

**Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**

**Qualidade física de solos com horizonte antrópico
(Terra Preta de Índio) na Amazônia Central**

Afrânio Ferreira Neves Junior

**Tese apresentada para obtenção do título de
Doutor em Agronomia. Área de concentração:
Solos e Nutrição de Plantas**

**Piracicaba
2008**

Afrânio Ferreira Neves Junior
Engenheiro Agrônomo

Qualidade física de solos com horizonte antrópico
(Terra Preta de Índio) na Amazônia Central

Orientador:
Prof. Dr. ALVARO PIRES DA SILVA

Tese apresentada para obtenção do título de
Doutor em Agronomia. Área de concentração:
Solos e Nutrição de Plantas

Piracicaba
2008

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
DIVISÃO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - ESALQ/USP**

Neves Junior, Afrânio Ferreira
Qualidade física de solos com horizontes antrópico (Terra Preta de Índio) na
Amazônia Central / Afrânio Ferreira Neves Junior.- - Piracicaba, 2008.
93 p. : il.

Tese (Doutorado) - - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 2008.
Bibliografia.

1. Amazônia Central 2. Argissolos 3. Física do solo - Qualidade 4. Horizontes
do solo 5. Latossolos I. Título

CDD 631.43

"Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte – O autor"

*“Não há nada que assuste tanto um homem
quanto ser capaz de descobrir a enormidade do
que ele pode fazer e se tornar”*

(Soren Kierkegaard)

*À minha filha Gabi: a inspiração
e o sentido de tudo...*

*À minha esposa Paôla: pelo carinho,
compreensão e força para
superar os desafios.*

Dedico

*Aos meus pais pela educação, valores
e amor incondicional...*

*À Eurico Lira e Sandra Lira pelo apoio e suporte
indispensáveis à realização deste.*

Ofereço

AGRADECIMENTOS

Agradeço...

... ao Dr. Alvaro Pires da Silva pela orientação, amizade e contribuição marcante em minha formação profissional...

... ao Dr. Wenceslau G. Teixeira pela orientação e assistência durante o período de trabalho na Embrapa...

... ao Dr. Newton P. Falcão pelo apoio, incentivo e oportunidade de pesquisar as Terras Pretas de Índio...

... à Dra. Eleusa Barros, Dra. Maria do Rosário e Dr. Hedinaldo Lima pelo apoio e incentivo...

... à Universidade de São Paulo (USP) e Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”(ESALQ) pela oportunidade e por toda a sua gloriosa história...

... ao Departamento de Ciência do Solo e à Coordenação do Curso de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas da ESALQ/USP ...

... ao CNPq por conceder bolsas em todas as etapas de minha formação...

... à Embrapa Amazônia Ocidental e ao Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (INPA) pela infra-estrutura e logística necessária para a realização deste trabalho...

... à Universidade Federal do Amazonas (UFAM) onde tudo começou...

... à família da República Batkverna e seus 20 anos de história e tradição...

... aos colegas do PPG Solos e Nutrição de Plantas e todos que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

Muito obrigado!

SUMÁRIO

RESUMO.....	7
ABSTRACT.....	8
2 DESENVOLVIMENTO.....	14
2.1 Revisão Bibliográfica.....	14
2.1.2 Amazônia: desenvolvimento cultural dos povos nativos.....	14
2.1.3 Terra Preta de Índio (TPI).....	15
2.1.4 Caracterização das TPI.....	15
2.1.5 Ocorrência e distribuição geográfica.....	17
2.1.6 O processo de formação das TPI.....	19
2.1.7 Variabilidade das TPI.....	21
2.1.8 Os sistemas de uso das TPI.....	22
2.1.9 Cronologia de eventos relacionados às TPI e instituições participantes.....	24
2.2 Propriedades físicas do solo.....	27
2.2.1 Granulometria.....	27
2.2.2 Densidade do solo (ρ_s).....	27
2.2.3 Densidade de partículas (ρ_p).....	28
2.2.4 Porosidade do solo (α).....	28
2.2.5 Condutividade hidráulica saturada (K_{sat}).....	28
2.2.6 Curva de retenção da água no solo (CRA).....	29
2.2.7 Resistência do solo à penetração de raízes (RP).....	29
2.2.8 Estabilidade de agregados.....	30
2.2.9 Resistência tênsil de agregados (RT) e Friabilidade (F).....	30
2.3 Qualidade do solo.....	31
2.3.1 Índices de qualidade do solo.....	31
2.3.2 Intervalo Hídrico Ótimo (IHO).....	32
2.3.3 Parâmetro S.....	32
2.4 Material e métodos.....	35
2.4.1 Descrição das áreas de estudo.....	35
2.4.2 Amostragem de solo.....	40
2.4.3 Coleta e preparo das amostras.....	40
2.4.4 Características químicas.....	41
2.5 Análises.....	41
2.5.1 Granulometria e carbono do solo.....	41
2.5.2 Umidade gravimétrica (θ_g).....	41
2.5.3 Umidade volumétrica (θ).....	42
2.5.4 Condutividade hidráulica saturada (K_{sat}).....	42
2.5.5 Curvas de retenção da água no solo e de resistência à penetração (RP).....	43
2.5.6 Densidade de partículas (ρ_p).....	46
2.5.7 Densidade do solo (ρ_s) e volume de poros.....	47
2.6 Qualidade estrutural do solo.....	48
2.6.1 Estabilidade de agregados.....	48
2.6.2 Resistência tênsil de agregados e friabilidade.....	50
2.7 Indicadores de Qualidade Física do Solo.....	51
2.7.1 Intervalo Hídrico Ótimo (IHO).....	51

2.7.2 Parâmetro S.....	53
2.8 Análises estatísticas	53
2.9 Resultados	54
2.9.1 Curva de retenção da água no solo (CRA) e curva de resistência à penetração (CRP).....	54
2.9.2 Densidade do solo (ρ_s) e Porosidade do solo	57
2.9.3 Condutividade hidráulica saturada (Ksat).....	61
2.9.4 Resistência Tênsil de Agregados (RT) e Friabilidade (F)	62
2.9.5 Estabilidade de agregados.....	64
2.9.6 Intervalo Hídrico Ótimo (IHO) e S	66
2.10 Discussão.....	69
3 CONCLUSÕES.....	80
REFERÊNCIAS.....	81

RESUMO

Qualidade física de solos com horizonte antrópico (Terra Preta de Índio) na Amazônia Central

As Terras Pretas de Índio (TPI) apresentam por definição o horizonte A antrópico, de cor escura, com presença de artefatos líticos e/ou cerâmicos oriundos do processo de ocupação humana na Amazônia. As áreas que ocorrem se diferenciam dos solos adjacentes por exibirem e manterem condições químicas do solo adequadas ao crescimento de plantas, mesmo após vários anos de cultivo. Essa pesquisa testa a hipótese de que as TPI exibem condições físicas do solo adequadas ao crescimento de plantas e, mais adequadas que às encontradas nos solos adjacentes. O objetivo deste estudo foi avaliar as propriedades físicas dos horizontes antrópicos de duas TPI relacionando-as com as propriedades estruturais do solo que podem limitar o crescimento de plantas. Para a realização deste estudo foram amostradas duas áreas com horizonte A antrópico (TPI) e amostras do solo adjacente. A primeira área está localizada na estação experimental da Embrapa Amazônia Ocidental (Campo Experimental do Caldeirão) no município de Iranduba, Estado do Amazonas. O solo adjacente foi classificado como Argissolo Amarelo Tb Distrófico. A segunda área está localizada em uma pequena propriedade agrícola no município de Manacapuru, Estado do Amazonas. O solo adjacente foi classificado como Latossolo Amarelo Tb Distrófico. Para a caracterização das propriedades físicas do solo, coletaram-se 120 amostras de solo indeformadas na profundidade entre 0-0,05 m e oito amostras de solo com o formato de blocos (7,0 x 15 x 22 cm). As amostras coletadas foram utilizadas para determinar a curva de retenção da água no solo, a condutividade hidráulica saturada, a curva de resistência do solo à penetração, a densidade do solo, densidade de partículas, a porosidade total do solo, a estabilidade e a resistência tênsil de agregados e a friabilidade do solo. Além das propriedades físicas, o Intervalo Hídrico Ótimo (IHO) e o índice "S" foram utilizados como indicadores da qualidade física do solo. A hipótese da pesquisa foi parcialmente comprovada. Os índices de qualidade do solo constataram que as Terras Pretas de Índio apresentam condições físicas do solo adequadas ao crescimento de plantas, entretanto, as TPI não apresentam propriedades físicas mais adequadas ao crescimento de plantas que os horizontes superficiais adjacentes.

