

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RECÔNCAVO DA BAHIA  
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS, AMBIENTAIS E BIOLÓGICAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA  
CURSO DE DOUTORADO**

**DINÂMICA DE ÁGUA EM LATOSSOLO TÍPICO DOS  
TABULEIROS COSTEIROS SOB DIFERENTES  
SISTEMAS DE USO**

**ANDRÉ LEONARDO VASCONCELOS SOUZA**

**CRUZ DAS ALMAS - BAHIA  
FEVEREIRO - 2018**

**DINÂMICA DE ÁGUA EM LATOSSOLO TÍPICO DOS TABULEIROS  
COSTEIROS SOB DIFERENTES  
SISTEMAS DE USO**

**ANDRÉ LEONARDO VASCONCELOS SOUZA**  
Engenheiro Agrônomo e Mestre em Ciências Agrárias  
Universidade Federal da Bahia

Tese apresentada ao Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, como requisito parcial para a obtenção do Título de Doutor em Engenharia Agrícola, Área de Concentração: Agricultura Irrigada e Recursos Hídricos.

**Orientador:** Prof. Dr. Francisco Adriano de Carvalho Pereira  
**Coorientador:** Prof. Dr. José Fernandes de Melo Filho

**CRUZ DAS ALMAS - BAHIA  
FEVEREIRO - 2018**

## FICHA CATALOGRÁFICA

S729d	<p>Souza, André Leonardo Vasconcelos. Dinâmica de água em latossolo típico de tabuleiros costeiros sob diferentes sistemas de uso / André Leonardo Vasconcelos Souza._ Cruz das Almas, BA, 2018. 161f.; il.</p> <p>Orientador: Francisco Adriano de Carvalho Pereira. Coorientador: José Fernandes de Melo Filho.</p> <p>Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Centro de Ciências Agrárias, Ambientais e Biológicas.</p> <p>1.Solos – Manejo. 2.Solos – Água – Uso. I.Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Centro de Ciências Agrárias, Ambientais e Biológicas. II.Título.</p> <p>CDD: 631.4</p>
-------	---

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RECÔNCAVO DA BAHIA  
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS, AMBIENTAIS E BIOLÓGICAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA  
CURSO DE DOUTORADO**

**DINÂMICA DE ÁGUA EM LATOSSOLO TÍPICO DOS TABULEIROS  
COSTEIROS SOB DIFERENTES  
SISTEMAS DE USO**

**COMISSÃO EXAMINADORA DA DEFESA DE TESE DE  
André Leonardo Vasconcelos Souza**

Realizada em 21 de Fevereiro de 2018

Prof. Dr. Francisco Adriano de Carvalho Pereira  
Universidade Federal do Recôncavo da Bahia / UFRB  
Examinador Interno (Orientador)

Prof. Dra. Jucicleia Soares da Silva  
Universidade Federal do Recôncavo da Bahia / UFRB  
Examinador Interno

Prof. Dr. Luciano da Silva Souza  
Universidade Federal do Recôncavo da Bahia / UFRB  
Examinador Interno

Prof. Dr. Alisson Jadavi Pereira da Silva  
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Baiano / IFBaiano  
Examinador Externo

Prof. Dr. Delfran Batista dos Santos  
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Baiano / IFBaiano  
Examinador Externo

*“Há um tempo em que é preciso abandonar as roupas usadas,  
já que têm a forma do nosso corpo, e esquecer os nossos  
caminhos que nos levam sempre aos mesmos lugares.  
É o tempo da travessia, se não ousarmos fazê-la,  
teremos ficado, para sempre, à margem  
de nós mesmos.”*

**Fernando Pessoa**

“Por sabedoria entendo a arte de tornar a vida  
o mais agradável e feliz possível.”

**Schopenhauer**

A minha família **Patrícia, Ícaro Leonardo e Helena** por me apoiar, sempre, durante todo esse caminhar, permanecendo ao meu lado nas mais diversas situações.

**DEDICO**

Até onde posso vou deixando o melhor de mim...  
Se alguém não viu... Não me sentiu com o coração.

**Clarice Lispector**

## AGRADECIMENTOS

A todas as formas de energia e manifestação positivas da natureza – **Deus** – que liberta a mente e acalenta a alma.

A todo povo brasileiro por ter financiado mais uma vez, e de novo, meus estudos possibilitando a ampliação do meu conhecimento e formação, ao qual devo retribuir no desempenho de minhas atividades profissionais.

Aos meus pais Neuza Maria Vasconcelos Souza e Valter Moraes Souza por me estimular a sempre prosseguir em busca dos meus objetivos.

A Washignton Nilo e Gilva Beatriz por participarem direta e efetivamente da minha criação.

Aos meus irmãos Ana Carolina, Camila e Junior por estarem presentes sempre que possível, acreditando e estimulando o meu caminhar.

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Baiano por ter concedido afastamento das atividades funcionais para realização dos estudos de doutoramento.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, por ter disponibilizado bolsas de estudo ao IF Baiano através do programa PRODOUTORAL e que após seleção foi contemplado.

Aos professores Dr. José Fernandes de Melo Filho e Dr. Francisco Adriano Pereira Carvalho, orientadores e amigos, pelo profissionalismo, conduta e ensinamentos profissionais e pessoais.

Aos meus colegas de doutorado Francicleiton, Jamile, Klebson, Lucylia e Marcos, pelas horas de estudos que partilhamos ao longo dessa caminhada.

Aos meus estagiários e amigos Jean e Rosana pelos longos dias em campo, independente de sol ou chuva.

Enfim, a todas as pessoas que de alguma maneira contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho.

## SUMÁRIO

	<b>Página</b>
RESUMO.....	
SUMMARY.....	
INTRODUÇÃO.....	<b>01</b>
REFERENCIAL TEÓRICO.....	<b>04</b>
<b>Capítulo 1</b>	
ATRIBUTOS FÍSICO-HÍDRICOS DE UM LATOSSOLO AMARELO TÍPICO DOS TABULEIROS COSTEIROS SOB DIFERENTES USOS.....	<b>30</b>
<b>Capítulo 2</b>	
VARIABILIDADE ESPACIAL DE ATRIBUTOS FÍSICO-HÍDRICOS EM LATOSSOLO AMARELO DISTROCOESO SOB DIFERENTES USOS.....	<b>59</b>
<b>Capítulo 3</b>	
INFILTRAÇÃO EM FUNÇÃO DO MÉTODO DE DETERMINAÇÃO EM SISTEMAS DE USO DO SOLO.....	<b>110</b>
<b>Capítulo 4</b>	
MODELOS MATEMÁTICOS PARA ESTIMATIVA DA INFILTRAÇÃO DA ÁGUA EM LATOSSOLO AMARELO TÍPICO SOB DIFERENTES USOS.....	<b>136</b>
<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>161</b>

## **DINÂMICA DE ÁGUA EM LATOSSOLO TÍPICO DOS TABULEIROS COSTEIROS SOB DIFERENTES SISTEMAS DE USO**

Autor: André Leonardo Vasconcelos Souza

Orientador: Prof. Dr. Francisco Adriano de Carvalho Pereira

Coorientador: Prof. Dr. José Fernandes de Melo Filho

**RESUMO:** A interferência antrópica, sob a forma de manejo, modifica os atributos físico-hídricos do solo, quando comparado ao ambiente nativo. Entretanto, as práticas de manejo nem sempre alteram negativamente esses atributos, muitas vezes podem melhorar ou mesmo recuperá-los em diferentes graus. O presente estudo tem por objetivo avaliar a dinâmica da água em um Latossolo típico de Tabuleiros Costeiros sob quatro diferentes usos: floresta nativa (FN), área em regeneração (AR), sistema plantio direto (PD) e convencional (PC), todas situadas no município de Cruz das Almas, Bahia. Em cada área, foram coletadas 80 amostras deformadas e 400 amostras não deformadas em cada profundidade (0,0-0,20 e 0,20-0,40m). As amostras deformadas foram utilizadas para avaliar textura, densidade de partículas, matéria orgânica e diâmetro médio de agregados do solo e as não deformadas utilizadas para avaliar a densidade de solo, macroporosidade, microporosidade, porosidade total, resistência mecânica a penetração (a 100 kPa) e condutividade hidráulica do solo saturado. Os atributos foram avaliados por métodos estatísticos univariado, multivariado e geoestatísticos; também foram avaliadas a velocidade de infiltração básica (VIB) e a adequação aos modelos de Kostiaikov, Kostiaikov-Lewis e Horton à VIB. Os resultados demonstram que os atributos físicos e hídricos obtiveram os melhores desempenhos, pela ordem, nos sistemas FN, AR, PD e PC, com grau de dependência espacial de forte a moderada; as maiores velocidades de infiltração seguiram mesma ordem entre os sistemas, com melhor adequação ao modelo de Horton.

**Palavras-chave:** atributos físico-hídricos, estatística multivariada, variabilidade espacial, velocidade de infiltração, modelos empíricos.

## **WATER DYNAMICS IN A TYPICAL LATOSOL OF COASTAL PLAINS UNDER DIFFERENT SYSTEMS OF USE**

Author: André Leonardo Vasconcelos Souza  
Advisor: Prof. Dr. Francisco Adriano de Carvalho Pereira  
Co-Advisor: Prof. Dr. José Fernandes de Melo Filho

**ABSTRACT:** Soil management practices are a known source of anthropogenic interference, which change the physical and hydrological properties of soil, when compared with the native environment. However, in addition to the negative affects on those properties, management practices can often improve or even lead to different levels of soil recovery. The goal of this study was to assess the water dynamics in a typical latosol of coastal plains under four different uses: natural forest (NF), regeneration area (RA), no-tillage system (NT) and conventional planting (CP), all located in Cruz das Almas, Bahia. In each area, 80 degraded soil samples were collected and 400 non-degraded samples at two depths (0.0-0.20 and 0.20-0.40m). The degraded samples were used to assess the texture, particles density, organic matter, and the average diameter of soil aggregates and the non-degraded samples were used to assess the soil density, macroporosity, microporosity, total porosity, mechanical resistance to penetration (to 100 kPa) and the saturated soil hydraulic conductivity. These attributes were assessed by statistical univariate, multivariate and geostatistics methods; we also assessed the basic infiltration speed (BIS) and the adjustment of the Kostiakov, Kostiakov-Lewis and Horton models to BIS. Our results show that the physical and hydrological attributes had the best performances were, by descending order, the NF, RA, NT, and CP systems, with a strong to moderate degree of spatial dependence; the highest infiltration speed followed the same order among the systems, with a better adjustment to the Horton model.

Keywords: physical and hydrological attributes, multivariate statistics, spatial variability, infiltration speed, empirical models.

## INTRODUÇÃO

A água é um recurso fundamental para a manutenção da vida neste planeta; todos os ecossistemas terrestres têm a água como elemento de presença essencial, independente da quantidade. Sua redução em termos quantitativos ou qualitativos têm sérios impactos negativos nos ecossistemas, pois regula os processos fisiológicos e geobioquímicos fundamentais dos seres vivos.

A presença de água sempre foi requisito essencial para fixação do homem, construiu civilização, criou culturas e hábitos, determinou a ocupação de territórios e processos produtivos. Portanto, falar sobre sua dinâmica, mesmo que apenas no solo, é falar das condições necessárias à sobrevivência da espécie humana, da conservação e equilíbrio da biodiversidade, das relações de dependência entre seres vivos e ambientes naturais.

Vale ressaltar que o solo regula todo o fluxo de água nos sistemas terrestres, e é nele que esse recurso permanece por mais tempo após os demais eventos do ciclo hidrológico. Se a humanidade dependesse apenas do suprimento que cai com a chuva, ou mesmo da água que fica retida ou detida sobre a superfície do solo, não sobreviveria ou teria seu desenvolvimento limitado. É posterior ao evento de infiltração que o solo, com suas variadas estruturas, inicia a regulação do fluxo de água nos diferentes ambientes, liberando-a gradativamente por meio das nascentes, córregos e riachos.

O homem tem transformado, ao longo da história, os ecossistemas naturais em ecossistemas agrícolas, necessários ao desenvolvimento das sociedades. Por outro lado, as práticas agrícolas e o manejo do solo interferem diretamente na dinâmica e permanência da água no sistema. Quando são realizadas de maneira adequada, podem promover modificações positivas nos atributos físico-hídricos do solo promovendo o crescimento das culturas em curto, médio e longo prazo. Entretanto, práticas inadequadas durante vários anos, podem degradá-lo, alterando a retenção e redistribuição de água no perfil do solo, reduzindo a produtividade e aumentando os custos de produção, além de reduzir a sustentabilidade dos recursos hídricos e contribuir para sua degradação com a mesma velocidade.

Para evitar a continua redução da qualidade e quantidade de água, assim como o aumento dos processos erosivos é preciso compreender melhor o fenômeno da infiltração da água no solo sob diferentes usos, sua dinâmica e armazenamento, principalmente, nos ecossistemas produtivos.

Desde o processo de infiltração, a partir do qual ocorre a penetração vertical da água através da superfície do solo, até seu armazenamento, o recurso estabelece sua dinâmica em função dos atributos pedogenéticos de cada solo, do seu uso e manejo. Os indicadores físico-hídricos do solo podem auxiliar na compreensão de como o uso e manejo afetam a dinâmica de água. Todavia os atributos dos solos não exibem variações exclusivas do manejo; eles possuem variações em função das interações entre os fatores e processos de formação do solo, que confere padrões de variabilidade dentro de uma mesma unidade amostral, oriundas dos fatores pedogenéticos. Tal variabilidade limita a compreensão das modificações ocasionadas pelo manejo quando são utilizados apenas métodos tradicionais da estatística.

Entender como ocorre a distribuição espacial das variáveis físico-hídricas também é importante para estabelecer práticas de manejo adequadas, não somente para otimizar a produtividade agrícola, mas também para minimizar possíveis danos ambientais. Estudos dessa natureza possibilitam adotar manejos adequados e, com isso, melhorar o uso dos recursos hídricos, notadamente na região de solos de Tabuleiros Costeiros, visando à produção de alta rentabilidade com sustentabilidade.

Neste sentido, propôs-se avaliar os efeitos de diferentes usos do solo nos atributos físico-hídricos, sua influência na variabilidade espacial e a dinâmica de infiltração de água em um solo típico dos Tabuleiros Costeiros, bem como sua capacidade de resiliência, em relação ao ambiente natural.

## **HIPÓTESE**

Nesse estudo pressupõe-se que, quanto maior o revolvimento do solo ao longo dos diversos cultivos em solos de Tabuleiros Costeiros, menor será a infiltração de água, sua dinâmica e permanência no solo.

O principal manejo adotado na região é chamado “plantio convencional”, que tem como característica o revolvimento intensivo do solo. Em alternativa,

existe o plantio direto que reduz o revolvimento do solo durante seu preparo, o que provocaria melhoraria na dinâmica e permanência da água no solo, quando comparado ao plantio convencional. Todavia, se o revolvimento mínimo melhora os atributos físico-hídricos, os melhores resultados deverão ser encontrados em locais que nunca sofreram preparo do solo ou permanecem sem movimentação do solo por longos períodos.

### **OBJETIVO GERAL**

Avaliar e comparar atributos físico-hídricos, sua variabilidade e a velocidade de infiltração de água em um Latossolo Amarelo Distrocoeso típico de Tabuleiros Costeiros sob quatro diferentes usos: floresta nativa, área em regeneração, áreas com plantio direto e plantio convencional.

### **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- 1) Caracterizar os atributos físico-hídricos em um Latossolo Amarelo Distrocoeso típico de Tabuleiros Costeiros sob diferentes ambientes de usos;
- 2) Determinar a variabilidade espacial dos atributos físico-hídricos em um Latossolo Amarelo Distrocoeso típico de Tabuleiros Costeiros, sob quatro diferentes usos;
- 3) Estimar a velocidade de infiltração da água em um Latossolo Amarelo Distrocoeso típico de Tabuleiros Costeiros sob quatro diferentes usos;
- 4) Comparar o desempenho de dois modelos de infiltrômetros de anel em quatro diferentes usos do solo; e
- 5) Comparar o desempenho dos modelos de Kostiakov, Kostiakov-Lewis e Horton para predição da velocidade de infiltração de água em quatro diferentes usos do solo.

## REFERENCIAL TEÓRICO

### 1. Tabuleiros Costeiros e importância econômica

O termo Tabuleiros Costeiros é utilizado para designar feições geomorfológicas ou de superfície do tipo tabular, dissecada por vales profundos com encosta de forte declividade, próximas ao oceano Atlântico (NASCIMENTO, 2001). Os Tabuleiros estendem-se por quase toda a costa brasileira, desde o Rio de Janeiro até o Amapá. Em toda a sua extensão, a altitude desta formação geológica varia muito, podendo apresentar altitudes de 20 a 220 metros (JACOMINE, 1996).

Os solos de Tabuleiros Costeiros normalmente são profundos e ocorrem associados a relevo plano a suave ondulado, favorecendo a exploração agrícola (VIEIRA et al., 2012). Ocupam uma área total de cerca de 20 milhões de hectares, em todo o Brasil, com ocorrência descontínua no litoral dos estados do Amapá até o Rio de Janeiro, estendendo-se da faixa costeira até as terras do médio e baixo vale do rio Amazonas e seus afluentes (REZENDE, 2000). Apenas na Região Nordeste, estima-se uma área total com de 6,4 a 10 milhões de hectares (JACOMINE, 1996; SOBRAL et al., 2002; SOUZA et al., 2002), que corresponde a aproximadamente 16% da área total dos estados da Bahia, Sergipe, Alagoas, Pernambuco, Paraíba, Rio Grande do Norte e Ceará.

A importância social e econômica dos Tabuleiros Costeiros é percebida pela concentração urbana de, aproximadamente, 45% da população de sete Estados do Nordeste (Alagoas, Bahia, Ceará, Paraíba, Pernambuco, Rio Grande do Norte e Sergipe), apresentando densidade demográfica em toda área de aproximadamente 123 hab. km<sup>-2</sup> (SOBRAL et al., 2002). Araújo (2000), afirma que densidade demográfica, em geral, diminui do litoral (1.200 hab. km<sup>-2</sup>) para o interior (15 hab. km<sup>-2</sup>). Essa região é responsável pela diversidade de produção agrícola e por grande parte da produção agropecuária do Nordeste. Segundo o Plano Diretor da EMBRAPA/CPATC (2005), somente a região de Tabuleiros Costeiros representadas pelos estados do Nordeste foi responsável por 30,4% do PIB gerado por culturas temporárias e 38,2% do PIB gerado por culturas permanentes. Essa área ainda dispõe de ampla infraestrutura de transporte rodoviário e terminais marítimos para o escoamento da produção; contudo, existe nessa região uma demanda reprimida por produtos agrícolas, porque as

atividades agropecuárias têm sido inviabilizadas pelas baixas produções e alta relação custo/benefício (CINTRA et al., 1997; EMBRAPA/CPATC, 2005).

## **2. Sistema de manejo e preparo do solo**

De modo geral, o solo apresenta, em seu estado natural, atributos físicos e químicos definidos em função dos fatores de formação e processos pedogenéticos. Um solo que se encontra com floresta nativa, geralmente possui boa estruturação, quantidade e distribuição de poros, presença de matéria orgânica e boa capacidade de infiltração de água em seu perfil, mas quando cultivado, seus atributos são alterados em relação ao solo sobre florestas (KLEIN et al., 2008). As alterações nos atributos do solo ocorrem de acordo com o uso, tipo de manejo, nível e tempo de utilização (WENDLING et al., 2005). As modificações incidem sobre os atributos físico-hídricos do solo, com maior ou menor intensidade, a depender do tipo de preparo e manejo adotados (BOTTEGA et al., 2011; VENDRUSCOLO et al., 2011).

Cientes de que a interferência antrópica, sob forma de preparo e/ou manejo, inevitavelmente imprime nova dinâmica aos processos naturais do solo, quando comparado ao ambiente nativo, e por ser o solo um sistema complexo, com arranjos espaciais e temporais variáveis, decorrente da própria formação e evolução, torna-se imprescindível compreender como o manejo muda as condições naturais do solo. Alguns autores afirmam que, após o manejo, torna-se praticamente impossível devolver ao solo as condições físicas que se encontravam em ambiente natural (KLEIN; LIBARDI, 2002; COSTA et al., 2003). Entretanto, a degradação de seus atributos pode ser evitada ou mesmo recuperada em diferentes graus, por meio de práticas de manejo adequadas, à medida que se conhece suas inter-relações com o meio.

Dos componentes do manejo, o preparo do solo é um dos fatores com maior condição de provocar alterações nos atributos naturais do solo. Influi diretamente no seu comportamento físico-hídrico, pois atua na sua estrutura e provoca modificações na infiltração, porosidade e densidade. Os diferentes manejos de solo afetam também a retenção de água e a resistência mecânica à penetração (VIEIRA; KLEIN, 2007), quando comparado com solos não cultivados, tal como aquele encontrado em florestas e campos nativos (SILVA et al., 2014).

Todavia, existem relatos que alguns sistemas de manejo conservacionistas podem melhorar indicadores como: capacidade de infiltração de água no solo, condutividade hidráulica e resistência mecânica à penetração, quando comparados a sistemas de vegetação natural (SOUZA; ALVES, 2003).

Quanto ao preparo do solo, o manejo pode ser enquadrado, basicamente, em dois grupos, a saber: sistema de manejo convencional e sistema de manejo reduzido ou conservacionista. Os dois sistemas causam alterações no solo, contudo, elas são mais pronunciadas nos sistemas convencionais de preparo do que nos conservacionistas. As principais alterações se manifestam, em geral, na densidade do solo; estabilidade dos agregados; volume, distribuição e tamanho dos poros, o que influencia a infiltração da água, erosão hídrica e desenvolvimento das plantas (SILVA et al., 2014).

### **3. Características do sistema de preparo convencional**

O sistema convencional que utiliza implementos como arado de discos, aiveca e grade pesada, seguido de gradagens leves, tem como característica principal o revolvimento de toda área a ser cultivada, na qual o implemento de preparo atua como incorporador total ou parcial de fitomassa.

O sistema convencional ou plantio convencional (PC), ou mesmo preparo convencional é assim designado por ser o principal manejo utilizado em larga escala e em diversas culturas. O PC normalmente ocasiona degradação do solo pela perda da qualidade estrutural, pois rompe os agregados na camada preparada e acelera a decomposição da matéria orgânica, refletindo negativamente na resistência dos agregados do solo (CARPENEDO; MIELNICZUK, 1990), aumentando assim os processos de erosão, especialmente quando dissociado de práticas conservacionistas.

O conceito de PC é amplo e pode variar em função de vários fatores locais ligados à sua execução e tipo de cultivo, tais como: tipo de práticas culturais, frequência e sequência das práticas (DICKEY et al., 1992). Para diversos autores (MOROTE et al., 1990; UNGER; CASSEL, 1991; ROJAS; VAN LIER, 1999) é possível generalizar o PC como o uso sistemático de uma aração do solo (na profundidade de 0,20 a 0,30 m) e duas gradagens antes do plantio, para a maioria das culturas.

Mesmo em solos que apresentam atributos naturais favoráveis ao cultivo, conforme Klein e Klein (2014), o preparo convencional tende a degradar os atributos físico-hídricos, pois o revolvimento, além de romper os agregados, compacta o solo abaixo da camada preparada e o deixa descoberto. O adensamento abaixo da camada de preparo tem sido verificado pelo aumento da densidade do solo e da microporosidade, da diminuição da porosidade total e, principalmente, da macroporosidade (SECCO et al., 2005).

Essas alterações também são verificadas em outros sistemas de cultivo; contudo, são mais evidentes nos sistemas de preparo convencional que em sistemas com menor uso de máquinas e implementos, e, tende ao agravamento à medida que o solo é submetido a sucessivos anos de cultivo, com tendência à redução da sua aptidão agrícola (MOROTE et al., 1990). Além disto, o solo quando descoberto pelo efeito do preparo é submetido às chuvas erosivas, as quais o desagregam na superfície pelo impacto das gotas, diminuem a velocidade de infiltração de água e aumentam o escoamento superficial e a erosão hídrica, em relação aos outros sistemas de manejo do solo (BERTOL et al., 2004).

#### **4. Características do sistema de preparo plantio direto**

Em oposição ao PC surgem os sistemas de preparos conservacionistas; porém, vale ressaltar que a produção agrícola com cultivos mínimos ou sem preparo do solo é tão antiga quanto a própria agricultura e persistiu até que os egípcios, há uns 6.000 anos atrás, inventassem o arado de madeira arrastado por bois.

Para Koronka (1973), citado por Wiethölter (2000), os primeiros estudos sobre Plantio Direto (PD), foram realizados na Estação Experimental de *Rothamsted* na Inglaterra durante a década de 1940, quando se constatou que o preparo do solo era dispensável, desde que não houvesse competição de plantas espontâneas. O PD tem como premissa a manutenção de fitomassa das espécies antecessoras, na superfície do solo e mobilização apenas das linhas de plantio das culturas. Atualmente o conceito amplo de PD envolve a rotação de cultura, o controle fitossanitário e as variáveis agrometeorológicas (BATAGLIA et al., 2012)

Os preparos de solo conservacionistas, tal como a semeadura direta, com menor revolvimento, mantêm, parcial ou totalmente, a fitomassa na superfície e

aportam continuamente matéria orgânica ao solo, a qual é responsável pela manutenção e melhoria dos atributos físicos do solo (LANZANOVA et al., 2010).

Para Cássaro et al. (2011), a ausência quase que completa de preparo por longos períodos reduz o volume de macroporos e eleva a densidade do solo em superfície. Por outro lado, é amplamente reconhecido que os sistemas de preparos reduzidos, sem revolver o solo intensamente, se mostram promissores para promover aumento da quantidade de fitomassa em superfície e melhorar a estrutura do solo (FRANCHINI et al., 2009). Por isso, ocorre também melhoria na estabilidade de agregados em superfície (CARPENEDO; MIELNICZUK, 1990) e aumento da infiltração e retenção de água nessas camadas (SANTOS et al., 2013), o que reflete boa qualidade do solo em relação ao preparo convencional e ao campo nativo (D'ANDRÉA et al., 2002).

## **5. Atributos físico-hídricos do solo**

Conforme evidenciado anteriormente, a alteração da vegetação natural e o uso da mecanização intensiva ou não favorecem alterações nos atributos do solo, mudando assim suas características anteriores. A modificação dos atributos do solo, em geral, ocasiona perda de produtividade, decorrente da diminuição de quantidade de nutrientes, matéria orgânica, modificações de atributos físicos, químicos e hídricos (ALBUQUERQUE et al., 2005).

Os impactos do uso e manejo nos atributos físico-hídricos do solo têm sido quantificados na tentativa de compreender melhor essa dinâmica. São utilizados comumente como atributos a granulometria, densidade do solo, porosidade, resistência mecânica à penetração, condutividade hidráulica e velocidade de infiltração, entre outros (COSTA et al., 2003; CRUZ et al., 2003; SILVA; CABEDA; LIMA, 2005; CAVALIERI et al., 2006; CARNEIRO et al., 2009).

Para Secco et al. (2005) não há dúvida de que as diferentes práticas de manejo do solo induzem alterações nos indicadores físico-hídricos. Logo, é preciso compreender quais práticas promovem alterações temporárias ou permanentes. Tal compreensão é fundamental para a manutenção das condições primordiais ao desenvolvimento das plantas e da garantia de alta produtividade agrícola.

A dificuldade está em, sob condições experimentais, se avaliar modificações submetendo ao uso um solo de floresta ou mata virgem e de forma contínua, analisar seus atributos. Este seria o procedimento ideal para compreender e quantificar o impacto do uso e manejo no desenvolvimento de sistemas agrícolas (SANCHEZ, 1981). No entanto, o procedimento mais comum entre pesquisadores, é a opção por estudar solos sob floresta nativa e compará-los com outros cultivados, de semelhança pedogenética e topográfica (STEFANOSKI et al., 2013).

## **6. Análise granulométrica**

A classificação adotada no Brasil, proposta pelo Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA), considera que as três frações granulométricas do solo são: argila, silte e areia. A fração argila é identificada como o conjunto de partículas com diâmetro equivalente menor que 0,002 mm; na fração silte, são contabilizadas as partículas com diâmetro equivalente entre 0,002 e 0,05 mm; e a fração areia é composta por partículas com diâmetro equivalente entre 0,05 e 2,0 mm (FERREIRA, 2010).

O conhecimento sobre a distribuição granulométrica das partículas sólidas do solo é essencial para várias aplicações, como na análise de sua qualidade, estudo sobre compactação, movimentação, condutividade e disponibilidade de água e calor (PREVEDELLO, 1996; SILVA et al., 2011).

Para Scheinost et al. (1997), a textura é o principal fator entre os vários que afetam a infiltração e retenção de água no solo, pois determina a área de contato entre a água e as partículas sólidas, determinando assim a acomodação das partículas e a distribuição de poros. Klein et al. (2010) também relatam que os principais fatores que exercem influência na retenção e disponibilidade de água às plantas são a textura e a estrutura do solo. Assim, a textura do solo, ou seja, a proporção entre as diferentes partículas minerais, é uma característica importante e deve ser considerada durante a escolha do tipo e intensidade de manejo a ser adotado.

## 7. Densidade do solo

A densidade do solo expressa a relação da massa de uma amostra seca a 105°C por unidade de volume de solo. Em solos minerais, a densidade do solo varia geralmente de 1,10 a 1,60 g cm<sup>-3</sup>, enquanto que, em solos orgânicos esse valor varia de 0,60 a 0,80 g cm<sup>-3</sup> (BRADY; WEIL, 2008). Reichardt e Timm (2008) salientam que a densidade do solo pode ser usada como um índice do grau de sua compactação, quando de mesma textura. Contudo, é preciso considerar que densidade pode aumentar com a profundidade do perfil, devido às pressões exercidas pelas camadas superiores. Assim, para um mesmo solo, o valor da densidade pode ser alterado em diferentes horizontes.

Esse atributo do solo está diretamente relacionado com a estrutura e a porosidade, influenciando diretamente a dinâmica da água no solo. A densidade do solo tem sido usada como medida da qualidade do solo devido às suas relações intrínsecas com outros atributos, como porosidade, resistência mecânica à penetração, condutividade hidráulica entres outros. (DAM et al., 2005; COSTA et al., 2007; MARTINS et al., 2009).

O manejo do solo pode alterar sua densidade, pois, como o solo é um material poroso, por compressão a mesma massa pode ocupar um volume menor. Isto afeta a sua estrutura, o arranjo e volume dos poros e as características de retenção de água (REICHARDT; TIMM, 2008). Ao conhecer a densidade e a textura do solo, torna-se possível avaliar o estado de manejo atual do solo, além de permitir inferir sobre alguns de seus atributos, tais como sua drenagem, condutividade hidráulica, permeabilidade ao ar e a água (PIRES et al., 2011).

## 8. Porosidade do solo

A porosidade do solo pode ser classificada em macroporosidade (poros maiores), preenchidos pelo ar e água do solo e microporosidade (poros capilares), responsáveis pela retenção e armazenamento de água (SILVA et al., 2011).

Ao longo do tempo a literatura tem estabelecido diferentes parâmetros para classificar a porosidade do solo. Richards (1965) e o Departamento de Agricultura dos Estados Unidos - USDA (1972) classificaram como macroporos os poros com diâmetro maior do que 0,05 mm e esvaziados à tensão de 6 kPa e

microporos os com diâmetro menor do que 0,05 mm e Kiehl (1979) classificou macroporos como poros que têm diâmetro maior do que 0,06 mm e, os microporos os poros menores do que 0,06 mm. Outras classificações mais detalhadas subdividem os poros em até oito classes, adotando classificações como criptoporos para poros com diâmetro inferior a 0,0002 mm (KLEIN; LIBARDI, 2002). Independente da classificação adotada sabe-se que o manejo inadequado provoca compactação e, com isso, reduz os poros maiores que são substituídos por poros menores; tal modificação é responsável pela redução da aeração e dinâmica da água no solo. Como consequência, o aumento da microporosidade favorece a retenção de água no solo (REICHERT et al., 2007), ao mesmo tempo em que compromete o transporte de ar e água e o desenvolvimento radicular (TORMENA et al., 1998).

### **9. Resistência mecânica à penetração**

A resistência mecânica à penetração de raízes tem sido um dos atributos mais estudados (BEUTLER et al., 2001) para expressar o grau de compactação de um solo e pode ser quantificada com uso de penetrômetros (TORRES et al., 2012). Os valores restritivos podem variar muito conforme o tipo de solo e a cultura utilizada (RICHART et al., 2005; REICHERT et al., 2007), para Taylor et al. (1966) e Tavares Filho et al. (2012), são valores igual ou superior 2,0 MPa; conforme Grant e Lafond (1993) entre 1,5 a 3,0 MPa; e de 2,0 a 4,0 MPa, segundo Arshad et al. (1996). Existe uma grande amplitude de valores de resistência mecânica do solo à penetração considerados críticos ao desenvolvimento de raízes; contudo, o valor de 2,0 MPa tem sido aceito como o limite crítico de resistência mecânica do solo à penetração (TAYLOR; ROBERTSON; PARKER, 1966).

Os principais fatores externos que interferem no aumento da resistência do solo à penetração são a carga aplicada ao solo por meio da utilização de maquinários (CAVALIERI et al., 2009), pisoteio animal, revolvimento do solo por equipamentos de preparo do solo como grades, arados e escarificadores (COSTA et al., 2009). Entre os fatores internos, cita-se teor de água e principalmente a fração argila no solo (TAVARES FILHO; RIBON, 2008).

A resistência à penetração não é a única alteração causada pelo manejo inadequado do solo, mas também a redução do movimento de água no solo e aumento significativo na densidade, que ocasionam um impedimento físico ao desenvolvimento do sistema radicular das plantas (FREDDI et al., 2007; BERGAMIN et al., 2010). Contudo, a resistência à penetração é dependente da textura, da densidade do solo e, sobretudo, do teor de água do solo, exigindo, assim, cuidado na sua utilização e interpretação (OLIVEIRA et al., 2007; BLAINSKI et al., 2008; VALICHESKI et al., 2012).

#### **10. Determinação do percentual de agregados**

A estabilidade de agregados tem sido utilizada por vários autores como indicadores de qualidade do solo (BALBINO et al., 2002; OLIVEIRA et al., 2007), pois é um atributo sujeito a alterações pelo manejo e serve como indicador dos processos envolvidos na degradação do solo (CARPENEDO; MIELNICZUK, 1990), já que influencia a infiltração, retenção de água, aeração e resistência à penetração de raízes (LAWALL et al., 2009).

Estabilidade dos agregados refere-se, em linhas gerais, à resistência que o conjunto de partículas do solo apresenta em relação à ação das forças desagregadoras que atuam sobre elas. As principais alterações que afetam essa resistência são produzidas pela redução de material agregador (argila e matéria orgânica), o que repercute na diminuição do diâmetro dos agregados e no aumento de perda de solo (WENDLING et al., 2005). Os agregados são classificados de acordo com o tamanho, em macroagregados, quando superiores a 250  $\mu\text{m}$ , e microagregados aqueles inferiores a 250  $\mu\text{m}$  (TISDALL; OADES, 1982). Os macroagregados são mais susceptíveis aos danos mecânicos por serem menos estáveis, razão da necessidade de sua preservação (CAMBARDELLA; ELLIOT, 1993).

Para um mesmo tipo de solo, diferentes práticas de manejo poderão afetar diretamente os processos de agregação. O sistema plantio direto, ao manter fitomassa em superfície, poderá aumentar a matéria orgânica e melhorar a agregação do solo em relação ao plantio convencional (CARPENEDO; MIELNICZUK, 1990). Assim, no plantio direto os agregados são geralmente

maiores e menos densos, o que promove o aumento da infiltração de água no solo (ROTH; CASTRO FILHO; MEDEIROS, 1991).

### **11. Condutividade hidráulica saturada**

Para a sua determinação existe uma grande variedade de métodos, com diferentes níveis de precisão. De modo geral, os métodos podem ser agrupados em indiretos ou diretos. Os métodos indiretos relacionam a condutividade hidráulica com atributos do solo (distribuição do tamanho dos poros, textura, porosidade drenável, densidade do solo etc.). Nos métodos diretos, os métodos de laboratório mais utilizados são permeâmetros de carga constante e carga decrescente, os quais fornecem resultados aproximados sendo recomendados quando os de campo são impraticáveis (TREVISAN et al., 2009).

A condutividade hidráulica do solo saturado ( $K_0$ ) é um dos atributos físico-hídricos do solo que influenciam o fluxo de água no solo e assume relevância por fornecer informações imprescindíveis da capacidade de transporte de água (CUNHA et al., 2015). Seu valor máximo é atingido quando o solo se encontra saturado (REICHARDT; TIMM, 2008). Esse parâmetro sofre influência de atributos do solo tais como: estrutura, textura, densidade do solo, densidade das partículas, porosidade total, macro e microporosidade (TREVISAN et al., 2009), manejo, composição granulométrica e teor de matéria orgânica (SILVA et al., 2014).

Segundo Mesquita e Moraes (2004), a condutividade hidráulica saturada é mais dependente da estrutura do que da textura do solo. As práticas culturais adotadas alteram a estrutura do solo e influenciam diretamente a  $K_0$ , mais até do que os processos de gênese e formação da estrutura dos solos. Inclusive, devido ao importante efeito do diâmetro dos poros, a variabilidade de  $K_0$  em sítios próximos pode alcançar várias ordens de grandeza.

### **12. Estimativa e modelos para velocidade de infiltração**

De maneira geral as taxas iniciais de infiltração de água no solo são altas e tendem a decrescer com o tempo, até atingir um valor quase constante. Para Bernardo et al. (2008), nesse ponto, onde a variação na taxa de infiltração é praticamente nula ou desprezível, a taxa estabilizada é chamada de velocidade

de infiltração básica (VIB). Assim a VIB pode ser entendida como uma condição estável da taxa de infiltração no tempo, decorrente do decrescente gradiente hídrico no solo ao longo do tempo, o que é associado à profundidade da frente de molhamento durante a infiltração.

Em estudos sob diferentes tipos de uso e cobertura do solo, Lawall et al. (2009) verificaram que a VIB decresceu quando comparados solos sob usos de floresta, agricultura e pastagem, seguindo essa ordem. Segundo os autores, os resultados observados da VIB nas florestas foram de 2 a 15 vezes maiores que nas áreas agrícolas, reforçando a ideia de que a cobertura vegetal influencia de maneira positiva a capacidade de infiltração do solo (LIPIEC et al., 2006).

Diversos autores registraram a dependência da VIB a outros atributos físicos do solo como textura e estrutura (CAVALIERI et al., 2009; DE MORAES, 2012; KLEIN; KLEIN, 2014), permeabilidade e condutividade hidráulica (PRUSKI, 2003), compactação e selamento superficial (SILVA; KATO, 1997; REICHERT et al., 2007), cobertura do solo, quantidade de matéria orgânica e carga hidráulica (CUNHA et al., 2015; KLEIN; KLEIN, 2014).

A infiltração da água no solo deve ser mensurada por meio de técnicas capazes de representar, adequadamente, as condições naturais em que se encontra o solo (DE MORAIS, 2012). Normalmente, a determinação da VIB é executada *in situ*, da forma mais representativa possível, existindo para isso vários métodos. Contudo, devido à facilidade de execução, pode-se dizer que o método mais utilizado é o método do anel (BERNARDO; SOARES; MANTOVANI, 2008).

A velocidade de infiltração também pode ser mensurada a partir do uso de modelos de infiltração que podem ser divididos em duas categorias: empírico e teórico (HABILI; HEIDARPOUR, 2015). Os modelos empíricos apresentam vantagens, pois os atributos do solo se relacionam com os parâmetros do modelo, o que permite inferir sobre os atributos físico-hídricos do solo estudados. Porém, sua principal dificuldade são os ajustes que só são válidos para as condições em que as equações dos modelos foram determinadas, não podendo ser empregadas em outros solos, que possuem características diferentes (BRANDÃO et al., 2006).

Apesar da disponibilidade de um grande número de modelos de infiltrações, alguns disponíveis têm sido muito populares e frequentemente utilizados em várias aplicações em recursos hídricos mundiais, devido à sua simplicidade e com resultados razoavelmente satisfatórios para a maioria das aplicações (ULOMA et al., 2014).

Entre os modelos comumente utilizados é possível citar: o modelo empírico de Kostiakov que é derivado, usando os dados observados, quer no campo ou no laboratório; o Kostiakov-Lewis ou Kostiakov modificado, muito empregado em manejo de irrigação é normalmente utilizado para a estimativa de infiltração por longo período de tempo; e o modelo de Horton, considerado muito consistente, por seus parâmetros sofrerem forte influência da estruturação do solo (PINHEIRO et al., 2009). Os modelos de Kostiakov e Kostiakov-Lewis são escritos por uma equação do tipo potencial, já o modelo de Horton por uma equação do tipo exponencial, contudo, todos apresentam coeficientes que podem ser calculados a partir de dados de infiltração medidos em campo (SIHAG et al., 2017).

### **13. Variabilidade espacial**

O avanço do conhecimento científico tem evidenciado limitações dos métodos tradicionais para avaliar variáveis físico-hídricas do solo. Para a estatística clássica, todas as amostras são aleatórias e sua aplicação não envolve qualquer conhecimento da posição atual, ou seu relacionamento com outras (JUNQUEIRA, et al., 2008). Para a geoestatística as variações não são aleatórias e, portanto, apresentam algum grau de dependência espacial e/ou temporal (ISAAKS; SRIVASTAVA, 1989; OLEA, 1999; DEUTSCH, 2002). O estudo da geoestatística parte do pressuposto que as propriedades naturais da superfície terrestre são espacialmente contínuas, logo, necessita da aplicação de preceitos associados à dependência espacial das variáveis continuamente distribuídas no espaço (VIEIRA, 2000).

A geoestatística tem como ponto de partida observações de natureza quantitativa ou qualitativa, que permitem compreender propriedades e fenômenos espaciais em estudo (YAMAMOTO; LANDIM, 2013). As principais técnicas utilizadas descrevem os padrões espaciais (variografia), estimam valores em locais não amostrados (*krigagem*), permitindo a representação quantitativa da

variação de um fenômeno regionalizado no espaço (HUIJBREGTS, 1975; VIEIRA, 2000) e otimizam as malhas de amostragem (ANDRIOTTI, 2003).

Os estudos de variabilidade espacial de variáveis físico-hídricas do solo podem ser realizados em grandes áreas (IQBAL et al., 2005; DUFFERA; WHITE; WEISZ, 2007; ZIMMERMANN et al., 2008) ou em áreas menores (GREGO; VIEIRA, 2005; MACHADO et al., 2007). De acordo com Mendes et al. (2008), atributos do solo quase sempre apresentam dependência espacial e variam entre pontos relativamente próximos em área de mesma unidade taxonômica, muitas vezes de forma significativa (LIMA et al., 2006; CAMPOS et al., 2007). Logo, conhecer a distribuição espacial dos atributos diretamente ligados à dinâmica de água e distribuição de nutrientes é de suma importância para o manejo, sendo indispensável para alcançar uma agricultura sustentável (WEIRICH NETO et al., 2006).

O uso da geoestatística no estudo da variabilidade espacial dos atributos do solo tem aumentado nos últimos anos (MONTANARI et al., 2013). Para Cajazeiras e Assis Junior (2011), a ferramenta apresenta grande importância no mapeamento da área estudada, interpretação dos resultados com base na estrutura da variabilidade dos atributos avaliado (BOTTEGA et al., 2013; CORADO NETO et al., 2015), estabelecimento de práticas de manejo adequadas, otimização da produtividade agrícola e redução de possíveis danos ambientais (SILVA et al., 2014).

#### **14. Análise multivariada**

Para Neto (2004), a análise multivariada corresponde a um grande número de métodos e técnicas que utilizam, simultaneamente, todas as variáveis na interpretação teórica do conjunto de dados obtidos.

A análise fatorial exploratória (AFE) e a análise de componentes principais (ACP) são duas técnicas da análise multivariada que têm por objetivo reduzir um determinado número de itens a um menor número de variáveis (WIDAMAN, 2007).

O primeiro passo durante a realização de AFEs é observar se a matriz de dados é passível de fatoração, isto é, analisar se os dados podem ser submetidos ao processo de análise fatorial. Para isso, dois métodos de avaliação são mais

comumente utilizados, a saber: o critério de Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) e o teste de esfericidade de Bartlett (SASS; SCHMITT, 2010).

Os valores do índice KMO são calculados por meio do quadrado das correlações totais dividido pelo quadrado das correlações parciais, das variáveis analisadas, e indicam se a análise fatorial é apropriada (FIELD, 2005). Para Hair et al. (2005) são valores aceitáveis entre 0,5 a 1,0, portanto abaixo de 0,5 são considerados inaceitáveis, valores entre 0,5 e 0,7 são considerados medíocres; valores entre 0,7 e 0,8 são considerados bons; valores maiores que 0,8 e 0,9 são ótimos e excelentes, respectivamente.

O teste de esfericidade de Bartlett, por sua vez, avalia em que medida a matriz de (co)variância é similar a uma matriz-identidade (FIELD, 2005). Segundo Hair et al. (2005), esse teste avalia, também, a significância geral de todas as correlações em uma matriz de dados. Valores do teste de esfericidade de Bartlett com níveis de significância  $p < 0,05$  indicam que a matriz é fatorável (TABACHNICK; FIDELL, 2007), rejeitando a hipótese nula de que a matriz de dados é similar a uma matriz-identidade.

A técnica de análise de componentes principais (ACP) tem como objetivo agrupar os dados para entender seu comportamento, por meio de um número menor de variáveis denominado “componentes principais” ortogonais com perda mínima de informação, identificando-se os componentes principais “scores” e as variáveis analisadas “loadings” representados em um plano fatorial (SENA et al., 2002; SAVEGNAGO et al., 2011).

A correlação entre os componentes principais (CPs) é zero, ou seja, a variação explicada no CP1 é independente da explicação no CP2 e nos demais CPs (SAVEGNAGO et al., 2011). A distribuição das variáveis é representada por pontos, indicando suas respectivas correlações com os CPs. A direção das variáveis analisadas é mostrada pelos vetores, indicando o gradiente máximo das variáveis. Tem-se que o comprimento dos vetores seja proporcional à correlação das variáveis com os CPs, e à sua importância na explicação da variância total apresentada pelas CPs (SENA et al., 2002; THEODORO et al., 2003). O autovetor é o valor que representa o peso de cada variável em cada componente (eixos) e funciona como coeficiente de correlação que varia de -1 a +1. As variáveis com elevado autovetor no primeiro eixo tendem a ter autovetor inferior

no segundo eixo (GOMES et al., 2004). Existe a necessidade de padronização dos dados, ou seja, devem ser autoescalados. Isso quer dizer que as variáveis devem ter média zero e variância um, o que permite que todas apresentem a mesma contribuição para o modelo, independentemente das diferentes grandezas entre os atributos (SENA et al., 2000).

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBUQUERQUE, J. A.; ARGENTON, J.; BAYER, C.; WILDNER, L.P.; KUNTZE, M.A.G. Relação de atributos do solo com a agregação de um Latossolo Vermelho sob sistemas de preparo e plantas de verão para cobertura do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, n. 3, p. 415-424, 2005.

ANDRIOTTI, J. L. S. **Fundamentos de estatística e geoestatística**. Editora Unisinos, 2003, 165 p.

ARAÚJO, Q. R. **Solos de tabuleiros costeiros e qualidade de vida das populações**. Ilhéus: Editus, 2000. 97 p.

ARSHAD, M.A.; LOWERY, B.; GROSSMAN, B. Physical tests for monitoring soil quality. In: Doran, J.W.; Jones, A.J. (eDS.) *Methods for assessing soil quality*. Madison, **Soil Science Society of America**. 1996. p.123-141. SSSA Special publication, 49

BALBINO, L.C.; BRUAND, A.; BROSSARD, M.; GRIMALDI, M.; HAJNOS, M.; GUIMARÃES, M.F. Changes in porosity and microaggregation in clayey ferralsols of the brazilian cerrado on clearing for pasture. **European Journal of Soil Science**, v. 53, n. 2, p. 219-230, 2002.

BATAGLIA, O.C.; BRÜGGEMANN, G.; CARDOSO, F.; DECHEN, S. **Estado da arte do plantio direto no Brasil 2007-2012**. In: 13º Encontro Nacional de Plantio Direto, Passo Fundo, 2012.

BERGAMIN, A.C.; VITORINO, A. C. T.; FRANCHINI, J. C.; SOUZA, C. M. A.; SOUZA, F. R. Compactação em um Latossolo Vermelho Distroférrico e suas relações com o crescimento radicular do milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.34, n.3, p.681-691, 2010.

BERNARDO, S.; SOARES, A. A.; MANTOVANI, E. C. **Manual de irrigação**. 8. ed. Viçosa: UFV, 2008. 625 p.

BERTOL, I; ALBUQUERQUE, J. A.; LEITE, D.; AMARAL A. J.; ZOLDAN JUNIOR, W. A. Propriedades físicas do solo sob preparo convencional e semeadura direta

em rotação e sucessão de culturas comparadas às do campo nativo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, n. 1, p.155-163, 2004.

BEUTLER, A. N.; SILVA, M. L. N.; CURI, N.; FERREIRA, M. M.; CRUZ, J. C.; PEREIRA FILHO, I. A. Resistência à penetração e permeabilidade de Latossolo Vermelho Distrófico típico sob sistemas de manejo na região dos cerrados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.25, n.1, p.167-177, 2001.

BLAINSKI, E.; TORMENA, C. A; FIDALISKI, J.; GUIMARÃES, R. M. L. Quantificação da degradação física do solo por meio da curva de resistência do solo a penetração. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, n.3, p.975-983, 2008.

BOTTEGA, E. L.; BOTTEGA, S. P.; SILVA, S. A.; QUEIROZ, D. M.; SOUZA, C. M. A.; RAFULL, L. Z. L. Variabilidade espacial da resistência do solo à penetração em um Latossolo Vermelho distroférico. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v.6, n.2, p.331-336, 2011.

BOTTEGA, E. L.; QUEIROZ, D. M. de; CARVALHO PINTO F. A.; SOUZA, C. M. A. Variabilidade espacial de atributos do solo em sistema de semeadura direta com rotação de culturas no cerrado brasileiro. **Revista Ciência Agrônômica**. v. 44, n. 1, p. 1-9, 2013.

BRADY, N. C.; WEIL, R. R. **The nature and properties of soils**. 14. ed. Upper Saddle River, New Jersey: Pearson-Prentice Hall, 2008. cap. 05, p. 173-217.

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

CAJAZEIRA, J. P.; ASSIS JÚNIOR, R. N. Variabilidade espacial das frações primárias e agregados de um Argissolo no Estado do Ceará. **Revista Ciência Agrônômica**, v. 42, n. 2, p. 258-267, 2011.

CAMBARDELLA, C. A.; ELLIOT, E. T. Carbon and nitrogen distribution in aggregates from cultivated and native grassland soils. **Soil Science Society of America Journal**, v.57, n. 4, p.1071-1076, 1993.

CAMPOS, M. C.; MARQUES JUNIOR, J.; PEREIRA, G. T.; MONTANARI, R.; SIQUEIRA, D. S. Variabilidade espacial da textura de solos de diferentes materiais de origem em Pereira Barreto, SP. **Revista Ciência Agrônômica**, v. 38, n. 2, p. 149-157, 2007.

CARNEIRO, M.A.C.; SOUZA, E.D.; REIS, E.F.; PEREIRA, H.S. & AZEVEDO, W.R.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.

CARPENEDO, V.; MIELNICZUK, J. Estado de agregação e qualidade de agregados de Latossolos Roxos, submetidos a diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 14, n. 1, p. 99-105, 1990.

CÁSSARO, F. A. M., BORKOWSKI, A. K.; PIRES, L. F.; ROSA, J. A.; SAAB, S. C. Characterization of a Brazilian clayey soil submitted to conventional and no-tillage management practices using pore size distribution analysis. **Soil & Tillage Research, Amsterdam**, v. 111, n. 2, p. 175-179, 2011.

CAVALIERI, K.M.V.; TORMENA, C.A.; VIDIGAL FILHO, P.S.; GONÇALVES, A.C.A.; COSTA, A.C.S. Efeitos de sistemas de preparo nas propriedades físicas de um Latossolo Vermelho Distrófico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 30, n. 1, p. 137-147, 2006.

CAVALIERI, K. M. V., SILVA, A.P., TORMENA, A.P., LEÃO, T.P., DEXTER, A.R., HAKANSSON, I. Long-term effects of no-tillage on dynamic soil physical properties in a Rhodic Ferrasol in Paraná, Brazil. **Soil & Tillage Research**, v. 103, n. 1, p. 158-164, 2009.

CINTRA, L. D. C.; LIBARDI, P. L.; SILVA, A. P. Tabuleiros Costeiros do Nordeste do Brasil: uma análise dos efeitos do regime hídrico e da presença de camadas coesas nos solos. **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, n. 18, p. 81 – 95, 1997. (Boletim informativo)

CORADO NETO, F. C.; SAMPAIO, F. de M. T.; VELOSO, M. E. da C.; MATIAS, S. S. R.; ANDRADE, F. R.; LOBATO, M. G. R. Variabilidade espacial dos agregados e carbono orgânico total em Neossolo Litólico Eutrófico no município de Gilbués, PI. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 58, n. 1, p. 75-83, 2015.

COSTA, A.; ALBUQUERQUE, J. A.; MAFRA; A. L.; SILVA, F. R. Propriedades físicas do solo em sistemas de manejo na integração agricultura-pecuária. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, n. 2, p.235-244, 2009.

COSTA, F. S.; ALBUQUERQUE, J. A.; BAYER, C.; FONTOURA, S. M. V.; WOBETO, C. Propriedades físicas de um Latossolo Bruno afetadas pelos sistemas de plantio direto e preparo convencional. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, n. 3, p. 527-535, 2003.

COSTA, M. J.; ROSA JÚNIOR, E. J.; ROSA, Y. B. C. J.; DE SOUZA, L. C. F.; ROSA, C. B. J. Atributos químicos e físicos de um Latossolo sendo influenciados pelo manejo do solo e efeito da gessagem. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 29, n. 5, p. 701-708, 2007.

CRUZ, A.C. R; PAULETTO, E. A.; FLORES, C.A.; SILVA, J.B. Atributos físicos e carbono orgânico de um Argissolo Vermelho sob sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.27, n. 6, p. 1105-1112, 2003.

CUNHA, F. N.; DA SILVA, N. F.; FREITAS MOURA, L. M.; TEIXEIRA, M. B.; CARVALHO, J. J. Influência da difusividade e condutividade hidráulica na infiltração de água em um Latossolo Vermelho sob diferentes sistemas de cultivo. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**. Fortaleza v. 9, n. 3, p. 102-112, 2015.

DAM, R. F.; MEHDI, B. B.; BURGESS, M. S. E.; MADRAMOOTOO, C. A.; MEHUYS, G. R.; CALLUM, I. R. Soil bulk density and crop yield under eleven consecutive years of corn with different tillage and residue practices in a sandy loam soil in central Canada. **Soil and Tillage Research**, v. 84, n. 1, p. 41-53, 2005.

D'ANDRÉA, A.F.; SILVA, M.L.N.; CURI, N.; FERREIRA, M.M. Atributos de agregação indicadores da qualidade do solo em sistemas de manejo na região dos cerrados no sul do estado de Goiás. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 26, n. 4, p. 1047-1054, 2002.

DE MORAIS, F. **Infiltração – uma variável geomorfológica**. Cadernos de Geografia, Belo Horizonte, v. 22, n. 38, , 2012.

DICKEY, E.C.; SIEMENS, J.C.; JASA, P.J.; HOFMAN, V.L.; SHELTON, D.P. Tillage system definitions. In: Conservation tillage systems and management: crop residue management with no-till, ridge-till, mulch-till. **Ames**: Midwest Plan Service, 1992. p. 5-7.

DUFFERA, M.; J. G. WHITE; R. WEISZ. Spatial variability of southeastern U.S. coastal plain soil physical properties: Implications for site-specific management, **Geoderma**, v. 137, n. 2, p. 327–339, 2007.

DEUTSCH, C.V. Geostatistical Reservoir Modeling, Oxford: University Press, 2002, 376 p.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Rio de Janeiro, RJ). **Manual de métodos de análise de solo**. 2ª Ed. Rio de Janeiro: 2011. 212p.

