

Contrastando com os resultados de Betioli Júnior et al. (2012), que avaliando em solo e classe textural semelhantes, porém caulinítico, observaram que independentemente do valor de RP crítica considerado, 2,0, 3,5 ou 4,6 MPa, a resistência do solo à penetração mantém-se como limite inferior do IHO. Em Latossolos oxídicos sob cultivos agropecuários de longa duração, como neste estudo, há o restabelecimento da porosidade do solo (Oliveira et al., 2004). Dessa forma a porosidade de aeração de 10%, de modo geral, não afeta os limites críticos do IHO.

Semelhante aos resultados obtidos, Moreira et al. (2014) observaram maior conteúdo de água no solo com o aumento da RP crítica, ao comparar de 2,0 e 3,0 MPa, ao mesmo tempo que se tornou visível a influência da porosidade de aeração no IHO quando considera RP de 3,0 MPa. Isto é, a porosidade de aeração só se torna limitante ao IHO em condições de compactação extrema, fato este abordado anteriormente por Severiano et al. (2011).

Na Figura 4C, os dois tratamentos que são limitados pela resistência à penetração são a LAV-C e COR, ao mesmo tempo, na Figura 6C, também é notável a diferença desses dois tratamentos frente aos demais no que se refere ao IHO médio na camada 0,10-0,20 m. Mas considerando a camada unificada 0,00-0,20 m, (Figura 4D), somente o COR apresentou relativamente reduzido conteúdo de água e, por outro lado, o IHO dos outros tratamentos fora semelhante à CAD de cada sistema. Diante disso, pode-se inferir que, a diagnose

levando em conta a camada unificada do solo não é suficiente para detectar as alterações estruturais do solo, inerentes ao sistema de manejo e ainda que, em sistemas de manejo contrastantes, equivocadamente, observaria IHO próximos, os quais variaram de acordo com a camada ou com a RP crítica para o sistema. Portanto, adequações ao intervalo hídrico ótimo podem auxiliar na sua maior sensibilidade em detectar as limitações físico-hídricas do solo decorrentes do uso e do manejo adotado.

Considerando a relativização da densidade do solo com RP fixa na determinação da densidade limitante (D_s/D_{sL}) (Figura 5), a densidade relativa igual próxima de 1, indica a menor restrição hídrica, isto é, maior valor absoluto de IHO, além da maior proximidade da semente/raiz com o solo, sem qualquer impedimento mecânico à penetração radicular quando o solo estiver com seu conteúdo de água na amplitude da água disponível. A maioria dos sistemas de manejo apresentaram densidade baixas e neste caso, independentemente do valor de referência da resistência à penetração, apresentaram $D_{sR} < 1$. Pode-se observar que apenas os tratamentos cuja $D_{s_r} > 1$, sendo PAST, e COR, na camada 0,00-0,05m; PAST, SIL-D, SIP-D, LAV-D e COR na camada 0,05-0,10 m; PAST, SIP-D e COR na camada de 0,10-0,20 m; e PAST e COR na camada unificada, tiveram como limite crítico inferior no IHO a resistência à penetração (Figura 2). Enquanto os demais tiveram $D_{sR} < 1$, indicando que não há nenhum impedimento físico no solo. Quando se considera apenas a média geral do perfil do solo (Figura 5D), a D_{s_r} da maioria dos tratamentos é estatisticamente igual e menor do que 1. No entanto, a fragmentação em camada do perfil do solo revela variação da D_{sR} .

Mesmo que os menores valores de D_s sejam observados na camada superficial (Figura 6A), na relativização da densidade foi observado os menores valores na camada 0,10-0,20m (Figura 5C), reflexo do efeito da D_{sL} que tendeu a aumentar em profundidade (Figura 3). Esses resultados indicam que as forças compressivas superficiais aumentam o estado de compactação do solo mesmo sob condições de menores D_s .

Os maiores valores de D_{sR} observados na segunda camada (Figura 5B) é reflexo do incremento da densidade do solo comparada à camada superficial, expressa na Figura 6A, e reforça o diagnóstico da camada crítica à compactação por meio da densidade relativa. No entanto, menores valores de densidade do solo, para lavoura e pecuária, nem sempre correspondem às condições mais favoráveis. Isto porque, para os Latossolos, uma leve compactação pode ser benéfica para o desenvolvimento das plantas ao mesmo tempo que oferece maior resistência a pressões externas se tornando menos suscetível à compressão e, conseqüentemente, à compactação (Severiano et al., 2011).