Palavras-chave: Horizonte A antrópico; Carbono pirogênico; Latossolo; Argissolo; Terra Preta de Índio; Qualidade do solo; Intervalo Hídrico Ótimo; S; Amazônia Central

ABSTRACT

Soil physical quality of anthropics horizons (Amazonian Dark Earth) in Central Amazon

Amazonian Dark Earth (ADE) presents an Anthropic A horizon, with dark color and presence of lithic and ceramics sherds. Those topsoil characteristics resulted from old Indian settlements from the pre-Columbian time in the Amazon Basin. ADE shows differences from the surrounding soils by its very good soil chemical characteristics and that are still in the most sites very fertile and productive after long time of cultivation. In this study we tested the hypothesis that ADE presents good soil physical conditions to plant growth, and more appropriate than the surrounding soil. The objective of this study was to evaluate physical properties of Anthropic horizons of two sites with ADE. The soil physical properties were discussed concerning the potencial impacts on plant growth. The Anthropic horizons from two ADE sites were sampled and also the A horizon from the surrounding soil. The ADE sites sampled were located in the Amazonas State in Brazil, one at the Experimental Research Station of Embrapa Amazônia Ocidental (Campo Experimental do Caldeirão) – Iranduba, the surrounding soil was an Dystric Yellow Acrisol. The another site was located near the city of Manacapuru – AM in a private farm. The adjacent soil in this area was classified as Dystric Yellow Ferralsol. At the depth of 0-0,05 m, 120 soil cores were collected along with eight soil box (7,0 x 15 x 22 cm). At the laboratory, soil samples were analyzed to determine: soil water retention curve, saturated hydraulic conductivity, penetration resistance curve, bulk density, particle density, total porosity, aggregate stability, tensile strength and friability. The Least Limiting Water Range (LLWR) and S indexes were used as soil physical quality indicators. The hypothesis was partially proven. The soil quality indexes indicated that ADE presented appropriate soil physical conditions for plant growth; however, the ADE had no better soil physical quality than the surrounding soil.

Keywords: Anthropic Horizon; Black carbon, Ferralsol, Acrisol, Soil quality, Least Limiting Water Range; S; Central Amazon

1 INTRODUÇÃO

A Amazônia Central apresenta uma paisagem com uma grande variedade de solos que, em sua grande maioria, exibem elevada acidez, baixa capacidade de troca catiônica e baixa fertilidade natural (VIEIRA, 1975; SANCHEZ; COCHRANE, 1980). Apesar dessas características, há a ocorrência de áreas contendo solos com elevada fertilidade e com grande potencial produtivo, mantidos mesmo após várias décadas de uso. Estes solos são conhecidos regionalmente como Terra Preta de Índio - TPI (SOMBROEK, 1966; SMITH 1980).

As Terras Pretas de Índio são solos que exibem coloração escura, horizonte antrópico com presença de artefatos líticos e/ou cerâmicos (EDEN et al., 1984; KERN; KÄMPF, 1989; LIMA et al., 2002) além de elevada fertilidade e capacidade de retenção de nutrientes. São manchas de solo que ocorrem por toda a Amazônia, geralmente encontradas próximas aos cursos de água, em locais bem drenados e em áreas com posição topográfica que permite boa visualização espacial (SMITH, 1980; KERN; KÄMPF, 1989; KERN et al., 2003).

A origem das TPI ainda é motivo de controvérsia entre os pesquisadores, mas a grande maioria relaciona o seu aparecimento à atividade humana (SMITH, 1980), provavelmente por populações pré-colombianas. Embora aceita, esta relação ainda gera uma série de dúvidas, entre as quais o questionamento da formação intencional ou como mera consequência da ocupação humana (KERN et al., 2003, NEVES et al., 2003). Os horizontes das TPI originam-se por antropogênese, sobrepondo-se à pedogênese. O horizonte diagnóstico A antrópico é definido como resultante do uso contínuo do solo pelo homem, na forma de residência ou local de cultivo, por períodos relativamente prolongados (KERN; KÄMPF, 1989). Atualmente, acredita-se que os índios manejavam o solo de uma forma diferente do processo tradicional praticado nos trópicos, derrubando primeiramente a floresta e, em seguida, realizando o processo de queima controlada ("slash and char"), obtendo o carvão vegetal como produto final ao invés de cinzas (MANN, 2002).

Dessa forma, a elevada fertilidade das TPI é atribuída às propriedades físico-químicas da matéria orgânica, principalmente pela contribuição significativa do carbono

pirogênico (“black carbon”), formado por oxidação incompleta de materiais orgânicos (DERENNE; LARGEAU, 2001) que exibem alta resistência à oxidação termal, química e até a foto-oxidação (WOLBACH; ANDERS, 1989; SKJEMSTAD et al., 1996).

Do ponto de vista cultural, as TPI são importantes registros do processo de ocupação na Amazônia e podem esclarecer questões a respeito da distribuição da população, capacidade de suporte do solo, padrões de assentamentos e o uso da terra por antigas civilizações (LIMA et al., 2002). Por outro lado, inúmeras pesquisas são conduzidas com o intuito de elucidar a gênese e os mecanismos de estabilidade encontrados nestes solos, abordando aspectos ligados à produtividade e à manutenção da fertilidade mesmo após várias décadas de uso.

Diante do exposto, admite-se que as Terras Pretas de Índio são solos decorrentes de atividades antrópicas, que dependendo do manejo, podem ser férteis e produtivos mesmo após várias décadas de uso, sendo consideradas modelos para o manejo sustentável em condições tropicais (MADARI et al., 2004). As pesquisas realizadas nas TPI buscam conhecimentos para o aprimoramento de técnicas de manejo sustentável na agricultura. Na escala regional, os conhecimentos obtidos podem ser utilizados no processo de recuperação de áreas degradadas, reincorporando áreas abandonadas ao processo produtivo, além de potencialmente diminuir a pressão ao desmatamento de novas áreas de floresta primária. Por outro lado, a grande atenção dada ao aquecimento global, aos gases do efeito estufa e às condições ambientais, tem focado os estoques de carbono do solo e seus fluxos (BERNOUX et al., 1998) pelo fato da matéria orgânica funcionar como um grande reservatório de carbono no solo. Dessa forma, entender os mecanismos que levaram ao aumento significativo dos estoques de carbono nas TPI pode servir como base para a criação de técnicas de manejo que reduzam a emissão de gases e promovam o aumento do seqüestro de carbono no solo (TEIXEIRA, 2007).