EMBRAPA/CNPTC. III Plano Diretor da Embrapa Tabuleiros Costeiros 2004-2007 / Embrapa Tabuleiros Costeiros. - Aracaju, 2005 40 p. (**Documentos / Embrapa Tabuleiros Costeiros, 73**). Disponível em <http://www.cpatc.embrapa.br>. Acesso em: 01.02.2016.

FERREIRA, M.M. **Caracterização física do solo**. In: JONG van LIER, Q., ed. Física do solo. Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2010. p.01-27.

FIELD, A. **Discovering Statistics Using SPSS**. (2. ed.), London: Sage, 2005.

FRANCHINI, I. C.; DEBIAIS, H.; SACOMAN, A.; NEPOMUCENO, A. L.; FARIAS, J. R. B. **Manejo do solo para redução das perdas de produtividade pela seca**. Documentos, Embrapa Soja, Londrina, 2009.

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, n. 4, p.627-636, 2007.

GOMES, J. B. V.; CURI, N.; MOTTA, P. E. F.; KER, J. C.; MARQUES, J. J. G. S. M.; SCHULZE, D. G. Análise de componentes principais de atributos físicos, químicos e mineralógicos de solos do bioma Cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, n. 1, p. 137-153, 2004.

GRANT, C.A.; LAFOND, G.P. The effects of tillage systems and crop sequences on soil bulk density and penetration resistance on a clay soil in Southern Saskatchewan. **Canadian Journal Soil Science**, Ottawa, v.73, n.2, p.223-232, 1993.

GREGO, C. R.; VIEIRA, S. R. Variabilidade espacial de propriedades físicas de solo em uma parcela experimental. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, vol.29, n.2, p. 169-177, 2005.

HABILI, J. M.; HEIDARPOUR, M. Application of the Green–Ampt model for infiltration into layered soils. **Journal of Hydrology**, v. 25, n. 527, p. 824–832, 2015.

HAIR, J. F., ANDERSON, R. E., TATHAM, R. L.; BLACK, W. C. **Análise multivariada de dados**. A. S. Sant’Anna & A. C. Neto (Trad.). Porto Alegre: Bookman, 2005.

HUIJBREGTS, C. J. **Regionalized variables and quantitative analysis of spatial data**. In: DAVIS, J. C. e MCCULLAGH, M. J. eds. Display and analysis of spatial data. New York: John Wiley, p. 38-53, 1975.

IQBAL, J; THOMASSON, J. A; JENKINS, J. N; OWENS, P. R; WHISLER, F. D. Spatial variability analysis of soil physical properties of alluvial soils. **Soil Science Society of American Journal**, v. 69, n. 4, p. 1338-1350, 2005.

ISAAKS, E. H.; SRIVASTAVA, R. M. **An Introduction to Applied Geostatistics**, Oxford: University Press, 1989, 561 p.

JACOMINE, P. K. T. Distribuição geográfica, características e classificações dos solos coesos dos tabuleiros costeiros. In: REUNIÃO TÉCNICA SOBRE SOLOS COESOS DOS TABULEIROS. 1996, Cruz das Almas. **Anais...**, Cruz das Almas: EAUFBA/GVFBA, EMBRAPA/CNPMF, 1996, p. 13 – 26.

JUNQUEIRA JÚNIOR, J. A.; SILVA, A. M.; MELLO, C. R.; PINTO, D. B. F. Continuidade espacial de atributos físico-hídricos do solo em sub-bacia hidrográfica de cabeceira. **Ciência e agrotecnologia**, Lavras, v. 32, n. 3, p. 914-922, maio/jun., 2008.

KIEHL, E. J. **Manual de edafologia: relações solo-planta**: São Paulo, Ceres, 1979, 262 p.

KLEIN, C.; KLEIN, V. A. Influência do manejo do solo na infiltração de água. **Revista Monografias Ambientais – REMOA**, v.13, n.5, p.3915-3925, 2014.

KLEIN, V. A.; BASEGGIO, M.; MADALOSSO, T.; MARCOLIN, C. D. Textura do solo e a estimativa do teor de água no ponto de murcha permanente com psicrômetro. **Ciência Rural**, v.40, n.7, p.1550-1556, 2010.

KLEIN, V. A.; VIEIRA, M.L.; DURIGON, F.F.; MASSING, J.P. & FÁVERO, F. Porosidade de aeração de um Latossolo Vermelho e rendimento de trigo em plantio direto escarificado. **Ciência Rural**, v. 38, n. 2, p. 365-371, 2008.

KLEIN, V. A.; LIBARDI, P. L. Densidade e distribuição do diâmetro dos poros de um Latossolo Vermelho sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.26, n. 4, p.857-867, 2002.

LANZANOVA, M. E.; ELTZ, F. L. F.; NICOLOSO, R. S.; AMADO, T. F. C.; REINERT, D. J.; ROCHA, M. R. Atributos físicos de um Argissolo em sistemas de culturas de longa duração sob semeadura direta. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 34, n.5, p. 1333-1342, 2010.

LAWALL, S.; SANTOS, A. C. F.; MOTA, P. O.; FERNANDES, N. F. Modificações da dinâmica hidrológica do solo em resposta as mudanças de uso e cobertura: Um estudo de caso na região serrana do Rio de Janeiro. **Anais...** 12º Encontro de Geografos da América Latina, Montevideo, Uruguai, p. 7467-7477, 2009.

LIMA, J. A. G.; MENDES, A. M. S.; DUDA, G. P.; FERREIRA, C. V. Variabilidade espacial de características físico-hídricas de um Cambissolo cultivado com mamão no semiárido do RN. **Revista Caatinga**, v. 19, n. 2, p. 192-199, 2006.

LIPIEC, J; KÚS, J.; SLOWINSKA-JURKIEWICZ, A.; NOSALEWICZ, A. Soil porosity and water infiltration as influenced by tillage methods. **Soil & Tillage Research**, v. 89, n. 2, p.210-220, 2006.

MACHADO, L. O.; LANA, A. M. Q.; LANA, R. M. Q.; GUIMARAES, E. C.; FERREIRA, C.V. Variabilidade espacial de atributos químicos do solo em áreas sob sistema plantio convencional. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, n. 3, p. 591-599, 2007.

MARTINS, M. V.; PASSOS, E.; CARVALHO, M.; ANDREOTTI, M.; MONTANARI, R. Correlação linear e espacial entre a produtividade do feijoeiro e atributos físicos de um Latossolo Vermelho distroférico de Selvíria, Estado de Mato Grosso do Sul. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 31, n. 1, p. 147-154, 2009.

MENDES, A. M. S.; FONTES, R. L. F.; OLIVEIRA, M. Variabilidade espacial da textura de dois solos do deserto salino, no Estado do Rio Grande do Norte. **Revista Ciência Agronômica**, v. 39, n. 1, p. 19-27, 2008.

MESQUITA, M. G. B. F.; MORAES, S. O. A dependência entre a condutividade hidráulica saturada e atributos físicos do solo. **Ciência Rural**, v.34, n. 3, p.963-969, 2004.

MONTANARI, R.; PANACHUKI, E.; LOVERA, L. H.; OLIVEIRA, I. S.; BONINI, C. S. B. Variabilidade espacial da produtividade de sorgo e atributos físicos em um Planossolo. **Revista Agro@mbiente**. v. 7, n. 3, p. 252–261, 2013.

MOROTE, C.G.R.; VIDOR, C.; MENDES, N.G. Alterações na temperatura do solo pela cobertura morta e irrigação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 14, n. 5, p. 81-84, 1990.

NASCIMENTO, G. B. **Caracterização dos solos e avaliação de propriedades edáficas em ambiente de tabuleiro costeiro da região norte fluminense (RJ)**. 2001. 162 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Instituto de Agronomia, Univ. Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2001.

NETO, M. M. J. Estatística multivariada. **Revista de Filosofia e Ensino**. Núcleo de Estudos e Pesquisas sobre o Ensino de Filosofia - NESEF, 2004.

OLEA, R. A. **Geostatistics for Engineers and Earth Scientists**. Boston: Kluwer Academic Publishers, 1999.

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.

PINHEIRO, A.; TEIXEIRA, L. P.; KAUFMANN, V. Capacidade de infiltração de águas em solos sob diferentes usos e práticas de manejo agrícolas. **Revista Ambiente & Água**, v. 4, n. 2, p. 1-12, 2009.

PIRES, L. F.; ROSA, J. A.; TIMM, L. C. Comparação de métodos de medida da densidade do solo. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 33, n. 1, p. 161-170, 2011.

PREVEDELLO, C. L. **Física do solo com problemas resolvidos**. Curitiba: Discovery, 1996. 446p.

PRUSKI, F.F. **Infiltração da água no solo**. Viçosa: Editora UFV, 2003.

REICHARDT, K.; TIMM, L. C. **Solo, planta e atmosfera: conceitos, processos e aplicações**. Barueri: Manole, 2008.

REICHERT, J. M.; SUZUKI, L. E. A. S.; REINERT, D. J. Compactação do solo em sistemas agropecuários e florestais: identificação, efeitos, limites críticos e mitigação. In: **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: SBCS, 2007. 72p.

REZENDE, J. O. Solos coesos dos tabuleiros costeiros: limitações agrícolas e manejo. Salvador: SEAGRI-SPA, 2000. 117 p. (**Série estudos agrícolas, n. 1**).

RICHARDS, L. A., Physical conditions of water in soil. In: C. A. BLACK, D. D. EVANS, J. L. WHITE, L. E. ENSMINGE and F. E. CLARK, ed. **Methods of soil analysis - Physical and mineralogical properties, including statistics of measurements and sampling**. Madison, ASASSSA, p.128-152, 1965.

RICHART, A.; FILHO, J. T.; BRITO, O. R.; LLANILLO, R. F.; FERREIRA, R. Compactação do solo: causas e efeitos. **Semina: Ciências Agrárias**, v.26, n. 3, p.321-344, 2005.

ROJAS, C.A.L.; VAN LIER, Q.J. Alterações físicas e hídricas de um Podzólico em função de sistemas de preparo. **Pesquisa Agropecuária Gaúcha**, v. 5, n. 1, p.105-115, 1999.

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, n. 3, p.241-248, 1991.

SANCHEZ, P.A. **Suelos del trópico - características y manejo**. San José, Instituto Interamericano de Cooperacion para la Agricultura, 1981. 645p.

SANTOS, R. C.; SOUZA, C. M.; REZENDE, M. J.; LANI, J. L.; CECON, P. R.; GOMES, M. A. Proposta metodológica para o cálculo de espaçamento entre sulcos de mulching vertical. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 60, n. 4, p. 552-562, jul/ago, 2013.

SASS, D. A.; SCHMITT, T. A. A comparative investigation of rotation criteria within exploratory factor analysis. **Multivariate Behavioral Research**, v. 45, n. 1, p. 73-103, 2010.

SAVEGNAGO, R. P.; CAETANO, S. L.; RAMOS, S. B.; NASCIMENTO, G. B.; SCHMIDT, G. S.; LEDUR, M. C.; MUNARI, D. P. Estimates of genetic parameters, and cluster and principal components analyses of breeding values related to egg

production traits in a White Leghorn population. **Poultry Science**, v. 90, n. 10, p. 2174-2188, 2011.

SCHEINOST, A.; SINOWSKI, W.; AUERSWALD, K. Rationalization of soil water retention curves in a highly variable soils cape, I. Developing a new pedotransfer function. **Geoderma**, v.78, n.1-4, p.129-143, 1997.

SECCO, D.; DA ROS, C.O.; SECCO, J.K.; FIORIN, J.E. Atributos físicos e produtividade de culturas em um Latossolo Vermelho argiloso sob diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, n. 3, p. 407-414, 2005.

SENA, M. M.; FRIGHETTO, R. T. S.; VALARINI, P. J.; TOKESHI, H.; POPPI, R. J. Discrimination of management effects on soil parameters by using principal component analysis: a multivariate analysis case study. **Soil and Tillage Research**, v. 67, n. 1, p. 171-181, 2002.

SENA, M. M.; POPPI, R. J.; FRIGHETTO, R. T. S.; VALARINI, P. J. Avaliação do uso de métodos quimiométricos em análise de solos. **Química Nova**, v. 23, n. 4, p. 547-556, 2000.

SIHAG, P.; TIWARI, N.K.; RANJAN, S. Estimation and inter-comparison of infiltration models. **Water Science**, v. 31, n. 1, p. 34–43, 2017.

SILVA, A. J. N. da; CABEDA, S. V.; LIMA, F. W. F. Efeito de sistemas de uso e manejo nas propriedades físico-hídricas de um Argissolo Amarelo de Tabuleiro Costeiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.29, n. 6, p. 833-842, 2005.

SILVA, C. L.; KATO, E. Efeito do selamento superficial na condutividade hidráulica saturada da superfície de um solo sob cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.32, n.2, p.213-220, 1997.

SILVA, J. U. C.; WENDLING, B.; CAMARGO, R.; PRAZERES MENDONÇA, L. B.; FREITAS, M. C. M. Análise comparativa entre os sistemas de preparo do solo: aspectos técnicos e econômicos. **Enciclopédia Biosfera**, v.7 n.12; p.1-11, 2011.

SILVA, N. F. da; CUNHA, F. N.; OLIVEIRA, R. C. de; CABRAL FILHO, F. R.; TEIXEIRA, M. B.; CARVALHO, J. J. Características físico-hídricas de um Latossolo sob diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v. 8, n.5, p. 375 - 390, 2014.

SOBRAL, L. F.; IVO, W. M. P. M.; RANGEL, J. H. A.; CINTRA, F. L. D. Avaliação crítica da história de uso dos solos nos tabuleiros costeiros do Nordeste. In: ARAÚJO, Q. R. A. (Org.) **500 anos de uso do solo no Brasil**. Ilhéus: Editus, 2002. p. 447-461.

SOUZA, L. S.; BORGES, A. L.; CINTRA, F. L. D.; SOUZA, L. D.; MELLO IVO, W. M. P. Perspectivas de uso dos solos dos Tabuleiros Costeiros. In: ARAÚJO, Q. R. A. (Org.) **500 anos de uso do solo no Brasil**. Ilhéus: Editus, 2002. p. 521 – 580.

SOUZA, Z. M. de; ALVES, M. C. Movimento de água e resistência à penetração em um Latossolo Vermelho distrófico de cerrado, sob diferentes usos e manejos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola**, ambient. [online]. 2003, vol.7, n.1, pp.18-23. ISSN 1807-1929.

STEFANOSKI, D. C.; SANTOS, G. G.; MARCHÃO, R. L.; PETTER, F. A.; PACHECO, L. P. Uso e manejo do solo e seus impactos sobre a qualidade física. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental** [online]. v.17, n.12, p.1301-1309, 2013.

TABACHNICK, B. G.; FIDELL, L. S. **Using Multivariate Statistics** (5th. ed.). Boston: Allyn and Bacon, 2007.

TAVARES FILHO, J.; FELTRAN, C. T. M.; OLIVEIRA, J. F.; ALMEIDA, E. Modelling of soil penetration resistance for an Oxisol under No-Tillage. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.36, n.1, p.89-95, 2012.

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

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

THEODORO, V. C. A.; ALVARENGA, M. I. N.; GUIMARÃES, R. J.; SOUZA, C. A. S. Alterações químicas em solo submetido a diferentes formas de manejo do cafeeiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 27, n. 6 p. 1039-1047, 2003.

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

TORMENA, C. A.; ROLOFF, G.; SA, J. C. M.. Propriedades físicas do solo sob plantio direto influenciadas por calagem, preparo inicial e tráfego. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** [online]. 1998, vol.22, n.2, pp.301-309. ISSN 1806-9657. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06831998000200016>.

TORRES, J. L. R.; RODRIGUES JUNIOR, D. J.; SENE, G. A.; JAIME, D. G.; VIEIRA, D. M. S. Resistência à penetração em área de pastagem de capim Tifton, influenciada pelo pisoteio e irrigação. **Bioscience Journal**, v. 28, p. 232-239, 2012.

TREVISAN, R.; SALEMI, L. F.; MORAES, J. M.; OLIVEIRA, J. C. M. Condutividade hidráulica do solo saturado na zona vadosa in situ e em laboratório. **Irriga**, v. 14, n. 3, p. 413-422, 2009.

ULOMA, A. R; SAMUEL, A. C; KIGSLEY, I. K. Estimation of Kostiakov's Infiltration Model Parameters of Some Sandy Loam Soils of Ikwano – Umuahia, Nigeria. **Open Transactions on Geosciences**, v. 1, n. 1, p. 21-30, 2014.

UNGER, P.W.; CASSEL, D.K. Tillage implement disturbance effects on soil properties related to soil and water conservation: a literature review. **Soil Tillage Research**, v. 19, n. 4, p. 363-382, 1991.

UNITED STATES DEPARTAMENTO OF AGRICULTURE – USDA. Soil Conservation service soil. Soil Survey Laboratory Methods and Procedure for Collecting Soil Samples: soil survey investigations. Washington, 1972.

VALICHESKI, R. R.; GROSSKLAUS, F.; STURMER, S. L. K.; TRAMONTIN, A. L.; BAADE, E. S. A. S. Desenvolvimento de plantas de cobertura e produtividade da soja conforme atributos físicos em solo compactado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, n. 9, p. 969–977, 2012.

VENDRUSCOLO, J.; RIBEIRO, T. S.; MESQUITA, F. O.; ALVES, A. S.; SANTOS, G. A. Propriedades físicas de um Latossolo e Argissolo comparados a quatro tipos de solos na Paraíba – Brasil. **Revista Verde**, v. 6, n. 4, p. 204-212, 2011.

VIEIRA, S. R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: NOVAIS R. F.; ALVAREZ, V., V. H.; SCHAEFER, G. R. **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo v. 1, p.1-54. 2000.

VIEIRA, J. M.; ROMERO, R. E.; FERREIRA, T. O.; ASSIS JUNIOR, R. N. Contribuição de material amorfo na gênese de horizontes coesos em Argissolos dos Tabuleiros Costeiros do Ceará. **Revista Ciência Agronômica**, v. 43, n. 4, p. out-dez, 2012.

VIEIRA, M. L.; KLEIN, V. A. Propriedades físico-hídricas de um Latossolo Vermelho submetido a diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, n. 1, p. 1271-1280, 2007.

WEIRICH NETO, P. H.; BUZOLINI JUNIOR, O; ROCHA, J. V.; BORGHI, E.; SVERZUT, C. B. Um estudo da variabilidade espacial do conteúdo de areia do solo, utilizando diferentes métodos de interpolação. **Ciências Agrárias e Engenharias**, v.12, n.1, p41-49, 2006.

WENDLING, B.; JUCKSCH, I.; MENDONÇA, E. S.; NEVES, J. C. L. Carbono orgânico e estabilidade de agregados de um Latossolo Vermelho sob diferentes manejos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.40, n.5, p.487-494, 2005.

WIDAMAN, K. F. Common factor versus components: Principals and principles, errors and misconceptions Em: R. Cudeck & R. C. Mac-Callum. **Factor Analysis at 100: Historical Developments and Future Directions** (pp. 177- 204). London: Lawrence Erlbaum Associates, 2007.

WIETHÖLTER, S. Manejo da fertilidade do solo no sistema plantio direto no sul do Brasil. **Anais...** In: Reunião Brasileira de Fertilidade do Solo, 24. Santa Maria: UFSM, 2000. CD-ROM.UFSM, 2000.

YAMAMOTO, J. K.; LANDIM, P. M. B. **Geoestatística: conceitos e aplicações**. 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos. 2013. 215 p.

ZIMMERMANN, B., E; ZEHE, N. K. HARTMANN; H. ELSENBEER. **Analyzing spatial data: An assessment of assumptions, new methods, and uncertainty using soil hydraulic data**, Water Resources Research, p. 44, 2007.

## **CAPÍTULO 1**

# **ATRIBUTOS FÍSICO-HÍDRICOS DE UM LATOSSOLO AMARELO TÍPICO DOS TABULEIROS COSTEIROS SOB DIFERENTES USOS<sup>1</sup>**

---

<sup>1</sup> Artigo a ser ajustado para submissão ao Comitê Editorial do periódico científico Revista Brasileira de Ciências Agrárias

## **ATRIBUTOS FÍSICO-HÍDRICOS DE UM LATOSSOLO AMARELO TÍPICO DOS TABULEIROS COSTEIROS SOB DIFERENTES USOS**

**RESUMO:** O uso incorreto do solo pode causar alterações drásticas em sua estrutura original, quando comparado ao solo sob vegetação nativa. Avaliar as modificações dos atributos físico-hídricos em diferentes sistemas de uso possibilita compreender melhor os impactos causados pela intervenção antrópica sob forma de manejo. Com o objetivo de estudar estas alterações em Latossolo Amarelo Distrocoeso, causadas por diferentes sistemas de uso, selecionou-se quatro áreas: floresta natural (FN), área em regeneração (AR), plantio direto (PD) e plantio convencional (PC), no município de Cruz das Almas (BA). Em cada área, foram coletadas 80 amostras deformadas e 400 amostras não deformadas em cada profundidade (0,0-0,20 e 0,20-0,40m). Os atributos avaliados foram: granulometria, porosidade total, macroporosidade e microporosidade, densidade do solo, condutividade hidráulica do solo saturado, matéria orgânica do solo, diâmetro médio ponderado e resistência mecânica a penetração de cada amostra nas duas profundidades estudadas. Para identificação dos atributos físico-hídricos semelhantes do solo, utilizou-se a técnica de análise multivariada denominada análise fatorial. Os atributos físico-hídricos do solo sofreram alterações entre os sistemas de uso, notadamente na profundidade mais superficial. O sistema plantio convencional foi o que mais se opôs ao sistema floresta natural. As técnicas de análise multivariadas mostraram que DMP, Ma, K<sub>0</sub>, DS e RP foram os atributos de maior importância para discriminação dos quatro sistemas. Os atributos que mais determinaram a diferença entre as profundidades foram PT e Ma de maneira direta e DS de maneira inversa. O uso dessas técnicas foi eficiente para avaliar as similaridades ou diferenças, com base nos atributos físico-hídricos do solo, uma vez que mostraram o grau de degradação mediante diferentes usos. Os resultados indicam que o uso intensivo do solo diminui a sua qualidade tendo como referência a vegetação nativa.

**Palavras-chave:** tabuleiros costeiros, floresta natural, área em regeneração, plantio direto, plantio convencional.

## PHYSICAL AND HYDROLOGICAL ATTRIBUTES OF A TYPICAL YELLOW LATOSOL OF COASTAL PLAINS UNDER DIFFERENT SYSTEMS OF USE

**ABSTRACT:** The incorrect use of soil may drastically change its original structure while compared to a soil with its native vegetation. The purpose of this study was to assess the changes in the physical-hydrological properties in different systems of use allow us to better understand the impacts caused by the anthropological intervention in the form of soil management. In order to study the modifications in a dystrophic yellow latosol, caused by different systems of use, we selected four areas: natural forest (NF), regeneration area (RA), no-tillage system (NT) and conventional planting (CP), located in Cruz das Almas, Bahia. In each area, 80 degraded samples were collected and 400 non-degraded samples at two depths (0.0-0.20 and 0.20-0.40m). The properties assessed were: granulometry, total porosity (TP), macroporosity (Ma) and microporosity (Mi), soil density (SD), saturated soil hydraulic conductivity ( $K_0$ ), organic matter in the soil (OM), weighted average diameter of aggregates (WAD), and mechanical resistance to penetration (RP) of each set of depth samples. For identification of soils with similar physical and hydrological attributes, we used a multivariate analysis approach known as factorial analysis. The soil physical-hydrological attributes were affected in each system used, notably in the more superficial depth. The conventional planting system was the most different from the natural forest system. The multivariate analysis showed that WAD, Ma,  $K_0$ , SD and RP were the more important properties for differentiation of the four systems. The best attributes for a direct discrimination of the depths were TP and Ma and the SD for an inverse discrimination. This approach was effective to assess the similarities or differences based on the soil physical-hydrological attributes, since it showed the degree of degradation for each system of use. Our results indicate that the intensive use of the soil reduces its quality compared to soil with intact native vegetation.

**Keywords:** coastal plains, natural forest, regeneration area, tillage, conventional planting.

## INTRODUÇÃO

O principal desafio do processo produtivo é desenvolver sistemas agrícolas sustentáveis, que sejam adaptados às condições edafoclimáticas, sociais e culturais. Para tanto, faz-se necessário quantificar e compreender os impactos causados pelos diferentes sistemas de manejo do solo, principalmente em seus atributos físicos (DEXTER; YOUNGS, 1992).

Para Hillel (1980), a supressão da vegetação natural e o uso da mecanização favorecem alterações nos atributos do solo, mudando assim suas características anteriores. Essas modificações, em geral, ocasionam perda de produtividade, decorrente da diminuição da quantidade de nutrientes, matéria orgânica, modificações de atributos físicos, químicos e hídricos (SILVA et al., 2014). Avaliar e monitorar alterações nos atributos do solo, decorrentes das intervenções antrópicas em ecossistemas naturais, constitui um importante instrumento de monitoramento da conservação ambiental, pois permite caracterizar a situação atual, alertar para situações de risco e, por vezes, prever situações futuras (CARDOSO et al., 2011).

A dificuldade está em converter uma área com vegetação preservada ou nativa em área experimental, implantando diferentes usos e de forma contínua, analisar e monitorar seus atributos. Este seria o procedimento ideal para compreender e quantificar o impacto do uso e manejo dos diferentes sistemas agrícolas (SANCHEZ, 1981). Entretanto, por diversas razões, não é possível atender esse pressuposto experimental; assim, o procedimento mais comum entre pesquisadores tem sido optar por estudar solos sob diferentes cultivos e compará-los com solos sob vegetação nativa, de semelhança pedogenética e topográfica (STEFANOSKI et al., 2013). No Brasil têm sido comuns estudos que avaliam as mudanças nos atributos dos solos provocadas pelo manejo, utilizando como referência o solo sob vegetação nativa.

Para exemplificar cita-se o estudo realizado por Silva et al. (2005), que avaliaram o efeito de três sistemas de manejo com cana-de-açúcar nos atributos físico-hídricos de um Argissolo Amarelo de Tabuleiro Costeiro e concluíram que, independente do manejo adotado, ocorreu redução do volume de poros e da condutividade hidráulica saturada, aumento da densidade do solo e da retenção

de água disponível para as plantas até a profundidade de 0,20-0,40 m, em relação ao solo da mata; Borges et al. (2009) avaliaram parâmetros físico-hídricos de Latossolo Vermelho sob pastejo e concluíram que, em geral, o solo estudado perdeu a qualidade físico-hídrica nas profundidades de 0-5 e 10-15 cm, em comparação ao cerrado natural; Luciano et al. (2010) relataram modificações nos atributos físicos de um Cambissolo Háplico sob plantio direto em relação ao da mata natural, sendo a taxa de infiltração de água a que sofreu maior influência pelo uso e manejo do solo; Santos et al. (2011) também identificaram alterações provocadas pelo manejo e à medida em que se intensificou o uso do solo os atributos físico-hídricos sofreram alterações mais expressivas, geralmente adversas ao crescimento vegetal; Lima et al. (2014) identificaram que o plantio convencional de feijão de caupi, após quatro ciclos de cultivos, em Latossolo Amarelo, influenciou os atributos físico-hídricos do solo, resultando no aumento da densidade do solo, redução da porosidade total, da macroporosidade, da condutividade hidráulica saturada e do parâmetro  $\alpha$  da curva de retenção, proporcionando uma mudança considerável no comportamento hidrodinâmico desses solos, em relação ao solo da mata.

Cientes de que a interferência antrópica, sob forma de preparo e/ou manejo, inevitavelmente imprime nova dinâmica aos processos naturais do solo, quando comparado ao ambiente nativo, e por ser o solo um sistema complexo, com arranjos espaciais e temporais variáveis, decorrente da própria formação e evolução, torna-se imprescindível compreender como o manejo muda as condições naturais do solo (KLEIN; LIBARDI, 2002; COSTA et al., 2003; ORTIGARA et al., 2014). Essa compreensão é fundamental para a manutenção das condições primordiais ao desenvolvimento das plantas, garantia de alta produtividade agrícola e consolidação de sistemas agrícolas sustentáveis.

A hipótese deste estudo é de que quanto mais degradado for o sistema de uso do solo mais evidente será sua relação inversa ao sistema de uso sob condição natural. Desta forma, objetivou-se investigar os atributos físico-hídricos de um Latossolo Amarelo Distrocoeso dos Tabuleiros Costeiros da Bahia, sob quatro sistemas de uso solo.

## MATERIAL E MÉTODOS

### Áreas de estudo

O trabalho foi desenvolvido no município de Cruz das Almas, Bahia (220 m; 12° 40' 12" S; 39° 06' 07" W) em quatro diferentes áreas (Tabela 1). Pela classificação de Köppen, o clima do município é do tipo Af (BAHIA,1998), caracterizado como tropical chuvoso de floresta com 1 a 3 meses secos. O total anual médio de chuva é de 1.100 mm. Os meses mais chuvosos, em condições normais, são abril e maio e os mais secos, setembro e outubro. A temperatura média anual é de 24,5°C.

O relevo é plano em todas as áreas e os solos foram classificados como Latossolo Amarelo Coeso, LAx (RIBEIRO et al. 1996), atualizado para Latossolo Amarelo Distrocoeso, LAdx (EMBRAPA, 2013) nas áreas do *campus* da UFRB e Latossolo Amarelo Distrocoeso, LAdx (GOMES et al., 2012), na reserva florestal. O solo é derivado do grupo Barreiras, o qual é formado por sedimentos arenosoargiloso com a fração areia constituída basicamente de quartzo e a fração argila de caulinita, com baixos teores de óxidos de ferro (GOMES et al., 2012).

**Tabela 1. Histórico e localização dos sistemas de uso do Latossolo Amarelo Distrocoeso, Cruz das Almas – BA.**

Sistemas	Coordenadas Geográficas	Descrição dos sistemas de uso
Floresta Natural (FN)	12° 39' 58,944" S 39° 6' 23,769" W	Reserva de floresta natural (mata Atlântica) do município, conhecida como "Mata do Cazuzinha", considerada um fragmento de floresta estacional semidecidual (VELOSO et al., 1991), com 11,7 ha, localizada dentro do espaço urbano;
Área em Regeneração (AR)	12° 39' 29,657" S 39° 4' 55,978" W	Área de restauração florestal denominada "Talhão Memória", anteriormente utilizada como pastagem, com predomínio de <i>Urochloa ssp.</i> por mais de 30 anos, ficou por um período de 10 anos sob pousio e até 2010 foi utilizada para descarte de adubo e calcário. Em 2012 teve início um processo de restauração florestal. Para tanto, realizou-se preparo do solo com uma aração e gradagem niveladora, sem calagem ou aplicação de adubos. Foram mantidas as árvores frutíferas e introduzidas espécies florestais, tais como: <i>Paubrasilia echinata</i> Lam, <i>Schinus terebinthifolius</i> Raddi, <i>Licania tomentosa</i> Benth, <i>Enterolobium contortisiliquium</i> Vell, entre outras, separadas por espaçamento de 2 x 3m. No total foram plantadas 800 mudas de essências florestais nativas em 0,8 ha. Apenas nos primeiros dois anos foram feitos controle de formiga. Desde a implantação são feitos tratos culturais de coroamento e roçagem, três vezes ao ano, com manutenção dos resíduos orgânicos sobre o solo;
Sistema plantio direto (PD)	12° 39' 29,178" S 39° 4' 52,457" W	Área experimental com plantio alternado de culturas temporárias, manejada há 08 anos em sistema plantio direto na palha, anteriormente foi utilizada como pastagem, com predomínio de

Sistema plântio convencional (PC)	12° 39' 26,006" S 39° 4' 52,529" W	<p><i>Urochloa ssp.</i> por mais de 30 anos. Antes da implantação do plântio a área recebeu mobilizações - aração e gradagem - para incorporação de corretivos. Depois desta fase semeou-se, ao longo dos anos para produção de fitomassa e grãos a seguinte sequência de culturas: Ano I – 2009: <i>Crotalária Juncea</i>; Ano II – 2010: Girassol; Ano III – 2011: <i>Crotalária Juncea</i> seguida de girassol; Ano IV – 2012: Consórcio feijão de porco com milheto, em seguida, girassol; Ano V – 2013: Consórcio de milheto com sorgo, seguida de girassol; Ano VI – 2014: Integração Girassol com Braquiária; Ano VII – 2015: Dessecação da Braquiária oriunda da integração de 2014 e integração Girassol com Braquiária; Ano VIII – 2016: Dessecação da Braquiária oriunda da integração de 2015 e em sucessão milho e <i>Crotalária Juncea</i>. Anualmente desde 2010, após o período de verão considerado na região como pousio realizou-se o manejo da fitomassa utilizando-se processos químicos com herbicidas ou mecânicos com trituradores;</p> <p>Área experimental com plântio convencional de mandioca, anteriormente utilizada como pastagem, com predomínio de <i>Urochloa ssp.</i> por mais de 30 anos e há mais de 10 anos está sendo cultivada. Inicialmente foi realizada uma calagem (em 2008), o preparo do solo é realizado anualmente, utilizando uma aração e duas gradagens, adubações com NPK de acordo com a necessidade das culturas e periodicamente realiza-se capinas com enxada. O último plântio realizado antes da coleta das amostras (julho 2016) foi feito no mês de julho de 2015.</p>
--	---------------------------------------	--

### Amostragem do solo e análises

Em cada sistema foi selecionada, ao acaso, uma subárea de 700 m<sup>2</sup> (20 x 35 m), para coleta das amostras deformadas e não deformadas de solo nas profundidades de 0,0-0,20 e 0,20-0,40 m. Em cada área selecionou-se 40 pontos por profundidade, em cada ponto foi coletada uma amostra deformada, (totalizando 80 amostras) por subáreas e cinco amostras não deformadas, por meio de anéis de 0,05 m x 0,05 m (diâmetro e altura), no ponto médio das profundidades (totalizando 400 amostras por subáreas).

Os atributos analisados foram: densidade do solo (DS), determinada pelo método do anel volumétrico; macroporosidade (Ma), microporosidade (Mi) e porosidade total (PT), pelo método da mesa de tensão. A tensão de 60 kPa foi adotada como referente à microporosidade; matéria orgânica do solo (MOS); granulometria e condutividade hidráulica do solo saturado, pelo método do permeâmetro de carga constante, todos conforme Embrapa (2011); também determinou-se a resistência mecânica à penetração e o diâmetro médio ponderado dos agregados por via úmida.

Para a determinação da resistência mecânica do solo à penetração as amostras foram saturadas e colocadas em câmara de Richards e submetidas a

um potencial de 100 kPa para a padronização do conteúdo de água, sendo, após esse procedimento, submetidas ao penetrômetro eletrônico de bancada modelo MA 933. Os valores obtidos em  $\text{kgf cm}^{-2}$  foram multiplicados pela constante 0,098 para transformação em MPa (BEUTLER et al., 2001; SILVA; GIAROLA, 2001).

A estabilidade dos agregados foi determinada via úmida adotando-se o procedimento descrito por Castro Filho et al. (1998), por meio de peneiramento em água, após pré-umedecimento lento dos agregados, por capilaridade. Os agregados assim preparados foram transferidos para dois conjuntos de cinco peneiras de 2,00; 1,00; 0,50; 0,25 e 0,105 mm de diâmetro de malha, sendo submetidos à agitação vertical (42 ciclos por min) durante 15 min, imersos em recipiente com água. O solo retido em cada peneira foi acondicionado em recipientes de alumínio para secagem em estufa a 105 °C, durante 24 h; em seguida, foram pesados e calculados a massa e a porcentagem de agregados estáveis em cada uma das classes de diâmetro de agregados. Os valores de diâmetro médio ponderado (DMP) foram obtidos de acordo com a Eq. 1:

$$DMP = \sum_{i=1}^n (x_i \cdot w_i) \quad (1)$$

em que DMP – é o diâmetro médio ponderado;  $x_i$  – diâmetro médio das classes, mm e  $w_i$  – proporção de cada classe em relação ao total.

### **Análise estatística**

As variações dos atributos físico-hídricos do solo foram analisadas por de técnicas estatísticas univariada e multivariadas.

Para análise univariada os valores observados dos atributos foram submetidos à análise de variância, segundo delineamento inteiramente casualizado, sendo os efeitos entre os sistemas, profundidade e interação sistema x profundidade comparados pelo teste de Tukey ao nível de 5% de significância empregando-se o programa computacional Statistica versão 7.0 (STATSOFT, 2004).

A análise multivariada foi composta por dois testes para realização da análise fatorial exploratória, a saber: o critério de Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) e o

teste de esfericidade de Bartlett, demonstrando que o estudo das variáveis não deve ser feito de forma isolada, mas sim conjunta.

Foi utilizada, também, a técnica de análise de componentes principais (ACP) com o objetivo de entender o comportamento dos diferentes sistemas de uso por meio da redução de informação sobre os atributos físico-hídricos do solo para um número menor de variáveis “componentes principais” ortogonais com perda mínima de informação, sendo os sistemas de uso do solo *scores* e as variáveis analisadas *loadings* representados em um plano fatorial (SENA et al., 2002; SAVEGNAGO et al., 2011). Assim a técnica permitiu formação de grupos de variáveis que proporcionaram uma síntese de resultados e caracterização do estágio atual dos atributos segundo os sistemas de uso em estudo.

A seleção dos componentes principais foi realizada de acordo com critério sugerido por Kaiser em 1958 (HAIR et al., 2005); segundo o autor os CPs que apresentam autovalores maiores que 1, são suficientes para explicar a maior parte da variação no conjunto dos dados e podem ser utilizadas para ordenação bidimensional dos ambientes e das variáveis avaliados. Para confirmação gráfica dos CPs utilizou-se o método gráfico denominado de teste do *scree plot* ou teste de Cattell (HAIR et al., 2005). Para escolha do número de fatores optou-se fazer seleção incluindo-se somente CPs cujos valores próprios (autovalores) fossem superior a 1 e conseguisse incluir na análise os componentes que sintetizaram a explicação da variância acumulada em torno de 80% da variação total dos dados. Os resumos dos CPs estão configurados pela representação dos autovalores e autovetores utilizando-se também diagramas de ordenação das variáveis (atributos) nos quatro sistemas avaliados e nas duas profundidades. As análises foram realizadas com auxílio no software SPSS (*Statistical Package for Social Sciences*) versão 22.0.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### Análise univariada

Ao avaliar as frações inorgânicas dos solos, foram identificadas apenas duas classes texturais: franco-arenosa na profundidade de 0,0-0,20 m nos

sistemas floresta natural (FN), área em regeneração (AR) e plantio direto (PD), e franco-argilo-arenosa na profundidade 0,20-0,40 m nos sistemas FN, AR, PD e nas duas profundidades do plantio convencional (PC). Em função da similaridade textural entre os sistemas, é possível afirmar que as diferenças encontradas entre eles não foram influenciadas por esse atributo (Tabela 2).

**Tabela 2. Composição textural para duas profundidades de um Latossolo Amarelo Distrocoeso sob diferentes sistemas de uso, Cruz das Almas, BA.**

Profundidade	Areia	Silte	Argila	Classe Textural
m	g kg <sup>-1</sup>			
<b>Floresta Nativa</b>				
0,00 – 0,20	820,4	35,8	143,8	Franco-arenosa
0,20 – 0,40	751,3	30,5	218,2	Franco-argilo-arenosa
<b>Área em Regeneração</b>				
0,00 – 0,20	791,3	101,2	107,5	Franco-arenosa
0,20 – 0,40	737,2	49,3	213,5	Franco-argilo-arenosa
<b>Plantio Direto</b>				
0,00 – 0,20	820,2	53,1	126,7	Franco-arenosa
0,20 – 0,40	708,1	53,4	238,5	Franco-argilo-arenosa
<b>Plantio Convencional</b>				
0,00 – 0,20	772,4	50,3	177,3	Franco-argilo-arenosa
0,20 – 0,40	735,3	35,6	229,1	Franco-argilo-arenosa

Os valores médios de porosidade total (PT) estão situados entre 0,31 a 0,60 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup> (0,0-0,20 m), os maiores encontrados no PD e FN, quando comparados aos outros sistemas. O PD apresentou 16,7; 26,7 e 45% a mais de poros em comparação a FN, AR e PC, respectivamente. Tal fato foi influenciado pelos valores de microporosidade (0,47 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>), que foi maior e diferente (p<0,05) em comparação aos demais sistemas. É provável que a microporosidade no PD, em 0,0-0,20 m, tenha sido influenciada pelos altos teores de matéria orgânica, superior estatisticamente aos demais sistemas (Tabela 3).

A macroporosidade (Ma) variou de 0,13 a 0,30 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>, com menor valor no PD e maior na FN. O fato de o PD apresentar menor Ma que o PC pode ter sido influenciado pelo não revolvimento do solo (por longo período), somado a movimentação de máquinas e implementos agrícolas, o que concorda com

os relatados encontrados por Stone e Silveira (2001) e Luciano et al. (2010) caracterizando maior compactação do solo.

A redução da porosidade total e da macroporosidade, assim como o aumento da microporosidade no sistema PD (0,0-0,20 m), podem não afetar a dinâmica de ar e água. Henklain et al. (1996) identificaram maior presença de microporos no plantio direto, em comparação ao plantio convencional, contudo não houve limitação ao crescimento e desenvolvimento de raízes. Para os autores o fato se deve à qualidade dos poros, ou seja: continuidade ao longo do perfil, presença de canais e galerias formados pela atividade biológica e decomposição das raízes das culturas anteriores. Também é possível comprovar nesse estudo que não houve limitação à dinâmica de água no PD, ao observar os valores de  $K_0$  (Tabela 3), verifica-se que não foram restritivos para esse sistema.

**Tabela 3. Valores médios de porosidade total, macroporosidade, microporosidade (PT, Macro e Micro), matéria orgânica do solo (MOS), densidade do solo (DS), densidade de partículas (Dp), condutividade hidráulica do solo saturado ( $K_0$ ), diâmetro médio ponderado (DMP) e resistência mecânica à penetração (RP), em diferentes sistemas de usos, nas profundidades de 0,0-0,20 e 0,20-0,40 m, Cruz das Almas, BA.**

Atributos	Profundidade (m)	SISTEMAS DE USO			
		FN	AR	PD	PC
PT ( $m^3 m^{-3}$ )	0,0 – 0,20	0,50 aB	0,44 aC	0,60 aA	0,33 Ad
	0,20 – 0,40	0,40 bA	0,39 bA	0,38 bA	0,31 Bb
Macro ( $m^3 m^{-3}$ )	0,0 – 0,20	0,30 aA	0,24 aB	0,13 aC	0,20 aB
	0,20 – 0,40	0,18 bA	0,17 bA	0,14 aB	0,11 Bc
Micro ( $m^3 m^{-3}$ )	0,0 – 0,20	0,20 aB	0,20 aB	0,47 aA	0,13 bC
	0,20 – 0,40	0,22 aAB	0,22 aB	0,24 bAB	0,20 aB
MOS ( $g kg^{-3}$ )	0,0 – 0,20	32,1 aB	28,3 aC	38,6 aA	21,9 aD
	0,20 – 0,40	9,7 bB	30,6 aA	10,8 bB	12,7 bB
DS ( $Mg m^{-3}$ )	0,0 – 0,20	1,41 aA	1,50 aB	1,41 aA	1,64 aC
	0,20 – 0,40	1,62 bA	1,64 bA	1,66 bA	1,75 bB
$K_0$ ( $mm h^{-1}$ )	0,0 – 0,20	851,8 aA	490,9 aB	453,7 aB	295,2 aC
	0,20 – 0,40	293,9 bA	249,2 bA	219,1 bA	49,6 bB
DMP (mm)	0,0 – 0,20	3,00 aA	2,87 aA	2,76 aA	2,12 aB
	0,20 – 0,40	2,27 bB	2,76 aA	1,51 bC	1,30 bD
RP (MPa)	0,0 – 0,20	0,73 aA	0,87 aA	1,10 aA	1,42 aB
	0,20 – 0,40	1,61 bA	1,72 bA	2,35 bB	4,72 bC

Médias seguidas da mesma letra minúscula nas profundidades e maiúscula nas linhas entre os diferentes sistemas, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Avaliando-se a PT na profundidade de 0,20-0,40 m observa-se que os valores reduziram em relação a 0,0-0,20 m e foram estatisticamente semelhantes para todos os sistemas, com exceção do PC. Os valores de Ma também reduziram com a profundidade, exceto no PD, sendo superiores estatisticamente nos sistemas FN e AR em comparação ao PD e PC, este último com menor valor médio. No que se refere a Ma os valores ficaram acima de  $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  em todos os sistemas, não comprometendo o fluxo de ar e água no solo (CULLEY et al., 1987; CUNHA et al., 2011). O atributo Mi apresentou similaridade estatística para todos os sistemas na profundidade de 0,20-0,40 m.

Os valores médios de matéria orgânica do solo (MOS) na profundidade de 0,0-0,20 m variaram de 21,9 a 38,6  $\text{g kg}^{-1}$ , sendo o maior encontrado no PD e o menor no PC. De acordo com os critérios adotados pela Comissão Estadual de Fertilidade do Solo (1989), vigentes até hoje no Estado da Bahia, os teores de MOS foram considerados altos na FN e PD ( $>30 \text{ g kg}^{-1}$ ) e médios para AR e PC ( $15-30 \text{ g kg}^{-1}$ ). Mesmo agrupados segundo a classificação adotada, os valores foram diferentes estatisticamente em todos os sistemas estudados, pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade (Tabela 3). A avaliação dos teores de matéria orgânica tem papel fundamental na melhoria das condições físico-hídricas do solo, uma vez que é o principal agente cimentante para formação de agregados, os quais influenciam na aeração, retenção e movimentação de água no solo (ARAÚJO, 2008; DALMAGO et al., 2009; FONTANA et al., 2016). De acordo com os resultados desta pesquisa, verificou-se que o manejo utilizado no sistema PD foi eficiente no aumento dos teores de MOS em superfície.

De modo geral, observou-se diminuição dos valores de MOS na profundidade de 0,20-0,40 m em todos os sistemas, com exceção do sistema AR que apresentou altos teores de MOS ( $30,6 \text{ g kg}^{-1}$ ), diferindo dos demais sistemas, que apresentaram baixos teores ( $<15 \text{ g kg}^{-1}$ ) a essa profundidade. Os resultados obtidos neste trabalho corroboram em parte os encontrados por Freitas et al. (2017) que detectaram redução do teor de C ao longo do perfil de um Latossolo Vermelho para os sistemas de floresta natural, área em regeneração e cultivo.

A densidade do solo (DS) nos diferentes sistemas em 0,0-0,20 m, apresentou valores que variaram de  $1,41 \text{ Mg m}^{-3}$  a  $1,64 \text{ Mg m}^{-3}$ , sendo os valores, em ordem decrescente, no PC, AR, PD e FN (Tabela 3). Os valores de DS no PC

corroboram com resultados obtidos por Barros (2015) e foram maiores que o limite crítico de  $1,52 \text{ Mg m}^{-3}$ , estabelecido para Latossolo Amarelo Distrocoeso (SOUZA et al., 2003). A análise do teste de média não apresentou diferenças estatísticas entre os sistemas PD e FN (Tukey,  $p > 0,05$ ) que apresentaram menores valores de DS, mas ambos diferiram estatisticamente dos demais. Os sistemas AR e PC apresentaram maiores DS, e entre eles foi observada diferença entre as médias ( $p < 0,05$ ) e maior densidade do solo no PC. Percebe-se que a cobertura do solo não influenciou na compactação em superfície, mas aonde houve maior revolvimento ocorreu aumento da densidade do solo (Tabela 3).

Na profundidade de 0,20-0,40 m, a tendência observada para os valores de densidade do solo foi semelhante ao descrito; todavia, o efeito dos sistemas de manejo sobre a densidade do solo soma-se ao efeito da coesão natural nessa profundidade. Comportamento semelhante para densidade do solo foi relatado por Oliveira et al. (2010) ao estudarem um Argissolo Amarelo Distrocoeso latossólico dos Tabuleiros Costeiros em sistemas de manejo com cana-de-açúcar.

De acordo com Neto et al. (2009), a densidade do solo em subsuperfície é um importante atributo para avaliar a presença de coesão em solos de Tabuleiros. Araújo Filho et al. (2001) e Corrêa (2005) afirmam que a DS no coeso varia entre  $1,50$  a  $1,68 \text{ Mg m}^{-3}$ , com média de  $1,59 \text{ Mg m}^{-3}$ . Como os valores de DS em 0,20-0,40 m profundidade variaram entre  $1,64$  e  $1,75 \text{ Mg m}^{-3}$  é possível que exista presença do horizonte coeso a essa profundidade. Outro indicativo da presença do horizonte coeso é o alto valor de DS no PC ( $1,75 \text{ Mg m}^{-3}$ ), que seria oriundo da ação de cargas externas de compressão, somada ao caráter coeso, característica edáfica deste solo (VASCONCELOS et al., 2014).

A tabela 3 também apresenta os valores médios para condutividade hidráulica do solo saturado ( $K_0$ ). Sua análise permite identificar diferenças entre os sistemas estudados; os valores em ordem decrescente foram na FN, AR, PD e PC, para as duas profundidades. De acordo com a classificação sugerida por Ferreira (1999) para  $K_0$ , todos os valores observados em 0,0-0,20 m foram considerados muito rápidos ( $>250 \text{ mm h}^{-1}$ ). Na profundidade de 0,20-0,40 m, apenas no sistema FN a  $K_0$  apresentou classificação muito rápida, os sistemas AR e PD apresentaram classificação rápida ( $125$  a  $250 \text{ mm h}^{-1}$ ) e PC moderada ( $20$  a  $62,5 \text{ mm h}^{-1}$ ).

Na profundidade de 0,0-0,20 m, o valor de  $K_0$  na FN foi maior e diferente estatisticamente dos demais sistemas de uso. Os sistemas AR e PD apresentaram valores intermediários, porém não diferiram pelo teste (Tukey,  $p < 0,05$ ); já o sistema PC apresentou valor menor e diferente ( $p < 0,05$ ) dos demais sistemas (Tabela 3). Resultados similares foram encontrados por Souza e Alves (2003) quando avaliaram seis sistemas de uso em um Latossolo Vermelho Distrófico típico do cerrado.

Os valores de  $K_0$  reduziram significativamente nos solos em todos os sistemas entre as profundidades de 0,0-0,20 e 0,20–0,40 m. A maior redução no valor de  $K_0$  no sistema PC (0,20-0,40 m) reflete a redução da macroporosidade, que é responsável pela aeração e drenagem da água no perfil do solo (HILLEL, 1980), e a sua influência na condutividade hidráulica do solo tem sido verificada na literatura (AZOOZ et al., 1996; SILVA et al., 2003; BORGES et al., 2009; FONTANA et al., 2016).

Avaliando-se ainda a tabela 3 verifica-se que maiores diâmetros médios ponderados (DMP) para agregados, em 0,0–0,20 cm, foram observados nos sistemas FN, AR e PD, que não diferiram estatisticamente. O PC apresentou menor valor de DMP e foi diferente ( $p < 0,05$ ) dos demais sistemas estudados.

Ao considerar os valores de DMP entre as profundidades, observou-se que todos os sistemas apresentaram redução e foram estatisticamente diferentes, exceto AR. Em 0,20-0,40 m verificou-se diferença estatística entre todos os sistemas de uso, sendo os valores, em ordem decrescente, de AR, FN, PD e PC.

Os resultados evidenciam que o processo de estabilização dos agregados desse solo está associado ao teor de matéria orgânica. Nota-se que, à medida que o teor de matéria orgânica diminuiu, pelo revolvimento excessivo do solo ou pelo baixo aporte de material orgânico proporcionado pelos sistemas de uso, decresceu o DMP. Diversos pesquisadores encontraram correlações significativas e positivas entre o teor de C orgânico e os índices de estabilidade de agregados (ROTH et al., 1991; SILVA et al., 2006; OLIVEIRA, 2008).

É provável também que o efeito da matéria orgânica soma-se à ação dos ciclos sucessivos de umedecimento e secagem, uma vez que, em profundidades mais superficiais, o solo apresenta ciclos de umedecimento e secagem mais intensos. Oliveira et al. (1996) investigaram a ação dos ciclos de umedecimento e

secagem em Latossolos brasileiros e concluíram que seus efeitos sobre a formação e estabilidade de agregados maiores ocorrem nas camadas superficiais. Tal fato explica os resultados observados nos sistemas de uso avaliados.

Os valores relacionados à resistência mecânica a penetração (RP) demonstraram diferença estatística para os diferentes sistemas de usos, assim como para as profundidades. Em termos de valores absolutos, os menores valores de RP foram encontrados em 0,0-0,20 m, variando de 0,73 a 1,42 MPa, sendo o menor valor encontrado na FN e o maior no PC (Tabela 3). Segundo a classificação para resistência mecânica à penetração do solo adotada por Beutler et al (2001) nessa profundidade os sistemas FN (0,73 MPa) e AR (0,87 MPa) apresentaram baixa resistência (0,1 a 1,0 MPa) e os sistemas PD (1,10 MPa) e PC (1,42 MPa) moderada (1,10 a 2,0 MPa), todos não restritivos para o cultivo da maioria das culturas agrícolas (TAVARES FILHO; TESSIER, 2009).

De acordo com Cunha et al. (2007), altos valores de resistência do solo à penetração são comuns em plantio direto. Entretanto, se houver acúmulo de MOS oriunda da deposição de fitomassa cultural residual, afetará positivamente a qualidade do solo nas primeiras camadas, reduzindo a resistência à penetração em plantio direto (LIMA et al., 2013); isso se deve ao efeito determinante da matéria orgânica na formação e estabilização de agregados do solo e, dessa forma, seu acúmulo está associado a alterações na susceptibilidade a compactação do solo (BRAIDA et al., 2010). Leroy et al. (2008) relatam que o aumento de matéria orgânica promove redução da resistência à penetração, causando efeito benéfico ao sistema, fato verificado nesse estudo no PD, quando observados os valores de MOS e RP na profundidade de 0,0-0,20 m (Tabela 3).

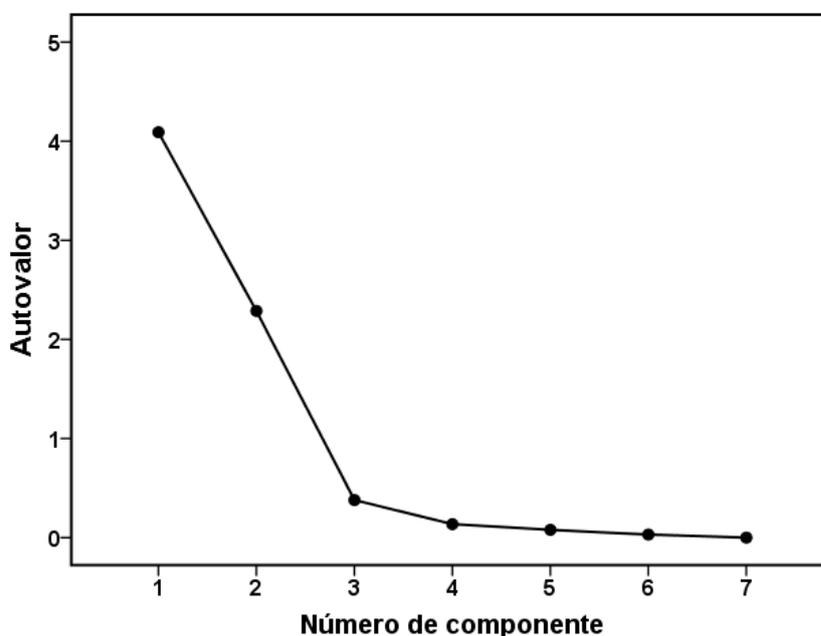
O maior grau de compactação foi encontrado na camada de 0,20-0,40 m, na qual os valores de RP encontrados diferiram ( $p < 0,05$ ) da camada superior em todos os sistemas. Nessa camada, os valores de RP variaram de 1,61 a 4,72 MPa, seguindo a mesma tendência da camada superior, ou seja, menor restrição na FN e maior no PC. Todavia mudaram de classificação (BEUTLER et al., 2001), sendo os valores de RP moderados em FN (1,61 MPa) e AR (1,70 MPa), altos (2,1 a 4,0 MPa) no PD (2,35 MPa) e muito alto (4,1 a 8,0 MPa) no PC (4,72 MPa).

Para Tavares Filho e Tessier (2009), valores de resistência do solo à penetração de 2,0 a 4,0 MPa podem restringir ou mesmo impedir o crescimento e

o desenvolvimento das raízes. Entretanto, a compactação do solo se torna mais prejudicial em solo seco, sendo que em condições de maior conteúdo de água pode haver crescimento radicular em valores de resistência do solo à penetração superiores a 4,0 MPa.

