

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
GOIANO - CÂMPUS RIO VERDE PROGRAMA DE
PÓSGRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS - AGRONOMIA

INTEGRAÇÃO AGRICULTURA-PECUÁRIA NA
RESILIÊNCIA E NA QUALIDADE FÍSICA DE UM
LATOSSOLO VERMELHO DISTROFÉRICO DA REGIÃO
DO CERRADO BRASILEIRO

Autor: José Fausto Guimarães Silva

Orientador: Prof. Dr. Eduardo da Costa Severiano

Rio Verde – GO

Março – 2017

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
GOIANO - CÂMPUS RIO VERDE PROGRAMA DE
PÓSGRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS - AGRONOMIA

INTEGRAÇÃO AGRICULTURA-PECUÁRIA NA
RESILIÊNCIA E QUALIDADE FÍSICA DE UM LATOSSOLO
VERMELHO DISTROFÉRRICO DA REGIÃO DO CERRADO
BRASILEIRO

Autor: José Fausto Guimarães Silva

Orientador: Prof. Dr. Eduardo da Costa Severiano

Tese apresentada como parte das exigências para obtenção do título de DOUTOR 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 Produção Vegetal Sustentável no Cerrado.

Rio Verde – GO

Março – 2017

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

GS1586

i

Guimarães Silva, José Fausto
INTEGRAÇÃO AGRICULTURA-PECUÁRIA NA
RESILIÊNCIA E QUALIDADE FÍSICA DE UM
LATOSSOLO VERMELHO DISTROFÉRRICO DA REGIÃO
DO CERRADO BRASILEIRO / José Fausto Guimarães
Silva; orientador Eduardo Costa Severiano; co-orientador
Adriano Jakelaitis. -- Rio Verde, 2017. 90 p.

Tese (Doutorado em Ciências Agrárias - Agronomia) --
Instituto Federal Goiano, Câmpus Rio Verde, 2017.

1. Descompactação biológica. 2. qualidade estrutural
do solo. 3. estabilidade de agregados. 4. intervalo hídrico
ótimo. 5. Brachiaria sp., Helianthus annuus L.. I. Costa
Severiano, Eduardo, orient. II. Jakelaitis, Adriano, co-orient.
III. Título.

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

INTEGRAÇÃO AGRICULTURA-PECUÁRIA NA RESILIÊNCIA
E QUALIDADE FÍSICA DE UM LATOSSOLO VERMELHO
DISTROFÉRICO DA REGIÃO DO CERRADO BRASILEIRO

Autor: José Fausto Guimarães Silva

Orientador: Dr. Eduardo da Costa Severiano

TITULAÇÃO: Doutor. APROVADA em 08 de março de 2017.

Prof. Dr. Itamar Pereira de Oliveira

Prof^(a). Dr^(a). Kátia Aparecida de Pinho Costa

Prof^(a). Dr^(a). Adriana Aparecida Ribon

Prof. Dr. Wender Ferreira de Souza

Prof. Dr. Eduardo da Costa Severiano

(Orientador)

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar a Deus, pela oportunidade de vida, por cada pessoa colocada no meu caminho ao longo desta jornada, por toda proteção e bênção.

A toda família, que sempre esteve ao meu lado dando apoio, meus pais, Aldeson Alves da Silva e Irma Guimarães Silva.

Aos meus irmãos, Fabiano Guimarães Silva e Flávia Guimarães Silva, pela ajuda e apoio.

Ao Instituto Federal Goiano, Campus Rio Verde e especialmente ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias, coordenação e docentes, pela oportunidade de realização deste estudo.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela bolsa de estudo e apoio financeiro à execução deste trabalho.

Ao meu orientador, Professor Dr. Eduardo da Costa Severiano, pela dedicação prestada ao longo da pesquisa, conhecimentos, sabedoria e confiança passados durante as etapas de todo o processo de formação acadêmica, e tamanha paciência no andar da pesquisa.

Ao grande profissional responsável técnico do laboratório de física do solo, Wainer Gomes Gonçalves, que com grande sabedoria e profissionalismo, desempenha sua função formidavelmente, seja no auxílio nas análises ou nas dúvidas diversas.

Aos meus amigos, profissionais do Instituto Federal Goiano, José Flávio Neto, Paulo Dorneles, Wenner Gomes e Sebastião, que além do apoio, incentivo, sempre que

possível, disponibilizaram ferramentas de trabalho e parte do tempo na execução da pesquisa, e também aos demais Técnicos aqui não citado, o meu muito obrigado.

Aos colegas e amigos do Laboratório de Física do Solo, Josué Gomes, Lucas, Aline, Adalto, Jordaanny, Lidiane Santos, Renata, Leonardo, que colaboraram para que este trabalho fosse concluído, além da amizade que é muito importante.

A todos os amigos que sempre estiveram ao meu lado com incentivos tão importantes.

À minha esposa, namorada e melhor amiga, Aline Gobbi Dutra, que se fez presente em todos os momentos, somando alegria, amor e que me apoiou imensamente, principalmente nos momentos difíceis.

Aos meus avós Mario Vieira Guimarães e Irany Vieira Guimarães (*in memoriam*).

De coração, muito obrigado a todos!

BIOGRAFIA DO AUTOR

JOSÉ FAUSTO GUIMARÃES SILVA, filho de Aldeson Alves da Silva e Irma Guimarães Silva, nasceu no dia 19 de março de 1981, em Rio Verde, Goiás.

Em dezembro de 2000 concluiu o curso de Técnico em Zootecnia pela Escola Agrotécnica Federal de Rio Verde, atual Instituto Federal Goiano Campus Rio Verde.

Em dezembro de 2009 concluiu o curso de Engenharia Agrônômica pela Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ).

Em outubro de 2012 concluiu o curso de mestrado do Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias, no Instituto Federal Goiano Campus de Rio Verde, sob a orientação do Professor Dr. Eduardo da Costa Severiano.

Em 2017 concluiu o curso de Doutorado em Ciências Agrárias - Agronomia pelo Instituto Federal Goiano Campus Rio Verde, também sob a orientação do Dr. Eduardo da Costa Severiano.

ÍNDICE GERAL

	Página
ÍNDICE DE TABELAS -----	Vii
ÍNDICE DE FIGURAS -----	Viii
LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS E ABREVIATURAS -----	Xi
RESUMO GERAL-----	1
ABSTRACT -----	3
INTRODUÇÃO GERAL-----	5
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS-----	8
OBJETIVOS-----	11
CAPÍTULO I: Integração agricultura-pecuária na resiliência de um Latossolo Vermelho compactado: sensibilidade de indicadores da qualidade física do solo-----	12
RESUMO-----	12
INTRODUÇÃO-----	14
MATERIAL E MÉTODOS -----	16
RESULTADOS E DISCUSSÃO -----	19
CONCLUSÕES -----	30
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS -----	31
CAPÍTULO II: Qualidade física do solo e rendimento de girassol e capim-Paiaguás em integração agricultura-pecuária -----	42
RESUMO-----	42
INTRODUÇÃO-----	43

MATERIAL E MÉTODOS -----	47
RESULTADOS E DISCUSSÃO -----	53
CONCLUSÕES -----	74
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS -----	75
CONCLUSÃO GERAL-----	88

ÍNDICE DE TABELAS

	Página
CAPÍTULO – I Integração agricultura-pecuária na resiliência de um Latossolo Vermelho compactado: sensibilidade de indicadores da qualidade física do solo.	
Tabela 1. Caracterização física e química do Latossolo Vermelho Distroférico típico do município de Rio Verde, Goiás.....	16
Tabela 2. Carbono orgânico total do solo (CO) após o cultivo dos diferentes tipos de cobertura vegetal, nas diferentes camadas avaliadas em um Latossolo Vermelho Distroférico típico.....	20
Tabela 3. Diâmetro médio geométrico (DMG) e classificação dos agregados quanto às diferentes classes de tamanho em um Latossolo Vermelho Distroférico típico.....	22
CAPÍTULO – II Qualidade física do solo e rendimento de girassol e capim-Paiaguás em integração agricultura-pecuária.	
Tabela 1. Caracterização física e mineralógica do Latossolo Vermelho Distroférico típico em Rio Verde, Goiás.....	47
Tabela 2. Complexo sortivo do Latossolo Vermelho Distroférico típico em Rio Verde, Goiás.....	48

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
CAPÍTULO – I Integração agricultura-pecuária na resiliência de um Latossolo Vermelho compactado: sensibilidade de indicadores da qualidade física do solo.	
Figura 1. Variação do conteúdo de água no solo (θ , $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) em profundidade, para os limites críticos do intervalo hídrico ótimo em um Latossolo Vermelho Distroférico típico.....	25
Figura 2. Correlações de Pearson entre os indicadores de qualidade física do solo e o carbono orgânico total em um Latossolo Vermelho Distroférico típico do Cerrado brasileiro sob sistemas de manejo do solo.....	30
CAPÍTULO – II Qualidade física do solo e rendimento de girassol e capim-Paiaguás em integração agricultura-pecuária.	
Figura 1. Precipitação pluviométrica (mm) e temperatura ($^{\circ}\text{C}$) diária durante o ciclo da cultura do girassol no município de Rio Verde, Goiás.....	50
Figura 2. Variação do conteúdo de água no solo (θ) com o incremento da densidade do solo (D_s) nos teores limites 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 2,5 MPa (θ_{RP}) do Latossolo Vermelho Distroférico típico, cultivado com girassol safrinha em monocultivo e consorciado	

com espécies de capim-Paiaguás. A área preenchida representa o IHO. Dsc: densidade crítica ao desenvolvimento das plantas.....	54
Figura 3. Variação do intervalo hídrico ótimo na camada de 0-0,15 m do Latossolo Vermelho Distroférrico típico, em função do tráfego de um trator agrícola e tara de 4,5 Mg. $T_0 = 0$, $T_2 = 2$, $T_{10} = 10$ e $T_{30} = 30$ passadas no mesmo lugar.....	56
Figura 4. Produtividade de aquênios de girassol em segunda safra sob monocultivo e consorciado com capim-Paiaguás em função da compactação do solo, mensurada pelos indicadores densidade do solo (A), densidade relativa limitante (B) e densidade relativa crítica ao IHO (C), em um Latossolo Vermelho Distroférrico típico do Cerrado brasileiro.....	59
Figura 5. Produtividade de forragem de <i>Brachiaria brizantha</i> cv. BRS Paiaguás sob monocultivo e consorciado com girassol, em função da compactação de Latossolo Vermelho Distroférrico típico do Cerrado brasileiro. A: capim-Paiaguás consorciado com girassol; B: capim-Paiaguás em monocultivo; C: produtividade total de forragem na entressafra; D: produtividade de palhada para o plantio direto...	65
Figura 6. Variação do conteúdo de água no solo (θ) com o incremento da densidade do solo (D_s) nos teores limites 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 1,7 e 3,9 MPa (θ_{RP}) (A) e; variação do intervalo hídrico ótimo com o incremento de D_s , considerando-se a RP limitante às medidas restritivas obtidas para o girassol e o capim-Paiaguás (B), na camada de 0-0,15 m de um Latossolo Vermelho Distroférrico típico em sistema de integração agricultura-pecuária. A área preenchida e hachurada representa o IHO em cada situação. $T_0 = 0$, $T_2 = 2$, $T_{10} = 10$ e $T_{30} = 30$ passadas no mesmo lugar de um trator agrícola e tara de 4,5 Mg.....	72

Figura 7. Produtividade relativa de aquênios de girassol e de forragem de capim-Paiaguas em função da compactação do solo, mensurada pelos indicadores densidade do solo (A) e pela densidade relativa limitante ao IHO (B), em um Latossolo Vermelho Distroférico típico do Cerrado brasileiro.....

LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS, ABREVIACIONES E UNIDADES

θ	conteúdo de água -----	($\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$)
θ_{CC}	conteúdo de água na capacidade de campo -----	-6 kPa
θ_{PMP}	conteúdo de água no ponto de murcha permanente ----	-1500 kPa
θ_{RP}	conteúdo de água na resistência do solo à penetração --	2,5 MPa
θ_{PA}	conteúdo de água na porosidade de aeração -----	10% ($\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$)
$^{\circ}\text{C}$	graus Celsius -----	-
%	por cento -----	-
AD	água disponível -----	-
AMG	areia muito grossa -----	(g kg^{-1})
Al	alumínio -----	-
AG	areia grossa -----	(g kg^{-1})
AM	areia média -----	(g kg^{-1})
AF	areia fina -----	(g kg^{-1})
AMF	areia muito fina -----	(g kg^{-1})
SiO_2	silício no extrato sulfúrico -----	(g kg^{-1})
Fe_2O_3	ferro no extrato sulfúrico -----	(g kg^{-1})
Al_2O_3	alumínio no extrato sulfúrico -----	(g kg^{-1})
DMG	diâmetro médio geométrico -----	(mm)
Aw	verão chuvoso -----	-
B	Boro -----	-
Ca	cálcio -----	-
cm	centímetro -----	-
$\text{cmol}_c\text{dm}^{-3}$	centimol de carga por decímetro cúbico -----	-

CRP	curva de resistência à penetração -----	-
Cu	cobre -----	-
DAS	dias após a semeadura -----	-
dm ³	decímetro cúbico -----	-
dm ³ ·dm ⁻³	decímetro cúbico por decímetro cúbico -----	-
Dp	densidade de partículas -----	(kg·dm ⁻³)
Ds	densidade do solo -----	(kg·dm ⁻³)
Dsb	densidade do solo benéfica -----	(kg·dm ⁻³)
Dsc	densidade do solo crítica -----	(kg·dm ⁻³)
DscIHO	densidade do solo crítica pelo intervalo hídrico ótimo -	(kg·dm ⁻³)
Dsmáx	densidade do solo máxima pelo ensaio de proctor normal -----	(kg·dm ⁻³)
g·kg ⁻¹	grama por quilo -----	-
h	hora -----	-
ha	hectare -----	-
H + Al	hidrogênio mais alumínio -----	-
IAP	integração agricultura-pecuária -----	-
IHO	intervalo hídrico ótimo -----	-
kg·ha ⁻¹	quilograma por hectare -----	-
kPa	quilopascal -----	-
Ki	relação molecular -----	(SiO ₃ /Al ₂ O ₃)
Kr	relação molecular -----	SiO ₃ : (Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃)
K	potássio -----	-
Kg	quilograma -----	-
K ₂ O	óxido de potássio -----	-
kg dm ⁻³	quilograma por decímetro cúbico -----	-
kg ha ⁻¹	quilograma por hectare -----	-
L ha ⁻¹	litro por hectare -----	-
LI	limite inferior do intervalo hídrico ótimo -----	-
LS	limite superior do intervalo hídrico ótimo -----	-

Mg	megagrama -----	-
Mg ²⁺	magnésio -----	-
<i>m</i>	saturação por alumínio -----	-
m	metro linear -----	-
m ³	metro cúbico -----	-
mm	milímetro -----	-
mm min ⁻¹	milímetro por minuto -----	-
mg·dm ⁻³	miligrama por decímetro cúbico -----	-
M.O.	matéria orgânica -----	-
MPa	megapascal -----	-
Mn	manganês -----	-
Mo	molibdênio -----	-
N	nitrogênio -----	-
P(Mel)	fósforo Melich -----	(mg·dm ⁻³)
P ₂ O ₅	pentóxido de fósforo -----	-
pH	potencial de hidrogênio -----	-
PRNT	poder de reação e neutralização total -----	-
PT	prosidade total do solo -----	-
R ²	coeficiente de determinação -----	-
RP	resistência do solo à penetração -----	-
SPD	sistema Plantio Direto -----	-
S	enxofre -----	-
T.N.T.	tecido não tecido -----	-
T ₀	tratamento com ausência de tráfego -----	-
T ₂	tratamento com 2 passadas de trator no mesmo lugar --	-
T ₁₀	tratamento com 7 passadas de trator no mesmo lugar --	-
T ₃₀	tratamento com 15 passadas de trator no mesmo lugar -	-
V	saturação por bases do solo -----	-
Zn	zinco -----	(mg dm ⁻³)

RESUMO

SILVA, JOSÉ FAUSTO GUIMARÃES, Instituto Federal Goiano – Campus Rio Verde – GO, março de 2017. **Integração agricultura-pecuária na resiliência e qualidade física de um Latossolo Vermelho Distroférico da região do cerrado brasileiro.** Orientador: Eduardo da Costa Severiano. Coorientador: Adriano Jakelaitis.

A degradação de pastagens no Brasil representa um problema tanto de ordem agronômica quanto ambiental, por comprometer a capacidade produtiva da terra e ainda o ciclo hidrológico. No enfrentamento desse entrave, a integração agricultura-pecuária destaca-se como prática promissora na recuperação de solos fisicamente degradados, através da agregação do solo e rompimento de camadas compactadas pelo crescimento radicular de gramíneas. Esta tese de doutorado se propõe avaliar sistemas de integração agricultura-pecuária na resiliência e na qualidade física de um Latossolo Vermelho Distroférico da região do Cerrado brasileiro visando a produtividade agrícola. Para tanto, foram realizados dois estudos que constituem seus capítulos. No primeiro capítulo, com objetivo de avaliar a sensibilidade de dois indicadores da qualidade física, na mitigação da compactação em um Latossolo cultivado com diferentes plantas do gênero *Brachiaria*, avaliaram-se os seguintes capins: *Brachiaria brizantha* (Xaraés, Piatã, Marandu); *Brachiaria decumbens* e *Brachiaria ruziziensis*. Para comparação, adotou-se como testemunha: pousio e cultivo convencional com preparo do solo. As amostras de solo coletadas após o cultivo dos capins foram utilizadas na avaliação da agregação via peneiramento úmido e do intervalo hídrico ótimo. A estabilidade de agregados não se mostrou sensível às alterações estruturais do solo, mantendo-se elevada nos sistemas conservacionistas avaliados e diferenciando-se apenas da

testemunha com revolvimento do solo. Por outro lado, o intervalo hídrico ótimo variou em todos os sistemas e camadas avaliadas, conferindo habilidade do Gênero *Brachiaria* na recuperação física do solo. O capim-Xaraés, seguido do Piatã e Marandu destacam-se na descompactação biológica do solo e de forma semelhante à recuperação via preparo do solo, e a *B. decumbens* apresenta desempenho intermediário, enquanto a *B. ruziziensis* teve comportamento similar ao pousio, indicando potencial limitado de recuperação física do solo. No segundo capítulo, cujo objetivo foi avaliar a acuracidade do intervalo hídrico ótimo, na qualidade física do solo e no rendimento de aquênios de girassol em condições de segunda safra e de forragem de capim-Paiaguás na época da terceira e quarta safra, em monocultivos e consorciados em diferentes níveis de compactação do solo, foram implantadas 16 parcelas experimentais, dispostas em 4 blocos com seguintes tratamentos de intensidade de tráfego: 0, 2, 10 e 30 passadas de um trator no mesmo lugar, perfazendo toda a superfície do solo. Nas subparcelas, foram implantadas a cultura do girassol e do capim-Paiaguás em monocultivo e consorciados. Determinaram-se, como indicador da qualidade física do solo, a sua densidade e intervalo hídrico ótimo (IHO), além do rendimento das culturas. Os resultados indicaram que a qualidade física do solo em sistemas de integração agricultura-pecuária submetidos ao tráfego agrícola pode ser adequadamente descrita por meio do intervalo hídrico ótimo. Os indicadores de qualidade física densidade do solo e intervalo hídrico ótimo, apresentaram robustez na avaliação da produtividade vegetal de girassol e capim-Paiaguás em função da compactação do solo. O girassol cultivado em período de segunda safra se mostrou extremamente sensível à compactação do solo, com redução de produtividade superior a 50% quando cultivado em monocultivo e a 80% quando consorciado com o capim-Paiaguás. O capim-Paiaguás se mostrou resistente à compactação do solo, com desempenho satisfatório na produção de forragem para pastejo e palhada para o plantio direto.

PALAVRAS-CHAVE: Descompactação biológica, qualidade estrutural do solo, estabilidade de agregados, intervalo hídrico ótimo, *Brachiaria sp.*, *Helianthus annuus L.*

ABSTRAC

SILVA JOSÉ FAUSTO GUIMARÃES, Federal Goiano Institute - Rio Verde Campus - GO, March 2017. Agricultural-livestock integration in the resilience and physical quality of a Distroferric Red Latosol of the Brazilian Cerrado region. Advisor: Eduardo da Costa Severiano, co-advisor: Adriano Jakelaitis.

Pastures degradation in Brazil represents an agronomic and environmental problem by damage the land productive capacity and the hydrological cycle. Considering this obstacle, the agriculture-livestock integration stands out as a promising practice in the recovery of physically degraded soils, through soil aggregation and breaking of compacted layers by grass root growth. This thesis proposes to evaluate systems of agriculture-livestock integration in the resilience and physical quality of a Distroferric Red Latosol of the Brazilian Cerrado region aiming the agricultural productivity. For that, two studies were carried out that constitute its chapters. In the first chapter, to assess the sensitivity of two physical quality indicators, in the compaction mitigation of a Latosol cultivated with different plants of the genus *Brachiaria*, the following grasses were evaluated: *Brachiaria brizantha* (Xaraés, Piatã and Marandu); *Brachiaria decumbens* and *Brachiaria ruziziensis*. For comparison, it was adopted as a control: fallow and conventional cultivation with soil preparation. Soil samples collected after the grass cultivation were used in the aggregation evaluation by wet screening and optimal water range. The aggregate stability was not sensitive to soil structural changes, remaining high in the conservation systems evaluated and differing only from soil-tilted control. On the other hand, the optimum water range

varied in all systems and strata evaluated, conferring ability to the *Brachiaria* genus on the physical recovery of the soil. The Xaraés grass, followed by Piatã and Marandu stand out in the soil biological decompression and in a similar way to the recovery through soil preparation, and *B. decumbens* presents intermediate performance, whereas *B. ruziziensis* had similar behavior to the fallow, indicating soil physical recovery potential. In the second chapter, the objective of this study was to evaluate the optimal water range accuracy in soil physical quality and the yield of sunflower achenes in second crop conditions and Paiaguás grass forage in the third and fourth harvest season, in monocultures and intercropping at different levels of soil compaction. A total of 16 experimental plots were arranged in 4 blocks with the following traffic intensity treatments: 0, 2, 10 and 30 passed from a tractor in the same place, covering the entire surface of the soil. In the subplots, the sunflower and paiaguás grass were planted in monoculture and consortium. As an indicator of the soil physical quality, its density and optimal water range (IHO), as well as crop yield, were determined. The results indicated that the soil physical quality in agriculture-livestock integration systems submitted to agricultural traffic can be adequately described by means of the optimal water range. The physical quality indicators soil density and optimal water range showed robustness in the sunflower and paiaguás grass productivity evaluation as a function of soil compaction. Sunflower cultivated in the second harvest period was extremely sensitive to soil compaction, with a productivity reduction of over 50% when grown in monoculture and 80% when intercropped with paiaguás grass. The paiaguás grass proved to be resistant to soil compaction, with satisfactory performance in forage production for grazing and straw for no-till.

KEY WORDS: Biological decomposition, soil structural quality, aggregate stability, optimal water range, *Brachiaria sp.*, *Helianthus annuus L.*

INTRODUÇÃO GERAL

O solo é a base dos diferentes sistemas de produção, devendo ser manejado corretamente para adequado enraizamento das plantas cultivadas. A expressão “Qualidade do Solo” define o seu caráter funcional dentro do ecossistema, de forma a sustentar e manter a produtividade biológica e os processos ambientais, garantindo assim a saúde animal e vegetal ali vinculadas (Soil Science Society of America, SSSA, 2016). Embora o termo “qualidade física do solo” traga uma conotação subjetiva, sua determinação envolve a utilização de indicadores de natureza estritamente quantitativa (Araújo et al., 2007; Carneiro et al., 2009; Severiano et al., 2011a,b).

Esta é afetada pelo arranjo das partículas e do espaço poroso no solo, que por sua vez influencia o armazenamento e a movimentação da água e do ar e, ainda, sua resistência mecânica. Contudo, pode ser alterado pela compactação, em função das forças externas aplicadas durante o uso e manejo agropecuário (Ferreira, 2010). Segundo Cunha et al. (2009), a intensa movimentação e a pulverização do solo aumentam a compactação já nas primeiras atividades mecanizadas, especialmente na superfície.

Diversos atributos indicadores de qualidade física do solo têm sido propostos na avaliação estrutural do solo, a exemplo das relações entre massa e volume dos constituintes, bem como medidas do estado de agregação do solo. Ainda assim, as relações entre as alterações estruturais do solo e a produtividade das culturas são complexas (van Lier e Gubiani, 2015), tornando necessária esta compreensão e considerando ainda o seu papel ecológico associado ao ciclo das águas (Severiano et al., 2011).

Visando maior compreensão entre a qualidade física do solo e o rendimento agrônômico das plantas cultivadas, Silva et al. (1994) propuseram o intervalo hídrico ótimo (IHO). Os autores explicam que a faixa ótima de conteúdo de água para a planta está

restrita entre o limite crítico superior, correspondente à capacidade de campo (θ_{CC}) e/ou à porosidade de aeração (θ_{PA}) (relacionado à saturação de água e redução aeróbica no solo), e o limite crítico inferior, pelo ponto de murcha permanente (θ_{PMP}) e/ou resistência mecânica ao enraizamento (θ_{RP}) (relacionados à secagem do solo e incrementos da compactação).

Em contrapartida, a grande maioria dos estudos em estrutura do solo desde então foram pouco associados com o comportamento das plantas, limitando-se a medir o efeito do manejo do solo sobre a sua qualidade física. Além disso, Gubiani et al. (2013) alertaram sobre a eficiência do IHO na predição do crescimento das plantas e, sobretudo, da produção de grãos, necessitando de maiores quantificações.

Este fato pode estar associado a características peculiares das culturas em relação à tolerância à compactação do solo. Santos et al. (2011), por exemplo, não verificaram diferença na produção de palhada de *Brachiaria brizantha* entre as densidades de 1,0 a 1,6 $Mg\ m^{-3}$, resultado que corroboraram com os encontrados por Bonelli et al. (2011) e Souza Neto et al. (2013) e que permitem indicar que algumas forrageiras são mais tolerantes ao aumento da compactação do solo.