Atualmente inúmeras instituições e grupos de pesquisa, situados no Brasil e em outros países, estão envolvidos com a temática das TPI (MADARI et al., 2004). Na área de solos, além das publicações existentes, várias pesquisas vêm sendo conduzidas com temas voltados à caracterização da fertilidade das TPI, pelo fato de ser uma das propriedades mais intrigantes. Assim, de uma maneira geral, pode-se dizer que as TPI

oferecem condições químicas favoráveis ao crescimento de plantas, baseado nos elevados teores de matéria orgânica e nas altas produtividades obtidas nas culturas, principalmente quando comparadas aos solos adjacentes. No entanto, deve-se ressaltar que os aspectos químicos e biológicos do solo, considerados de forma isolada, podem estar comprometidos sem a adequada quantificação das condições físicas do solo (DEXTER, 2004). Neste contexto há a necessidade de verificar se, além das propriedades químicas do solo, as TPI apresentam também condições físicas do solo adequadas ao cultivo de plantas. Portanto, essa pesquisa testa a hipótese de que as Terras Pretas de Índio exibem condições físicas do solo adequadas ao crescimento de plantas e, mais adequadas que às encontradas nos solos adjacentes. O objetivo desta pesquisa foi caracterizar dois horizontes antrópicos (Terra Preta de Índio) por meio de propriedades físicas do solo, relacionando essas propriedades aos valores críticos que podem limitar o crescimento de plantas.

REFERÊNCIAS

- BERNOUX, M. M. Y.; ARROUAYS, D.; CERRI, C. C, VOLKOFF, B.; JOLIVET, C. Bulk density of Brazilian Amazon soils related to other soil properties. **Soil Science Society of America Journal**, Baltimore, v. 62, p. 743-749, 1998.
- DERENNE, S.; LARGEAU, C. A review of some important families of refractory macromolecules: Composition, origin, and fate in soils and sediments. **Soil Science**, Philadelphia, v. 166, p. 833-884, 2001.
- DEXTER, A. R. Soil physical quality. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 79, p.129-130, 2004.
- EDEN, M.J.; BRAY, W.; HERRERA, L.; McEWAN, C. Terra Preta soils and their archeological context in the Caqueta Basin of Southeast Colombia. **American Antiquity**, Washington, v. 49, p. 125-140, 1984.
- GLASER, B. Prehistorically modified soils of central Amazonia: a model for sustainable agriculture in the twenty-first century. **Philosophical Transactions of the Royal Society B**, London, v. 362, p. 187-196, 2007.

KERN, D. C.; D'AQUINTO, G. D.; RODRIGUES, T. E.; FRAZAO, F.; SOMBROEK, W., MEYERS, T. M.; NEVES, E. G. Distribution of Amazonian Dark Earth in the Brazilian Amazon. In: LEHMANN, J.; KERN, D. C.; GLASER, B.; WOODS, W. I. **Amazonian dark earths; origin, properties and management**, Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2003. p. 51-77.

KERN, D. C.; KÄMPF, N. Antigos assentamentos indígenas na formação de solos com Terra Preta Arqueológica na região de Oriximiná, Pará. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 3, p. 219-225, 1989.

LIMA, H. N.; SCHAEFER, C. E. R.; MELLO, J. W. V.; GILKES, R. J.; KER, J. C. Pedogenesis and pre-Colombian land use of "Terra Preta Anthrosols" ("Indian black earth") of Western Amazonia. **Geoderma**, Amsterdam, v. 110, p. 1-17, 2002.

MADARI, B. E.; SOMBROEK, W.; WOODS, W. I. Research on anthropogenic dark earths soils. Could be a solution for sustainable agricultural development in the Amazon? In: GLASER, B.; WOODS, W. I. **Amazonian dark earth: exploration in space and time**. Berlin: Springer, 2004. p. 169-180.

MANN, C.C. The real dirt on rainforest fertility. **Science**, Washington, v. 29, p. 922-923., 2002.

NEVES, E. G.; PETERSON, J. B.; BARTONE, R. N.; Da SILVA, C. A. Historical and Socio-cultural Origins of Amazonian Dark Earths. In: LEHMANN, J.; KERN, D. C.; GLASER, B.; WOODS, W. I. **Amazonian dark earths; origin, properties and management**, Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2003. p.29-50.

OLIVEIRA, J. B.; JACOMINE, P. K. T.; CAMARGO, M. N. **Classes gerais de solos do Brasil**. 2.ed., Jaboticabal: FUNEP, 1992. 201p.

RODRIGUES, T, E. Solos da Amazônia. In: ALVAREZ, V. H.; FONTES, L. E. F. (Ed.) **O solo nos grandes domínios morfoclimáticos do Brasil e o desenvolvimento sustentado**. Viçosa: SBCS; UFV, 1996. p. 51-260.

SANCHEZ, P.A.; COCHRANE, T. T. Soil constraints in relation to major farming systems in tropical America. **Priorities for Alleviating Soil-Related Constraints to Food Production in the Tropics**. Los Baños: International Rice Research Institute, 1980. p.107-139.

SKJEMSTAD, J. O.; CLARKE, P.; TAYLOR, J. A.; OADES, J. M.; MCCLURE, S. G. The chemistry and nature of protected carbon in soil. **Australian Journal of Soil Research**, Collingwood, v. 34, p. 251-271, 1996.

SMITH, N. J. H. Anthrosol and human carrying capacity in Amazonia. In: ANNALS OF THE ASSOCIATION OF AMERICAN GEOGRAPHERS, 70. 1980. Durham, **Anais...** Durham, 1980. p. 553-566.

SOMBROEK, W. G. **Amazonian soils**. A reconnaissance of the soils of the Brazilian Amazon. Wageningen: Centre for Agricultural Publication Documentation, 1966. 292p.

TEIXEIRA, W. G. O manejo do solo pelas populações pré-colombianas na Amazônia brasileira: vestígios deixados nas terras pretas de índio e terras mulatas. In: REUNIÃO AMAZÔNICA DE AGROECOLOGIA, 2007. Manaus, **Anais...** Manaus, 2007. p. 47-55.

VIEIRA, L. S. **Manual de ciência do solo**. São Paulo: Editora Agronômica Ceres, 1975. 464p.

WOLBACH, W. S.; ANDERS, E. Elemental carbon in sediments: determination and isotopic analysis in the presence of kerogen. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, London, v. 53, p.1637-1647, 1989.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Revisão Bibliográfica

2.1.2 Amazônia: desenvolvimento cultural dos povos nativos

Os vestígios da presença humana na Amazônia datam da transição do Pleistoceno tardio, cerca de 12 mil anos. Alguns afirmam que as migrações vieram a partir da América do Norte, embora existam àqueles que acreditam em outras fontes de povoamento. As evidências são encontradas numa amplitude de habitats, entre terras altas e várzeas, florestas, em cerrados e alagados, embora prioritariamente aconteçam nas terras baixas, conhecidas como várzeas (ROOSEVELT, 1994; OLIVER, 2001; MEIRELLES FILHO, 2004).

Do ponto de vista da subsistência como necessidade primária da vida, Meggers (1987) divide a Amazônia em duas sub-regiões, marcadamente contrastantes em tamanho e diferentes quanto ao potencial alimentar: (1) a vasta terra firme, onde os recursos são escassamente disseminados, porém sempre disponíveis; (2) a estreita faixa de terrenos alagados (várzeas), onde a escassez se alterna com a fartura, dependendo do nível do rio.

Assim, surge uma agricultura itinerante, com roçados provisórios que depois de alguns anos são abandonados devido ao declínio da produtividade. O predomínio do método de cultivos itinerantes representa uma adaptação às necessidades do solo e do clima, tratando-se de uma técnica especializada que se desenvolveu em resposta às condições tropicais. Para Meggers (1996), a pobreza de recursos ambientais na Amazônia foi o fator limitante para a subsistência e a expansão populacional indígena, o que impediria a evolução social em níveis mais complexos e organizados.