### Análise multivariada

Análise fatorial completa dos valores extraídos pelo gráfico *scree plot*, considerando como significantes apenas os autovalores maiores que 1, permitiu identificar dois componentes para a profundidade de 0,0-0,20 m (Figura 1).



**Figura 1. Resultado da análise dos atributos físico-hídricos do solo para a profundidade de 0,0-0,20 m pelo método *scree plot*.**

Pelo método *scree plot* é possível observar que os dois primeiros fatores apresentam maiores autovalores, sendo o primeiro componente principal (CP1) responsável por 4,090 e o segundo componente principal (CP2) responsável por 2,287 (Figura 1), portanto responsáveis por uma maior variância explicada. Segundo Hair et al. (2005) é possível perceber graficamente a baixa contribuição dos componentes, principalmente, quando existe uma tendência paralela ao eixo dos componentes e autovalores muito próximos, fato perceptivo na figura 1, após o terceiro componente.

A análise preliminar dos componentes principais foi realizada em todos os sistemas e com todos os oitos componentes (atributos), cogitado pela técnica, que avaliaram os dados na profundidade de 0,0-0,20 m.

As ponderações de cada atributo do solo, que constituiu a combinação linear foi melhor visualizada e confirmada quando se utilizou a rotação Varimax com Normalização de Kaiser e rotação convergida em três interações. Em função das semelhanças das cargas de MOS nos componentes principais CP1 (0,757) e CP2 (0,607), optou-se pela eliminação desta, em atendimento ao pressuposto de ortogonalidade entre os componentes (Tabela 4).

**Tabela 4. Matriz<sup>1</sup> de correlação dos componentes principais rotacionados dos atributos físicos do solo, valor próprio inicial e percentagem de variação nas CPs em quatro sistemas de uso do solo, na profundidade de 0,0-0,20 m.**

Variáveis	Componentes	
	CP1	CP2
Densidade do solo (DS)	-0,808	-0,259
Condutividade hidráulica do solo saturado (K0)	0,933	0,075
Porosidade total (PT)	0,295	0,929
Diâmetro médio ponderado (DMP)	0,897	0,251
Resistência mecânica à penetração (RP)	-0,922	-0,006
Microporosidade (Mi)	-0,123	-0,991
Macroporosidade (Ma)	0,802	-0,477
<b>Valor próprio inicial</b>	<b>4,090</b>	<b>2,287</b>
<b>Variância explicada (%)</b>	<b>58,432</b>	<b>32,669</b>

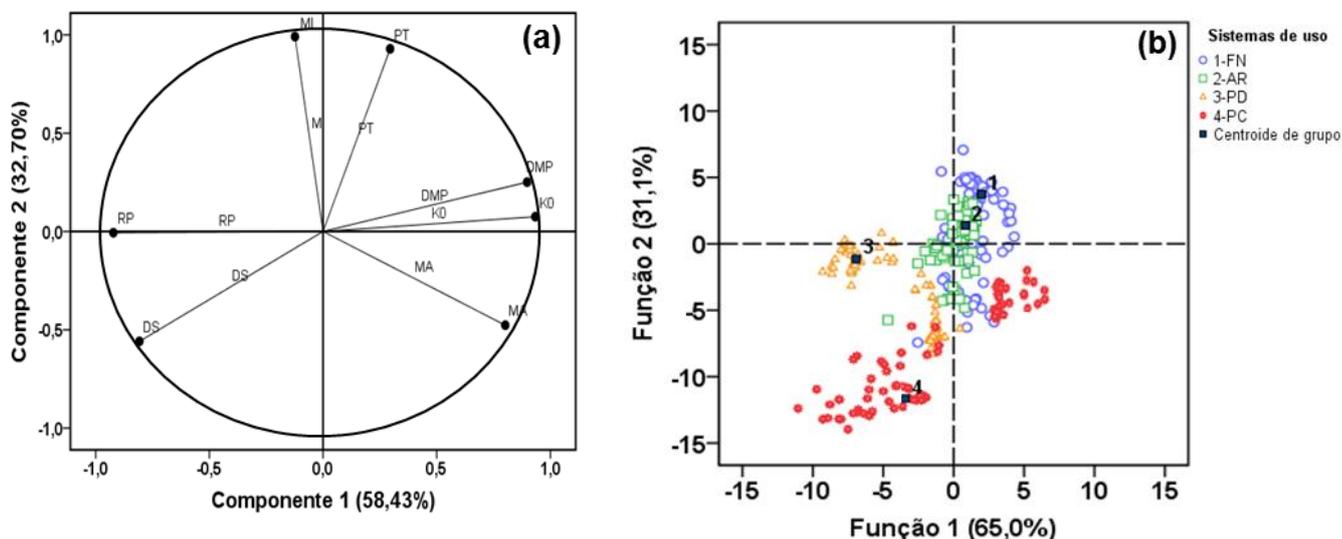
<sup>1</sup> Método de rotação Varimax, com normalização de Kaiser

O CP1 representou 58,43%, sendo constituído pelos atributos: K0 (0,933), DMP (0,897) e Ma (0,802), com intercorrelação positiva, e RP (-0,922) e DS (-0,808), com intercorrelação negativa, todos com importância significativa para explicar a diferença entre os sistemas estudados (Tabela 4). As intercorrelações positivas referem-se aos atributos que contribuíram para melhoria das condições físico-hídricas do solo, enquanto que as intercorrelações negativas caracterizam degradação, comportamento também determinado nos atributos avaliados pelo teste de média da análise univariada (Tabela 3).

O segundo eixo constituído por CP2, com 32,70% da variação total, representa as variâncias que mais contribuíram na dispersão dos dados amostrais. Apenas dois atributos constituíram o eixo CP2, sendo correlacionado diretamente por PT (0,929) e inversamente pela Mi (-0,991). A escolha dos CP1 e CP2 representou 91,1% da variância explicada. Os demais componentes apresentaram explicações irrisórias de apenas 8,9%, que deixaram de ser incluídas nas análises.

Esses resultados revelam que grande parte da variabilidade quantificada nos atributos do solo em 0,0-0,20 m pode ser atribuída aos valores de K0, DMP, Ma, RP, DS, PT e Mi.

Considerando que há uma variação expressiva na nuvem de pontos das amostras para o conjunto de variáveis analisadas, este resultado fica evidente quando as figuras 2a e 2b são superpostas, observando-se que o posicionamento dos sistemas em relação a CP1 e CP2, reflete a contribuição isolada de cada componente no estudo. Este procedimento permitiu uma discriminação visual na plotagem dos sistemas no campo biplote.



**Figura 2. Autovalores e autovetores da configuração (a) e diagrama de ordenação de distribuição (b) dos atributos físico-hídricos do solo avaliados na profundidade de 0,0-0,20 m, em quatro sistemas de uso do solo.**

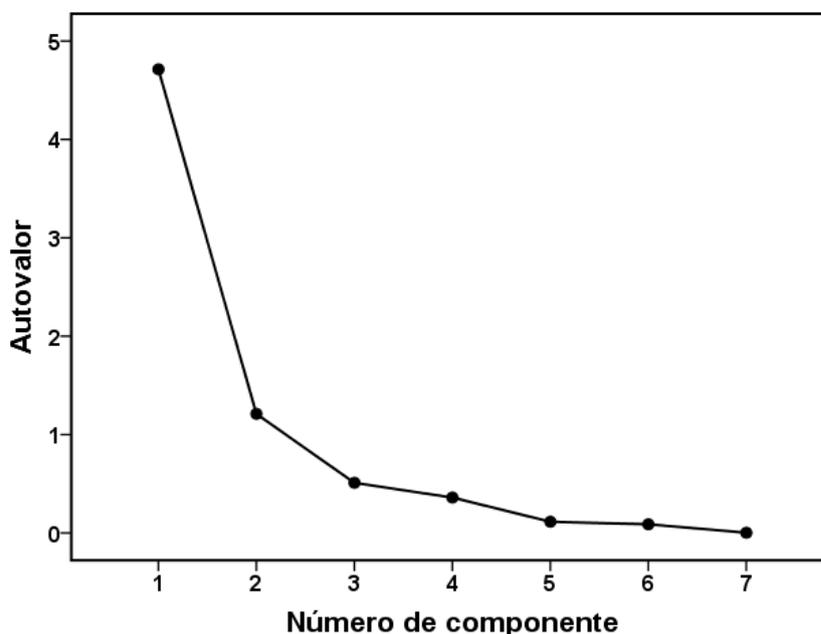
A figura 2 evidencia que os atributos físico-hídricos diretamente relacionados com FN foram: K0, Ma e DMP, registrando-se, portanto, os maiores

valores dos atributos neste sistema, e inversamente os menores para RP e DS, por estes se encontrarem em posição oposta no plano do círculo da correlação.

Pelo posicionamento dos centroides na biploide (Figura 2b), verifica-se que as alterações ocorridas em AR e PD foram geralmente intermediárias às obtidas nos sistemas FN e PC, porém na proporção direta para K0 e DMP, e indireta para RP e DS, com exceção do PD que obteve menor valor de Ma e maior valor médio de Mi, em comparação com aos outros sistemas (Tabela 3).

De acordo com os dados coletados na profundidade de 0,0-0,20 m percebe-se que a modificação do solo, causadas pela ação mecânica para implantação dos cultivos nos sistemas PD e PC, alterou de maneira marcante a superfície do solo, em comparação com o sistema FN, verificando-se os menores valores para K0, DMP e Mi e os maiores para RP e DS.

Pelo gráfico *scree plot*, referente à profundidade de 0,20-0,40 m, é possível identificar como significantes dois componentes com autovalores maiores que 1, o CP1 com 4,571 e CP2 com 1,353 (Figura 3).



**Figura 3. Resultado da análise dos atributos físico-hídricos do solo para a profundidade de 0,20-0,40 m pelo método *scree plot*.**

Na análise dos CPs para os valores dos atributos do solo quantificados em 0,20-0,40 m percebeu-se a necessidade da retirada do atributo MOS, conforme realizado em 0,0-0,20 m, para atender aos pressupostos e critérios com que a

técnica foi empregada, uma vez que a variável (MOS) infringiu o princípio da ortogonalidade.

Os dois primeiros componentes principais CP1 (65,31%) e CP2 (19,32%) foram também necessários e suficientes para explicar 84,63% da variação total. O resultado mostrou que Ma (0,965), K0 (0,926), PT (0,923) e DMP (0,877) indicaram relações diretas, enquanto que DS (-0,819) e RP (-0,815) registraram efeitos indiretos, portanto, os atributos de maior importância, uma vez que fazem parte do primeiro componente do eixo (Tabela 5).

**Tabela 5. Matriz<sup>1</sup> de correlação dos componentes principais rotacionados dos atributos físicos do solo, valor próprio inicial e percentagem de variação nas CPs em quatro sistemas de uso do solo, na profundidade de 0,20-0,40 m.**

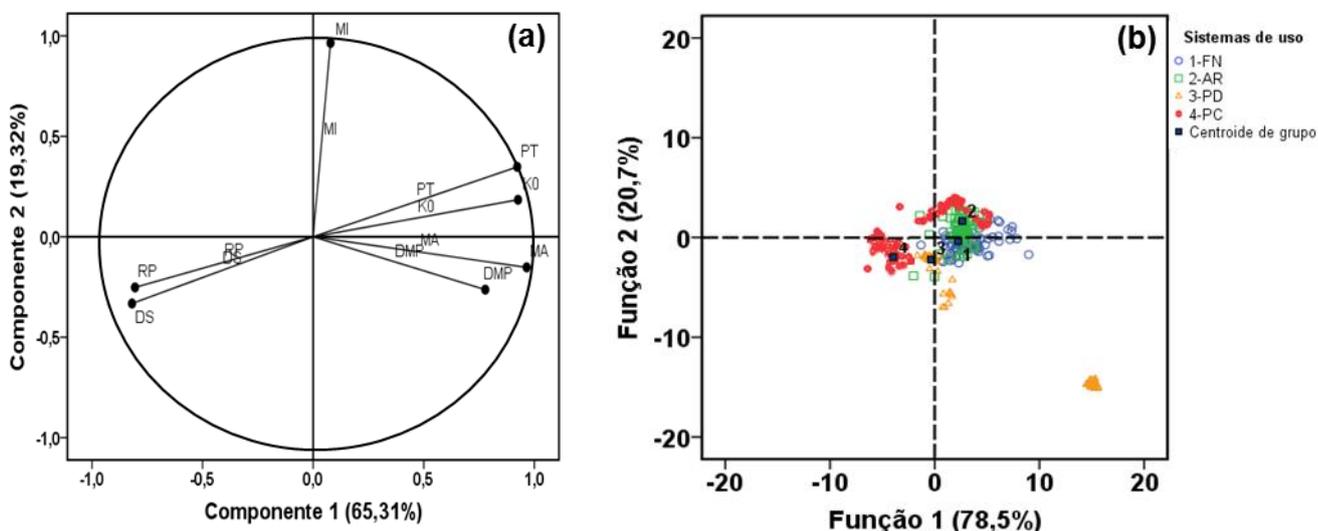
Variáveis	Componentes	
	CP1	CP2
Densidade do solo (DS)	-0,819	-0,332
Condutividade hidráulica do solo saturado (K0)	0,926	0,184
Porosidade total (PT)	0,923	0,348
Diâmetro médio ponderado (DMP)	0,877	-0,263
Resistência mecânica à penetração (RP)	-0,805	-0,252
Microporosidade (Mi)	0,078	0,965
Macroporosidade (Ma)	0,965	-0,152
<b>Valor próprio inicial</b>	<b>4,571</b>	<b>1,353</b>
<b>Variância explicada (%)</b>	<b>65,306</b>	<b>19,322</b>

<sup>1</sup> Método de rotação Varimax, com normalização de Kaiser

O CP2 foi representado por Mi (0,965) que, positiva e isoladamente explicou 19,32% da variância do segundo eixo, restando explicação de 15,37%, fracionada para os outros cinco componentes, cada um deles sem informação expressiva para o estudo.

Em função do posicionamento dos sistemas FN e AR na biplot (Figura 4b) e conforme o grau dos vetores, bem como a proximidade entre variáveis: K0, Ma, PT e DMP verificou-se que essas variáveis estão fortemente relacionadas com os dois sistemas em questão (Figura 4a). Esses atributos tiveram centroides no quadrante da superposição dos vetores das variáveis relatadas, enquanto que,

para os mesmos sistemas, os atributos DS e RP apresentaram vetores em posição oposta, obtendo-se então os menores índices, complementando assim a caracterização dos sistemas (Figura 4).



**Figura 4. Autovalores e autovetores da configuração (a) e diagrama de ordenação de distribuição (b) dos atributos do solo avaliados na profundidade de 0,20-0,40 m em quatro sistemas de uso do solo.**

O sistema PC isoladamente é caracterizado por apresentar maior ligação com os atributos de DS e RP (Figura 4), registrando-se maiores índices dessas variáveis e menores índices para K0, Ma, DMP e PT. É possível que os maiores valores para DS e RP no PC tenham sido influenciados pelo tipo de manejo adotado que compacta o solo, em função do maior trânsito de máquinas, e estando em subsuperfície somam-se ao caráter coeso, característica edáfica desse solo (VASCONCELOS et al., 2014). No sistema PD verificou-se mesma discriminação para atributos RP e DS, embora com menor intensidade, apresentando mesma tendência do PC.

As figuras 2a e 4a demonstraram o grau de importância dos atributos do solo relacionados com PT, DMP, K0, Ma, DS e RP, enquanto que as figuras 2b e 4b mostraram o posicionamento dos quatro sistemas de uso determinados por análises de componentes principais. Os maiores valores de PT, DMP e K0, e os menores para DS e RP representam os sistemas FN e AR, em relação aos demais, independente da profundidade. Verifica-se a nítida tendência de agrupamento dos atributos na FN e AR à direita do diagrama e dos sistemas PD e

PC à esquerda. Os agrupamentos verificados pelos CPs distinguiram os sistemas em dois grupos, assim caracterizados: o que não expressou a influencia do manejo do solo (FN e AR) e o que expressou (PD e PC), com maior ou menor intensidade, conforme características dos atributos físico-hídricos do solo avaliados.

Independente dos atributos avaliados houve maior dispersão das amostras na profundidade de 0,0-0,20 m (Figura 2b). Nessa profundidade foi observada maior influencia dos sistemas de uso sobre os atributos do solo, fato percebido também pela redução da porcentagem da variância explicada pelas duas componentes principais CP1 (58,43%) e CP2 (32,70%), que totalizou 91,13%. O distanciamento dos ângulos determinou o agrupamento dos sistemas por quadrantes, FN e AR ficaram no segundo e PD e PC no quarto na profundidade de 0,0-0,20 m.

A aglomeração da nuvem de pontos das amostras do solo sob FN e AR nas duas profundidades foi influenciada principalmente pelos atributos K0 e DMP. Esses atributos tiveram a mesma participação direta na profundidade de 0,0-0,20 m e com igual tendência em 0,20-0,40 m, e de forma indireta tem-se RP e DS, principalmente no PC em comparação com PD. Observou-se ainda pelo círculo das correlações (Figura 4a), que PT e Ma foram os atributos que influenciaram de maneira determinante a profundidade de 0,20-0,40 m.

Os atributos de porosidade total e macroporosidade, de maneira direta, e densidade do solo, de maneira inversa, foram os que mais determinaram a diferença entre as profundidades. Verificou-se o fortalecimento da intercorrelação entre PT e Ma, de forma independente, demonstrada pelo estreitamento dos ângulos e intensidade do grau destes (PT e Ma) com DMP e K0 quando da profundidade mais superficial (0,0-0,20 m) para a mais profunda (0,20-0,40 m), constatado pelas Figuras 2a e 4a.

Sabendo-se que  $Ma = PT - Mi$ , sendo que Mi foi excluída por razões técnicas, tem-se que a Ma foi a de maior autoria na discriminação entre profundidades, neste quadrante, enquanto que no quadrante oposto observou-se também, que a diminuição do ângulo e aumento do vetor da DS na profundidade de 0,20-0,40 m fez com que esta se aproximasse mais da RP, fortalecendo o grupo de variáveis da CP1 e CP2 que explicaram melhor a diferença entre

profundidades. Esta evidência se justifica pelo fato de os macroporos serem os primeiros atingidos pela compactação (MAGALHÃES et al., 2009), determinando a forte correlação positiva de  $M_a$  (0,802) na profundidade de 0,0-0,20 m, passando para  $M_a$  (0,965) na profundidade de 0,20-0,40 m. Por outro lado, de forma inversa, mas com igual tendência, tem-se a  $D_S$ , que variou de -0,808 na profundidade 0,0-0,20 m para -0,819 em 0,20-0,40 m, independente dos sistemas em estudo.

Em subsuperfície houve menor influência sobre a variância das variáveis, já que os sistemas apresentaram separação menos nítida (Figura 4b), concordando com Pereira et al. (2010). Esses resultados demonstram que a concentração dos impactos com o cultivo foi em superfície.

Independente da profundidade, os sistemas apresentaram comportamento similar, quando considerado o conjunto das variáveis em estudo. No entanto, com referência ao sistema FN, observou-se aproximação dos atributos avaliados na AR e que o uso do solo no PD e PC provocou alteração em vários atributos, o que pode levar à degradação destes com o tempo, contudo com maior intensidade no PC. Por meio das técnicas multivariadas foi possível identificar quais as variáveis que melhor se relacionaram com cada tipo de sistema, quais as que provocaram maior efeito na alteração das características do solo, bem como o efeito do uso do solo na sua degradação.

## CONCLUSÕES

Os atributos físico-hídricos do solo sofreram alterações entre os sistemas de uso, notadamente na profundidade mais superficial.

O plantio convencional foi o que mais se opôs ao sistema floresta natural nas duas profundidades, demonstrando maior grau de degradação com o uso

As técnicas de análise multivariadas mostraram que diâmetro médio ponderado, macroporosidade, condutividade hidráulica saturada, densidade do solo e resistência mecânica a penetração foram os atributos de maior importância para discriminação dos quatro sistemas.

Os atributos que mais determinaram a diferença entre as profundidades foram porosidade total e macroporosidade de maneira direta e densidade do solo de maneira inversa.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARAÚJO, E.A. **Qualidade do solo em ecossistema de mata nativa e pastagens na Região Leste do Acre, Amazônia Ocidental**. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 2008. 233p. (Tese de Doutorado)

ARAÚJO FILHO, J.C.; CARVALHO, A.; SILVA, F.B.R. Investigações preliminares sobre a pedogênese de horizontes coesos em solos dos tabuleiros costeiros do Nordeste do Brasil. In: WORKSHOP COESÃO EM SOLOS DOS TABULEIROS COSTEIROS, Aracaju, 2001 **Anais**. Aracaju, Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2001. p.123-142.

AZOOZ, R.H.; ARSHAD, M.A.; FRANZLUEBBERS, A.J. Pore size distribution and hydraulic conductivity affected by tillage in Northwestern Canada. **Soil Science Society America Journal**, v. 60, n. 1, p. 1197-1201, 1996.

BAHIA. Superintendência de Estudos Econômicos e Sociais da Bahia. Atributos climáticos do Estado da Bahia. Salvador, 1998. 85 p. (**Série Estudos e Pesquisas, 38**).

BARROS, T. N. **Variabilidade espacial de atributos de qualidade do solo em sistemas plantio direto e convencional no Recôncavo da Bahia**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Centro de Ciências Agrárias, Ambientais e Biológicas. Cruz das Almas, BA, 2015. 63 p.

BEUTLER, A. N.; SILVA, M. L. N.; CURI, N.; FERREIRA, M. M.; CRUZ, J. C.; PEREIRA FILHO, I. A. Resistência à penetração e permeabilidade de Latossolo Vermelho distrófico típico sob sistemas de manejo na região dos cerrados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25, n. 1, p. 167-177, 2001.

BORGES, T. A.; OLIVEIRA, F. A.; SILVA, E. M. da; GOEDERT, W. J. Avaliação de parâmetros físico-hídricos de Latossolo Vermelho sob pastejo e sob cerrado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola Ambiental**, v.13, n.1, p.18–25, 2009.

BRAIDA, J. A.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; VEIGA, M. Teor de carbono orgânico e a susceptibilidade à compactação de um Nitossolo e um Argissolo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campinas Grande-PB, v. 14, n. 2, p. 131–139, 2010.

CARDOSO, E.L.; SILVA, M.L.N.; CURI, N.; FERREIRA, M.M.; FREITAS, D.A.F. Qualidade química e física do solo sob vegetação arbórea nativa e pastagens no pantanal sul mato-grossense. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, n. 2, p. 613-622, 2011.

CASTRO FILHO, C.; MUZILLI, O.; PODANOSCHI, A.L. Estabilidade dos agregados e sua relação com o teor de carbono orgânico em um Latossolo Roxo Distrófico, em função de sistemas de plantio, rotações de culturas e métodos de

preparo das amostras. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.22, n. 2, p.527-538, 1998.

CORRÊA, M.M. **Gênese de horizontes coesos e fragipãs de solos do ambiente Tabuleiros Costeiros**. Viçosa, MG, Universidade Federal de Viçosa, 2005. 72p. (Tese de Doutorado).

COSTA, F. S.; ALBUQUERQUE, J. A.; BAYER, C.; FONTOURA, S. M. V.; WOBETO, C. Propriedades físicas de um Latossolo Bruno afetadas pelos sistemas de plantio direto e preparo convencional. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, n. 3, p. 527-535, 2003.

COMISSÃO ESTADUAL DE FERTILIDADE DO SOLO (Salvador, BA). **Manual de adubação e calagem para o Estado da Bahia**. 2. Ed. Salvador: CEPLAC/EMATERBA/EMBRAPA/EPABA/NITROFÉRTIL, 1989. 176 p.

CULLEY, J. L. B.; LARSON, W. E.; RANDALL, G. W. Physical properties of a typic Haplaquoll under convencional and no-tillage. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 51, n. 3, p. 1587-1593, 1987.

CUNHA, E. Q.; BALBINO, L. C.; STONE, L. F.; LEANDRO, W. M.; OLIVEIRA, G. C. Influência de rotações de culturas nas propriedades físico-hídricas de um Latossolo Vermelho em plantio direto. **Engenharia Agrícola**, v.27, n. 3, p. 665-667, 2007.

CUNHA, E.Q.; STONE, L.F.; MOREIRA, J.A.A.; FERREIRA, E.P.B.; DIDONET, A.D.; LEANDRO, W.M. Sistemas de preparo do solo e culturas de cobertura na produção orgânica de feijão e milho. I – Atributos físicos do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, n.2, p. 589-602, 2011.

DALMAGO, G. A.; BERGAMASCHI, H.; BERGONCI, J. I.; KRUGER, C. A. M.; COMIRAN, F.; HECKLER, B. M. M. Retenção e disponibilidade de água às plantas, em solo sob plantio direto e preparo convencional. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 13 (suplemento), p. 855–864, 2009.

DEXTER, A.R.; YOUNGS, I.M. Soil physic toward 2000. **Soil & Tillage Research**, v.24, n. 10, p. 101-106, 1992.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUARIA - EMBRAPA. Serviço de Produção de Informação – SPI. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 4.ed. Rio de Janeiro, 2013. 306p.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Rio de Janeiro, RJ). **Manual de métodos de análise de solo**. 2ª Ed. Revisada. Rio de Janeiro: 2011. 225p.

FERREIRA, P.A. **Drenagem de terras agrícolas**. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 1999. 187p

FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G.; BALIEIRO, F. de C.; MOURA, T. P. A. de; MENEZES, A. R. de; SANTANA, C. I. Características e atributos de Latossolos sob diferentes usos na região Oeste do Estado da Bahia. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, n. 9, p. 1457-1465, 2016.

FREITAS, L. DE; OLIVEIRA, I. A. DE; SILVA, L. S.; FRARE, J. C. V.; FILLA, V. A.; GOMES, R. P. Indicadores da qualidade química e física do solo sob diferentes sistemas de manejo. **Revista Unimar Ciências**, v. 26, n. 1-2, p. 18-36, 2017.

GOMES, J. B. V.; ARAUJO FILHO, J. C.; CURI, N. Solos de Tabuleiros Costeiros sob florestas naturais e sob cultivo. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 32, n. 71, p. 233-246, 2012.

HAIR, J. F.; ANDERSON, R. E.; TATHAM, R. L.; BLACK, W. C. (2005). **Análise multivariada de dados**. A. S. Sant'Anna e A. C. Neto (Trad.). Porto Alegre: Bookman. 2005. 593 p. il.

HENKLAIN, J.C.; GUIMARÃES, M.F.; VIEIRA, M.J.; MEDINA, C.C. Efeito do preparo do solo no desenvolvimento radicular. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PLANTIO DIRETO PARA UMA AGRICULTURA SUSTENTÁVEL, 1., Ponta Grossa, 1996. **Resumos expandidos**. Ponta Grossa, Instituto Agrônômico do Paraná, 1996. p.103-105.

HILLEL, D. **Fundamentals of soil physics**. New York, Academic Press, 1980. 413p.

KLEIN, V. A.; LIBARDI, P. L. Densidade e distribuição do diâmetro dos poros de um Latossolo Vermelho sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.26, n. 4, p.857-867, 2002.

LEROY, B.L.M.; HERATH, H.M.S.K.; SLEUTEL, S.; DE NEVE, S.; GABRIELS, D.; REHEUL, D.; MOENS, M. The quality of exogenous organic matter: short-term effects on soil physical properties and soil organic matter fractions. **Soil Use Manage**, Malden-MA, v. 24, n. 2, p. 139-147, 2008.

LIMA, R. P.; LEÓN, M. J.; SILVA, A. R. Resistência mecânica à penetração sob diferentes sistemas de uso do solo. **Scientia Plena**, São Cristóvão - SE, v. 9, n. 6, p.1-7, 2013.

LIMA, J. R. de S.; SOUZA, S. de; ANTONINO, A. C. D.; SILVA, I. de F. da; CORRÊA, M. M.; LIRA, C. A. B. de O. Atributos físico-hídricos de um Latossolo Amarelo cultivado e sob mata nativa no Brejo Paraibano. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v.9, n. 4, p.599-605, 2014.

LUCIANO, R. V.; BERTOL, I.; BARBOSA, F. T.; KURTZ, C.; FAYAD, J. A. Propriedades físicas e carbono orgânico do solo sob plantio direto comparados à mata natural, num Cambissolo Háplico. **Revista de Ciências Agroveterinárias**. Lages, v.9, n. 1, p. 09-19, 2010.

MAGALHÃES, E.N.; OLIVEIRA, G.C.; SEVERIANO, E.C.; COSTA, K.A.P.; CASTRO, M.B. Recuperação estrutural e produção do capim-tifton 85 em um Argissolo Vermelho-Amarelo compactado. **Ciência Animal Brasileira**, v. 10, n. 1, p. 68-76, 2009.

NETO, J. A. L; RIBEIRO, M. R; CORRÊA, M. M.; SOUZA JÚNIOR, V. S.; LIMA, J. F. W. F.; ABREU, F; FERREIRA, R. L. Caracterização e gênese do caráter coeso em Latossolos Amarelos e Argissolos dos Tabuleiros costeiros do estado de Alagoas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, n. 4, p. 1001-1011, 2009

OLIVEIRA, T.S.; COSTA, L.M.; REGAZZI, A.J.; FIGUEIREDO, M.S. Efeito de ciclos de umedecimento e secagem sobre a estabilidade de agregados em água de quatro Latossolos brasileiros. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 20, n. 3, p. 509-515, 1996.

OLIVEIRA, V.S. **Compactação em solos coesos dos tabuleiros costeiros de Alagoas**. Recife, Universidade Federal Rural de Pernambuco, 2008. 81p. (Tese de Doutorado)

OLIVEIRA, V. S.; ROLIM, M. M.; VASCONCELOS, R. F. B.; COSTA, Y. D. J.; PEDROSA, E. M. R. Compactação de um Argissolo Amarelo Distrocoeso submetido a diferentes manejos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, n. 9, p. 914-920, 2010.

ORTIGARA, C.; KOPPE, E.; BONINI, da L., F.; BERTOLLO, A. M.; KAISER, D. R.; SILVA, V. R. da. Uso do solo e propriedades físico-mecânicas de Latossolo Vermelho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, n. 2, p. 619-626, 2014.

PEREIRA, S.A.; OLIVEIRA, G.C.; SEVERIANO, E.C.; BALBINO, L.C.; OLIVEIRA, J.P. Análise de componentes principais dos atributos físicos de um Latossolo Vermelho Distrófico típico sob pastagem e mata. **Global Science and Technology**, v. 3, n. 2, p. 87-97, 2010.

RIBEIRO, L. P. Gênese, evolução e degradação dos solos amarelos coesos dos tabuleiros costeiros. In: REUNIÃO TÉCNICA SOBRE SOLOS COESOS DOS TABULEIROS COSTEIROS, 1., 1996, Cruz das Almas. **Anais...** Cruz das Almas: EMBRAPA-CPATC; EMBRAPA-CNPMP; AGRUFBA; IGUFBA, 1996. p. 27-35.

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, n. 3, p.241-248, 1991.

SANCHEZ, P.A. **Suelos del trópico - características y manejo**. San José, Instituto Interamericano de Cooperacion para la Agricultura, 1981. 645p.

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.

SAVEGNAGO, R. P.; CAETANO, S. L.; RAMOS, S. B.; NASCIMENTO, G. B.; SCHMIDT, G. S.; LEDUR, M. C.; MUNARI, D. P. Estimates of genetic parameters, and cluster and principal components analyses of breeding values related to egg production traits in a White Leghorn population. **Poultry Science**, v. 90, n. 10, p. 2174-2188, 2011.

SENA, M. M.; FRIGHETTO, R. T. S.; VALARINI, P. J.; TOKESHI, H.; POPPI, R. J. Discrimination of management effects on soil parameters by using principal component analysis: a multivariate analysis case study. **Soil and Tillage Research**, v. 67, n. 2, p. 171-181, 2002.

SILVA, A. J. N. da; CABEDA, S. V.; LIMA, F. W. F. Efeito de sistemas de uso e manejo nas propriedades físico-hídricas de um Argissolo Amarelo de tabuleiro costeiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, n. 6, p. 833-842, 2005.

SILVA, A.J.N.; CABEDA, M.S.V.; CARVALHO, F.G. Matéria orgânica e propriedades físicas de um Argissolo Amarelo Coeso sob sistemas de manejo com cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 10, n. 3, p. 579-585, 2006.

SILVA, A. P.; GIAROLA, N. F. B. Estabelecimento de índice de resistência dos solos para quantificação do grau de coesão. In: WORKSHOP SOBRE COESÃO EM SOLOS DOS TABULEIROS COSTEIROS, Aracaju, 2001. **Anais**. Aracaju, Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2001. p.145-160.

SILVA, E. M. da; AZEVEDO, J. A.; RAUBER, J. C.; BRAGA, A. R. dos S. **Caracterização físico-hídrica e hidráulica de solos do Cerrado submetidos a diferentes sistemas de preparo do solo**. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2003. 22p. Boletim de P&D 101.

SILVA, N. F. da; CUNHA, F. N.; OLIVEIRA, R. C. de; CABRAL FILHO, F. R.; TEIXEIRA, M. B.; CARVALHO, J. J. Características físico-hídricas de um Latossolo sob diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**. v. 8, n. 5, p. 375 - 390, 2014.

SOUZA L.S.; SOUZA, L.D.; SOUZA, L.F.S. Indicadores físicos e químicos de qualidade do solo sob o enfoque de produção vegetal: estudo de caso para citros em solos coesos de tabuleiros costeiros. In: Congresso Brasileiro de Ciência do Solo, 29. Ribeirão Preto, 2003. **Anais**. Ribeirão Preto, UNESP, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2003. CD-ROM.

SOUZA, Z. M.; ALVES, M. C. Movimento de água e resistência do solo à penetração em um Latossolo Vermelho distrófico de cerrado, sob diferentes usos e manejos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.7, n.1, p.18-23, 2003.

STEFANOSKI, D. C.; SANTOS, G. G.; MARCHÃO, R. L.; PETTER, F. A.; PACHECO, L. P. Uso e manejo do solo e seus impactos sobre a qualidade

física. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental** [online]. v. 17, n. 12, p.1301-1309, 2013.

STATSOFT, INC. **Statistica for Windows – Computer program manual**. Tulsa, 2004.

STONE, L. F.; SILVEIRA, P. M. Efeitos dos sistemas de preparo e da rotação de culturas na porosidade e densidade do solo. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, Viçosa, v. 25, n. 2, p. 395-401, 2001.

TAVARES FILHO, J.; TESSIER, D. Compressibility of oxisol aggregates under no-till in response to soil water potential. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, n. 6, p.1525-1533, 2009.

VASCONCELOS, R.F.B .; de SOUZA, E.R .; CANTALICE, J.R.B .; SILVA, L.S. Qualidade física de Latossolo Amarelo de tabuleiros costeiros em diferentes sistemas de manejo da cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18, n. 4, p. 381-386, 2014.

VELOSO, H. P.; RANGEL FILHO, A. L. R.; LIMA, J. C. A. **Classificação da Vegetação Brasileira, adaptada a um sistema universal**. IBGE, Rio de Janeiro. 1991. 112 pp.

## **CAPÍTULO 2**

### **VARIABILIDADE ESPACIAL DE ATRIBUTOS FÍSICO-HÍDRICOS EM LATOSSOLO AMARELO DISTROCOESO SOB DIFERENTES USOS<sup>2</sup>**

---

<sup>2</sup> Artigo a ser ajustado para submissão ao Comitê Editorial do periódico científico da Revista Ciência Agronômica

## VARIABILIDADE ESPACIAL DE ATRIBUTOS FÍSICO HÍDRICOS EM LATOSSOLO AMARELO DISTROCOESO SOB DIFERENTES USOS

**RESUMO:** A conversão de ecossistemas naturais em sistemas agrícolas provoca alterações significativas nos atributos do solo, podendo ser capaz de interferir na dependência e distribuição espacial natural. O objetivo do trabalho foi caracterizar a variabilidade espacial de atributos físico-hídricos de um Latossolo Amarelo Distrocoeso sob floresta natural (FN), área em regeneração (AR), plantio direto (PD) e convencional (PC). Em cada área delimitando-se uma subárea com espaçamento de 20 x 35 m, foram coletadas amostras de solos em malha regular com espaçamento de 5 x 5 metros nas profundidades de 0,0-0,20 e 0,20-0,40 m, sendo 40 pontos amostrais por profundidade, totalizando 80 pontos por área. Os atributos analisados foram: textura, densidade do solo (DS), macroporosidade (Ma), microporosidade (Mi), porosidade total (PT), matéria orgânica do solo (MO), diâmetro médio ponderado dos agregados (DMP) e condutividade hidráulica do solo saturado ( $K_0$ ). Os dados foram submetidos à estatística descritiva e a normalidade verificada pelo teste Shapiro-Wilk. A análise de dependência espacial foi realizada por meio da geoestatística. Os resultados demonstraram que as maiores variabilidades analisadas pelo coeficiente de variação ocorreram na profundidade de 0,0-0,20 m; a dependência espacial foi moderada e forte, exceto onde houve efeito pepita puro; a dependência espacial aumentou em profundidade para todos os atributos, exceto para DMP na FN e  $K_0$  no PD; os valores de alcance encontrados contrariam a ideia de que quanto mais intensamente cultivado o solo, mais homogêneo se apresenta seus atributos físico hídricos do solo; os modelos esférico e gaussiano foram os que mais se ajustaram ao conjunto de dados na profundidade de 0,0-0,20 m e o exponencial em 0,20-0,40 m; e o tamanho amostral utilizado foi suficiente para todos os atributos em 0,0-0,20 m e insuficiente na profundidade de 0,20-0,40 m apenas para  $K_0$  em todos os sistemas, e para MO apenas nos plantios direto e convencional, aceitando-se 10% de variação em torno da média.

**Palavras-chave:** geoestatística, tamanho amostral, floresta natural, área em regeneração, plantio direto, plantio convencional

## PHYSICAL AND HYDROLOGICAL SPACIAL VARIABILITY IN A DYSTROPHIC YELLOW LATOSOL UNDER DIFFERENT USE SYSTEMS

**ABSTRACT:** The conversion of natural ecosystems into agricultural systems causes significant modifications to soil attributes and may interfere on their natural spatial dependence and distribution. Our goal was characterizing the spatial variation of the physical-hydrological attributes in a dystrophic yellow latosol under natural forest (NF), regeneration area (RA), no-tillage system (NT) and conventional planting (CP). For each study area a subarea with a 20 x 35m spacing was delimited. The soil samples were collected in a regular mesh with a 5 x 5 m spacing at 0.0-0.20 and 0.20-0.40 m depth, for a total of 40 samples in each depth and a total of 80 samples per area. The attributes assessed were: texture, soil density (SD), macroporosity (Ma) and microporosity (Mi), total porosity (TP), organic matter in the soil (OM), weighted average diameter (WAD) of aggregates, and saturated soil hydraulic conductivity ( $K_0$ ). The data were analyzed by descriptive statistics and the normality verified by the Shapiro-Wilk test. The spatial dependence analysis was performed by geostatistics. Our results show that most of the variations analyzed by the coefficient of variation occurred at a depth of 0.0-0.20 m; the spatial dependence was moderate to strong, except where there was pure nugget effect; the spatial dependence increased in depth for all attributes, except for WAD on NF and  $K_0$  on the NT; the range values observed oppose the idea of greater homogeneity of physical-hydrological attributes in more intensively cultivated soil; the spherical and Gaussian models were the best fitted to the data set at the depth of 0.0-0.20 m and the exponential model to the depth of 0.20-0.40 m; the sample size was sufficient for all attributes at 0.0-0.20 m depth, but not at the depth of 0.20-0.40 m for the  $K_0$  in all systems, and for MO in the no-tillage and conventional planting and for that a 10% variation of the average is acceptable.

**Keywords:** geostatistics, sample size, natural forest, regeneration area, no-tillage, conventional planting

## INTRODUÇÃO

O solo é um sistema complexo que apresenta, em seu estado natural, um funcionamento dinâmico, definido pela interação de seus atributos de natureza química, física e biológica, a qual é alterada, irreversivelmente, pelos sistemas de cultivo (KLEIN et al., 2008; KLEIN; LIBARDI, 2002; COSTA et al., 2003). A magnitude dessas alterações está diretamente relacionada com o tipo e a intensidade do uso, sistemas de manejo e o tempo de utilização do solo (WENDLING et al., 2005). Por outro lado, as modificações determinadas pela intensidade do manejo causam, especialmente, modificações nos atributos físico-hídricos (BOTTEGA et al., 2011; VENDRUSCOLO et al., 2011). Na medida em que se intensifica o uso agrícola os atributos físico-hídricos do solo sofrem alterações, geralmente adversas ao crescimento vegetal, que ficam mais nítidas quando os sistemas de uso são comparados com o estado do solo ainda sob vegetação natural (GUIMARÃES et al., 2010).

Diversos autores têm relatado a ocorrência de alterações nos atributos físico-hídricos de solos manejados, quando comparados a sistemas naturais. Para exemplificar citam-se diversos trabalhos: Ramos et al. (2013), que observaram redução na condutividade hidráulica do solo, tanto no plantio direto quanto no convencional, em comparação com a mata nativa; Figueiredo et al. (2009), que verificaram sob diferentes manejos, alterações nos atributos físico-hídricos de Latossolo, tais como redução da macroporosidade, aumento da microporosidade e densidade do solo, em comparação com a área preservada no cerrado; Machado et al. (2008), que identificaram alterações no aumento da densidade de um Latossolo Vermelho quando utilizado por mais de 20 anos para cultivo de culturas anuais com preparo convencional do solo em relação ao uso anterior com mata nativa; e Flores et al., (2008), que observaram no preparo convencional e plantio direto o aumento da densidade do solo e redução da porosidade total, macroporosidade, retenção e disponibilidade de água em relação à mata nativa.

Ao comparar diferentes tipos de manejo, Bataglia et al. (2012) afirmam que as alterações são mais pronunciadas nos sistemas convencionais de preparo, em comparação aos sistemas conservacionistas. Tal fato foi constatado por Castro et

al. (2009), quando avaliaram, após oito anos, o plantio direto com milho e identificaram aumento na condutividade hidráulica do solo saturado e macroporosidade em comparação aos sistemas de preparo mecânico (preparo convencional), ambos sob Latossolo Vermelho.

De acordo com Camargo et al. (2010), o manejo não só afeta os atributos, mas também sua variabilidade espacial, já que em toda área existe uma variabilidade natural. Para Vieira (2000) não há dúvidas que a variabilidade espacial de solos sempre existiu, seja em ambiente natural ou manejado. Segundo Mendes et al. (2008), as práticas de manejo provocam fontes adicionais de heterogeneidade aos atributos do solo, mas, normalmente não interferem em sua dependência espacial, que varia entre pontos relativamente próximos em área de mesma unidade taxonômica, muitas vezes de forma significativa (LIMA et al., 2006; CAMPOS et al., 2013a).

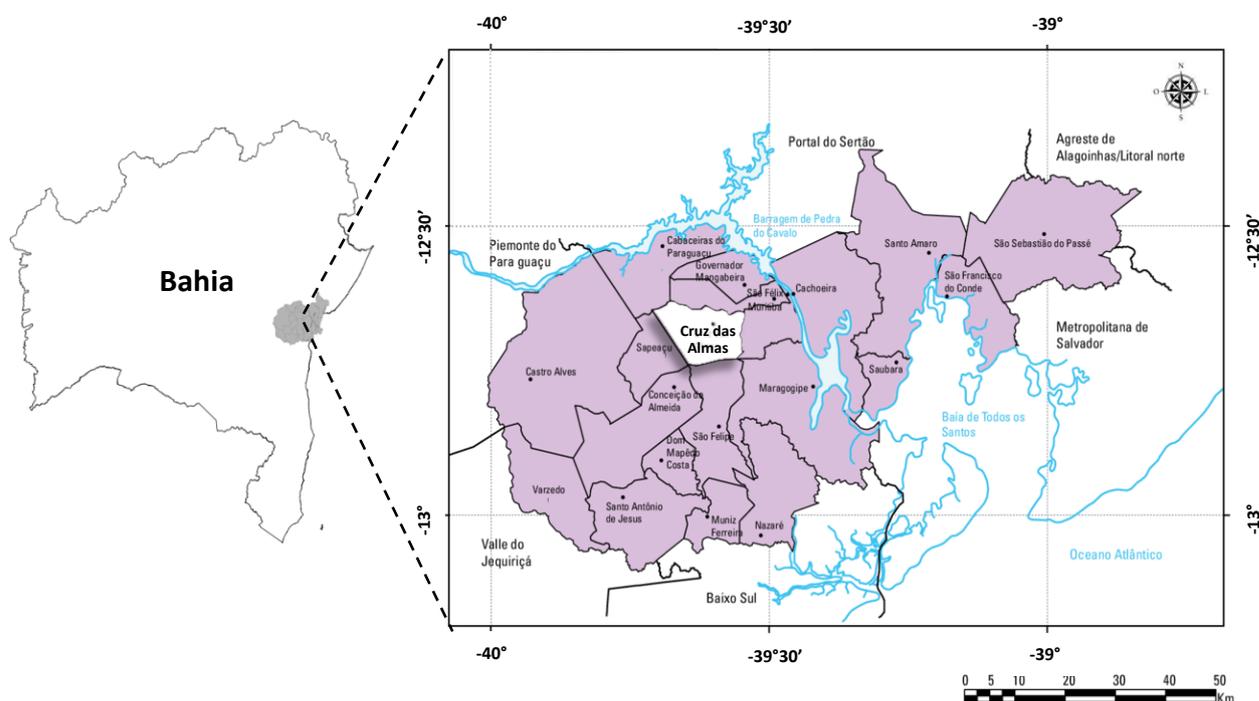
Em solos coesos existem poucos trabalhos sobre variabilidade espacial (RIBEIRO et al., 2016). Contudo, é possível citar os trabalhos de Souza (2005), que avaliou a variabilidade espacial do índice de qualidade do solo, sob floresta nativa; Barros (2015), que estudou a variabilidade espacial de atributos físicos e químicos sob plantio direto e convencional e Peixoto (2017), que também avaliou a variabilidade espacial de parâmetros associados à curva de retenção de água do solo sob plantio direto, todos em Latossolo Amarelo Distrocoeso no Recôncavo da Bahia. Todavia, faz-se necessários mais estudos sobre variabilidade espacial em sistema de plantio direto sob solos de Tabuleiros Costeiros, principalmente, por não ser o sistema de manejo comum nas regiões (SILVA et al., 2014).

A hipótese deste estudo é que o manejo não só afeta os atributos, mas também sua variabilidade espacial. Logo ao avaliar a mesma unidade taxonômica de solo sob condições naturais e submetida a diferentes condições de uso e manejos, será possível identificar alterações causadas pelo manejo. Diante do exposto, objetivou-se com o presente trabalho estudar a variabilidade e a dependência espacial dos atributos físico-hídricos de um Latossolo Amarelo Distrocoeso sob diferentes usos: floresta nativa, área em regeneração, plantio direto e convencional no ambiente de Tabuleiro Costeiro no Estado da Bahia.

## MATERIAL E MÉTODOS

### Áreas de estudo

A figura 1 apresenta a Estado da Bahia, a região do Recôncavo e o município de Cruz das Almas, onde o trabalho foi desenvolvido (220 m; 12° 40' 12" S; 39° 06' 07" W). Na classificação de Köppen, o clima é do tipo Af (BAHIA,1998), caracterizado como tropical chuvoso de floresta com 1 a 3 meses secos. O total anual médio de chuva é de 1.100 mm. Os meses mais chuvosos, em condições normais, são abril e maio e os mais secos, setembro e outubro. A temperatura média anual é de 24,5°C.



**Figura 1. Mapas fisiográficos da Bahia, Recôncavo e Cruz das Almas em destaque, fonte SEI (2017).**

Quatro áreas foram selecionadas para o estudo, sendo a primeira uma reserva de florestal natural do município, conhecida como “Mata do Cazuzinha” (39° 6' 23, 769" W e 12° 39' 58,944" S), considerada um fragmento da Mata Atlântica com 11,7 ha, localizada dentro do espaço urbano, e três outras áreas dentro do *campus* da Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, na Fazenda Experimental.

A segunda área experimental com plantio convencional de mandioca (39° 4' 52,529" W e 12° 39' 26,006" S), anteriormente utilizada como pastagem, com predomínio de *Urochloa ssp.* por mais de 30 anos e há mais de 10 anos está sendo cultivada. Foi realizada uma calagem em 2008, o preparo do solo é realizado anualmente, utilizando uma aração e duas gradagens, adubações com NPK de acordo com a necessidade da cultura e periodicamente realiza-se capinas com enxada.

A terceira área foi de restauração florestal denominada "Talhão Memória" (39° 4' 55,978" W e 12° 39' 29,657" S), anteriormente utilizada como pastagem, com predomínio de *Urochloa ssp.* por mais de 30 anos, ficou por um período de 10 anos sob pousio e até 2010 foi utilizada para descarte de adubo e calcário. Em 2012 teve início um processo de restauração florestal. Para tanto, realizou-se preparo do solo com uma aração e gradagem niveladora, sem calagem ou aplicação de adubos. Foram mantidas as árvores frutíferas e introduzidas espécies florestais, tais como: *Paubrasilia echinata* Lam, *Schinus terebinthifolius* Raddi, *Licania tomentosa* Benth, *Enterolobium contortisiliquium* Vell, entre outras, separadas por espaçamento de 2 x 3 m. No total foram plantadas 800 mudas de essências florestais nativas em 0,8 ha. Apenas nos primeiros dois anos foi feito controle de formigas. Desde a implantação são feitos tratamentos culturais de coroamento e roçagem, três vezes ao ano, com manutenção da fitomassa residual sobre o solo.

A quarta área experimental foi composta por plantio alternado de culturas temporárias (39° 4' 55,978" W e 12° 39' 29,657" S), manejada há 08 anos em sistema plantio direto. Anteriormente foi utilizada como pastagem, com predomínio de *Urochloa ssp.* por mais de 30 anos. Antes da implantação do plantio direto a área recebeu mobilizações - aração e gradagem - para incorporação de corretivos. Depois desta fase semeou-se, ao longo dos anos, para produção de fitomassa e grãos a seguinte sequência de culturas: Ano I – 2009: *Crotalaria juncea*; Ano II – 2010: Girassol; Ano III – 2011: *Crotalaria juncea* seguida de girassol; Ano IV – 2012: consórcio feijão de porco com milho, em seguida, girassol; Ano V – 2013: consórcio de milho com sorgo seguido de girassol; Ano VI – 2014: integração girassol com braquiária; Ano VII – 2015: dessecação da braquiária oriunda da integração de 2014 e integração girassol

com braquiária; Ano VIII – 2016: dessecação da braquiária oriunda da integração de 2015 e sucessão milho e *Crotalaria juncea*. Anualmente desde 2010, após o período de verão considerado na região como pousio, realizou-se o manejo da fitomassa utilizando-se processos químicos com herbicidas ou mecânicos com trituradores.

O relevo é plano em todas as áreas e os solos foram classificados como Latossolo Amarelo Coeso, LAx (RIBEIRO et al. 1996), atualizado para Latossolo Amarelo Distrocoeso, LAdx (EMBRAPA, 2013) nas áreas do *campus* da UFRB e Latossolo Amarelo Distrocoeso, LAdx (GOMES et al., 2012), na reserva florestal.

### Amostragem do solo e análises

Em cada área foram coletadas amostras deformadas e não deformadas nos pontos de cruzamento de uma malha regular de 20 x 35 m (Figura 2), com espaçamento entre pontos de 5 m, resultando em 40 pontos de amostragem para cada área de 700 m<sup>2</sup>. Em cada ponto foram coletadas quatro amostras não deformadas, por meio de anéis de 0,05 m x 0,05 m (diâmetro e altura), e uma deformada no ponto médio das profundidades de 0-0,2 e 0,2-0,4 m.

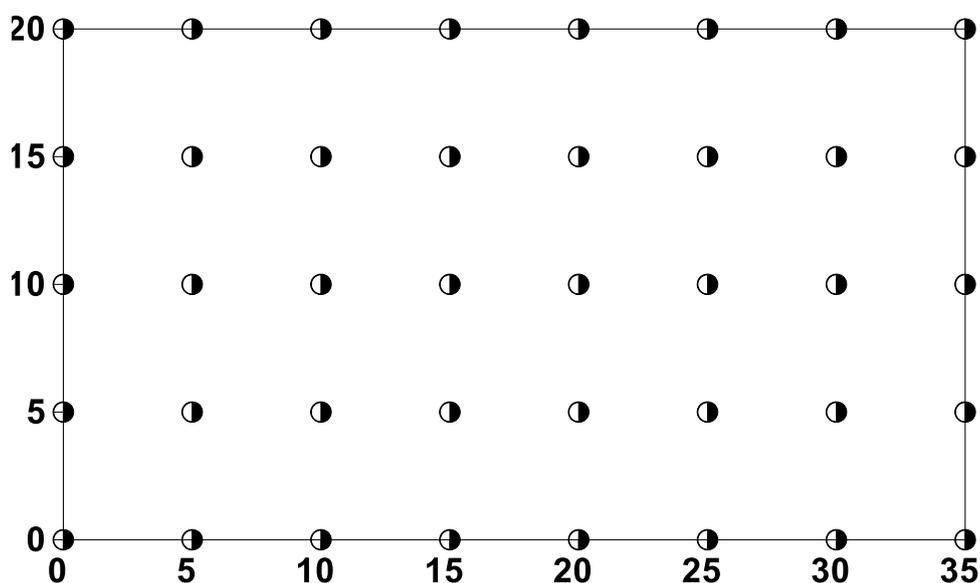


Figura 2. Esquema de amostragem nos diferentes sistemas de usos e manejos do solo, em *grid*, com quarenta pontos distribuídos de 5 em 5 metros.

Os atributos analisados foram: densidade do solo (DS), determinada pelo método do anel volumétrico; densidade de partículas (Dp) por meio do método do

balão volumétrico; macroporosidade (Ma), microporosidade (Mi) e porosidade total (PT), pelo método da mesa de tensão. A tensão de 60 kPa foi adotada como referente à microporosidade; granulometria; distribuição de agregados estáveis em água e condutividade hidráulica saturada pelo método do permeâmetro de carga constante, todos conforme Embrapa (2011). Com os dados de massa seca dos agregados calculou-se o diâmetro médio ponderado de agregados (DMP), segundo Castro Filho et al. (1998), conforme equação 1:

$$DMP = \sum_{i=1}^n (xi - wi) \quad (1)$$

em que DMP – é o diâmetro médio ponderado; xi – diâmetro médio das classes, mm e wi – proporção de cada classe em relação ao total.

Mesmo não sendo atributo físico-hídrico do solo determinaram-se os teores de matéria orgânica do solo (Embrapa, 2011).

**Tabela 1. Composição granulométrica para duas profundidades de um Latossolo Amarelo Distrocoeso sob floresta nativa, área em regeneração, plantio direto e Plantio convencional.**

Profundidade	Areia	Silte	Argila	Classe Textural
<b>m</b>	<b>g kg<sup>-1</sup></b>			
	<b>Mata Nativa</b>			
0,00 – 0,20	840,4	35,8	123,8	Franco-arenosa
0,20 – 0,40	751,3	30,5	218,2	Franco-argilo-arenosa
	<b>Área em Regeneração</b>			
0,00 – 0,20	791,3	101,2	107,5	Franco-arenosa
0,20 – 0,40	757,2	69,3	173,5	Franco-argilo-arenosa
	<b>Plantio Direto</b>			
0,00 – 0,20	820,2	53,1	126,7	Franco-arenosa
0,20 – 0,40	708,1	53,4	238,5	Franco-argilo-arenosa
	<b>Plantio Convencional</b>			
0,00 – 0,20	772,4	50,3	177,3	Franco-argilo-arenosa
0,20 – 0,40	735,3	35,6	229,1	Franco-argilo-arenosa

### Análises estatísticas

Inicialmente realizou-se análise estatística exploratória descritiva dos atributos físico-hídricos, utilizando-se o programa Statistic, versão 7.0 (STATSOFT, 2004). Os parâmetros considerados foram as medidas de posição: média e mediana; e de dispersão: coeficientes de variação, assimetria, curtose, quartis superior e inferior, valores máximos e mínimos. A variabilidade dos dados quanto ao coeficiente de variação, foi avaliada por duas metodologias diferentes: Warrick e Nielsen (1980), que considera a variação do CV como baixa ( $CV < 12\%$ ), média ( $12\% < CV < 62\%$ ) e alta ( $CV > 62\%$ ); e Nogueira (2007) que avalia a representatividade da média em função do CV baixo ( $CV < 35\%$ ), médio ( $35\% < CV < 65\%$ ) e alto ( $CV > 65\%$ ). A hipótese de normalidade foi verificada pela análise da reta de Henry e histograma de probabilidade normal, sendo posteriormente confirmada pelo teste de Shapiro-Wilk a 5 % de probabilidade.