Por outro lado, culturas anuais são menos tolerantes à presença de camadas de impedimento mecânico no solo. Bayhan et al. (2002) verificaram que a elevação do impedimento mecânico medido pela resistência do solo ao penetrômetro, de 1,5 para 2,0 MPa foi suficiente para reduzir a altura das plantas, o diâmetro dos colmos e do capítulo, mas, principalmente, a produtividade de aquênios do girassol. Esses resultados estão coerentes aos de Botta et al. (2006), que constataram correlação negativa entre o rendimento da parte aérea do girassol e o desenvolvimento das raízes em solos com diferentes graus de compactação.

Para a cultura do milho, Freddi et al. (2009) afirmam que o aumento da resistência do solo à penetração em um Latossolo Vermelho distrófico típico também aumenta a produção de massa seca das raízes, diâmetro e densidade do comprimento radicular, com correlação negativa com a produtividade. Por sua vez, o engrossamento da raiz implica também maior força exercida no processo de alongamento das células meristemáticas para penetração em determinada camada de solo, podendo, inclusive, cessar o crescimento radicular em caso de compactação excessiva.

Gonçalves et al. (2006) acrescentam que superficialização radicular promovida pela presença de camadas compactadas no solo torna as plantas mais suscetíveis aos déficits hídricos. Em cultivos de safrinha, a compactação do solo assume, portanto, relevância ainda maior, uma vez que a intensificação do déficit hídrico afeta o crescimento e o desenvolvimento da planta, podendo ser irreversível em função do tempo de exposição às condições limitantes (Silva et al., 2013).

Desta forma, percebe-se que o impacto dos atributos físicos do solo sobre o rendimento das culturas está fortemente associado a fatores climáticos e edáficos (ex: fertilidade do solo e localização/dispersão do impedimento mecânico no solo), cujos efeitos podem contornar a ação deletéria da estrutura do solo compactado sobre o crescimento vegetal (Beutler et al., 2004; Santos et al., 2005; Gubiani et al., 2013; Cecagno et al., 2016). Isto implica dizer as associações entre a resposta vegetal e restrições físicas do solo, medidas pelos diferentes indicadores de qualidade, demandam uma visão mais ampla dos sistemas agrícolas, em diferentes usos, manejos e condições edafoclimáticas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

BAYHAN, Y.; KAYISOGLU, B.; GONULOL, E. Effect of soil compaction on sunflower growth. **Soil & Tillage Research**, v.68, n.1, p.31–38, 2002.

BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F. Soil compaction and fertilization in soybean productivity. **Scientia Agrícola**, v.61, n.6, p.626-631, 2004.

BONELLI, E.A.; SILVA, E.M.B.; CABRAL, C.E.A.; CAMPOS, J.J.; SCARAMUZZA, W.L.M.P.; POLIZEL, A.C. Compactação do solo: Efeitos nas características produtivas e morfológicas dos capins Piatã e Mombaça. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.15, n.3, p.264–269, 2011.

BOTTA G.F.; JORAJURIA, D.;BALBUENA, R.;RESSIA,M.; FERRERO, C.; ROSATTO, H.; TOURN, M. Deep tillage and traffic effects on subsoil compaction and sunflower (*Helianthus annuus L.*) yields. **Soil & Tillage Research**, v.91, n.1-2, P.164–172, 2006.

CARNEIRO, M.A.C.; SOUZA, E.D., REIS, E.F., PEREIRA, H.S.; AZEVEDO, W.R. Atributos físicos, químicos e biológicos de solo de cerrado sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.33, n.1, p.147-157, 2009.

CECAGNO, D.; COSTA, S.E.V.G.A; ANGHINONI, I; KUNRATH,T.R; MARTINS, A. P; REICHERT,J.M.; GUBIANI,P.I.; BALERINI, F.; FINK, J.R.; CARVALHO,P.C.F. Least

limiting water range and soybean yield in a long-term, no-till, integrated crop-livestock system under different grazing intensities. **Soil and Tillage Research**, v.156, p.54–62, 2016.

CUNHA, J.P.A.R.; CASCAÃO, V.N.; REIS, E.F. Compactação causada pelo tráfego de trator em diferentes manejos de solo. **Acta Scientiarum Agronomy**. Maringá, v.31, n.3, p. 371-375, 2009.

FERREIRA. M.M. **Caracterização física do solo**. In: Lier, Q.J.V. (Org.). Física do Solo. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa. 1ªed.p. 241-282. 2010.

FREDDI, O. S.; CENTURION, J. F.; DUARTE, A. P.; LEONEL, C. L. Compactação do solo e produção de cultivares de milho em Latossolo Vermelho. I – Características de planta, solo e índice S. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.33, n.4 p.793-803, 2009a.

GONÇALVES, W.G.; JIMENEZ, R.L.; ARAÚJO FILHO, J.V.; ASSIS, R.L.; SILVA, G.P.; PIRES, F.R. Sistema radicular de plantas de cobertura sob compactação do solo. **Engenharia Agrícola**, v.26, n.1, p.67-75, 2006.

GUBIANI P.I.; GOULART R.Z.; REICHERT J.M.; REINERT D.J.; Crescimento e produção de milho associados com o intervalo hídrico ótimo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v.37, n.6, p.1502-1511, 2013.

SANTOS, G. A.; DIAS JUNIOR, M. S.; GUIMARÃES, P. T. G.; FURTINI NETO, A. E. Diferentes graus de compactação e fornecimento de fósforo influenciando no crescimento de plantas de milho (*Zea mays* l.) cultivadas em solos distintos. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v.29, n.4, p.740-752, 2005.

SANTOS, G.G.; MARCHÃO, R.L.; MEDRADO, E.; SILVEIRA, P.M.; BECQUER, T. Qualidade física do solo sob sistemas de integração lavoura-pecuária. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. Brasília, v.46, n.10, p. 1339-1348, 2011.

SEVERIANO, E.C.; OLIVEIRA, G.C.; DIAS JÚNIOR, M.S.; COSTA, K. A.P.; BENITES, V.M.; FERREIRA FILHO, S.M. Structural changes in Latosols of the cerrado region: II - soil compressive behavior and modeling of additional compaction. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.35, n.3, p.783-791, 2011b.

SEVERIANO, E.C.; OLIVEIRA, G.C.; DIAS JÚNIOR, M.S.; COSTA, K.A.P.; SILVA, F.G.; FERREIRA FILHO, S.M. Structural Changes in Latosols of the Cerrado Region: I – Relationships Between Soil Physical Properties and Least Limiting Water Range. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.35, n.3, p.773-782, 2011a.

SILVA, A. P.; KAY, B. D.; PERFECT, E. Characterization of the least limiting water range. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v.58, n.6, p.1775-1781, 1994.

SILVA, A.R.A.; BEZERRA, F.M.L.; LACERDA, C.F.; PEREIRA FILHO, J.V.; FREITAS, C.A.SILVA. Trocas gasosas em plantas de girassol submetidas à deficiência hídrica em diferentes estádios fenológicos. **Revista Ciência Agronômica**, v.44, n.1, p.86-93, 2013.

SOIL SCIENCE SOCIETY OF AMERICA. Glossary of soil science terms. Disponível em: <<https://www.soils.org/publications/soils-glossary#>>. Acesso em: 28/10/2016.

SOUSA NETO, E.L.; PIERANGELI, M.A.P.; LAL, R. Compaction of an Oxisol and Chemical Composition of Palisadegrass. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.37, n.4, p.928-935, 2013.

VAN LIER, Q.J.; GUBIANI, P.I. Beyond the “least limiting water range”: rethinking soil physics research in brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.39, n.4, p.925-939, 2015.

OBJETIVOS

Avaliar o uso de indicadores de qualidade física na resiliência e na acuracidade de diagnóstico da compactação do solo e no rendimento de aquênios de girassol e forragem de capim em um Latossolo Vermelho Distroférico típico da região do Cerrado sob sistemas de integração agricultura-pecuária.

CAPÍTULO I: Integração agricultura-pecuária na resiliência de um Latossolo Vermelho compactado: sensibilidade de indicadores da qualidade física do solo

RESUMO

A degradação de pastagens no Brasil, representa um problema tanto de ordem agronômica quanto ambiental, por comprometer a capacidade produtiva da terra e o ciclo hidrológico. No enfrentamento desse entrave, a integração agricultura-pecuária destaca-se como prática promissora na recuperação de solos fisicamente degradados, através da agregação do solo e rompimento de camadas compactadas pelo crescimento radicular de gramíneas. O objetivo deste trabalho foi avaliar a sensibilidade de dois indicadores da qualidade física, na mitigação da compactação em um Latossolo cultivado com plantas do gênero *Brachiaria*. Avaliaram-se os seguintes capins: *Brachiaria brizantha* (Xaraés, Piatã, Marandu); *Brachiaria decumbens* e *Brachiaria ruziziensis*. Para comparação, adotou-se como testemunha: pousio e cultivo convencional com preparo do solo. As amostras de solo coletadas após o cultivo dos capins foram utilizadas na avaliação da agregação via peneiramento úmido e do intervalo hídrico ótimo. A estabilidade de agregados não se mostrou sensível às alterações estruturais do solo, mantendo-se elevada nos sistemas conservacionistas avaliados e diferenciando-se apenas da testemunha com revolvimento do solo. Por outro lado, o intervalo hídrico ótimo variou em todos os sistemas e camadas avaliadas, conferindo habilidade do Gênero *Brachiaria* na recuperação física do solo. O capim-Xaraés, seguido do Piatã e Marandu destacam-se na descompactação biológica do solo e de forma semelhante à recuperação via preparo do solo, e a *B. decumbens* apresenta desempenho intermediário, enquanto a *B. ruziziensis* teve comportamento similar ao pousio, indicando potencial limitado de recuperação física do solo.

Termos de indexação: descompactação biológica, qualidade estrutural do solo, estabilidade de agregados, intervalo hídrico ótimo, *Brachiaria* sp.

CHAPTER I: Agriculture-livestock integration in the resilience of a compacted Red Latosol: sensitivity of soil physical quality indicators

Pastures degradation in Brazil represents an agronomic and environmental problem by damage the land productive capacity and the hydrological cycle. Considering this obstacle, the agriculture-livestock integration stands out as a promising practice in the recovery of physically degraded soils, through soil aggregation and breaking of compacted layers by grass root growth. The objective of this work was to evaluate the sensitivity of two physical quality indicators in the mitigation of compaction in an Latosol cultivated with plants of the *Brachiaria* genus. The following grasses were evaluated: *Brachiaria brizantha* (Xaraés, Piatã and Marandu); *Brachiaria decumbens* and *Brachiaria ruziziensis*. For comparison, it was adopted as a control: fallow and conventional cultivation with soil preparation. Soil samples collected after the grass cultivation were used in the aggregation evaluation by wet screening and optimal water range. The aggregate stability was not sensitive to soil structural changes, remaining high in the conservation systems evaluated and differing only from soil-tilted control. On the other hand, the optimum water range varied in all systems and strata evaluated, conferring ability to the *Brachiaria* genus on the physical recovery of the soil. The Xaraés grass, followed by Piatã and Marandu stand out in the soil biological decompression and in a similar way to the recovery through soil preparation, and *B. decumbens* presents intermediate performance, whereas *B. ruziziensis* had similar behavior to the fallow, indicating soil physical recovery potential.

Index terms: biological decompression, soil structural quality, aggregate stability, optimal water range, *Brachiaria* sp.

INTRODUÇÃO

O Brasil se destaca na produção e exportação de carne bovina, sendo a produção animal realizada predominantemente a pasto. Entre as regiões produtoras, àquelas pertencentes ao bioma Cerrado têm aproximadamente 49,5 milhões de hectares de pastagens, respondendo por cerca de 30% da área cultivada (Sano et al., 2010) e 50% da carne produzida no país. Metade das pastagens, porém, encontra-se em estágio de declínio de produtividade, sobretudo por envelhecimento ou superpastejo (Ferreira et al., 2013).

Por outro lado, o Brasil vem estabelecendo um sistema de agricultura que contribui com a garantia da segurança alimentar mundial (Tollefson, 2010). Isto por que, para que o solo cumpra o seu papel de componente essencial no meio ambiente e ainda produza alimentos, é preciso que sua estrutura seja preservada, sobretudo por meio de práticas que mantenham as suas funções edáficas, com merecido destaque ao manejo da compactação do solo (Severiano et al., 2011).

Este é um grave problema ambiental, cujo impacto sobre a estrutura do solo promove a degradação do meio ambiente local, com acréscimo da emissão de gases de efeito estufa, além do aumento da erosão e transporte de sedimentos, com consequente assoreamento de cursos d'água (Horn et al., 1995; Nawaz et al., 2013).

A adoção de sistemas agrícolas conservacionistas favorece sobremaneira a qualidade do solo e do ambiente em que estão inseridos (Vezzani & Mielniczuk, 2009). Nesse contexto, o sistema de integração agricultura-pecuária destaca-se como uma ferramenta de recuperação da estrutura de solos (Souza et al., 2010; Chioderoli et al., 2012), sendo utilizados com sucesso na América do Sul (García-Préchac et al., 2004).

Entre as gramíneas utilizadas nestes sistemas, a *Brachiaria* (Trin.) Griseb. spp. (syn. *Urochloa* P. Beauv. spp.) representa o mais importante grupo de forrageiras (Santos et al., 2011). Atualmente, o programa de melhoramento genético deste Gênero vegetal promovido pela Embrapa (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária) vem desenvolvendo cultivares aptos às condições edafoclimáticas dos ambientes de produção regionais (Maia et al., 2014).

Em adição, estas espécies podem promover a descompactação biológica do solo (Silva et al., 2014; Flávio Neto et al., 2015), minimizando o efeito compressivo do tráfego

de maquinário e de animais sobre solos pouco revolvidos, notadamente manejados sob plantio direto, aliando ainda, ciclagem de nutrientes (Pacheco et al., 2011) e produção de palhada (Nunes et al., 2006), que tem viabilizado a sua adoção nos sistemas de produção integrados em condições tropicais do Cerrado Brasileiro. Por esses motivos, as pastagens de *Brachiaria* merecem destaque, notadamente as espécies *B. brizantha*, *B. decumbens*, *B. ruziziensis*.

Por sua vez, o cultivo de gramíneas apresenta efeitos positivos sobre a estrutura do solo, especialmente quando cultivadas na entressafra das culturas de verão, antecipando-se ao plantio direto (Campos et al., 1999; Pérès et al., 2013; Silva et al. 2014). Estes decorrem da contínua renovação radicular e aporte de resíduos vegetais no solo (Oades, 1984; Silva & Mielniczuk, 1998). Entretanto, no cerrado brasileiro, este período é caracterizado como de inverno seco, podendo limitar a o desenvolvimento de capins menos tolerantes ao déficit hídrico.

Em termos de qualidade do solo, destaca-se a sua predisposição em cumprir um papel funcional no ecossistema através da preservação da qualidade ambiental, dando suporte à produtividade biológica e favorecendo a sanidade vegetal e animal (Soil Science Glossary Terms Committee, 2008). Nesse contexto, os atributos físicos do solo podem influenciar sua qualidade potencial, uma vez que são impactados pelo manejo a que o solo é sujeito. Assim, os indicadores de qualidade física do solo são ferramentas capazes de assinalar as alterações estruturais sofridas pelo solo que levam à sua degradação (Leão et al., 2006).

Entre os indicadores da condição estrutural do solo, as medidas de agregação destacam-se como indicador de qualidade física (Kong et al., 2005; Rawlins et al., 2013; Moncada et al., 2013). A agregação do solo, a princípio, está intimamente ligada ao potencial do solo em resistir à degradação, sendo indicativo de alterações no manejo do solo (Zotarelli et al., 2005).

A avaliação da estabilidade de agregados, apesar de amplamente empregada (Rawlins et al., 2013), deve ser associada ao uso de outros indicadores (Moncada et al., 2013). Nesse sentido, o intervalo hídrico ótimo (IHO) enquadra-se como alternativa complementar da condição estrutural do solo (Olibone et al, 2010; Lima et al., 2012).

O IHO é um indicador que representa uma faixa de conteúdo de água do solo em que são mínimas as restrições físicas ao crescimento de plantas, relacionadas à disponibilidade hídrica, suprimento de ar e resistência mecânica oferecida ao crescimento radicular, sendo um índice multifatorial que decresce com a compactação do solo, até a densidade do solo crítica, em que seu valor é nulo (Silva et al., 2006a).

Dada a relevância da produção agropecuária sustentável no Brasil, o presente trabalho objetivou avaliar a recuperação física de um Latossolo Vermelho Distroférico típico, submetido a sistemas de integração agricultura-pecuária com o cultivo de espécies do gênero *Brachiaria*, através da aplicação dos indicadores de qualidade estrutural e dos fatores que limitam o IHO e a agregação do solo.

MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi realizado no Campo Experimental do Instituto Federal Goiano, Campus Rio Verde, Estado de Goiás – Brasil (17°48'34" S e 50°54'05" O) em uma área de 2016 m², recoberta por um Latossolo Vermelho Distroférico típico (Santos et al., 2013) argiloso (Tabela 1) por ter sido cultivada com *Brachiaria decumbens* por 10 anos, em sistema extensivo de pastejo. O clima é classificado de acordo com Köppen, como Tropical Úmido (Aw), do subtipo Tropical de Savana, com inverno seco e verão chuvoso.

No processo de recuperação da pastagem, instalou-se o experimento de safra 2010/2011, com trinta e duas parcelas com dimensões de 5,4 x 6 m (32,4 m²), dispostas ao acaso em quatro blocos e cultivadas com cultivo do milho (*Zea mays*) em espaçamento entre linhas de 0,88 m.

Tabela 1. Caracterização física e química do Latossolo Vermelho Distroférico típico do município de Rio Verde, Goiás.

Dp ⁽¹⁾	Ds ⁽²⁾	Granulometria ⁽³⁾						Ataque sulfúrico ⁽⁴⁾					
		AMG	AG	AM	AF	AMF	Silte	Argila	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Ki	Kr
(kg dm ⁻³)		----- (g kg ⁻¹) -----						-----					
2,8	1,2	1	15	154	141	53	195	441	4,1	20,4	20,4	0,34	0,21

⁽¹⁾Densidade de partículas na camada de 0-0,2 m; ⁽²⁾Densidade do solo na camada de 0-0,2 m; ⁽³⁾Determinada pelo método da pipeta na camada de 0-0,2 m; ⁽⁴⁾Determinado no horizonte Bw (1,00-1,20 m). AMG: areia muito grossa; AG: areia grossa; AM: areia média; AF: areia fina; AMF: areia muito fina; Ki: relação molecular (SiO₂/Al₂O₃); Kr: relação molecular SiO₂: (Al₂O₃ + Fe₂O₃).

Trinta dias após a emergência do milho, realizou-se a sobressemeadura dos capins do gênero *Brachiaria* para implantação do sistema de integração agricultura-pecuária, consistindo nos seguintes tratamentos, utilizando 9 kg ha⁻¹ de sementes puras e viáveis: (1) *Brachiaria brizantha* cv. Xaraés (*BbX*); (2) *Brachiaria brizantha* cv. Piatã (*BbP*); (3) *Brachiaria brizantha* cv. Marandu (*BbM*); (4) *Brachiaria decumbens* cv. Basilisk (*Bdec*) e (6) *Brachiaria ruziziensis* (*Br*).

Para efeito comparativo, adotaram-se como tratamentos testemunha: (6) Ausência de cultivo de *Brachiaria*, deixando o solo em pousio e com presença de plantas infestantes (Pousio), compreendida predominantemente em termos de densidade e diversidade, por um dossel de plantas invasoras dicotiledôneas, conforme descrito por Flávio Neto et al. (2015) e; (7) Cultivo convencional, pela recuperação mecânica via aração e destorroamento do solo por enxada rotativa (CC), realizado por ocasião da implantação do calendário agrícola subsequente, equivalente ao final da condução das pastagens de entressafra nos tratamentos integrados. Esta operação foi realizada quando o conteúdo de água do solo se encontrava próximo à capacidade de campo.

O milho para a produção de silagem foi colhido mecanicamente aos 90 dias após semeadura, em fevereiro de 2011, apresentando teor de matéria seca variando de 30 a 35%. Na sequência, o desenvolvimento dos capins foi monitorado através do incremento da produção de massa seca, variando em função da sazonalidade climática. Quando em simulação de pastejo, sofreram cortes a 20 cm de altura, sendo os resíduos retirados da área. Foram realizados cortes, em março, maio, julho, setembro, outubro e novembro de 2011, cujo desempenho das plantas forrageiras foi descrito em Maia et al. (2014).

Para avaliação da recuperação estrutural do solo promovida pelo cultivo dos capins estudados, procedeu-se, após o último corte das forrageiras, uma amostragem de solo indeformada e aleatória em cada parcela. Esta amostragem foi feita nas camadas de 0-10, 10-20 e 20-30 cm de profundidade, utilizando anéis metálicos de 6,4 cm diâmetro e 5,0 cm de altura. Após a retirada das amostras, elas foram envolvidas em filme de PVC.

Na mesma ocasião, tendo em vista a avaliação dos agregados do solo, foram coletados monólitos através da abertura de pequenas trincheiras nas parcelas experimentais, obedecendo às mesmas camadas descritas anteriormente. Os monólitos foram retirados com

o auxílio de espátulas e acondicionados em recipientes plásticos para manutenção da integridade até o momento da sua avaliação em laboratório.

No laboratório, esses monólitos foram inicialmente destorroados manualmente, através do rompimento dos blocos de solo em seus pontos de maior fraqueza, obtendo agregados com diâmetro de 4,76 - 8,00 mm mediante peneiramento do material indeformado. A estabilidade de agregados em água foi determinada conforme o princípio de umedecimento lento por capilaridade, descrito por Kemper & Rosenau (1986). Para tanto, as amostras foram colocadas no aparelho de oscilação vertical, sobre um conjunto de peneiras de 2,00; 1,00; 0,50; 0,25 e 0,106 mm de abertura, conforme descrito por Yoder (1936). Na sequência, transferiu-se o conteúdo retido em cada peneira para uma lata de alumínio, que foi levada à estufa por 24 horas a 110 °C para a secagem. O diâmetro médio geométrico (DMG) foi determinado segundo Kemper & Chepil (1965).

As amostras indeformadas foram destinadas à determinação do Intervalo Hídrico Ótimo (IHO). Para tanto, após a saturação inicial, foram submetidas ao Potencial Matricial de -6 kPa para a determinação da microporosidade e da capacidade de campo (Embrapa, 2011; Severiano et al., 2011). Posteriormente foram ajustadas a conteúdos de água no solo variando de 0,04 a 0,53 dm³ dm⁻³, para então serem submetidas ao teste de penetrometria, conforme Leão et al. (2006).

Em seguida, as amostras foram secas em estufa, a 105°C por 48 horas, para a determinação da densidade do solo (Ds) e da porosidade total (PT) (Embrapa, 2011).

A curva de resistência do solo à penetração (CRP) foi obtida ajustando-se os valores de resistência à penetração (RP) em função do conteúdo volumétrico de água (θ) e da Ds, por meio do modelo não linear proposto por Busscher (1990). Os parâmetros empíricos de ajuste foram obtidos por minimização da soma dos quadrados da diferença entre os valores determinados e estimados pelos modelos, utilizando algoritmos de planilhas eletrônicas, conforme Leão & Silva (2004). A CRP obtida é expressa pela equação 1:

$$RP = 0,34\theta^{-0,78}Ds^{5,65}; R^2 = 0,82^{**} \quad \text{Eq. (1)}$$

Foram ainda determinados os teores de carbono orgânico total do solo (CO), a partir do material excedente resultante do preparo dos monólitos, de acordo com Embrapa (2011). Os resultados das análises de agregação do solo e CO foram submetidos à análise de variância, segundo delineamento em blocos ao acaso e as comparações das médias, ao teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade.

O Intervalo Hídrico Ótimo (IHO) foi determinado de acordo com os procedimentos descritos em Silva et al. (1994), considerando como limites superiores, o conteúdo de água no solo retido no potencial matricial de -6 kPa como sendo a capacidade de campo (θ_{CC}) (Severiano et al., 2011) ou aquele em que a porosidade de aeração (θ_{PA}) é de 10%.

Como limites inferiores, foram considerados os conteúdos de água retidos no potencial matricial de -1500 kPa, o ponto de murcha permanente (θ_{PMP}), e/ou correspondente a resistência do solo à penetração de 2,5 MPa (θ_{RP}) (Severiano et al., 2011), valores estes utilizados na Eq. 1.

O IHO foi obtido ajustando os limites do conteúdo de água no solo em função da D_s , sendo o limite superior o menor valor entre θ_{CC} e θ_{PA} , e o limite inferior o maior valor entre θ_{PMP} e θ_{RP} .

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os teores de carbono orgânico total do solo (CO) variaram entre as espécies de *Brachiaria* e as camadas avaliadas (Tabela 2). Na superfície do solo (0-10 cm), os cultivares de *B. brizantha* (*Bb*) e a *B. decumbens* (*Bdec*) promoveram leves incrementos, coerentes com a biomassa adicionada ao solo pelos sistemas radiculares (Trujillo et al., 2006).

A espécie *B. ruziziensis* (*Br*) e o Pousio tiveram desempenho intermediário, enquanto o menor teor de CO encontrado foi aquele sob cultivo convencional (CC), dado revolvimento do solo feito pela enxada rotativa e o conseqüente rompimento dos agregados na camada superficial do solo. Neste último caso, há a eliminação da proteção física da matéria orgânica e exposição ao ataque de microrganismos aeróbicos (Tisdall & Oades, 1982), e pode provocar rápidas perdas de carbono do solo na forma de CO_2 , contribuindo, inclusive para o efeito estufa e aquecimento global do planeta (Oliveira et al. 2004).

Tabela 2. Carbono orgânico total do solo (CO) após o cultivo dos diferentes tipos de cobertura vegetal, nas diferentes camadas avaliadas em um Latossolo Vermelho Distroférico típico.