Estudos mais recentes não sustentam a interpretação generalizada de Meggers (1996), onde as ocupações temporárias seriam limitadas pelo ambiente pobre em recursos. Pelo contrário, há evidências de que a Amazônia foi ocupada por uma grande variedade de povos e culturas, em uma longa e dinâmica trajetória de desenvolvimento

(ROOSEVELT, 1994, 2002). Neste contexto, há cerca de 2000 anos (entre 1000 anos a.C. e 1000 d.C.) uma ocupação mais densa e permanente desenvolveu-se nas várzeas e terras altas, permanecendo até a chegada dos europeus (ROOSEVELT 1994; KÄMPF; KERN, 2005). Essas ocupações imprimiram transformações significativas no ambiente, entre as quais se destacam as alterações nas propriedades dos solos, o que viria a contribuir na produção de alimentos, sustentando uma população numerosa, por volta de 5,7 a 10 milhões de habitantes (DENEVAN, 1992). Os solos de coloração escura e com grande potencial produtivo, viriam mais tarde a ser conhecidos como Terra Preta de Índio, atualmente em destaque devido ao grande interesse da comunidade científica.

2.1.3 Terra Preta de Índio (TPI)

2.1.4 Caracterização das TPI

Na região amazônica há uma grande variedade de solos, que em sua grande maioria possuem baixa fertilidade natural e acidez elevada (VIEIRA, 1975; SANCHEZ; COCHRANE, 1980). A baixa fertilidade dos solos deve-se à sua avançada idade geológica. A maior parte da Amazônia está localizada em um dos dois grandes escudos, o das “Guianas” ao norte e o “Brasileiro” ao sul (MEIRELLES FILHO, 2004).

Contrastando a essa paisagem, há a ocorrência de solos férteis, de coloração escura, exibindo altos teores de fósforo, cálcio, magnésio, zinco e manganês, e valores mais elevados de pH e saturação por bases, além disso, possuem altos teores de matéria orgânica, proporcionando grande potencial de produção. Estes solos são conhecidos regionalmente como Terra Preta de Índio – TPI ou Terra Preta Arqueológica (SOMBROEK, 1966; SMITH 1980; KERN; KÄMPF, 1989; KÄMPF; KERN, 2005).

As Terras Pretas de Índio (Figura 1a) são caracterizadas por exibirem coloração escura, horizonte antrópico com presença de artefatos líticos e/ou cerâmicos, elevada fertilidade e capacidade de retenção de nutrientes (EDEN et al., 1984; KERN; KÄMPF, 1989; LIMA et al., 2002). As TPI da Amazônia são principalmente Latossolos, Argissolos e Cambissolos com o horizonte A antrópico (LIMA et al., 2002). De acordo

com Kämpf e Kern (2005), os solos dos sítios arqueológicos são identificados pelas qualidades distintas em relação ao ambiente circunvizinho. Além da alta fertilidade química, resultante da prolongada ocupação, há a associação com fragmentos de artefatos cerâmicos e líticos, restos de fauna e flora e padrões distintos de vegetação.

São horizontes bem drenados e com textura variando entre arenosa a muito argilosa (KERN; KÄMPF, 1989; LIMA et al., 2002). Quando comparadas aos solos adjacentes, as TPI apresentam o horizonte A mais profundo, variando entre 30 e 60 cm (KERN et al., 2003). Segundo Smith (1980), a grande maioria das TPI possui a espessura do horizonte A variando entre 36 a 73 cm, embora o autor tenha mencionado a ocorrência de TPI com até 2 m.



Figura 1 – Perfis de Terra Preta de Índio (TPI), em (a) perfil de TPI localizado na terra firme; em (b) horizonte antrópico (TPI) sob um Neossolo Flúvico, encontrado na várzea (linhas vermelhas)
Fonte: Teixeira et al. (2004)

Uma das características mais intrigantes das TPI é a manutenção da fertilidade, mesmo após várias décadas de uso. A estabilidade apresentada pelas TPI foi relacionada com os teores de matéria orgânica do solo e com a contribuição

significativa do carbono pirogênico (ZECH et al. 1990; GLASER et al. 2000; LIMA et al. 2001). Glaser et al. (2000) encontraram que a matéria orgânica das TPI é constituída em grande parte (35 - 45%) por “black carbon” (carbono pirogênico ou carvão) enquanto os solos adjacentes apresentaram por volta de 14%.

O carbono pirogênico é formado pela combustão incompleta de materiais orgânicos (DERENNE; LARGEAU, 2001). Os altos teores encontrados nas TPI estão associados a uma elevada e prolongada adição de material orgânico carbonizado, provavelmente, resultado da produção de carvão em fogos domésticos de baixa intensidade para o preparo de alimentos, aquecimento e queima de lixo. O carbono pirogênico persiste nas TPI há pelo menos um século, devido à estabilidade química, decorrente da estrutura aromática que o mesmo possui (GLASER et al 2004). Lehmann et al. (2006) propõem a aplicação de “bio-char” (carvão ou biomassa derivada de carbono pirogênico) no solo como uma maneira inovadora para estabelecer, em longo prazo, o seqüestro de carbono em ecossistemas terrestres.

2.1.5 Ocorrência e distribuição geográfica

As TPI são manchas de solo que ocorrem por toda a Amazônia, sendo encontradas geralmente próximas aos cursos de água, ocupando várzeas, elevações marginais adjacentes (Figura 2), com extensão variando de um hectare (disseminados em solos de terra firme) a centenas de hectares, ao longo de rios e interflúvios (SMITH, 1980; KÄMPF; KERN, 2005). Estão situadas em locais bem drenados, localizados em áreas com posição topográfica que permite boa visualização espacial e acesso aos recursos de diferentes ambientes (SMITH, 1980; KERN; KÄMPF, 1989; KERN et al., 2003; GERMAN, 2004; KÄMPF; KERN, 2005). São encontradas em uma variedade de solos (Latosolos, Argissolos, Neossolos e Espodossolos) e superfícies geomorfológicas, permanecendo com coloração escura mesmo sob intensa lixiviação (SMITH, 1980). Segundo Kern et al. (2003), TPI em Latossolos e Argissolos são mais comuns, estendendo-se através de grandes áreas e localizadas em locais onde não ocorrem inundações periódicas. No entanto, Teixeira et al. (2004) descreveram a ocorrência de uma TPI na várzea (enterrada), sob um Neossolo Flúvico (Figura 1b). A

grande diversidade de ocorrências indica que o tipo de solo, provavelmente, não foi o fator determinante para o estabelecimento de grupos pré-históricos (KERN et al., 2003). Além da Amazônia brasileira, as TPI são encontradas no Equador, Colômbia, Peru, Guianas e Venezuela.