No entanto, conforme observado na Figura 4, um aumento crescente da D_{SL} com o aumento da RP crítica adotada, 1,5, 2,0 e 3,5 MPa, respectivamente, refletiu também da D_{SR} , pois ao adotar esses valores de RP, crítica nota-se a redução da densidade do solo relativa (Figura 6). Dessa forma, até mesmo nos sistemas com pisoteio animal, a D_{SR} foi menor que 1,0, enquanto o sistema LAV-C, o qual se adotou $RP=1,5$ MPa, foi o tratamento com maiores alterações em todas as profundidades avaliadas, alcançando valores relativizados superiores a 1,0.

Os sistemas com pastagens, que a princípio com a RP crítica de 2,0 teve restrições severas do IHO, apresenta expressivo efeito no sistema, como supracitado, como agente estrutural e escarificador biológico (Flávio Neto et al., 2015), notado pela elevada quantidade de raízes ao longo do perfil durante as amostragens em campo (Figura 1). Dessa forma, sistemas conservacionistas tem-se a formação de bioporos oriundos do crescimento das raízes e da atividade de organismos que compõem a mesofauna do solo (Serafim et al., 2008), cuja conexão entre os poros é fundamental para a biota do solo, crescimento das plantas e transporte de água e gases (Rabot et al., 2018). Somando-se a isso, tem-se o aumento da macrofauna do solo, conforme observado por Marchão et al. (2009b) na mesma área em estudo.

Considerando somente os sistemas cultivados, pode ser observado expressiva variação da média da D_s (mínima de $0,91 \text{ kg dm}^{-3}$ no SIL-C e máxima de $1,20 \text{ kg dm}^{-3}$ no SIP-D), refletindo o efeito dos sistemas de manejo, ao longo dos anos, na sua estrutura do solo. Essa compactação, notável pela ampla variação da D_s em função dos manejos, é permissível ao Latossolos oxídicos pela sua estrutura granular pequena que garante elevada macroporosidade (Severiano et al, 2011).

Já para o corredor de manejo, a D_s média máxima foi de $1,30 \text{ kg dm}^{-3}$ encontrada na camada superficial. Ainda assim, o valor foi inferior a D_s máxima encontrada por Silva et al. (2015), de $1,36 \text{ kg dm}^{-3}$, na média da camada 0,0-0,20 m, em um solo semelhante intensamente trafegado por um trator agrícola e cultivado com sorgo. No entanto, o Latossolo em estudo, textura muito argilosa apresenta mineralogia da fração argila predominantemente gibbsítica (50%) (Marchão et al., 2009a), cujo sistema poroso se assemelha aos solos de textura arenosa. Atributos do solo como elevada permeabilidade, baixa densidade do solo natural e maior presença de poros grandes (Ferreira et al., 1999) são predominantes no Latossolos oxídicos. Este comportamento característico é descrito no CN, refletindo as condições naturais, cuja D_s média foi inferior a $1,00 \text{ kg dm}^{-3}$ (Figura 6A).

A menor D_s superficial observada nos tratamentos manejados pode ser efeito do incremento de carbono orgânico no solo ao longo dos anos de uso, como observado por Sant'Anna et al. (2016) na mesma área em estudo. Esses autores observaram os maiores valores de carbono orgânico na camada 0,00-0,05 m, notadamente os tratamentos CN e SIL-D, próximos a 40 g kg^{-1} , sendo superiores aos demais tratamentos na referida camada, ao passo que tenderam a reduzir ao longo do perfil (em torno de 20 g kg^{-1} na camada 0,10-0,20 m), independente do sistema de manejo adotado, como também observado por Gazolla et al. (2015).

Para Sant'Anna et al. (2016) nem sempre os sistemas integrados com pastagem terão o maior incremento de C no solo e que, talvez, o solo nesse clima tropical já tenha alcançado sua estabilidade/equilíbrio físico-químico sem mais ganhos significativos ao longo dos anos.

Resultados similares também foram encontrados por Sato et al. (2019), na mesma área em estudo, então com 24 anos de duração. Os autores observaram maiores valores de carbono orgânico e semelhantes no sistema integrado lavoura-pecuária sob plantio direto (SIL-D), o qual foi superior aos demais sistemas de cultivo analisados e semelhante ao cerrado nativo (CN). Além disso, esses autores também sustentam os estudos anteriores na mesma área, em que os sistemas de preparo convencional levam às maiores perdas de carbono orgânico do solo.

Cecagno et al. (2018), em estudo em solo semelhante e em sistema de 13 anos de integração lavoura-pecuária, não observaram diferença no carbono orgânico do solo em diferentes intensidades de manejo. No entanto, Bonetti et al. (2019), na mesma área de estudo anterior, avaliando atributos físicos do solo, notaram que pastejo intensivos promovem o aumento da densidade e redução da porosidade na camada 0,0-0,05 cm, mas que após a safra da soja, a densidade nessa camada é significativamente reduzida.