Tratamentos	CO (g dm ⁻³)		
	0-10 cm	10-20 cm	20-30 cm
<i>B. brizantha</i> cv. Xaraés	35,5a	26,7c	24,3a
<i>B. brizantha</i> cv. Piatã	34,5a	30,0b	26,3a
<i>Brachiaria brizantha</i> cv. Marandu	33,9a	28,1c	26,2a
<i>B. decumbens</i>	35,8a	27,8c	26,2a
<i>B. ruziziensis</i>	30,5b	26,4c	27,2a
Pousio	31,0b	26,7c	20,4b
Cultivo convencional	23,7c	33,6a	27,1a

Para cada camada, valores seguidos da mesma letra não diferem das demais, pelo teste de Scott-Knott ($P \leq 0,05$).

Por outro lado, na camada de 10-20 cm, destaca-se o maior CO no solo sob CC que, neste caso, deve-se, sobretudo à inversão de camadas decorrente do maquinário de preparo. Esta constatação se dá ao fato dos valores observados serem semelhantes àqueles superficiais em todos os tratamentos sem revolvimento de solo e, ainda, pela amostragem ter sido realizada imediatamente após a aração do solo. Ressalta-se ainda que o solo sob *BbP* se destacou sobre as demais espécies de *Brachiaria*, que tiveram as menores concentrações de CO, semelhantes ao encontrado sob pousio (Tabela 2).

Em profundidade, na camada de 20-30 cm, os maiores teores de CO foram encontrados no solo sob o cultivo de capins e sob CC. Os valores de CO encontrados nestes tratamentos se devem provavelmente pelo aporte e/ou manutenção de carbono promovido pelo sistema radicular dos capins e pela incorporação dos resíduos vegetais do milho, respectivamente. Neste sentido, os menores teores de CO do solo sob pousio sugerem que o sistema radicular das plantas infestantes não conseguiu incorporar carbono a camadas mais profundas (abaixo de 20 cm), muito provavelmente por causa da morfologia radicular pivotante da maioria das espécies encontradas neste tratamento, pertencente à classe das dicotiledôneas.

Embora tenha havido diferenças entre os valores de CO nos tratamentos avaliados, estas são numericamente pequenas. Isto porque o incremento de carbono no solo é lento e gradual, mesmo quando advindo do correto estabelecimento e manutenção de sistemas conservacionistas de manejo por longos períodos de tempo (Assis & Lanças, 2005),

notadamente em solos tropicais, cuja mineralização da matéria orgânica tende a superar o aporte (Tirloni et al., 2013).

Em contrapartida, as alterações estruturais podem ocorrer em curto espaço de tempo, tanto em termos de degradação, caso as pressões aplicadas pelo maquinário e por animais em pastejo superem a capacidade de suporte de carga do solo (Zink et al., 2010; Severiano et al., 2013;), quanto pela sua recuperação via descompactação mecânica ou biológica (Severiano et al., 2010; Flávio Neto et al., 2015). Tais constatações são fundamentais para interpretação dos resultados apresentados a seguir, dada importância do crescimento radicular e da matéria orgânica na agregação do solo (Brandão & Silva, 2012).

Nesse sentido, observa-se na tabela 3, que em todos os sistemas e camadas avaliados, à exceção do CC, que apresentou os menores valores, não houve diferença de diâmetro médio geométrico dos agregados (DMG). Solos que são revolvidos apresentam menores valores de DMG em comparação àqueles sob sistemas conservacionistas, pela diminuição da quantidade de macroagregados (> 2 mm), que são rompidos por ação dos implementos de cultivo sobre o solo.

De maneira geral, os valores de DMG mantiveram-se elevados, mesmo em profundidade, para os tratamentos sem revolvimento do solo (e.g. ausência de cultivo de *Brachiaria* e integração lavoura-pecuária), quando comparados aos valores obtidos por Tirloni et al. (2013) num Latossolo muito argiloso. Isto porque a estabilidade de agregados pode aumentar de maneira rápida com a inclusão de pastagens no processo de rotação de culturas, em função da ausência de revolvimento do solo, da constante renovação do vigoroso sistema radicular e da maior atividade da fauna do solo sob pastagens (Marchão et al., 2007). Resultados semelhantes foram obtidos por Silva & Mielniczuk (1998), que observaram papel positivo do cultivo de gramíneas sobre a estabilidade de agregados em um solo semelhante.

Por outro lado, Conte et al. (2011) observaram maior agregação do solo em áreas pastejadas em relação àquelas sem pastejo, apontando para a formação de torrões via compressão do solo pelo pisoteio animal. Nesse sentido, o maior valor numérico de DMG observado (4,6) obtido no solo sob *BbP* e *BbX* e iguais ao solo sob pousio, poderia então estar associado à compactação do solo, indicando assim a possibilidade de existência de um histórico de degradação decorrente do manejo anterior do solo. Este comportamento requer,

portanto, outras investigações em torno da acurácia da agregação na avaliação da qualidade estrutural do solo.

Tabela 3. Diâmetro médio geométrico (DMG) e classificação dos agregados quanto às diferentes classes de tamanho em um Latossolo Vermelho Distroférrico típico.

Tratamentos	DMG (mm)	Classes de tamanho (mm)					
		8-2	2-1	1-0.5	0.5- 0.25 %	0.25- 0.106	< 0.106
Camada de 0-10 cm							
<i>B. brizantha</i> cv. Xaraés	4,6 A	97,7 A	0,3 A	0,3 B	0,7 B	0,4 B	0,6 B
<i>B. brizantha</i> cv. Piatã	4,6 A	97,7 A	0,2 A	0,3 B	0,7 B	0,4 B	0,8 B
<i>Brachiaria brizantha</i> cv. Marandu	4,4 A	95,4 A	0,8 A	0,8 B	1,1 B	0,7 B	1,2 B
<i>B. decumbens</i>	4,5 A	96,5 A	0,7 A	0,5 B	0,9 B	0,5 B	0,9 B
<i>B. ruziziensis</i>	4,3 A	93,6 A	1,5 A	1,3 B	1,7 B	1,1 B	0,9 B
Pousio	4,3 A	95,1 A	0,8 A	0,8 B	1,2 B	0,9 B	1,2 B
Cultivo convencional	3,0 B	81,3 B	2,7 A	3,3 A	5,3 A	3,6 A	3,8 A
Camada de 10-20 cm							
<i>B. brizantha</i> cv. Xaraés	4,6 A	97,5 A	0,3 B	0,2 B	0,6 B	0,5 B	1,0 A
<i>B. brizantha</i> cv. Piatã	4,5 A	96,9 A	0,3 B	0,4 B	0,8 B	0,6 B	0,9 A
<i>Brachiaria brizantha</i> cv. Marandu	4,3 A	94,6 A	1,0 B	1,1 B	1,6 B	1,1 B	0,6 A
<i>B. decumbens</i>	4,6 A	97,3 A	0,3 B	0,3 B	0,7 B	0,5 B	1,0 A
<i>B. ruziziensis</i>	4,4 A	94,9 A	1,1 B	0,9 B	1,2 B	0,8 B	1,0 A
Pousio	4,6 A	96,8 A	0,4 B	0,6 B	1,0 B	0,6 B	0,7 A
Cultivo convencional	3,4 B	85,7 B	2,2 A	2,4 A	3,9 A	4,5 A	1,4 A
Camada de 20-30 cm							
<i>B. brizantha</i> cv. Xaraés	4,5 A	96,2 A	0,76B	0,60B	1,0 B	0,7 B	0,8 B
<i>B. brizantha</i> cv. Piatã	4,5 A	96,8 A	0,46B	0,43B	0,8 B	0,6 B	0,9 B
<i>Brachiaria brizantha</i> cv. Marandu	4,1 A	92,3 A	1,68B	1,60B	2,1 B	1,4 B	1,0 B
<i>B. decumbens</i>	4,3 A	94,1 A	1,25B	1,01B	1,5 B	0,9 B	1,3 B
<i>B. ruziziensis</i>	4,0 A	91,1 A	2,24A	1,52B	2,1 B	1,3 B	1,7 B
Pousio	4,4 A	94,8 A	1,25B	1,06B	1,3 B	0,7 B	0,9 B
Cultivo convencional	2,5 B	74,2 B	4,21A	4,60A	7,2 A	3,7 A	6,2 A

Para cada camada, valores seguidos da mesma letra não diferem das demais, pelo teste de Scott-Knott ($P \leq 0,05$).

Quanto à distribuição dos agregados em classes de tamanho, observa-se que mais de 95% mantiveram-se estáveis em água, retidos em todas as peneiras $\geq 0,25$ mm em todos os tratamentos e camadas (Tabela 3). Este valor de diâmetro (0,25 mm) é justamente o divisor entre macro e microagregados do solo (Oades & Waters, 1991) e, analisado isoladamente, indica que a quase totalidade dos agregados encontrados no solo experimental encontra-se em estágios avançados de agregação, denotando elevada qualidade física. Sistemas que promovam a formação de macroagregados estáveis são desejáveis, pois suportam maiores aplicações de forças externas sem sofrerem cisão, imprimindo ao solo maior resistência à compactação e a erosão (Severiano et al., 2008; Salton et al., 2008).

Segundo Daynes et al. (2013), o processo de agregação do solo está ligado a fenômenos dinâmicos e dependentes, dentre outros fatores, da atuação da biota sobre a matéria orgânica do solo, bem como da influência do sistema radicular das plantas em crescimento sobre as partículas unitárias. Nesse sentido, o aporte de resíduos vegetais observados em sistemas de integração agricultura-pecuária garante um balanço positivo na agregação do mesmo, enquanto o revolvimento do solo, observado, por exemplo, no CC, pode ser relacionado à menor estabilidade de agregados (Oliveira et al., 2004).

Por outro lado, observa-se pelos resultados apresentados que as diferenças nos teores de CO do solo (Tabela 2), mesmo que pequenas, não tiveram efeito suficiente na agregação do solo para diferenciar os tratamentos com ausência de movimentação do solo, acusando apenas diferenças entre CC e os demais sistemas de cultivo (Tabela 3). Sugere-se, portanto, que as medidas de agregação do solo, quantificada pelo peneiramento em água, não tenham sido sensíveis para diferenciar os efeitos de reestruturação do solo em contrapartida a formação de torrões de solo densos, advindos do crescimento radicular e estabilização de macroagregados ou provenientes de forças compressivas a que o solo foi sujeito, respectivamente.

Em adição, ressalta-se que a micromorfologia dos Latossolos oxídicos é caracterizada por agregados granulares muito pequenos e resistentes, de diâmetro entre 50 a 300 μm (Ferreira et al., 1999; Vollant-Tuduri et al., 2005; Carducci et al., 2011), dotados de elevada estabilidade estrutural e friabilidade (Vitorino et al., 2003). Neste contexto, observa-se que mais de 90% dos agregados do solo encontram-se na maior classe de tamanho (8-2 mm) para os tratamentos sem revolvimento do solo e em todas as camadas

avaliadas (Tabela 3) sendo, no mínimo, seis vezes maior que as unidades estruturais básicas destes solos, conforme descrito pelos autores citados. Ademais, ressalta-se que, pela metodologia empregada no presente estudo e com aceitação universal (Kemper & Rosenau, 1986), elimina-se os agregados entre 2,00 e 4,76 mm presentes nestes solos, e pode limitar a sua acuracidade do diagnóstico da qualidade física do solo.

Isto reforça o fato dos resultados deixarem dúvidas quanto à origem da agregação do solo, se foram formados por ação cimentante da matéria orgânica e/ou ação do sistema radicular dos capins em estudo, ou se advém de processos de compactação acumulados pelo histórico de tensão da área degradada, devendo, neste caso, ser denominados como torrões e não agregados de solo, conforme salientado por Severiano et al. (2008).

De forma similar, Silva et al. (2006b) observaram que o DMG aumentou com a compactação do solo, pela provável compressão mecânica evidenciada pela junção das partículas de solo, e levou os autores a considerar que o DMG não é um bom indicador dos efeitos da degradação física do solo. Esta insensibilidade do método de avaliação da estabilidade de agregados por peneiramento em água já foi apontada por Nichols & Toro (2011) e seus índices numéricos não expressam os impactos de fatores biológicos, mecânicos e ambientais sobre a estrutura do solo, devendo-se assim, estar associado a outros indicadores estruturais, para um diagnóstico mais acurado da sua qualidade (Moncada et al., 2013).

Nesse sentido, faz-se necessário avaliar a qualidade física do solo submetido aos sistemas de integração agricultura-pecuária com o cultivo de espécies do gênero *Brachiaria*, por meio de indicadores de maior sensibilidade. A proposta de uso do Intervalo Hídrico Ótimo (IHO), apresentada na Figura 1, integra diferentes atributos num único parâmetro, significando grande avanço nos estudos de biofísica do solo, conforme apontado por Tormena et al. (2007).

A avaliação deste atributo demonstrou a atuação dos capins sobre o processo de estruturação do solo. Dos limites que influenciam o IHO, o conteúdo de água em que a resistência do solo à penetração crítica de 2,5 MPa é atingida (θ_{RP}) foi o que mais afetou a sua amplitude, notadamente com o aumento da profundidade do solo, por se tratar de uma propriedade dinâmica associada à compactação (Vaz et al., 2001; Dexter et al., 2007).

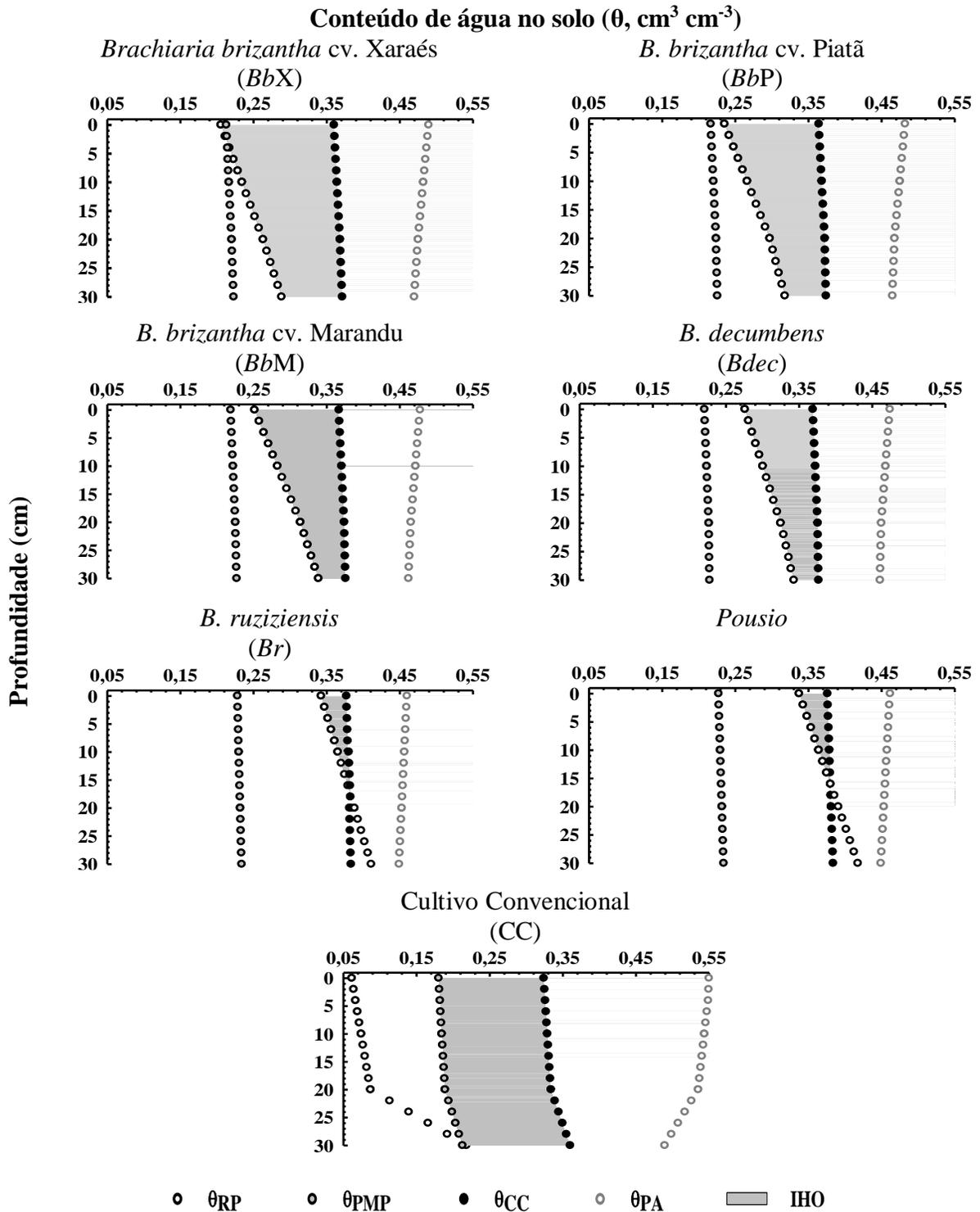


Figura 1. Variação do conteúdo de água no solo (θ , $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) em profundidade, para os limites críticos do intervalo hídrico ótimo em um Latossolo Vermelho Distroférico típico.

Por outro lado, a porosidade de aeração mínima de 10% não limitou o IHO em nenhum dos tratamentos e profundidades (Figura 1). Este fato reafirma o caráter poroso dos Latossolos Vermelhos, cuja mineralogia predominantemente oxídica e estrutura tipo granular confere com solo elevada estabilidade estrutural e friabilidade, refletindo a aglutinação da fração sólida do solo e o espaço vazio interconectado (Reatto et al., 2009; Severiano et al., 2013; Flavio Neto et al., 2015).

Observa-se que os cultivares de *Brachiaria brizantha* e a espécie *Brachiaria decumbens* destacaram-se em relação à testemunha pousio na recuperação da estrutura do solo avaliada pelo IHO em todas as profundidades, cuja magnitude deste indicador obedeceu à seguinte ordem: $IHO_{BbX} > IHO_{BbP} > IHO_{BbM} > IHO_{Bdec}$ (Figura 1). Dada a elevada suscetibilidade à compactação dos Latossolos oxídicos da região dos Cerrados, em que sua ocorrência é praticamente inevitável com o tráfego de maquinário e o pisoteio de animais (Severiano et al., 2013), a inserção de sistemas integrados de manejo que envolvam o cultivo de espécies *Brachiaria*, principalmente *B. brizantha*, pode ser uma alternativa para aliviar os efeitos danosos na estrutura do solo.

Este comportamento é compreendido quando se analisa o desempenho dos cultivares de *Brachiaria brizantha* utilizados na agricultura brasileira. Esses capins foram desenvolvidos pelo programa de melhoramento genético da Embrapa, visando a adaptação às condições de clima tropical úmido e solos quimicamente pobres e ácidos, encontrados na região do Cerrado brasileiro (Valle et al., 2009). Por sua vez, esta região se caracteriza por duas estações bem definidas (inverno seco e verão chuvoso), e torna a produção animal a pasto sensível aos efeitos da estacionalidade da produção forrageira (Costa et al., 2004; Bustamante et al., 2012).

Estas espécies são originárias do continente africano, em países de baixas latitudes (Ambiel et al., 2008), onde estiveram naturalmente expostas a condições estressantes em termos de insolação e déficit hídrico estacional, contornados em parte pelo seu aparato fotossintético tipo C4, que garante melhor aproveitamento da radiação incidente e maior eficiência no uso d'água (Sage e Zhu, 2011; Guenni et al., 2002). Estas características foram potencializadas no melhoramento dos cultivares, notadamente dos capins-Xaraés e Piatã e com isso, a atividade metabólica superior durante o período seco de entressafra no

cerrado brasileiro concorre para o crescimento do seu sistema radicular permitindo o rompimento de camadas de solo compactadas, comumente encontradas nas áreas agrícolas, conforme constatado por Flávio Neto et al. (2015).

Nossos resultados esclarecem, portanto, que na integração agricultura-pecuária, o manejo varietal forrageiro do Gênero em questão pode promover sensível melhoria dos atributos físicos do solo, concordando com os resultados positivos obtidos por Blanco-Canqui et al. (2011), trabalhando também com outras espécies de plantas de cobertura em plantio direto e também com Petean et al. (2010), que constataram que a integração agricultura-pecuária estabelece um ambiente físico propício ao desenvolvimento das plantas, desde que se evite o superpastejo das áreas de pastagem.

A melhoria estrutural do solo em decorrência da descompactação biológica promovida por capins do gênero estudado durante a etapa de pecuária nos sistemas integrados afeta diretamente o desenvolvimento das culturas agrícolas em sucessão. Nesse sentido, avaliando a recuperação de um solo degradado fisicamente através do cultivo desses capins, Flávio Neto et al. (2015) constataram que o cultivo dos capins *Brachiaria brizantha* cv. Xaraés e cv. Piatã amenizaram os efeitos da sazonalidade climática e proporcionam aumentos na disponibilidade hídrica para a cultura da soja em sucessão, o que contribuiu para amenizar estresses hídricos coincidentes aos estádios fenológicos de maior demanda hídrica desta cultura.

Em contrapartida, a espécie *Br* apresentou potencial de recuperação edáfico limitado em relação às demais espécies de *Brachiaria*, mantendo o IHO em condições semelhantes aos encontrados sob a testemunha pousio (Figura 1). Nestes tratamentos, observa-se gradativa redução do IHO até a camada intermediária (10-20 cm), quando o mesmo é nulo. Nestes casos, em qualquer conteúdo de água em que o solo se encontre, há limitações ao crescimento vegetal pela excessiva resistência do solo à penetração que a matriz do solo oferece ao sistema radicular das plantas ali cultivadas (Silva et al., 2006a).

Destaca-se, portanto, que os dados obtidos pela avaliação do IHO em condições de integração agricultura-pecuária sob plantio direto permitem considerar este indicador como sensível às alterações estruturais do solo cultivado com pastagens do gênero *Brachiaria*, notadamente *Bb* e *Bdec*, corroborando os resultados obtidos por Leão et al. (2006).

Em adição, estando o solo sob cultivo convencional (CC), foram observadas as maiores amplitudes do IHO em todas as profundidades, indicando que a ação destorroadora do preparo do solo é efetiva na eliminação de camadas compactadas (Figura 1). Embora não tenha limitado o IHO, é importante ressaltar que, neste tratamento, a partir de 20 cm de profundidade, detecta-se que há aumento da θ_{RP} concomitante a redução da θ_{PA} , advindos possivelmente de uma leve compactação em decorrência do espelhamento da massa de solo pelos implementos utilizados no preparo. Considerando-se que isto se deve ao histórico de uso, esses resultados salientam a importância da prévia correção física em profundidade no processo de conversão das áreas agrícolas ao sistema de plantio direto (Oliveira et al., 2007) e à integração agricultura-pecuária, sendo este um procedimento corrente no Brasil.

Por outro lado, embora a maior amplitude do IHO sob CC possa indicar menor compactação do solo neste tratamento, a distribuição e a conectividade do sistema poroso neste torna-se prejudicada pela inexistência da atividade benéfica do sistema radicular dos capins sobre a estrutura do solo (Franzluebbers & Stuedemann, 2008).

Avaliando os valores de DMG (Tabela 3) de forma associada aos de IHO (Figura 1), observa-se que embora não tenham sido detectadas diferenças, salvo as observadas em CC, houve discrepância nas amplitudes dos IHOs avaliados nos sistemas conservacionistas de cultivo. Isto indica que a ausência de diferenças no comportamento do DMG frente aos tipos de cobertura do solo evidencia ineficácia da metodologia de estabilidade de agregados por peneiramento via úmida em discriminar agregados e torrões de solo formados por compressão das partículas de solo. Solos compactados podem apresentar elevada estabilidade de agregados em água, porém com distribuição inadequada entre os volumes de macro e microporos, culminando com redução da porosidade total do solo (Severiano et al. 2008; Conte et al., 2011).

Assim, os elevados valores de DMG observados nos tratamentos *Br* e *pousio* devem-se, sobretudo ao histórico de degradação física do solo, processo inverso ao de estruturação mantido pela formação e estabilização de macroagregados, através do sistema radicular das gramíneas e do aporte de carbono orgânico ao solo. Pelo trabalho de Brandão & Silva (2012), que avaliaram o efeito de *Brachiaria ruziziensis* sobre a agregação do solo, observa-se esta gramínea tem baixo potencial de elevar os valores de DMG, não havendo

diferença entre os tratamentos com e sem gramínea para a porcentagem de agregados maiores que 1 mm no referido trabalho.

De maneira geral, entretanto, a utilização de espécies do gênero *Brachiaria* em sistemas de integração, na recuperação da estrutura do Latossolo degradado foi eficiente, salvo o cultivo de *Br.* Por outro lado, o potencial descompactador dos cultivares de *Bb* principalmente, evidenciado pela maior amplitude do IHO no solo sob estes tratamentos reforçam os resultados de Calonego et al. (2011) e Chioderoli et al. (2012) e ajudam a confirmar seu potencial em atuar positivamente na agregação do solo, que está associado à abundância e agressividade do sistema radicular destes capins, e a sua eficiência na exsudação de compostos orgânicos (Santos et al., 2012).

Ressalta-se, portanto, a ação radicular diferencial dos capins durante a fase pecuária do sistema de integração na melhoria física do solo. Ao se desenvolver no perfil do solo, raiz contribui para o incremento no CO (Tabela 2) e na descompactação biológica do solo (Figura 1), mesmo não apresentando efeitos sob os parâmetros de agregação avaliados via peneiramento úmido (Tabela 3). É o que pode ser visualizado por meio das análises de correlação de Pearson apresentadas na Figura 2, em que há correlação positiva entre IHO e CO, mas não sendo observada entre os atributos de agregação e CO.

Observa-se, embora significativa, uma fraca correlação ($r = 0,49^*$) entre IHO e CO quando se considera todos os tratamentos avaliados no estudo (Figura 2). Isto se deve ao tratamento CC, que promove a ruptura mecânica dos torrões do solo e inversão das camadas, aumentando a amplitude do IHO, mas também alterando a disposição do carbono no perfil do solo.

Quando se considera somente os sistemas integrados com capins, observa-se melhoria na correlação entre IHO e CO ($r = 0,71^{**}$). Nesse sentido, Tirloni et al. (2013) aponta que o crescimento e posterior decomposição das raízes das plantas de cobertura, resultam na formação de bioporos que concorrem para a redução da densidade do solo e, por consequência, dos demais atributos físicos relacionados a ela, resultando também no incremento de carbono nas camadas de solo exploradas pelo capim.