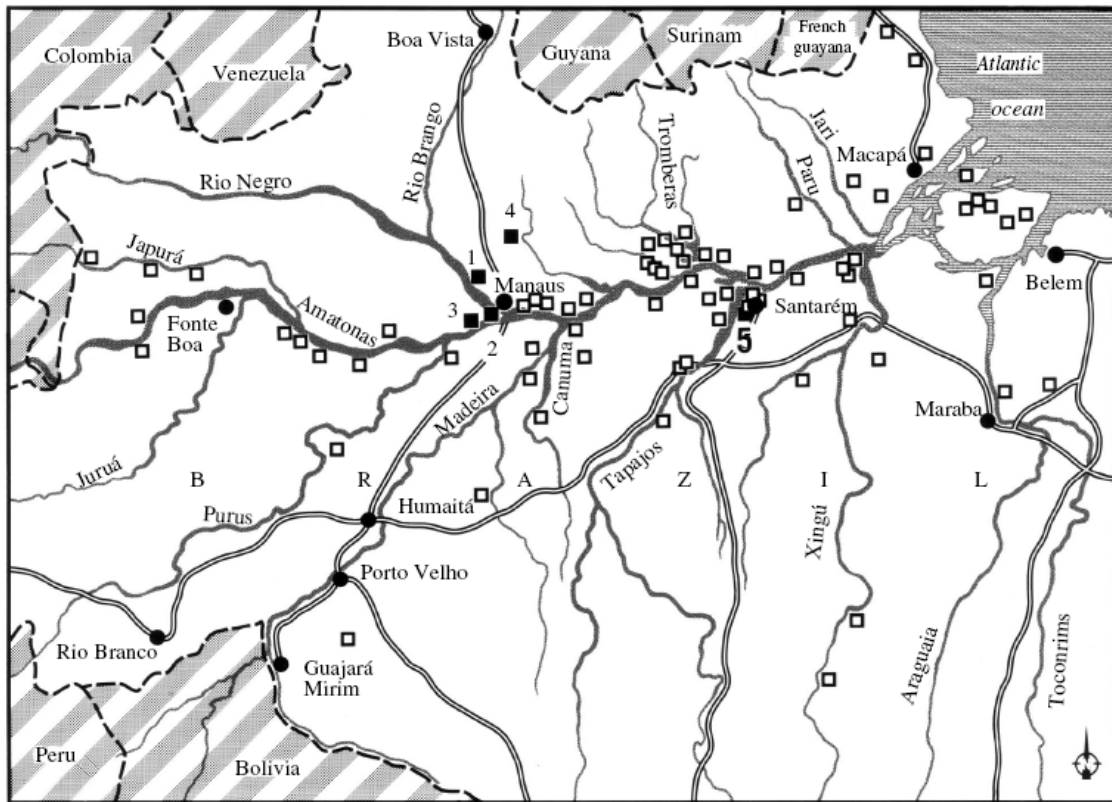


Figura 2 – Distribuição das TPI na Amazônia Central (áreas conhecidas). Fonte: Glaser (2006)

Segundo Sombroek et al. (2003), as TPI ocupam de 0,1 a 0,3% da Bacia Amazônica, correspondendo entre 6000 - 18000 km (6 milhões de km²). As informações a respeito do tamanho dos sítios variam de menos de um hectare em terraços elevados paralelos aos rios (SMITH, 1980; ROOSEVELT, 1987; DENEVAN, 2001) a 400 hectares (ROOSEVELT, 2000). Os sítios encontrados em floresta de terra firme são bem menores que os encontrados em terraços, possuem tamanho médio de 1,4 hectare, variando entre 0,3 a 5,0 ha (SMITH, 1980). De acordo com Kämpf e Kern (2005), grandes extensões de TPI apóiam a concepção de grandes sítios de assentamento pré-histórico ocupados por longos períodos de tempo.

2.1.6 O processo de formação das TPI

Nos dias de hoje, é amplamente aceita a hipótese que as TPI são produtos da ação humana, embora ainda seja questionada se a origem foi antrópica, com a intenção de alterar a qualidade do solo ou formada sem intenção. Os artefatos encontrados nas TPI foram interpretados como resultado de Ameríndios que encontraram um solo naturalmente fértil e o utilizaram para o cultivo de plantas. Assim, segundo essa teoria, a fertilidade natural do solo atraiu a população indígena que descartou vários utensílios (louças de cerâmica e ferramentas de pedra) durante o período de ocupação. No entanto, as investigações pedológicas e geoquímicas mostraram que a mineralogia das TPI e dos solos adjacentes são semelhantes (COSTA et al., 1999; LIMA et al., 2002), indicando que as TPI são horizontes formados devido ao processo de ocupação humana, ou seja, solos de baixa fertilidade natural que foram transformados em solos férteis e produtivos. Dessa forma, o foco da discussão baseia-se em quais atividades humanas levaram à formação das TPI (SMITH, 1980; NEVES et al., 2003).

Para Neves et al. (2003), embora aceita a relação das TPI com a ocupação humana, não significa que as mesmas foram criadas intencionalmente. Entretanto, isto é uma possibilidade. A formação das TPI pode ser o resultado da habitação humana, que originou um produto de forma não intencional, devido ao manejo do solo. Segundo Woods (2003), as conseqüências da atividade de deposição humana (intencional ou não intencional), podem resultar em um enriquecimento do solo, alterando propriedades químicas e físicas. De acordo com Smith (1980), o fósforo (P), em particular, é considerado um dos elementos mais significativos da ocupação humana. Como já mencionado, as TPI contrastam com os solos locais nos teores de fósforo, sempre exibindo teores de P disponível mais elevado. O teor de P encontrado nas TPI é atribuído às cinzas oriundas de fogueiras, ossos de peixe e outros animais, fezes, urina e cascos de tartaruga. Além do P, outros componentes comuns à ocupação humana são encontrados nessas áreas, tais como o carbono, nitrogênio e cálcio. A cor do solo e o pH são modificações secundárias, relacionadas às alterações culturais.

O processo de formação das TPI foi interrompido gradativamente na fase pós-colombiana com o desaparecimento da população indígena (MORAN, 1990). Dessa forma, segundo Kern e Kämpf (2005), a evolução pedogenética teve seqüência com a

participação do homem moderno através das práticas agrícolas com caráter extrativista. Assim, as TPI podem apresentar horizontes evoluídos por processos antrópicos antigos e pedogênese, além da ação humana recente.

Por outro lado, há muitas dificuldades em se explicar o início da formação das TPI. No entanto, devem-se considerar as possibilidades: (1) algumas TPI formadas anteriormente podem ter desaparecido por processos erosivos e de sedimentação, devido às mudanças no nível das águas (efeito pós-glacial); (2) a formação das TPI (atuais) começou apenas por volta de 2.000 – 2.500 AP¹; (3) a matéria orgânica da maioria das TPI mais antigas pode ter sido mineralizada, deixando apenas artefatos inorgânicos para trás, sem a coloração do substrato pela matéria orgânica, e assim, estes sítios estão sub-representados (NEVES et al., 2003).

O início da formação da TPI pode estar correlacionado com o estabelecimento de uma população com estilo de vida sedentária, baseado na agricultura durante o terceiro milênio AP e daí em diante. A agricultura permanente necessita que o solo seja melhorado e as TPI podem, em parte, ser o resultado do manejo do solo (intencional). Além disso, uma vez que a agricultura foi estabelecida na Amazônia, padrões residenciais e econômicos emergiram, os quais foram característicos até o início da colonização européia (NEVES et al., 2003). Segundo Petersen et al. (2001), o estilo de vida sedentário e seu alicerce econômico foram as pré-condições básicas para o desenvolvimento das TPI neste cenário. Algumas pesquisas arqueológicas mostraram que na Amazônia Central alguns sítios arqueológicos foram continuamente ocupados por várias décadas e até durante séculos em alguns assentamentos. Isto sugere que a mobilidade dos assentamentos foi muito mais reduzida durante esse tempo, quando comparada às circunstâncias etnográficas contemporâneas para Ameríndios na região (NEVES et al., 2003 apud NEVES, 2000).

Durante o período de ocupação nos assentamentos houve descarte de resíduos orgânicos, oriundos de resto de comida e outros materiais utilizados, como folha de palmeiras utilizadas nas coberturas das habitações. O material descartado pela população indígena, acumulou-se no solo e modificou suas propriedades. As possíveis fontes da formação das TPI, no contexto de habitação, podem estar associadas com

¹AP = anos antes do presente (antes de 1950, utilizado em datação com radicarbono)

atividade de sepultamento (restos humanos, vestimentas, urnas, etc.) preparo de alimentos (restos de peixe ou caça, frutas, vasilhames, etc.) excrementos, resíduos de moradias (palha, folha de palmeiras, etc.), entre outras atividades. Assim, o processamento de alimentos, principalmente o ato de cozinhar, é muito provável que seja uma das fontes de formação das TPI. Além disso, acredita-se que a densidade populacional e as atividades concentradas, mais do que o próprio tempo, foram os fatores primários na formação das TPI (SMITH, 1980; NEVES et al., 2003). No entanto, a espessura das camadas dentro dos sítios não é uniforme, essa variabilidade dificulta estabelecer inferências confiáveis da taxa de acumulação, do tempo de ocupação e da densidade da população que habitava o local (KÄMPF; KERN, 2005).