A dependência espacial das variáveis foi determinada com base no ajuste dos dados ao semivariograma experimental, tendo como fundamento a teoria das variáveis regionalizadas (VIEIRA, 2000). Utilizou-se para tal o programa GS+ versão 5.03 (ROBERTSON, 1998). A elaboração dos mapas de isolinhas foi realizada no programa Sufer 11.0 (GOLDEN SOFTWARE, 2002).

Os valores de semivariância foram obtidos por meio da equação:

$$y^*(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad (2)$$

em que  $N(h)$  é o número de pares de valores medidos  $Z(x_i)$ ,  $Z(x_i + h)$ , separados por um vetor  $h$ . O gráfico de  $\gamma^*(h)$  em função dos valores correspondentes de  $h$ , chamado semivariograma, é uma função do vetor  $h$  e, portanto, depende exclusivamente da distância  $h$ .

Para o ajuste do semivariograma foram testados os modelos esférico, exponencial e gaussiano, conforme equações 3, 4 e 5:

$$y^*(h) = C_0 + C_1 \left[ 1,5 \left( \frac{h}{a} \right) - 0,5 \left( \frac{h}{a} \right)^3 \right] \quad 0 < h \leq a \quad (3)$$

$$y(h) = C_0 + C_1 \quad h < a$$

$$y^*(h) = C_0 + C_1 \left[ 1 - e^{-\left(\frac{h}{a}\right)} \right] \quad 0 \neq h \quad (4)$$

$$y^*(h) = C_0 + C_1 \left[ 1 - e^{-\left(\frac{h^2}{a^2}\right)} \right] \quad 0 \neq h \quad (5)$$

em que  $C_0$  é o efeito pepita,  $C_0 + C$  é o patamar, e  $a$  é o alcance do semivariograma.

Para variáveis que apresentaram tendências no semivariogramas e mapas de superfícies, utilizou-se as equações linear (6), quadrática (7) e cúbica (8) para estimar o resíduo e a retirada de tendência com uso do programa Sufer 11.0 (GOLDEN SOFTWARE, 2002).

$$m(x) = A_0 + A_1X + A_2Y + A_3XY \quad (6)$$

$$m(x) = A_0 + A_1X + A_2Y + A_3X^2 + A_4Y^2 + A_5XY \quad (7)$$

$$m(x) = A_0 + A_1X + A_2Y + A_3X^2 + A_4Y^2 + A_5XY + A_6X^3 + A_7Y^3 + A_8X^2Y + A_9XY^2 \quad (8)$$

Determinou-se o grau de dependência espacial conforme a equação proposta por Cambardella et al. (1994),

$$GDE = \left[ \frac{C_0}{C_0 + C_1} \right] * 100 \quad (9)$$

Utilizou-se a seguinte classificação GDE <25 % - forte dependência espacial, entre 25 % e 75 % - moderada dependência espacial e >75 % - fraca dependência espacial.

### Estimativa do número ideal de amostras

O cálculo do número mínimo de amostras necessárias para estimar o valor médio representativo dos atributos do solo foi feito utilizando o modelo proposto por Petersen e Calvin (1965):

$$n = \frac{ta^2 \cdot CV^2}{D^2} \quad (10)$$

sendo: n o número mínimo de amostras,  $t_{\alpha}$  o valor do teste t de Student para determinado nível de probabilidade (5 %), CV o coeficiente de variação e D o erro aceitado em torno da média (5, 10 e 15 %).

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados da estatística descritiva à profundidade de 0,0-0,20 m estão resumidos na tabela 2. Verificou-se que o valor médio de porosidade total do solo (PT), nos diferentes sistemas de uso, variou de 0,33 a 0,60  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ , sendo o menor no plantio convencional (PC) e maior no plantio direto (PD). O PD apresentou 16,7; 26,7 e 45% a mais de poros em comparação a FN, AR e PC, respectivamente. Para Brady e Weil (2008) o valor ideal de PT é de 0,50  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ . Os resultados encontrados na floresta natural (FN) e na área em regeneração (AR) demonstra que os valores foram, respectivamente, iguais e próximos (0,50  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$  e 0,44  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ) ao considerado ideal. Por outro lado, os mais altos valores médios de macroporosidade (Ma) foram observados na FN (0,30  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ) e o menor no PD (0,13  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ), o que demonstra maior eficiência do sistema FN na movimentação de ar e infiltração de água no solo, quando comparado aos demais sistemas.

Os valores de microporosidade (Mi) foram, em média, maior (0,47  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ), no PD, o que contribuiu para elevar os valores da porosidade total (PT) no sistema PD. É provável que os altos valores de porosidade total, no PD, tenham sido influenciados pelos maiores teores de matéria orgânica (38,66  $\text{g kg}^{-1}$ ), superiores aos encontrados na floresta natural e área em regeneração. Quando avaliados os valores de PT, Ma e Mi na profundidade de 0,20-0,40 m (Tabela 3), observou-se que, em média, os valores são próximos entre os diferentes sistemas estudados, sendo a maior PT encontrada em FN, superando em 2,5, 5,0 e 22,5% os sistemas AR, PD e PC, respectivamente, mesmo com alto teor médio de MO no AR.

**Tabela 2.** Estatística descritiva da porosidade total (PT), macroporosidade (Ma), microporosidade (Mi), densidade do solo (DS), diâmetro médio ponderado de agregados (DMP), condutividade hidráulica saturada ( $K_0$ ) e matéria orgânica (MO) de um Latossolo Amarelo distrocoeso (LAdx) sob diferentes usos na profundidade de 0,00-0,20 m.

Variáveis	nº	Me	Md	Min	Max	DP	$C_s$	$C_k$	CV	p>0,05
<b>Floresta Nativa</b>										
PT ( $m^3 m^{-3}$ )	40	0,50	0,50	0,37	0,58	0,08	0,14	-0,26	15,54	N
Ma ( $m^3 m^{-3}$ )	40	0,30	0,30	0,15	0,42	0,09	0,05	-0,42	30,46	N
Mi ( $m^3 m^{-3}$ )	40	0,20	0,20	0,12	0,29	0,03	0,45	0,47	15,58	N
DS ( $Mg m^{-3}$ )	40	1,41	1,40	1,15	1,72	0,13	0,38	-0,24	9,19	N
DMP (mm)	40	3,02	3,05	2,55	3,28	0,16	-1,15	1,55	5,41	nN
$K_0$ ( $cm h^{-1}$ )	40	85,18	88,40	10,39	148,9	28,44	-0,50	1,04	33,38	N
MO ( $g Kg^{-3}$ )	40	32,05	30,33	24,47	44,82	5,20	-0,89	1,59	16,22	nN
<b>Área em Regeneração</b>										
PT ( $m^3 m^{-3}$ )	40	0,44	0,44	0,31	0,52	0,04	-1,09	2,43	9,28	nN
Ma ( $m^3 m^{-3}$ )	40	0,24	0,23	0,06	0,30	0,05	-1,29	2,06	23,24	nN
Mi ( $m^3 m^{-3}$ )	40	0,20	0,21	0,07	0,39	0,06	0,16	1,19	28,59	N
DS ( $Mg m^{-3}$ )	40	1,50	1,50	1,26	1,75	0,11	0,38	-0,07	7,51	N
DMP (mm)	40	2,87	3,03	1,63	3,24	0,39	-1,67	2,24	10,3	nN
$K_0$ ( $cm h^{-1}$ )	40	49,10	46,43	22,69	87,71	14,16	0,56	0,17	28,83	N
MO ( $g Kg^{-3}$ )	40	28,32	27,58	18,45	45,24	6,45	0,27	0,21	20,1	N
<b>Plantio Direto</b>										
PT ( $m^3 m^{-3}$ )	40	0,60	0,72	0,31	0,69	0,15	-0,76	0,52	21,86	N
Ma ( $m^3 m^{-3}$ )	40	0,13	0,12	0,04	0,19	0,04	-0,57	0,05	29,35	N
Mi ( $m^3 m^{-3}$ )	40	0,47	0,59	0,27	0,58	0,12	-0,80	0,49	20,80	nN
DS ( $Mg m^{-3}$ )	40	1,41	1,41	1,14	1,66	0,13	0,05	-0,16	9,23	N
DMP (mm)	40	2,76	2,72	1,89	3,18	0,30	0,43	-0,11	11,35	N
$K_0$ ( $cm h^{-1}$ )	40	45,37	46,52	21,20	67,36	13,16	0,02	-1,00	28,99	N
MO ( $g Kg^{-3}$ )	40	38,66	37,23	25,98	56,97	7,76	0,48	-0,56	20,09	N
<b>Plantio Convencional</b>										
PT ( $m^3 m^{-3}$ )	40	0,33	0,37	0,20	0,48	0,07	-0,58	-0,35	19,80	N
Ma ( $m^3 m^{-3}$ )	40	0,20	0,24	0,12	0,31	0,03	0,45	-0,46	19,47	N
Mi ( $m^3 m^{-3}$ )	40	0,13	0,13	0,03	0,19	0,04	-0,92	-1,67	30,53	nN
DS ( $Mg m^{-3}$ )	40	1,64	1,65	1,46	1,85	0,08	-0,09	-0,01	5,08	N
DMP (mm)	40	2,12	2,18	1,10	2,75	0,36	-0,68	0,72	16,91	N
$K_0$ ( $cm h^{-1}$ )	40	29,12	27,79	2,56	54,75	10,32	0,20	0,51	35,43	N
MO ( $g Kg^{-3}$ )	40	21,96	21,93	17,67	29,34	2,63	0,49	0,66	11,96	N

nº - número de amostras; Me – média; Md – mediana; Min – valor mínimo; Max – valor máximo; DP – desvio padrão;  $C_s$  – coeficiente de assimetria;  $C_k$  – coeficiente de curtose; CV – coeficiente de variação; N – distribuição normal pelo teste de Shapiro Wilk e nN – distribuição não normal pelo teste de Shapiro Wilk,

Os valores médios de densidade do solo (DS) na profundidade de 0,0-0,20 variaram entre 1,41  $Mg m^{-3}$  (FN e PD), 1,50  $Mg m^{-3}$  (AR) e 1,61  $Mg m^{-3}$  (PC). Os valores de FN e AR, corroboram com resultados obtidos por Neto et al. (2009),

quando estudaram Latossolo Amarelo Distrocoeso típico sob mata em Alagoas. Em 0,20-0,40 m, os valores médios foram mais altos (de 1,64 a 1,75 Mg m<sup>-3</sup>) em todas as áreas, sendo a maior média no PC. Vasconcelos et al. (2014) afirmaram que os altos valores de densidade do solo em subsuperfície, nos solos de tabuleiros manejados, são oriundos da ação de cargas externas de compressão, somada ao caráter coeso, característica edáfica deste solo.

Observa-se que o maior valor para diâmetro médio ponderado de agregados do solo (DMP), em 0,0-0,20 m, foi encontrado no sistema FN (3,02 mm), já o menor no PC (2,12 mm), onde também se verificaram os menores teores de MO (Tabela 2). Na profundidade de 0,20-0,40 m o maior valor de DMP (2,76 mm) foi no AR. Os resultados refletem a relação direta entre DMP e MO, preservando suas magnitudes (Tabela 3).

Os valores de condutividade hidráulica do solo saturado ( $K_0$ ) para FN variaram de 10,4 cm h<sup>-1</sup> a 148,96 cm h<sup>-1</sup> (0,0-0,20 m), considerados como valores altos (BERNARDO et al., 2008), contudo semelhantes aos encontrados por Marques et al. (2008), ao avaliar condutividade hidráulica do solo saturado em Latossolo Amarelo Distrófico no Baixo Amazonas sob floresta natural, em horizonte superficial (0-16 cm). Verificou-se redução da  $K_0$  e do diâmetro médio ponderado (DMP) nos solos cultivados, em comparação ao solo com floresta nativa e área em regeneração. Em comparação com a FN, houve redução média para  $K_0$  e DMP no PC de 65,7 e 29,8% e no PD de 46,7 e 13,6%, respectivamente. A condutividade hidráulica do solo saturado sofreu redução em resposta ao aumento da densidade do solo e diminuição da macroporosidade, provocadas pelos cultivos e tráfego de máquinas. Este comportamento pode estar relacionado também à reorganização do sistema poroso, devido à distribuição do diâmetro e a quebra da continuidade vertical dos poros (BRADY; WEIL, 2008; MARSILI et al., 1998).

A análise da Tabela 2 permite observar também que, em sua maioria, os atributos estudados apresentaram valores de média e mediana próximos, condição que, para Cambardella et al. (1994), seria um indicativo de que estas medidas não foram afetadas por valores atípicos ou extremos, o que não se confirmou quando avaliado o histograma e a reta de probabilidade normal. As Figuras de 3 a 8 apresentam histogramas e reta de probabilidade dos atributos

estudados na profundidade de 0,0-0,20 m. Pela reta de probabilidade normal, verificou-se que todos os atributos apresentaram dispersão suficiente para promover assimetria em pelo menos um dos sistemas estudados, exceto densidade do solo. As maiores dispersões para essa profundidade foram observadas para o atributo porosidade total nos sistemas AR e PD (Figura 3), que apresentaram distribuição de probabilidade pelo teste de Shapiro e Wilk de  $p=0,0057$  e  $p=0,0074$ , respectivamente.

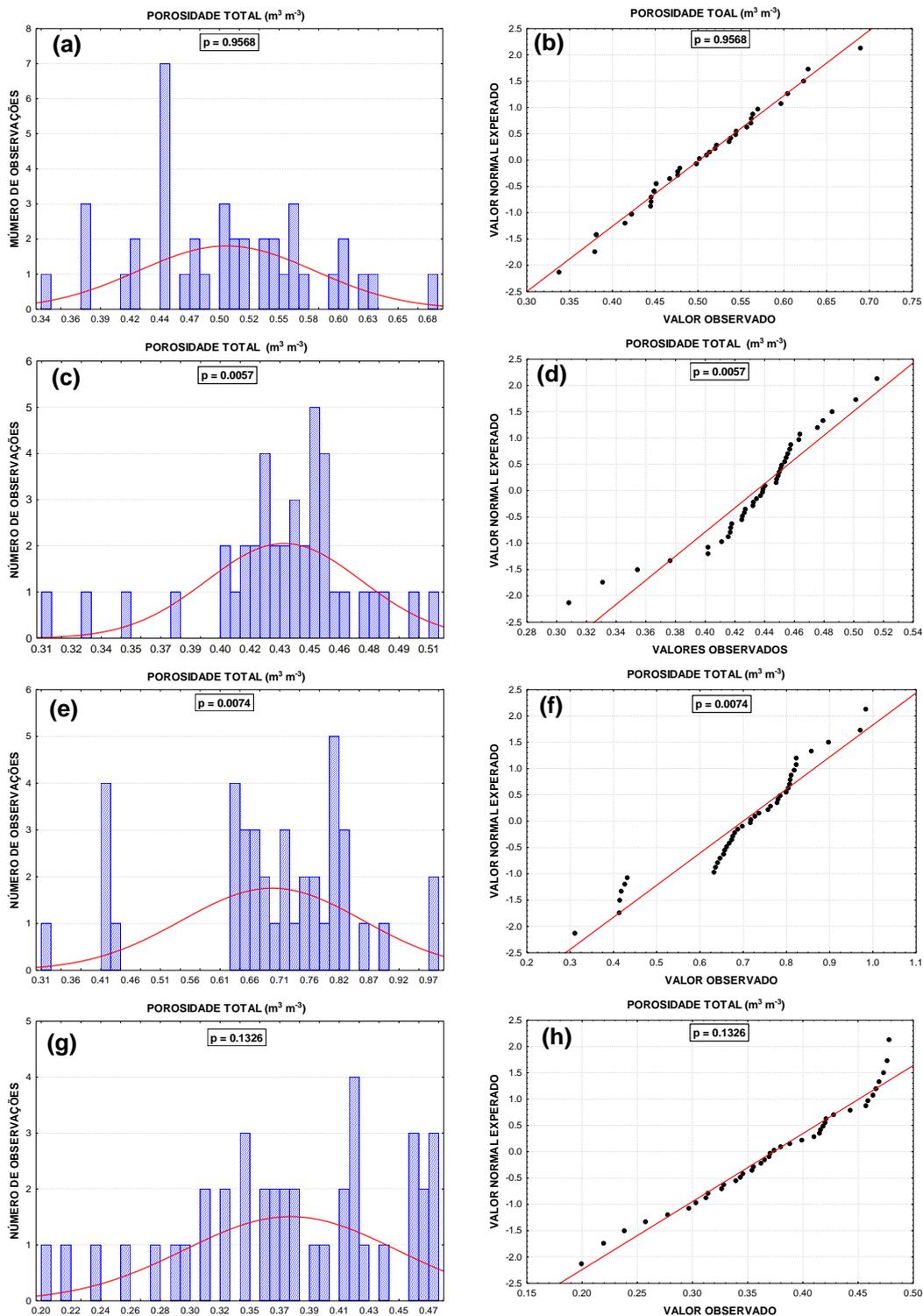
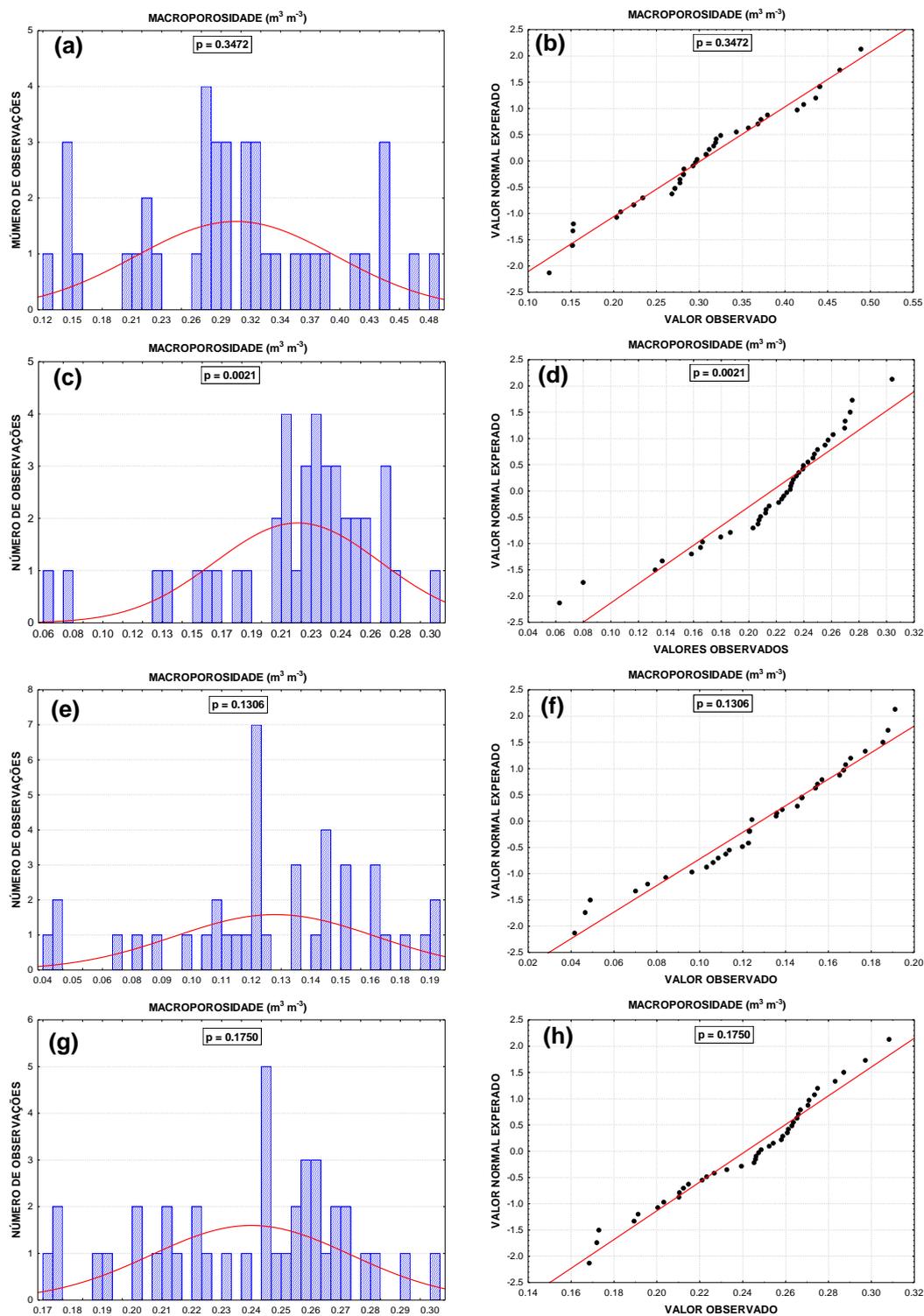


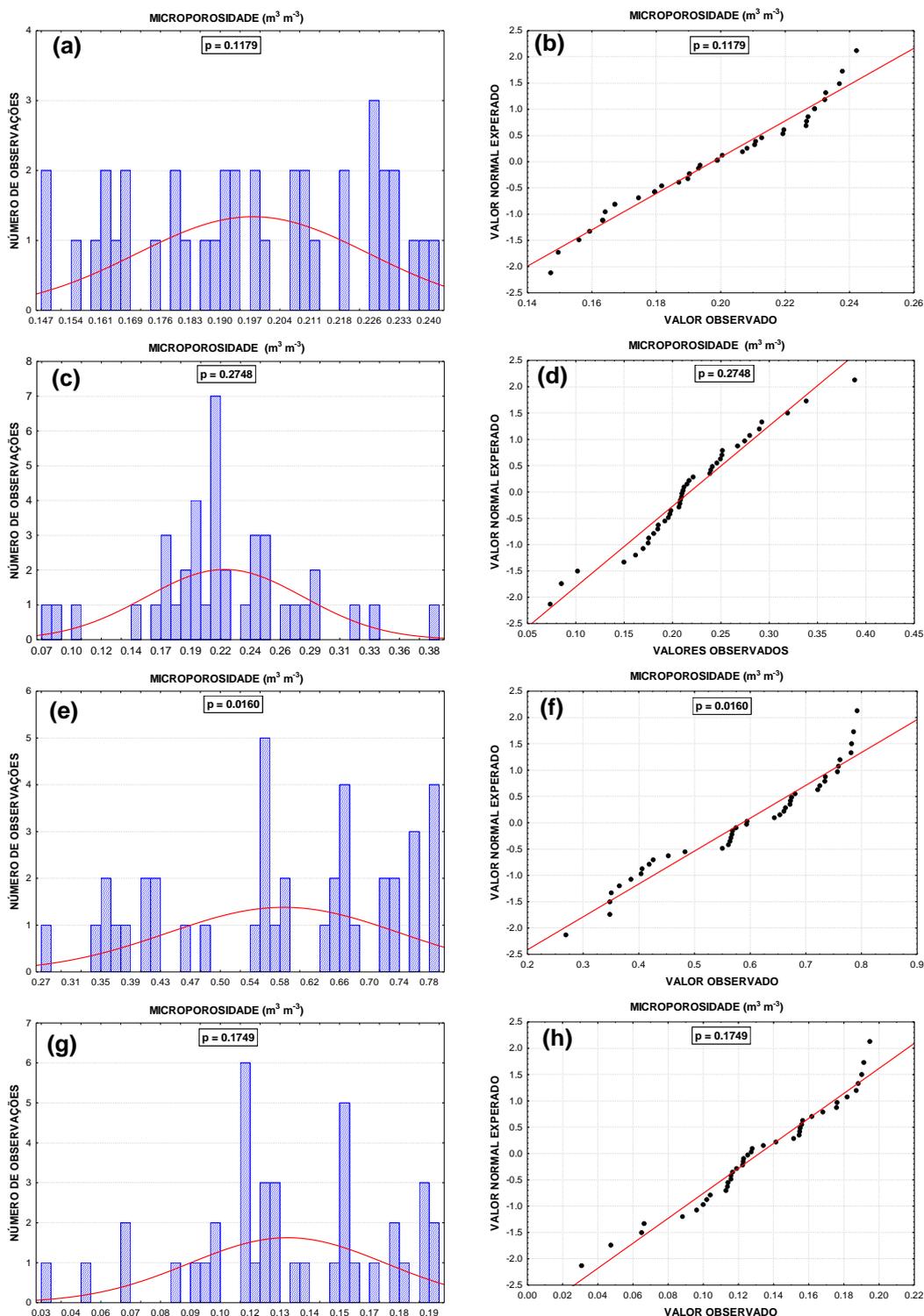
Figura 3. Histograma e reta de probabilidade normal para porosidade total na floresta natural - FN (a, b), área em regeneração - AR (c, d), plantio direto - PD (e, f) e plantio convencional - PC (g, h) em Latossolo Amarelo Distrocoeso na profundidade de 0,0-0,20 m.

O atributo de macroporosidade também apresentou dispersão significativa no sistema AR (Figura 4), com distribuição dos dados concentrados à esquerda ( $p=0,0021$ ).



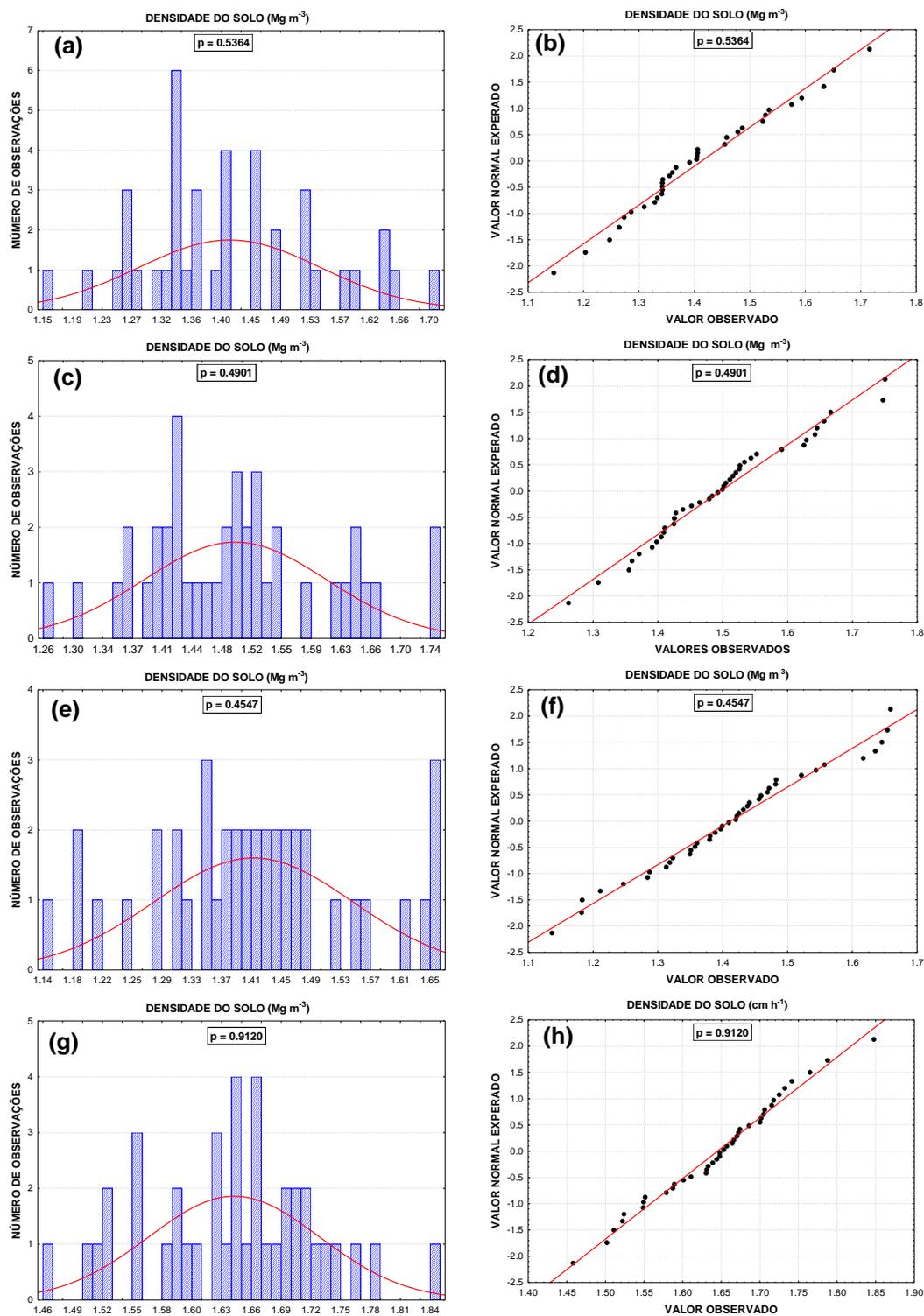
**Figura 4. Histograma e reta de probabilidade normal para macroporosidade na floresta natural - FN (a, b), área em regeneração - AR (c, d), plantio direto - PD (e, f) e plantio convencional - PC (g, h) em Latossolo Amarelo Distrocoeso na profundidade de 0,0-0,20 m.**

A Figura 5 apresentam os histogramas e as retas de probabilidade normal para microporosidade do solo, nesta é possível observar a partir dos histogramas maior concentração dos dados a esquerda nos sistemas PD e PC.



**Figura 5. Histograma e reta de probabilidade normal para microporosidade na floresta natural - FN (a, b), área em regeneração - AR (c, d), plantio direto - PD (e, f) e plantio convencional - PC (g, h) em Latossolo Amarelo Distrocoeso na profundidade de 0,0-0,20 m.**

Diferente dos demais atributos, observou-se que a densidade do solo foi a que apresentou melhor distribuição dos dados em todos os sistemas estudados (Figura 6).



**Figura 6. Histograma e reta de probabilidade normal para densidade do solo na floresta natural - FN (a, b), área em regeneração - AR (c, d), plantio direto - PD (e, f) e plantio convencional - PC (g, h) em Latossolo Amarelo Distrocoeso na profundidade de 0,0-0,20 m.**

Para os dados de diâmetro médio ponderado, observou-se que em todos os sistemas, exceto no PD (Figura 7), os dados possuíam assimetria a esquerda.

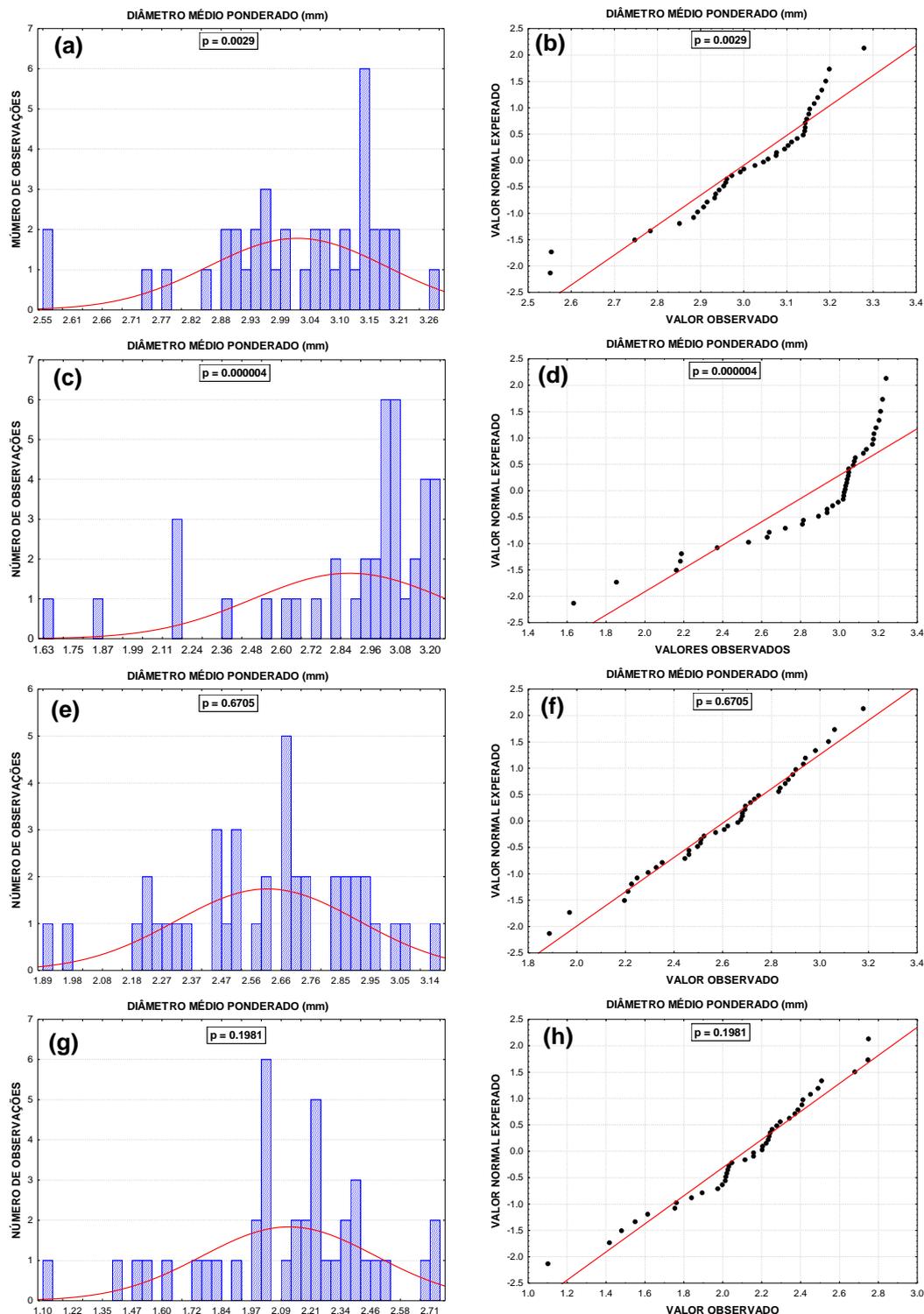


Figura 7. Histograma e reta de probabilidade normal para diâmetro ponderado na floresta natural - FN (a, b), área em regeneração - AR (c, d), plantio direto - PD (e, f) e plantio convencional - PC (g, h) em Latossolo Amarelo Distrocoeso na profundidade de 0,0-0,20 m.

De maneira geral as dispersões dos dados na profundidade de 0,0-0,20 m provocaram assimetrias à esquerda, exceto para condutividade hidráulica (Figura 8).

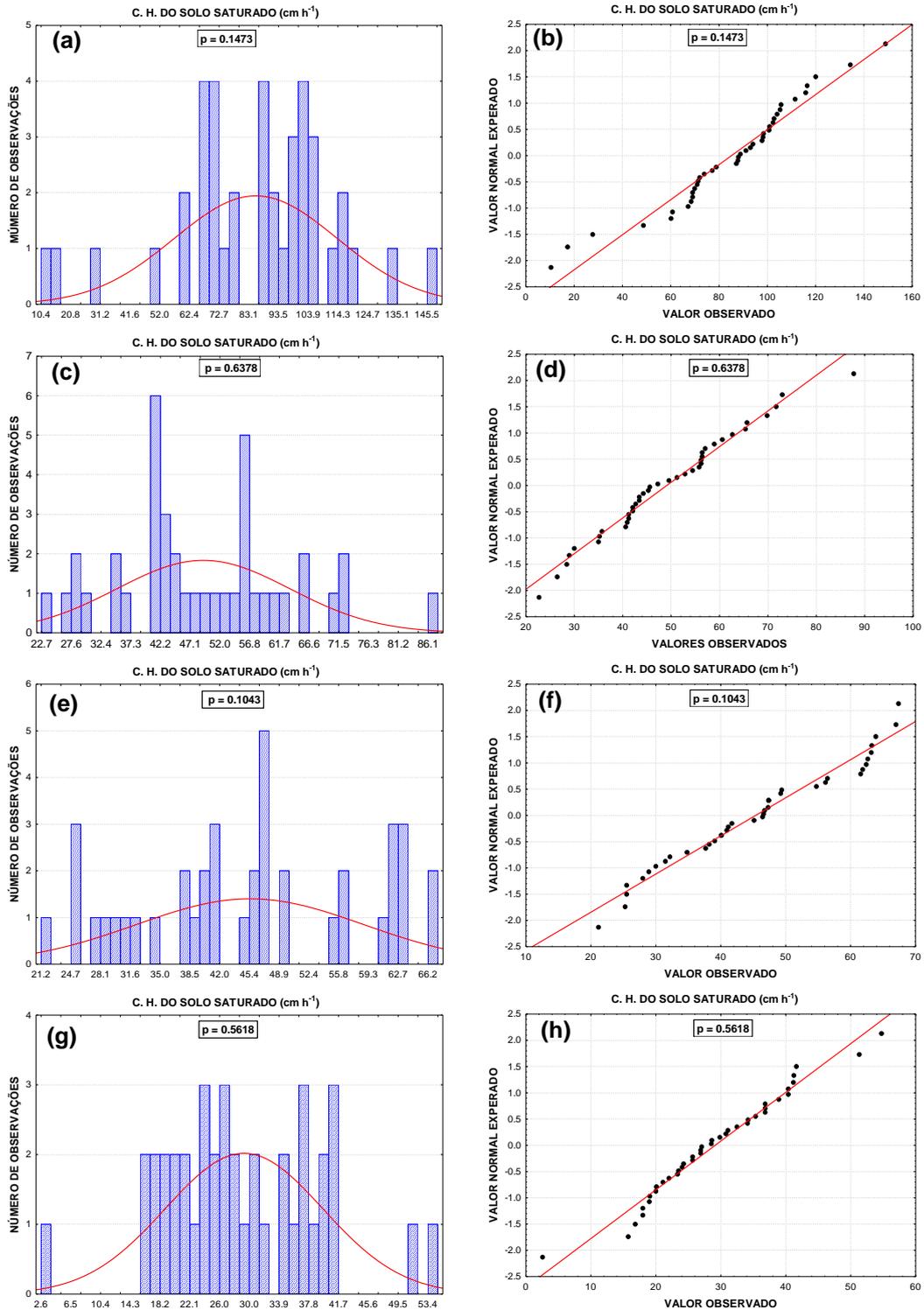


Figura 8. Histograma e reta de probabilidade normal para condutividade hidráulica do solo saturado na floresta natural - FN (a, b), área em regeneração - AR (c, d), plantio direto - PD (e, f) e plantio convencional - PC (g, h) em Latossolo Amarelo Distrocoeso na profundidade de 0,0-0,20 m.

As Figuras de 9 a 14 mostram a dispersão dos dados de cada atributo, segundo histograma e reta de probabilidade normal, em 0,20-0,40 m.

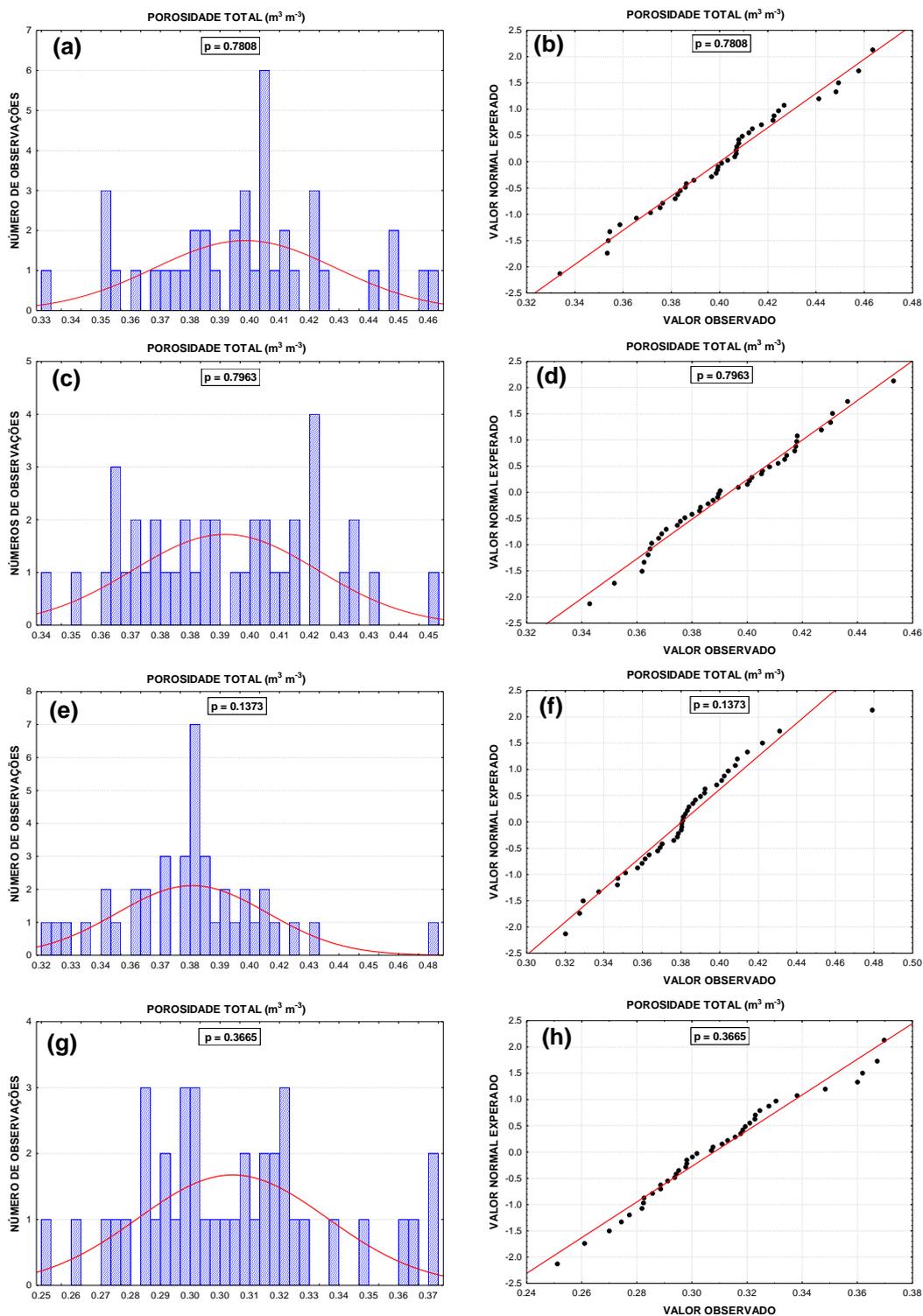
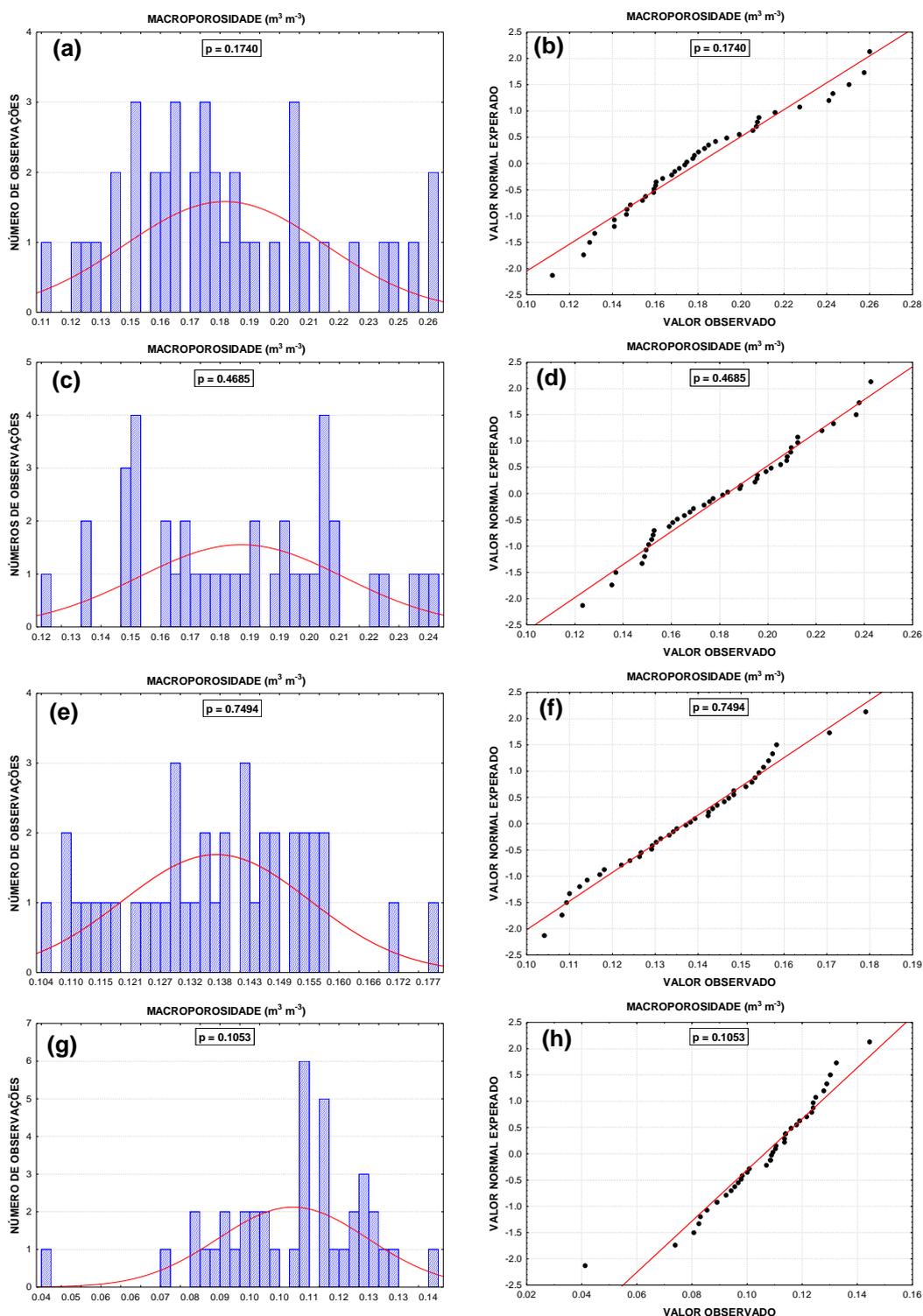
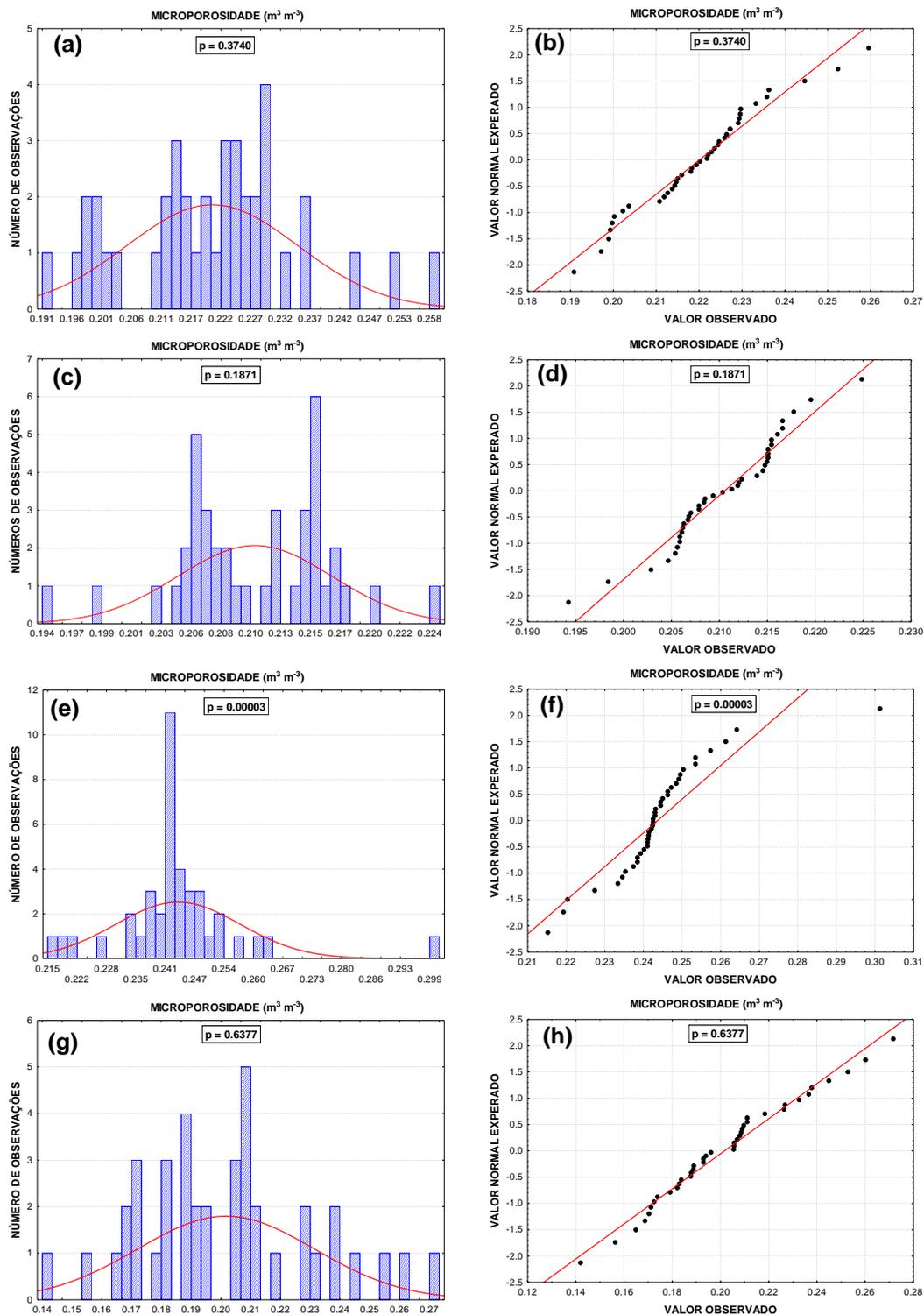


Figura 9. Histograma e reta de probabilidade normal para porosidade total na floresta natural - FN (a, b), área em regeneração - AR (c, d), plantio direto - PD (e, f) e plantio convencional - PC (g, h) em Latossolo Amarelo Distrocoeso na profundidade de 0,20-0,40 m.

Pelas figuras observou-se que os atributos: porosidade total no PD (Figura 9), macroporosidade no PC (Figura 10), microporosidade na FN e PD (Figura 11),

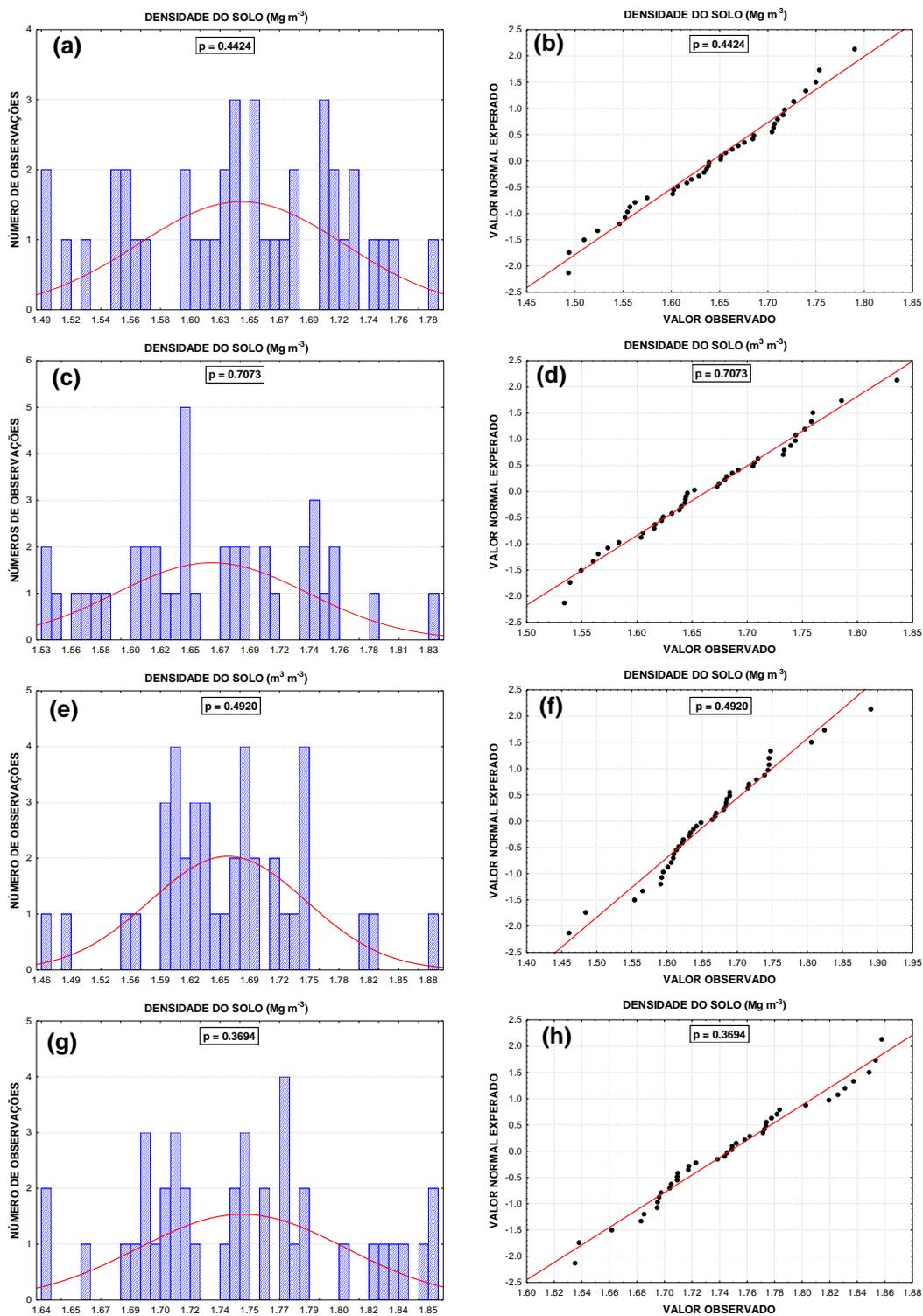


**Figura 10.** Histograma e reta de probabilidade normal para macroporosidade na floresta natural - FN (a, b), área em regeneração - AR (c, d), plantio direto - PD (e, f) e plantio convencional - PC (g, h) em Latossolo Amarelo Distrocoeso na profundidade de 0,20-0,40 m.