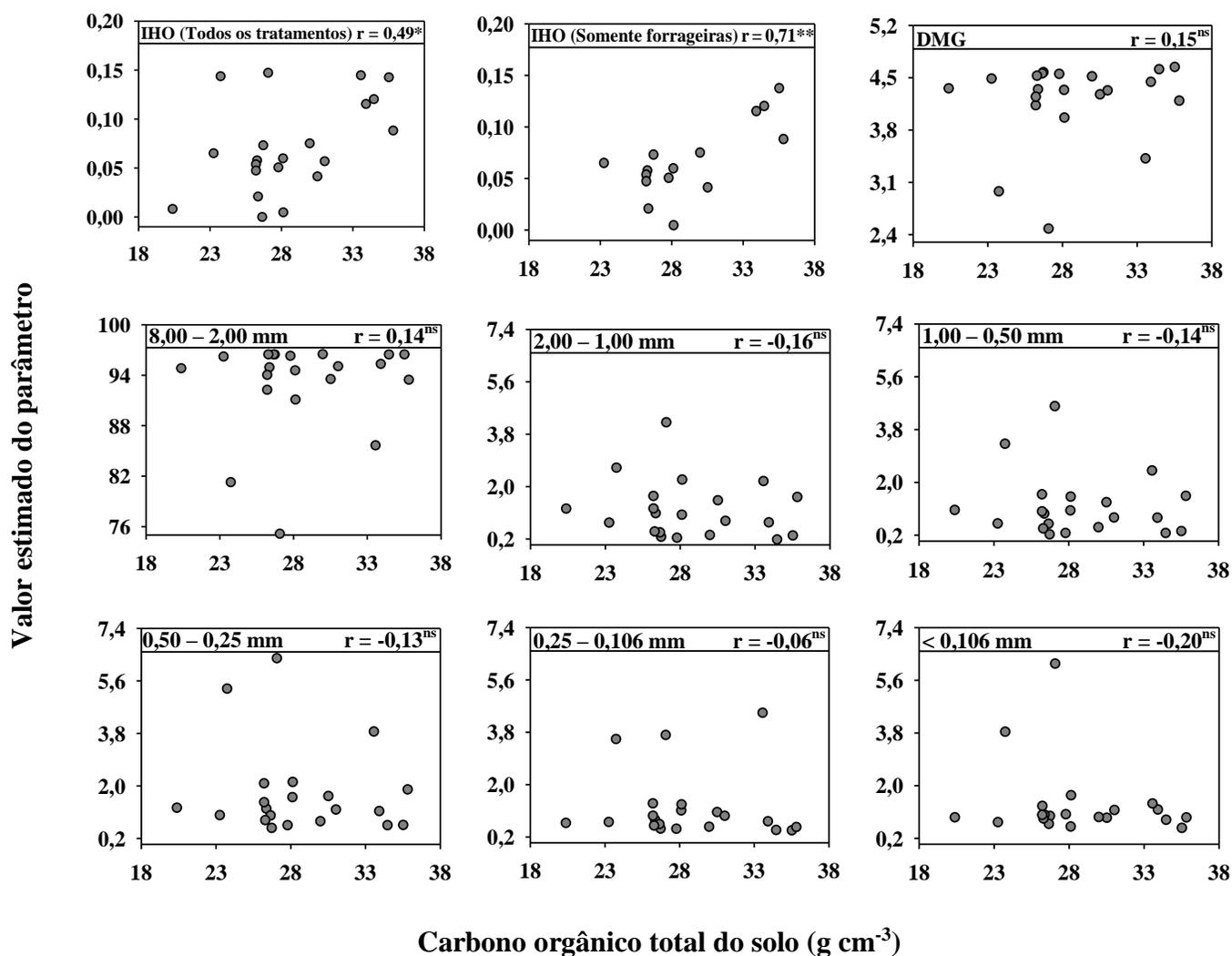


Figura 2. Correlações de Pearson entre os indicadores de qualidade física do solo e o carbono orgânico total em um Latossolo Vermelho Distroférico típico do cerrado brasileiro sob sistemas de manejo do solo.

CONCLUSÕES

A avaliação da estabilidade de agregados não se mostrou bom indicador para quantificar o potencial de recuperação da estrutura do solo, frente aos tratamentos avaliados, por não elucidar os efeitos dos sistemas de manejo adotados sobre a estrutura do solo e não diferenciar agregação de compactação do solo. Por sua vez, o IHO apresentou elevada sensibilidade aos sistemas de manejo avaliados, indicando aqueles com potencial de recuperação estrutural do solo. Nossos resultados apontam o cultivo de *Brachiaria brizantha* cv. Xaraés e Piatã como promissores na descompactação biológica do solo, até a

profundidade de 30 cm, com maiores impactos nas camadas superficiais. Em adição, destaca-se principalmente a eficiência do capim-Xaraés, sendo sugerida como estratégia de manejo na recuperação edáfica em sistemas de integração agricultura-pecuária.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDERS, M.M.; BECK, P.A.; WATKINS, B.K.; GUNTER, S.A.; LUSBY, K.S.; HUBBELL, D.S. Soil aggregates and their associated carbon and nitrogen content in winter annual pastures. **Soil Science Society of America Journal**, v.74, n.4, p.1339-1347, 2010.

ASSIS, R.L.; LANÇAS, K.P. Avaliação da compressibilidade de um Nitossolo Vermelho distroférico sob sistema plantio direto, preparo convencional e mata nativa. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.29, n.4, p.507-514, 2005.

BLANCO-CANQUI, H.; MIKHA, M.M.; PRESLEY, D.R.; CLAASSEN, M.M. Addition of cover crops enhances no-till potential for improving soil physical properties. **Soil Science Society of America Journal**, v.75 n.4, p.1471-1482, 2011.

BRANDÃO, E.D.; SILVA, I.F. Formação e estabilização de agregados pelo sistema radicular de braquiária em um Nitossolo Vermelho. **Ciência Rural**, v.42, n.7, p.1193-1199, 2012.

BRAZ, S.P.; URQUIAGA, S.; ALVES, B.J.R.; JANTALIA, C.P.; GUIMARÃES, A.P.P.; SANTOS, C.A.; SANTOS, S.C.; PINHEIRO, E.F.M.; BODDEY, R.M. Soil carbon stocks under productive and degraded *Brachiaria* pastures in the Brazilian Cerrado. **Soil Science Society of America Journal**, v.77, n.3, p.914-928, 2013.

BUSSCHER, W.J. Adjustment of flat-tipped penetrometer resistance data to common water content. **American Society of Agricultural Engineers**, v.33, n.2, p.519-524, 1990.

BUSTAMANTE, M.M.C.; NOBRE, C.A.; SMERALDI, R.; AGUIAR, A.P.D.; BARIONI, L.G.; FERREIRA, L.G.; LONGO, K.; MAY, P.; OMETTO, J.P.H.; PINTO, A.S. Estimating greenhouse gas emissions from cattle raising in Brazil. **Climatic Change**, v.115, n.3, p.559-577, 2012.

CAMARGO, O.A.; ALLEONI, L.R.F. Compactação do solo e o desenvolvimento de plantas. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, 1997. 132p.

CARDUCCI, C.E.; OLIVEIRA, G.C.; SEVERIANO, E.C.; ZEVIANI, W.M. Modelagem da curva de retenção de água de Latossolos utilizando a Equação Duplo Van Genuchten. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.35, n.1, p.77-86, 2011.

CHIODEROLI, C.A.; MELLO, L.M.M.; GRIGOLLI, P.J.; FURLANI, C.E.A.; SILVA, J.O.R.; CESARIN, A.L. Physycal properties of soil and yield of soybeans in corn braquiaria consortium. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.16, n.1, p.37-43, 2012.

CONTE, O.; FLORES, J.P.C.; CASSOL, L.C.; ANGHINONI, I.; CARVALHO, P.C.F.; LEVIEN, R.; WESP, C.L. Evolução de atributos físicos de solo em sistema de integração lavoura-pecuária. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.46, n.10, p.1301-1309, 2011.

COSTA, K.A.P.; FAQUIN, V.; OLIVEIRA, I.P.; RODRIGUES, C.; SEVERIANO, E. C. Doses e fontes de N em pastagem de capim-marandu. I - Alterações nas características químicas do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32 n.4, p.1591-1599, 2008.

DAYNES, C.N.; FIELD, D.J.; SALEEBA, J.A.; COLE, M.A.; MCGEE, P.A. Development and stabilisation of soil structure via interactions between organic matter, arbuscular mycorrhizal fungi and plant roots. **Soil Biology and Biochemistry**, v.57, p.683-694, 2013.

DEXTER, A.R.; CZYZ, E.A.; GATE, O.P. A method for prediction of soil penetration resistance. **Soil & Tillage Research**, v.93, n.2, p.412–419, 2007.

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2. ed. Rio de Janeiro: Ministério da Agricultura e Abastecimento. 306 p, 2006.

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Centro Nacional de Pesquisas de Solos. **Manual de métodos de análises de solo**. 2. ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 230p, 2011.

FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations. 2013. Food outlook: biannual report on global food markets. Disponível em: <<http://www.fao.org/docrep/019/i3473e/i3473e.pdf>>. Acesso em: 06/05/2014.

FERREIRA, L.G.; FERNANDEZ, L.E.; SANO, E.E.; FIELD, C.; SOUSA, S.B.; ARANTES, A.E.; ARAÚJO, F.M. Biophysical properties of cultivated pastures in the Brazilian savanna biome: an analysis in the spatial-temporal domains based on ground and satellite data. **Remote Sensing — Open Access Journal**, v.5, n.1, p.307-326, 2013.

FISHER, M.J.; BRAZ, S.P.; SANTOS, R.S.M.; URQUIAGA, S.; ALVES, B.J.R.; BODDEY, R.M. Another dimension to grazing systems: soil carbon. **Tropical Grasslands**, v.41, n.2, p.65–83, 2007.

FONSECA, G.C.; CARNEIRO, M.A.C.; COSTA, A.R.; OLIVEIRA, G.C.; BALBINO, L.C. Atributos físicos, químicos e biológicos de um Latossolo Vermelho distrófico de cerrado sob duas rotações de cultura. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v.37, n.1, p.22-30, 2007.

FRANZLUEBBERS, A.J.; STUEDEMANN, J.A. Soil physical responses to cattle grazing cover crops under conventional and no tillage in the Southern Piedmont USA. **Soil and Tillage Research**, v.100, n.1-2, p.141-153, 2008.

GARCÍA-PRÉCHAC, F.; ERNST, O.; SIRI-PRIETO, G.; TERRA, J.A. Integrating no-till into crop–pasture rotations in Uruguay. **Soil & Tillage Research**, v.77, n.1, p.1–13, 2004.

GILKER, R.E.; WEIL, R.R.; KRIZEK, D.T.; MOMEN, B. Eastern gamagrass root penetration in adverse subsoil conditions. **Soil Science Society of America Journal**, v.66, n.3, p.931–938, 2002.

GRABLE, A.R.; SIEMER, E.G. Effects of bulk density, aggregate size, and soil water suction on oxygen diffusion, redox potential and elongation of corns roots. **Soil Science Society of America Journal**, v.32, n.2, p.180-186, 1968.

GUEDES-FILHO, O.; SILVA, A.P.; GIAROLA, N.F.B.; TORMENA, C.A. Structural properties of the soil seedbed submitted to mechanical and biological chiseling under no-tillage. **Geoderma**, v.204-205, p.94–101, 2013.

JIMENEZ, R.L.; GONÇALVES, W.G.; ARAÚJO FILHO, J.V.; ASSIS, R.L.; PIRES, F.R.; SILVA, G.P. Crescimento de plantas de cobertura sob diferentes níveis de compactação em um Latossolo Vermelho. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.12, n.2 p.116-121, 2008.

KEMPER, W.D.; CHEPIL, W.S. Size distribution of aggregates. In: Black, C.A., ed. *Methods of soil analysis*. Madison, **American Society of Agronomy**, p.449-510, 1965.

KEMPER, W.D.; ROSENAU, R.C. Aggregate stability and size distribution. In: KLUTE, A., ed. *Methods of soil analysis*. Madison, **American Society of Agronomy**, p.425-442, 1986.

KONG, A.Y.Y.; SIX, J.; BRYANT, D.C.; DENISON, R.F.; VAN KESSEL, C. The relationship between carbon input, aggregation, and soil organic carbon stabilization in sustainable cropping systems. **Soil Science Society of America Journal**, v.69, n.4, p.1078-1085, 2005.

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

LEÃO, T.P.; SILVA, A.P.; MACEDO, M.C.M.; IMHOFF, S.; EUCLIDES, V.P.B. Least limiting water range: A potential indicator of changes in near-surface soil physical quality after the conversion of Brazilian Savanna into pasture. **Soil and Tillage Research**, v.88, n.1-2, p.279–285, 2006.

LIMA, V.M.P.; OLIVEIRA, G.C.; SERAFIM, M.E.; CURI, N.; EVANGELISTA, A.R. Intervalo hídrico ótimo como indicador de melhoria da qualidade estrutural de Latossolo degradado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.36, n.1, p.71-78, 2012.

MACEDO, M.C.M. Integração lavoura e pecuária: o estado da arte e inovações tecnológicas. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v.38, (supl. especial), p.133-146, 2009.

MAIA, G.; COSTA, K.A.P.; SEVERIANO, E.C.; EPIFÂNIO, P.S.; FLÁVIO NETO, J.; RIBEIRO, M.G.; FERNANDES, P.B.; SILVA, J.F.G.; GONÇALVES, W.G. Yield and chemical composition of *Brachiaria* forage grasses in the offseason after corn harvest. **American Journal of Plant Sciences**, v.5 n.7, p.933-941, 2014.

MARCHÃO, R.L.; BALBINO, L.C.; SILVA, E.M.; SANTOS JUNIOR, J.D.G.; SÁ, M.A.C; VILELA, L.; BECQUER, T. Qualidade física de um Latossolo Vermelho sob sistemas de integração lavoura-pecuária no Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.42, n.6, p.873-882, 2007.

MONCADA, M.P.; GABRIELS, D.; CORNELIS, W.; LOBO, D. Comparing aggregate stability tests for soil physical quality indicators. **Land Degradation & Development**, published online, v.26, n.8, p.843-852, 2013.

NICHOLS, K.A.; TORO, M. A whole soil stability index (WSSI) for evaluating soil aggregation. **Soil and Tillage Research**, v.111, n.2, p.99-104, 2011.

NUNES, U.R.; ANDRADE JÚNIOR, V.C.; SILVA, E.B.; SANTOS, N.F.; COSTA, H.A.O.; FERREIRA, C.A. Produção de palhada de plantas de cobertura e rendimento do feijão em plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.41, n.6, p.943-948, 2006.

OADES, J.M. Soil organic matter and structural stability: mechanisms and implications for management. **Plant and Soil**, v.76, n.1, p.319-337, 1984.

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

OLIVEIRA, G.C.; DIAS JUNIOR, M.S.; RESCK, D.V.S.; CURI, N. Alterações estruturais e comportamento compressivo de um Latossolo Vermelho distrófico argiloso sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.38, n.2, p.291-299, 2003.

OLIVEIRA, G.C.; DIAS JUNIOR, M.S.; RESCK, D.V.S.; CURI, N. Caracterização química e físico-hídrica de um Latossolo Vermelho após vinte anos de manejo e cultivo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.28, n.2, p.327-336, 2004.

OLIVEIRA, G.C.; SEVERIANO, E.C.; MELLO, C.R. Dinâmica da resistência à penetração de um Latossolo Vermelho da Microrregião de Goiânia, GO. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.11, n.3, p.265-270, 2007.

PACHECO, L.P.; LEANDRO, W.M.; MACHADO, P.L.O.A.; ASSIS, R.L.; COBUCCI, T.; MADARI, B.E.; PETTER, F.A. Produção de fitomassa e acúmulo e liberação de nutrientes por plantas de cobertura na safrinha. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.46, n.1, p.17-25, 2011.

PAGLIARINI, M.S.; VALLE, C.B.; SANTOS, E.M.; MENDES, D.V.; BERNARDO, Z.H.; MENDES-BONATO, A.B.; SILVA, N.; CALISTO, V. Microsporogenesis in *Brachiaria brizantha* (Poaceae) as a selection tool for breeding. **Genetics and Molecular Research**, v.11, n.2, p.1309-1318, 2012.

PÉRÈS, G.; CLUZEAU, D.; MENASSERI, S.; SOUSSANA, J.F.; BESSLER, H.; ENGELS, C.; HABEKOST, M.; GLEIXNER, G.; WEIGELT, A.; WEISSLER, W.W.; SCHEU, S.; EISENHAUER, N. Mechanisms linking plant community properties to soil aggregate stability in an experimental grassland plant diversity gradient. **Plant and Soil**, v.373, n.1, p.285-299, 2013.

PETEAN, L.P.; TORMENA, C.A.; ALVES, S.J. Intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Vermelho distroférrico sob plantio direto em sistema de integração lavoura-pecuária. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.34, n.5, p.1515-1526, 2010.

RAWLINS, B.G.; WRAGG, J.; LARK, R.M. Application of a novel method for soil aggregate stability measurement by laser granulometry with sonication. **European Journal of Soil Science**, v.64, n.1, p.92–103, 2013.

REATTO, A.; BRUAND, A.; MARTINS, E.S.; MULLER, F.; SILVA, E.M.; CARVALHO JR., O.A.; BROSSARD, M.; RICHARD, G. Development and origin of the microgranular structure in Latosols of the Brazilian Central Plateau: significance of texture, mineralogy, and biological activity. **Catena**, v.76, n.2, p.122-134, 2009

RICHARDS, L.A.; WEAVER, L.R. Fitten-atmosphere percentage as related to the permanent wilting percentage. **Soil Science**, v.56, n.2, p.331-339, 1943.

ROTH, C.H.; CASTRO FILHO, C.; MEDEIROS, G.B. Análise de fatores físicos e químicos relacionados com a agregação de um Latossolo Roxo distrófico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.15, p.241-248, 1991.

SALTON, J.C.; MIELNICZUK, J.; BAYER, C.; BOENI, M.; CONCEIÇÃO, P.C.; FABRÍCIO, A.C.; MACEDO, M.C.M.; BROCH, D.L. Agregação e estabilidade de agregados do solo em sistemas agropecuários em Mato Grosso do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, n.1, p.11-21, 2008.

SANO, E.E.; ROSA, R.; BRITO, J.L.S.; FERREIRA, L.G. Land cover mapping of the tropical savanna region in Brazil. **Environmental Monitoring and Assessment**, v.166, n.1-4 p.113-124, 2010.

SANTOS, G.G.; MARCHÃO, R.L.; SILVA, E.M.; SILVEIRA, P.M.; BECQUER, T. Qualidade física do solo sob sistemas de integração lavoura-pecuária. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.46, n.10, p.1339-1348, 2011.

SANTOS, G.G.; SILVEIRA, P.M.; MARCHÃO, R.L.; PETTER, F.A.; BECQUER, T. Atributos químicos e estabilidade de agregados sob diferentes culturas de cobertura em Latossolo do cerrado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.16, n.11 p.1171-1178, 2012.

SEVERIANO, E.C.; OLIVEIRA, G.C.; DIAS JÚNIOR, M.S.; OLIVEIRA, L.F.C.; CASTRO, M.B. Pressão de preconsolidação e intervalo hídrico ótimo como indicadores de alterações estruturais de um Latossolo e de um cambissolo sob cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, n.4, p.1419-1427, 2008.

SEVERIANO, E.C.; OLIVEIRA, G.C.; DIAS JUNIOR, M.S.; COSTA, K.A.P.; CASTRO, M.B.; MAGALHÃES, E.N. Potencial de descompactação de um Argissolo promovido pelo capim-tifton 85. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.14, n.1, p.39-45, 2010.

SEVERIANO, E.C.; OLIVEIRA, G.C.; DIAS JÚNIOR, M.S.; COSTA, K.A.P.; SILVA, F.G.; FERREIRA FILHO, S.M. Structural changes in latosols of the cerrado region: I -

relationships between soil physical properties and least limiting water range. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.35, n.3, p.773-782, 2011.

SEVERIANO, E.C.; OLIVEIRA, G.C.; DIAS JUNIOR, M.S.; CURI, N.; COSTA, K.A.P.; CARDUCCI, C.E. Preconsolidation pressure, soil water retention characteristics, and texture of Latosols in the Brazilian Cerrado. **Soil Research**, v.51, n.3, p.193–202, 2013.

SILVA, A.P.; KAY, B.D.; PERFECT, E. Characterization of the least limiting water range. **Soil Science Society American Journal**, v.58, n.6, p.1775-1781, 1994.

SILVA, I.F.; MIELNICZUK, J. Sistemas de cultivo e características do solo afetando a estabilidade de agregados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.22, n.2, p.311-317, 1998.

SILVA, A.P.; KAY, B.D.; TORMENA, C.A.; IMHOFF, S. Least Limiting Water Range of Soils. **Encyclopedia of Soil Science**, v.2, p.1026-1029, 2006a.

SILVA, S.R.; BARROS, N.F.; COSTA, L.M. Atributos físicos de dois Latossolos afetados pela compactação do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.10, n.4, p.842-847, 2006b.

Soil Science Glossary Terms Committee. Glossary of soil science terms. **USA: Soil Science Society of America**; 2008.

SOUSA, D.M.; LOBATO, E. Cerrado: correção do solo e adubação. 2. ed. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica. 416p, 2004.

SOUZA, E. D.; COSTA, S. E. V. G. A.; ANGHINONI, I.; CARVALHO, P. C. F.; OLIVEIRA, E. V. F.; MARTINS, A. P.; C A O, E.; ANDRIGHETTI, M. Soil aggregation in a crop-livestock integration system under no-tillage. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.34, n.4, p.1365-1374, 2010.

SULC, R. M.; FRANZLUEBBERS, A. J. Exploring integrated crop–livestock systems in different ecoregions of the United States. **European Journal of Agronomy**, V.57, p. 21-30, 2014.

SULC, R. M.; TRACY, B.F. Integrated crop–livestock systems in the U.S. corn belt. **Agronomy Journal**, v.99, n.2, p.335-345, 2007.

TAVARES FILHO, J.; FELTRAN, C.T.M.; OLIVEIRA, J.F.; ALMEIDA, E.; GUIMARÃES, M.F. Atributos de solo determinantes para a estimativa do índice de estabilidade de agregados. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.47, n.3, p.436-441, 2012.

TIRLONI, C.; VITORINO, A.C.T.; BERGAMIN, A.C.; SOUZA, L.C.F. Physical properties and particle-size fractions of soil organic matter in crop-livestock integration. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.36, n.4, p.1299-1310, 2012.

TOLLEFSON, J. Food: the global farm. **Nature**, v.466, p.554-556, 2010.

TORMENA, C.A.; ARAÚJO, M.A.; FIDALSKI, J.; COSTA, J.M. Variação temporal do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Vermelho distroférico sob sistemas de plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.31, n.2, p.211-219, 2007.

TRUJILLO, W.; FISHER, M.J.; LAL, R. Root dynamics of native savanna and introduced pastures in the Eastern Plains of Colombia. **Soil and Tillage Research**, v.87, n.1, p.28-38, 2006.

VAZ, C.M.P.; HOPMANS, J.W. Simultaneous measurement of soil penetration resistance and water content with a combined penetrometer-TDR moisture probe. **Soil Science Society of America Journal**, v.65, n.1, p.4-12, 2001.

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

YODER, R.E. A direct method of aggregate analysis of soil and a study of the physical nature erosion losses. **Agronomy Journal**, v.28, n.5, p.337-351, 1936.

ZHANG, B.; HORN, R.; HALLETT, P.D. Mechanical resilience of degraded soil amended with organic matter. **Soil Science Society of America Journal**, v.69, n.3, p.864-871, 2005.

ZINK, A.; FLEIGE, H.; HORN, R. Load risks of subsoil compaction and depths of stress propagation in arable Luvisols. *Soil Science Society of America Journal*, v.74, n.5, p.1733-1742, 2010.

ZOTARELLI, L.; ALVES, B.J.R.; URQUIAGA, S.; TORRES, E.; DOS SANTOS, H.P.; PAUSTIAN, K.; BODDEY, R.M. Impact of tillage and crop rotation on aggregate-associated carbon in two Oxisols. **Soil Science Society of America Journal**, v.69, n.2, p.482-491, 2005.

CAPÍTULO II: Qualidade física do solo e rendimento de girassol e capim-Paiaguás em integração agricultura-pecuária

RESUMO

O presente estudo objetivou avaliar a acuracidade do intervalo hídrico ótimo na qualidade física do solo e no rendimento de aquênios de girassol em condições de segunda safra e de forragem de capim-Paiaguás na época da terceira e quarta safra, em monocultivos e consorciados em diferentes níveis de compactação do solo. Para tanto, foram implantadas 16 parcelas experimentais, dispostas em quatro blocos com seguintes tratamentos de intensidade de tráfego: 0, 2, 10 e 30 passadas de um trator no mesmo lugar, perfazendo toda a superfície do solo. Nas subparcelas, foram implantadas a cultura do girassol e do capim-Paiaguás em monocultivo e consorciados. Determinaram-se, como indicador da qualidade física do solo, a sua densidade e intervalo hídrico ótimo (IHO), além do rendimento das culturas. Os resultados indicaram que a qualidade física do solo em sistemas de integração agricultura-pecuária submetidos ao tráfego agrícola pode ser adequadamente descrita por meio do intervalo hídrico ótimo. Os indicadores de qualidade física densidade do solo e intervalo hídrico ótimo, apresentaram robustez na avaliação da produtividade vegetal de girassol e capim-Paiaguás em função da compactação do solo. O girassol cultivado em período de segunda safra se mostrou extremamente sensível à compactação do solo, com redução de produtividade superior a 50% quando cultivado em monocultivo e a 80% quando consorciado com o capim-Paiaguás. O capim-Paiaguás se mostrou resistente à compactação do solo, com desempenho satisfatório na produção de forragem para pastejo e palhada para o plantio direto.