Semelhante aos resultados encontrados neste estudo, nos sistemas de integração, os quais SIP-D, avaliado na fase pastagem, apresentou uma das maiores D_s na camada superficial, enquanto o SIL-D, avaliado na fase lavoura, obteve a menor D_s na mesma camada. Ambus et al. (2018) também observaram que apenas um ciclo de lavoura seria suficiente para recuperar o solo, pela atividade biológica e decomposição das raízes das gramíneas cultivadas anteriormente.

Apesar das densidades distintas observadas (Figura 6A), de maneira geral, a influência do manejo foi menos expressiva quando se considera valores de IHO absolutos no perfil (6B e C). Isto porque o mesmo IHO pode refletir momentos estruturais distintos (Cecagno et al., 2016).

O comportamento do IHO ao longo do perfil em um mesmo sistema, varia de acordo com a RP crítica considerada crítica. Sistemas como PAST, SIP-D (ambos com pisoteio) e LAV-D apresentaram os menores do IHO dentre os sistemas de manejo agropecuário, sendo que na camada superficial, somente PAST se distanciou dos demais com menor IHO e maior dispersão dos resultados, reflexo das limitações impostas pela RP, observadas diretamente na Figura 2.

Para a LAV-D, a redução do IHO na camada de 0,00-0,10 m pode ser advinda do acúmulo do histórico de tensões superficiais e do não revolvimento do solo no sistema plantio direto (SPD), atingindo camadas mais profundas. Ao mesmo tempo, o não revolvimento preserva a estrutura do solo, a entrada de gramíneas no sistema ajuda na descompactação biológica do solo, que atua fundamentalmente da superfície para as camadas mais profundas (Silva et al., 2019). Mas, a presença de gramíneas e raízes é mais intensa no sistema quando se faz integração lavoura-pecuária, como no SIL-D, em que são 4 anos de lavoura alternando com 4 anos de pastagem, esta por sua vez, elimina o histórico de tensões aplicadas ao solo advindo do plantio direto da fase lavoura.

Esse comportamento pode ser observado na Figura 6B, em que o IHO do SIL-D se manteve quase constante ao longo do perfil, enquanto LAV-D teve redução de $0,19 \text{ dm}^3 \text{ dm}^{-3}$ na camada superficial para $0,11 \text{ dm}^3 \text{ dm}^{-3}$ na camada de 0,05-0,10 m, sendo semelhante em todos os tratamentos para camada 0,10-0,20 m, demonstrando, portanto, a profundidade em torno de 0,10 m como a de maior suscetibilidade à compactação deste solo. Em sistema de manejo do solo bastante semelhante, também em Latossolo da região do Cerrado, de mineralogia e textura semelhantes ao deste estudo, Silva et al. (2014), demonstraram que a sucessão soja/*Brachiaria brizantha* (sistema semelhante aos SIL-D deste estudo) por cinco anos promoveu a recuperação do solo em todas as camadas avaliadas no perfil. Esses autores observaram ainda, que a sucessão soja/milho ou o monocultivo de soja (sistemas semelhantes ao LAV-D deste estudo) apontaram a camada de 0,05-0,10 m com os menores valores de IHO no perfil.

Mas, considerando que em sistemas plantio direto tem-se caminhos alternativos para o crescimento das raízes, assume-se a adoção de valores de RP crítica maiores (3,5 MPa), resultando em outro comportamento dos sistemas conservacionistas, não apresentando limitações ao IHO (Figura 6C). Por um lado, o efeito do manejo foi mais pronunciado na Ds (6A) do que no IHO, o que não refletiu, porém, no IHO. Esta constatação subsidia a afirmação que as referidas alterações estruturais aqui quantificadas não implicam na perda da qualidade física do solo, já que o IHO ou se manteve constante, ou aumentou com a

profundidade (mesmo com aumento da D_s), exceto o LAV-C. Consequentemente, tanto o aspecto visual das áreas amostradas nestas condições (Figura 1), quanto os resultados do rendimento de grãos de soja e de forragem nas áreas com os referidos cultivos atestam a saúde do solo, além da sustentabilidade agropecuária, mesmo com os incrementos de compactação do solo na magnitude avaliada.