2.1.7 Variabilidade das TPI

Ao considerarmos as TPI como produto da ação humana, é provável que ocorra uma variabilidade espacial nas propriedades do solo, refletindo diferentes períodos de ocupação, densidade de populações, padrão de ocupação humana, elementos culturais, ou ainda a disponibilidade de recursos na era pré-colombiana (KÄMPF; KERN, 2005; MADARI et al., 2005). A informação a respeito da variabilidade das propriedades do solo limita-se a indicar a espessura de horizontes e teor mais elevado de nutrientes no centro das áreas, apesar de haver um grande número estudos nas TPI (FALESI, 1972; PABST, 1985; KERN, KÄMPF; 2003).

Segundo Madari et al. (2005) a fertilidade e a produtividade das TPI podem variar entre regiões, sítios ou até mesmo dentro de um mesmo local. Os teores de fósforo tendem a ser mais alto perto de rios maiores, enquanto teores de cálcio são mais uniformemente distribuídos por toda a bacia. Embora ocorra essa variabilidade, algumas propriedades são comuns na maioria das TPI, tais como o alto teor de carbono orgânico, fósforo, cálcio e micronutrientes. Kern e Kämpf (2005) estudaram a variabilidade espacial de propriedades morfológicas e químicas do solo de três sítios arqueológicos no Estado do Pará. A partir desse estudo foi possível interpretar a ação antrópica e a subsequente pedogênese na evolução dessas TPI. Os resultados indicaram que as características presentes nas TPI e nos solos adjacentes, antes da ocupação humana, eram similares. Os solos adjacentes desta região refletem o

ambiente tropical, onde a temperatura e pluviosidade elevada favorecem os processos de hidrólise e lixiviação, sendo que nas áreas de TPI houve um acréscimo da ação humana, por um período de tempo suficiente para diferenciá-las dos solos adjacentes. Na fase pós-colombiana, os processos pedogenéticos predominaram novamente, com o abandono das áreas devido à diminuição da população de índios, por volta de 1500 a 1600 d.C., em decorrência de epidemias, escravização e outras formas de perturbação pelos europeus (NEVES et al., 2003). Assim, a formação e evolução das TPI é produto da superposição de processos antrópicos e pedogênicos.

2.1.8 Os sistemas de uso das TPI

O potencial produtivo das TPI é conhecido por pequenos produtores e ribeirinhos que as utilizam principalmente na produção de grãos, frutas e verduras (Figura 2). Para os pecuaristas e produtores agrícolas comerciais as TPI têm menor importância nas decisões de uso da terra (HIRAOKA et al., 2003).



Figura 3 – Diferentes sistemas de uso das Terras Pretas de Índio, localizadas na Costa do Açutuba e Costa do Laranjal, próximas ao município de Manacapuru, Estado do Amazonas

Neste tópico será abordado o estudo realizado por Hiraoka et al. (2003), tratando dos principais sistemas de uso e manejo nas TPI. A princípio, é preciso levar em consideração que algumas generalizações a respeito do manejo e uso da terra são possíveis, embora as mesmas não sejam uniformes, apresentem variabilidade em relação às propriedades químicas e físicas (dentro e entre os sítios) e que estejam localizadas a distâncias diferentes dos centros consumidores.

Os maiores usuários das TPI são os pequenos produtores que as utilizam para produzir inúmeros tipos de alimento, principalmente para atender suas necessidades. Embora isso ocorra, ocasionalmente, são realizados cultivos de ciclo curto destinados ao mercado consumidor.

A urbanização fez com que a horticultura crescesse para atender o mercado, principalmente os consumidores de frutas e verduras. Assim, produtores e comunidades utilizam as TPI para a produção de laranja, mamão, goiaba, banana, coco, acerola, guaraná, cupuaçu, etc. Além dos frutos, as TPI são utilizadas na produção de milho, mandioca, batata doce, tomate, vagens, pimentão, cebola, pepino e etc. As áreas que estão em pousio geralmente contêm palmeiras regionais, cujas frutas são vendidas, aumentando a receita dos proprietários.

Apesar de serem férteis, as TPI necessitam de um manejo adequado para que ocorra a produção de uma maneira sustentável, caso contrário ocorre a deterioração das propriedades do solo. Pode-se citar o exemplo da demanda do mercado por solos orgânicos, impulsionando a extração das TPI para serem utilizadas na formação de material compostado, muito utilizado em gramados, vasos, quintais e viveiros. Assim, grandes volumes de TPI são removidos e transportados para outros locais, degradando o ambiente em que as mesmas estão inseridas.

Por outro lado, as TPI não são muito utilizadas em sistemas de pastagens devido ao crescimento vigoroso de plantas invasoras que competem com as gramíneas utilizadas na alimentação do gado. Apesar disso, há iniciativas para incorporar manchas de TPI aos sistemas de pastagem de melhor qualidade.

Os sistemas agroflorestais (SAFs) constituem um dos principais sistemas de uso das TPI atualmente. São utilizados na produção de diversos produtos, na alimentação, como remédios, fabricação de utensílios e materiais de construção. O reconhecimento

do papel dos SAFS na economia, na manutenção da agrobiodiversidade e no manejo sustentável do solo tem promovido a reintrodução de práticas indígenas de manejo da terra na região.

Nas TPI, produções maiores e sustentáveis podem ser alcançadas aumentando a diversidade de árvores e arbustos. A elevada capacidade de retenção de água, durante os períodos de seca, é um dos fatores que permite a agrobiodiversidade. Neste contexto, as TPI podem contribuir significativamente para a agricultura sustentável na região, como observado nos cultivos realizados por pequenos produtores, nos quais são alcançadas produções adequadas sem que ocorra a degradação do solo.

De acordo com Kämpf e Kern (2005), a influência humana pós-colombiana nas TPI tem sido significativa. Os diferentes tipos de uso têm alterado e até destruído porções do registro arqueológico preservado nas TPI. Assim, têm-se perdido inúmeras oportunidades de entender a história do comportamento humano pré-histórico na Amazônia.

2.1.9 Cronologia de eventos relacionados às TPI e instituições participantes

Este tópico aborda os eventos realizados para a discussão de temas relacionados às Terras Pretas de Índio. Alguns dos eventos foram organizados especificamente para a discussão do estado da arte das TPI. Outros, de grande porte, tiveram seções específicas para a apresentação de trabalhos, como no caso do “Congresso Mundial de Ciência do Solo”, realizado em 2006 na Filadélfia (EUA). No entanto, o principal evento aconteceu em Manaus – AM, no ano de 2002 quando foi realizado o “Workshop Internacional de Terra Preta Antropogênica”.

Eventos:

Ano: 2001

Evento: Conference of Latin Americanist Geographers – Terra Preta Symposium

Local: Benicassim - Espanha.