TITLE II: Physical soil quality and yield of sunflower and paiaguás grass in agriculture-livestock integration

The objective of this study was to evaluate the accuracy of the optimum water range in the soil physical quality and yield of sunflower achenes in second crop conditions and forage

of paiaguás grass in the third and fourth harvest season, in monocultures and intercropping at different levels of soil compaction. A total of 16 experimental plots, arranged in 4 blocks with the following traffic intensity treatments were implemented: 0, 2, 10 and 30 of a tractor in the same place, making up the entire surface of the soil. In the subplots, the sunflower and paiaguás grass were planted in monoculture and consortium. As an indicator of the soil physical quality, its density and optimal water range (IHO), as well as crop yield, were determined. The results indicated that the soil physical quality in agriculture-livestock integration systems submitted to agricultural traffic can be adequately described by means of the optimal water range. The physical quality indicators soil density and optimal water range showed robustness in the sunflower and paiaguás grass productivity evaluation as a function of soil compaction. Sunflower cultivated in the second harvest period was extremely sensitive to soil compaction, with a productivity reduction of over 50% when grown in monoculture and 80% when intercropped with paiaguás grass. The paiaguás grass proved to be resistant to soil compaction, with satisfactory performance in forage production for grazing and straw for no-till.

INTRODUÇÃO

O agronegócio brasileiro apresenta destaque no cenário mundial. Os títulos de “fazenda global” (Tollefson, 2010) ou “milagre agrícola do Cerrado brasileiro” (Rada, 2013) e as campanhas como “salve a Amazônia” (Tollefson, 2013) estão associados ao bônus de recordes consecutivos de produtividade e ao ônus da preservação da biodiversidade que caminha, supostamente, na contramão da atividade agropecuária. Ao passo que se reconhece o papel do Brasil na segurança alimentar mundial (Pereira et al., 2012), entidades internacionais também alertam sobre a ameaça à biodiversidade e aos recursos naturais, bem como à preservação etnocultural nativa (Sullivan, 2013; Gibbs et al., 2015; Strassburg et al., 2017).

A região do Cerrado, polo agrícola do País (Economist, 2010; Rada, 2013), é predominantemente recoberta por Latossolos (Oxisols, na U.S. Soil Taxonomy e Ferralsols, na World Reference Base for Soil Resources). São solos naturalmente deficientes em fertilidade química, cuja inserção no processo produtivo demandou técnicas de correção

que hoje são de domínio público (Goedert, 1983). No entanto, o negligenciamento em torno das limitações físico-hídricas potenciais e a adoção de tecnologias de mecanização dos tratamentos culturais em todas as etapas do processo produtivo têm degradado a estrutura do solo, processo praticamente inevitável nestes solos (Severiano et al., 2013). Assim a produtividade vegetal tem se estagnado nas últimas safras.

Embora altamente produtiva e economicamente bem-sucedida, há crescente preocupação com os impactos ambientais negativos e não intencionais (Sulc e Franzluebbers, 2014). No agravamento desta situação, práticas conservacionistas de controle da erosão estão sendo suprimidas de forma a aumentar o rendimento operacional das máquinas e atender o reduzido calendário agrícola das lavouras brasileiras e levando à graves e irreversíveis danos ambientais relativos à perda de solo fértil nos campos de agricultura e ao assoreamento e eutrofização de cursos hídricos (Merten e Minella, 2013; Hunke et al., 2015).

Este cenário reflete as demandas do principal modelo econômico instalado no Brasil, baseado na produção de grãos em duas safras consecutivas de *commodities*, notadamente soja e milho em sucessão (Fischer, 2009; Chioderoli et al., 2012). O termo “safrinha” foi designado para o segundo cultivo imediatamente após a colheita de verão caracterizada pela mudança de estações (do verão chuvoso para inverno seco) (Anderson et al., 2016) e pelo estágio de semeadura estendendo de janeiro a março. Apresentava inicialmente baixo rendimento agrônomico, devido principalmente ao limitado investimento tecnológico (reduzido ou nenhum *input* de fertilizantes e insumos) e, por vezes, pela irregularidade da precipitação pluviométrica.

Com inovações tecnológicas, sobretudo na adoção de cultivares de menor ciclo (Crusciol et al., 2012; Anderson et al., 2016) e a manutenção da fertilidade do solo, passou a apresentar indicadores agrônomicos equivalentes à safra de verão, cuja implantação ocorre em condições climáticas adequadas a todo o ciclo da cultura, justificando, portanto, o uso da expressão “segunda safra”. Destinada majoritariamente à exportação e provendo maior rentabilidade imediata, é também a principal responsável ao desequilíbrio ecológico de pragas nas lavouras (Godoy et al., 2015) que, por sua vez, intensifica o tráfego de maquinário no manejo fitossanitário dos cultivos e, por conseguinte, dissemina a

compactação do solo (Lima et al., 2017). Caracteriza, então, um ciclo de produção agrícola e degradação dos recursos naturais.

Em contradição, mesmo com tecnologias de crescimento sustentável desenvolvida pelos pesquisadores, muitos fazendeiros e agricultores ainda não as adotam (Tollefson, 2010). Uma das alternativas potenciais para a solução desta problemática passa pela diversificação de culturas e de sistemas de manejo do solo, com benefícios agrônômicos e ambientais. A Integração Agricultura-Pecuária (IAP), por exemplo, se enquadra nessa premissa (Lemaire et al., 2014; Salton et al., 2014), sendo, inclusive, assumida como política internacional de mitigação do aquecimento global pelo Governo brasileiro (Brazil's INDC, 2015).

Neste sistema integrado de produção, a soja é preferencialmente semeada na safra de verão (primeira safra), com o cultivo subsequente de algum cereal consorciado a forrageiras, que proporciona a segunda safra de grãos e, ainda o capim na entressafra, na forma de pastagem (terceira safra) e, ou, palhada para o sistema de plantio direto (quarta safra). Culturas alternativas, como o girassol, tem potencial para inserção no sistema, por permitirem semeaduras tardias, sujeitas a déficit hídrico (Chimenti et al., 2002), em que não é mais viável o cultivo de milho. Assim, viabiliza a adoção de práticas conservacionistas e contribui para a rotação de culturas, sendo esta a tecnologia de maior eficiência no manejo integrado de pragas.

Além da otimização do uso da terra, a IAP promove a melhoria física do solo instalada nas áreas agrícolas degradadas (Silva et al., 2014). A cobertura do solo e o incremento no conteúdo de carbono orgânico no perfil, aliados à capacidade de escarificação biológica do solo pelas plantas forrageiras, são alguns dos serviços agroambientais de reparo e manutenção da qualidade do solo, sobretudo devido ao conceito de não revolvimento decorrente do sistema de plantio direto (Flávio Neto et al., 2015).

A capacidade funcional edáfica no ecossistema mantém os processos ambientais e a produtividade biológica assegurando, portanto, a higidez animal e vegetal (SSSA, 2016). A expressão “qualidade física do solo”, embora de aceção subjetiva, é determinada por avaliações meramente quantitativas (Severiano et al., 2011; Tormena et al., 2017). Estes, por sua vez, podem ser associados à quantificação de atributos do solo que traduzam o

fornecimento potencial de água e ar às plantas, sem que a resistência mecânica imposta pela compactação do solo seja limitante.

O intervalo hídrico ótimo (IHO) é um indicador da qualidade física do solo que integra o efeito de diferentes atributos do solo, associados ao crescimento vegetal. Elucidado na década de 1980, teve sua definição aprimorada e quantificada por Silva et al. (1994). O IHO complementa o conceito clássico de água disponível (representada pelo conteúdo de água no solo entre a capacidade de campo e o ponto de murcha permanente), ao incorporar outros dois outros parâmetros intimamente associados à variação da densidade do solo: resistência à penetração limitante ao desenvolvimento das plantas e porosidade de aeração mínima requerida pelo sistema radicular vegetal (Tormena et al., 2017).

Os teores-limite superior do IHO são determinados pelo conteúdo de água no solo, referente à capacidade de campo (θ_{CC}) e/ou à porosidade de aeração (θ_{PA}) e os inferiores são restringidos pelo conteúdo de água no ponto de murcha permanente (θ_{PMP}) e/ou pelo conteúdo de água no solo que promove resistência do solo à penetração limitante ao desenvolvimento radicular (θ_{RP}) (Ferreira et al., 2017). Desta forma, representa um indicador multifatorial de alta sensibilidade aos impactos adversos decorrentes da compactação do solo.

O risco de exposição das culturas às condições físicas inadequadas no solo em relação à amplitude do IHO tem tido reconhecimento universal (Bengough et al., 2006; Tormena et al., 2017; Fashi et al., 2017). As limitações parecem estar mais associadas ao engessamento dos teores-limite que definem a sua magnitude do que a falta de correlação fortuita com a produtividade vegetal. Dessa forma, a definição de valores mais condizentes com as necessidades de cada espécie e com o dinamismo do fluxo de água no sistema solo-planta-atmosfera pode melhorar a acuracidade deste indicador de qualidade física do solo em relação a medidas pré-fixadas e arbitrárias (Van Lier e Gubiani, 2015).

O presente estudo objetivou avaliar a acuracidade do intervalo hídrico ótimo, na qualidade física do solo e no rendimento de aquênios de girassol em condições de segunda safra e de forragem de capim-Paiaguás na época da terceira e quarta safra, em monocultivos e consorciados em diferentes níveis de compactação do solo.

MATERIAL E MÉTODOS

Caracterização experimental

O ensaio foi conduzido em área recoberta por Latossolo Vermelho Distroférico típico (Santos et al., 2013) localizado Instituto Federal Goiano, município de Rio Verde, região sudoeste do estado Goiás, Brasil (17°48'34,25"S; 50°54'05,36"W; e 731 m de altitude). Esta região é caracterizada pela topografia suavizada recoberta pelos solos mais velhos do mundo cuja principal atividade econômica é a agricultura empresarial (Severiano et al., 2013).

O clima é classificado conforme Köppen como Megatérmico ou Tropical Úmido (Aw), subtipo Tropical de Savana, com inverno seco e verão chuvoso. A temperatura média anual da região é de 25 °C e a média pluviométrica anual de aproximadamente 1600 mm. O período chuvoso se estendendo de novembro a abril e menores precipitações ocorrendo entre junho e agosto (< 50 mm mês⁻¹).

A composição mineralógica e física do solo, analisada segundo Embrapa (2011), encontra-se na Tabela 1.

Tabela 1. Caracterização física e mineralógica do Latossolo Vermelho Distroférico típico em Rio Verde GO.

Camada (m)	Dp ⁽¹⁾ (kg dm ⁻³)	Granulometria ⁽²⁾			Ataque sulfúrico				
		Areia	Silte	Argila	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Ki	Kr
		-----			(g kg ⁻¹) -----				
0 – 0,20	2,80	350	200	450	46	198	224	0,39	0,23
0,20 – 0,40	2,82	382	150	468	42	186	238	0,38	0,21

⁽¹⁾ Dp: Densidade de partículas pelo método do balão volumétrico; ⁽²⁾ Determinada pelo método da pipeta; Ki: relação molecular (SiO₂/Al₂O₃); Kr: relação molecular SiO₂: (Al₂O₃ + Fe₂O₃).

A correção do solo seguiu recomendações propostas de Sousa e Lobato (2004) para o Cerrado brasileiro, e com base nos resultados da análise de solo (Tabela 2).

Tabela 2. Complexo sortivo do Latossolo Vermelho Distroférico típico em Rio Verde GO⁽¹⁾.

Ca	Mg	Al	$\frac{H+A}{I}$	P	K	S	Zn	B	Cu	Mn	Mo	V ⁽²⁾	m ⁽³⁾	M.O. ⁽⁴⁾	pH
----- cmol _c dm ⁻³ -----				----- mg dm ⁻³ -----								--- % ---		g kg ⁻¹	
1,8	1,3	0,0	4,1	2,3	52	2,4	1,4	0,2	4,0	51,6	0,1	43,3	0,0	40	5,2

⁽¹⁾ 0,20 m de profundidade; ⁽²⁾ V: saturação por bases; ⁽³⁾ m: saturação por alumínio; ⁽⁴⁾: M.O.: Matéria Orgânica. P: Determinado pelo extrator Mehlich. pH em CaCl₂

Visando à eliminação do histórico de usos anteriores, ao controle do processo de compactação do solo nas parcelas experimentais e ao manejo integrado das plantas invasoras, foi realizado, com antecedência de quatro meses, o preparo inicial do solo constituído por subsolagem a 0,45 m de profundidade, incorporação de corretivo (1,5 Mg de calcário dolomítico contendo PRNT = 80%, CaO = 36% e MgO: 12%) via gradagem aradora e niveladora, ambas a 0,20 m de profundidade.

O experimento foi conduzido no delineamento em blocos completos ao acaso e esquema de parcelas subdivididas, com quatro repetições. Nas parcelas, de dimensões de 12,0 m de comprimento e 6,0 m de largura, foram avaliados quatro níveis de compactação obtidos pela intensidade de tráfego de um trator agrícola com tara de 4,5 Mg. O conjunto de rodados utilizados no momento da aplicação dos tratamentos foi formado por dois pneus dianteiros e dois traseiros. Os pneus eram diagonais, com as seguintes características técnicas: dianteiros, de 14,9-24,0; traseiros, de 18,4-34,0, com pressão de inflação de 95 e 165 kPa, respectivamente.

A compactação do solo foi realizada considerando-se quatro intensidades de tráfego, sendo: T₀: ausência de compactação; T₂: duas passadas; T₁₀: dez passadas; e T₃₀: trinta passadas do trator no mesmo lugar, cobrindo toda a superfície do solo da parcela, conforme recomendações de Guimarães Junnyor et al. (2015). Por ocasião da aplicação dos tratamentos, o solo se encontrava com o conteúdo de água no solo na capacidade de campo (0,30±0,01 dm³ dm⁻³), ocasionado pela precipitação ocorrida antes da implantação do ensaio e monitorada por análises de umidade do solo. Segundo Severiano et al. (2013), nestas condições de umidade, o Latossolo em questão apresenta sua menor resistência à compressão.

Nas subparcelas, constituídas por 13 linhas de plantas espaçadas de 0,50 m e 4,0 m

de comprimento, foram implantados três sistemas forrageiros, constituídos por girassol (*Helianthus annuus* L.), híbrido Charrua e capim-Paiaguás (*Brachiaria brizantha* cv. BRS Paiaguás), em monocultivo e consorciados.

Os cultivos foram semeados mecanicamente em 28 de fevereiro de 2014. As sementes do girassol, depositadas a 0,03 m de profundidade, e as sementes do capim, incorporadas junto ao fertilizante na profundidade de 0,07 m, foram distribuídas em todas as parcelas. Previamente, foi feita a inclusão da semente de capim (15 kg, correspondente a 5 kg sementes puras e viáveis ha⁻¹) na mistura de fertilizantes (350 kg ha⁻¹) contendo 16,5 kg de N, 90 kg de P₂O₅, 35 kg de K₂O, 3,5 kg de Zn, 3,2 kg de B e 0,32 kg de Mo, com o uso de ureia, superfosfato triplo, cloreto de potássio, sulfato de zinco, boromol[®], respectivamente.

Na sequência, foi feito o desbaste das plantas aos 21 dias após a semeadura (DAS), conforme a disposição das subparcelas. Para tanto, a população foi ajustada em 40.000 plantas ha⁻¹ para o girassol e de 10 plantas por metro linear para o capim-Paiaguás nas subparcelas consorciadas. Nas subparcelas sob monocultivo de girassol, foi feito o desbaste de todas as plantas do capim e vice-versa.

Com as parcelas implantadas, foram executados tratos culturais durante a condução do ensaio, conforme as recomendações agronômicas para a cultura anual, consistindo nos seguintes manejos:

- Adubações em cobertura aos 22 e 42 DAS conforme recomendações de Sousa e Lobato (2004), com aplicação de 30 kg de N ha⁻¹ e 40 de kg N, 25 kg de K₂O e 24 kg de S ha⁻¹, nas fontes ureia, sulfato de amônio e cloreto de potássio, respectivamente;
- Controle de pragas, sempre que necessário;
- Cobertura dos capítulos após a fase de floração (término da polinização), com o uso de tecido não tecido (T.N.T.) para evitar o ataque de pássaros.

Durante a condução do experimento, foram monitoradas a precipitação pluviométrica e a temperatura, associadas ao desenvolvimento fenológico do girassol, cujos resultados estão apresentados na Figura 1.

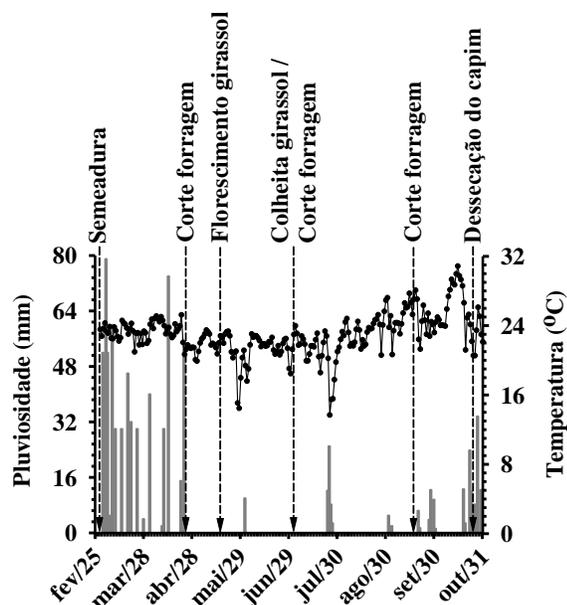


Figura 1. Precipitação pluviométrica (mm) e temperatura (°C) diária durante o ciclo da cultura do girassol no município de Rio Verde, Goiás.

Amostragem e avaliação dos atributos físicos do solo

Após a etapa de implantação experimental, foi executada a etapa de amostragem de solo e sua submissão ao Laboratório de física do solo. Para tanto, foram coletadas em três pontos diagonais na parcela (um ponto por subparcela) e em três camadas (0-0,05; 0,05-0,10 e 0,10-0,15 m), nove amostras indeformadas de solo em anéis de Uhlend com dimensões de 0,064 cm de diâmetro e 0,05 m de altura que totalizaram 144 amostras experimentais. Foram coletadas ainda amostras deformadas nas posições e profundidades descritas, utilizadas para análise granulométrica e a determinação do ponto de murcha permanente (potencial matricial de -1,5 MPa) pelo uso do Extrator de Richards (Embrapa, 2011).

No laboratório, as amostras indeformadas foram submetidas às análises físico-hídricas do solo. Inicialmente as amostras foram saturadas por capilaridade através da elevação gradual de lâmina (48 h) e, na sequência, foram submetidas ao potencial matricial de -0,006 MPa até atingir o equilíbrio hidráulico. Nessa situação, o conteúdo de água obtido foi considerado equivalente à capacidade de campo do solo (Severiano et al., 2011a).

Posteriormente, para cada amostra, foram ajustados diferentes conteúdos de água, variando de 0,03 a 0,36 $\text{dm}^3 \text{dm}^{-3}$, para então serem submetidas ao penetrômetro de bancada, dotado de variador eletrônico de velocidade (10 mm min^{-1}) e sistema de registro de dados (Severiano et al., 2008).

Por fim, as amostras foram secas em estufa a $105 \text{ }^\circ\text{C}$ por 48 horas para a determinação da densidade do solo (D_s). A porosidade total (PT) foi determinada pela equação 1, sendo D_p considerada a densidade da partícula.

$$PT = [1 - (D_s/D_p)] \quad \text{Eq. (1)}$$

A curva de resistência do solo à penetração (CRP) foi obtida, ajustando-se os valores de resistência à penetração (RP) em função do conteúdo volumétrico de água (θ) e da D_s , por meio do modelo não linear proposto por Busscher (1990), conforme a equação 2:

$$RP = 0,015\theta^{-1,831}D_s^{9,340}; R^2 = 0,92^{**} \quad \text{Eq. (2)}$$

A qualidade física do solo foi determinada pela estimativa do intervalo hídrico ótimo (IHO), de acordo com os procedimentos descritos em Silva et al. (1994), considerando, como limites superiores (LS), o conteúdo de água no solo retido no potencial matricial $-0,006 \text{ MPa}$ como sendo a capacidade de campo (θ_{CC}) (Severiano et al., 2011a) ou aquele em que a porosidade de aeração (θ_{PA}) é de 10% (Grable e Siemer, 1968), calculado para cada amostra pela equação 3:

$$\theta_{PA} = PT - 0,1 \quad \text{Eq. (3)}$$

Como limites inferiores (LI), o conteúdo de água retido no potencial de $-1,5 \text{ MPa}$ foi considerado como sendo o ponto de murcha permanente (θ_{PMP}) e/ou o conteúdo de água correspondente à resistência do solo à penetração de $2,5 \text{ MPa}$ (θ_{RP}) (Severiano et al., 2011), determinados através da Eq. 2.

Rendimento do girassol e do capim-paiaguás

Aos 124 dias após a semeadura, foi realizada a colheita do girassol em 4,0 m² de área útil (2,0 m linear das 8 linhas centrais da parcela). A produtividade de aquênios foi avaliada através da pesagem dos grãos com correção da umidade para 13%.

As forrageiras foram avaliadas em regime de cortes sucessivos, e foram coletadas amostras de 1 m², direcionando um quadrado metálico aleatoriamente dentro de cada parcela e cortando a 20 cm de altura. Os cortes foram realizados aos 56, 126 e 204 dias após a semeadura, correspondente aos meses de abril, julho e setembro de 2014 (148 dias de pastejo) para o sistema em monocultivo e aos 126 e 204 dias (julho e setembro de 2014) para o capim consorciado (78 dias de pastejo). Após a avaliação, foi realizado o corte de uniformização na mesma altura das plantas avaliadas em toda subparcela, sendo descartado o resíduo resultante dessa operação.

A produção de palhada foi quantificada 30 dias após o último corte da forragem, em outubro de 2014, sete dias após a dessecação da pastagem com herbicida glifosato na dosagem de 3,0 L ha⁻¹. Para tanto, procedeu-se a amostragem, conforme descrito anteriormente, coletando toda a biomassa presente na área útil do quadrado.

O material coletado em campo foi acondicionado em sacos plásticos e enviado ao laboratório, e foi retirada uma amostra representativa de aproximadamente 500 g e colocado em estufa de ventilação forçada de ar, com temperatura de 55±2 °C, para determinação da produtividade de forragem.

Análise Estatística

Os parâmetros empíricos de ajuste da curva de resistência do solo à penetração (CRP) foram obtidos por minimização da soma dos quadrados da diferença entre os valores determinados e estimados pelos modelos, utilizando algoritmos de planilhas eletrônicas, conforme Leão e Silva (2004). Para avaliação da acurácia do modelo ajustado, foi considerado o coeficiente de determinação (R²) e a raiz do erro médio quadrado entre os valores determinados e estimados.

O IHO foi obtido segundo Silva et al. (1994), ajustando os limites do conteúdo de água no solo em função da D_s , sendo o limite superior o menor valor entre θ_{CC} e/ou θ_{PA} e limite inferior o maior valor entre θ_{PMP} e/ou θ_{RP} , considerando os valores médios de 0-0,15 m em razão da homogeneidade do atributo nesta camada.

O valor de densidade do solo em que ocorreu a primeira inversão de limites do IHO foi considerado limitante (D_{sl}) e aquele em que o IHO assumiu o valor nulo foi considerado crítico ao desenvolvimento das plantas (D_{sc}). Estes valores foram utilizados no cálculo da densidade relativa (D_s/D_{sl} e D_s/D_{sc}).

Os resultados da produtividade de aquênios de girassol e de forragem em função da qualidade física do solo (monitorada pela D_s , D_s/D_{sl} ou D_s/D_{sc}) foram submetidos à análise de variância, utilizando o software estatístico SISVAR 4.6 (Ferreira, 2011), ajustando modelos de regressão, quando constatada significância ($p < 0,05$) através do software Sigma Plot 11.0 (Jandel Scientific).

A partir dos ajustes polinomiais quadrático referentes ao desenvolvimento das plantas, foi estimada a densidade do solo no ponto de máxima produtividade ($D_{smáx}$) e utilizada na determinação da RP limitante às culturas estudadas. Para tanto, foram substituídos os valores de $D_{smáx}$ e θ_{PMP} equação 2.

Na sequência, o IHO foi remodelado para as culturas em questão, considerando como θ_{RP} , o conteúdo de água correspondente à resistência do solo à penetração limitante estimada para o girassol e para o capim-paiaguás. Por fim, a produtividade relativa das duas culturas foi ajustada a modelos de regressão em função da D_s e D_s/D_{sl} .

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Qualidade física do solo

Na Figura 2, estão dispostos os limites críticos do intervalo hídrico ótimo (IHO) em função da densidade do solo (D_s). Observa-se que a resistência do solo à penetração (RP) foi o atributo que mais restringiu a amplitude, e está de acordo com Silva et al. (2014a) e

Flávio Neto et al. (2015). Por outro lado, nestas condições, a porosidade de aeração mínima requerida para o crescimento vegetal (PA) não limitou a magnitude do IHO para os valores de D_s inferiores à densidade do solo crítica ($D_{sc} = 1,43 \text{ kg dm}^{-3}$).

Quando a compactação do solo promove incrementos na D_s superiores à D_{sc} , o IHO torna-se nulo e qualquer conteúdo de água do solo passa a ser restritivo às plantas, seja em termos de potencial mátrico, aeração ou resistência do solo à penetração radicular (Silva et al., 1994). Ainda assim, a PA não limitante em Latossolos oxídicos se dá pela estrutura granular, que predispõe a formação de elevada porosidade, mantida superior a 10% mesmo em níveis elevados de D_s , fato este elucidado por Severiano et al. (2011a) em estudos sobre as alterações estruturais de solos desta região do Brasil.

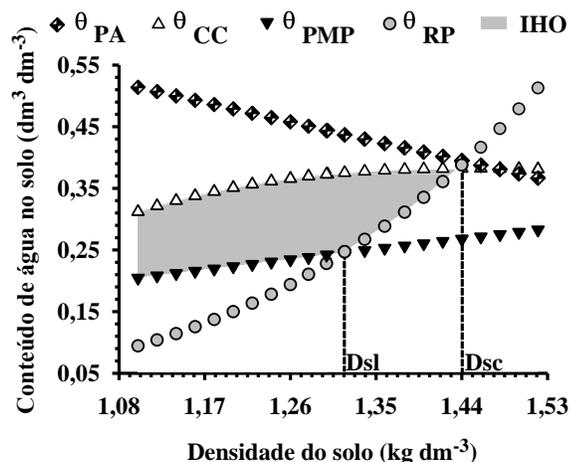


Figura 2. Variação do conteúdo de água no solo (θ) com o incremento da densidade do solo (D_s) nos teores-limite de capacidade de campo (θ_{CC} : -6 kPa), ponto de murcha permanente (θ_{PMP} : -1500 kPa), porosidade de aeração a 10% (θ_{PA}) e resistência do solo à penetração de 2,5 MPa (θ_{RP}) do Latossolo Vermelho Distroférrico típico, cultivado com girassol safrinha em monocultivo e consorciado com espécies de capim-Paiaguás. A área preenchida representa o intervalo hídrico ótimo (IHO); D_{sl} : Densidade limitante ao IHO; D_{sc} : densidade crítica ao desenvolvimento das plantas.