Quando se analisa somente a D_s (6A), torna-se difícil prever qual sistema oferece restrições pois, embora seja a medida quantitativa mais direta no diagnóstico estrutural do solo, a influência exercida pela textura e estrutura pedológica nesse atributo limita a escolha de um valor absoluto de referência. Em contrapartida, com a relativização pela Densidade limitante ao IHO (Figura 6D e E) em cada sistema nota-se quais sistemas estão acima ou muito abaixo da D_{SL} , isto é, $1,0 < D_{SR} \text{ ótima} < 1,0$. Nesse sentido, a D_{SR} ideal é mais próxima a 1,0, o que indica as melhores condições ao desenvolvimento das plantas pela melhoria na retenção de água, no contato solo-raiz e na estrutura com maior capacidade de suporte às pressões externas. Em outras palavras, é a condição/momento estrutural que se tem as melhores condições físico-hídricas e menor suscetibilidade a compactação do solo. Isso porque o solo revolvido ou sem histórico de tensões aplicadas é mais suscetível à compactação (Guimarães Júnnyor et al., 2019), ao passo que Severiano et al. (2011) afirmam que um leve aumento da D_s pode ser benéfico nos Latossolos oxídicos. Quando considera para D_{SL} a RP variável (6E), foi observado a $D_{SR} < 1,0$ para maioria dos tratamentos, ou seja, nesse caso a densidade, observada nos sistemas em estudo, não é limitante ao desenvolvimento das plantas.

O efeito do pastoreio sobre o solo é inerente ao contexto em que está inserido (Zhang et al., 2019), como intensidade de pastejo, qualidade da pastagem, tipo de solo. Para os sistemas com pastejo animal, SIP-D e PAST, mesmo com as maiores D_s foram observados valores semelhantes do IHO ao longo do perfil. Neste sentido, as gramíneas, neste caso *Brachiaria brizantha* cv Piatã, são indicadas para os sistemas de integração lavoura-pecuária devido seu potencial de descompactação biológica (Flávio Neto et al., 2015) e, atuaram neste resultado, notadamente pela agressividade do crescimento das raízes mesmo sob eventual impedimento físico.

O acentuado aumento do IHO no tratamento COR em função da profundidade (Figura 6B) se deve ao fato de o efeito das pressões externas que levam ao aumento da densidade já que esta área recebe todo o tráfego de maquinário e pisoteio animal para o acesso aos talhões cultivados, sendo uma área de manobra de máquinas e implementos agrícola e de carro periodicamente durante os 26 de duração de condução do experimento.

Sem manejo de recuperação da estrutura, este tratamento representa o máximo de degradação física deste solo. Em adição, no LAV-C também se constata restrições de natureza física, quantificada pela redução do IHO resultante dos impactos do preparo do solo e formação do pé-de-grade, que dificulta a disponibilidade de água e nutrientes para o desenvolvimento da planta.

Em profundidade, 80% dos tratamentos tenderam a apresentar os mesmos valores de IHO. Esta tendência também foi constatada por Pires et al. (2017), em um mesmo tipo de solo, avaliando preparo convencional e plantio direto, observaram que em camadas a partir de 0,20-0,25 m a estrutura do solo se torna similar entre esses sistemas.

Assim, a avaliação da qualidade física através do indicador intervalo hídrico ótimo foi satisfatória, no sentido de sensibilidade com as alterações estruturais promovidas pelos sistemas de manejos. As diferentes maneiras de expor os resultados e observação dos comportamentos dos dados garante melhor interpretação e entendimento do IHO. No entanto, deve-se considerar as particularidades de cada sistema na definição dos limites críticos, haja vista que as variáveis que compõe o IHO são passíveis de serem alteradas pelo preparo e manejo do solo. Nesse sentido, adequações em conjunto dos ajustes modelos da CRA e CRP para o sistema, a variação da RP crítica, a adoção da D_{SL} e a fragmentação do perfil em camadas podem embasar com mais acurácia do IHO.

3.5 CONCLUSÕES

Os limites críticos do IHO dos sistemas avaliados variaram com RP crítica de 2,0 MPa, quando comparados ao IHO da camada avaliada;

Quando se adotou RP crítica variável de 1,5, 2,0 ou 3,5 MPa, apenas o corredor de manejo e a lavoura contínua sob plantio convencional foram limitados pela RP;

A densidade do solo superficial, na camada de 0,00-0,05 m, apresentou os menores valores de densidade do solo na maioria dos tratamentos;

Apesar da ampla variação da densidade nos sistemas avaliados, a amplitude do IHO foi menor na camada mais profunda (0,10-0,20 m).

Os sistemas de manejo com pisoteio animal apresentaram as maiores densidades dentre os sistemas cultivados, no entanto, não houve limitações ao IHO, considerando RP crítica de 3,5 MPa.