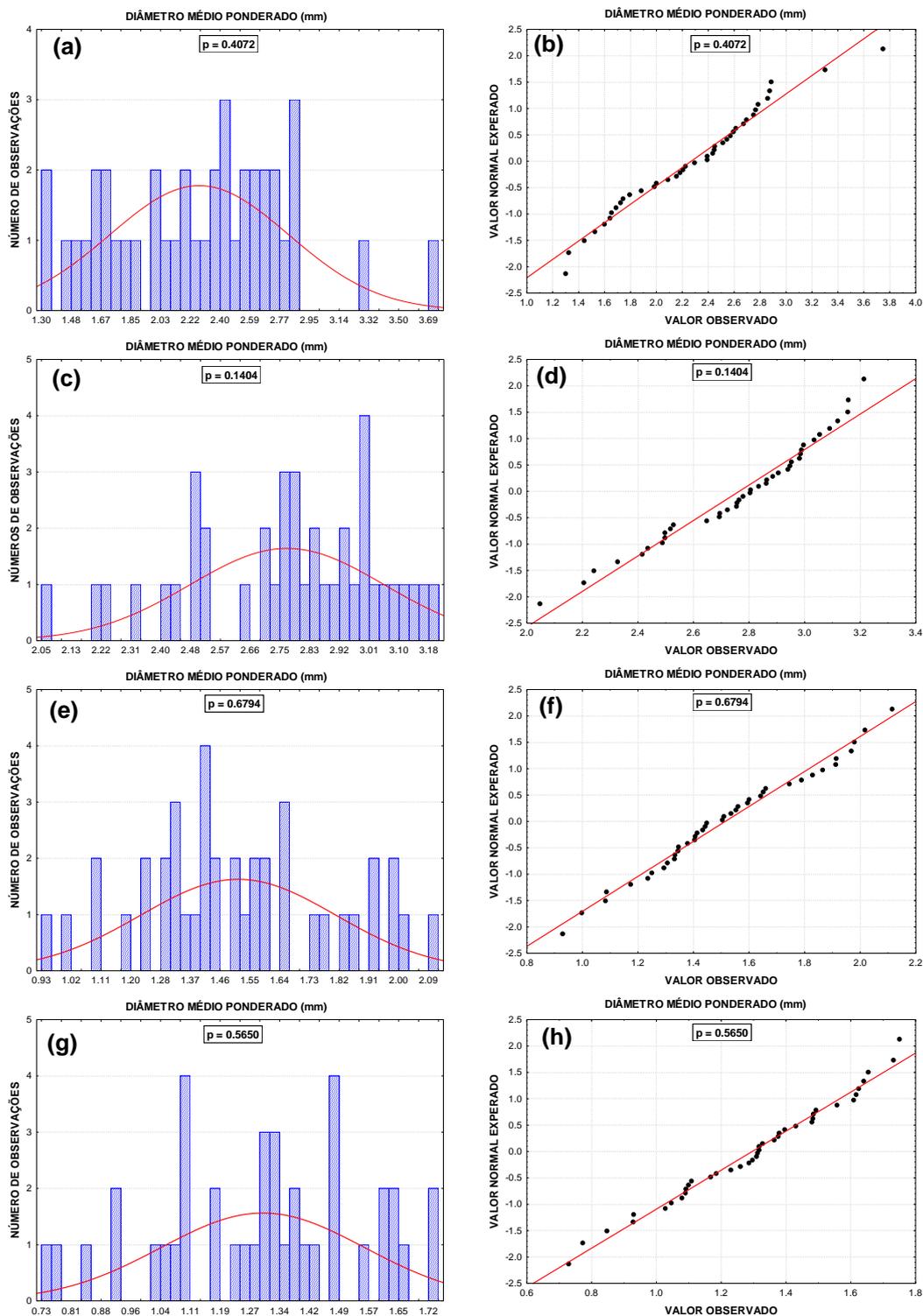
**Figura 11.** Histograma e reta de probabilidade normal para microporosidade na floresta natural - FN (a, b), área em regeneração - AR (c, d), plantio direto - PD (e, f) e plantio convencional - PC (g, h) em Latossolo Amarelo Distrocoeso na profundidade de 0,20-0,40 m.

diâmetro médio ponderado na FN e AR (Figura 13) e condutividade hidráulica do solo saturado (Figura 14), na FN, AR e PD apresentaram dispersões suficientes para provocar assimetrias.



**Figura 12.** Histograma e reta de probabilidade normal para densidade do solo na floresta natural - FN (a, b), área em regeneração - AR (c, d), plantio direto - PD (e, f) e plantio convencional - PC (g, h) em Latossolo Amarelo Distrocoeso na profundidade de 0,20-0,40 m.

O atributo densidade do solo apresentou leve dispersão a direita na AR nessa profundidade (Figura 12), fato que não ocorreu em 0,0-0,20 m.



**Figura 13. Histograma e reta de probabilidade normal para diâmetro médio ponderado na floresta natural - FN (a, b), área em regeneração - AR (c, d), plantio direto - PD (e, f) e plantio convencional - PC (g, h) em Latossolo Amarelo Distrocoeso na profundidade de 0,20-0,40 m.**

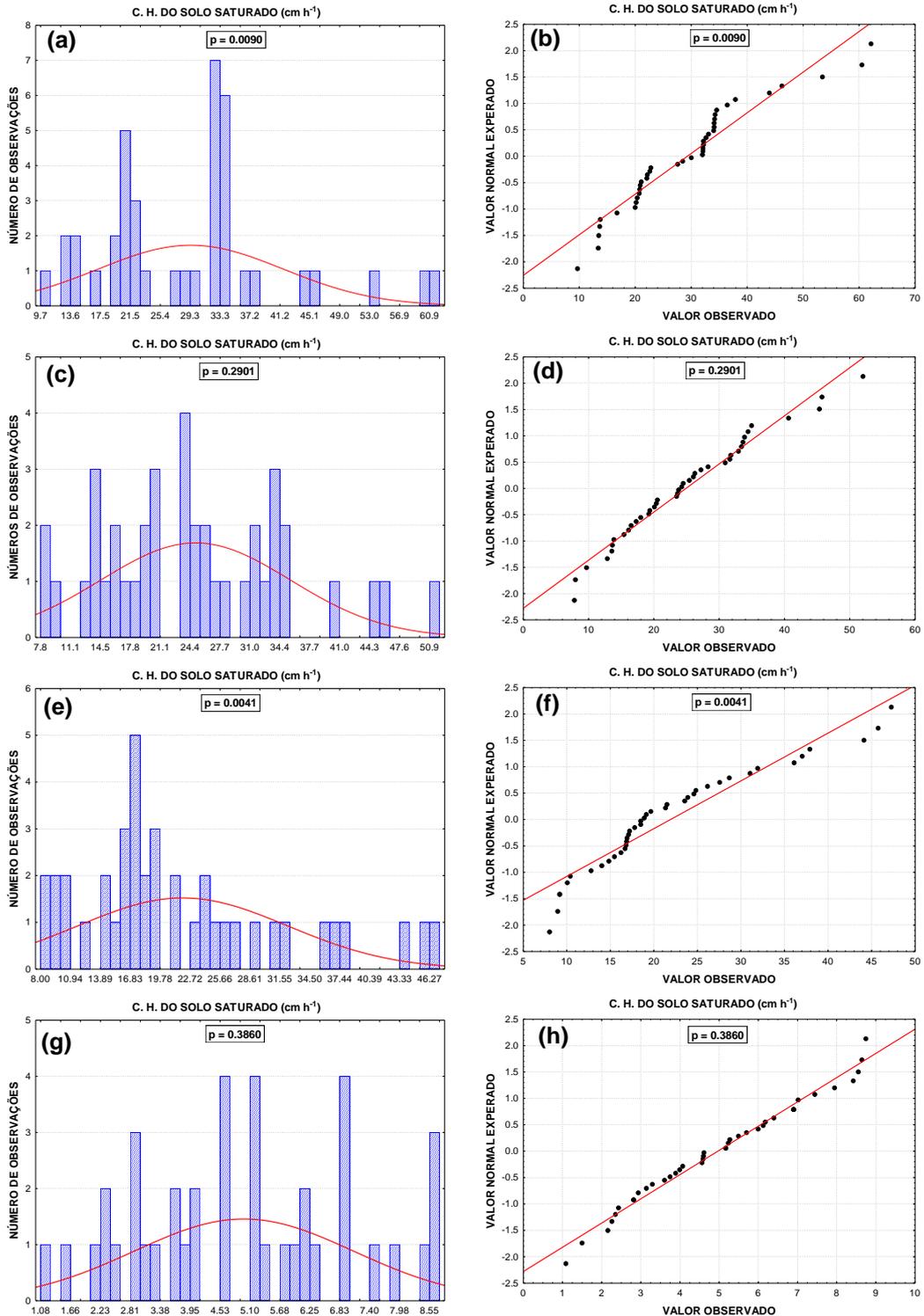


Figura 14. Histograma e reta de probabilidade normal para condutividade hidráulica do solo saturado na floresta natural - FN (a, b), área em regeneração - AR (c, d), plantio direto - PD (e, f) e plantio convencional - PC (g, h) em Latossolo Amarelo distrocoeso na profundidade de 0,20-0,40 m.

A tabela 3 mostra que os atributos com forte dispersão apresentam valores de assimetria ( $C_s$ ) positivos, exceto Mi e DMP no AR e Ma no PC.

**Tabela 3. Estatística descritiva da porosidade total (PT), macroporosidade (Ma), microporosidade (Mi), densidade do solo (DS), diâmetro médio ponderado de agregados (DMP), condutividade hidráulica saturada ( $K_0$ ) e matéria orgânica (MO) de um Latossolo Amarelo Distrocoeso sob diferentes usos na profundidade de 0,20-0,40 m,**

Variáveis	nº	Me	Md	Min	Max	DP	$C_s$	$C_k$	CV	$p > 0,05$
<b>Floresta Nativa</b>										
PT ( $m^3 m^{-3}$ )	40	0,40	0,40	0,33	0,46	0,03	0,05	-0,06	7,4	N
Ma ( $m^3 m^{-3}$ )	40	0,18	0,17	0,11	0,26	0,04	0,47	-0,31	20,8	N
Mi ( $m^3 m^{-3}$ )	40	0,22	0,22	0,19	0,26	0,01	0,54	0,53	6,7	N
DS ( $Mg m^{-3}$ )	40	1,64	1,65	1,49	1,79	0,08	-0,25	-0,72	4,7	N
DMP (mm)	40	2,87	2,74	1,30	3,75	0,55	0,56	0,01	24,3	N
$K_0$ ( $cm h^{-1}$ )	40	29,3	30,99	9,65	62,17	12,13	0,88	1,98	41,4	nN
MO ( $g Kg^{-3}$ )	40	9,68	9,61	2,61	21,39	4,08	0,79	1,74	42,1	nN
<b>Área em Regeneração</b>										
PT ( $m^3 m^{-3}$ )	40	0,39	0,39	0,34	0,45	0,03	0,18	-0,58	6,5	N
Ma ( $m^3 m^{-3}$ )	40	0,17	0,18	0,12	0,24	0,03	0,11	-0,84	16,8	N
Mi ( $m^3 m^{-3}$ )	40	0,22	0,21	0,19	0,22	0,01	-0,59	0,66	2,8	N
DS ( $Mg m^{-3}$ )	40	1,66	1,65	1,53	1,84	0,07	0,17	-0,49	4,4	N
DMP (mm)	40	2,76	2,80	2,05	3,21	0,28	-0,63	-0,18	13,62	N
$K_0$ ( $cm h^{-1}$ )	40	24,92	24,05	7,83	52,05	10,47	0,68	0,06	42,0	N
MO ( $g Kg^{-3}$ )	40	30,67	29,46	22,29	47,37	6,34	0,83	1,71	22,7	nN
<b>Plantio Direto</b>										
PT ( $m^3 m^{-3}$ )	40	0,38	0,38	0,32	0,48	0,03	0,99	2,08	7,9	nN
Ma ( $m^3 m^{-3}$ )	40	0,14	0,14	0,10	0,18	0,02	0,07	-0,40	12,8	N
Mi ( $m^3 m^{-3}$ )	40	0,24	0,24	0,22	0,30	0,01	1,62	7,68	5,6	nN
DS ( $Mg m^{-3}$ )	40	1,66	1,66	1,46	1,89	0,08	0,23	0,98	5,1	N
DMP (mm)	40	1,51	1,48	0,93	2,12	0,29	0,17	-0,50	19,2	N
$K_0$ ( $cm h^{-1}$ )	40	21,91	18,70	8,00	47,26	10,29	0,55	0,31	47,0	N
MO ( $g Kg^{-3}$ )	40	10,84	10,98	2,14	21,39	4,45	0,08	0,03	41,0	N
<b>Plantio Convencional</b>										
PT ( $m^3 m^{-3}$ )	40	0,31	0,31	0,25	0,37	0,03	0,44	-0,03	9,2	N
Ma ( $m^3 m^{-3}$ )	40	0,11	0,11	0,04	0,14	0,02	-0,69	1,42	18,3	N
Mi ( $m^3 m^{-3}$ )	40	0,20	0,20	0,14	0,27	0,03	0,43	0,00	14,3	N
DS ( $Mg m^{-3}$ )	40	1,75	1,75	1,64	1,86	0,06	0,19	-0,56	3,3	N
DMP (mm)	40	1,30	1,31	0,73	1,75	0,26	-0,27	-0,50	20,1	N
$K_0$ ( $cm h^{-1}$ )	40	4,97	4,89	1,08	8,74	2,10	0,14	-0,87	42,3	N
MO ( $g Kg^{-3}$ )	40	12,75	12,60	1,51	30,79	7,61	0,24	-0,84	59,7	N

nº - número de amostras; Me - média; Md - mediana; Min - valor mínimo; Max - valor máximo; DP - desvio padrão;  $C_s$  - coeficiente de assimetria;  $C_k$  - coeficiente de curtose; CV - coeficiente de variação; N - distribuição normal pelo teste de Shapiro Wilk e nN - distribuição não normal pelo teste de Shapiro Wilk.

Crespo (1998) afirma que o coeficiente de assimetria deve tender a zero ou próximo a este, para que a distribuição seja simétrica. Para o autor, quando a assimetria for distante de zero e positiva, a distribuição será assimétrica à direita e, se for negativa é assimétrica à esquerda.

Webster (2001) afirma ser possível, a partir dos valores de coeficiente de assimetria ( $C_s$ ), inferir sobre a distribuição dos dados. Por exemplo, se a assimetria for até 0,5 (em módulo), significa que determinado atributo apresenta distribuição normal; valores entre 0,5 e 1,0 necessitam de análise por meio de seus quadrados mínimos e valores maiores que 1,0 necessitam de transformação para apresentarem distribuição normal. No presente estudo observou-se que os atributos com  $C_s$  maior ou igual a 0,79 (em módulo) apresentaram forte dispersão dos dados pela reta de probabilidade normal.

O coeficiente de curtose ( $C_k$ ) também pode ser utilizado para avaliar se os dados seguem distribuição normal, este deve ser preferencialmente nulo mas podem ser aceitos valores entre +2 e -2 (NEGREIROS NETO et al., 2014). Nesse estudo foi possível perceber que alguns atributos apresentaram  $C_k$  e  $C_s$ , distantes de zero nas duas profundidades estudadas (Tabela 2 e 3), sendo que os atributos com valores  $C_k$  maiores que 1,50 também apresentaram assimetria, nas duas profundidades. De acordo com Diggle e Ribeiro (2007), os coeficientes de assimetria e curtose são mais sensíveis a valores extremos do que a média, mediana e o desvio padrão, uma vez que um único valor pode influenciar fortemente o coeficiente de assimetria e curtose, pois os desvios entre cada valor e a média são elevados à terceira potência.

O teste de Shapiro Wilk ( $p > 0,05$ ), para as duas profundidades estudadas identificou que apenas os atributos com assimetrias menores que -0,79 e maiores que 0,79, e com curtose superior a 1,50 não apresentaram distribuição normal, em concordância com a metodologia proposta por Webster (2007). Apenas a Mi no PD (0,0-0,20 m) não apresentou normalidade dos dados mesmo com valor de curtose abaixo de 1,50, mas com assimetria de -0,80.

Como existe a probabilidade de esses atributos terem sido influenciados por valores extremos ou atípicos (LIBARDI, et al., 1996; SCHERPINSKI et al., 2010), procedeu-se a sua identificação e a posterior retirada dos valores atípicos, conforme proposto por Libardi et al. (1996). Constatou-se que apenas Mi no PD

na profundidade de 0,0-0,20 m não apresentou distribuição normal, mesmo com a retirada de valores extremos (Tabela 4).

Isaaks e Srivastava (1989) afirmam que o conjunto de dados não precisa ter distribuição normal como condição para a realização de análise geoestatística, bastando que apresentem patamar bem definidos e caudas de histogramas não muito alongadas, para não comprometer a krigagem. Por isso, não foi realizada transformação dos dados de Mi no PD (0,0-0,20 m) após retirada dos valores atípicos.

**Tabela 4, Estatística descritiva de atributos do diâmetro médio ponderado (DMP), matéria orgânica (MO), porosidade total (PT), macroporosidade (Ma), microporosidade (Mi) e condutividade hidráulica saturada ( $K_0$ ) sem os valores atípicos em um Latossolo Amarelo Distrocoeso sob diferentes usos nas profundidades de 0,0-0,20 e 0,20-0,40 m.**

Variáveis	n <sup>o</sup>	Me	Md	Min	Max	DP	C <sub>s</sub>	C <sub>k</sub>	CV	p>0,05
<b>(Profundidade 0,0-0,20 m)</b>										
<b>Floresta Nativa</b>										
<b>DMP</b> (mm)	38	3,04	3,07	2,75	3,28	0,13	-0,41	-0,53	4,13	N
<b>MO</b> (g Kg <sup>-3</sup> )	38	31,39	30,12	24,47	41,63	4,41	0,70	-0,13	14,06	N
<b>Área em Regeneração</b>										
<b>PT</b> (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )	34	0,44	0,44	0,40	0,49	0,02	0,09	-0,43	4,77	N
<b>Ma</b> (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )	35	0,23	0,23	0,16	0,28	0,03	-0,55	-0,06	13,43	N
<b>DMP</b> (mm)	33	3,03	3,04	2,78	3,24	0,13	-0,32	-0,62	4,16	N
<b>Plantio Direto</b>										
<b>PT</b> (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )	32	0,74	0,73	0,63	0,90	0,07	0,21	-1,10	10,04	N
<b>Mi</b> (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )	39	0,59	0,59	0,35	0,79	0,14	-0,37	-1,13	23,72	nN
<b>(Profundidade 0,20-0,40 m)</b>										
<b>Floresta Nativa</b>										
<b>K<sub>0</sub></b> (cm h <sup>-1</sup> )	37	26,93	28,52	9,65	46,20	8,96	-0,01	-0,68	33,28	N
<b>MO</b> (g Kg <sup>-3</sup> )	36	11,41	11,03	6,84	19,39	2,90	0,81	0,85	25,41	N
<b>Área em Regeneração</b>										
<b>MO</b> (g Kg <sup>-3</sup> )	38	29,85	29,33	22,29	40,95	5,33	0,51	-0,54	17,87	N
<b>Plantio Direto</b>										
<b>Mi</b> (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )	33	0,24	0,24	0,23	0,26	0,005	0,50	0,29	2,29	N
<b>K<sub>0</sub></b> (cm h <sup>-1</sup> )	37	19,98	18,51	8,00	37,88	7,97	0,64	-0,11	39,89	N

n<sup>o</sup> - número de amostras; Me – média; Md – mediana; Min – valor mínimo; Max – valor máximo; DP – desvio padrão; C<sub>s</sub> – coeficiente de assimetria; C<sub>k</sub> – coeficiente de curtose; CV – coeficiente de variação; N – distribuição normal pelo teste de Shapiro Wilk e nN – distribuição não normal pelo teste de Shapiro Wilk,

Conforme classificações para CV adotadas neste estudo, apenas o atributo densidade do solo (DS) apresentou baixa variação em todos os sistemas estudados e nas duas profundidades. Outros autores também encontraram baixos

CV, na profundidade de 0,0-0,20 m, para densidade do solo, tais como Ribeiro et al. (2016) ao estudarem a variabilidade espacial de um Latossolo Amarelo Distrocoeso típico de Tabuleiros Costeiros, no estado do Maranhão, submetido a plantio direto e convencional, e Carvalho et al. (2011) que identificaram baixos CV para densidade e porosidade do solo, em três classes de solos cultivados com cana-de-açúcar, dados que corrobora com os valores encontrados.

De acordo com a classificação de Warrick e Nielsen (1980) também apresentaram baixos CVs: DMP, na FN e PD (5,41 e 11,35%); e PT na AR (9,28%), em 0,0-0,20 m. Já na profundidade de 0,20-0,40 m os atributos que apresentaram baixo CV foram: PT em todos os sistemas FN (7,4%), AR (6,5%), PD (7,9%) e PC (9,2%) e Mi, com exceção do PC.

Nogueira (2007) propõe uma avaliação de CV que leva em consideração a utilização da média aritmética como valor representativo. Para o autor um coeficiente de variação menor <35% indica que a série de dados é homogênea, ou seja, possibilita utilizar a média como valor representativo do conjunto de dados; CV entre 35% e 65% indica que a série de dados é heterogênea, tendo a média pouco significado para expressar o fenômeno; e se o CV for >65% a série é muito heterogênea, e a média não tem significado algum para representar o conjunto de dados. Nesse estudo todos os atributos físico-hídricos na profundidade de 0,0-0,20 m apresentaram média homogênea, o que possibilita utilizar esses valores como representativos do conjunto de dados, com exceção apenas da  $K_0$  (35,43%) no PC. Na profundidade de 0,20-0,40 m  $K_0$  também foi o único atributo que apresentou heterogeneidade, sendo sua variação de 41,4 a 47%, nos sistemas FN e PD, respectivamente.

Analisando-se os semivariogramas, percebeu-se tendência apenas na profundidade de 0,0-0,20 m, ou seja, o semivariograma expressou aumento contínuo com a distância, sem apresentar patamar definido (GOMES et al., 2007). As tendências se expressaram no DMP, na FN e AR; microporosidade nos dois sistemas de cultivo (PD e PC); macroporosidade e porosidade total em AR. Para prosseguir com as análises foi necessário retirar as tendências, calculando-se os resíduos, por meio de equações linear, quadrática ou cúbica e gerar novos semivariogramas (VIEIRA, 2000). Depois da retirada de tendência, os atributos avaliados, nos quatro sistemas e nas duas profundidades, apresentaram

dependência espacial (Tabelas 5 e 6), com exceção da Mi no plantio convencional (0,0-0,20 m) e floresta natural (0,20-0,40 m) que apresentaram efeito pepita puro. Para Vieira (2000) quando um atributo apresenta efeito pepita puro, demonstra falta de explicação para sua variabilidade, considerando a distância de amostragem utilizada, indicando necessidade da redução na malha amostral.

**Tabela 5, Parâmetros da análise semivariográfica dos valores de porosidade total (PT), macroporosidade (Ma), microporosidade (Mi), densidade do solo (DS), diâmetro médio ponderado de agregados (DMP) e condutividade hidráulica saturada ( $K_0$ ) de um Latossolo Amarelo Distrocoeso sob diferentes usos na profundidade de 0,0-0,20 m.**

Variável	$C_0$	$C_0+C_1$	$A_0$ (m)	GDE (%)	Classificação	Modelo	$R^2$
<b>Floresta Nativa</b>							
<b>PT</b> ( $m^3 m^{-3}$ )	0,00124	0,00706	19,5	17,6	Forte	Esférico	0,75
<b>Ma</b> ( $m^3 m^{-3}$ )	0,00188	0,00959	17,0	19,60	Forte	Esférico	0,83
<b>Mi</b> ( $m^3 m^{-3}$ )	0,00003	0,00047	9,3	6,75	Forte	Exponencial	0,35
<b>DS</b> ( $Mg m^{-3}$ )	0,0042	0,0191	17,2	21,9	Forte	Esférico	0,90
<b>DMP</b> (mm)	0,0211	0,0422	16,4	50,0	Moderada	Gaussiano	0,86
<b><math>K_0</math></b> ( $cm h^{-1}$ )	221,0	927,00	21,0	23,8	Forte	Esférico	0,94
<b>Área em Regeneração</b>							
<b>PT</b> ( $m^3 m^{-3}$ )	0,00095	0,00191	19,8	49,7	Moderada	Gaussiano	0,95
<b>Ma</b> ( $m^3 m^{-3}$ )	0,00096	0,00279	18,7	34,4	Moderada	Esférico	0,94
<b>Mi</b> ( $m^3 m^{-3}$ )	0,00002	0,00018	8,91	8,84	Forte	Exponencial	0,73
<b>DS</b> ( $Mg m^{-3}$ )	0,0061	0,0154	21,4	39,6	Moderada	Gaussiano	0,96
<b>DMP</b> (mm)	0,0158	0,1606	13,8	9,8	Forte	Exponencial	0,76
<b><math>K_0</math></b> ( $cm h^{-1}$ )	108,3	216,7	16,3	49,9	Moderada	Gaussiano	0,71
<b>Plantio Direto</b>							
<b>PT</b> ( $m^3 m^{-3}$ )	0,00213	0,02336	17,6	9,1	Forte	Exponencial	0,69
<b>Ma</b> ( $m^3 m^{-3}$ )	0,00355	0,00166	16,1	21,4	Forte	Esférico	0,78
<b>Mi</b> ( $m^3 m^{-3}$ )	0,00124	0,01428	9,5	8,7	Forte	Exponencial	0,75
<b>DS</b> ( $Mg m^{-3}$ )	0,0094	0,0203	24,6	46,3	Moderada	Gaussiano	0,97
<b>DMP</b> (mm)	0,0461	0,107	25,6	43,0	Moderada	Gaussiano	0,97
<b><math>K_0</math></b> ( $cm h^{-1}$ )	101,5	203,1	23,5	49,9	Moderada	Gaussiano	0,92
<b>Plantio Convencional</b>							
<b>PT</b> ( $m^3 m^{-3}$ )	0,00045	0,00361	17,3	12,6	Forte	Esférico	0,84
<b>Ma</b> ( $m^3 m^{-3}$ )	0,00072	0,00143	16,0	50,3	Moderada	Gaussiano	0,95
<b>Mi</b> ( $m^3 m^{-3}$ )	-	-	-	-	-	Efeito pepita	-
<b>DS</b> ( $Mg m^{-3}$ )	0,0041	0,0083	23,1	49,9	Moderada	Gaussiano	0,88
<b>DMP</b> (mm)	0,0676	0,1702	31,4	39,7	Moderada	Gaussiano	0,98
<b><math>K_0</math></b> ( $cm h^{-1}$ )	37,6	75,2	23,7	49,9	Moderada	Exponencial	0,55

$C_0$  – Efeito pepita;  $C_0+C_1$  – Patamar;  $A_0$  – Alcance; GDE – Grau de dependência espacial e  $R^2$  – coeficiente de determinação

Nenhum modelo ajustou-se ao mesmo atributo em todas as áreas estudadas. Todavia, independente do modelo, a Mi apresentou dependência espacial forte, onde não se verificou efeito pepita; PT e Ma apresentaram também forte dependência espacial, exceto em AR de 0,0-0,20 m.

**Tabela 6, Parâmetros da análise semivariográfica dos valores de porosidade total (PT), macroporosidade (Ma), microporosidade (Mi), densidade do solo (DS), diâmetro médio ponderado de agregados (DMP) e condutividade hidráulica saturada ( $K_0$ ) de um Latossolo Amarelo Distrocoeso sob diferentes usos na profundidade de 0,20-0,40 m.**

Variável	$C_0$	$C_0+C_1$	$A_0$ (m)	GDE (%)	Classificação	Modelo	$R^2$
<b>Floresta Nativa</b>							
PT ( $m^3 m^{-3}$ )	0,00034	0,00093	14,7	35,9	Forte	Esférico	0,98
Ma ( $m^3 m^{-3}$ )	0,00020	0,00151	11,0	13,0	Forte	Exponencial	0,71
Mi ( $m^3 m^{-3}$ )	-	-	-	-	-	Efeito pepita	-
DS ( $Mg m^{-3}$ )	0,0008	0,0065	13,1	12,9	Forte	Exponencial	0,84
DMP (mm)	0,1524	0,3338	15,7	45,7	Moderada	Gaussiano	0,98
$K_0$ ( $cm h^{-1}$ )	61,10	167,00	20,1	36,6	Forte	Exponencial	0,82
<b>Área em Regeneração</b>							
PT ( $m^3 m^{-3}$ )	0,00008	0,00070	11,6	11,4	Forte	Exponencial	0,91
Ma ( $m^3 m^{-3}$ )	0,00011	0,00099	7,0	10,6	Forte	Gaussiano	0,90
Mi ( $m^3 m^{-3}$ )	0,00000	0,00005	6,9	3,7	Forte	Esférico	0,51
DS ( $Mg m^{-3}$ )	0,0001	0,0055	7,6	2,4	Forte	Esférico	0,59
DMP (mm)	0,0130	0,0884	13,0	14,7	Forte	Exponencial	0,78
$K_0$ ( $cm h^{-1}$ )	5,1	114,9	8,9	4,4	Forte	Esférico	0,60
<b>Plantio Direto</b>							
PT ( $m^3 m^{-3}$ )	0,00014	0,00096	12,5	14,2	Forte	Exponencial	0,90
Ma ( $m^3 m^{-3}$ )	0,00005	0,00036	7,9	12,7	Forte	Gaussiano	0,66
Mi ( $m^3 m^{-3}$ )	0,00003	0,00019	8,9	14,3	Forte	Exponencial	0,78
DS ( $Mg m^{-3}$ )	0,0010	0,0077	7,9	13,1	Forte	Gaussiano	0,79
DMP (mm)	0,0083	0,0880	8,1	9,4	Forte	Exponencial	0,52
$K_0$ ( $cm h^{-1}$ )	48,90	114,5	14,6	42,7	Moderada	Exponencial	0,58
<b>Plantio Convencional</b>							
PT ( $m^3 m^{-3}$ )	0,00011	0,00089	11,1	12,2	Forte	Exponencial	0,79
Ma ( $m^3 m^{-3}$ )	0,00001	0,00039	7,7	3,6	Forte	Esférico	0,72
Mi ( $m^3 m^{-3}$ )	0,00011	0,00910	7,9	1,2	Forte	Gaussiano	0,63
DS ( $Mg m^{-3}$ )	0,0002	0,0036	11,9	5,6	Forte	Exponencial	0,71
DMP (mm)	0,0067	0,0709	10,7	9,4	Forte	Exponencial	0,87
$K_0$ ( $cm h^{-1}$ )	0,5	4,7	11,6	11,3	Forte	Exponencial	0,81

$C_0$  – Efeito pepita;  $C_0+C_1$  – Patamar;  $A_0$  – Alcance; GDE – Grau de dependência espacial e  $R^2$  – coeficiente de determinação,

A análise da tabela 5 permite observar que, sob floresta natural, os atributos PT, Ma, DS, e  $K_0$  apresentaram modelo de ajuste esférico (Figura 15) e forte dependência espacial. Na área em regeneração constatou-se a predominância do modelo gaussiano ajustado a PT, DS e  $K_0$  (Figura 16), todos com moderada dependência espacial. Para os sistemas de cultivo, observou-se que o modelo predominante foi o gaussiano, ajustado para DS, DMP e  $K_0$ , no PD (Figura 17), e Ma, DS e DMP, no PC (Figura 18), todos como moderado grau de dependência.

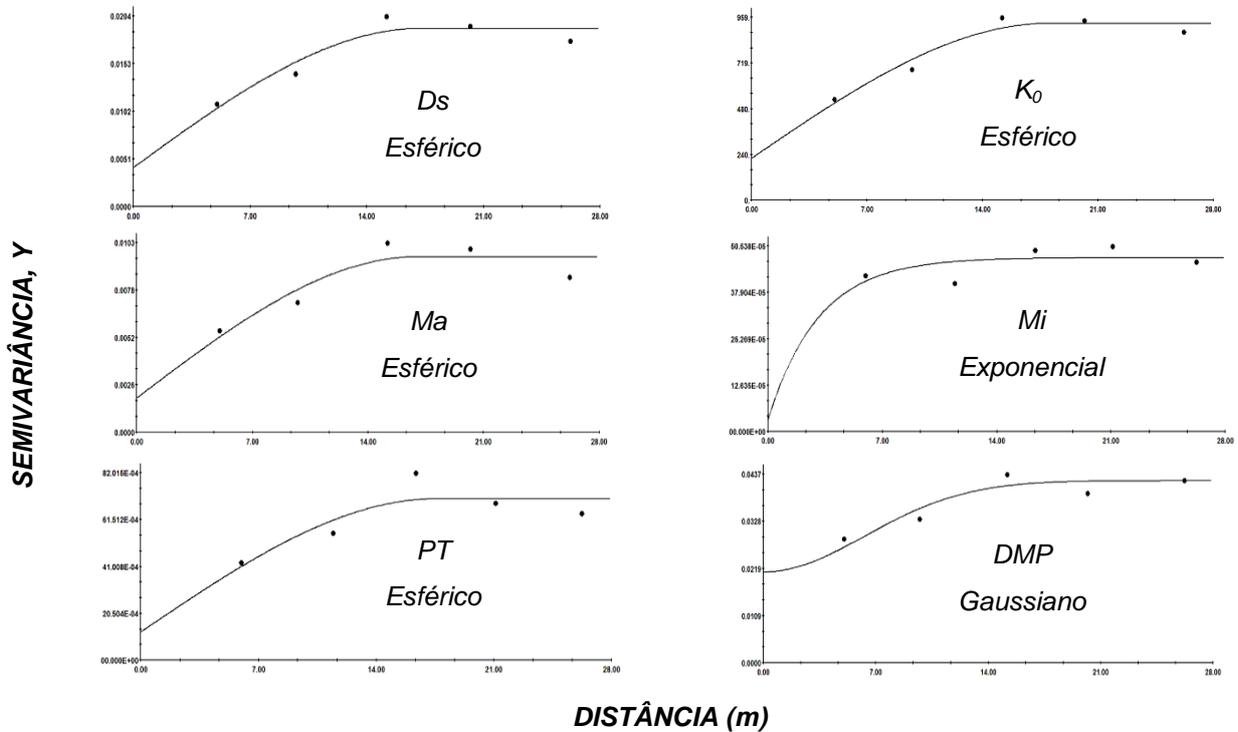


Figura 15. Semivariogramas de densidade do solo (DS), condutividade hidráulica saturada ( $K_0$ ), macroporosidade (Ma), microporosidade (Mi), porosidade total (PT) e diâmetro médio ponderado para agregados (DMP) em Latosolo Amarelo Distrocoeso sob floresta natural na profundidade de 0,0-0,20 m.

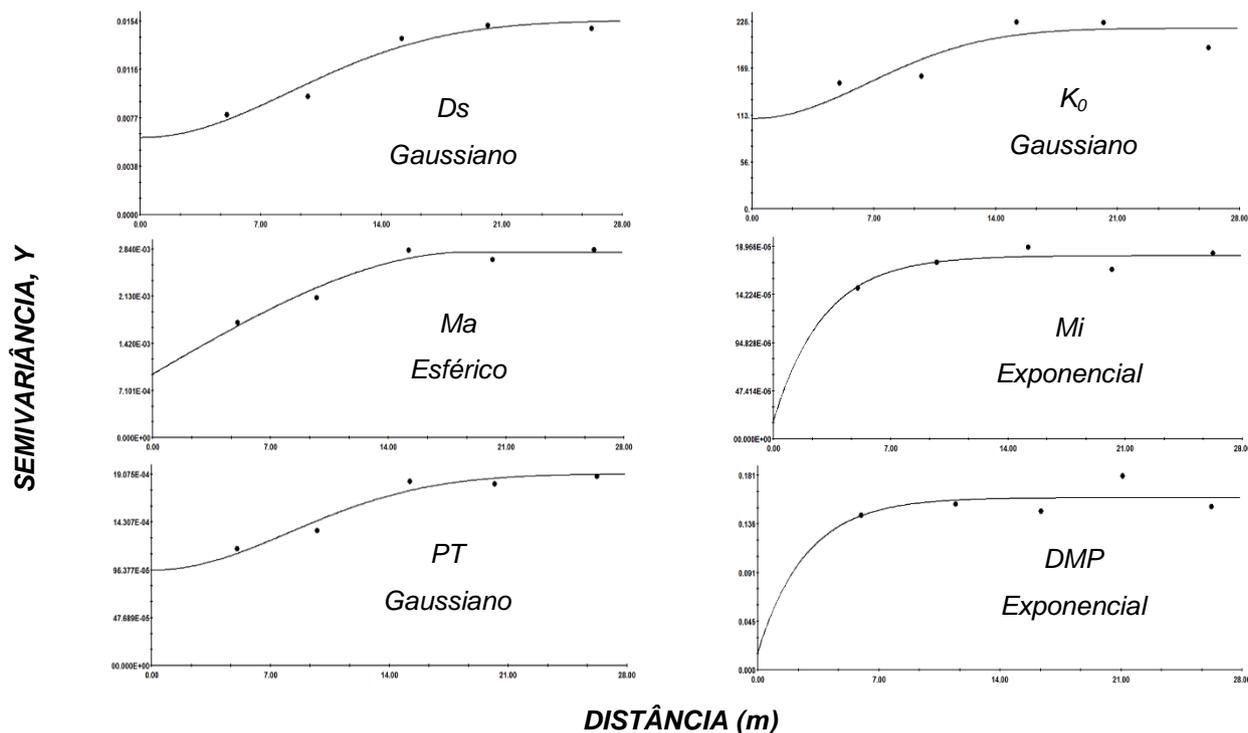


Figura 16. Semivariogramas para densidade do solo ( $D_s$ ), condutividade hidráulica saturada ( $K_0$ ), macroporosidade ( $Ma$ ), microporosidade ( $Mi$ ), porosidade total ( $PT$ ) e diâmetro médio ponderado para agregados ( $DMP$ ) em Latossolo Amarelo Distrocoeso sob área em regeneração na profundidade de 0,0-0,20 m.

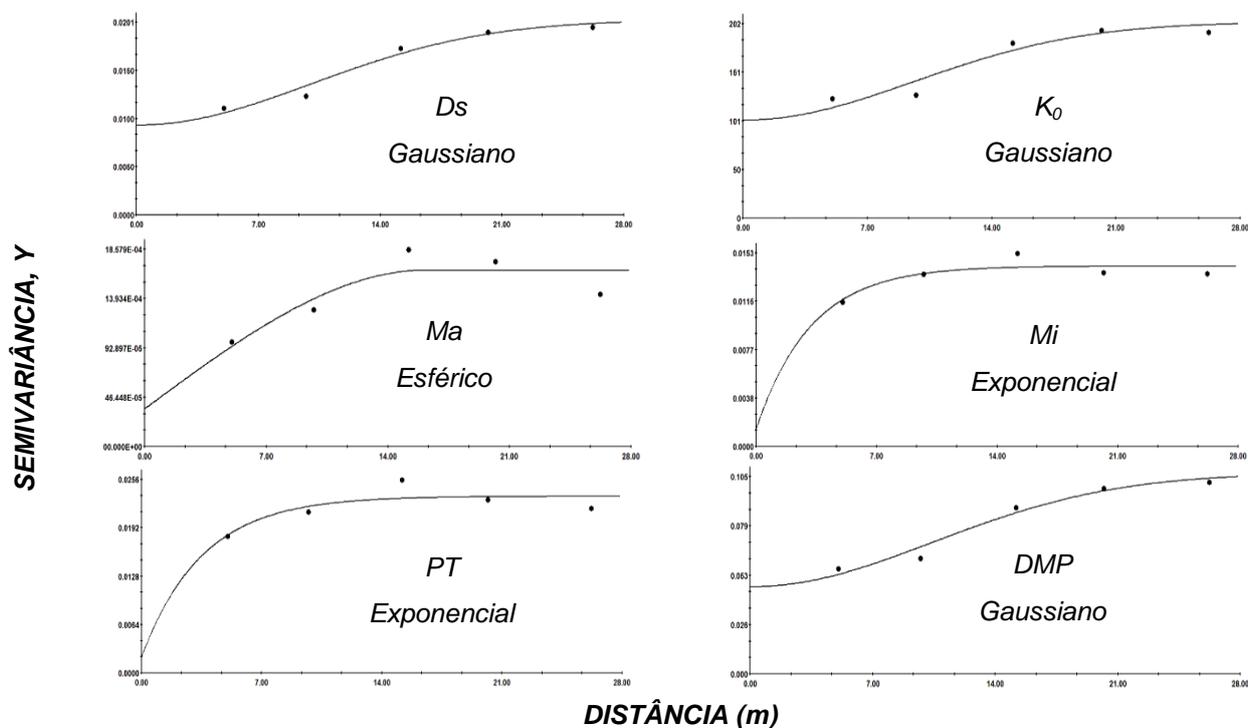


Figura 17. Semivariogramas para densidade do solo ( $D_s$ ), condutividade hidráulica saturada ( $K_0$ ), macroporosidade ( $Ma$ ), microporosidade ( $Mi$ ), porosidade total ( $PT$ ) e diâmetro médio ponderado para agregados ( $DMP$ ) em Latossolo Amarelo Distrocoeso sob plantio direto na profundidade de 0,0-0,20 m.

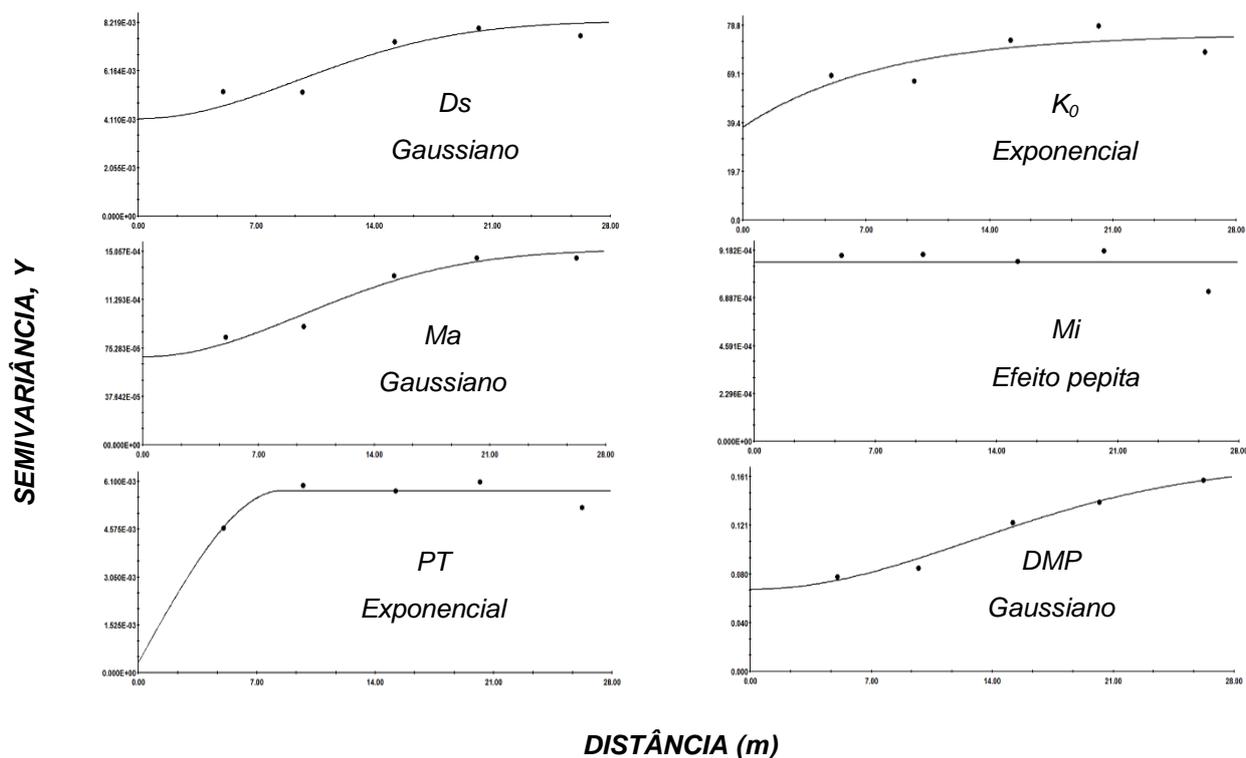


Figura 18. Semivariogramas para densidade do solo (DS), condutividade hidráulica saturada ( $K_0$ ), macroporosidade (Ma), microporosidade (Mi), porosidade total (PT) e diâmetro médio ponderado para agregados (DMP) em Latossolo Amarelo Distrocoeso sob plantio convencional na profundidade de 0,0-0,20 m.

De acordo com a tabela 6 e as Figuras 19 a 22, verificou-se que no sistema FN o modelo exponencial foi o que se ajustou ao maior número de atributos, foram eles: Ma, DS e  $K_0$ , com GDE forte; na AR o modelo esférico predominou entre aos atributos, tais como: Mi, DS e  $K_0$ , com GDE também forte; no PD o modelo predominante foi o exponencial, que se ajustou aos atributos PT, Mi,  $K_0$  e DMP, com GDE forte e GDE moderado para  $K_0$ ; já no PC, o modelo exponencial ajustou-se aos atributos PT, DS, DMP e  $K_0$ , todos com GDE forte.

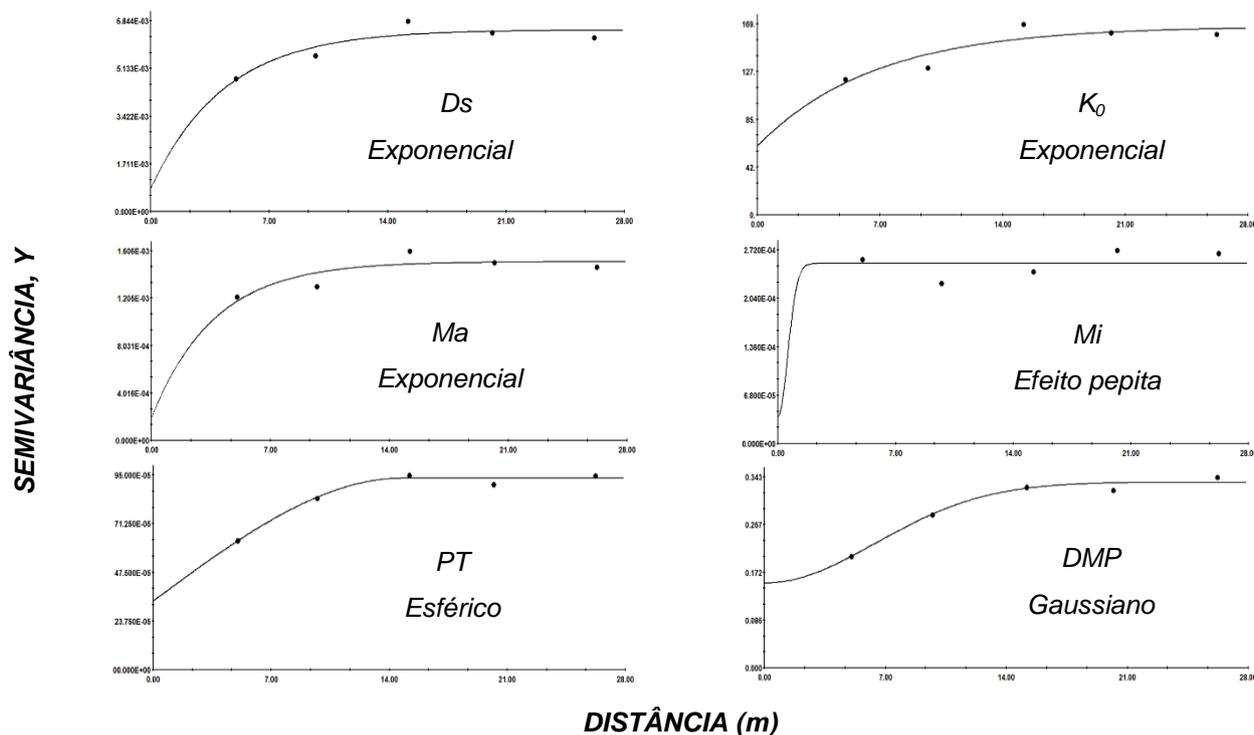


Figura 19. Semivariogramas para densidade do solo ( $D_s$ ), condutividade hidráulica saturada ( $K_0$ ), macroporosidade ( $Ma$ ), microporosidade ( $Mi$ ), porosidade total ( $PT$ ) e diâmetro médio ponderado para agregados ( $DMP$ ) em Latossolo Amarelo Distrocoeso sob floresta natural na profundidade de 0,20-0,40 m.

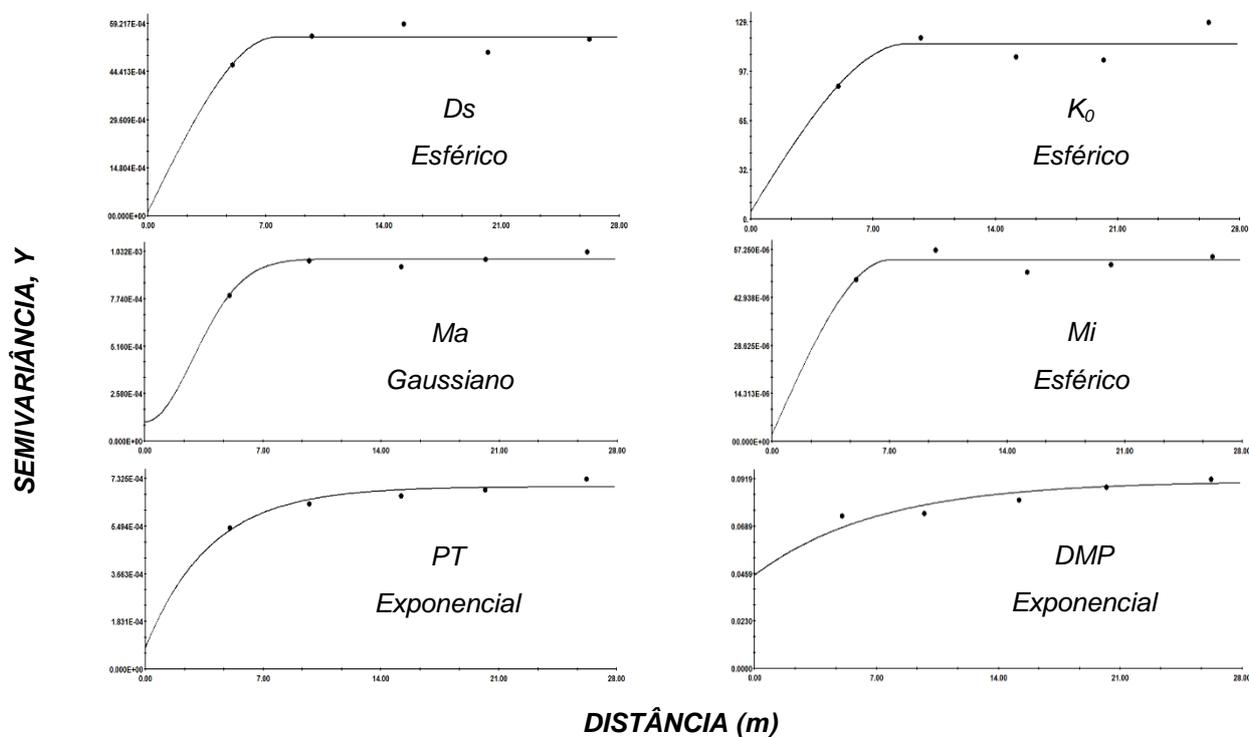


Figura 20. Semivariogramas para densidade do solo ( $D_s$ ), condutividade hidráulica saturada ( $K_0$ ), macroporosidade ( $Ma$ ), microporosidade ( $Mi$ ), porosidade total ( $PT$ ) e diâmetro médio ponderado para agregados ( $DMP$ ) em Latossolo Amarelo Distrocoeso sob área em regeneração na profundidade de 0,20-0,40 m.

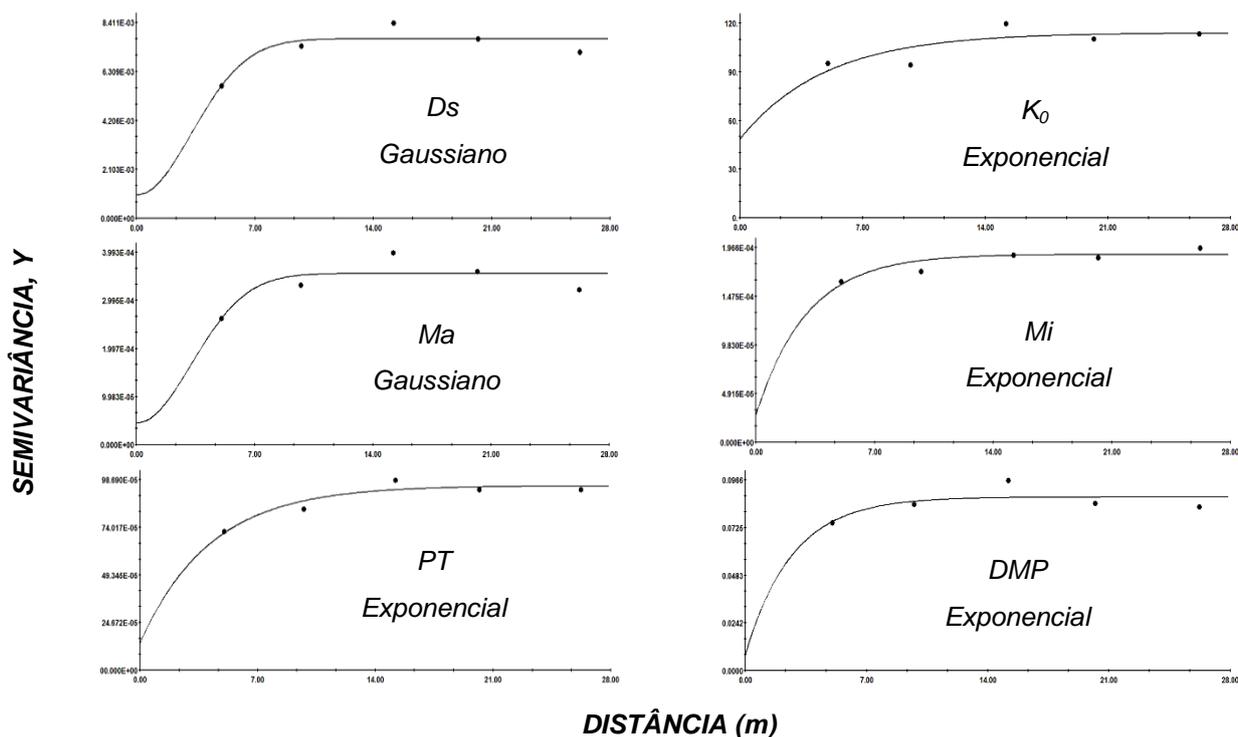


Figura 21. Semivariogramas para densidade do solo ( $D_s$ ), condutividade hidráulica saturada ( $K_0$ ), macroporosidade ( $Ma$ ), microporosidade ( $Mi$ ), porosidade total ( $PT$ ) e diâmetro médio ponderado para agregados ( $DMP$ ) em Latossolo Amarelo Distrocoeso sob plantio direto na profundidade de 0,20-0,40 m.

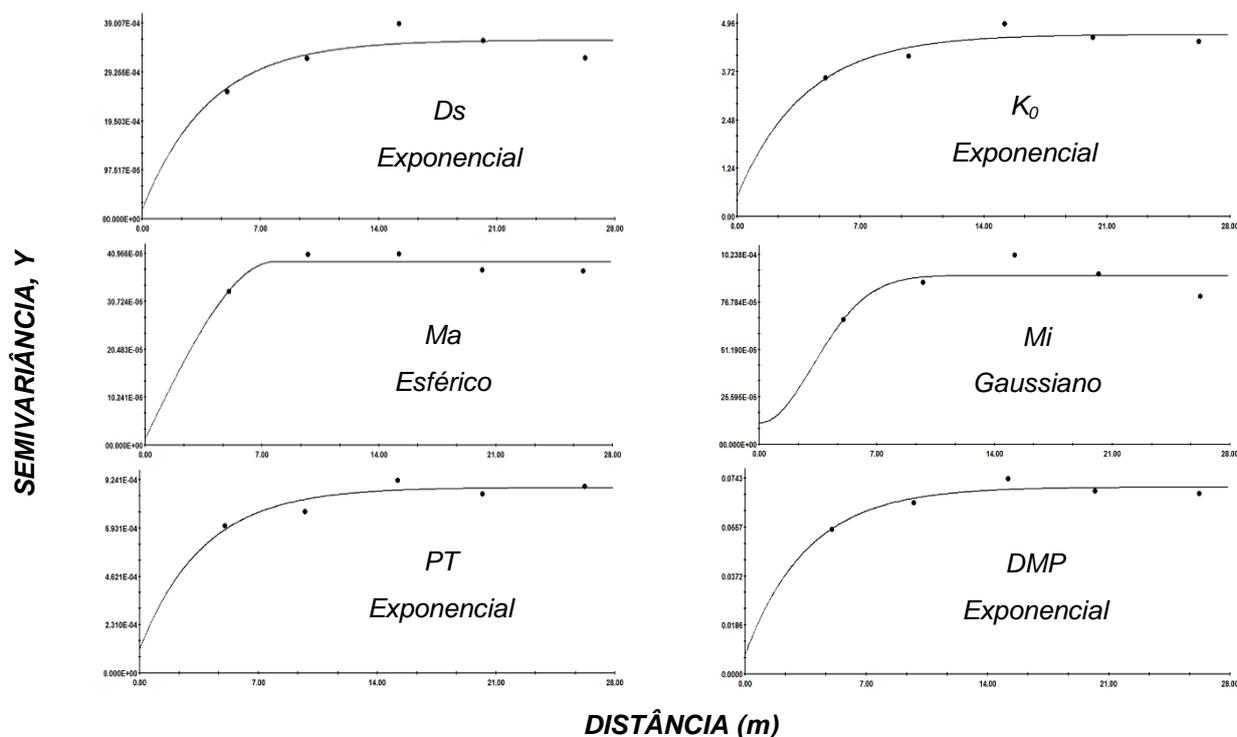


Figura 22. Semivariogramas para densidade do solo ( $D_s$ ), condutividade hidráulica saturada ( $K_0$ ), macroporosidade ( $Ma$ ), microporosidade ( $Mi$ ), porosidade total ( $PT$ ) e diâmetro médio ponderado para agregados ( $DMP$ ) em Latossolo Amarelo Distrocoeso sob plantio convencional na profundidade de 0,20-0,40 m.