A água disponível do solo (AD), parâmetro clássico que define o intervalo do teor de água entre a capacidade de campo e o ponto de murcha permanente proposto por Veihmeyer e Hendrickson (1931), sofreu discretas alterações com o incremento de D_s . Mesmo apresentando limitações em torno da definição dos teores-limite (van Lier e Gubiani, 2015), principalmente por não considerar as relações dinâmicas na interação solo-água-planta, trata-se de um atributo de uso consagrado e de importância prática

indispensável para o correto manejo da água, balanço hídrico e zoneamento agrícola, entre outras aplicações agronômicas (Silva et al., 2014b).

Isto atesta a sensibilidade do IHO frente à AD. Por outro lado, torna necessária sua validação em relação ao desenvolvimento das plantas, já que a sua eficácia é contraditória à luz da pesquisa em física do solo, sendo considerado desde o indicador que melhor traduz a qualidade física do solo às plantas (Tormena et al., 2007), até como inadequado e sem relação com a produtividade vegetal (Cecagno et al. 2016).

Na Figura 3, estão expostos os valores absolutos do IHO em função da Ds e com o incremento de o seu valor limitante de $1,31 \text{ kg dm}^{-3}$, o IHO também se eleva até seu máximo valor ($0,13 \text{ dm}^3 \text{ dm}^{-3}$). Este comportamento é destacado por Severiano et al. (2011a) como o benefício de uma leve compactação do solo em Latossolos do Cerrado brasileiro para a melhoria da retenção de água. Assim, o valor de Dsl foi superior ao encontrado no tratamento sem tráfego de maquinário (T_0) e implica dizer que, para o solo em estudo, a ocorrência de compactação do solo não é necessariamente restritiva ao crescimento vegetal, dada a sua elevada porosidade natural, advinda da estrutura granular oxidica (Reatto et al., 2009; Severiano et al., 2013).

Isto indica, portanto, que uma leve compressão do solo pode ser benéfica por converter parte dos macroporos em microporos, resultando em maior retenção de água, o que beneficia o crescimento vegetal. Por outro lado, o manejo destes solos exige cautela dada a sua elevada suscetibilidade à compactação (Severiano et al., 2013) e suas consequências agronômicas, uma vez que, a partir da Dsl, ocorre decréscimo brusco da amplitude do IHO até se tornar nulo (Figura 3).

Este comportamento, mensurado pela aplicação do IHO em estudos em torno da qualidade física do solo, significa grande avanço no que se refere à biofísica e à mecânica do solo. Proposições da modelagem do comportamento compressivo associada aos limites de compactação adicional estimada pelo índice em questão, visando à manutenção das funções edáficas relacionadas à produção vegetal e também à recarga de água subterrânea, foram propostas para os solos brasileiros e constituem ferramentas de manejo sustentável nestes agrossistemas (Severiano et al., 2011b), frente ao seu papel na demanda mundial alimentos colocando-os, inclusive, como a fronteira agrícola da fazenda do mundo (Tollefson, 2010).

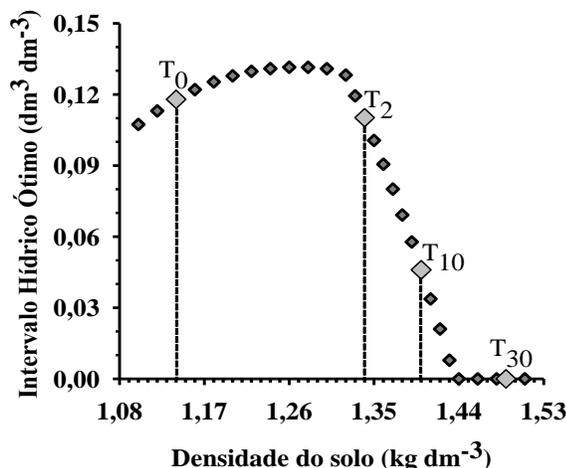


Figura 3. Variação do intervalo hídrico ótimo na camada de 0-0,15 m do Latossolo Vermelho Distroférrico típico do Cerrado brasileiro em função do tráfego de um trator agrícola e tara de 4,5 Mg. $T_0 = 0$, $T_2 = 2$, $T_{10} = 10$ e $T_{30} = 30$ passadas no mesmo lugar.

Fazem-se necessárias considerações em torno da dependência da mecanização dos tratos culturais que viabiliza duas safras de grãos em um período de chuvas concentradas na região do Cerrado e sob os solos mais suscetíveis à compactação do mundo (Severiano et al., 2013). Este processo é considerado praticamente inevitável nestes solos (Assouline et al., 1997) e primordial à degradação estrutural que, por sua vez, leva à sua degradação, considerado por Keller et al. (2007) o principal problema ambiental mundial.

A aplicação do conceito do IHO na quantificação da compactação benéfica configura-se importante proposta descrita em literatura e de aplicabilidade prática capaz de considerar a ocorrência da compactação sem o comprometimento do pleno funcionamento do solo. De acordo com Severiano et al. (2011a), esta pode ser estimada através de modelos de pedotransferência obtidos pelo IHO, a partir do teor de argila do solo. Sendo assim, para o Latossolo em estudo, com conteúdo de argila em torno de 450 g kg^{-1} (Tabela 1), o valor de densidade seria aproximadamente $1,30 \text{ kg dm}^{-3}$, estando coerente aos resultados de Dsl. Demonstra-se a relevância dos referidos modelos matemáticos na interpretação de momentos estatísticos dos atributos físicos do solo.

A suscetibilidade à compactação do solo é reafirmada pelo fato que bastaram apenas duas passadas do trator (T_2 , $D_s = 1,34 \text{ kg dm}^{-3}$) para que a D_s extrapolasse o valor limitante ($D_{sl} = 1,31 \text{ kg dm}^{-3}$). Este processo foi se agravando com o incremento do tráfego, com sensível redução do IHO (aproximadamente 65%) após dez passadas (T_{10}), levando à nulidade hídrica após as trinta passadas (T_{30}), com base no conceito do IHO (Figura 3).

As discussões levantadas até aqui tratam da sensibilidade do IHO no apontamento dos impactos sofridos pela estrutura do solo mediante a aplicação de forças externas. No entanto, apesar de haver consenso quanto à influência das propriedades físicas do solo no crescimento de plantas, as informações a esse respeito carecem de dados quantitativamente comprovados, cuja correlação tem sido difícil de validar cientificamente (van Lier e Gubiani, 2015).

O diagnóstico de alteração estrutural do solo por meio do caráter dinâmico do IHO merece esclarecimentos. Observa-se (Figura 3) que, numa faixa 60% da variação total na densidade do solo em decorrência do tráfego do trator agrícola (1,14 a 1,35 kg dm^{-3}) ocorreu sobreposição de valores absolutos de IHO, podendo ter amplitude definida por diferentes limites críticos (Figura 2) que, conseqüentemente, afetam, também de forma díspar, a capacidade do solo em fornecer ar e água em proporções adequadas, bem como as restrições mecânicas impostas pela matriz edáfica ao pleno desenvolvimento das plantas. Por esse motivo, tentativas de correlação com a produtividade apresentam limitações teóricas, uma vez que um mesmo valor de IHO pode refletir momentos estruturais distintos, sendo mais sensata a determinação destas relações pelos valores de densidade referência (por exemplo: Dsl ou Dsc), conforme proposto por Cecagno et al. (2016).

Ao considerar que na perda da qualidade física do solo, aqui quantificada pela redução do IHO, avalia-se a magnitude em que a condição estrutural do solo restringe o desenvolvimento das plantas (Lapen et al., 2004) e que este indicador engloba, num único índice, atributos físicos que afetam diretamente a produtividade agrícola, o mesmo tem sido frequentemente relacionado com o desenvolvimento das culturas (Guimarães Junnyor et al. 2015; Cecagno et al., 2016).

Ainda assim, os estudos não têm sido conclusivos quando se propõe relacionar os resultados de IHO aos de produtividade das culturas. Cabe ressaltar que as propriedades físicas do solo são parâmetros dependentes entre si, ou seja, a variação de um implica na oscilação dos demais. Para van Lier e Gubiani (2015), no caso da compactação do solo, é previsível a ocorrência de mudanças para quase todas as propriedades físicas do solo, sobretudo daquelas que afetam o IHO, o que de fato pode ser confirmado pela figura 3. A condenação de um determinado indicador, pautada apenas na ausência de resposta vegetal estatisticamente apreciável a partir das alterações estruturais impostas ao solo, pode invalidar os demais, dada a sua interdependência.

Qualidade física do solo e rendimento de girassol e capim-Paiaguás

A figura 4 relaciona a qualidade física do solo, considerando valores absolutos e relativos da densidade do solo, à produtividade de aquênios de girassol nos cultivos em monocultivo e consorciado com capim-Paiaguás na época de cultivo relativa à segunda safra. Observa-se que o monocultivo proporcionou maiores rendimentos, independentemente da condição estrutural do solo. Isto se deve provavelmente pela ausência de competição interespecífica, evidenciando, em primeira análise, a influência daninha do capim sobre a espécie anual, que se agrava com a degradação estrutural do solo.

Em outra perspectiva, o ajuste quadrático de elevada significância do coeficiente de determinação em todos os ajustes matemáticos ($R^2 > 0,78^{**}$; de acordo com a Figura 4) acusa o efeito benéfico de uma leve compactação do solo sobre o desenvolvimento da cultura avaliada, por meio da existência de um ponto de máxima produtividade de aquênios. Isto se deve à melhoria na retenção de água do Latossolo e do melhor contato solo-raiz (o que pode ser compreendido pelas figuras 2 e 3), uma vez que a estrutura granular é originalmente muito porosa (Reatto et al. 2009, Severiano et al., 2013; Guimarães Junnyor et al., 2015).

Analisando a produtividade de aquênios com o aumento de D_s (Figura 4A), observa-se valor máximo de 1,82 e 1,42 Mg ha⁻¹ em D_s de 1,26 e 1,24 kg dm⁻³, respectivamente no monocultivo e consorciado (queda aproximada de 22% no rendimento de girassol). Estes rendimentos podem ser considerados satisfatórios para a cultura em questão em condições de segunda safra, cuja produtividade média brasileira, segundo Conab (2017), é de 1,49 Mg ha⁻¹. Nestas condições, a D_s encontra-se muito próxima entre os sistemas e ligeiramente inferior ao valor limitante ao IHO (Figura 4).

Por outro lado, a partir da ocorrência da máxima produtividade de aquênios, observa-se drástica redução de rendimento (55%) e ainda mais acentuada no sistema consorciado com o capim (83% de redução na produtividade). Esses resultados demonstram a elevada suscetibilidade à compactação do solo pelo girassol, principalmente quando cultivado em condições climáticas adversas, como é o caso da segunda safra, sobretudo em cultivo simultâneo com plantas forrageiras.

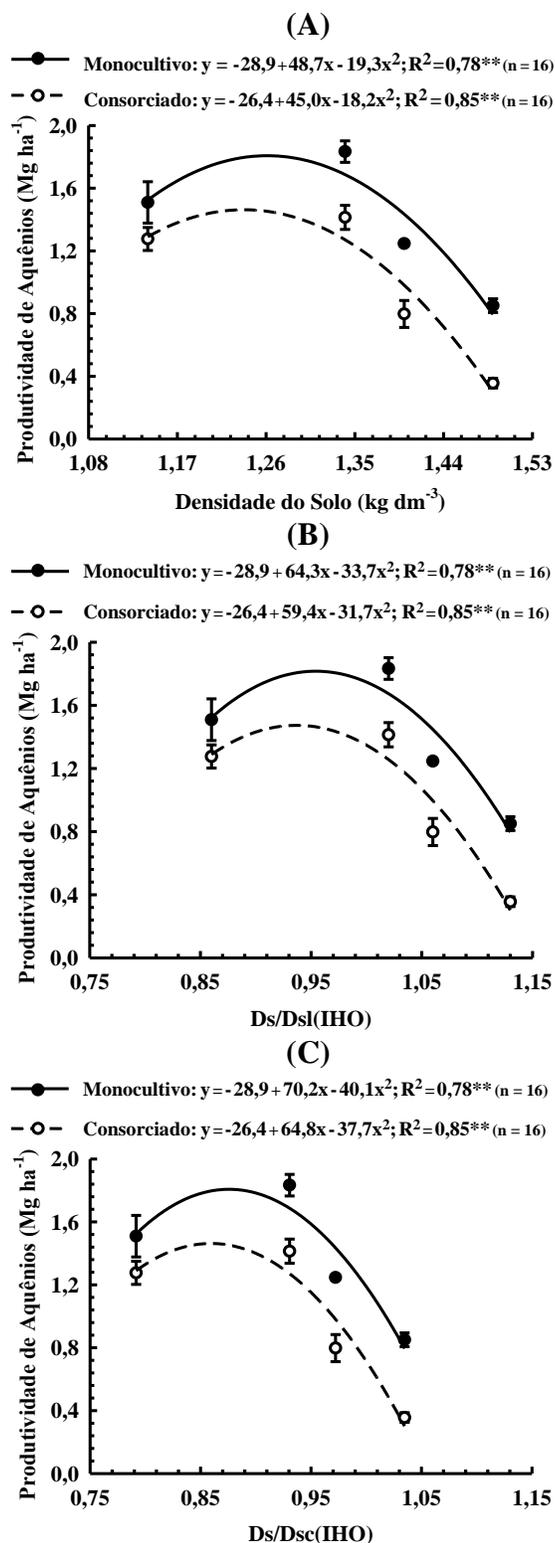


Figura 4. Produtividade de aquênios de girassol em segunda safra sob monocultivo e consorciado com capim-Paiaguás em função da compactação do solo, mensurada pelos indicadores densidade do solo (A), densidade relativa limitante (B) e densidade relativa crítica ao IHO (C), em um Latossolo Vermelho Distroférico típico do Cerrado brasileiro.

Por esta redução, pode-se considerar tecnicamente inviável o cultivo de girassol na segunda safra estanto o solo degradado fisicamente e, principalmente, em consórcio, sistema que caracteriza a principal modalidade de integração agricultura-pecuária adotada no Brasil. Embora atenda as premissas de intensificação do uso da terra por produzir grãos, forragem para os animais na entressafra e palhada para o sistema de plantio direto, a adoção das culturas em questão deve levar em consideração, portanto, o histórico de uso da terra.

Isto porque a compactação do solo pode levar à concentração superficial das raízes de plantas anuais (Gonçalves et al., 2006), tornando-as mais suscetíveis aos déficits hídricos que são comuns em cultivos de segunda safra. Por outro lado, os cultivares de *Brachiaria brizantha* tem se demonstrando tolerantes a camadas de impedimento mecânico (Bonelli et al.; 2011; Maia et al., 2014). Dessa forma, a limitação do desenvolvimento do girassol com o incremento da Ds amenizou os efeitos do sombreamento sobre o capim, tornando-o mais competitivo pelos fatores de produção agrícola (luz, água e nutrientes).

Como consequência, estando com a estrutura do solo adequada, sistemas consorciados com plantio da forrageira misturada ao adubo em maior profundidade promove supressão natural do capim. Os resultados demonstram que a adoção em áreas de extrema degradação física, além de inviabilizar o girassol pode levar até mesmo ao comprometimento do capim em sucessão, pela restrição imposta ao seu estabelecimento pleno nestas condições.

Segundo a função de pedotransferência sugerida por Severiano et al. (2011a), no valor de Ds de $1,30 \text{ kg dm}^{-3}$ correspondente à compactação benéfica para o solo em questão, a produtividade de aquênios embora próximos a máxima, decresceu 1,65 e 5,63% para o monocultivo e consorciado com o capim neste valor de densidade (figura 4A). Isto atesta que o modelo proposto, pautado na definição de compactação benéfica a partir da análise do IHO, pode ser usado convenientemente para a quantificação deste parâmetro em Latossolos oxidícos da região do Cerrado, a partir de análises granulométricas de rotina.

Salienta-se aqui que, na função de pedotransferência supracitada, o valor de RP utilizado na modelagem foi de 2,5 MPa, por ser amplamente utilizado como limitante em diversos estudos físicos do solo desenvolvidos no Brasil (Silva et al., 2014; Flavio Neto et al., 2015; Guimarães Junior et al., 2015). Este aspecto, associado ao desempenho do

girassol observado no experimento, sugere a necessidade em torno da definição teorema-limite do IHO, ressaltando a possibilidade de utilização de diferentes valores críticos sem alterar a aplicabilidade do conceito deste indicador de qualidade física.

Embora a densidade do solo seja a medida quantitativa mais direta no diagnóstico da compactação, ressalva a influência exercida pela textura e estrutura do solo nesse atributo, limitando a escolha de um valor absoluto de referência (Reichert et al., 2009; Severiano et al., 2011a). Apresenta-se como alternativa a determinação da densidade do solo relativa. Este parâmetro representa um valor de referência que permite a comparação entre solos, sistemas de manejo e uso distintos. Para tanto, são considerados valores associados à D_s , no estudo, D_{sl} e D_{sc} pelo IHO. As relações entre rendimento do girassol e valores de densidade relativa estão apresentadas nas figuras 4B e 4C.

Esses valores correspondem, apenas, à normalização matemática dos resultados de densidade do solo obtidos nas diferentes intensidades de tráfego avaliadas. Assim, eventuais efeitos das alterações estruturais do solo no desenvolvimento do girassol na segunda safra e do capim-Paiaguás no período de entressafra serão quantificados em mesma magnitude, independente da escala do atributo, porém com a vantagem de permitir inferências em torno da qualidade física do solo e a comparação dos resultados entre estudos realizados em solos distintos.

As produtividades máximas de aquênios de girassol foram obtidas para $D_s/D_{sl} = 0,95$ e $0,94$ e de $D_s/D_{scIHO} = 0,88$ e $0,86$, para os sistemas de monocultivo e consorciado, respectivamente. Estes valores corroboram as afirmações que uma leve compactação do solo se torna benéfica às culturas. Por outro lado, na normalização utilizada por Cecagno et al. (2016), ao avaliarem os efeitos da compactação do solo sobre o rendimento de soja em um sistema de integração agricultura-pecuária de longo prazo sob diferentes intensidades de pastejo, constataram-se que o IHO foi inadequado e sem relação direta com o desenvolvimento da cultura, uma vez que este fator de produção dependeu principalmente do regime pluviométrico.

Entretanto, por se tratar de indicadores relativos, o desempenho agrônomico de plantas cultivadas são os mesmos verificados para a D_s absoluta, sendo expresso pelos coeficientes de determinação (R^2) embora com coeficientes de ajustes do polinômio distintos para a magnitude da variável independente em questão (Figura 4). Ressalta-se

então que a resposta (ou não) das culturas deve-se à estrutura do solo, alterada pelo processo de compactação do solo, e não a algum indicador em específico. Por esse motivo, a avaliação dos impactos da agricultura moderna no desenvolvimento das culturas deve levar em consideração, fundamentalmente, as alterações estruturais do solo e as a sustentabilidade das plantas adotadas nos planos de rotação de cultura no Cerrado brasileiro.

Ademais, Ferreira et al. (2016) demonstraram que a posição de amostragem sob o sistema de plantio direto afeta os resultados das propriedades físicas do solo. Isto porque a semeadura mecânica promove a descompactação do solo no sulco de plantio, condicionando boas condições físicas do solo para germinação de sementes e estabelecimento de plantas nesta posição. Sob adequados conteúdos de água no solo, os efeitos adversos da estrutura do solo, sob o desenvolvimento das culturas, podem então ser amenizados, ou até mesmo eliminados, notadamente quando os demais fatores de produção se apresentam em condições ideais.

Dessa forma, torna-se importante salientar a influência do regime pluviométrico no rendimento da cultura. Observa-se pela figura 1, interrupção das chuvas ainda na fase vegetativa da cultura. Nesta situação, a influência da compactação do solo sob o rendimento da cultura é decisiva, por restringir o aprofundamento radicular, conseqüentemente no suprimento demanda hídrica da cultura.

Recentemente, o uso do IHO como indicador da produtividade das culturas e da estrutura do solo foi questionado por van Lier e Gubiani (2015) pela adoção de teores-limite fixos, bem como pela ausência de correlação com o rendimento de culturas em algumas situações. Por outro lado, há consenso entre os pesquisadores em aprimorar o referido indicador de qualidade física, principalmente no que diz respeito a esses valores de referência, visando sua maior capacidade preditiva, inclusive, considerando o dinamismo do sistema solo-água-planta-atmosfera em sua mensuração.

Salienta-se também que o IHO se trata de um indicador de elevada correlação à densidade do solo, atributo este de simples avaliação e interpretação. Neste ponto, destaca-se a existência de propostas de aprimoramento do IHO que constituem profundas contribuições para o avanço do estado da arte em física do solo, notadamente à sua acuracidade como indicador robusto no estudo das relações agronômicas, já que a sua aplicação no diagnóstico da condição estrutural do solo possui aceitação universal

(exemplos: Silva et al., 1994; Bengough et al., 2006; Reichert et al., 2009; Severiano et al., 2011a; Seben Junior et al., 2014; Flávio Neto et al., 2015; Silva et al., 2015; Fashi e Sharifi, 2017; Ferreira et al., 2017).

Neste sentido, Silva et al. (2015) apresentam uma proposta de grande relevância à modelagem do IHO ao sugerir a substituição do ponto de murcha permanente pela umidade crítica, calculada a partir da evapotranspiração potencial da cultura em questão. Com esta sugestão, elimina-se a utilização de valores fixos relativos ao limite inferior de potencial mátrico, ao considerar a fenologia vegetal, uma vez que a demanda evapotranspiratória aumenta de forma não linear com o potencial matricial. Tais constatações corroboram com Kukal et al. (2005) e Liu et al. (2012), que consideraram respostas fisiológicas ao estresse hídrico em potenciais matriciais na ordem de 30 a 100 kPa, isto é, dentro da faixa de água disponível.

Entretanto, considerando que em solos tropicais, notadamente àqueles localizados na região do Cerrado brasileiro, a resistência do solo à penetração é o limite que mais restringe o IHO com o incremento da compactação (Severiano et al., 2011a; Tormena et al., 2017), torna-se necessário, por meio da pesquisa científica, elucidar valores de referência para este atributo. Neste sentido, deve-se considerar as exigências das diversas plantas cultivadas ou até mesmo a sua substituição por outro relacionado à magnitude com que a matriz do solo resiste à deformação, o que configura o impedimento mecânico ao crescimento radicular (Singer e Ewing, 2000).

A pressão de preconsolidação, por exemplo, obtida a partir do ensaio de compressão do solo (Severiano et al., 2013), além de ser considerada um indicador da suscetibilidade do solo à compactação (Peng et al., 2004) por representar a máxima pressão que foi aplicada ao solo no passado, é também considerada a pressão que o sistema radicular das plantas tem que superar no solo, para poder crescer (Römken e Miller, 1971). Estudos associando os indicadores de qualidade física IHO à pressão de preconsolidação já foram iniciados (Severiano et al., 2011b), embora ainda não sejam propositivos à substituição do atributo obtido pelo penetrômetro.

Até que seja proposto avanços relacionados ao limite crítico inferior associado ao impedimento mecânico, uma alternativa com efeito imediato seria considerar valores de referência disponíveis em literatura e associados às culturas de interesse na determinação

do IHO. Considerando então as colaborações disponibilizadas nos últimos anos na literatura agrônômica, para a cultura do milho cultivado no Brasil, por exemplo (Foloni et al., 2003; Silva et al., 2004; Freddi et al., 2007a,b; 2009; Beutler et al., 2009; Deperon Junior et al., 2016), destaca que o valor de RP médio encontrado foi de 1,30 MPa, variando de 0,9 a 1,65 de acordo com as condições experimentais de cada estudo. Neste sentido, o presente trabalho apresentará, em sequência, uma proposta de valores de resistência do solo à penetração limitante ao girassol e ao capim-Paiaguás cultivados em segunda safra.

Os resultados apresentados até o momento elucidam a elevada suscetibilidade do girassol a impedimentos mecânicos no solo, e exige cautela no diagnóstico estrutural do solo que, por sua vez, é negligenciada pelos agricultores brasileiros. Isto pode levar a interpretações errôneas de baixos rendimentos de cultivos em segunda safra que, na maioria das vezes, é atribuída aos déficit hídrico característico deste período.

Por outro lado, é sabido que o gênero *Brachiaria* apresentam certa tolerância à compactação do solo (Bonelli et al., 2011; Sousa Neto et al., 2013; Souza et al., 2013), sendo consideradas, inclusive, biotecnologias de descompactação (Salton et al., 2014; Silva et al., 2014a; Flávio Neto et al., 2015). Observa-se (Figura 5) ajustes da produtividade de capim-Paiaguás em função da densidade do solo, variando de linear (Figura 5A), polinomial quadrático (5A e 5B) à não significância para o atributo em questão (5D).

Devendo-se ao fato de algumas forrageiras se desenvolverem satisfatoriamente em solos compactados, desde que apresente condições químicas adequadas para o desenvolvimento das plantas (Maia et al., 2014; Silva et al., 2014; Flávio Neto et al., 2015). Neste estudo, o fato do manejo da fertilidade ter se baseado na cultura de grãos favoreceu o desenvolvimento do capim, mesmo estando a estrutura do solo em condições adversas.

Embora não tenha apresentado comportamento único em relação à compactação do solo, o capim demonstrou maior resistência à compactação que o girassol. Isto elucidada a ocorrência de interpretações edafoclimáticas específicas a cada planta, mesmo quando inseridas concomitantemente num mesmo ambiente de produção, reforçando a necessidade de aferição de teores-limite restritivos às plantas, visando aos ajustes no IHO.