Ano: 2001

Evento: Congresso da Sociedade de Arqueologia Brasileira

Local: Rio de Janeiro - RJ

Ano: 2002

Evento: I Workshop Internacional de Terra Preta Antropogênica

Local: Manaus - AM

Ano: 2002

Evento: World Congress of Soil Science

Local: Bangcoc - Tailândia

Ano: 2005

Evento: XXX Congresso Brasileiro de Ciência do Solo - Workshop TERRA PRETA NOVA: A Terra Preta do Índio e sua relevância na agricultura moderna

Local: Recife - PE

Ano: 2006

Evento: World Congress of Soil Science – Amazonian Dark Earth Soils (Terra Preta and Terra Preta Nova): A Tribute to Wim Sombroek

Local: Filadélfia – EUA

Ano: 2007

Evento: Workshop Terra Preta de Índio: as Terras Pretas de Índio da Amazônia Central – estado da arte da sua caracterização e pesquisas no entendimento de sua gênese

Local: Manaus - AM

Ano: 2007

Evento: Workshop Terra Preta de Índio: Recovering the past, regaining the future of Amazonian Dark Earths

Local: Manaus - AM

Instituições:

Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (INPA), Manaus - AM

Embrapa Amazônia Ocidental, Manaus - AM

Universidade Federal do Amazonas, Manaus - AM

Museu Paraense Emílio Goeldi, Belém - PA

Universidade Federal do Pará, Belém - PA

Universidade Estadual do Pará, Belém - PA

Universidade Federal Rural da Amazônia, Belém - PA

Embrapa Amazônia Oriental, Belém - PA

Universidade de São Paulo (USP), São Paulo - SP

ESALQ, Universidade de São Paulo, Piracicaba - SP

CENA, Universidade de São Paulo, Piracicaba - SP

Embrapa Instrumentação Agropecuária, São Carlos - SP

Embrapa Solos, Rio de Janeiro - RJ

Biocarbo, Itabirito - MG

Universidade Federal de Viçosa, Viçosa - MG

Holding Carbon Energetic, Curvelo - MG

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre - RS

Zentrum für Werkstoffanalytiklauf, Pegnitz - Alemanha

Universität Bayreuth - Alemanha

Cornell University - E.U.A.

The University of Kansas - E.U.A.

Wisconsin University - E.U.A.

Universidade da Flórida - E.U.A.

University of Southern Illinois - E.U.A.

International Soil Reference and Information Center (ISRIC) - Holanda

Universidade de Wageningen – Países Baixos

2.2 Propriedades físicas do solo

2.2.1 Granulometria

A análise granulométrica é uma medida da distribuição do tamanho de partículas individuais em uma amostra de solo (GEE; BAUDER, 1986), estimada pela capacidade das partículas passarem através de peneiras com tamanhos definidos ou pela sedimentação das partículas em água. As proporções são geralmente representadas pelo peso relativo das partículas dentro de uma classe de tamanho estabelecida (SHELDRIK; WANG, 1993). De acordo com Schoenholtz et al. (2002), a composição granulométrica é uma propriedade física (qualitativa) de extrema importância no solo, pois controla a retenção (água e nutrientes) e as trocas gasosas. É a propriedade que influencia a maioria das outras propriedades e os processos do solo, além disso, a composição granulométrica muda pouco através do tempo (relativo) para um determinado solo.

2.2.2 Densidade do solo (ρ_s)

A densidade do solo é uma razão de massa do solo seco pelo volume de solo. O volume do solo inclui o volume de sólidos e o espaço poroso. A massa de solo seco é obtida pela secagem da amostra de solo a 105 °C até atingir peso constante, e o volume é igual ao volume que a amostra de solo ocupa no campo (BLAKE; HARTGE 1986). A ρ_s é um parâmetro extremamente útil, é utilizada para calcular a porosidade do solo (α) quando a densidade de partículas (ρ_p) é conhecida, para converter massa em volume e para estimar a massas de volumes de solos com peso muito alto para serem quantificados através de pesagem (CULLEY, 1993).

Para Warrick e Neilson (1980) a ρ_s é uma propriedade dinâmica que é conhecida por exibir baixa (relativa) variabilidade espacial. Os coeficientes de variação para medidas de ρ_s , em horizontes de uma determinada classe de solo, são em torno de 10% e geralmente não excedem esse valor. Assim, poucas amostras de solo podem ser suficientes para estimar a ρ_s média dentro da margem de $\pm 10\%$ do valor real (CULLEY, 1993).

2.2.3 Densidade de partículas (ρ_p)

A densidade de partículas refere-se à densidade das partículas sólidas do solo, é expressa como a razão da massa total das partículas sólidas pelo volume total, excluindo o espaço poroso entre as partículas. A ρ_p é utilizada na maioria das expressões matemáticas onde o volume ou massa de solo está sendo considerado. Dessa forma, relações entre a porosidade, densidade do solo, espaço poroso e taxas de sedimentação de partículas em fluídos são dependentes da ρ_p (BLAKE; HARTGE, 1986).

2.2.4 Porosidade do solo (α)

O espaço poroso (também chamado de vazios) em um solo consiste da porção do volume de solo não ocupado por sólidos, nem mineral nem orgânico. Em condições de campo, o espaço poroso está ocupado por água e ar. As partículas do solo têm formatos irregulares, criando espaços ou poros entre as mesmas, com tamanho, formato e direção irregulares (DONAHUE et al. 1983).

2.2.5 Condutividade hidráulica saturada (K_{sat})

A condutividade hidráulica saturada é uma medida da “facilidade” ou habilidade dos poros do solo em transmitir água. Os fatores que determinam a K_{sat} incluem a composição granulométrica do solo, a estrutura (fissuras, canais de raízes, túneis de minhocas) dos poros, a temperatura da água, a concentração iônica na água e a presença de bolhas de ar nos poros (REYNOLDS, 1993). A K_{sat} é um parâmetro chave para analisar ou modelar fluxo de água e transporte químico na subsuperfície do solo (MONHANTY et al., 1998)

2.2.6 Curva de retenção da água no solo (CRA)

O estado da água no solo é definido pela quantidade de água (θ) e pela força com a qual a mesma é retida na matriz do solo, quantidade de energia ou potencial de água no solo (ψ). Estes atributos do solo são relacionados através de uma função conhecida como a curva característica de retenção de água no solo (OR; WRAITH, 2000).

A curva de retenção permite quantificar a quantidade de água que é retida pelo solo em cada valor de potencial matricial, composto por uma seqüência que geralmente drena a amostra de solo da condição de saturação ($\psi = 0$) até o ponto de murcha permanente ($\psi = -1500$ kPa). As CRA são utilizadas como indicadores diretos e indiretos do comportamento de outras propriedades do solo, como a drenagem, aeração, infiltração e o do padrão do sistema radicular. Além disso, as informações obtidas na CRA podem ser utilizadas para indicar a distribuição do tamanho de poros interpretados em relação à aeração e disponibilidade de água para as plantas (TOPP et al., 1993).

2.2.7 Resistência do solo à penetração de raízes (RP)

O impedimento mecânico ou a resistência à penetração de raízes é um dos fatores mais importantes que determinam a taxa de alongação e desenvolvimento do sistema radicular dentro de um perfil de solo (BENGOUGH; MULLINS, 1990). A quantificação da RP geralmente é obtida com a utilização de um penetrômetro. É uma medida amplamente utilizada por se tratar de uma forma rápida e fácil de avaliar a resistência oferecida pelo solo ao desenvolvimento do sistema radicular (DEXTER et al., 2006).

A RP varia com a composição granulométrica do solo, formato das partículas, mineralogia da argila, conteúdo de óxidos amorfo, conteúdo de matéria orgânica e a composição química da solução do solo (GERARD, 1965; BYRD; CASSEL, 1980; STITT et al., 1982;).

Para um determinado tipo de solo, a RP depende da ρ_s , conteúdo de água e estrutura do solo. A RP diminui com o aumento do conteúdo de água e aumenta com o aumento da densidade do solo. No entanto, em solos com uma estrutura muito solta, o conteúdo de água tem um pequeno efeito na RP, embora este efeito aumente com o aumento da ρ_s , pois o efeito da ρ_s sobre a RP é mais acentuado quando o solo está seco (BENGOUGH et al., 2000).

2.2.8 Estabilidade de agregados

A estabilidade de agregados descreve a habilidade do solo em manter sua estrutura (sólidos e espaços vazios) quando exposto às diferentes forças externas (KAY, 1990). Assim, a estabilidade de agregados determina a susceptibilidade do solo à erosão, formação de crostas, adensamento e compactação (ANGERS; MEHUYS, 1993).