3.6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ajayi, A.E., Dias Junior, M.S., Curi, N., Araujo Junior, C.F., Souza, T.T.T., Inda Junior, A.V., 2009. Strength properties and compaction susceptibility of Brazilian Latosols. *Soil Tillage Res.* 105, 122-127. <https://doi.org/10.1016/j.still.2009.06.004>
- Ambus, J.V., Reichert, J.M., Gubiani, P.I., Carvalho, P.C.F., 2018. Changes in composition and functional soil properties in long-term no-till integrated crop-livestock system. *Geoderma*, 330, 232–243, <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.06.005>
- Arriaga, F.J., Guzman, J., Lowery, B., 2017. Chapter 5 – conventional agricultural production systems and soil functions, In: Al-Kaisi, M.M. and Lowery, B. *Soil Health and Intensification of Agroecosystems*, Academic Press, pp.109–125. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-805317-1.00005-1>
- 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. *Rev. Bras. Ciênc. Solo* 36, 971–982. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832012000300027>
- Bertolazi, V.T., Inda, A.V., Caner, L., Martins, A.P., Vaz, M.A.B., Bonnet, M., Anghinoni, I., Carvalho, P.C.F., 2017. Impact of an integrated no-till soybean–beef cattle production system on Oxisol mineralogy in southern Brazil. *Appl. Clay Sci.* 149, 67–74 <https://doi.org/10.1016/j.clay.2017.08.028>
- Bonetti, J.A., Anghinoni, I., Gubiani, P.V., Cecagno, D., Moraes, M.T., 2019. Impact of a long-term crop-livestock system on the physical and hydraulic properties of na Oxisol. *Soil Tillage Res.* 186, 280–291. <https://doi.org/10.1016/j.still.2018.11.003>
- Busscher, W. J., 1990. Adjustment of flat-tipped penetrometer resistance data to common water content. *Transactions of the ASAE*, 33, 519–424.
- Calonego, J.C.; Borghi, E.; Crusiol C.A.C. 2011. Intervalo hídrico ótimo e compactação do solo com o cultivo de milho e braquiária. *Rev. Bras. Ciênc. Solo* 35, 2183-2190. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832011000600033>
- Carvalho, P.C.F., Barro, R.S., Barth Neto, A., Nunes, P.A.A., Moraes, A., Anghinoni, I., Bredemeier, C., Bayer, C., Martins, A.P., Kunrath, T.R., Santos, D.T., Carmona, F.C., Barros, T., Souza Filho, W., Almeida G.M., Caetano, L.A.M., Cecagno, D., Arnuti, F., Denardin, L.A.O., Bonetti, J.A., Toni, C.A.G., Borin, J.B.M., 2018. Integrating the pastoral component in agricultural systems. *R. Bras. Zootec.* 47:e20170001. <https://doi.org/10.1590/rbz4720170001>
- Carducci, C.E., Oliveira, G.C., Severiano, E.C., Seviani, W.M., 2011. Modelagem da curva de retenção de água de latossolos utilizando a equação duplo Van Genuchten. *Rev. Bras. Ciênc. Solo* 35, 77–86. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832011000100007>
- 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 Tillage Res.* 156, 54–62. <https://doi.org/10.1016/j.still.2015.10.005>
- Cecagno, D., Gomes, M.V., Costa, S.E.V.G.D., Posset, A., Denardin, L.G.O., Bayer, C., Anghinoni, I., Carvalho, P.C.F., 2018. Soil organic in a integrated crop-livestock system under difere diferenteg intensities. *Rev. Bras. Ciênc. Agrárias* 13, e5553. <http://dx.doi.org/10.5039/agraria.v13i3a5553>