O capim consorciado com girassol se ajustou linearmente ao incremento da densidade do solo para o corte de julho/2014 e pelo modelo quadrático na avaliação de setembro/2014, conforme demonstrado pela Figura 5A. Considerações a este respeito, o

primeiro corte se deu por ocasião da colheita da cultura anual, ressaltando o efeito inicial de competição imposta pelo girassol.

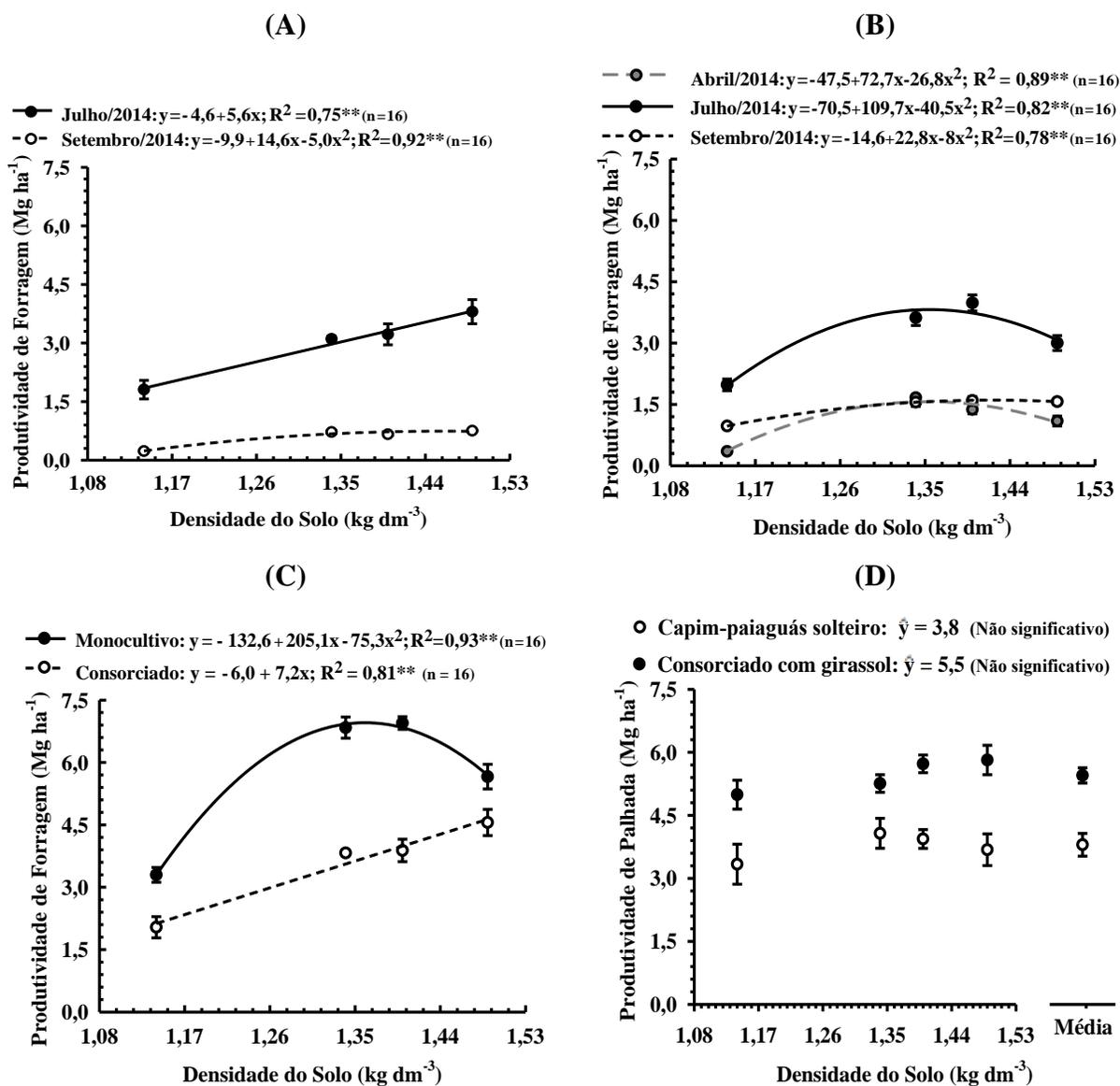


Figura 5. Produtividade de forragem de *Brachiaria brizantha* cv. BRS Paiaguás sob monocultivo e consorciado com girassol, em função da compactação de Latossolo Vermelho Distroférrico típico do Cerrado brasileiro. A: capim-Paiaguás consorciado com girassol; B: capim-Paiaguás em monocultivo; C: produtividade total de forragem na entressafra; D: produtividade de palhada para o plantio direto.

Avaliando a produção da parte aérea no sistema consorciado deste experimento, Linhares (2015) demonstrou que, por ocasião da colheita de forragem para ensilagem, na

Ds de $1,38 \text{ kg dm}^{-3}$ (valor entre os tratamentos T_2 e T_{10}) cada cultura possuía 50% da biomassa total e com predomínio de capim a partir de então. Isto significa redução gradativa do fator sombreamento do girassol sob a pastagem, sendo constatadas pelo autor, alterações morfológicas na planta forrageira características da restrição luminosa.

Neste estudo, a colheita dos grãos ocorreu no final da fase de maturação e, portanto em estágio fenológico mais avançado em relação à ensilagem. Sugere-se que a supressão da competição intraespecífica ocorreu à medida da dessecação e senescência das folhas do girassol. Com isso, espera-se, ao final do ciclo da cultura de grãos, resposta crescente em termos de produtividade de forragem e diretamente proporcional à densidade do solo observada.

Por outro lado, a avaliação ocorrida em setembro/2014 (intervalo de 67 dias) apresentou baixa produtividade de forragem, que se ajustou ao modelo polinomial quadrático, em função da densidade do solo com ponto de máxima em $1,46 \text{ kg dm}^{-3}$ e rendimento médio 550% inferior ao primeiro corte (julho/2014). Por esses motivos, a produtividade o total de forragem consorciada se ajustou ao modelo linear e inferior, porém, a produtividade do monocultivo independentemente das condições estruturais do solo, reiterando os efeitos da competição interespecífica (Figura 5C).

Para o capim em monocultivo (5B), a produtividade de forragem se ajustou ao modelo polinomial quadrático nos três cortes de avaliação, com produtividade crescente até a densidade do solo média de $1,38 \text{ kg dm}^{-3}$. Este valor restritivo é inferior aos resultados obtidos em outras pesquisas [$1,49 \text{ kg dm}^{-3}$ para Bonelli et al. (2011), $1,57 \text{ kg dm}^{-3}$ para Souza Neto et al. (2013) e $1,60 \text{ kg dm}^{-3}$ para Santos et al. (2008), avaliados em solos de textura e estrutura semelhantes] e pode estar relacionado ao estresse hídrico em todo período de avaliação do capim neste trabalho.

Em adição, Severiano et al. (2010) esclarecem que, em condições de severa degradação física, o capim consome parcialmente os fotoassimilados para estabelecimento do sistema radicular e reservas orgânicas, que neste trabalho foram preservadas pela altura de corte do capim. Isto ajuda elucidar o fato da produtividade de palhada, após a dessecação do capim ter se mostrado insensível à compactação do solo.

Analisando a produtividade desta palhada nos sistemas consorciados e sob monocultivo ($5,5$ e $3,8 \text{ Mg ha}^{-1}$, respectivamente - Figura 5D), salienta-se que os valores

são inferiores à $6,0 \text{ Mg ha}^{-1}$, considerado por Bayer (1996) para implantação do sistema plantio direto em sucessão. Ainda assim, podem ser considerados satisfatórios por estarem próximos do valor de referência, notadamente no sistema consorciado. Considera-se ainda a natureza químico-bromatológica do capim-Paiaguás, que se destaca pela elevada relação C:N (Santos et al., 2016), retardando sua decomposição (Costa et al., 2016). Considera-se ainda, a ciclagem de nutrientes pela inserção de *Brachiaria sp.* em sistemas de integração agricultura-pecuária, notadamente do fósforo e potássio, que são as principais limitações nutricionais em solos brasileiros (Garcia et al., 2008; Nesper et al., 2015).

Neste ponto, destaca-se a vantagem da integração agricultura-pecuária com o cultivo consorciado na época da segunda safra, pelas múltiplas funções da pastagem neste sistema (produção animal a pasto, palhada e prestação de serviços ambientais). Para tanto, faz-se necessário que o solo esteja com a estrutura preservada. Embora promova ligeira redução na produtividade do girassol (Figura 4), o sistema avaliado garante oferta satisfatória de forragem para o período destinado à pecuária (a ser discutido a seguir), e ainda forma cobertura morta para o sistema de plantio direto (Figura 5D).

Isto porque, conforme demonstrado por Linhares (2015), a competição luminosa com o girassol promove alongamento de colmos e redução proporcional de folhas do capim-Paiaguás, levando ao acamamento. Com isso, a biomassa da forragem se situa predominantemente abaixo da altura de corte para simulação de pastejo, não sendo considerada oferta de forragem à alimentação animal no primeiro corte (quantificada pela figura 5A) e, por conseguinte, convertida em palhada para o plantio direto após a dessecação via herbicidas. Já a baixa produtividade de forragem (consorciada ou monocultivo) nos cortes subsequentes se deve às condições de inverno brasileiro (junho a setembro), caracterizado pela escassez de chuvas e redução da temperatura média (Figura 1). Nesta estação, são frequentes valores inferiores a 15°C , tida como crítica ao crescimento de *Brachiaria sp.*

Faz-se necessário no planejamento das atividades agropecuárias o adequado diagnóstico físico do solo, pelo fato da produtividade do girassol ser inviabilizada em condições de degradação estrutural do solo e notadamente quando cultivado em simultâneo à planta forrageira na segunda safra (Figura 4). Salienta-se que a modernização da agricultura brasileira tem se alicerçado na mecanização de todas as etapas do processo

produtivo. Associada à topografia favorável, práticas de conservação do solo têm sido suprimidas sob a premissa de aumento de rendimento operacional de máquinas agrícolas. Nas áreas destinadas à produção de grãos, têm se observado o plantio “morro abaixo”, isto é, paralelo ao sentido do declive e a eliminação gradativa de terraços agrícolas, que consiste na construção de barreiras perpendiculares ao relevo para interceptação de enxurrada. Mesmo não havendo recomendação agrônômica de remoção, no sudoeste do estado de Goiás, já não há mais áreas agricultáveis com esta prática conservacionista.

Embora os pesquisadores tenham desenvolvido tecnologias de produção sustentável, muitos agricultores e pecuaristas ainda não as adotam (Tollefson, 2010). A negligência constitui o principal fator de perda da sustentabilidade da atividade agropecuária, tendo na compactação do solo oriunda do uso indiscriminado da mecanização e supressão de práticas conservacionistas, fatores primordiais da perda da sua fertilidade física (Pagliai et al., 2003; Mosaddeghi et al., 2007; Schäffer et al., 2008 Reichert et al., 2009; Severiano et al., 2013; Guimarães Junnyor et al., 2015) e aumento dos processos erosivos (Krümmelbein et al., 2008), acelerando o processo de assoreamento dos cursos hídricos.

Por esse motivo é que a pesquisa agropecuária brasileira tem destacado a importância do diagnóstico estrutural do solo, no planejamento das atividades agropecuárias. Com base nesses resultados de produtividade, além de assegurar a produtividade vegetal e, por conseguinte, a rentabilidade da atividade, tem-se que a substituição de um segundo cultivo de grãos em solos compactados pelo monocultivo de capins do gênero *Brachiaria*, além de forragem em quantidade (Figura 5) e em qualidade no período de entressafra (Maia et al., 2014; Euclides et al., 2016; Santos et al., 2016), também contribui para a descompactação biológica (Salton et al., 2014; Silva et al., 2014; Flávio Neto et al., 2015). Isso prevê o aumento de produtividade das culturas em sucessão (Chioderoli et al., 2012).

De acordo com Maia et al. (2014), a *Brachiaria brizantha* em sistemas de integração agricultura-pecuária já produz mais biomassa na entressafra das culturas de grãos que outras espécies do gênero. Entretanto, o melhor desempenho na estação seca do capim-Paiaguás entre os cultivares disponíveis, em termos quantitativos e nutricionais, resulta em maior ganho de peso em bovinos (Euclides et al., 2016). Além da superioridade produtiva, essa vantagem também se deve ao não florescimento nesta época de cultivo, o

que reduziria o seu valor nutritivo já que as sementes atuam como dreno das reservas orgânicas vegetais (Silva e Nascimento Júnior, 2007). Deve-se também ressaltar a elevada eficiência de dessecação para formação de palhada (Machado e Valle, 2011).

Por esses motivos, o capim em estudo é uma importante alternativa de pastejo na estação seca, conseqüentemente, na entressafra de grãos, contribuindo para elucidação do principal problema da pecuária brasileira a pasto, a sazonalidade de produção de forragem. Em resposta à estacionalidade, associada à baixa suplementação nutricional, é que a idade média de abate do rebanho brasileiro pode ser considerada alta. Nestas condições, os animais ganham peso no verão chuvoso, perdendo-o no inverno seco subsequente. Esse fenômeno é conhecido no Brasil como “boi sanfona”.

“Terceira e quarta safras” e “boi safrinha” são termos frequentemente utilizados para se referir às modalidades de integração agricultura-pecuária cuja pastagem é inserida em consorciação à cultura de grãos na segunda safra ou em monocultivo após o cultivo de verão, respectivamente. Esses resultados demonstram que a redução da produtividade de aquênios de girassol no sistema consorciado (Figura 4) é compensada então pela viabilização da pecuária nos sistemas integrados.

Numa primeira análise, então, o consórcio de girassol com *Brachiaria brizantha* cv Paiaguás pode ser considerado uma prática inadequada por reduzir a produtividade de aquênios (Figura 4). Para isso técnicas de supressão da competição têm sido desenvolvidas [e.g.: plantio defasado (Costa et al., 2016; Santos et al., 2016), ou manejo de reguladores de crescimento do capim (Crusciol et al., 2010)]. Tais práticas podem comprometer o estabelecimento do capim e até inviabilizar a renovação indireta da pastagem. Mesmo produzindo menos forragem que o capim sob monocultivo, a capacidade de suporte animal da pastagem consorciada assegura lotação considerável (muitíssimo acima da média das pastagens brasileiras) para o período de cultivo (Figura 5C) e satisfaz as premissas de produção de palhada para semeadura direta (Figura 5D).

Esta intensificação do uso da terra, proporcionada pela adoção integração agricultura-pecuária após a cultura de verão (primeira safra), é tecnicamente viável (índices agrônômicos supracitados), economicamente resiliente, diversificando a produção (Bonaudo et al., 2014; Moraes et al., 2014), socialmente justo, pela fixação de recursos humanos no campo, dada a otimização e o uso racional da mão de obra (Hoagland et al.,

2010) e ambientalmente correta (Sulc e Tracy, 2007), por: (i) promover o sequestro de carbono atmosférico (Carvalho et al., 2014), (ii) descompactar biologicamente o solo, contribuindo para o controle da erosão (Flavio Neto et al., 2015), (iii) suprimir de doenças e plantas daninhas, reduzindo o uso e a seleção de plantas resistentes à herbicidas (Derksen et al., 2002; Sulc e Franzluebbbers, 2014) e (iv) ciclar nutrientes, reduzindo a demanda por fertilizantes sintéticos (Garcia et al., 2008; Peyraud et al., 2014). Recentemente, a IAP tem sido utilizada pelo governo do Brasil em definições de políticas públicas de crédito agrícola, de controle de desmatamento e de mitigação de gases de efeito estufa. Essas ações se destacam como compromissos assumidos no âmbito do acordo climático internacional de Paris – COP 21 (Lal, 2016; Medina e Santos, 2017; Sá et al., 2017).

Essa postura, subsidiada pela comunidade científica brasileira, foi recentemente abordada por Tollefson (2010) ao se referir ao Brasil como a “fazenda global”, sendo questionado se significaria ameaça à preservação da Amazônia. É importante, entretanto, salientar a responsabilidade brasileira frente à segurança alimentar (a Organização das Nações Unidas para a Alimentação e Agricultura prevê crescimento da produção agrícola em torno de 40% e superior a qualquer outro país), aliada, porém à necessidade de manutenção da biodiversidade em todos os outros biomas.

São então objetivos convergentes, a produção de alimentos e a preservação ambiental. A solução para a questão está na adoção de tecnologias de produção integradas numa mesma área, de componentes pecuário e agrícola (podendo ainda incluir espécies florestais). Considera-se sensato o relatório de Tollefson (2010), em que, aumentando a taxa de lotação animal das pastagens, dobra-se a área agrícola e mantém o mesmo rebanho sem avançar o desmatamento em todos os biomas brasileiros. Não há dúvida em se afirmar a desnecessidade de expansão da fronteira agrícola brasileira para aumentar a produção de alimentos, mas sim em intensificar o uso da terra nas áreas já incorporadas ao processo produtivo.

Adequação dos teores limites de resistência do solo à penetração do intervalo hídrico ótimo

Pelos resultados e também com base no comportamento dos solos da região dos Cerrados, discutidos anteriormente, ressalta-se a necessidade de aprimoramento da

resistência à penetração limitante, uma vez que este fator tem sido apontado como o principal responsável pela redução do indicador da qualidade física do solo aqui avaliado.

Para tanto, faz-se necessário considerar os valores de densidade do solo correspondente à máxima produtividade de cada cultura (1,25 e 1,39 kg dm⁻³, para o girassol e o capim-Paiaguás, respectivamente) e os conteúdos de água no solo correspondentes ao ponto de murcha permanente nas referidas densidades (0,23 e 0,26 dm³ dm⁻³), ocasião em que ocorre a substituição do limite inferior do IHO. Inserindo-os na equação 2, define-se os valores de resistência à penetração (RP) de 1,7 e 3,9 MPa como limitantes.

Assim, a figura 6 apresenta a proposta de modelagem do intervalo hídrico ótimo considerando os valores de RP definidos, em contrapartida ao valor arbitrário utilizado anteriormente (2,5 MPa, Figura 3). Ao adotar valores de RP de referência, obtidos a partir da máxima produtividade vegetal, observa-se que as culturas em consorciação reconhecem de forma diferente o ambiente edáfico de produção, com reflexos na magnitude do indicador biofísico de qualidade do solo estudado (Figura 6A).

As limitações no IHO para o girassol se deram na faixa de Ds variando de 1,25 a 1,37 kg dm⁻³, ao passo que, para o capim, as restrições se deram a partir de 1,39 kg dm⁻³ até o valor de 1,51 kg m⁻³ (Figura 6B). Isso sinaliza que, enquanto o girassol já se encontrava em situação de severa restrição física (IHO = 0 na Ds = 1,37 kg dm⁻³), o capim-Paiaguás ainda dispunha de condição estrutural plena ao seu crescimento. Observa-se então, que apenas 30% da faixa de Ds obtida após a aplicação dos tratamentos de tráfego (T₀ a T₃₀) foi favorável ao cultivo do girassol, enquanto 70% desta foi benéfica ao crescimento do capim (Figura 6B), o que, de fato, justifica o desempenho das culturas (Figuras 4 e 5).

A adoção do IHO, como índice agrônomo na orientação do manejo da compactação para culturas se mostra eficiente por possibilitar tomada de decisão em torno da planta a ser cultivada. Ao diagnosticar condições de severa degradação da estrutura do solo, sugere-se a destinação da área ao monocultivo de capim-Paiaguás após a colheita da primeira safra, visando a produção de forragem em quantidade (Figura 5) e em qualidade (Maia et al., 2014; Santos et al., 2016) em toda entressafra, possibilitando, ainda, a recuperação física desse quadro pela descompactação biológica do solo (Salton et al., 2014; Silva et al., 2014a; Flávio Neto et al., 2015).

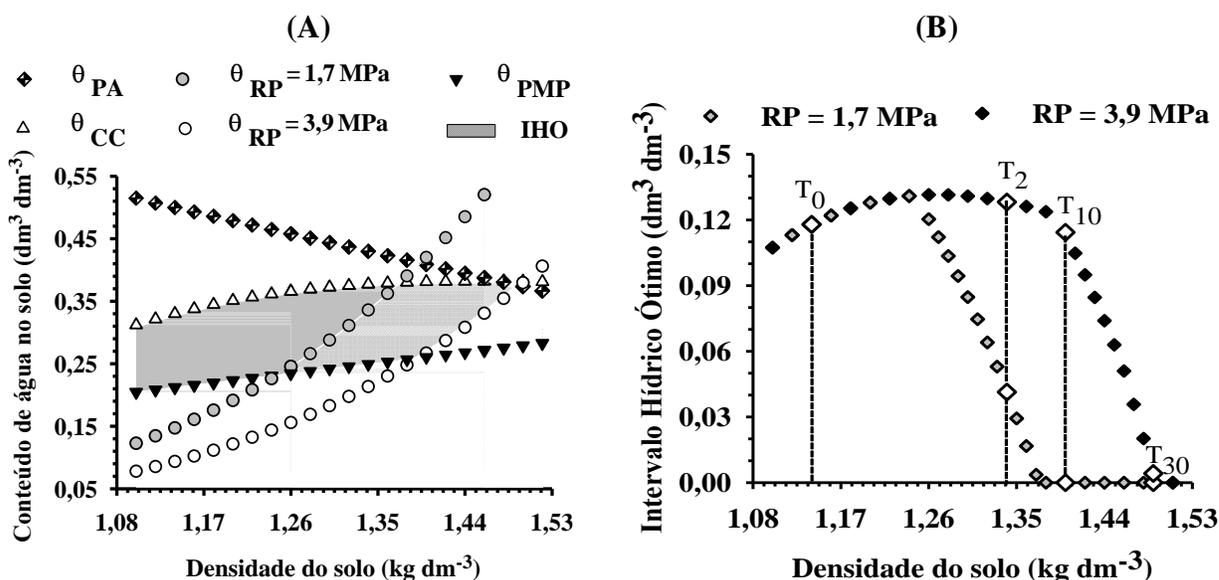


Figura 6. Variação do conteúdo de água no solo (θ) com o incremento da densidade do solo (Ds) nos teores limites de capacidade de campo (θ_{CC} : -6 kPa), ponto de murcha permanente (θ_{PMP} : -1500 kPa), porosidade de aeração a 10% (θ_{PA}) e resistência do solo à penetração de 1,7 e 3,9 MPa (θ_{RP}) (A) e; variação do intervalo hídrico ótimo com o incremento de Ds, considerando-se a RP limitante às medidas restritivas obtidas para o girassol e o capim-Paiaguás (B), na camada de 0-0,15 m de um Latossolo Vermelho Distroférico típico em sistema de integração agricultura-pecuária. A área preenchida e hachurada representa o IHO em cada situação. $T_0 = 0$, $T_2 = 2$, $T_{10} = 10$ e $T_{30} = 30$ passadas no mesmo lugar de um trator agrícola e tara de 4,5 Mg.

Salienta-se que a resistência do solo ao penetrômetro é um índice integrado pela densidade do solo, conteúdo de água, textura, estrutura, tipo de argila e demais constituintes do solo. Apesar das limitações que esses aparelhos apresentam, pela falta de medidas diretas da própria raiz, os mesmos preveem as melhores estimativas da resistência do solo para o crescimento de raízes (Bengough e Mullins, 1990; Dexter et al., 2007).

Considerações a respeito de valores de referência para resistência do solo à penetração de raízes para as culturas avaliadas, fazem-se necessárias. Rosolem et al. (2002) sugeriram o valor de 0,86 MPa para que o crescimento radicular do girassol seja reduzido à metade do seu máximo potencial, valor este inferior ao proposto.

Em adição, deve-se considerar que em áreas sob plantio direto ou integração agricultura-pecuária, a descompactação biológica do solo oriunda do crescimento radicular de plantas forrageiras, notadamente do gênero *Brachiaria* formam de bioporos, criando

assim, rotas alternativas ao enraizamento. Ehlers et al. (1983) observaram que os valores de RP limitante para a aveia em solo não revolvido foram cerca de 142% superiores àqueles obtidos em solo revolvido, fato que atribuíram à presença de bioporos que, curiosamente, ocupavam menos de 1% do volume total do solo. Em áreas consolidadas nesses sistemas de manejo conservacionista, há discussões em se considerar valores de RP superiores aos preestabelecidos, em torno de 3,5 MPa para as culturas de grãos (Tavares Filho et al., 2001; Tormena et al., 2007; Blainski et al., 2012).

A análise da produtividade relativa de aquênios de girassol e de forragem de capim-Paiaguás em função da compactação do solo, mensurada pela densidade do solo, torna claro a diferenciação do ambiente edáfico pelas plantas avaliadas (Figura 7A). Entretanto, ao considerar-se o IHO específico à cada espécie, é constatado o avanço nos estudos de biofísica do solo, pela elevada correlação com o crescimento das plantas (Figura 7B). Os resultados subsidiam a proposição dos valores de resistência do solo à penetração para as culturas estudadas, por condicionar a máxima produtividade relativa na densidade limitante ($D_s/D_{sl} = 1$).

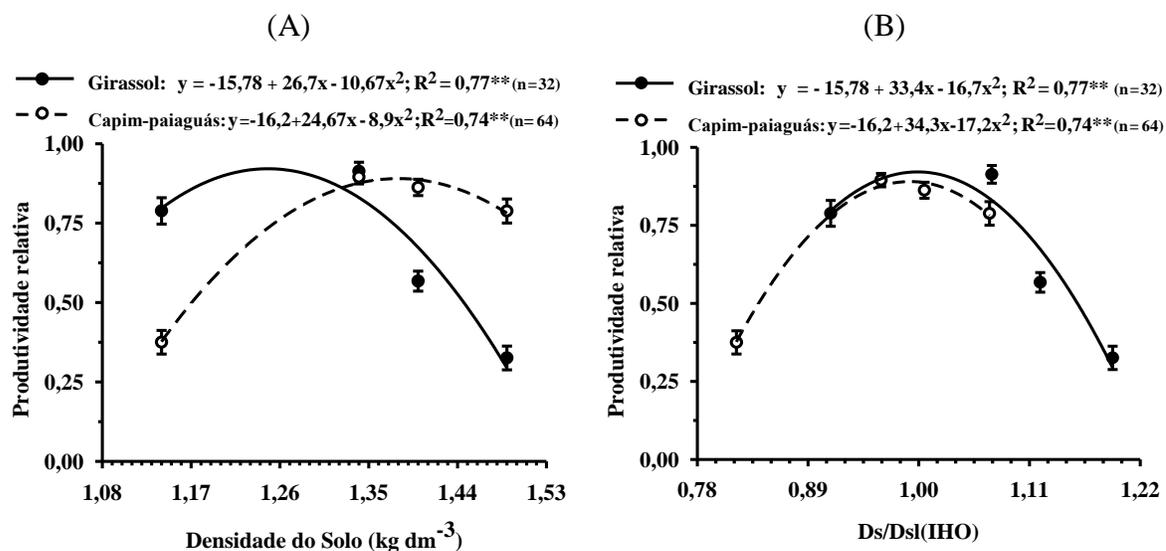


Figura 7. Produtividade relativa de aquênios de girassol e de forragem de capim-Paiaguás em função da compactação do solo, mensurada pelos indicadores densidade do solo (A) e pela densidade relativa limitante ao IHO (B), em um Latossolo Vermelho Distroférico típico do Cerrado brasileiro.