Com os valores estimados por krigagem, foram gerados mapas de distribuição espacial dos atributos analisados, exceto para Ma e Mi (Figuras 23, 24, 25 e 26). Observou-se um arranjo de distribuição espacial dos atributos bem definidos para as duas profundidades.

Em geral, foram observados maiores valores dos atributos nos mapas à esquerda das figuras, correspondentes à profundidade de 0,0-0,20 m, exceto para densidade do solo, que inversamente proporcional, em todos os sistemas.

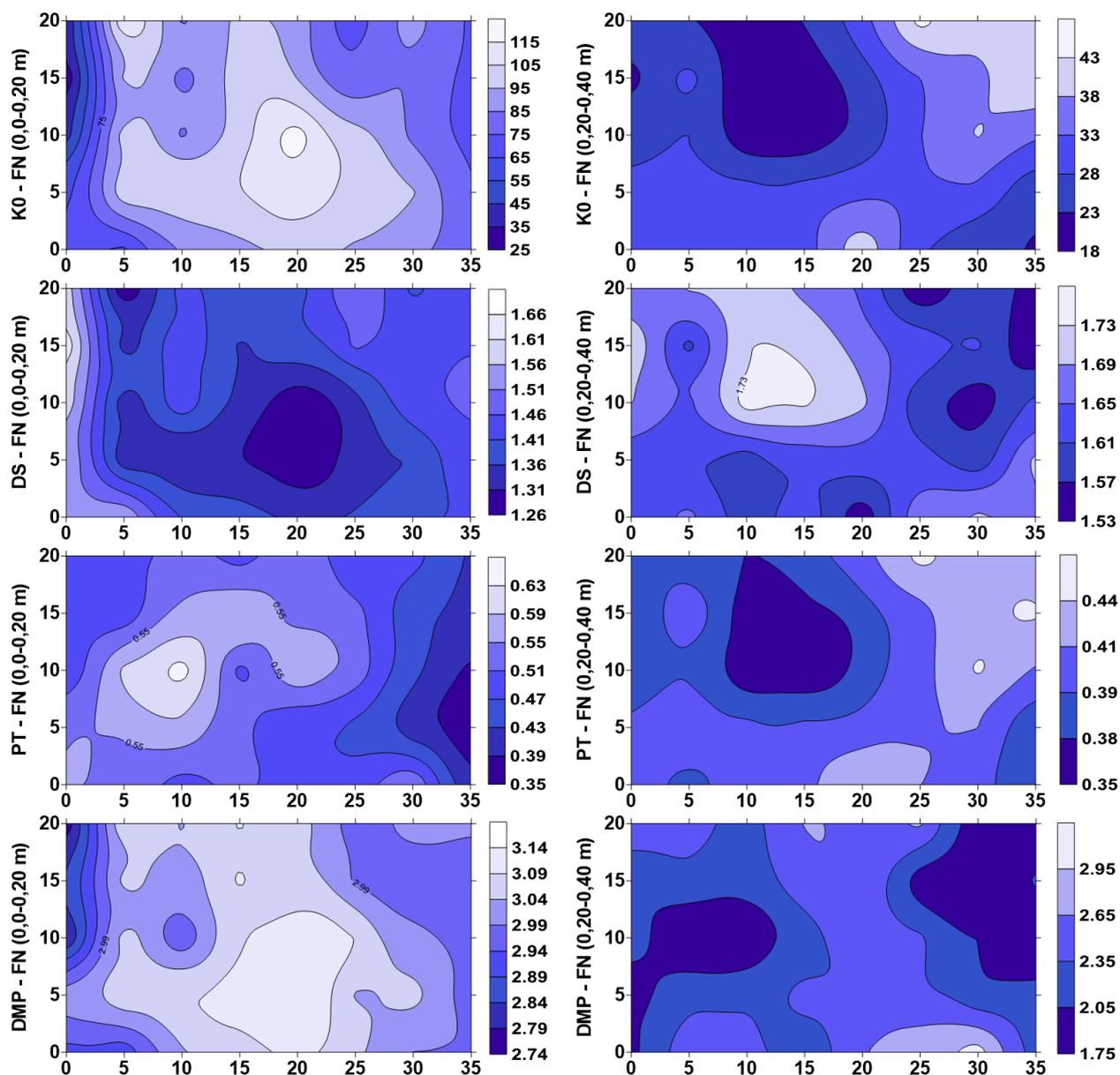


Figura 23. Mapas de interpolação por krigagem para condutividade hidráulica saturada (K<sub>0</sub>), densidade do solo (DS), porosidade total (PT) e diâmetro médio ponderado para agregados (DMP) em Latossolo Amarelo Distrocoeso sob floresta natural (FN) nas profundidades de 0,0-0,20 e 0,20-0,40 m.

De acordo com os mapas do sistema FN, observou-se em 0,0-0,20 m (Figura 23) relação espacial clara e direta entre os atributos  $K_0$  e PT, e clara e inversa entre esses atributos e a DS. Entretanto, em 0,20-0,40 m, visualiza-se melhor a relação direta entre  $K_0$  e PT, mantendo-se a relação inversa com DS.

Os mapas de superfície do sistema AR na profundidade de 0,20-0,40 m apresentaram isoinhas melhor relacionadas entre os atributos  $K_0$ , PT e DMP, quando comparados à profundidade mais superficial (Figura 24).

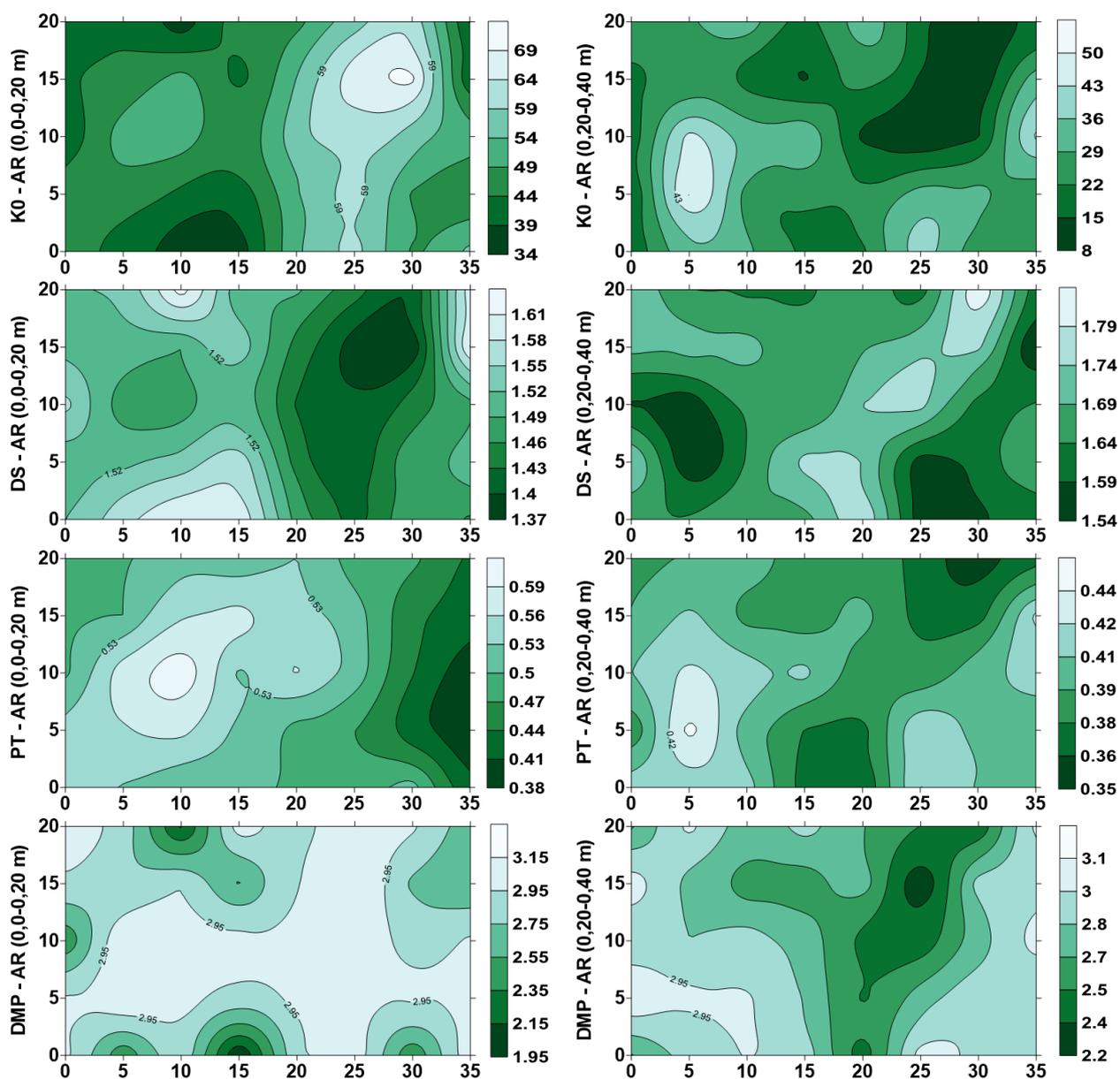


Figura 24. Mapas de interpolação por krigagem para condutividade hidráulica saturada ( $K_0$ ), densidade do solo (DS), porosidade total (PT) e diâmetro médio ponderado para agregados (DMP) em Latossolo Amarelo Distrocoeso sob área em regeneração nas profundidades de 0,0-0,20 e 0,20-0,40 m.

No PD e PC, independente da profundidade avaliada, são observadas distribuição espacial mais dependente entre atributos analisados, indicando que os Latossolos, conceituadamente considerados homogêneos, apresentaram menor variabilidade espacial de seus atributos em sistemas de uso com maior mobilização (Figuras 25 e 26).

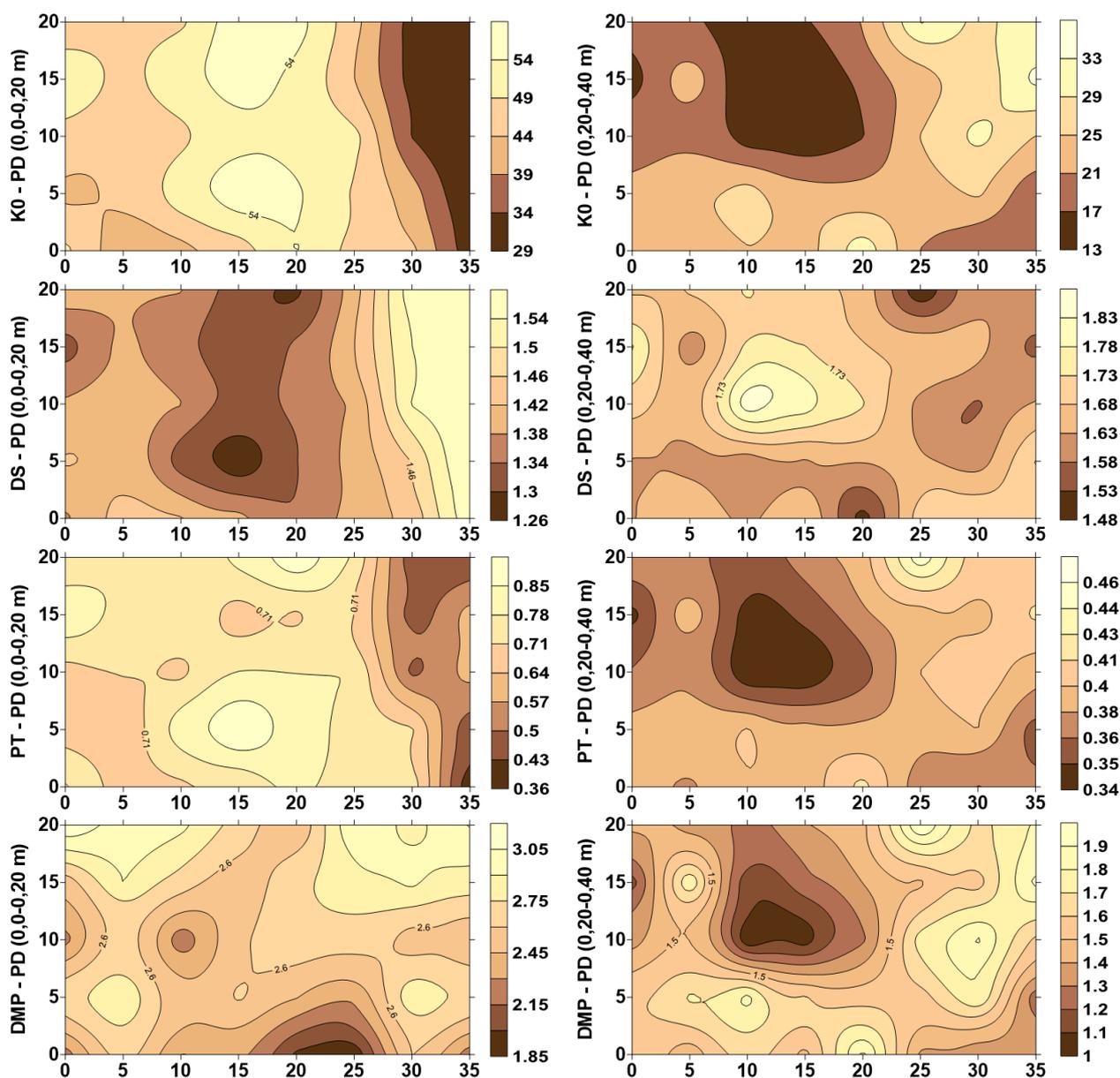


Figura 25. Mapas de interpolação por krigagem para condutividade hidráulica saturada ( $K_0$ ), densidade do solo (DS), porosidade total (PT) e diâmetro médio ponderado para agregados (DMP) em Latossolo Amarelo Distrocoeso sob plantio direto nas profundidades de 0,0-0,20 e 0,20-0,40 m.

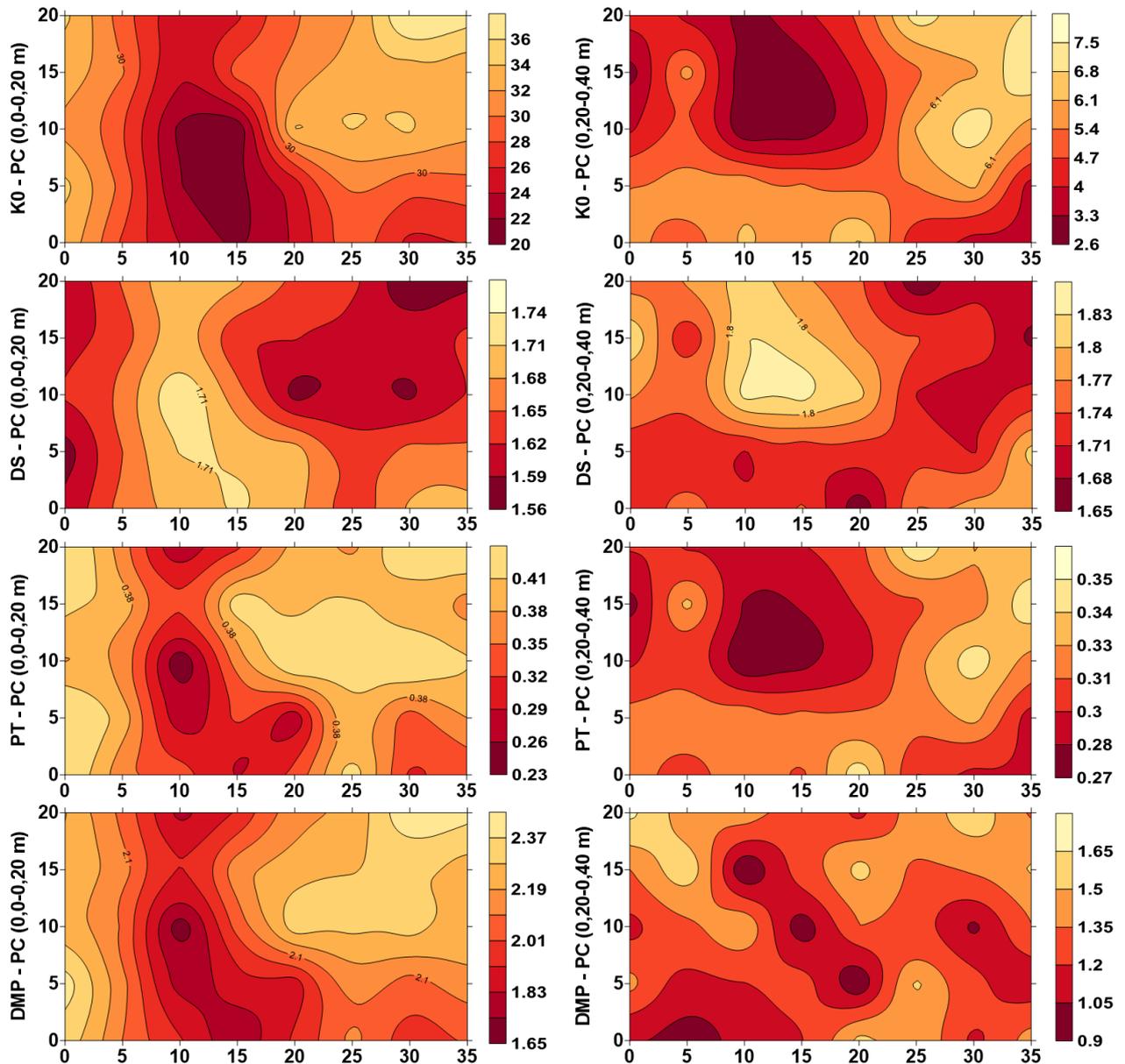


Figura 26. Mapas de interpolação por krigagem para condutividade hidráulica saturada ( $K_0$ ), densidade do solo (DS), porosidade total (PT) e diâmetro médio ponderado para agregados (DMP) em Latosolo Amarelo Distrocioso sob plantio convencional nas profundidades de 0,0-0,20 e 0,20-0,40 m.

Contudo, ainda foi possível perceber, de maneira geral, maiores valores dos atributos na parte esquerda dos mapas de PD e PC, semelhantemente aos demais sistemas, confirmando a existência de subsuperfície mais compactada ou adensada em 0,20-0,40 m independente do sistema de uso.

Considerando todos os sistemas e as duas profundidades estudadas, observou-se que todos os atributos se ajustaram aos modelos gaussiano, esférico e exponencial, exceto o DMP que se ajustou a apenas os modelos gaussiano e

exponencial. Esse fato tem sido evidenciado por diversos autores, em diferentes ambientes. Para exemplificar cita-se a densidade do solo que foi melhor ajustada, por Silva e Lima (2013), ao modelo gaussiano, enquanto Siqueira et al. (2009) e Campos et al. (2013b) observaram ajustes para o modelo esférico, já Negreiros Neto et al. (2014) encontraram ajustes para o modelo exponencial.

A análise da relação do grau de dependência espacial (GDE) em todos os atributos em estudo mostrou grau de dependência espacial forte e moderado para os atributos nos diferentes usos e nas duas profundidades (Tabelas 5 e 6). Assim constatou-se que a distribuição dos atributos físico-hídricos no espaço não é aleatória, uma vez que todos apresentaram valores moderados ou fortes para o grau de dependência espacial (RAMOS, et al., 2013), exceto Mi no PC (0,0-0,20 m) e em FN (0,20-0,40 m) que apresentaram efeito pepita puro. A dependência espacial aumentou com a profundidade, fato que pode ser observado pela redução do efeito pepita ( $C_0$ ), em todos os atributos com dependência, com isso reduz-se a descontinuidade entre as amostras (VIEIRA, 2000), e pela classificação de forte dependência (GDE), com exceção da DMP na FN e  $K_0$  no PD, estes mantiveram dependência espacial moderada a 0,20-0,40 m.

Os maiores alcances foram identificados em 0,0-0,20 m, para todos os atributos físico-hídricos (Tabelas 5 e 6). A porosidade total e macroporosidade apresentaram maiores alcances em FN e AR, enquanto que os demais atributos possuíram maiores alcances nos sistemas com cultivos agrícolas (PD e PC). Os valores de alcance demonstram claramente que o cultivo torna mais homogêneos alguns atributos (SILVA et al., 2008; TORRES et al., 2011). Todavia, contraria o conceito de que, quanto mais intensamente cultivado, mais homogêneos se apresentariam os atributos físico-hídricos de uma área (IQBAL et al., 2005), uma vez que os valores de alcance dos atributos, exceto Mi (efeito pepita) são próximos entre o PD e PC. Esses dados refletem a heterogeneidade do solo nos diferentes sistemas, o que demonstra ser muito mais uma regra do que exceção. Por isto, para representar adequadamente um atributo torna-se obrigatório considerar a estrutura da variação e não apenas a magnitude das mesmas, como faz os métodos clássicos até então utilizados (PETERSEN; CALVIN, 1986). Caso contrário, corre-se o risco de realizar amostragens custosas e imprecisas.

O tamanho amostral ideal para os atributos estudados nas duas profundidades encontra-se na tabela 7. Observa-se que o número de amostras necessárias para satisfazer todos atributos na profundidade 0,0-0,20 m com CV de 5% de erro foi muito alto, tais como: 127, 95, 98 e 143 para FN, AR, PD e PC, respectivamente. Os dados indicam valores ainda maiores para satisfazer um CV de 5% na profundidade de 0,20-0,40 m, sendo o número de repetições: 194, 200, 250 e 202 para FN, AR, PD e PC, respectivamente. Entre os atributos estudados o que demandou maior número de amostras foi  $K_0$ , em todos os sistemas e nas duas profundidades. Esse atributo influenciou o tamanho amostral pelos elevados valores de CV, que geralmente podem ultrapassar 70% (MESQUITA; MORALES, 2004).

**Tabela 7. Tamanho ideal de amostras determinadas para os atributos de porosidade total (PT), macroporosidade (Ma), microporosidade (Mi), densidade do solo (DS), diâmetro médio ponderado de agregados (DMP) e condutividade hidráulica saturada ( $K_0$ ) de um Latossolo Amarelo Distrocoeso sob floresta natural (FN), área em regeneração (AR), plantio direto (PD) e plantio convencional (PC) em duas profundidades.**

Atributos	FN			AR			PD			PC		
	5%	10%	15%	5%	10%	15%	5%	10%	15%	5%	10%	15%
<b>Profundidade 0,0-0,20 m</b>												
<b>PT</b>	27	7	3	10	3	1	55	13	6	45	11	5
<b>Ma</b>	105	27	12	62	16	7	98	24	10	24	6	3
<b>Mi</b>	27	7	3	93	24	10	76	19	8	105	26	12
<b>DS</b>	10	3	1	7	2	1	10	3	1	3	2	1
<b>DMP</b>	4	2	1	21	6	2	15	4	2	32	8	4
<b><math>K_0</math></b>	127	32	15	95	24	11	96	24	10	143	36	16
<b>MO</b>	30	8	4	59	15	7	46	11	5	16	4	2
<b>Profundidade 0,20-0,40 m</b>												
<b>PT</b>	6	2	1	5	2	1	7	2	1	10	3	1
<b>Ma</b>	49	12	5	32	8	4	19	5	2	38	9	4
<b>Mi</b>	5	1	1	1	1	1	4	1	1	23	6	3
<b>DS</b>	3	1	1	2	1	1	3	1	1	1	1	1
<b>DMP</b>	67	17	7	12	3	1	42	10	5	46	11	5
<b><math>K_0</math></b>	194	49	22	200	50	22	250	62	28	202	51	22
<b>MO</b>	125	31	14	48	12	5	222	55	25	191	48	21

Claramente verifica-se que o número de amostras ao nível de variação de 5 % em torno da média, resultou em números exaustivos e onerosos de amostras, principalmente para análises laboratoriais, o que inviabiliza a adoção deste nível

de precisão. Todavia, quando assumido o nível de 15% para a variação, observou-se redução significativa das repetições, o que poderia comprometer a precisão desejada para a obtenção de resultados confiáveis.

De acordo com esses resultados o mais sensato parece ser adotar uma variação de 10%, o que possibilita satisfazer as duas condições: obtenção de resultados confiáveis e possíveis de ser executado. Segundo Hendrickx e Wierenga (1990), a variação em torno da média de 10% é considerada um erro aceitável para amostragens em áreas agrícolas.

Ao considerar um CV de 10% é possível afirmar que, não houve necessidade de retirar mais de 40 amostras para representar os atributos estudados em um Latossolo Amarelo Distrocoeso sob os quatro sistemas avaliados nesta pesquisa foi atendido para profundidade 0,0-0,20 m. Todavia, na profundidade de 0,20-0,40 m, seria necessário ampliar o número amostral, em função da  $K_0$ , para 49, 50, 62 e 51 nos sistemas FN, AR, PD e PC, respectivamente.

## CONCLUSÕES

As maiores variação dos atributos físicos hídricos analisados pelo coeficiente de variação ocorreram na profundidade de 0,0-0,20 m, exceto para diâmetro médio ponderado, condutividade hidráulica saturada e matéria orgânica do solo em todos os sistemas estudados.

A análise dos semivariogramas mostrou que todas as variáveis estudadas apresentaram dependência espacial moderada e forte, exceto microporosidade que apresentou efeito pepita puro em 0,0-0,20 m no plantio convencional e em 0,20-0,40 m na floresta nativa.

A dependência espacial aumentou em profundidade para todos os atributos, exceto para DMP na FN e  $K_0$  no PD.

Os valores de alcance encontrados contrariam a ideia de que quanto mais intensamente cultivado o solo, mais homogêneo se apresenta seus atributos físico-hídricos do solo.

Os modelos esférico e gaussiano foram os que mais se ajustaram ao conjunto de dados na profundidade de 0,0-0,20 m e o exponencial em 0,20-0,40 m.

O tamanho amostral utilizado, aceitando-se 10% de variação em torno da média, foi suficiente para avaliar todos os atributos em 0,0-0,20 m e insuficiente à profundidade de 0,20-0,40 m para avaliar  $K_0$  em todos os sistemas, e para MO apenas nos plantios direto e convencional.

### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BAHIA. Superintendência de Estudos Econômicos e Sociais da Bahia. **Atributos climáticos do Estado da Bahia**. Salvador, 1998. 85 p. (Série Estudos e Pesquisas, 38).

BARROS, T. N. **Variabilidade espacial de atributos de qualidade do solo em sistemas plantio direto e convencional no Recôncavo da Bahia**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Centro de Ciências Agrárias, Ambientais e Biológicas. Cruz das Almas, BA, 2015. 63 f

BATAGLIA, O.C.; BRÜGGEMANN, G.; CARDOSO, F.; DECHEN, S. **Estado da arte do plantio direto no Brasil, 2007-2012**. In: 13º Encontro Nacional de Plantio Direto, Passo Fundo, 2012.

BERNARDO, S.; SOARES, A. A.; MANTOVANI, E. C. **Manual de irrigação**. 8. ed. Viçosa: UFV, 2008. 625 p.

BOTTEGA, E. L.; BOTTEGA, S. P.; SILVA, S. A.; QUEIROZ, D. M.; SOUZA, C. M. A.; RAFULL, L. Z. L. Variabilidade espacial da resistência do solo à penetração em um Latossolo Vermelho distroférico. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 6, n. 2, p.331-336, 2011.

BRADY, N. C.; WEIL, R. R. **The nature and properties of soils**. 14. ed. Upper Saddle River, New Jersey: Pearson-Prentice Hall, 2008. cap. 05, p. 173-217.

CAMARGO, L. A.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G. T. Spatial variability of physical attributes of an alfisol under diferente hillslope curvatures. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, n. 3, p. 617-630, 2010.

CAMBARDELLA, C.A.; MOORMAN, T.B.; NOVAK, J.M.; PARKIN, T.B.; KARLEN D.L.; TURCO, R.F.; KONOPKA, A.E. Field-scale variability of properties in Central Iowa soils. **Soil Science Society of American Journal**, 1994, v. 58, n. 4, p. 1501-11. DOI:10.2136/sssaj1994.03615995005800050033x

CAMPOS, M. C. C.; OLIVEIRA, I. A.; AQUINO, R. E.; BERGAMIN, A. C.; SILVA, D. A. P. Distribuição espacial de atributos físicos do solo em área cultivada com cana-de-açúcar. **Revista Agro@ambiente**. On-line, v. 7, n. 2, p. 119-128, mai-ago, 2013a.

CAMPOS, M. C.C.; SOARES, M. D. R.; SANTOS, L. A. C.; OLIVEIRA, I. A.; de AQUINO, R. E.; BERGAMIN, A. C. Variabilidade espacial dos atributos físicos em um Argissolo Vermelho sob floresta. **Comunicata Scientiae**, v.4, n.2, p. 168-178, 2013b.

CARVALHO, L.A. de; MEURER, I.; SILVA JUNIOR, C.A. da; CAVALIEIRI, K.M.V.; SANTOS, C.F.B. Dependência espacial dos atributos físicos de três classes de solos cultivados com cana-de-açúcar sob colheita mecanizada. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 15, n. 9, p. 940-949, 2011. DOI:10.1590/S1415-43662011000900010.

CASTRO FILHO, C.; MUZILLI, O. PODANOSCHI, A. L. Estabilidade dos agregados e sua relação com o teor de carbono orgânico num Latossolo Roxo distrófico, em função de sistemas de plantio, rotações de culturas e métodos de preparo das amostras. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 22, n. 3, p. 527-538, 1998.

CASTRO, O. M. de; VIEIRA, S. R.; SIQUEIRA, G. M.; ANDRADE, C. A. de. Atributos físicos e químicos de um Latossolo Vermelho eutroférico sob diferentes sistemas de preparo. **Bragantia**, v. 68, n. 4, p.1047-1057, 2009.

COSTA, F. S.; ALBUQUERQUE, J. A.; BAYER, C.; FONTOURA, S. M. V.; WOBETO, C. Propriedades físicas de um Latossolo Bruno afetadas pelos sistemas de plantio direto e preparo convencional. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, n. 3, p. 527-535, 2003.

CRESPO, A. A. **Estatística fácil**. 16.ed. São Paulo: Saraiva, 1998. 207p.

DIGGLE, P. J.; RIBEIRO, J. R. **Model-based geostatistics**. New York: Springer, 2007. 228p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUARIA - EMBRAPA. Serviço de Produção de Informação – SPI. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 4.ed. Rio de Janeiro, 2013. 306p.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Rio de Janeiro, RJ). **Manual de métodos de análise de solo**. 2ª Ed. Revisada. Rio de Janeiro: 2011. 225p.

FIGUEIREDO, C. C. de; SANTOS, G.G.; PEREIRA, S.; NASCIMENTO, J. L.; JÚNIOR, J. A. Propriedades físico-hídricas em Latossolo do Cerrado sob diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 13, n. 2, p.146–151, 2009.

FLORES, C. A.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; ALBUQUERQUE, J. A.; PAULETTO, E. A. Recuperação da qualidade estrutural, pelo sistema plantio direto, de um Argissolo Vermelho. **Ciência Rural**, v. 38, n. 8, p. 2164-2172, 2008.

GOLDEN SOFTWARE. **Surfer for Windows version 11.0**. Colorado: Golden, 2002.

GOMES, JBV; ARAUJO FILHO, JC; CURI, N. Solos de tabuleiros costeiros sob florestas naturais e sob cultivo. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 32, n. 71, p. 233-246, 2012.

GOMES, M.; da SILVA, N.; de MELLO, A. M.; FARIA, C. R.; OLIVEIRA, M. A.; MARA, P. Métodos de ajuste e modelos de semivariograma aplicados ao estudo da variabilidade espacial de atributos físico-hídricos do solo. **Revista Brasileira de Ciência Solo** [online]. 2007, v. 31, n. 3, p.435-443. ISSN 1806-9657. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832007000300003>.

GUIMARÃES, R. M. L.; GONÇALVES, A. C. A.; TORMENA, C. A.; FOLEGATTI, M. V. Variabilidade espacial de propriedades físico-hídricas de um Nitossolo sob a cultura do feijoeiro irrigado. **Revista de Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 30, n. 4, p. 657-669, 2010.

HENDRICKX, J.M.H.; WIERENGA, P.J. Variability of soil water tension in a trickle irrigated Chile pepper field. **Irrigation Science**., v. 11, n. 1, p. 23-30, 1990.

ISAAKS, E.H., SRIVASTAVA, R.M. **An introduction to applied geostatistics**. Oxford University Press, Oxford, UK. 1989, 561p.

IQBAL, J; THOMASSON, J. A; JENKINS, J. N; OWENS, P. R; WHISLER, F. D. Spatial variability analysis of soil physical properties of alluvial soils. **Soil Science Society of American Journal**, v. 69 n. 4, p. 1338-1350, 2005.

KLEIN, V.A.; VIEIRA, M.L.; DURIGON, F.F.; MASSING, J.P. & FÁVERO, F. Porosidade de aeração de um Latossolo Vermelho e rendimento de trigo em plantio direto escarificado. **Ciência Rural**, v. 38, n. 2, p. 365-371, 2008.

KLEIN, V. A.; LIBARDI, P. L. Densidade e distribuição do diâmetro dos poros de um Latossolo Vermelho sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.26, n. 4, p.857-867, 2002.

LIBARDI, P.L.; MANFRON, P.A.; MORAES, S.O.; TUON, R.L. Variabilidade da umidade gravimétrica de um solo hidromórfico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v. 20, n. 1, p. 1-12,1996.

LIMA, J. A. G.; MENDES, A. M. S.; DUDA, G. P.; FERREIRA, C. V. Variabilidade espacial de características físico-hídricas de um Cambissolo cultivado com mamão no semiárido do RN. **Revista Caatinga**, v. 19, n. 02, p. 192-199, 2006.

MACHADO, J. L.; TORMENA, C. A.; FIDALSKI, J.; SCAPIM, C. A. Inter-relações entre as propriedades físicas e os coeficientes da curva de retenção de água de um Latossolo sob diferentes sistemas de uso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 2, p. 495-502, 2008.

MARQUES, J. D. O.; TEIXEIRA, W. G.; REIS, A. M.; CRUZ JÚNIOR, O, F.; MARTINS, G. C. Avaliação da condutividade hidráulica do solo saturada utilizando dois métodos de laboratório numa topossequência com diferentes coberturas vegetais no Baixo Amazonas. **Acta Amazonica**, v. 38, n. 2, p.193-206, 2008.

MARSILI, A.; SERVADIO, P.; PAGLIAI, M.; VIGNOZZI, N. Changes of some physical properties of a clay soil following passage of rubber-and metal-tracked tractors. **Soil and Tillage Research**, v. 49, n. 2, p.185-199, 1998.

MESQUITA, M. G. B. F.; MORAES, S. O. A dependência entre a condutividade hidráulica saturada e atributos físicos do solo. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 34, n. 3, p. 963-969, 2004

MENDES, A. M. S.; FONTES, R. L. F.; OLIVEIRA, M. Variabilidade espacial da textura de dois solos do deserto salino, no Estado do Rio Grande do Norte. **Revista Ciência Agrônômica**, v. 39, n. 01, p. 19-27, 2008.

NEGREIROS NETO, J. V.; SANTOS, A. C.; GUARNIERI, A.; SOUZA, D. J. de A. T.; DARONCH, D. J.; DOTTO, M. A.; ARAÚJO, A. dos S. Variabilidade espacial de atributos físico-químicos de um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico em sistema plantio direto. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 35, n. 1, p. 193-204, 2014.

NETO, J. A. L.; RIBEIRO, M. R.; CORRÊA, M. M.; SOUZA JÚNIOR, S. V.; LIMA, J. F. W.F.; ABREU, F.; LIMA, R. F. Caracterização e gênese do caráter coeso em Latossolos Amarelos e Argissolos dos tabuleiros costeiros do estado de Alagoas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, n. 4, pp. 1001-1011, 2009.

NOGUEIRA, M. C. S. **Experimentação agrônômica I**. Piracicaba: Universidade de São Paulo. 463p, 2007.

PETERSEN, R. G.; CALVIN, L. D. Sampling. In: BLACK, C. A. **Methods of soil analysis: I. physical and mineralogical methods**. Madison: American Society of Agronomy; Soil Science Society of America, cap. 2, p. 33-51, 1986.

PEIXOTO, D. S. **Variabilidade espacial de parâmetros associados à curva de retenção de água do solo**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Centro de Ciências Agrárias, Ambientais e Biológicas. Cruz das Almas, BA, 2017. 45 f

RAMOS, B. Z.; PAIS, P. S. M.; FREITAS, W. A.; JUNIOR, M.de S. D. Avaliação dos atributos físico-hídricos em um Latossolo Vermelho distroférico sob diferentes sistemas de manejo-Lavras/Minas Gerais/Brasil. **Revista de Ciências Agrárias** [online], v. 36, n. 3, p. 440-446. 2013.

RIBEIRO, L. P. Gênese, evolução e degradação dos solos amarelos coesos dos tabuleiros costeiros. In: REUNIÃO TÉCNICA SOBRE SOLOS COESOS DOS TABULEIROS COSTEIROS, 1., 1996, Cruz das Almas. **Anais...** Cruz das Almas: EMBRAPA-CPATC; EMBRAPA-CNPMF; AGRUFBA; IGUFBA, 1996. p. 27-35.

RIBEIRO, L. S.; de OLIVEIRA, I. R.; DANTAS, J. S.; da SILVA, C. V.; SILVA, G. B.; AZEVEDO, J. R. Variabilidade espacial de atributos físicos de solo coeso sob sistemas de manejo convencional e de plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 51, n. 9, p. 1699-1702, set. 2016. DOI: 10.1590/S0100-204X2016000900071

ROBERTSON GP. GS+: **Geostatistics for the environmental sciences**. Versão 5.03 Beta, Plainwell: Gamma Design Software; 1998.

SCHERPINSKI, C.; URIBE-OPAZO, M. A.; VILAS BOAS, M. A.; SAMPAIO, S. C.; ADRIANI JOHANN, J. Variabilidade espacial da condutividade hidráulica e da infiltração da água no solo. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 32, n. 1, p. 7-13, 2010.

SILVA, M. R. da; SOUZA, M. S.; FILHO, P. A. Plantio direto no Recôncavo da Bahia e na Universidade Federal: a primeira impressão. Bonito – MS. In: **Anais do 14º Encontro Nacional de Plantio Direto na Palha**. Bonito – MS, 2014.

SILVA, S. A.; LIMA, J. S. S. Atributos físicos do solo e sua relação espacial com a produtividade do café Arábica. **Coffee Science**, Lavras, v. 8, n. 4, p. 395-403, 2013.

SILVA, G.J.; VALADÃO JÚNIOR, D.D.; BIANCHINI, A.; AZEVEDO, E.C.; MAIA, J.C.S. Variação de atributos físico-hídricos em Latossolo Vermelho-amarelo do cerrado Matogrossense sob diferentes formas de uso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 5, p.2135-2143, 2008.

SIQUEIRA, G. M.; VIEIRA, S. R.; DECEN, S. C. F. Variabilidade espacial da densidade e da porosidade de um Latossolo Vermelho Eutroférico sob semeadura direta por vinte anos. **Bragantia**, v. 68, n. 3, p. 751-759, 2009  
<http://dx.doi.org/10.1590/S0006-87052009000300023>

SOUZA, A. L. V. **Avaliação da qualidade de um Latossolo Amarelo coeso argissólico dos tabuleiros costeiros, sob floresta natural**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal da Bahia. Cruz das Almas, BA, 2005. 115 f.

STATSOFT, INC. **Statistica for Windows – Computer program manual**. Tulsa, 2004.

TORRES, J.L.R.; FABIAN, A.J.; PEREIRA, M.G. Alterações dos atributos físicos de um Latossolo Vermelho submetido a diferentes sistemas de manejo. **Ciência & Agrotecnologia**, v. 35, n. 3, p.437-445, 2011.

VASCONCELOS, de R. F. B.; de SOUZA, de E. R.; CANTALICE, J. R. B.; SILVA, L. S. Qualidade física de Latossolo Amarelo de tabuleiros costeiros em diferentes sistemas de manejo da cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18, n. 4, p.381–386, 2014.

VENDRUSCOLO, J.; RIBEIRO, T. S.; MESQUITA, F. O.; ALVES, A. S.; SANTOS, G. A. Propriedades físicas de um Latossolo e Argissolo comparados a quatro tipos de solos na Paraíba – Brasil. **Revista Verde**, v. 6, n. 4, p. 204-212, 2011.

VIEIRA, S. R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: NOVAIS R. F.; ALVAREZ, V., V. H.; SCHAEFER, G. R. **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v. 1, p.1-54, 2000.

WARRICK, A. W.; NIELSEN, D. R. Spatia lvariability of soil physical properties in thefield. In: HILLEL, D., ed. **Application of soil physics**. New York, Academic Press, p. 319-344, 1980.

WEBSTER, R. Statistics to support soil research and their presentation. **European Journal of Soil Science**, v. 52, n. 2, p.331-340, 2001.

WENDLING, B.; JUCKSCH, I.; MENDONÇA, E. S.; NEVES, J. C. L. Carbono orgânico e estabilidade de agregados de um Latossolo Vermelho sob diferentes manejos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 40, n. 5, p.487-494, 2005.

## **CAPÍTULO 3**

### **INFILTRAÇÃO EM FUNÇÃO DO MÉTODO DE DETERMINAÇÃO EM SISTEMAS DE USO DO SOLO<sup>3</sup>**

---

<sup>3</sup> Artigo a ser ajustado para submissão ao Comitê Editorial do periódico científico Revista Pesquisa Brasileira Agropecuária

## INFILTRAÇÃO EM FUNÇÃO DO MÉTODO DE DETERMINAÇÃO EM SISTEMAS DE USO DO SOLO

**RESUMO:** A velocidade de infiltração da água no solo é talvez, isoladamente, a propriedade que melhor reflete os atributos físicos e hídricos e a dinâmica de água no solo. Para determinar a velocidade de infiltração é preciso utilizar métodos adequados e sensíveis às mudanças ocasionadas por diferentes sistemas de uso. Este estudo teve como objetivo comparar dois infiltrômetros de anel na determinação da velocidade de infiltração de água em um Latossolo Amarelo Distrocoeso, sob quatro diferentes sistemas de usos: floresta natural (FN), área em regeneração (AR), plantio direto (PD) e convencional (PC). Os dados de velocidade de infiltração determinados em campo foram determinados por infiltrômetros de anel duplo (IAD) e simples (IAS). Em cada sistema foi delimitada uma área de 700 m<sup>2</sup>, local onde foram realizados 13 testes de infiltração, sendo três com o uso do IAD e dez com o IAS. Os resultados mostram que a velocidade de infiltração no sistema FN foi superior à determinada nos demais sistemas e os mais baixos valores observados no sistema PC, independente do infiltrômetro utilizado; os valores para velocidade de infiltração apresentaram nível de precisão experimental satisfatório, com médias consideradas homogêneas para os dois infiltrômetros avaliados, exceto no PC com o uso do IAD; a velocidade de infiltração estimada pelos IAS e IAD foram estatisticamente iguais em todos os sistemas, exceto no PC, onde o IAS foi maior e diferente do IAD; e o infiltrômetro de simples anel pode ser utilizado, em substituição ao duplo anel, para estimar a velocidade de infiltração básica nos sistemas floresta nativa, área em regeneração e plantio direto.

**Palavras-chave:** infiltrômetro de anel simples, floresta natural, área em regeneração, plantio direto e convencional

## INFILTRATION IN THE FUNCTION OF THE METHOD OF DETERMINATION IN DIFFERENT SOIL USE SYSTEMS

**ABSTRACT:** Water infiltration speed in the soil, is perhaps the only single property that best reflects the physical-hydrological attributes and the water dynamics in the soil. For the determination of the infiltration speed it is necessary to apply methods that are suitable and sensitive to the changes caused by different use systems. The goal of this study was to compare two ring infiltrometers on the infiltration speed determination in a dystrophic yellow latosol under different use systems: natural forest (NF), regeneration area (RA), no-tillage system (NT) and conventional planting (CP). The infiltration speed data were determined in the field using double-ring infiltrometer (DRI) and single-ring infiltrometer (SRI). For each system a 700 m<sup>2</sup> area was delimited, where the 13 infiltration tests were performed, three with DRI and 10 with SRI. Our results show that the infiltration speed on the NF system was higher than what was observed for the other systems and the lowest values were observed in the CP system, independent of the infiltrometer used. The infiltration speed values showed a satisfactory experimental precision, with averages considered homogeneous for the two infiltrators used, except for the PC system using the DRI. The infiltration speed estimated by the DRI and SRI were statistically similar in all systems, with an exception for the CP system, where the SRI was higher and significantly different from the DRI. The DRI can be replaced by the SRI in order to estimate the basic infiltration speed on the natural forest, regeneration area and no-tillage systems.

**Keywords** single-ring infiltrometer, natural forest, regeneration area, no-tillage and conventional planting.

## INTRODUÇÃO

A infiltração de água no solo é o termo aplicado ao processo dinâmico de entrada de água através da superfície do solo, geralmente por fluxo descendente através de toda ou parte da superfície do solo (REICHARDT, 1996; BERNARDO et al., 2008). Conhecer a dinâmica de entrada e distribuição de água no solo permitir fazer inferências sobre a produção vegetal, tornando-se fundamental para decisões sobre o uso e manejo dos solos (CALHEIROS et al., 2009).

Estudar e conhecer a velocidade de infiltração é fundamental para as ciências hidrológicas e agrícolas, uma vez que esse processo regula o estoque de água na zona das raízes, recarrega aquíferos subterrâneos, controla o escoamento superficial da água e a erosão do solo (GREEN; AHUJA; BENJAMIN, 2003; POTT; DE MARIA, 2003; CUNHA et al., 2009; ANGULO-JARAMILLO et al., 2016).

Vários estudos têm evidenciado que diferentes tipos de uso do solo provocam fortes diminuições na velocidade de infiltração e condutividade hidráulica, quando comparados a solos sob floresta (YIMER et al., 2008; PRICE et al., 2010; OKELO et al., 2015; SILVA FILHO, 2016). No Brasil, Lawall et al. (2009) ao realizarem estudos com infiltrômetros de duplo anel, sob diferentes tipos de uso e cobertura do solo, constataram que a infiltração decresceu quando comparada a solos sob usos de floresta, sendo a infiltração na floresta 2 a 15 vezes maior que em áreas agrícolas, reforçando a ideia de que a cobertura vegetal associada ao preparo influencia de maneira positiva à capacidade de infiltração do solo.

O manejo do solo modifica a superfície e afeta os atributos do solo como infiltração e condutividade hidráulica do solo saturado (PRUSKI, 2003; PINHEIRO et al., 2009; PRICE et al., 2010), densidade do solo (BATEY, 2009), volume e distribuição do espaço poroso (LIPIEC et al., 2006; OWUOR et al., 2018), teores de matéria orgânica e o tamanho e estabilidade de agregados (CELIK, 2005; REICHERT et al., 2009). Esses atributos são fundamentais e interferem na relação entre o escoamento superficial e o fluxo interno de água no solo, afetando assim sua dinâmica (PRICE et al., 2010). A velocidade de infiltração da água no solo é, isoladamente, o atributo que melhor reflete as condições físico-hídricas

gerais do solo, sua estabilidade estrutural e capacidade de movimentação da água (GONDIM et al., 2010), sendo possível utilizá-la para conhecer a eficiência do manejo utilizado nos cultivos agrícolas.

Segundo Mancuso et al. (2014), em geral o preparo convencional altera mais acentuadamente as condições físicas do solo, diminui a infiltração de água e facilitar o processo erosivo.

Em decorrência dos problemas causados pelo preparo convencional, surgiram os preparos conservacionistas, que proporcionam menor mobilização do solo e mantêm maior proteção da superfície com a fitomassa cultural residual (CÁSSARO et al., 2011). Alves e Cabeda (1999) estimaram a velocidade de infiltração em um Argissolo Vermelho escuro sob plantio direto e convencional. Os resultados mostraram que houve redução de 41% da VIB no plantio convencional, em comparação ao plantio direto. Pinheiro et al. (2009), ao estudarem a VIB com uso de infiltrômetros de duplo anel, em três diferentes solos, submetidos as práticas de manejo de cultivo mínimo, plantio direto e convencional, concluíram que os maiores valores de VIB foram proporcionados pelo cultivo mínimo e os menores em áreas de plantio direto.

Não existe consenso sobre qual o melhor método para determinar a velocidade de infiltração, assim, vários são as técnicas utilizadas para sua estimativa (POTT; DE MARIA, 2003; SILVA et al., 2017), com diferentes graus de complexidade e precisão (MAHESHWARI, 1996; REYNOLDS et al., 2002), sendo grande parte realizados *in situ*.

Embora não exista consenso sobre o melhor método para estimar a infiltração, os infiltrômetros de anéis simples (IAS) e duplos (IAD) são os equipamentos mais utilizados por serem um procedimento direto, de baixo custo de aquisição ou fabricação e simples de operar (GONDIM et al., 2010; VERBIST et al., 2010).

Os infiltrômetros de anel possuem ampla variação no diâmetro do cilindro interno e externo, que podem variar de 10 a 30 cm e de 20 a 60 cm, respectivamente (GONDIM et al., 2010; CUNHA et al., 2011; JOSÉ et al., 2013). Existem variações também na profundidade de instalação podendo variar de 4 a 15 cm e na altura da lâmina de 4 a 10 cm (GONDIM et al., 2010; CUNHA et al., 2011). Mesmo com ampla variação os infiltrômetros de duplo e simples anel têm

sido uma maneira comumente adotada para determinação da infiltração de água no solo (VERBIST et al., 2010). A vantagem do primeiro sobre o segundo é a de minimizar as infiltrações laterais, mantendo o fluxo, preferencialmente, na direção vertical. A sua desvantagem é uma operação e logística mais complicada, principalmente porque necessita de maiores volumes de água (LIMA; SILANS, 1999).

Tendo como hipótese que a infiltração de água no solo é sensível às variações ocasionadas pelos sistemas de uso do solo, que inevitavelmente modificam sua superfície e seus atributos físico-hídricos, objetivou-se com o presente estudo determinar e comparar a velocidade de infiltração básica (VIB) medida por dois diferentes infiltrômetros de anel em um Latossolo Amarelo Distrocoeso típico de Tabuleiros Costeiro da Bahia, sob quatro sistemas de uso: floresta natural, área em regeneração, plantio direto e convencional.

## MATERIAL E MÉTODOS

### Áreas de estudo

O trabalho foi desenvolvido no município de Cruz das Almas, Bahia (220 m; 12° 40' 12" S; 39° 06' 07" W), em quatro diferentes sistemas de uso (Tabela 1). Pela classificação de Köppen, o clima do município é do tipo Af (BAHIA, 1998), caracterizado como tropical chuvoso de floresta com 1 a 3 meses secos. O total anual médio de chuva é de 1.100 mm. Os meses mais chuvosos, em condições normais, são abril e maio e os mais secos, setembro e outubro. A temperatura média anual é de 24,5°C.

**Tabela 1. Histórico e localização dos sistemas de uso do Latossolo Amarelo Distrocoeso, Cruz das Almas – BA.**

Sistemas	Coordenadas Geográficas	Descrição dos sistemas de uso
Floresta Natural (FN)	12° 39' 58,944" S 39° 6' 23,769" W	Reserva de florestal natural (mata Atlântica) do município, conhecida como "Mata do Cazuzinha", considerada um fragmento de floresta estacional semidecidual (VELOSO et al., 1991), com 11,7 ha, localizada dentro do espaço urbano;
Área em Regeneração (AR)	12° 39' 29,657" S 39° 4' 55,978" W	Área de restauração florestal denominada "Talhão Memória", anteriormente utilizada como pastagem, com predomínio de <i>Urochloa</i> ssp. por mais de 30 anos, ficou por um período de 10 anos sob pousio e até 2010 foi utilizada para descarte de adubo e calcário. Em 2012 teve início um processo de restauração florestal. Para tanto, realizou-se preparo do solo com uma aração e gradagem niveladora, sem calagem ou aplicação de adubos. Foram mantidas as árvores frutíferas e introduzidas espécies florestais, tais como: <i>Paubrasilia echinata</i> Lam,

		<i>Schinus terebinthifolius</i> Raddi, <i>Licania tomentosa</i> Benth, <i>Enterolobium contortisiliquium</i> Vell, entre outras, separadas por espaçamento de 2 x 3m. No total foram plantadas 800 mudas de essências florestais nativas em 0,8 ha. Apenas nos primeiros dois anos foram feitos controle de formiga. Desde a implantação são feitos tratos culturais de coroamento e roçagem, três vezes ao ano, com manutenção dos resíduos orgânicos sobre o solo;
Sistema plantio direto (PD)	12° 39' 29,178" S 39° 4' 52,457" W	Área experimental com plantio alternado de culturas temporárias, manejada há 08 anos em sistema plantio direto na palha, anteriormente foi utilizada como pastagem, com predomínio de <i>Urochloa ssp.</i> por mais de 30 anos. Antes da implantação do plantio a área recebeu mobilizações - aração e gradagem - para incorporação de corretivos. Depois desta fase semeou-se, ao longo dos anos para produção de fitomassa e grãos a seguinte sequência de culturas: Ano I – 2009: <i>Crotalaria Juncea</i> ; Ano II – 2010: Girassol; Ano III – 2011: <i>Crotalaria Juncea</i> seguida de girassol; Ano IV – 2012: Consórcio feijão de porco com milheto, em seguida, girassol; Ano V – 2013: Consórcio de milheto com sorgo, seguida de girassol; Ano VI – 2014: Integração Girassol com Braquiária; Ano VII – 2015: Dessecação da Braquiária oriunda da integração de 2014 e integração Girassol com Braquiária; Ano VIII – 2016: Dessecação da Braquiária oriunda da integração de 2015 e em sucessão milho e <i>Crotalaria Juncea</i> . Anualmente desde 2010, após o período de verão considerado na região como pousio realizou-se o manejo da fitomassa utilizando-se processos químicos com herbicidas ou mecânicos com trituradores;
Sistema plantio convencional (PC)	12° 39' 26,006" S 39° 4' 52,529" W	Área com plantio convencional de mandioca, anteriormente utilizada como pastagem, com predomínio de <i>Urochloa ssp.</i> por mais de 30 anos e há mais de 10 anos está sendo cultivada. Inicialmente foi realizada uma calagem (em 2008), o preparo do solo é realizado anualmente, utilizando uma aração e duas gradagens, adubações com NPK de acordo com a necessidade das culturas e periodicamente realiza-se capinas com enxada. O último plantio realizado antes da coleta das amostras (julho 2016) foi feito no mês de julho de 2015.

O relevo é plano em todas as áreas e os solos foram classificados como Latossolo Amarelo Coeso, LAX (RIBEIRO et al., 1996), atualizado para Latossolo Amarelo Distrocoeso, LAdx (EMBRAPA, 2013) nas áreas do *campus* da UFRB e Latossolo Amarelo Distrocoeso, LAdx (GOMES et al., 2012), na reserva florestal. O solo é derivado do grupo Barreiras, o qual é formado por sedimentos arenoargiloso com a fração areia constituída basicamente de quartzo e a fração argila de caulinita, com baixos teores de óxidos de ferro (GOMES; ARAÚJO FILHO; CURI, 2012).

### Determinação dos atributos do solo

Em cada sistema de uso delimitou-se uma área de 35 x 20 m, totalizando 700 m<sup>2</sup>, para realização das coletas e dos testes de infiltração de água no solo. Antes dos testes de infiltração foram retiradas amostras de solos nas profundidades de 0-0,20 e 0,20-0,40 m para análises dos atributos físico-hídricos.

Em cada sistema foram coletadas 40 amostras deformadas e 200 não deformadas, em cada profundidade. As amostras não deformadas foram coletadas, por meio de pressão mecânica, introduzindo anéis de 0,05 m de diâmetro por 0,05 m de altura (tipo Uhland).

Para caracterização dos sistemas e melhor compreensão dos resultados de infiltração determinou-se os seguintes atributos: textura, pelo método da pipeta; densidade de partícula ( $D_p$ ), por meio do método do balão volumétrico; densidade do solo ( $D_S$ ), macroporosidade e microporosidade pelo método da mesa de tensão, sendo a tensão de 60 kPa adotada como referente à microporosidade; condutividade hidráulica do solo saturado, pelo método do permeâmetro de carga constante, e matéria orgânica pelo método Walkley e Black (1937), descrito em Embrapa (2011). A porosidade total do solo foi obtida pela a equação  $\{1 - (D_S/D_p \cdot 100)\}$ . As análises foram realizadas de acordo com metodologias descritas em Embrapa (2011).