- Dias-Filho M.B., 2014. Diagnóstico das Pastagens no Brasil. Embrapa Amazônia Oriental, Belém. 36 pp.
- Donagemma, G.K., Viana, J.H.M., Almeida, B.G., Ruiz, H.A., Klein, V.A., Dechen, S.C.F., Fernandes, R.B.A. 2017. Análise Granulométrica. In: Teixeira, P.C., Donagemma, G.K., Fontana, A., Teixeira, W.G. Manual of soil method analysis, 3ed ver e ampl., Embrapa, pp.95-116.
- Ferreira, D.F., 2011. Sisvar: Um computador sistema de análise estatística. Ciência e Agrotecnologia, 35, 1039–1042.
- Ferreira, M.M., Fernandes, B., Curi, N., 1999. Mineralogia da fração argila e estrutura de Latossolos da região sudeste do Brasil. Rev. Bras. Ciênc. Solo 23, 507–514. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06831999000300003>
- Flávio Neto, J., Severiano, E.C., Costa, K.A.P., Guimarães Júnnyor, W.S., Gonçalves, W.G., Andrade, R., 2015. Biological soil loosening by grasses from genus *Brachiaria* in crop-livestock integration. Acta Sci. Agron. Maringá, 37, 375–383. <http://dx.doi.org/10.4025/actasciagron.v37i3.19392>
- Gazolla, P.R., Guareschi, R.F., Perin A., Pereira, M.G., Rossi, C.Q., 2015. Frações da matéria orgânica do solo sob pastagem, sistema plantio direto e integração lavoura-pecuária. Semina: Ciênc. Agrár. Londrina, 36, 693–704. <http://dx.doi.org/10.5433/1679-0359.2015v36n2p693>
- Girardello, V.C., Amado, T.J.C., Santi, A.L., Cherubin, M.R., Kunz, J. Teixeira, T.G., 2014. Resistência à penetração, eficiência de escarificadores mecânicos e produtividade da soja em Latossolo argiloso manejado sob plantio direto de longa duração. Rev. Bras. Ciênc. Solo 38, 1234–1244. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832014000400020>
- Grable, A.R., Siemer, E.G., 1968. Effects of bulk density, aggregate size, and soil water suction on oxygen diffusion, redox potencial and elongation of corn roots. Soil Sci. Soc. Am. J. 32, 180–186. <https://doi.org/10.2136/sssaj1968.03615995003200020011x>
- Greenwood, K.L., Mckenzie, B.M., 2001. Grazing effects on soil physical properties and the consequences for pastures: a review. Australian Journal Express Agricola, 42, 1231–1250. <http://dx.doi.org/10.1071/EA00102>
- 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 snowing time as a second crop in tehe brazilian cerrado. Rev. Bras. Ciênc. Solo 39, 1744–1754. <http://dx.doi.org/10.1590/01000683rbc20150121>
- Guimarães Júnnyor, W.S.; De Maria, I.C., Araujo-Junior, Lima, C.C, Vitti, A.C., Figueiredo, G.C., Dechen, S.C.F., 2019. Soil compaction in the traffic lane due to soil tillage and sugarcane mechanical harvesting operations. Sci. Agric. 76, 509–517. No prelo.
- Hendrickson, J., Sanderson, M., 2017. Chapter 7 – Perennial-Based Agricultural Systems and Livestock Impact on Soil and Ecological Services. In: al-kaisi, M.M. Lowery, B. Soil Health and Intensification of Agroecosytems, Academic Press, pp.151–171. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-805317-1.00007-5>
- Lal, R., 2016. Why Carbon Sequestration in Agricultural Soils, in: Kimble, J.M., Lal, R., Follett, R.F., Agricultural Practices and Policies for Carbon Sequestration in Soil. CRC Press, pp. 21–31. <https://doi.org/10.1201/9781420032291>

- Leão, T.P., Silva, A.P., Macedo, M.C.M., Imhoff, S., Euclides, V.P.B., 2004. Intervalo hídrico ótimo na avaliação de sistemas de pastejo contínuo e rotacionado. *Rev. Bras. Ciênc. Solo* 28, 415–423. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832004000300002>
- Leão, T.P., Da Silva, A.P., Perfect, E., Tormena, C.A., 2005. An algorithm for calculating the least limiting water range of soils. *Agronomy Journal*, 97, 1210–1215. <http://dx.doi.org/10.2134/agronj2004.0229>
- Marchão, R.L., Levelle, P., Celini, L., Barbino, L.C., Vilela, L., Becquer, T., 2009b. Soil macrofauna under integrated crop-livestock systems in a Brazilian Cerrado Ferralsol. *Pesq. Agropec. Bras.* 44, 1011–1020. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-204X2009000800033>
- Marchão, R.L., Balbino, L.C., Silva, E.M., Santos Junior, J.D.G., Sá, M.A.C., Vilela, L., Becquer, T., 2007. Qualidade física de um Latossolo Vermelho sob sistemas de integração lavoura-pecuária no Cerrado. *Pesq. Agropec. Bras.* 42, 873–882. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-204X2007000600015>
- Marchão, R.L., Becquer, T., Brunet, D., Balbino, L.C., Vilela, L., Brossard, M., 2009a. Carbon and nitrogen stocks in a Brazilian clayey Oxisol: 13-year effects of integrated crop-livestock management systems. *Soil Tillage Res.* 103, 442–450. <https://doi.org/10.1016/j.still.2008.11.002>
- Medina, G., Santos, A. P. S., 2017. Curbing enthusiasm for Brazilian agribusiness: the use of actorspecific assessments to transform sustainable development on the ground. *Appl. Geogr.* 85, 101–112. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2017.06.003>
- Moraes, M.T., Debiase, H., Carlesso, R., Franchini, J.C., Silva, V.R., Luz, F.B. 2016. Soil physical quality on tillage and cropping systems after two decades in the subtropical region of Brazil. *Soil Tillage Res.* 155, 351–362. <https://doi.org/10.1016/j.still.2015.07.015>
- 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. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832014000100011>
- Moreira, W.H., Betioli Júnior, E., Petean, L.P., Tormena, C.A., Alves, S.J., Costa, M.A.T., Franco, H.H.S., 2012. Atributos físicos de um Latossolo Vermelho Distroférico em sistemas de integração lavoura-pecuária. *Rev. Bras. Ciênc. Solo* 36, 389–400. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832012000200008>
- Oliveira, I. P., Kluthcouski, J., Yokoyama, L. P., Dutra, L. G., Portes, T. A., Silva, A. E., Pinheiro, B. S., Ferreira, E., Castro, E. M., Guimarães, C. M., Gomide, J.C., Balbino, L. C., 1996. Sistema Barreirão: recuperação/renovação de pastagens degradadas em consórcio com culturas anuais. Goiânia: EMBRAPACNPAF, 90 p. (EMBRAPA-CNPAF. Documentos, 64).
- Oliveira, G.C., Dias Júnior, M.S., Resck, D.V.S., Curi, N., 2003. Alterações estruturais e comportamento compressivo de um Latossolo Vermelho distrófico argiloso sob diferentes sistemas de uso e manejo. *Pesq. agropec. bras.* 38, 291–299. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-204X2003000200017>
- Pires, L.F., Borges, J.A.R., Rosa, J.A., Cooper, M., Heck, R.J., Passoni, S., Roque, W.L., 2017. Soil structure changes induced by tillage systems. *Soil Tillage Res.* 65, 66–79. <https://doi.org/10.1016/j.still.2016.07.010>