Este estudo, portanto, não só reforça o uso potencial do IHO no diagnóstico da compactação do solo e do rendimento das culturas, mas também, aponta as limitações a serem superadas por pesquisas futuras, principalmente associadas à definição dos teores-limites do IHO. Porém, é inegável a sua eficiência no monitoramento das alterações estruturais e do desenvolvimento das culturas. O avanço do conhecimento nesta área da física do solo depende, nesse contexto, da continuidade dos estudos em busca da elucidação dos sistemas integrados de produção agropecuária.

Pelos motivos supracitados, o estudo significa avanço por indicar valores de referência de resistência à penetração para duas culturas que, embora consorciadas, apresentaram respostas diferenciais às condições estruturais do solo. Pela figura 7, é possível verificar a elevada suscetibilidade do girassol à compactação do solo em oposição ao capim-Paiaguás, que se mostrou tolerante. Esses resultados estão coerentes à modelagem do IHO para as culturas em questão, quando considera valores de referência para cada cultura (Figura 6).

CONCLUSÕES

- A qualidade física do solo submetido ao tráfego agrícola em sistemas de integração agricultura-pecuária pode ser adequadamente descrita por meio do intervalo hídrico ótimo;
- Os indicadores de qualidade física, densidade do solo e intervalo hídrico ótimo, apresentaram robustez na avaliação da produtividade vegetal de girassol e capim-Paiaguás em função da compactação do solo;
- O girassol cultivado em período de segunda safra se mostrou extremamente sensível à compactação do solo, com redução de produtividade superior a 50% quando cultivado em monocultivo e a 80% quando consorciado com o capim-Paiaguás;

- O capim-Paiaguás se mostrou resistente à compactação do solo, com desempenho satisfatório na produção de forragem para pastejo e palhada para o plantio direto sob condições de “terceira” e “quarta” safra agrícola.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDERSON, C.; ZOLIN, C. A.; SENTELHAS, P. C.; HAIN, C. R.; SEMMENS, K.; YILMAZ, M. T.; GAO, F.; OTKING, J. A.; TETRAULT, R. The Evaporative Stress Index as an indicator of agricultural drought in Brazil: An assessment based on crop yield impacts. **Remote Sensing of Environment**, v.174, n.2, p. 82-89, 2016.

ASSOULINE, S.; TAVARES FILHO, J.; TESSIER, D. Effect of compaction on physical and hydraulic properties: experimental results and modeling. **Soil Science Society of American Journal**, v.61, n.2, p.390-398, 1997.

BAYER, C. Dinâmica da matéria orgânica em sistemas de manejo de solos. 1996. 241p. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

BENGHOUGH, A. G.; BRANSBY, M. F.; HANS, J.; McKENNA, S. J.; ROBERTS, T. J.; VALENTINE, T. A. Root responses to soil physical conditions: growth dynamics from field to cell. *Journal of Experimental Botany*, v.57, n.2, p. 437-447, 2006.

BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F.; MENGATTO, L. H.; MENGATTO, L. H.; ALVES, J. B.; WAGNER, G. P. C. Impacto do tráfego de máquinas na qualidade física do solo e produtividade de milho em Argissolo. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v.31, n.2, p. 359-364, 2009.

BLAINSKI, É.; TORMENA, C. A.; GUIMARÃES, R. M. L.; NANNI, M. R. Qualidade física de um Latossolo sob plantio direto influenciada pela cobertura do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.36, p.79-87, 2012.

BONAUDO, T. et al. Agroecological principles for the redesign of integrated crop-livestock systems. *European Journal of Agronomy*, v.57, p.43-51, 2014.

BONELLI, E.A.; SILVA, E.M.B.; CABRAL, C.E.A.; CAMPOS, J.J.; SCARAMUZZA, W.L.M.P.; POLIZEL, A.C. Compactação do solo: Efeitos nas características produtivas e morfológicas dos capins Piatã e Mombaça. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.15, n.3, p.264–269, 2011.

CARVALHO, J. L. N.; RAUCCI, G. S.; FRAZÃO, L. A.; CERRI, C. E. P.; BERNOUX, M.; CERRI, C. C. Crop-pasture rotation: a strategy to reduce soil greenhouse gas emissions in the Brazilian Cerrado. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v.183, p.167–175, 2014.

CECAGNO, D.; COSTA, S.E.V.G.A; ANGHINONI, I; KUNRATH, T.R; MARTINS, A. P; REICHERT, J.M.; GUBIANI, P.I.; BALERINI, F.; FINK, J.R.; CARVALHO, P.C.F. Least limiting water range and soybean yield in a long-term, no-till, integrated crop-livestock system under different grazing intensities. **Soil and Tillage Research**, v.156, p.54–62, 2016.

CHIODEROLI, C. A.; MELLO, L. M. M.; GRIGOLLI, P. J.; FURLANI, C. E. A.; SILVA, J. O. R.; CESARIN, A. L. Atributos físicos do solo, produtividade de soja em sistema de consórcio milho e braquiária. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, n.1, p. 37-43, 2012.

Conab – Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da safra brasileira de grãos**, safra 2016/17. Brasília: Conab, 171 p., 2017. Disponível em: <www.conab.gov.br> Acesso em: 07/08/2017.

COSTA, R.R.G.F.; COSTA, K.A.P.; SANTOS, C.B.; SEVERIANO, E.C.; EPIFANIO, P.S.; SILVA, J.T.; TEIXEIRA, D.A.A.; SILVA, V.R. Production and nutritional characteristics of pearl millet and Paiaguas palisadegrass under different forage systems

and sowing periods in the offseason. **African Journal of Agricultural Research**, v.11, p. 1712-1723, 2016.

CRUSCIOL, C. A. C.; MATEUS, G. P.; NASCENTE, A. S.; MARTINS, P. O.; BORGHI, E.; PARIZ, C. M. An innovative crop–forage intercrop system: early cycle soybean cultivars and palisadegrass. **Agronomy Journal**, v.104, n.4, p. 1085-1095, 2012.

CRUSCIOL, C. A. C.; SORATTO, R. P.; BORGHI, E.; MATEUS, G. P. Benefits of integrating crops and tropical pastures as systems of production. **Better Crops**, v.94, n.2, p. 14-16, 2010.

DEPERON JÚNIOR, M. A.; NAGAHAMA, H. J.; OLSZEWSKI, N.; CORTEZ, J. W.; SOUZA, E. B. Influência de implementos de preparo e de níveis de compactação sobre atributos físicos do solo e aspectos agrônômicos da cultura do milho. **Engenharia Agrícola**, v.36, n.2, p. 367-376, mar./abr. 2016.

DERKSEN, D.A., ANDERSON, R.L., BLACKSHAW, R.E., MAXWELL, B. Weed dynamics and management strategies for cropping systems in the Northern Great Plains. **Agronomy Journal**, v.94, p.174–185, 2002.

DEXTER, A.R.; CZYZ, E.A. GATE, O.P. A method for prediction of soil penetration resistance. **Soil and Tillage Research**, v.93, p.412–419, 2007.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisas de Solos. **Manual de métodos de análises de solo**. 2. ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 230 p, 2011.

EUCLIDES, V. P. B.; MONTAGNER, D. B.; BARBOSA, R. A.; VALLE, C. B.; NANTES, N. N. Animal performance and sward characteristics of two cultivars of *Brachiaria brizantha* (BRS Paiaguás and BRS Piatã). **Revista Brasileira de Zootecnia**, v.45, n.3, p.85-92, 2016.

FASHI, F. H.; GORJI, M.; SHARIFI, F. Least limiting water range for different soil management practices in dryland farming in Iran. **Archives of Agronomy and Soil Science**, p. 1-9, 2017.

FERREIRA, C. J. B.; ZOTARELLI, L.; TORMENA, C. A.; RENS, L. R.; ROWLAND, D. L. Effects of water table management on least limiting water range and potato root growth. **Agricultural Water Management**, v.186, p.1-11, 2017.

FERREIRA, D.F. Sisvar: Um computador sistema de análise estatística. **Ciência e Agrotecnologia**. Lavras, v.35, n.6, p.1039-1042, 2011.

FISCHER, T. Brazilian Cerrado: current status and prospects as a food bowl for the world. **Agricultural Science**, v.21, n.1, p.32-36, 2009.

FLÁVIO NETO, J.; SEVERIANO, E. C. COSTA, K. A. P.; GUIMARÃES JUNNYOR, W. S.; GONÇALVES, W. G.; ANDRADE, R. Biological soil loosening by grasses from genus *Brachiaria* in crop-livestock integration. **Acta Scientiarum Agronomy**. Maringá, v.37, n. 3, p.375-383, 2015.

FOLONI, J. S. S.; CALONEGO, J. C.; LIMA, S. L. Efeito da compactação do solo no desenvolvimento aéreo e radicular de cultivares de milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.38, n.8, p. 947-953, 2003.

FREDDI, O. S.; CENTURION, J. F.; BEUTLER, A. N.; ARATANI, R. G.; LEONEL, C. L. Compactação do solo no crescimento radicular e produtividade da cultura do milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.31, p.627-363, 2007a.

FREDDI, O. S.; CENTURION, J. F.; BEUTLER, A. N.; ARATANI, R. G.; LEONEL, C. L.; SILVA, A. P. Compactação do solo e intervalo hídrico ótimo no crescimento e na produtividade da cultura do milho. **Bragantia**, v.66, p.477-486, 2007b.

FREDDI, O. S.; CENTURION, J. F.; DUARTE, A. P.; LEONEL, C. L. Compactação do solo e produção de cultivares de milho em Latossolo Vermelho. I – Características de planta, solo e índice S. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.33, p.793-803, 2009a.

GIBBS, H. K.; RAUSCH, L.; MUNGER, J.; SCHELLY, I.; MORTON, D. C.; NOOJIPADY, P.; SOARES-FILHO, B.; BARRETO, P.; MICOL, L.; WALKER, N. F. Brazil's soy moratorium: supply-chain governance is needed to avoid deforestation. **Science**, v.347, n.6220, p.377-378, 2015.

GODOY, C. V.; BUENO, A. F.; GAZZIERO, D. L. P. Brazilian soybean pest management and threats to its sustainability. **Outlooks on Pest Management**, v.26, n.3, p.113-117, 2015.

GOEDERT, W. J. Management of the Cerrado soils of Brazil: a review. **European Journal of Soil Science**, v.34, n.3, p.405-428, 1983.

GONÇALVES, W.G.; JIMENEZ, R.L.; ARAÚJO FILHO, J.V.; ASSIS, R.L.; SILVA, G.P.; PIRES, F.R. Sistema radicular de plantas de cobertura sob compactação do solo. **Engenharia Agrícola**, v.26, p.67-75, 2006.

GRABLE, A.R.; SIEMER, E.G. Effects of bulk density, aggregate size, and soil water suction on oxygen diffusion, redox potential and elongation of corns roots. **Soil Science Society of American Journal**, v.32, p.180-186, 1968.

GUIMARÃES JÚNNYOR, W.S.; SEVERIANO, E.C.; SILVA, A.G.; GONÇALVES, W.G.; ANDRADE, R.; MARTINS, B.R.R.; CUSTÓDIO, G.D. Sweet sorghum performance affected by soil compaction and sowing time as a second crop in the brazilian cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.39, n.3, p.1744-1754, 2015.

HOAGLAND, L.; HODGES, L.; HELMERS, G. A.; BRANDLE, J. R.; FRANCIS, C. A. Labor availability in an integrated agricultural system. **Journal of Sustainable Agriculture**, v.34, n.5, p.532-548, 2010.

HUNKE, P.; MUELLER, E. N.; SCHRÖDER, B.; ZEILHOFER, P. The Brazilian Cerrado: assessment of water and soil degradation in catchments under intensive agricultural use. **Ecohydrology**, v.8, n.6, p.1154-1180, 2015.

KELLER, T.; DÉFOSSEZ, P.; WEISSKOPF, P.; ARVIDSSON, J.; RICHARD, G. SoilFlex: a model for prediction of soil stresses and soil compaction due to agricultural field traffic including a synthesis of analytical approaches. **Soil and Tillage Research**, v.93, n.2, p.391-411, 2007.

KUKAL S.S.; HIRA G.S.; SIDHU A.S. Soil matric potential-based irrigation scheduling to rice (*Oryza sativa*). **Irrigation Science**, v.23, p.153-159, 2005.

KRÜMMELBEIN, J.; PETH, S.; HORN, R. Determination of pre-compression stress of a variously grazed steppe soil under static and cyclic loading. **Soil and Tillage Research**, v.99, n.2, p.139-148, 2008.

LAL, R. Beyond COP21: Potential and challenges of the “4 per Thousand” initiative. **Journal of Soil and Water Conservation**, v.71, n.1, p.20-25, 2016.

LAPEN, D. R.; TOPP, G. C.; GREGORICH, E. G.; CURNOE, W. E. Least limiting water range indicators of soil quality and corn production, eastern Ontario, Canada. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.78, n.2, p.151-170, 2004.

LEÃO, T.P.; SILVA, A.P. A simplified Excel algorithm for estimating the least limiting water range of soils. **Scientia Agricola**, v.61, p.649-654, 2004.

LEMAIRE, G.; FRANZLUEBBERS, A.; CARVALHO, P. C. F.; DEDIEU, B. Integrated crop–livestock systems: strategies to achieve synergy between agricultural production and environmental quality. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v.190, p.4-8, 2014.

LIMA, R. P.; SILVA, A. P.; GIAROLA, N. F. B.; SILVA, A. R.; ROLIM, M. M. Changes in soil compaction indicators in response to agricultural field traffic. **Biosystems Engineering**, v.162, p.1-10, 2017.

LINHARES, A.J.S. **Compactação do solo e produção de silagem de girassol em monocultivo e consorciado com capim-paiaguás na safrinha**. 2015. Dissertação (Mestrado em Zootecnia) - Instituto Federal Goiano.

LIU H, YANG H, ZHENG J, JIA D, WANG J, LI Y, HUANG G. Irrigation scheduling strategies based on soil matric potential on yield and fruit quality of mulched-drip irrigated chili pepper in Northwest China. **Agricultural Water Management**, v.115, p.232-41, 2012.

MAIA, G.A.; COSTA, K.A.P.; SEVERIANO, E.C.; EPIFANIO, P.S.; FLÁVIO NETO, J.; RIBEIRO, M.G.; FERNANDES, P.B.; SILVA, J.F.G.; GONÇALVES, W.G. Yield and Chemical Composition of Brachiaria Forage Grasses in the Offseason after Corn Harvest. **American Journal of Plant Sciences**, v.5, p. 933-941, 2014.

MACHADO, L. A. Z.; VALLE, C. B. Desempenho agrônômico de genótipos de capim-braquiária em sucessão à soja. **Pesquisa agropecuária brasileira**, v.46, n.11, p.1454-1462, 2011.

MEDINA, G.; SANTOS, A. P. S. Curbing enthusiasm for Brazilian agribusiness: the use of actorspecific assessments to transform sustainable development on the ground. **Applied Geography**, v.85, p.101-112, 2017.

MERTEN, G. H.; MINELLA, J. P. G. The expansion of Brazilian agriculture: soil erosion scenarios. **International Soil and Water Conservation Research**, v.1, n.3, p.37-48, 2013.

MORAES, A.; CARVALHO, P.C.F.; ANGHINONI, I.; LUSTOSA, S.B.C.; COSTA, S.E.V.G.A.; KUNRATH T.R. Integrated crop–livestock systems in the Brazilian subtropics. **European Journal of Agronomy**. V.57, P.4-9, 2014.

MOSADDEGHI, M. R.; KOOLEN, A. J.; HEMMAT, A.; HAJABBASI, M. A.; LERINK P. Comparisons of different procedures of pre-compaction stress determination on weakly structured soils. **Journal of Terramechanics**, Oxford, v.44, n.1, p.53-63, 2007.

PAGLIAI, M.; MARSILI, A.; SERVADIO, P.; VIGNOZZI, N.; PELLEGRINI, S. Changes in some physical properties of a clay soil in central Italy following the passage of rubber tracked and wheeled tractors of medium power. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.73, n.1/2, p.119-129, 2003.

PENG, X. H.; HORN, R.; ZHANG, B.; ZHAO, Q. G. Mechanisms of soil vulnerability to compaction of homogenized and recompacted ultisols. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.76, n.2, p.125-137, 2004.

PEREIRA, P. A. A.; MARTHA JR., G. B.; SANTANA, C. A. M.; ALVES, E. The development of Brazilian agriculture: future technological challenges and opportunities. **Agriculture & Food Security**, v.1, n.4, p.1-12, 2012.

RADA, N. Assessing Brazil's Cerrado agricultural miracle. **Food Policy**, v.38, p.146-155, 2013.

REATTO, A.; BRUAND, A.; MARTINS, E. S.; MULLER, F.; SILVA, E. M.; CARVALHO JUNIOR, O. A.; BROSSARD, M.; RICHARD, G. Development and origin of the microgranular structure in Latosols of the Brazilian central plateau: significance of texture, mineralogy, and biological activity. **Catena**, v.76, n.2, p. 122-134, 2009.

REICHERT, J. M.; KAISER, D. R.; REINERT, D. J.; RIQUELME, U. F. B. Variação temporal de propriedades físicas do solo e crescimento radicular de feijoeiro em quatro sistemas de manejo. **Pesquisa agropecuária brasileira** v.44, n.3, 2009.

RÖMKENS, M. J. M.; MILLER, R. D. Predicting root size and frequency from one-dimensional consolidation data: a mathematical model. **Plant and Soil**, The Hague, v.35, p. 237-248, 1971.

ROSOLEM, C.A.; FOLONI, J.S.S.; TIRITAN, C.S. Root growth and nutrient accumulation in cover crops as affected by soil compaction. **Soil and Tillage Research**, v.65, p.109-115, 2002.

SÁ, J. C. M.; LAL, R.; CERRI, C. C.; LORENZ, K.; HUNGRIA, M.; CARVALHO, P. C. F. Low-carbon agriculture in South America to mitigate global climate change and advance food security. **Environment International**, v.98, p.102–112, 2017.

SALTON, J. C.; MERCANTE, F. M.; TOMAZI, M.; ZANATTA, J. A.; CONCENÇO, G.; SILVA, W. M.; RETORE, M. Integrated crop-livestock system in tropical Brazil: toward a sustainable production system. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v.190, p.70-79, 2014.

SANTOS, C.B.; COSTA, K.A.P.; OLIVEIRA, I.P.; SEVERIANO, E.C.; COSTA, R.R.G.F.; SILVA, A.G.; GUARNIERI, A.; SILVA, J.T.. Production and nutritional characteristics of sunflowers and paiaguas palisadegrass under different forage systems in the off season. **Bioscience Journal**, v.32, p.460-470, 2016.

SANTOS, H.G.; JACOMINE, P.K.T.; ANJOS, L.H.C.; OLIVEIRA, V.A.; LUMBRERAS, J.F.; COELHO, M.R.; ALMEIDA, J.A.; CUNHA, T. J. F.; OLIVEIRA, J.B. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 3ªed. rev. ampl. Brasília: Embrapa, 353 p. 2013.

SILVA, S. C.; NASCIMENTO JÚNIOR, D. Avanços na pesquisa com plantas forrageiras tropicais em pastagens: características morfofisiológicas e manejo do pastejo. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v.36, suppl.0 2007.

SCHÄFFER, B.; STAUBER, M.; MUELLER, T. L.; MÜLLER, R.; SCHULIN, R. Soil and macro-pores under uniaxial compression: I mechanical stability of repacked soil and deformation of different types of macro-pores. **Geoderma**, v.146, p.183-191, 2008.

SEBEN JUNIOR G.F.; CORÁ J.E.; LAL R. Effect of cropping systems in no-till farming on the quality of a Brazilian Oxisol. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.38, p.1268-80, 2014.

SEVERIANO, E. C.; OLIVEIRA, G. C.; DIAS JUNIOR, M. S.; CURTI, N.; COSTA, K. A. P.; CARDUCCI, C. E. Preconsolidation pressure, soil water retention characteristics, and texture of Latosols in the Brazilian Cerrado. **Soil Research**, v.51, p.193-202, 2013.

SEVERIANO, E. C.; OLIVEIRA, G. C.; DIAS JÚNIOR, M. S.; COSTA, K. A. P.; SILVA, F. G.; FERREIRA FILHO, S. M. Structural changes in latosols of the Cerrado region: I - relationships between soil physical properties and least limiting water range. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.35, p.773-782, 2011a.

SEVERIANO, E.C.; OLIVEIRA, G.C.; DIAS JÚNIOR, M.S.; COSTA, K. A.P.; BENITES, V.M.; FERREIRA FILHO, S.M. Structural changes in Latosols of the cerrado region: II - soil compressive behavior and modeling of additional compaction. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.35, p.783-791, 2011b.

SEVERIANO, E. C.; OLIVEIRA, G. C.; DIAS JUNIOR, M.S.; OLIVEIRA, L.F.C.; CASTRO, M.B. Pressão de preconsolidação e intervalo hídrico ótimo como indicadores de alterações estruturais do solo em decorrência das operações de colheita da cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, n.4, p.1419-1427. 2008.

SILVA B.M.; OLIVEIRA G.C.; SERAFIM M.E.; SILVA E.A.; FERREIRA M.M.; NORTON L.D.; CURI N. Critical soil moisture range for a coffee crop in an oxidic Latosol as affected by soil management. **Soil and Tillage Research**, v.154, p.103-113, 2015.

SILVA, A. P.; IMHOFF, S.; KAY, B. Plant response to mechanical resistance and air-filled porosity of soils under conventional and no-tillage system. **Scientia Agricola.**, v.61, n.4, p. 451-456, 2004.

SILVA, A. P.; KAY, B. D.; PERFECT, E. Characterization of the least limiting water range. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v.58, n.6, p.1775-1781, 1994.

SILVA, J. F. G.; SEVERIANO, E. C.; COSTA, K. A. P.; BENITES, V. M.; GUIMARÃES JÚNNYOR, W. S.; BENTO, J. C. Chemical and physical-hydric characterisation of a red Latosol after five years of management during the summer between-crop season. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.38, n.5, p.1576-1586, 2014.

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

SOIL SCIENCE SOCIETY OF AMERICA. **Glossary of soil science terms**. Disponível em: < <https://www.soils.org/publications/soils-glossary>>. Acesso em: 22/10/2016.

SOUSA NETO, E.L.; PIERANGELI, M.A.P.; LAL, R. Compaction of an Oxisol and Chemical Composition of Palisadegrass. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.37, p.928-935, 2013.

SOUZA, D. M. G.; LOBATO, E. **Cerrado: correção do solo e adubação**. 2 ed. Brasília: Embrapa Cerrados, 2004. 416 p.

STRASSBURG, B. B. N.; BROOKS, T.; FELTRAN-BARBIERI, R.; IRIBARREM, A.; CROUZEILLES, R.; LOYOLA, R.; LATAWIEC, A. E.; OLIVEIRA FILHO, F. J. B.;

SCARAMUZZA, C. A. M.; SCARANO, F. R.; SOARES-FILHO, B.; BALMFORD, A. Moment of truth for the Cerrado hotspot. **Nature, Ecology e Evolution**, v.1, n.99, 2017.

SULLIVAN, L. Identity, territory and land conflict in Brazil. **Development and Change**, v.44, n.2, p. 451-471, 2013.

TAVARES FILHO, J.; BARBOSA, G. M. C.; GUIMARÃES, M. F.; FONSECA, I. C. B. Resistência do solo à penetração e desenvolvimento do sistema radicular do milho (*Zea mays*) sob diferentes sistemas de manejo em um Latossolo Roxo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.25, p.725-730, 2001.

THE ECONOMIST. Brazilian agriculture: the miracle of the Cerrado. August 26, 2010. <<http://economist.com/node/16886442>> Acesso em: 15/07/2017.

TOLLEFSON, J. A light in the forest: Brazil's fight to save the Amazon and climate-change diplomacy. **Foreign Affairs**, v.92, n.2, p.141-151, 2013.

TOLLEFSON, J. The global farm. **Nature**, v.466, p.554-556, 2010.

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

TORMENA, C. A.; KARLENB, D. L.; LOGSDONB, S.; CHERUBIN, M. R. Corn stover harvest and tillage impacts on near-surface soil physical quality. **Soil and Tillage Research**, v.166, p.122–130, 2017.

VAN LIER, Q. J.; GUBIANI, P. I. Beyond the “least limiting water range”: rethinking soil physics research in Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.39, n.4, p.925-939, 2015.

VEIHMEYER, F.J.; HENDRICKSON, A.H. The moisture equivalent as a measure of the field capacity of soils. **Soil Science**, v.32, p.181-193, 1931.

CONCLUSÃO GERAL

A qualidade física do solo pode ser adequadamente descrita por meio do intervalo hídrico ótimo. Em sistemas de integração agricultura-pecuária, a recuperação desta pode ser obtida pelo cultivo de *Brachiaria brizantha* para pastejo no período de entressafra, notadamente dos cultivares Xaraés e Piatã. Pelo potencial produtivo e de descompactação biológica do solo pelos capins, espera-se viabilidade técnica da “terceira” e “quarta” safra agrícola sendo, respectivamente, pasto para alimentação animal e palhada para o plantio direto.