### **Descrição dos infiltrômetros**

Para realização dos testes de infiltração foram utilizados dois infiltrômetros de anel, sendo um com dois anéis e outro com apenas um anel. O infiltrômetro de anel duplo (IAD) possuiu um anel externo, confeccionado em metal, com 300 x 400 mm (altura e diâmetro); um anel interno, em PVC, com 200 x 200 mm (altura e diâmetro), ambos com uma das bordas afiada (em bisel) para facilitar sua introdução no solo e evitar desestruturação no local, e um abastecedor (Figura 1a). O abastecedor foi confeccionado em PVC, com capacidade para 18,8 L de água, possui em seu lado externo uma mangueira plástica transparente sobre escala graduada de 45 cm em intervalos de 1 mm, um registro de  $\frac{1}{2}$  polegada e mangueira que se conecta à extremidade do anel interno de 200mm, com uma boia a fim de manter uma lâmina de água constante.

O infiltrômetro de anel simples (IAS) possuiu um anel em PVC, com 200 x 200 mm (altura e diâmetro), com uma das bordas também afiada (em bisel) e um abastecedor (Figura 1b). O abastecedor utilizado foi idêntico ao utilizado pelo IAD.



**Figura 1. Infiltrômetros de anéis duplo (a) e simples (b) utilizados para determinação da velocidade de infiltração da água no solo. Cruz das Almas, BA, 2017.**

### **Determinação da velocidade de infiltração básica (VIB)**

Em cada sistema de uso foram realizados treze testes de infiltração de água no solo, sendo três com uso do infiltrômetro de anel duplo (IAD), segundo metodologia descrita por Bernardo et al. (2008), e dez com uso do infiltrômetro de anel simples (IAS), nos meses de junho a agosto de 2017, seguindo o mesmo procedimento descrito por Bernardo et al. (2008).

Os anéis dos infiltrômetros foram cravados no solo a 0,04 m de profundidade, e posteriormente nivelados, a carga hidráulica interna foi de 0,04 m de altura (Figura 2).

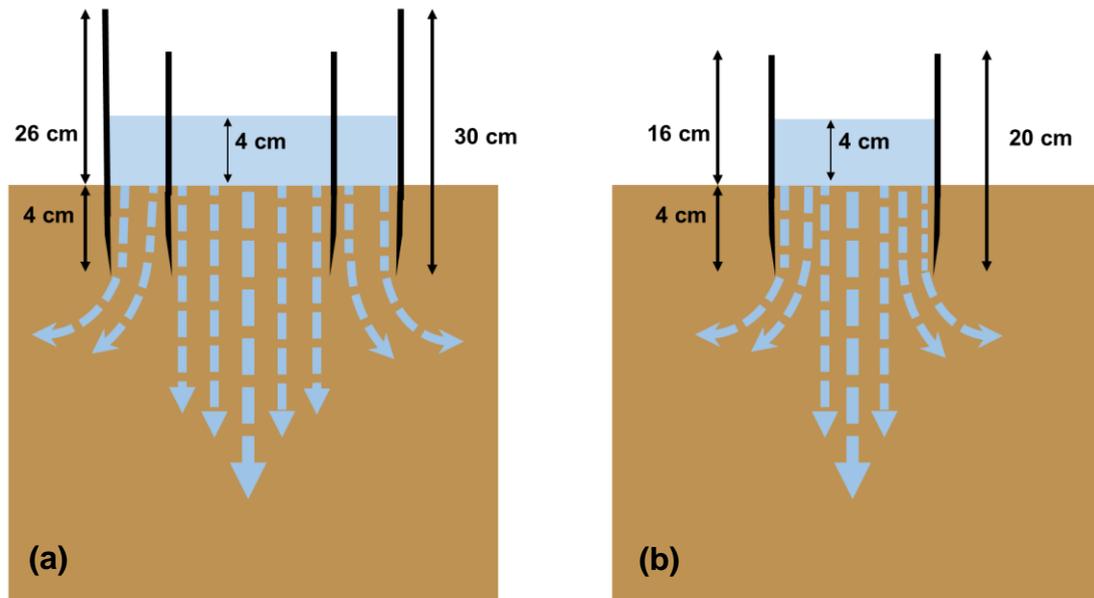


Figura 2. Desenho esquemático do comportamento das lâminas de água infiltradas em infiltrometro de anéis duplos (a) e anel simples (b), Cruz das Almas, BA, 2017.

As leituras foram realizadas nos intervalos de tempo: 0, 1, 2, 3, 5, 10, 15, 20 e 30 minutos até o tempo máximo de 360 minutos após o início do teste. As observações de infiltração acumulada com o tempo foram computadas e convertidas em taxas de infiltração correspondente, conforme equação 1:

$$i = \frac{V}{At} \quad (1)$$

onde:  $i$  a taxa de infiltração,  $V$  é o volume de água que infiltra,  $A$  é a área do anel e  $t$  o tempo, sendo a infiltração acumulada correspondente à integral de  $i$  ao longo do tempo:

$$I = \int_0^t i dt \quad (2)$$

### Análises estatísticas

Os dados de densidade do solo, matéria orgânica do solo, porosidade total, macroporosidade, microporosidade, condutividade hidráulica do solo saturado e velocidade de infiltração básica, nos diferentes sistemas de uso, foram

submetidos à estatística descritiva e avaliação de normalidade pelo teste de Shapiro e Wilk. Para análise da estatística descritiva foi utilizado o software Statistic (STATSOFT, 2004) e para avaliar as médias o teste de Tukey, ao nível de 5% de probabilidade.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### Avaliação dos atributos físico-hídricos

Estão descritos na tabela 2 os valores médios de granulometria, matéria orgânica do solo (MOS), densidades do solo (DS) e de partículas (Dp), condutividade hidráulica do solo saturado ( $K_0$ ), porosidade total (PT), macroporosidade (Ma) e microporosidade (Mi) nas profundidades de 0,0-0,20 e 0,20-0,40 m, nos quatro sistemas de uso estudados. Ao avaliar as frações inorgânicas dos solos, foram identificadas apenas duas classes texturais: franco-arenosa na profundidade de 0,0-0,20 m nos sistemas floresta natural (FN), área em regeneração (AR) e plantio direto (PD), e franco-argilo-arenosa na profundidade 0,20-0,40 m em FN, AR, PD e nas duas profundidades do plantio convencional (PC). Em função da similaridade granulométrica e de densidade de partículas entre os sistemas é possível afirmar que as frações inorgânicas do solo caracterizam o mesmo tipo de solo, ou seja, possíveis alterações serão adivindas exclusivamente do tipo de uso.

Analisando a tabela 2 observou-se que à profundidade de 0,0-0,20 m os valores médios de matéria orgânica do solo (MOS) foram de 32,1; 28,3; 38,6 e 21,9 g kg<sup>-1</sup> para os sistemas FN; AR; PD e PC, respectivamente, todos estatisticamente diferentes pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade (Tabela 2). Para Dalmago et al. (2009), os teores de matéria orgânica tem papel fundamental na melhoria das condições físico-hídricas do solo, pois influenciam na aeração, retenção e movimentação de água no solo. De acordo com os resultados desta pesquisa, verificou-se que o manejo utilizado no sistema PD foi eficiente no aumento dos teores de MOS em superfície.

De modo geral, observou-se diminuição dos valores de MOS na profundidade de 0,20-0,40 m, em todos os sistemas, com exceção do sistema AR que apresentou altos teores de MOS (30,6 g kg<sup>-1</sup>), diferindo estatisticamente dos

demais sistemas a essa profundidade. Freitas et al. (2017) também observaram redução nos teores de MOS com o aumento da profundidade.

**Tabela 2. Valores médios de areia total (AT), silte (SIL) e argila (AG), matéria orgânica do solo (MOS), densidade do solo (DS), densidade de partículas (Dp), condutividade hidráulica do solo saturado, porosidade total, macroporosidade, microporosidade (PT, Macro e Micro), em diferentes usos e manejo do solo, nas profundidades de 0,0-0,20 e 0,20-0,40 m, Cruz das Almas, BA.**

Profundidade M	Textura			MOS	Densidade		K <sub>0</sub> (mm h <sup>-1</sup> )	Porosidade		
	AT	SIL	AG		DS	Dp		PT	Macro	Micro
	g kg <sup>-1</sup>				Mg m <sup>-3</sup>			m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup>		
<b>Floresta Nativa</b>										
0,0 – 0,20	820,4	35,8	143,8	32,1 b	1,41 a	2,53	851,8 a	0,50 b	0,30 a	0,20 b
0,20 – 0,40	751,3	30,5	218,2	9,7 C	1,64 A	2,50	293,9 A	0,40 A	0,18 A	0,22 B
<b>Área em Regeneração</b>										
0,0 – 0,20	791,3	101,2	107,5	28,3 c	1,50 b	2,47	490,9 b	0,44 c	0,24 b	0,20 b
0,20 – 0,40	737,2	49,3	213,5	30,6 A	1,66 B	2,55	249,2 B	0,39 A	0,17 A	0,22 B
<b>Plantio Direto</b>										
0,0 – 0,20	820,2	53,1	126,7	38,6 a	1,41 a	2,50	453,7 b	0,60 a	0,13 c	0,47 a
0,20 – 0,40	708,1	53,4	238,5	10,8 C	1,66 B	2,48	219,1 B	0,38 B	0,14 B	0,24 A
<b>Plantio Convencional</b>										
0,0 – 0,20	772,4	50,3	177,3	21,9 d	1,64 c	2,58	295,2 c	0,33 d	0,20 b	0,13 c
0,20 – 0,40	735,3	35,6	229,1	12,7 B	1,75 C	2,45	49,6 C	0,31 C	0,11 C	0,20 C

Médias seguidas da mesma letra maiúscula (0,0-0,20 m) e minúscula (0,20-0,40 m) nas diferentes áreas, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

A densidade do solo (DS) nos diferentes sistemas e à profundidade de 0,0-0,20 m apresentou variação semelhante à MOS, com menores valores médios para FN e PD (1,41 Mg m<sup>-3</sup>) e maiores no PC (1,64 Mg m<sup>-3</sup>). Percebeu-se que o tipo de cobertura do solo não influenciou a compactação, em superfície, mas aonde houve maior revolvimento ocorreu aumento da densidade do solo (Tabela 2).

Avaliando-se a tabela 2 observou-se que os valores médios para condutividade hidráulica do solo saturado (K<sub>0</sub>), foram maiores em ordem decrescente na FN, AR, PD e PC, nas duas profundidades. Os valores de K<sub>0</sub> na FN diferiram estatisticamente dos demais sistemas de manejo, em todas as profundidades estudadas. Os sistemas AR e PD apresentaram valores intermediários, porém não diferiram pelo teste (Tukey, p<0,05); já o sistema PC

apresentou valor menor e diferente ( $p < 0,05$ ) dos demais sistemas, em ambas as profundidades.

As médias de porosidade total (PT) observadas estão situadas entre 0,33 a 0,60  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$  (0,0-0,20 m), sendo os maiores valores de PT encontrados no PD e FN, quando comparados aos outros sistemas. O PD apresentou maior porosidade total em comparação a FN, AR e PC, respectivamente. Tal fato foi influenciado por sua microporosidade (0,47  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ), maior e diferente ( $p < 0,05$ ) em comparação aos demais sistemas. Contrariamente, no sistema PD os valores de macroporosidade foram os menores dentre todos os sistemas estudados, sendo os maiores valores médios observados no sistema FN (0,30  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ). É provável que a microporosidade no sistema PD tenha sido influenciada pelos altos teores de matéria orgânica, superior estatisticamente aos demais sistemas.

Em todos os sistemas ocorreu redução da PT e aumento da DS em profundidade. No que se refere a macroporosidade os valores ficaram acima de 0,10  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ , em todos os sistemas, não comprometendo o rápido fluxo de ar e água no solo (CULLEY et al., 1987; CUNHA et al., 2011).

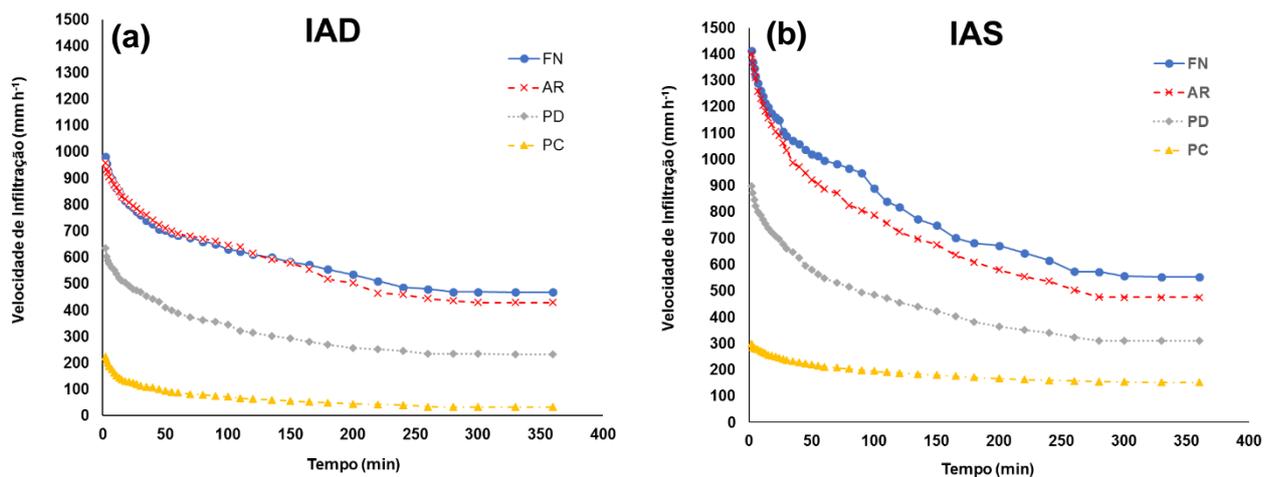
### **Avaliação da velocidade de infiltração básica**

A figura 3 apresenta graficamente as velocidades de infiltração de água no solo ao longo do tempo, estimadas pelos infiltrômetros de anel duplo (IAD) (Figura 3a) e anel simples (IAS) (Figura 3b), assim como sua magnitude nos diferentes sistemas. As curvas caracterizam as forças matriciais e gravitacionais nos diferentes sistemas e como o efeito de cada força varia ao longo do tempo. É possível observar que no início do processo de infiltração a velocidade é muito rápida, nessa fase as forças matriciais são predominantes às forças gravitacionais, que são praticamente desprezíveis, quando comparadas às forças matriciais, mas à medida que a infiltração continua e após longo período de tempo, a situação se inverte, de modo que as forças matriciais podem ser desprezadas diante da magnitude das forças gravitacionais (REICHARDT, 1996). Pela figura 3 observa-se que durante os testes os resultados se tornaram progressivamente constantes, tendendo para a velocidade de infiltração básica (VIB), ou regime de fluxo estacionário, conforme relatado por Reichardt (1996).

De acordo com a figura 3a os valores iniciais obtidos pelo IAD foram menores, quando comparado aos valores iniciais do IAS (Figura 3b), em todos os sistemas estudados. Nos sistemas de uso com FN (981,9 mm h<sup>-1</sup>) e AR (957,6 mm h<sup>-1</sup>) os valores iniciais do IAD foram próximos entre si e muito superiores aos sistemas de PD (634,9 mm h<sup>-1</sup>) e PC (222,1 mm h<sup>-1</sup>), sendo a FN e AR, 35,3 e 33,7% maior que o PD, e 77,3 e 76,7% maior que o PC, respectivamente. Pela figura 3b observa-se mesma tendência para os valores médios iniciais do IAS, contudo, houve um aumento na diferença percentual. Os sistemas FN (1.413,6mm h<sup>-1</sup>) e AR (1.399,7mm h<sup>-1</sup>), apresentaram valores 36,5 e 35,5% maior que no sistema PD, e 89,2 e 89,1% maior que no sistema PC, respectivamente.

Estudo realizado por Yimer et al. (2008), na Etiópia, detectou uma redução de 70% na velocidade de infiltração em solos cultivados por 15 anos, quando comparado à mesma classe de solo sob floresta nativa. Okelo et al. (2015) também relataram redução de 42% na velocidade de infiltração em áreas agrícolas, quando comparadas a áreas de floresta. Esses resultados estão em concordância com diversos autores que também evidenciaram redução na velocidade de infiltração em solos cultivados quando comparados aos solos sob florestas, independente das práticas de manejo e tipo de solo (NYAMADZAWO et al., 2008; OSUJI et al., 2010; AKINTOYE et al., 2012).

A redução da velocidade de infiltração dos solos sob cultivos agrícolas, em comparação aos solos sob floresta, pode ser atribuída à compactação e à degradação estrutural do solo próximo da superfície (NYAMADZAWO et al., 2008; OKELO et al., 2015). Essa degradação provoca perda dos macroporos e descontinuidade do espaço poroso entre a superfície e a subsuperfície, nas áreas cultivadas (OWUOR et al., 2018), conforme constatado pelos atributos físico-hídricos avaliados nesse estudo.



**Figura 3. Velocidade de infiltração da água no solo estimada por infiltrômetros de anel duplo (IAD) e simples (IAS) em Latossolo Amarelo distrocoeso sob floresta natural (FN), área em regeneração (AR), plantio direto (PD) e plantio convencional (PC).**

As velocidades de infiltração final, ou VIB, foram superiores no IAS em todos os sistemas, mas evidenciou mesma tendência do IAD, ou seja, os infiltrômetros apresentaram comportamentos idênticos nos diferentes sistemas, salvo a diferença de magnitude hídrica.

A análise da tabela 3 permite verificar a dimensão das diferenças entre os valores de VIB obtidos pelos IAD e IAS nos diferentes sistemas. Considerando o IAD como método padrão verifica-se que o IAS superestimou em 7,5; 9,9; 25,1 e 74,2% para FN; AR; PD e PC, respectivamente o método padrão (IAD). Desse modo, é possível afirmar que quanto mais movimentado foi o solo, maior sua diferença entre os infiltrômetros estudados (Figura 3). Se considerada a média de infiltração em todos sistemas, o IAS obteve VIB 18,9% maior que o IAD. Simões et al. (2005) também observaram valores maiores para infiltrômetros de anel simples, em Latossolo, quando comparados ao duplo anel. Os autores afirmaram que essa tendência evidencia o fluxo lateral durante a realização do estudo, sendo maior no IAS em função da ausência do anel externo, que promove carga hidráulica complementar e reduz o fluxo lateral do anel central, onde são realizadas as leituras de velocidade de infiltração da água no solo.

Em função do IAD ser comumente utilizado para determinação da VIB, o seu desempenho pode ser facilmente comparado, condição que não acontece para o IAS. Por exemplo, o valor médio de infiltração obtido por este infiltrômetro no sistema FN (467,4 mm h<sup>-1</sup>) foi maior que 326,5 mm h<sup>-1</sup>, encontrado por Silva

Filho (2016) quando estudou a VIB da floresta natural sobre Latossolo Amarelo no estado de Roraima. Já o valor médio da infiltração na AR ( $428,7 \text{ mm h}^{-1}$ ), foi menor que  $1.067 \text{ mm h}^{-1}$ , encontrado por Lorenzon et al. (2015) quando determinaram a VIB em área de mata atlântica em regeneração (estágio inicial), localizado no município de Viçosa. De acordo com Marcatto e Silveira (2015), em área de floresta a VIB pode atingir valores muito altos tais como  $2.100 \text{ mm h}^{-1}$ . Os resultados irão variar em função, principalmente, da variedade de espécies florestais, tipos de sistemas radiculares e presença de macrofauna próximo a superfície. Mesmo assim, as florestas frequentemente têm sido usadas como parâmetro de comparação, devido à maior conservação dos atributos físico-hídricos dos solos.

Nos sistemas PD e PC, verifica-se que os valores médios da velocidade de infiltração básica obtidos com o uso do IAD foram de  $231,9$  e  $38,7 \text{ mm h}^{-1}$ , respectivamente. Souza e Alves (2003) encontraram valores de VIB semelhantes para o PD ( $228 \text{ mm h}^{-1}$ ); no entanto, obtiveram VIB superior aos encontrados no PC ( $221 \text{ mm h}^{-1}$ ), quando estudaram Latossolo Vermelho-Escuro álico, no município de Selvíria, MS. Entretanto, os resultados obtidos nesse estudo estão de acordo com Silva et al. (2014), que afirmam: o manejo inadequados causam compactação, redução da condutividade hidráulica do solo e, conseqüentemente, provocam alteração na infiltração e redistribuição de água no solo.

Os valores de velocidade de infiltração altos no PD podem ser explicados pela excelente drenagem que é característica dos Latossolos, somado ao tipo de manejo, que reduz o revolvimento, aumenta a quantidade de matéria orgânica e a porosidade total da área, exercendo grande influência sobre a dinâmica da água no solo, conforme constatado pelos dados obtidos nesse estudo (Tabela 2). Almeida et al. (2016) concluíram que o plantio direto é um eficiente manejo para a conservação do solo. Nele, a matéria orgânica adicionada melhora as condições físicas do solo e a dinâmica da água.

No plantio convencional a velocidade de infiltração básica refletiu as características dos atributos físico-hídricos observados nas duas profundidades do sistema PC (Tabela 2). Silva et al. (2014) afirmam não haver dúvidas que a condição do solo é proporcionada pelo seu manejo, sendo este promotor de alterações estruturais, que inevitavelmente influenciam a infiltração da água. Para

Panachuki et al. (2011) a velocidade de infiltração de água é um reflexo dos atributos físico-hídricos e pode ser considerada como melhor parâmetro para avaliar a qualidade estrutural do solo.

O comportamento da VIB nos diferentes sistemas tem razoável explicação, devido ao solo de floresta apresentar menor movimentação, melhor estruturação e poros maiores o que melhora a dinâmica de ar e água quando comparado a sistemas que sofreram ou sofrem com atividades antrópicas (MAZURANA et al., 2011; PANACHUKI et al., 2011; BONO et al., 2012). Os valores de VIB encontrados nesse trabalho apresentam coerência com os resultados dos atributos físico-hídricos de DS,  $K_0$  e PT, ou seja, onde a VIB foi maior (FN) observou-se menor valor de DS e maiores valores para  $K_0$  e PT; onde foi menor (PC) evidenciou-se maiores valores de DS e menores valores de  $K_0$  e PT (Tabela 2).

Para Beutler et al. (2001) é possível dimensionar os dados de permeabilidade do solo à água. Os autores propõem classificação quanto a velocidade de infiltração. De acordo com essa classificação os valores de permeabilidade encontrados pelo IAD podem ser classificados como: rápida ( $>254 \text{ mm h}^{-1}$ ) na FN e AR; moderada a rápida ( $127 - 254 \text{ mm h}^{-1}$ ) no PD e lenta a moderada ( $20 - 63,5 \text{ mm h}^{-1}$ ) no PC. Os valores obtidos pelo IAS podem ser classificados como: rápida na FN, AR e PD, e moderada a rápida no PC (Tabela 3). Considerando a classificação proposta por Beutler os dois infiltrômetros tiveram mesmo desempenho nos sistemas FN e AR. Todavia, nos sistemas PD e PC os valores do IAD e IAS apresentam diferentes desempenhos, sendo sempre de maior permeabilidade com o uso do IAS. Tal situação implica, talvez, na necessidade do estabelecimento de um fator de correção para aproximar os valores quantificados pelo IAS daqueles obtidos pelo método padrão IAD.

Ainda segundo a classificação de Beutler et al. (2001) observa-se que independente do infiltrômetro utilizado, os valores máximos e mínimos observados nos sistemas FN e AR são classificados como de rápida permeabilidade. No sistema PD os valores máximos são agrupados como de rápida e os mínimos moderada a rápida permeabilidade, também independente do infiltrômetro adotado para sua estimativa. A diferença entre infiltrômetros, no que se refere a valores máximos e mínimos só se expressaram no sistema PC.

Essas observações sugerem que os valores das infiltrações iniciais (máxima) e finais (mínima) encontradas nos sistemas, possuem magnitudes similares entre o IAD e IAS, exceto no sistema PC que expressou diferenças entre infiltrações iniciais e finais para os infiltrômetros estudados (Tabela 3).

Pela tabela 3 é possível observar que as medidas de posição (média e mediana) para VIBs determinadas por IAD são próximas apenas na área de plantio direto (PD), no IAS à aproximação entre a média e mediana ocorre apenas na área de plantio convencional (PC), o que indicaria distribuição normal.

Dado a variabilidade espacial natural dos solos e a natureza do processo de infiltração, os coeficientes de variação obtidos pela análise estatística para velocidade de infiltração, podem ser caracterizados com bom nível de precisão experimental, com exceção do CV encontrado para VIB no sistema PC com a utilização do IAD (Tabela 3).

Nogueira (2007) propõe avaliação da precisão dos valores médios considerando o coeficiente de variação (CV). Para o autor  $CV < 35\%$  indica série de dados homogênea, o que possibilita utilizar a média como valor representativo do conjunto de dados;  $CV$  entre  $35\%$  e  $65\%$  indica que a série de dados é heterogênea, tendo a média pouco significado para expressar o fenômeno; e se o  $CV$  for  $> 65\%$  a série é muito heterogênea, ou seja, a média não tem significado algum para representar o conjunto de dados. De acordo com essa classificação, todas as médias de infiltração obtidas pelos infiltrômetros são homogêneas, com exceção da obtida pelo IAD no PC, que é considerada pouco representativa para o conjunto de dados de infiltração obtidos nesse estudo (Tabela 3).

Por fim, verifica-se (Tabela 3) pelo teste de Shapiro-Wilk (W) a 5% de probabilidade, que houve normalidade dos dados nos quatro sistemas estudados, considerando os dois infiltrômetros utilizados, sendo assim, é possível a aplicação de qualquer teste de média para avaliar seu desempenho.

**Tabela 3. Estatística descritiva para valores de velocidade de infiltração básica (VIB) determinada por infiltrômetros de anel simples (IAS) e duplo anéis (IAD) em sistemas de floresta nativa (FN), área em regeneração (AR), plantio direto (PD) e plantio convencional (PC).**

Estatística descritiva	SISTEMAS DE USO							
	FN		AR		PD		PC	
	IAD	IAS	IAD	IAS	IAD	IAS	IAD	IAS
<b>Nº</b>	3	10	3	10	3	10	3	10
<b>Média (mm h<sup>-1</sup>)</b>	467,4	505,6	428,7	474,8	231,9	309,5	38,7	150,2
<b>Mediana (mm h<sup>-1</sup>)</b>	410,3	457,6	402,7	491,9	234,7	302,0	24,2	152,0
<b>Mínimo (mm h<sup>-1</sup>)</b>	404,2	302,6	333,7	320,3	202,7	202,6	21,7	102,3
<b>Máximo (mm h<sup>-1</sup>)</b>	590,1	756,7	552,1	594,5	263,6	422,7	53,5	214,0
<b>Amplitude (mm h<sup>-1</sup>)</b>	185,9	457,1	218,4	274,2	62,9	220,1	31,8	111,7
<b>Desvio padrão</b>	10,6	15,1	11,2	9,7	3,0	6,6	1,8	3,9
<b>C.V. (%)</b>	22,6	29,8	26,0	20,3	13,1	21,1	53,4	25,2
<b>Teste S-W (p&gt;0,05)</b>	0,056	0,194	0,590	0,529	0,945	0,472	0,137	0,471

S-W – Sapiro Wilk a 5% de probabilidade

Pela análise estatística dos dados experimentais, verificou-se diferença tanto para os infiltrômetros, quanto para os sistemas, ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey. Entre sistemas observou-se que os valores de FN e AR, foram estatisticamente iguais entre si e superiores às médias no PD e PC. O sistema PC também foi estatisticamente diferente dos demais e obteve menor valor médio entre os sistemas estudados (Tabela 4).

Pelos resultados da tabela 4 é possível afirmar que os infiltrômetros foram estatisticamente iguais em todos os sistemas, exceto no PC, onde o IAS apresentou diferença do IAD ( $p < 0,05$ ), cujo valor médio da VIB foi muito superior.

Em um estudo clássico sobre o uso de infiltrômetros de único anel, Tricker (1978) concluiu que as medidas de campo feitas por infiltrômetro de anel simples sempre irá exceder a capacidade de infiltração verdadeira (apenas vertical), mas se o anel utilizado tiver mais de 15 cm de diâmetro será possível obter resultados com boa precisão. Esse fato foi comprovado por esse estudo, que não identificou diferença estatística entre o IAS e o IAD, sendo possível utilizar ambos para determinar a infiltração de água sob as condições avaliadas. No entanto, Saikia e Das (2016), após levantamento sobre o uso dos dois infiltrômetros, afirmaram que o infiltrômetro de duplo anel tem melhor adequação à maioria dos solos. Tais

circunstâncias deixam claro que é preciso realizar um maior número de avaliações para chegar a um consenso sobre as limitações do anel simples.

**Tabela 4. Valores médios de velocidade de infiltração básica (VIB) por infiltrômetros de anéis duplo (IAD) e simples (IAS) em sistemas de floresta nativa (FN), área em regeneração (AR), plantio direto (PD) e plantio convencional (PC), Cruz das Almas, BA.**

Método de determinação	SISTEMAS DE USO DO SOLO			
	FN	AR	PD	PC
	mm h <sup>-1</sup>			
IAD	467,4 Aa	428,7 Aa	231,9 Ba	38,7 Cb
IAS	505,6 Aa	474,8 Aa	309,5 Ba	150,2 Ca

Médias seguidas da mesma letra maiúscula na mesma linha (desdobramento por sistema de uso), e minúscula na mesma coluna (desdobramento por modelo de infiltrômetro), não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Conforme relatado por Romeiro et al. (2014), a velocidade de infiltração de água nesse estudo foi reflexo dos atributos físico-hídricos dos diferentes sistemas, fato comprovado pelo teste de média. A diferença de magnitude nas VIBs determinadas pelo IAS, muito provavelmente influenciada pelo aumento do fluxo lateral, não foi suficiente para diferenciar os infiltrômetros na maioria dos sistemas estudados.

A cobertura mais homogênea do solo nos sistemas FN e AR, associada a maior quantidade de macroporos nessas áreas, proporcionaram condições mais favoráveis à infiltração da água no solo, sobretudo pela quantidade de cobertura existente na superfície do solo (SILVA et al., 2014). No sistema onde houve aumento de densidade do solo e, conseqüentemente, redução da macroporosidade (Tabela 2), foi observada sensível redução da VIB, como verificado no PC. Os resultados apresentados diferem dos encontrados por Cunha et al. (2015) que, após avaliar a VIB em Latossolo sob diferentes sistemas de manejo do solo, concluíram que o plantio direto foi estatisticamente semelhante ao preparo convencional.

O sistema PC que vem sendo utilizado há dez anos na área experimental, reflete o que ocorre em várias outras áreas de produção com sistema convencional. Demonstra que o uso de grades agrava o aspecto relativo ao volume de macroporos, compactando de 0,20 a 0,40 m de profundidade,

conforme relatado por Alves Sobrinho et al. (2003) o que somado à limitação da coesão, pode reduzir drasticamente a disponibilidade hídrica para as plantas. Os valores de condutividade hidráulica do solo saturado nas duas profundidades do PC, refletem a dinâmica de infiltração de água e as limitações de redistribuição de água no sistema, independentemente do tipo de infiltrômetro utilizado (Tabela 2).

## CONCLUSÕES

A intensidade do uso no plantio convencional alterou os atributos físico-hídricos e reduziu a velocidade de infiltração da água no solo em comparação a floresta natural.

Os valores para velocidade de infiltração apresentaram nível satisfatório de precisão experimental, com médias homogêneas para os dois infiltrômetros avaliados, exceto no PC com o uso do infiltrômetro de anel duplo.

As velocidades de infiltração estimadas pelos infiltrômetros de duplo e simples anel foram estatisticamente iguais em todos os sistemas, exceto no PC, onde o infiltrômetro de anel simples foi maior e diferente do infiltrômetro de anel duplo.

O infiltrômetro de simples anel pode ser utilizado, em substituição ao infiltrômetro de anel duplo, para estimar a velocidade de infiltração básica nos sistemas de menor intensidade de uso a exemplo de floresta nativa, área em regeneração e plantio direto.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, M. C.; CABEDA, M. S. V. Influência da água em um Podzólico Vermelho-escuro sob dois métodos de preparo, usando chuva simulada com duas intensidades. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa. v. 23, n. 4, p. 735 – 761, 1999.

ALVES SOBRINHO, T.; VITORINO, A. C. T.; SOUZA, L. C. F. de; GONÇALVES, M. C.; CARVALHO, D. F. de. Infiltração de água no solo em sistemas de plantio direto e convencional. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 7, n. 2, p.191-196, 2003.

ALMEIDA, D. M.; ANTUNES, R. M.; BARROS, W. S.; OLIVEIRA, J. A. G.; OLIVEIRA, T. O. P. Conceitos e atribuições do sistema de plantio direto e sua viabilidade nos agroecossistemas. **Revista Conexão Eletrônica**, v. 13, n. 1, p. 1–11, 2016.

ANGULO-JARAMILLO, R.; BAGARELLO, V.; IOVINO, M.; LASSABATERE, L., **Infiltration Measurements for Soil Hydraulic Characterization**. Springer International Publishing, AG Switzerland, p. 386, 2016.

AKINTOYE, O.A.; UKATA, S.U.; ESOMONYE, H.I. The effects of landuse on the infiltration capacity of coastal plain soils of calabar–Nigeria. **International Journal of Applied Science and Technology**, v. 2, n. 2, p. 80–84, 2012.

BAHIA. Superintendência de Estudos Econômicos e Sociais da Bahia. **Atributos climáticos do Estado da Bahia**. Salvador, 1998. 85 p. (Série Estudos e Pesquisas, 38).

BATEY, T. Soil compaction and soil management – a review. **Soil Use Manage**, v. 25, n. 4, p. 335–345, 2009.

BERNARDO, S.; SOARES, A. A.; MANTOVANI, E. C. **Manual de irrigação**. 8. ed. Viçosa: UFV, 2008. 625 p.

BEUTLER, A. N.; SILVA, M. L. N.; CURI, N.; FERREIRA, M. M.; CRUZ, J. C.; PEREIRA FILHO, I. A. Resistência à penetração e permeabilidade de Latossolo Vermelho distrófico típico sob sistemas de manejo na região dos cerrados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25, n. 1, p. 167-177, 2001.

BONO, J. A. M.; MACEDO, M. C. M.; TORMENA, C. A.; NANNI, M. R.; GOMES, E. P.; MÜLLER, M. M. L. Infiltração de água no solo em um Latossolo Vermelho da região sudoeste dos Cerrados com diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 36, n. 6, p.1845-1853, 2012.

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

CÁSSARO, F. A. M., BORKOWSKI, A. K.; PIRES, L. F.; ROSA, J. A.; SAAB, S. C. Characterization of a Brazilian clayey soil submitted to conventional and no-tillage management practices using pore size distribution analysis. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 111, n. 2, p. 175-179, 2011.

CELIK, I. Land-use effects on organic matter and physical properties of soil in a southern Mediterranean highland of Turkey. **Soil & Tillage Research**, v. 83, n. 2, p. 270–277, 2005. <http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2004.08.001>.

CULLEY, J. L. B.; LARSON, W. E.; RANDALL, G. W. Physical properties of a typic Haplaquoll under conventional and no-tillage. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 51, n. 1, p. 1587-1593, 1987.

CUNHA, J.L.X.L; SILVA, C.A.; COELHO, M.E.H.; FONTES, L.O.; SILVA, M.G.O.; SILVA, I.N. Velocidade de infiltração da água em um Latossolo Amarelo submetido ao sistema de cultivo mínimo. **ACSA - Agropecuária Científica no Semi-Árido**, v.7, n. 1, p. 30 – 35, 2011.

CUNHA, J. L. X. L.; ALBUQUERQUE, A. W.; SILVA, C. A.; ARAÚJO, E. de; JUNIOR, R. B. dos S. Taxa de infiltração da água em um Latossolo Amarelo submetido ao sistema de manejo plantio direto. **Caatinga**, v. 22, n. 1, p.199-205, 2009.

CUNHA, J. L. X. L.; COELHO, M. E. H.; ALBUQUERQUE, A. W.; SILVA, C. A, SILVA, A. B.; CARVALHO, I. D. E. Water infiltration rate in Yellow Latosol under different soil management systems. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 19, n. 11, p. 1021–1027, 2015.

DALMAGO, G. A.; BERGAMASCHI, H.; BERGONCI, J. I.; KRUGER, C. A. M.; COMIRAN, F.; HECKLER, B. M. M. Retenção e disponibilidade de água às plantas, em solo sob plantio direto e preparo convencional. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande**, v. 13 (suplemento), p. 855–864, 2009.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUARIA - EMBRAPA. Serviço de Produção de Informação – SPI. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 4.ed. Rio de Janeiro, 2013. 306p.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Rio de Janeiro, RJ). **Manual de métodos de análise de solo**. 2ª Ed. Revisada. Rio de Janeiro: 2011. 225p.

FREITAS, L. de; OLIVEIRA, I. A. de; SILVA, L. S. S.; FRARE, J. C. V.; FILLA, V. A.; GOMES, R. P. Indicadores da qualidade química e física do solo sob diferentes sistemas de manejo. *Revista Unimar Ciências*, v.26, n 1-2, p.147-165, 2017.

GOMES, JBV; ARAUJO FILHO, JC; CURI, N. Solos de tabuleiros costeiros sob florestas naturais e sob cultivo. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 32, n. 71, p. 233-246, 2012.

GONDIM, T. M. S.; WANDERLEY, J. A. C.; SOUZA, J. M.; FEITOSA FILHO, J. C.; SOUSA, J. S.; Infiltração e velocidade de infiltração de água pelo método do infiltrômetro de anel em solo areno-argiloso. **Revista Brasileira de Gestão Ambiental**, (Pombal – PB – Brasil) v. 4, n. 1, p. 64-73, janeiro/dezembro de 2010.

GREEN, T.R., AHUJA, L.R., BENJAMIN, J.G. Advances and challenges in predicting agricultural management effects on soil hydraulic properties. **Geoderma**, v. 116, n. 1–2, p. 3–27, 2003.

JOSÉ, J. V.; REZENDE, R.; MARQUES, P. A A; FREITAS, P.S.L. de; ALVES, D.S. Determinação da velocidade de infiltração básica de água em dois solos do noroeste do estado do Paraná. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, v. 6, n. 1, p. 155-170, 2013.

LAWALL, S.; SANTOS, A. C. F.; MOTA, P. O.; FERNANDES, N. F. Modificações da dinâmica hidrológica do solo em resposta as mudanças de uso e cobertura:

Um estudo de caso na região serrana do Rio de Janeiro. **Anais...** 12º Encontro de Geógrafos da América Latina, Montevideo, Uruguai, p. 7467-7477, 2009.

LIPIEC, J.; KÚS, J.; SLOWINSKA-JURKIEWICZ, A.; NOSALEWICZ, A. Soil porosity and water infiltration as influenced by tillage methods. **Soil & Tillage Research**, v. 89, n. 2, p.210-220, 2006.

LIMA, C. A. G.; SILANS, A. P. de. Variabilidade espacial da infiltração de água no solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 34, n. 12, p. 2311-2320, 1999.

LORENZON, A. S.; DIAS, H. C. T.; TONELLO, K, C. Escoamento superficial da água da chuva em um fragmento florestal de mata atlântica, Viçosa-MG. **Revista Brasileira de Agropecuária Sustentável (RBAS)**, v. 5, n.1, p. 50-58, 2015.

MANCUSO, M. A.; FLORES, B. A.; ROSA, G. M. SCHROEDER, J. K.; PRETTO, P. R. P. Características da taxa de infiltração e densidade do solo em distintos tipos de cobertura de solo em zona urbana. **Revista Monografias Ambientais**, Santa Maria, v. 14, n.1, Edição Especial p. 2890–2998, 2014.

MAHESHWARI, B.L. Development of an automated double-ring infiltrometers. **Australian Journal of Soil Research**, v. 34, n. 1, p. 709–714, 1996.

MARCATTO, F. S.; SIVEIRA, H. Avaliação físico-hídrica do Latossolo Vermelho textura argilosa: subsídios a gestão dos recursos hídricos na bacia hidrográfica do Pirapó-PR. **Revista do Programa de Pós-Graduação em Geografia Maringá**, v. 7, n. 1, p. 117-138, 2015.

MAZURANA, M.; LEVIEN, R.; MULLER, J.; CONTE, O. Sistemas de preparo de solo: alterações na estrutura do solo e rendimento das culturas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, n. 4, p. p.1197-1206 2011.

NYAMADZAWO, G., NYAMUGAFATA, P., CHIKOWO, R., GILLER, K. Residual effects of fallows on selected soil hydraulic properties in a kaolinitic soil subjected to conventional tillage (CT) and no tillage (NT). **Agroforestry Systems**, v. 72, n. 3, p. 161–168, 2008. <http://dx.doi.org/10.1007/s10457-007-9057-6>.

NOGUEIRA, M. C. S. **Experimentação agrônômica I**. Piracicaba: Universidade de São Paulo, 2007. 463p

OKELO, M.O., ONYANDO, J.O., SHIVOGA, W.A., MILLER, S.N. Assessment of infiltration using a mini rainfall simulator in the river njoro watershed. Proceedings of Taal 2007. **Soil & Tillage Research**, v. 172, n. 7, p. 777-786, 2015.

OSUJI, G.E., OKON, M.A., CHUKWUMA, M.C., NWARIE, I.I. Infiltration characteristics of soils under selected land use practices in Owerri, Southeastern Nigeria. **World Journal Agriculture Science**, v. 6, n. 3, p. 322–326, 2010.

OWUOR, S.O.; BUTTERBACH-BAHL, K.; GUZHA, A.C.; JACOBS, S.; MERBOLD, L.; RUFINO, M.C.; PELSTER, D.E.; DÍAZ-PINÉS, E.; BREUER, L. Conversion of natural forest results in a significant degradation of soil hydraulic properties in the highlands of Kenya. **Soil & Tillage Research**, v. 176, n. 9, p. 36–44, 2018.

PANACHUKI, E.; BERTOL, I.; ALVES SOBRINHO, T.; OLIVEIRA, P. T. S.; RODRIGUES, D. B. B. Perdas de solo e de água e infiltração de água em Latossolo Vermelho sob sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, n. 5, p. 1777-1785, 2011.

PINHEIRO, A.; TEIXEIRA, L. P.; KAUFMANN, V. Capacidade de infiltração de água em solos sob diferentes usos e práticas de manejo agrícola. *Ambi-Água, An Interdisciplinary Journal of Applied Science*, v. 4, n. 2, p. 188-199, 2009.

POTT, C. A.; DE MARIA, I. C. Comparação de métodos de campo para determinação da velocidade de infiltração básica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, n. 1, p. 19-27, 2003.

PRICE, K.; JACKSON, C. R.; PARKER, A. J. Variation of surficial soil hydraulic properties across land uses in the southern Blue Ridge Mountains, North Carolina, **Journal of Hydrology**, USA, v. 383, n. 3–4, p. 256-268, 2010.

PRUSKI, F.F. **Infiltração da água no solo**. Viçosa: Editora UFV, 2003.

REICHARDT, K. Infiltração da água no solo. In: **Dinâmica da matéria e da energia em ecossistemas**. 2 ed. Piracicaba, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, p. 317-352, 1996.

REICHERT, J. M.; SUZUKI, L.; REINERT, D. J.; HORN, R.; HAKANSSON, I. Reference bulk density and critical degree-of-compactness for no-till crop production in subtropical highly weathered soils. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 102, n. 2, p. 242- 254, 2009.

REYNOLDS, W.D., ELRICK, D.E., YOUNGS, E.G., AMOOZEGAR, A.; BOOLTINK, H.W.G. Saturated and field-saturated water flow parameters. In: *Methods of soil analysis, part 4-physical methods* (eds J.H. Dane & G.C. Topp), p. 797–878. **Soil Science Society of America Inc.**, Madison, WI, USA, 2002.

RIBEIRO, L. P. Gênese, evolução e degradação dos solos amarelos coesos dos tabuleiros costeiros. In: REUNIÃO TÉCNICA SOBRE SOLOS COESOS DOS TABULEIROS COSTEIROS, 1., 1996, Cruz das Almas. **Anais...** Cruz das Almas: EMBRAPA-CPATC; EMBRAPA-CNPMPF; AGRUFBA; IGUFBA, 1996. p. 27-35.

ROMEIRO, E. R.; BONINI, C. S. B.; BONINI, A. Infiltração de água no solo sob diferentes usos e manejo. **X Fórum Ambiental da Alta Paulista**, v. 10, n. 7, p. 39-49, 2014.

SAIKIA, M. D.; DAS, G. A Review on Modelling on Infiltration in Different Areas with Different Types of Soils. **International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)**, v. 3, n. 11, p. 601-615, 2016.

SILVA, N. F.; CUNHA, F. N.; CABRAL FILHO, F. R.; MORAIS, W. A.; CUNHA, E. S.; ROQUE, R. C.; ALVES, D. K. M.; TEIXEIRA, M. B. Métodos para estimativa da infiltração de água em um Latossolo sob plantio direto e convencional. **Global Science and Technology**, Rio Verde, v. 10, n. 1, p.169 – 176, jan/abr. 2017.

SILVA, N. F.; CUNHA, F. N.; OLIVEIRA, R. C.; CABRAL FILHO, F. R.; TEIXEIRA, M. B.; CARVALHO, J. J. Características físico-hídricas de um Latossolo sob diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v. 8, n. 5, p. 375 - 390, 2014.

SILVA FILHO, E. P. da. Velocidade de infiltração em área pastagem degradada e floresta natural no município de Porto Velho (RO). **Revista franco-brasileira de geografia-Confins**, n. 29, 2016. Acesso em <<https://confins.revues.org/11635>> 07 de julho 2017. DOI : 10.4000/confins.11635.

SIMOES, W. L.; FIGUEIREDO, V. B.; SILVA, E. L. da. Uso do cilindro infiltrômetro único em diferentes solos. **Engenharia Agrícola**, v. 25, n. 2, p. 359-366, 2005.

SOUZA, Z. M.; ALVES, M. C. Movimento de água e resistência à penetração em um Latossolo Vermelho distrófico de cerrado, sob diferentes usos e manejos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 7, n. 1, p. 18-23, 2003.

STATSOFT, INC. **Statistica for Windows – Computer program manual**. Tulsa, 2004.

TRICKER, A. S. The infiltration cylinder: some comments on its use. **Journal of Hydrology**, v. 36, n. 3–4, p. 383-39, 1978.

VELOSO, H. P.; RANGEL FILHO, A. L. R.; LIMA, J. C. A. **Classificação da Vegetação Brasileira, adaptada a um sistema universal**. IBGE, Rio de Janeiro. 1991. 112 pp.

VERBIST, K., S. TORFS, W.M. CORNELIS, R. OYARZÚN, G. SOTO, AND D. GABRIELS. Comparison of single-ring and double-ring inltrometer methods on stony soils. **Vadose Zone Jornal**, v. 8, n. 4, p.462–475, 2010.

YIMER, F., MESSING, I., LEDIN, S., ABDELKADIR, A. Effects of different land use types on infiltration capacity in a catchment in the highlands of Ethiopia. **Soil Use Manage**. v. 24, n. 4, 344–349, 2008. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1475-2743.2008.00182.x>

## **CAPÍTULO 4**

### **MODELOS MATEMÁTICOS PARA ESTIMATIVA DA INFILTRAÇÃO DA ÁGUA EM LATOSSOLO AMARELO TÍPICO SOB DIFEENTES USOS<sup>4</sup>**

---

4 Artigo a ser ajustado para submissão ao Comitê Editorial do periódico científico Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental – Agriambi

## MODELOS MATEMÁTICOS PARA ESTIMATIVA DA INFILTRAÇÃO DA ÁGUA EM LATOSSOLO AMARELO TÍPICO SOB DIFEENTES USOS

**RESUMO:** Os diferentes sistemas de uso do solo influenciam a velocidade de infiltração e afetam os coeficientes dos modelos empíricos utilizados para estimar velocidade de infiltração. Este estudo teve por objetivos determinar a velocidade de infiltração da água no solo em campo e estimar os parâmetros de modelos de infiltração em diferentes sistemas de uso do solo. Os modelos empíricos de infiltração de Horton, Kostiakov e Kostiakov-Lewis foram utilizados para avaliar a previsibilidade da infiltração de água em um Latossolo Amarelo Distrocoeso, sob quatro diferentes usos: floresta natural (FN), área em regeneração (AR), plantio direto (PD) e convencional (PC). Os dados de velocidade de infiltração determinados em campo e utilizados para estimar os modelos foram baseados em infiltrômetros de anel duplo (IAD) e simples (IAS). Em cada sistema de uso do solo foi delimitada uma área de 700 m<sup>2</sup>, local onde foram realizados 13 testes de infiltração, sendo 03 com o uso do IAD e 10 com o IAS. Os resultados mostram que a velocidade de infiltração estimada pelos modelos superestimou os valores de VIB medidos em todos os sistemas; a maior diferença entre a VIB estimada e os dados obtidos em campo foi encontrada pelo modelo de Kostiakov-Lewis; e a equação de Horton foi a que melhor se adequou aos dados originais de infiltração de água em todos os sistemas de uso, apresentando os melhores parâmetros estatísticos, como: coeficiente de determinação ( $R^2$ ), raiz do erro quadrático médio (RMSE), coeficientes de massa residual (CMR), ajuste (CA) e eficiência (Ef), quando comparados aos demais modelos.

**Palavras-chave:** infiltrômetro de anel, sistemas de uso, modelos de infiltração, Kostiakov, Kostiakov-Lewis, Horton

## MATHEMATICAL MODELS FOR THE ESTIMATION OF WATER INFILTRATION IN A TYPICAL YELLOW LATOSOL UNDER DIFFERENT USE SYSTEMS

**ABSTRACT:** The different systems of soil use can influence the speed of infiltration and affect the empirical model coefficients used for estimating the infiltration speed. Our goal was to determine the water infiltration speed in the soil in the field and to estimate the infiltration models parameters in different use systems. The empirical infiltration models from Horton, Kostiakov, and Kostiakov-Lewis were used in order to assess the predictability of water infiltration in a dystrophic yellow latosol under four different use systems: natural forest (NF), regeneration area (RA), no-tillage system (NT) and conventional planting (CP). The infiltration speed data determined in the field and used for estimating the models were based on double-ring infiltrometers (DRI) and single-ring infiltrometers (SRI). For each of the soil use systems a 700 m<sup>2</sup> area was delimited where the 13 infiltration tests were performed, three with DRI and 10 with SRI. Our results showed that the infiltration speed estimated by the models overestimated the values of Basic Infiltration Speed (BIS) measured in all systems. The highest difference between the BIS estimated and the data set assessed in the field was detected by the Kostiakov-Lewis model. The Horton equation was the best-fitted to the original data of water infiltration in all use systems, showing the best statistical parameters in comparison to the other models. These parameters were: coefficient of determination ( $R^2$ ), root mean square error (RMSE), residual mass coefficient (RMC), adjustment (CA) and efficiency (Ef).

**Keywords:** infiltrometer ring, use systems, infiltration models, Kostiakov, Kostiakov-Lewis, Horton

## INTRODUÇÃO

A infiltração de água no solo pode ser determinada em campo ou estimada por modelos matemáticos (OKU; AIYELARI, 2011). Como as medidas em campo são muitas vezes demoradas e difíceis, em decorrência das dificuldades operacionais e variabilidade inerente ao processo de infiltração de água no solo, os modelos preditivos de infiltração oferecem uma alternativa à sua determinação (URCHEI; FIETZ, 2002).

De maneira geral, os modelos permitem avaliar a infiltração a partir de um pequeno número de parâmetros, que são basicamente os coeficientes dos modelos. Esses coeficientes são funções dos parâmetros estruturais, que, por sua vez, são funções do manejo, práticas e uso do solo (SHUKLA et al., 2003).

Para estimar a infiltração de água no solo são utilizados três tipos de modelos: teóricos ou físicos, semi-empíricos ou analíticos e empíricos. Os modelos teóricos usam parâmetros que podem ser obtidos a partir de propriedades da água no solo e não requerem dados de infiltração medidos. A avaliação dos modelos analíticos é puramente matemática ou gráfica, pois seu processo de avaliação envolve o uso da capacidade de infiltração estacionária. Já os modelos empíricos tendem a considerar as condições da superfície e perfil do solo, mas são restritos para as condições em que foram avaliados, uma vez que seus parâmetros são determinados com base em dados reais de infiltração medidos em campo (KHALEEL, 1982; HILLEL, 1998; SKAGGS). A confiança nas previsões desse modelo precisa ser demonstrada por meio de uma verificação adequada em campo, com concordância entre os valores medidos e os previstos pelo modelo de simulação (OGBE et al., 2011).

Os modelos empíricos apresentam vantagem, pois permitem relacionar seus parâmetros às características do solo, algo difícil de ser considerado nos modelos teóricos, como por exemplo a heterogeneidade do solo (FIORIN, 2008). Entre tantos modelos utilizados, os mais comuns são o de Horton, Kostiakov e Kostiakov modificado ou Kostiakov-Lewis (BRANDÃO et al., 2006).

As equações empíricas, como as de Kostiakov e Horton, são menos restritivas em relação ao modo de aplicação da água porque são baseadas em pressupostos relativos às condições do solo (HILLEL, 1998). Essas equações

podem potencialmente fornecer previsões mais precisas, desde que sejam usadas em condições semelhantes às que foram desenvolvidas. Isso ocorre porque seus parâmetros iniciais são determinados com base em dados reais de infiltração medidos em campo (SKAGGS; KHALEEL, 1982, RAWLS et al., 1993).

Para o modelo de Horton a capacidade de infiltração inicial ( $I_0$ ), diminuiu com o tempo até chegar a uma taxa mínima constante ( $I_f$ ). O modelo atribuiu esta diminuição na infiltração principalmente a fatores que operam na superfície do solo (FIORIN, 2008). Esse modelo tem sido amplamente utilizado, porque geralmente, fornece um bom ajuste aos dados. Embora a equação de Horton seja empírica em que  $\beta$ ,  $I_0$  e  $I_f$  devem ser calculados a partir de dados experimentais, em vez de medidos no laboratório, a mesma reflete bem as leis e as equações básicas da física do solo (PINHEIRO et al., 2009).

O modelo de Kostiakov também é amplamente utilizado por sua simplicidade, facilidade de determinação das suas constantes, a partir de dados de infiltração medidos, e ajuste razoável aos dados de infiltração a muitos solos em períodos curtos (CLEMMENS, 1983). A principal limitação deste modelo é para períodos longos de avaliação, pois neste caso, a velocidade de infiltração tende a zero, à medida que o tempo de infiltração se torna muito grande. Entretanto, na realidade, sabe-se que a velocidade de infiltração tende a um valor constante correspondente à velocidade de infiltração básica, diferente de zero (HAVERKAMP et al., 1987; NAETH; CHANASYK; BAILEY, 1991). Para resolver este problema, desenvolveu-se o modelo de Kostiakov-Lewis, no qual foi adicionada uma constante à equação de Kostiakov, assim a taxa de infiltração final tende a um determinado valor quando o solo se torna saturado após infiltração prolongada. As equações de Kostiakov e Kostiakov-Lewis tendem a ser os modelos preferidos para avaliar a infiltração em projetos de irrigação, provavelmente porque são menos restritivos quanto ao modo de aplicação da água do que alguns outros modelos (BRANDÃO et al., 2006).

Diversos autores realizaram estudos para comparar a precisão dos modelos às taxas de infiltração observadas em campo (HAVERKAMP et al., 1987; MISHRA et al., 2003; LILI et al., 2008; OGBE et al., 2011; SIHAG, et al., 2017). Outros observaram que a capacidade preditiva dos modelos varia de acordo com as práticas de manejo e uso do solo (ALVES SOBRINHO et al., 2003; SHUKLA et

al., 2003; CUNHA et al., 2009; SILVA et al., 2017), uma vez que estas interferem diretamente em atributos ligados a transmissão de água no solo.