- Rabot, E., Wiesmeier, M., Schlüter, S., Vogel, H. J. 2018. Soil structure as an indicator of soil functions: A review. *Geoderma*, 314, 122–137. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.11.009>
- Rada, N., 2013. Assessing Brazil's Cerrado agricultural miracle. *Food Policy*, 38, 146–155. <https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2012.11.002>
- Reatto, A., Bruand, A., Silva, E.M., Martins, E.S., Brossard, M., 2007. Hydraulic properties of the diagnostic horizon of Latosols of a regional toposequence across the Brazilian Central Plateau. *Geoderma*, 139, 51–59. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2007.01.003>
- Reatto, A., Bruand, A., Martins, E.S., Muller, F., Silva, E.M., Carvalho Jr., O.A., Brossard, M., Richard, G., 2009. Development and origin of the microgranular structure in Latosols of the Brazilian Central Plateau: significance of texture, mineralogy, and biological activity. *Catena*, 76, 122–134. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2008.10.003>
- Richards, L. A., Weaver, L. R., 1943. fifteen-atmosphere percentage as related to the permanente wilting point. *Soil Sci.* 56, 331–339.
- Ross, P.J., Williams, J, Bristow, K.L., 1991. Equation for extending water-retention curves to dryness. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 55, 923–927. <http://dx.doi.org/10.2136/sssaj1991.03615995005500040004x>
- Sá, J. C. M., Lal, R., Cerri, C. C., Lorenz, K., Hungria, M., Carvalho, P. C.F., 2017. Low-carbon agriculture in South America to mitigate global climate change and advance food security. *Environ. Int.* 98, 102–112. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2016.10.020>
- Sant'Anna, S. A. C., Jantalia, C. P., Sá, J. M., Vilela, L., Marchão, R. L., Alves, B.J. R., Urquiaga, S. E Boddey, R. M., 2016. Changes in soil organic carbon during 22 years of pastures, cropping or integrated crop/livestock systems in the Brazilian Cerrado. *Nutr. Cycl. Agroecosys.* 108,101–120. <https://doi.org/10.1007/s10705-016-9812-z>
- Santos, H.G., Jacomine, P.K.T., Anjos, L.H.C., Oliveira, V.A., Lumberras, J.F., Coelho, M.R., Almeida, J.A., Araujo Filho, K.C., Oliveira, J.B., Cunha, T.J.F., 2018. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos, quinta ed., Embrapa Solos.
- Statistical Analysis System - SAS, 2002. STAT software for PC. SAS Institute Inc.
- Sato, J. H., Figueiredo, C. C., Marchão, R. L., Oliveira, A. D., Vilela, L. Delvico, F. M., Alves, B. J. R., Carvalho, A. M., 2019. Understanding the relations between soil organic matter fractions and N₂O emissions in a long-term integrated crop-livestock system. <https://doi:10.1111/ejss.12819> (no prelo)
- Serafim, M.E., Vitorino, A.C.T., Peixoto, P.P.P, Souza, C.M.A., Carvalho, D.F., 2008. Intervalo hídrico em um Latossolo Vermelho Distroférrico sob diferentes sistemas de produção. *Eng. Agríc.* 28, 654–665. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-69162008000400005>
- Severiano, E.C.; Oliveira, G.C.; Curi, N.; Dias Junior, M.S., 2009. Potencial de uso e qualidade estrutural de dois solos cultivados com cana-de-açúcar em Goianésia (GO). *Rev. Bras. Ciênc. Solo* 33, 159-168. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832009000100017>
- Severiano, E.C., Oliveira, G.C., Dias Júnior, M.S., Costa, K.A.P., Silva, F.G., Ferreira Filho, S.M., 2011. Structural changes in Latosols of the Cerrado Region: I – Relationships between soil physical properties and Least Limiting Water Range. *Rev. Bras. Ciênc. Solo* 35, 773–782. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832011000300013>

- Severiano, E.C, Oliveira, G.C., Dias Junior, M.S., Curi, N., Costa, K.A.P., Carducci, C.E., 2013. Preconsolidation pressure, soil water retention characteristics, and texture of Latosols in the Brazilian Cerrado. *Soil Res.* 51, 193–202. <https://doi.org/10.1071/SR12366>
- Silva, A.P., Kay, B.D., Perfect, E., 1994. Characterization of the least limiting water range. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58, 1775–1781. <http://dx.doi.org/10.2136/sssaj1994.03615995005800060028x>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.still.2015.06.013>
- Silva, J.F.G., Severiano, E.C., Costa K.A.P., Benites, V.M., Guimarães Júnnyor, W.S., Bento, J.C. 2014. Chemical and physiscal-hydric characterisation of a red Latosol after five years of management during the summer between-crop season. *Rev. Bras. Ciênc. Solo* 38, 1576-1586. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832014000500023>
- Silva, J.F.G., Goncalves, W.G., Costa, K.A.P., Flávio Neto, J., Brito, M.F., Silva, F.C., Severiano, E.C., 2019. Crop-livestock integration and the physical resilience of a degraded Latosol. *Semina. Ciênc. Agrár.* (Online). (no prelo)
- Soil Survey Manual, 2017. United States Department of Agriculture Handbook n.18, by Soil Science Division Staff.
- Torino, A.B. Desempenho do milho e produção de matéria seca de *Brachiaria* em consórcio em Latossolo fisicamente degradado. 2017. Dissertação. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano - Campus Rio Verde/Programa de Pós-graduação em Ciências Agrárias – Agronomia.
- Tormena, C.A., Araújo, M.A., Fidalski J., Costa, J.M., 2007. Variação temporal do intervalo hídrico ótimo de um Latosolo Vermelho Distroférico em sistemas de plantio direto. *Rev. Bras. Ciênc. Solo* 31, 211–219. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832007000200003>
- Tormena, C.A., Silva, A.P., Libardi P.L., 1998. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo roxo sob plantio direto. *Rev. Bras. Ciênc. Solo* 22, 573–581. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06831998000400002>
- Tormena, C.A., Karen, D.L., Logsdon, S., Cherubin, M.R., 2017. Corn stover harvest and tillage impacts on near-surface soil physical quality. *Soil Tillage Res.* 166, 122-130. <https://doi.org/10.1016/j.still.2016.09.015>
- 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. <http://dx.doi.org/10.1590/01000683rbc20140596>
- Viana, J.H.M., Teixeira, W.G., Donagemma, G.K. 2017. Densidade de partículas. In: Teixeira, P.C., Donagemma, G.K., Fontana, A., Teixeira, W.G. *Manual of soil method analysis*, 3ed ver e ampl., Embrapa, pp.95-116.
- Vilela, L., Martha Junior, G.B., Macedo, M.C.M., Marchão, R.L., Guimarães Júnior, R., Pulrolnik, K., Maciel, G.A., 2011. Sistemas de integração lavoura-pecuária na região do Cerrado. *Pesq. Agropec. Bras.* 46, 1127–1138. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-204X2011001000003>
- Wu, L., Feng, G., Letey, J., Ferguson, L., Mitchell, J., McCullough-Sanden, B., Markegard, G., 2003. Soil management effects on the nonlimiting water range. *Geoderma*, 114, 401–414. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(03\)00052-1](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(03)00052-1)

Zhang, B., Beck, R., Pan, Q., Zhao, M. Hao, X., 2019. Soil physical and chemical properties in response to long-term cattle grazing on sloped rough fescue grassland in the foothills of the Rocky Mountains, Alberta. *Geoderma*, 346, 75–83. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.03.029>