A literatura relata que, sob condições específicas, um modelo em particular mostra melhores previsões do que outros. Por exemplo: Návar e Synnott (2000) avaliaram a velocidade de infiltração da água do solo sob quatro usos, no nordeste do México, e verificaram que entre os modelos de infiltração de Horton, Philip, Kostiakov-Lewis e Green-Ampt, o que apresentou melhor ajuste foi o modelo de Kostiakov-Lewis. Alves Sobrinho et al. (2003) observaram que a infiltração foi melhor descrita pelo modelo de Horton para áreas com plantio direto e convencional. Cunha et al. (2009), ao avaliarem o ajuste dos modelos de Kostiakov, Kostiakov-Lewis e Horton verificaram que apenas o modelo de Kostiakov descreveu bem a infiltração nas áreas de plantio direto do estado de Alagoas.

A hipótese deste estudo foi que um modelo capaz de prever corretamente a infiltração real de água no solo, se adequará aos dados originais do solo mesmo que sob diferentes sistemas de uso. Deste modo, objetivou-se avaliar o desempenho dos modelos empíricos de Horton, Kostiakov e Kostiakov-Lewis para estimar a infiltração de água em um Latossolo Amarelo típico sob quatro diferentes sistemas de uso: floresta nativa, área em regeneração, plantio direto e convencional.

## MATERIAL E MÉTODOS

### Áreas de estudo

O trabalho foi desenvolvido no município de Cruz das Almas, Bahia (220 m; 12° 40' 12" S; 39° 06' 07" W). Na classificação de Köppen, o clima é do tipo Af (BAHIA, 1998), caracterizado como tropical chuvoso de floresta com 1 a 3 meses secos. O total anual médio de chuva é de 1.100 mm. Os meses mais chuvosos, em condições normais, são abril e maio e os mais secos, setembro e outubro. A temperatura média anual é de 24,5°C.

Quatro áreas foram selecionadas para o estudo, sendo a primeira uma reserva de floresta natural do município, conhecida como "Mata do Cazuzinha" (39° 6' 23, 769" W e 12° 39' 58,944" S), considerada um fragmento da Mata

Atlântica com 11,7 ha, localizada dentro do espaço urbano, e três outras áreas dentro do *campus* da Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, na Fazenda Experimental.

A segunda área experimental com plantio convencional de mandioca (39° 4' 52,529" W e 12° 39' 26,006" S), anteriormente utilizada como pastagem, com predomínio de *Urochloa ssp.* por mais de 30 anos e há mais de 10 anos está sendo cultivada. Foi realizada uma calagem em 2008, o preparo do solo é realizado anualmente, utilizando uma aração e duas gradagens, adubações com NPK de acordo com a necessidade da cultura e periodicamente realiza-se capinas com enxada.

A terceira área foi de restauração florestal denominada "Talhão Memória" (39° 4' 55,978" W e 12° 39' 29,657" S), anteriormente utilizada como pastagem, com predomínio de *Urochloa ssp.* por mais de 30 anos, ficou por um período de 10 anos sob pousio e até 2010 foi utilizada para descarte de adubo e calcário. Em 2012 teve início um processo de restauração florestal. Para tanto, realizou-se preparo do solo com uma aração e gradagem niveladora, sem calagem ou aplicação de adubos. Foram mantidas as árvores frutíferas e introduzidas espécies florestais, tais como: *Paubrasilia echinata* Lam, *Schinus terebinthifolius* Raddi, *Licania tomentosa* Benth, *Enterolobium contortisiliquium* Vell, entre outras, separadas por espaçamento de 2 x 3 m. No total foram plantadas 800 mudas de essências florestais nativas em 0,8 ha. Apenas nos primeiros dois anos foram feitos o controle de formigas. Desde a implantação são feitos tratamentos culturais de coroamento e roçagem, três vezes ao ano, com manutenção da fitomassa residual sobre o solo.

A quarta área experimental foi composta por plantio alternado de culturas temporárias (39° 4' 55,978" W e 12° 39' 29,657" S), manejada há 08 anos em sistema plantio direto. Anteriormente foi utilizada como pastagem, com predomínio de *Urochloa ssp.* por mais de 30 anos. Antes da implantação do plantio direto a área recebeu mobilizações - aração e gradagem - para incorporação de corretivos. Depois desta fase semeou-se, ao longo dos anos, para produção de fitomassa e grãos a seguinte sequência de culturas: Ano I – 2009: *Crotalaria juncea*; Ano II – 2010: Girassol; Ano III – 2011: *Crotalaria juncea* seguida de girassol; Ano IV – 2012: consórcio feijão de porco com milho, em

seguida, girassol; Ano V – 2013: consórcio de milho com sorgo seguido de girassol; Ano VI – 2014: integração girassol com braquiária; Ano VII – 2015: dessecação da braquiária oriunda da integração de 2014 e integração girassol com braquiária; Ano VIII – 2016: dessecação da braquiária oriunda da integração de 2015 e sucessão milho e *Crotalaria juncea*. Anualmente desde 2010, após o período de verão considerado na região como pousio, realizou-se o manejo da fitomassa utilizando-se processos químicos com herbicidas ou mecânicos com trituradores.

O relevo é plano em todas as áreas e os solos foram classificados como Latossolo Amarelo Coeso, LAx (RIBEIRO et al., 1996), atualizado para Latossolo Amarelo Distrocoeso, LAdx (EMBRAPA, 2013) nas áreas do *campus* da UFRB e Latossolo Amarelo Distrocoeso, LAdx (GOMES; ARAÚJO FILHO; CURI, 2012), na reserva florestal.

### **Descrição dos infiltrômetros**

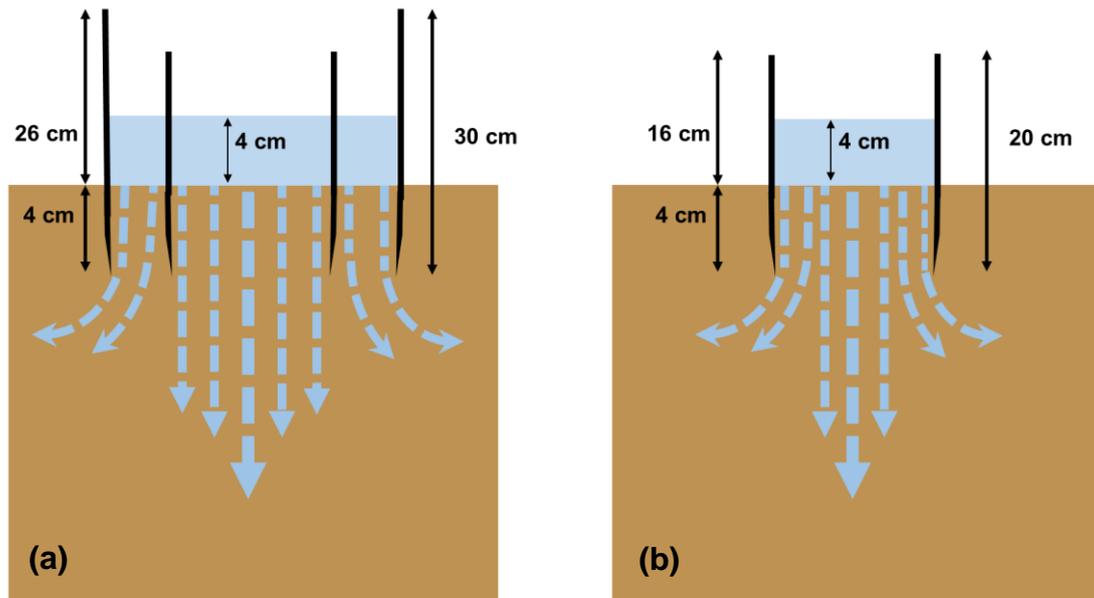
Para realização dos testes de infiltração foram utilizados dois infiltrômetros de anel, sendo um com dois anéis e outro com apenas um anel. O infiltrômetro de anel duplo (IAD) possuiu um anel externo, confeccionado em metal, com 300 x 400 mm (altura e diâmetro); um anel interno, em PVC, com 200 x 200 mm (altura e diâmetro), ambos possuem uma das bordas afiada (em bisel) para facilitar sua introdução no solo e evitar desestruturação no local e um abastecedor (Figura 1a). O abastecedor foi confeccionado em PVC, com capacidade para 18,8 L de água, possui em seu lado externo uma mangueira plástica transparente sobre escala graduada de 45 cm em intervalos de 1 mm, um registro de ½ polegada e mangueira que se conecta à extremidade do anel interno de 200 mm, este último possui uma boia a fim de manter uma lâmina de água constante. O infiltrômetro de anel simples (IAS) possuiu mesma descrição do IAD, excetuando o anel externo em metal.

### **Determinação da Velocidade de Infiltração Básica (VIB)**

Em cada sistema de uso do solo delimitou-se uma área de 700 m<sup>2</sup>, para realização dos testes de infiltração de água no solo. Foram realizados treze testes de infiltração de água no solo, aleatoriamente, sendo três com uso do infiltrômetro

de anéis duplos (IAD), segundo metodologia descrita por Bernardo et al. (2008), e dez com uso do anel simples (IAS), nos meses de junho a agosto de 2017, seguindo o mesmo procedimento descrito por Bernardo et al. (2008).

Os anéis do infiltrômetro foram cravados no solo a 0,04 m de profundidade, e posteriormente nivelados, a carga hidráulica interna foi mantida em 0,04 m de altura durante toda avaliação (Figura 1).



**Figura 1. Desenho esquemático do comportamento das lâminas de água infiltradas em infiltrômetro de anéis duplos (a); e anel simples (b). Cruz das Almas, BA, 2017.**

As leituras foram realizadas nos intervalos de tempo 0, 1, 2, 3, 5, 10, 15, 20 e 30 minutos até o tempo máximo de 360 minutos após o início do teste. As observações de infiltração acumulada com o tempo foram computadas e convertidas em taxas de infiltração correspondente, conforme equação 1:

$$i = \frac{V}{At} \quad (1)$$

onde:  $i$  a taxa de infiltração,  $V$  é o volume de água que infiltra,  $A$  é a área do anel e  $t$  o tempo, sendo a infiltração acumulada correspondente à integral de  $i$  ao longo do tempo:

$$I = \int_0^t i dt \quad (2)$$

A velocidade de infiltração de água no solo foi ajustada pelos modelos empíricos de Kostiakov (1932), Horton (1940) e Kostiakov-Lewis (1945).

A equação empírica é baseada na infiltração do modelo Kostiakov desenvolvida em 1932, assim representada:

$$I = kT^a \quad (3)$$

onde:  $I$  é lâmina infiltrada no tempo  $T$ ,  $k$  e  $a$  são parâmetros do modelo e dependem do tipo de solo. Derivando a equação 3, obtém-se a equação 4.

$$VI = kaT^{a-1} \quad (4)$$

onde:  $VI$  é a taxa de infiltração da água no solo. Os coeficientes  $k$  e  $a$  foram determinados por regressão linear entre os valores de infiltração acumulada de água e tempo acumulado.

O modelo de Kostiakov-Lewis ou Kostiakov modificado foi desenvolvido para eliminar a deficiência da taxa de infiltração de tender a zero quando o tempo tende a infinito, que pode ser assim representada (HILLEL, 1998):

$$I = kt^a + i_f t \quad (5)$$

onde:  $I$  é a infiltração;  $k$  é a taxa de infiltração no início da infiltração;  $a$  é um parâmetro relacionado com a forma da curva da taxa de infiltração;  $t$  é o tempo tendendo para o infinito; e  $i_f$  é o equilíbrio (a taxa da infiltração final constante). Derivando a equação 5, obtém-se:

$$VI = kat^{a-1} + i_f \quad (6)$$

A velocidade de infiltração segundo o modelo de Horton (1940) é expressa pela equação abaixo:

$$VI = i_f + (i_0 - i_f)e^{-\beta t} \quad (7)$$

onde:  $Vl$  é a velocidade de infiltração da água no solo,  $i_f$  é o valor constante correspondente a taxa de infiltração estável,  $i_0$  é a taxa de infiltração inicial,  $\beta$  é a constante de decaimento e  $t$  é o tempo, em minutos. Os parâmetros  $i_0$ ,  $i_f$  e  $\beta$  foram estimados minimizando a soma dos quadrados dos resíduos em relação aos valores observados em campo.

### Análises estatísticas

Os dados estimados pelos modelos foram submetidos à estatística descritiva pelo Statistica (STATSOFT, 2004), usando para avaliar as médias utilizou-se o teste de Tukey, ao nível de 5% de probabilidade.

Parâmetros relativos à precisão como os coeficientes de determinação ( $R^2$ ) e exatidão como o índice de Willmott (" $d$ ") (equação 8), também foram observados.

$$d = 1 - \left[ \frac{\sum (E_i - O_i)^2}{\sum (|E_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \right] \quad (8)$$

onde:  $E_i$  – valor estimado;  $O$  – valor observado; e  $\bar{O}$  – média dos valores observados. O índice " $d$ " é descrito em Willmott et al. (1985) e seus valores variam entre zero (nenhuma concordância) e 1 (concordância perfeita).

Para avaliar os métodos e modelos na descrição do fenômeno de infiltração foram determinados os indicadores estatísticos de: raiz do erro quadrático médio (RMSE em inglês), coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (Ef), amplamente utilizado para avaliação de eficácia de ajuste em modelos hidrológicos (NASH; SUTTCLIFFE, 1970), coeficiente de massa residual (CMR) e coeficiente de ajuste (CA), conforme Loague e Green (1991) e Xevi et al. (1996), descritos nas equações abaixo.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - E_i)^2} \quad (9)$$

$$Ef = \frac{[\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{E})^2 - \sum_{i=1}^n (O_i - E_i)^2]}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{E})^2} \quad (10)$$

$$CMR = \frac{(\sum_{i=1}^n O_i - \sum_{i=1}^n E_i)}{\sum_{i=1}^n (O_i)} \quad (11)$$

$$CA = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2}{\sum_{i=1}^n (E_i - \bar{O})^2} \quad (12)$$

onde:  $E_i$  e  $O_i$  representam, respectivamente os valores observados e estimados,  $n$  o número de observações,  $\bar{E}$  e  $\bar{O}$  a média aritmética dos valores estimados e observados, respectivamente.

O RMSE mostra o erro obtido na estimativa de  $O_i$  e seus valores são sempre maiores ou iguais a zero, sendo zero o valor ótimo, CMR representa a média de tendência do modelo em superestimar ou subestimar os valores observados. Valores positivos indicam tendência à superestimação pelo modelo. Na situação ideal, em que os valores estimados pelo método são exatamente iguais aos observados, os índices seriam:  $CMR = 0$  e  $CA = Ef = 1$ .

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

As figuras 2 e 3 descrevem as curvas de infiltração de água no solo obtidas pelos IAD e IAS, respectivamente, nos diferentes sistemas.

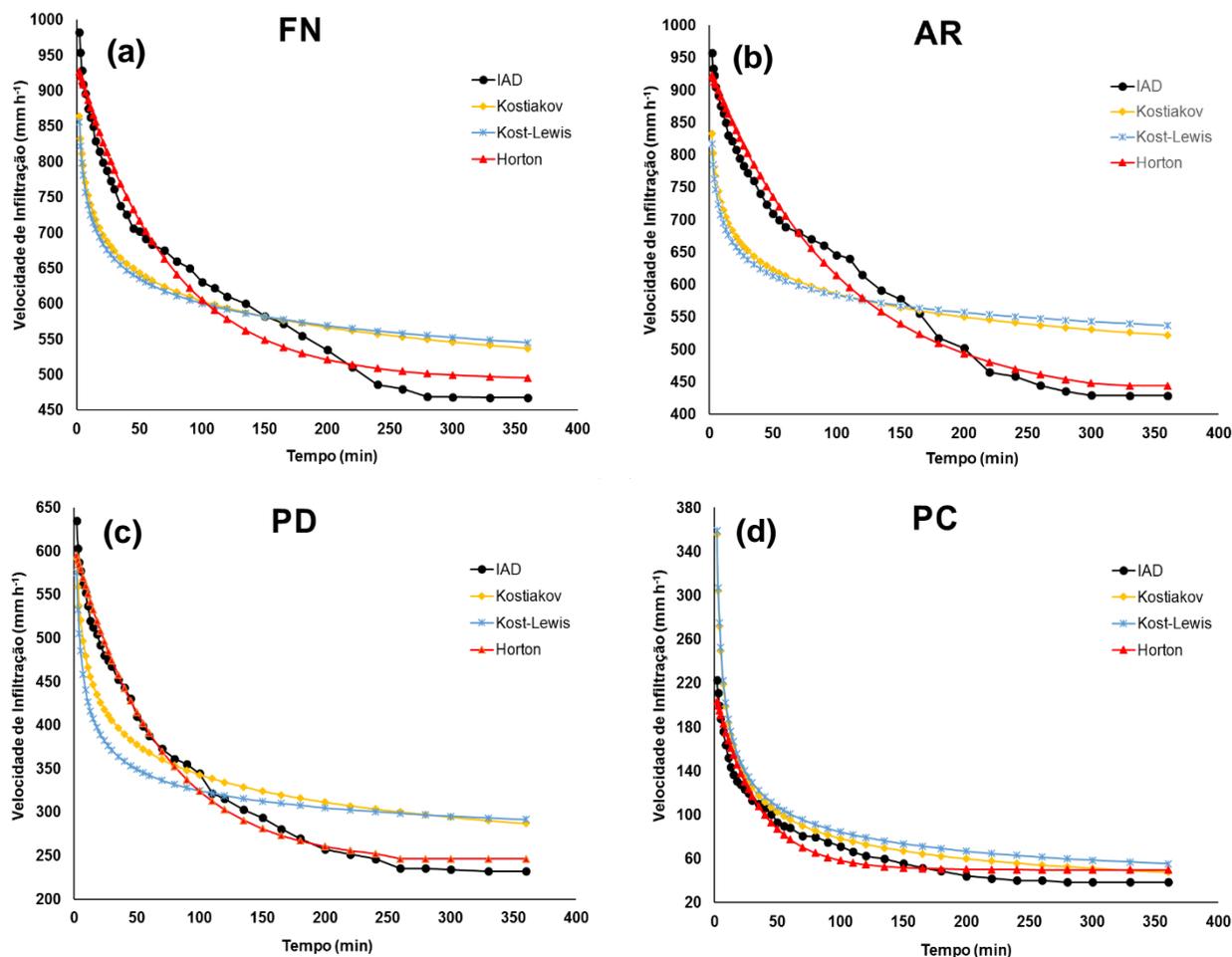
As curvas de velocidade de infiltração estimadas pelos modelos e os dados médios observados nas determinações de campo para IAD, estão apresentados na figura 2. Ao avaliar o sistema FN observa-se que os valores iniciais das equações de Kostiakov ( $864,2 \text{ mm h}^{-1}$ ) e Kostiakov-Lewis ( $855,7 \text{ mm h}^{-1}$ ) subestimam o valor inicial do IAD ( $981,9 \text{ mm h}^{-1}$ ). A partir dos 150 minutos iniciais da aplicação de água, os valores simulados passam a superestimar os valores reais e ao final do teste os modelos Kostiakov e Kostiakov-Lewis apresentam diferenças de  $69,4$  e  $77,6 \text{ mm h}^{-1}$ , respectivamente, em comparação a VIB obtida com o IAD (Figura 2a). Os valores iniciais para os modelos de Kostiakov ( $832,8 \text{ mm h}^{-1}$ ) e Kostiakov-Lewis ( $817,3 \text{ mm h}^{-1}$ ) no sistema AR possuem mesma tendência, subestimando o valor inicial do IAD ( $957,6 \text{ mm h}^{-1}$ ) até 150 minutos,

depois superestimam. Ao final, apresentaram diferenças entre a VIB do IAD, sendo de 93,2 e 108,2 mm h<sup>-1</sup> respectivamente (Figura 2b). Resultado similar foi encontrado por Oku e Aiyelari (2011) quando avaliaram o ajuste do modelo de Kostiakov à infiltração obtida por infiltrômetro de duplo anéis em floresta na Nigéria.

No PD as equações de Kostiakov (591,1 mm h<sup>-1</sup>) e Kostiakov-Lewis (575,4 mm h<sup>-1</sup>) apresentaram valores iniciais que subestimam o valor inicial do IAD (634,9 mm h<sup>-1</sup>) até os 100 e 110 minutos, respectivamente, posteriormente passando a superestimar até a VIB, que difere do IAD em 54,8 e 59,4 mm h<sup>-1</sup> para Kostiakov e Kostiakov-Lewis, respectivamente (Figura 2c). Por fim, no PC, a Figura 2d demonstra que os ajustes feitos pelos modelos de Kostiakov e Kostiakov-Lewis superestimam os valores observados em todo teste, e ao final expressam diferenças entre a VIB determinada pelo infiltrômetro e as ajustadas por Kostiakov (15,1 mm h<sup>-1</sup>) e Kostiakov-Lewis (16,7 mm h<sup>-1</sup>). Silva et al. (2017) encontraram resultados semelhantes ao avaliarem a VIB dos modelos de Kostiakov e Kostiakov-Lewis, identificando valores superestimados em um Latossolo Vermelho Distroférico sob plantio direto e convencional.

Analisando-se os resultados é possível afirmar que o valor médio inicial do IAD foi superior aos ajustados pelos modelos de Kostiakov e Kostiakov-Lewis em todos os sistemas, exceto no PC onde o valor inicial do IAD foi inferior aos dos modelos. Mesmo assim, em todos os sistemas a VIB obtida pelos modelos de Kostiakov e Kostiakov-Lewis superestimaram as encontradas pelo infiltrômetro de duplo anel, sendo as menores diferenças observadas no PC.

De acordo com Brandão et al. (2006), os modelos de Kostiakov e Kostiakov-Lewis são eminentemente empíricos, ou seja, limitados à situação em que existe disponibilidade de dados de infiltração observados para determinação dos seus parâmetros  $k$  e  $a$  da equação, pois os mesmos não possuem significado físico próprio. Nesse estudo os parâmetros  $k$  e  $a$  promoveram variações de VIB semelhantes, ou seja, superestimaram os valores reais em todos os sistemas, mesmo no PC, que expressou comportamento inicial diferentes dos demais sistemas.



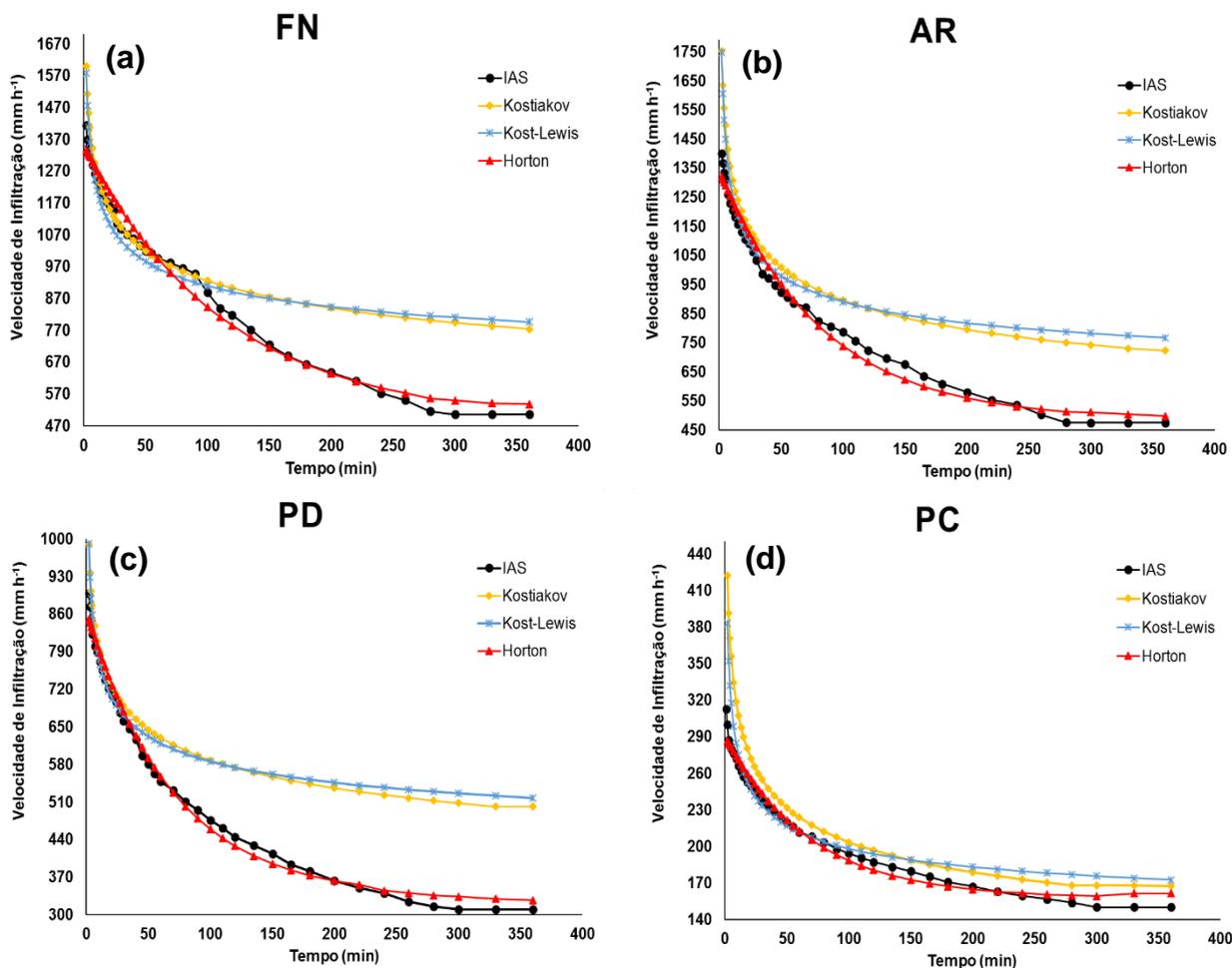
**Figura 2. Velocidade de infiltração de água no solo determinada por infiltrômetro de anel duplo (IAD) e estimada pelos modelos de Kostiakov, Kostiakov-Lewis e Horton em Latossolo Amarelo Distrocoeso sob floresta natural (FN), área em regeneração (AR), plantio direto (PD) e plantio convencional (PC).**

Ao comparar os três modelos testados para ajustar os dados obtidos pelo IAD, observou-se que o modelo de Horton apresentou melhor ajuste aos dados originais. Os valores de infiltração inicial foram sempre menores que os obtidos pelo IAD (Figura 1) e sua VIB maior, igual os demais modelos. Porém, houve menor diferença em comparação a determinada em campo pelo IAD, sendo em ordem decrescente: FN ( $27,6 \text{ mm h}^{-1}$ ), AR ( $15,3 \text{ mm h}^{-1}$ ), PD ( $14,1 \text{ mm h}^{-1}$ ) e PC ( $11,3 \text{ mm h}^{-1}$ ). Esses resultados estão em concordância com os obtidos por Alves Sobrinho et al. (2003) em estudos de avaliação da infiltração de água em Latossolo Vermelho distroférico sob plantio direto e convencional. Os autores evidenciaram a melhor adequação do modelo de Horton, com relação ao de Kostiakov-Lewis nos dois sistemas estudados.

A figura 3 apresenta a curva de infiltração da água no solo obtida com uso do IAS, nos diferentes sistemas e seus ajustes aos modelos de Kostiakov, Kostiakov-Lewis e Horton. No sistema FN, os valores iniciais das equações de Kostiakov ( $1.599,7 \text{ mm h}^{-1}$ ) e Kostiakov-Lewis ( $1.577,0 \text{ mm h}^{-1}$ ) superestimaram o valor médio do IAS ( $1.413,6 \text{ mm h}^{-1}$ ) até os 21 e 17 minutos, respectivamente, quando passa a subestimar. Aos 100 minutos os valores simulados pelas duas equações superestimaram os valores reais até a VIB (Figura 3a). As diferenças entre a VIB obtida pelo IAS e as obtidas pelos modelos de Kostiakov e Kostiakov-Lewis, foram de  $220,8$  e  $243,1 \text{ mm h}^{-1}$ , respectivamente. No sistema AR os valores iniciais simulados pelos modelos de Kostiakov ( $1.752,4 \text{ mm h}^{-1}$ ) e Kostiakov-Lewis ( $1.747,4$ ), superestimaram o valor inicial do IAS ( $1.399,7 \text{ mm h}^{-1}$ ) do início ao fim do teste (Figura 3b), e as diferenças entre VIBs foram  $248,4$  e  $292,6 \text{ mm h}^{-1}$ , respectivamente. A diferença entre a VIB estimada pelos modelos no sistema AR foi a maior entre todos os sistemas estudados, independente do infiltrômetro utilizado (Figuras 2 e 3).

No PD os valores iniciais das equações de Kostiakov ( $990,7 \text{ mm h}^{-1}$ ) e Kostiakov-Lewis ( $989,7 \text{ mm h}^{-1}$ ) também superestimaram o valor observado do IAS ( $898,3 \text{ mm h}^{-1}$ ). Entre 11 a 27 minutos os valores ajustados são muito próximos aos observados e depois superestimaram até o final do teste com as diferenças das VIBs entre os modelos de  $191,8$  e  $208,1 \text{ mm h}^{-1}$ , respectivamente. No PC o valor inicial do IAS ( $299,8 \text{ mm h}^{-1}$ ) também foi menor que os ajustados pelos modelos de Kostiakov ( $421,9 \text{ mm h}^{-1}$ ) e Kostiakov-Lewis ( $382,7 \text{ mm h}^{-1}$ ), com comportamento semelhante ao observado nos demais sistemas. Nesse sistema os valores do modelo de Kostiakov superestimaram os valores reais obtidos pelo IAS do início ao fim e a diferença da VIB foi de  $13 \text{ mm h}^{-1}$ . Já os dados obtidos pelo modelo de Kostiakov-Lewis subestimaram os originais no período de 21 aos 70 minutos, depois superestimaram até o final do teste e a VIB foi superior ao IAS em  $18,6 \text{ mm h}^{-1}$  (Figura 3d).

A equação de Horton também se ajustou melhor aos dados de VIB originais, obtidos pelo IAS, nos diferentes sistemas e as diferenças entre o modelo de Horton e os dados originais apresentaram a mesma tendência do IAS, sendo em ordem decrescente: FN ( $30,0 \text{ mm h}^{-1}$ ), AR ( $23,2 \text{ mm h}^{-1}$ ), PD ( $17,4 \text{ mm h}^{-1}$ ) e PC ( $11,2 \text{ mm h}^{-1}$ ).



**Figura 3. Velocidade de infiltração da água no solo determinada por infiltrômetro de anel simples (IAS) e estimada pelos modelos de Kostiakov, Kostiakov-Lewis e Horton em Latossolo Amarelo Distrocoeso sob floresta natural (FN), área em regeneração (AR), plantio direto (PD) e plantio convencional (PC).**

Avaliando a tabela 1 verifica-se a diferença entre os valores dos quadrados médios dos erros da infiltração de cada modelo nos diferentes sistemas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

De acordo com o teste de média verificou-se que apenas o modelo de Kostiakov-Lewis apresentou diferença entre os tipos de equipamento. O modelo de Kostiakov-Lewis foi diferente dos demais modelos em todos os sistemas, exceto no PC com o uso apenas do IAD. Entre sistemas verificou-se que o modelo de Kostiakov-Lewis também foi diferente dos demais, exceto no PC com o uso do IAD. A menor diferença entre os quadrados médios dos erros foi no PD e as maiores em FN e AR, estes dois últimos não diferiram entre si. Os modelos de Kostiakov e Horton não apresentaram diferença de ajuste entre infiltrômetros em nenhum dos sistemas estudados.

**Tabela 1. Valores dos quadrados médios dos erros de três modelos empíricos ajustados aos infiltrômetros de anel simples (IAS) e duplo anéis (IAD) em sistemas de floresta nativa (FN), área em regeneração (AR), plantio direto (PD) e plantio convencional (PC).**

Modelos	SISTEMAS DE USO							
	FN		AR		PD		PC	
	IAD	IAS	IAD	IAS	IAD	IAS	IAD	IAS
<b>Kostiakov</b>	14,6 Aa	16,2 Aa	12,6 Aa	20,7 Aa	6,0 Aa	13,1 Aa	6,9 Aa	5,9 Aa
<b>Kost-Lewis</b>	71,2 Cb	115,5 Cb	85,4 Cb	120,2 Cb	45,8 Bb	76,7 Bb	12,3 Aa	39,9 Ab
<b>Horton</b>	18,7 Aa	5,11 Aa	10,0 Aa	6,5 Aa	1,9 Aa	3,7 Aa	5,3 Aa	1,6 Aa

Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na linha (sistemas) e minúsculas na coluna (modelos) não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5 % de probabilidade.

A tabela 2 apresenta os parâmetros empíricos  $a$ ,  $\beta$  e  $k$  dos modelos matemáticos utilizados para explicar a infiltração de água nos solos, os coeficientes de determinação ( $R^2$ ) e os valores de infiltração inicial ( $I_0$ ) e final ( $I_f$ ) da equação de Horton.

De acordo com a equação de Kostiakov ajustada aos dados obtidos pelo IAD, o valor de  $k$  variou de 1,254 a 1,690  $\text{mm h}^{-1}$ , sendo o maior valor observado na FN e o menor no PC. Pela equação de Kostiakov-Lewis o maior valor ocorreu no PC (1,273  $\text{mm h}^{-1}$ ) e o menor em AR (1,059  $\text{mm h}^{-1}$ ), utilizando o mesmo infiltrômetro.

Com o uso do IAS o valor de  $k$  para equação de Kostiakov variou de 1,127 a 3,970  $\text{mm h}^{-1}$ , sendo o menor no PC e o maior valor no sistema AR. Para equação de Kostiakov-Lewis o parâmetro  $k$  também foi menor no PC (1,197  $\text{mm h}^{-1}$ ) e maior no sistema AR (3,637  $\text{mm h}^{-1}$ ), seguindo mesma tendência da equação de Kostiakov quando determinado pelo IAS.

**Tabela 2. Parâmetros  $a$  e  $k$  das equações de Kostiakov e Kostiakov-Lewis, valores de infiltração inicial ( $I_0$ ) e final ( $I_f$ ) da equação de Horton e coeficientes de determinação ( $R^2$ ) obtidos da estimativa da taxa de infiltração estável pelos modelo.**

Parâmetros	FN		AR		PD		PC	
	IAD	IAS	IAD	IAS	IAD	IAS	IAD	IAS
<b>Modelo Kostiakov</b>								
$a$	0,908	0,860	0,910	0,828	0,861	0,867	0,616	0,758
$k$	1,690	3,415	1,623	3,970	1,261	2,087	1,254	1,127
$R^2$	0,725	0,731	0,719	0,742	0,708	0,727	0,732	0,709
<b>Modelo Kostiakov-Lewis</b>								
$a$	0,845	0,758	0,817	0,701	0,672	0,753	0,270	0,359
$k$	1,234	2,839	1,059	3,637	1,081	1,720	1,273	1,197
$R^2$	0,695	0,668	0,674	0,649	0,613	0,661	0,712	0,639
<b>Modelo Horton</b>								
$\beta$	0,014	0,010	0,012	0,010	0,015	0,014	0,027	0,007
$I_0$	929,53	1338,6	922,98	1321,3	594,75	850,79	202,75	277,56
$I_f$	495,06	537,88	445,18	498,57	246,68	327,17	49,76	161,37
$R^2$	0,901	0,927	0,920	0,905	0,901	0,914	0,715	0,902

Considerando os parâmetros da equação de Horton verifica-se que os valores de  $\beta$  obtidos pelo IAD variaram de 0,012 (AR) a 0,027 (PC), enquanto que no IAS a variação foi de 0,007 (PC) a 0,014 (PD), sendo menor que o IAD em todos os sistemas estudados. Esse parâmetro representa a velocidade de decaimento da equação para a capacidade de infiltração; quanto menor for o valor de  $\beta$ , mais rapidamente a capacidade de infiltração se reduz e quanto mais elevado, mais devagar é a redução da capacidade de infiltração (ANGULO-JARAMILLO et al. 2016). Assim, constatou-se que, com o uso do IAD, a velocidade de decaimento da infiltração foi mais lenta quando comparada ao IAS, em todos os sistemas estudados. Ao comparar o ajuste do modelo Horton para os dois infiltrômetros, dentro de cada sistema de uso, observou-se que a maior amplitude do parâmetro  $\beta$  ocorreu no PC, o que significa maior diferença na predição do modelo nesse sistema.

A infiltração máxima que ocorre no início dos testes é representada por  $I_0$  e o fluxo de infiltração mínima, ou em regime estacionário por  $I_f$ , observado quando o solo se encontra na condição de saturação. Segundo Pinheiro et al. (2009) esses parâmetros da equação de Horton representam as forças matriciais e gravitacionais, respectivamente.

Os valores de infiltração inicial ( $I_0$ ), obtidos com o uso do IAD, variaram de 929,53 a 202,75 mm h<sup>-1</sup> e os de infiltração estacionária ( $I_f$ ) ou velocidade de infiltração básica (VIB) apresentaram variação de 495,1 a 49,8 mm h<sup>-1</sup>. A determinação pelo IAS apresentou valores superiores aos do IAD em todos os sistemas, tanto para infiltração inicial, quanto para velocidade de infiltração básica ou final. Todavia, independente do infiltrômetro utilizado, os maiores valores para  $I_0$  e  $I_f$  foram observados na mesma sequência: FN, AR, PD e PC, sendo as maiores médias obtidas, sempre, com o uso do IAS e as menores com o IAD (Tabela 2). Tal afirmação indica que os ajustes da equação de Horton foram sensíveis aos diferentes sistemas de uso, independentemente do tipo de infiltrômetro utilizado.

Os valores do parâmetro  $k$ , representativo da capacidade de infiltração inicial, ajustados às equações de Kostiakov e Kostiakov-Lewis foram muito menores quando comparados aos valores iniciais da equação de Horton para os dois infiltrômetros, em todos os sistemas. Essas diferenças podem ter sido provocadas pelo tipo de equações, pois a equação de Horton (exponencial) representa melhor a evolução da infiltração no início do processo. Nas equações de Kostiakov e Kostiakov-Lewis (potencial) a evolução do processo no início não é bem descrita (MISHRA et al., 2003). Tal circunstância evidencia que o valor de  $k$  não pode ser considerado como valor efetivo da capacidade de infiltração inicial (ALVES SOBRINHO et al., 2003). Assim a comparação entre a VIB é mais apropriada para avaliar os ajustes dos modelos aos diferentes sistemas, que os valores iniciais obtidos pelos modelos.

A análise da VIB, assim como os dados iniciais, também revela que houve discrepância na predição dos modelos para os diferentes sistemas. Entre os modelos estudados, apenas o de Horton apresentou comportamento semelhante quando comparado aos dois infiltrômetros. Pode-se afirmar, então que, de modo geral, o modelo de Horton foi único que apresentou coerência dos dados independente do infiltrômetro utilizado, pois obteve mesma sequência de magnitude em todos os sistemas, sendo os maiores valores em ordem decrescente na FN, AR, PD e PC.

A qualidade do ajuste aos modelos foi satisfatória para o modelo Horton, mediana para Kostiakov e insatisfatória para Kostiakov-Lewis. Tal afirmação

baseia-se na análise dos coeficientes de determinação ( $R^2$ ) das regressões não-lineares ajustados em cada sistema estudado. Os valores  $R^2$  indicam o grau em que as variações dos dados são explicadas por cada modelo. Entre os valores de  $R^2$  destacam-se os encontrados para o modelo de Horton, que apresentou valores sempre igual ou superior a 0,90, exceto no PC com o uso do IAD, onde o melhor ajuste ( $R^2$  0,73) ocorreu para modelo de Kostiaikov. Os valores de  $R^2$  obtidos pelo modelo de Horton na maioria dos sistemas indicam que a curva está muito próxima à curva obtida pelos dados dos infiltrômetros. As curvas geradas pelo modelo de Kostiaikov-Lewis foram as que mais se afastaram.

Na tabela 3 são apresentados os índices estatísticos de raiz do erro quadrático médio (RMSE), coeficiente de massa residual (CMR), coeficiente de ajuste (CA), eficiência (Ef) e índice de Willmott ( $d$ ) para avaliação do desempenho dos modelos ajustados ao IAD e IAS nos diferentes sistemas.

O coeficiente RMSE é comumente utilizado para expressar a acurácia dos resultados numéricos, com a vantagem de esse índice apresentar valores do erro na mesma unidade da medida da variável analisada. O RMSE mostra a quantidade de divergência dos valores do modelo em relação aos valores observados, normalmente um modelo que tenha um RMSE baixo também terá um alto  $R^2$  (SHAO; BAUMGARTL, 2016). Analisando-se a tabela 3, observa-se que independente do infiltrômetro utilizado e do sistema estudado o RMSE foi sempre maior para o modelo de Kostiaikov-Lewis, exceto no sistema de plantio convencional, e menor para o de Horton, sem exceção. Esses baixos valores de RMSE para o modelo de Horton demonstram a confiabilidade do modelo para prever a velocidade de infiltração de água no solo, nos sistemas estudados. Se considerado apenas o tipo de infiltrômetro utilizado, observou-se que entre todos os modelos e sistemas o IAD apresentou menores valores para RMSE.

A análise do coeficiente de massa residual (CMR), permite avaliar se os modelos superestimaram ou subestimaram os valores reais obtidos pelos infiltrômetros. Para tanto, basta verificar o quanto os valores do CMR se afastam do valor zero, e se são negativos (quando subestimam), ou positivos (quando superestimam). Pela tabela 3 verificou-se que com o uso do IAD os modelos de Kostiaikov e Kostiaikov-Lewis superestimaram os valores reais obtidos pelo infiltrômetro nos sistemas FN e PD, subestimaram os valores no PC e

superestimaram e subestimaram, respectivamente no sistema AR. Ao avaliar o desempenho dos modelos de Kostikov e Kostikov-Lewis com o uso do IAS, observou-se que os dois modelos foram semelhantes para todos os sistemas, subestimando os valores reais na FN, AR e PD, e superestimando no PC. Já o modelo de Horton subestimou a velocidade de infiltração, em todos os sistemas independentemente do infiltrômetro, com exceção apenas do IAS no PC (0,012), onde o modelo superestimou os valores reais. Este índice estatístico também confirma o melhor ajuste da equação de Horton, com desvios mais próximos de zero em todos os sistemas, exceto com o uso do IAS no PC.

**Tabela 3. Índices estatísticos para os modelos de infiltração ajustados aos dados do infiltrômetro de anéis duplos (IAD) e simples (IAS) nos sistemas de floresta natural (FN), área em regeneração (AR), plantio direto (PD) e plantio convencional (PC).**

Índices	FN		AR		PD		PC	
	IAD	IAS	IAD	IAS	IAD	IAS	IAD	IAS
<b>Modelo Kostikov</b>								
<b>RMSE</b>	78,08	117,22	100,34	166,02	49,33	108,97	34,11	38,25
<b>CMR</b>	0,06	-0,084	0,082	-0,17	0,031	-0,163	-0,24	0,014
<b>CA</b>	2,455	1,275	2,623	0,843	2,315	1,294	0,468	0,315
<b>Ef</b>	0,72	0,789	0,597	0,639	0,831	0,620	0,810	0,701
<b>D</b>	0,9975	0,9977	0,9948	0,9936	0,9969	0,9929	0,9813	0,9920
<b>Modelo Kostikov-Lewis</b>								
<b>RMSE</b>	86,65	120,43	112,59	167,44	69,64	112,91	22,84	23,65
<b>CMR</b>	0,068	-0,06	-0,1	-0,153	0,086	-0,153	-0,106	0,011
<b>CA</b>	2,597	1,592	5,694	1,016	2,466	1,492	1,149	1,518
<b>Ef</b>	0,656	0,777	-1,521	0,632	0,664	0,592	0,575	0,219
<b>D</b>	0,9960	0,9963	0,9922	0,9931	0,9920	0,9910	0,9901	0,9970
<b>Modelo Horton</b>								
<b>RMSE</b>	25,025	33,716	23,555	35,587	12,522	20,116	10,694	11,771
<b>CMR</b>	-0,004	-0,005	-0,006	-0,002	-0,004	-0,005	-0,004	0,012
<b>CA</b>	1,003	0,967	1,003	0,967	0,996	1,007	0,974	0,767
<b>Ef</b>	0,971	0,983	0,978	0,983	0,989	0,987	0,958	0,926
<b>D</b>	0,9997	0,9997	0,9997	0,9996	0,9998	0,9997	0,9996	0,9992

RMSE - raiz quadrada do quadrado médio do erro, MAE - máximo erro absoluto, CMR - coeficiente de massa residual, CA - coeficiente de ajuste, Ef - eficiência e d - índice de Willmott.

Os valores de Ef variaram de -1,521 (Kostikov-Lewis) a 0,989 (Horton), sendo que segundo Nash e Sutcliffe (1970), quando Ef = 1,0 a combinação é

perfeita entre os dados medidos e os observados;  $E_f = 0$  corresponde que os valores simulados pelo modelo são iguais às médias dos valores medidos em campo; já um valor negativo para  $E_f$  demonstra que os valores simulados são inadequados em relação aos observados. Pela tabela 3, observa-se que o único valor inadequado foi encontrado pelo modelo de Kostikov-Lewis no AR, com o uso do IAD. Esse modelo também expressou os menores valores para  $E_f$ , em todos os sistemas independente do infiltrômetro utilizado. Os valores de  $E_f$  mais próximos a 1,0 foram encontrados pelo modelo Horton para ambos infiltrômetros em todos os sistemas.

O coeficiente de ajuste (CA) também foi melhor na equação de Horton, para os quatro sistemas independente do infiltrômetro. Os valores desse índice, mais próximos da unidade ratificam esta equação como a mais adequada para estimar a velocidade de infiltração no tipo de solo estudado. Esse resultado corrobora com Alves Sobrinho (2010), quando avaliaram CA e  $E_f$  dos modelos de Kostikov-Lewis e Horton em plantio direto e convencional. Segundo Oliveira (2015), a análise do coeficiente de ajuste e a eficiência representa uma forma concisa de avaliação de desempenho de modelos, fato observado no presente trabalho, já que CA e  $E_f$  apresentaram valores coerentes para análise.

Com relação ao índice “ $d$ ” que avalia a exatidão (concordância) dos valores estimados de infiltração pelos métodos propostos (Tabela 3), todos os métodos avaliados e comparados com os valores obtidos pelos infiltrômetros apresentaram valores que variaram acima de 0,98, considerados como de muito boa concordância.

## CONCLUSÕES

A velocidade de infiltração de água no solo estimada pelos modelos Kostikov, Kostikov-Lewis e Horton superestimaram os valores de infiltração medidos em todos os sistemas de uso.

A maior diferença entre a velocidade de infiltração básica estimada e os dados obtidos em campo foi encontrada no modelo de Kostikov-Lewis.

A equação de Horton foi a que melhor se adequou aos dados originais de infiltração de água em todos os sistemas de uso, apresentando os melhores

parâmetros estatísticos, como: coeficiente de determinação ( $R^2$ ), raiz do erro quadrático médio (RMSE), coeficientes de massa residual (CMR), ajuste (CA) e eficiência (Ef), quando comparados aos demais modelos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES SOBRINHO, T.; VITORINO, A. C. T.; SOUZA, L. C. F. de; GONÇALVES, M. C.; CARVALHO, D. F. de. Infiltração de água no solo em sistemas de plantio direto e convencional. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 7, n. 2, p.191-196, 2003.

ANGULO-JARAMILLO, R.; BAGARELLO, V.; IOVINO, M.; LASSABATERE, L., **Infiltration Measurements for Soil Hydraulic Characterization**. Springer International Publishing, AG Switzerland, p. 386, 2016.

BAHIA. Superintendência de Estudos Econômicos e Sociais da Bahia. **Atributos climáticos do Estado da Bahia**. Salvador, 1998. 85 p. (Série Estudos e Pesquisas, 38).

BERNARDO, S.; SOARES, A. A.; MANTOVANI, E. C. **Manual de irrigação**. 8. ed. Viçosa: UFV, 2008. 625 p.

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

CLEMMENS, A. J. Infiltration equations for border irrigation models. P266-274. In: **Advances in infiltration**. Proc. Nat. Conf. on Advances in Infiltration. Dec. 12-13, 1983. Chicago, Ill. ASAE Pub. 11-83. St. Joseph, Mo. 1983.

CUNHA, J. L. X. L.; ALBUQUERQUE, A. W.; SILVA, C. A.; ARAÚJO, E. de; JUNIOR, R. B. dos S. Taxa de infiltração da água em um Latossolo Amarelo submetido ao sistema de manejo plantio direto. **Caatinga**, v. 22, n. 1, p.199-205, 2009.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUARIA - EMBRAPA. Serviço de Produção de Informação – SPI. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 4.ed. Rio de Janeiro, 2013. 306p.

FIORIN, T. T. **Estimativa da infiltração de água no solo a partir de funções de pedofunções**. Santa Maria, Universidade de Santa Maria, 2008, 116 p. (Tese de Doutorado)

GOMES, JBV; ARAUJO FILHO, JC; CURTI, N. Solos de tabuleiros costeiros sob florestas naturais e sob cultivo. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 32, n. 71, p. 233-246, 2012.

HAVERKAMP, R.; RENDON, L.; VACHAUD, G. Infiltration equations and their applicability for predictive use. p. 142-152. In Yu- SI Fok (ed.) **Infiltration Development and Application**. Honolulu, Hawaii, 1987.

HILLEL, D. **Environmental Soil Physics**. Academic Press, San Diego, 771 p. 1998.

HORTON, L. D. **An approach toward a physical interpretation of infiltration capacity**. Soil Science Society American Proceedings, Madison, v. 5, n. 1, p. 399-417, 1940.

KOSTIAKOV, A.N. **The dynamics of the coefficient of water - percolation in soils and on the necessity for studying it from a dynamic point of view for purposes of ameliation**. Society Soil Science, Moscou, v. 14, n. 1, p. 17-21, 1932.

LILI, M.; BRALTS, V. F.; YINGHUA, P.; HAN, L.; TINGWU, L. Methods for measuring soil infiltration: State of the art. **International Journal of Agricultural and Biological Engineering**, v. 1, n. 1, p. 22-30, 2008.

LOAGUE, K.; GREEN, R. E. Statistical and graphical methods for evaluating solute transport models: overview and application. **Journal of contaminant Hydrology**, Amsterdam, v. 1, n. 7, p. 51-73, 1991.

MISHRA, S. K.; TYAGI, J. V.; SINGH, V. P. Comparison of infiltration models **Hydrology Processes**, v. 17 n. 13, p. 2629 - 2652, 2003.

NAETH, M.A.; CHANASYK, D.S.; BAILEY, A.W. Applicability of the Kostiaikov equation to mixed prairie and fescue grasslands of Alberta. **Journal of Range Management**, v. 44, n. 1, p. 18-21, 1991.

NASH, J. E.; SUTCLIFFE, J. V. River flow forecasting through conceptual models. **Journal of Hydrology**, v. 10, n. 2, p. 282-290, 1970.

NÁVAR, J.; SYNNOTT, T. J. Soil infiltration and land use in Linares, NL, Mexico **Terra**, v. 18, n. 3, p. 255-262, 2000.

OBGE, V. B.; JAYEOBA, O. J.; ODE, S. O. "Comparison of four infiltration models on a sandy soil in Lafia, Southern Gunia, Savana Zone of Nigeria, **Production Agriculture and Technology Journal**, Publication of Nasarawa State University, Keffi., v. 7, n. 2, p. 116-126, 2011.

OKU, E.; AIYELARI, A. Predictability of philip and kostiaikov infiltration models under inceptisols in the humid forest zone, Nigeria. *Kasetsart J. (Nat. Sci.)* v. 45, n. 6, p. 594 – 602, 2011.

OLIVEIRA, V. B. **Avaliação da infiltração da água no solo utilizando modelos determinísticos**. 2015. 68 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Escola Superior de Agricultura ‘Luiz Queiroz’ / USP. Piracicaba, SP, 2015.

PINHEIRO, A.; TEIXEIRA, L. P.; KAUFMANN, V. Capacidade de infiltração de água em solos sob diferentes usos e práticas de manejo agrícola. *Amibi-Agua, An Interdisciplinary Journal of Applied Science*, v. 4, n. 2, p. 188-199, 2009.

RAWLS, W. J., L. R. AHUJA, D. L. BRAKENSIEK, A. SHIRMOHAMMADI. Infiltration and soil water movement. In **Handbook of Hydrology**. McGraw-Hill, Inc., 1993.

RIBEIRO, L. P. Gênese, evolução e degradação dos solos amarelos coesos dos tabuleiros costeiros. In: REUNIÃO TÉCNICA SOBRE SOLOS COESOS DOS TABULEIROS COSTEIROS, 1., 1996, Cruz das Almas. **Anais...** Cruz das Almas: EMBRAPA-CPATC; EMBRAPA-CNPMPF; AGRUFBA; IGUFBA, 1996. p. 27-35.

SHAO, Q; BAUMGARTL, T. Field evaluation of three modified infiltration models for the simulation of rainfall sequences. **Soil Science**, v. 181, n. 1, p. 45-56, 2016.

SHUKLA, M. K.; LAL, R.; OWENS, L. B.; UNKEFER, P. Land use and management impacts on structure and infiltration characteristics of soils in the north appalachian region of ohio. **Soil Science**, v. 168, n.3, p 167-177, 2003.

SIHAG, P.; TIWARI, N. K.; RANJAN, S. Estimation and inter-comparison of infiltration models. **Water Science**, v. 31, n. 1, p. 34-43, 2017.

SILVA, N. F.; CUNHA, F. N.; CABRAL FILHO, F. R.; MORAIS, W. A.; CUNHA, E. S.; ROQUE, R. C.; ALVES, D. K. M.; TEIXEIRA, M. B. Métodos para estimativa da infiltração de água em um Latossolo sob plantio direto e convencional. **Global Science and Technology**, Rio Verde, v. 10, n. 1, p.169 – 176, 2017.

SKAGGS, R. W.; KHALEEL, R. **Chapter 4: Infiltration. In Hydrologic modelling of Small Watersheds**. St Joseph, Mich.: ASAE, 1982.

STATSOFT, INC. **Statistica for Windows – Computer program manual**. Tulsa, 2004.

URCHEI, M. A.; FIETZ, C.R. Infiltração de água em um Latossolo Roxo muito argiloso em dois sistemas de manejo. **Irriga**, Botucatu, v. 7, n. 1, p. 01-09, 2002.

XEVI, E.; GILLEY, J.; FEYEN, J. Comparative study of two crop yield simulation models. **Agricultural Water Management**, v. 30, n. 1, p.155-173, 1996.

WILLMOTT, C.J.; ACKLESON, S.G.; DAVIS, R.E.; FEDDEMA, J.J.; KLINK, K.M.; LEGATES, D.R.; O'DONNELL, J.; ROWE, C.M. Statistics for the evaluation and comparison of models. **Journal of Geophysical Research**, Ottawa, v. 90, n. 5, p. 8995-9005, 1985.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

A presente tese procurou compreender melhor como os diferentes usos do solo influenciam a infiltração e sua distribuição de água em Latossolo Amarelo Distrocoeso típico de Tabuleiros Costeiros, tendo em vista as limitações físicas oriunda da própria gênese. Tal compreensão é fundamental para desenvolver sistemas de manejo que promovam sustentabilidade ao processo produtivo, principalmente por ser a água um recurso estratégico e fundamental ao processo produtivo.

De acordo com o estudo observou-se que o conjunto de atributos físico-hídricos selecionados foi suficiente para caracterizar e comparar os sistemas de uso, sob os aspectos estatísticos, geoestatísticos, univariado e multivariado.

A partir das diferentes observações ficou evidenciado que o sistema de uso menos sustentável foi o descrito como plantio convencional, pois prejudicou tanto o processo de entrada (infiltração) com a distribuição de água nas duas profundidades avaliadas. O plantio convencional interferiu inclusive na variabilidade dos atributos do solo. Em contra partida o plantio direto se mostrou mais eficiente, sob os dois aspectos e muito próximo da área em regeneração.

Por meio das análises multivariadas foi possível discriminar estatisticamente cada sistema, comprovando o que foi constatado inicialmente pelos atributos quando avaliados individualmente pela estatística clássica.

A partir dos resultados deste estudo, sugere-se que novas pesquisas sejam realizadas para avaliar diferentes solos e diferentes sistemas de uso, não apenas no ambiente dos Tabuleiros Costeiros, sob os aspectos estatísticos, geoestatísticos, univariado e multivariado, possibilitando maior compreensão das intervenções antrópicas nos sistemas naturais, bem como a capacidade de resiliência dos diferentes sistemas de uso do solo.