A agregação do solo é influenciada pela capacidade de floculação e natureza dos cátions presentes, a variação do alumínio em função da faixa de pH, a mineralogia do solo, os tipos de ácidos orgânicos presentes, as interações e/ou ligações entre partículas de argila, cátions polivalentes e matéria orgânica além da atividade microbiológica e os tipos de microorganismos envolvidos (CASTRO FILHO et al., 2002 apud CASTRO FILHO, 1998).

2.2.9 Resistência tênsil de agregados (RT) e Friabilidade (F)

A resistência tênsil é definida como o estresse, ou força por unidade de área, requerida para que o solo se rompa mediante a aplicação de uma tensão (DEXTER; WATTS, 2000).

A friabilidade é definida como a tendência que uma massa de solo tem em se desintegrar e se fragmentar, dentro de uma determinada classe de tamanho, sob uma pressão aplicada. A friabilidade é uma propriedade desejável ao se preparar o leito de semeadura e pode ser utilizada como um indicador da condição estrutural do solo (UTOMO; DEXTER, 1981).

2.3 Qualidade do solo

Segundo Karlen et al. (1997), a qualidade do solo pode ser definida como a capacidade de um tipo específico de solo para funcionar, dentro dos limites de um ecossistema natural ou sob manejo, e suportar a produtividade animal e vegetal, mantendo ou melhorando a qualidade do ar e da água, contribuindo para a saúde humana e habitação. Os solos possuem uma variabilidade natural em relação à sua funcionalidade, assim, a qualidade do solo é específica para cada tipo de solo.

Para Dexter (2004) o termo “qualidade” envolve o conceito de ajustar (adequar) para desempenhar alguma função específica ou uma categoria de funções. A qualidade física do solo deve ser considerada em relação às funções específicas do solo. As funções consideradas estão relacionadas à produtividade vegetal e os aspectos de proteção ambiental. A qualidade do solo é um conceito geral e que geralmente contempla a qualidade química, física e biológica do solo. O declínio da qualidade física do solo tem conseqüências sérias para a qualidade química e biológica do solo. Infelizmente, os aspectos químicos e biológicos são avaliados de uma forma isolada, sem uma quantificação adequada da qualidade física ou dos processos físicos que estão ocorrendo no solo, os quais fazem parte do conceito geral da qualidade do solo.

2.3.1 Índices de qualidade do solo

Por definição, um índice de qualidade do solo é uma propriedade ou processo sensível às mudanças relacionadas à funcionalidade do solo (DORAN; JONES, 1996). Para Schoenholtz et al. (2002), os índices de qualidade do solo devem ser adotados se forem:

- (i) sensíveis às práticas de manejo;
- (ii) facilmente mensuráveis;
- (iii) pertinentes através dos lugares ou no tempo;
- (iv) de baixo custo;
- (v) aplicados à quantificação de valores desejados, tais como produtividade ou biodiversidade;
- (vi) adaptáveis à ecossistemas específicos.

2.3.2 Intervalo Hídrico Ótimo (IHO)

De acordo com Letey (1985), são quatro as propriedades físicas do solo que afetam diretamente o crescimento de plantas: água (potencial matricial), temperatura, aeração (porosidade de aeração) e resistência à penetração. Das quatro propriedades, a água é o fator de controle das demais. A deficiência ou excesso de água pode influenciar todos os processos biológicos do solo. Em baixos conteúdos de água os processos podem ser limitados pela disponibilidade de água, pela resistência à penetração ou pelo acesso aos nutrientes. Em altos conteúdos de água, os processos podem ser limitados pela aeração.

A contribuição de Letey (1985) possibilitou que Silva et al. (1994) estabelecessem uma faixa ou conteúdo de água que combina os limites críticos das propriedades físicas do solo com os processos biológicos no solo, representada por uma única variável. Assim, o conceito proposto por Letey (1985) foi expandido para um índice de qualidade do solo mais sensível às alterações estruturais, conhecido como Intervalo Hídrico Ótimo (IHO).

O IHO pode ser definido como a faixa ou conteúdo de água no onde as limitações relacionadas ao crescimento de plantas, associadas ao potencial matricial, aeração e resistência à penetração, são menos limitantes.

Fora da faixa do IHO as limitações associadas ao crescimento de plantas são mais acentuadas do que dentro do IHO. O limite superior do IHO é definido pela umidade em que a porosidade de aeração inferior é a 10% (θ_{PA}) ou pela umidade na capacidade de campo (θ_{CC}), e o limite inferior é definido pela umidade em que a resistência à penetração é o fator restritivo ao crescimento de plantas (θ_{RP}) ou pela umidade no ponto de murcha permanente (θ_{PMP}) (SILVA et al., 1994).

2.3.3 Parâmetro S

O parâmetro “S” é igual ao valor da inclinação, em módulo, da tangente à curva de retenção da água no solo no ponto de inflexão. O valor de “S” igual a 0,035 é

considerado o limite entre solos com boa qualidade estrutural e àqueles com uma qualidade estrutural não adequada ao crescimento de plantas (Figura 4).

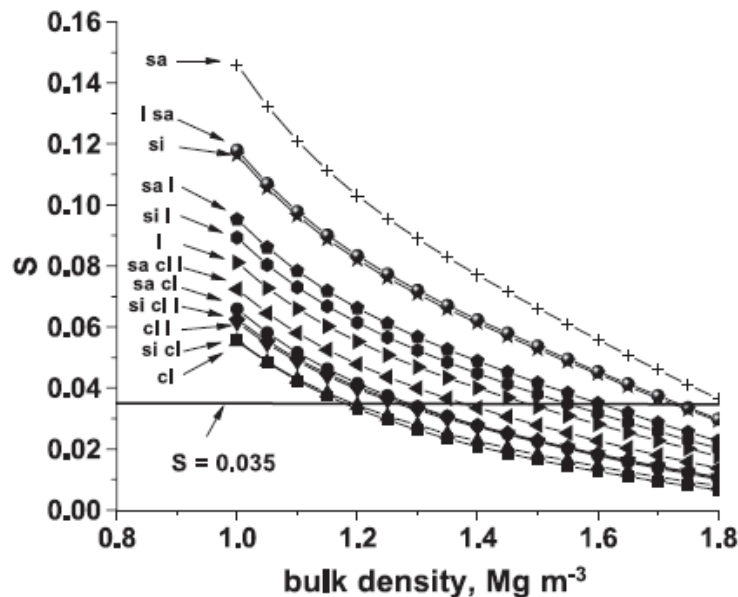


Figura 4 – Valores do índice de qualidade do solo “S” em função da densidade do solo (bulk density, Mg m⁻³). A linha correspondente ao valor de S= 0,035 indica o limite entre solos com boa qualidade estrutural e àqueles com uma qualidade estrutural não adequada ao crescimento de plantas (Dexter, 2003a)

Valores de “S” < 0,02 são associados aos solos considerados degradados. A representação do parâmetro através da letra “S” é explicada por ser uma medida da inclinação (no inglês = **S**lope) da curva de retenção da água no solo e também por representar uma medida da estrutura (no inglês = **S**tructure) do solo (Dexter, 2003c).

Segundo Dexter (2003c), o “S” fornece uma escala que pode ser utilizada com facilidade para comparar a qualidade física de diferentes solos ou os efeitos de diferentes sistemas de manejo do solo.

Uma estrutura lógica a respeito da teoria do “S” é apresentada na Figura 5. Para se entender a estrutura é necessário definir alguns conceitos utilizados no diagrama:

S = corresponde ao valor da inclinação, em módulo, da tangente à curva de retenção da água no solo no seu ponto de inflexão;

F = Friabilidade, definida como a tendência que uma massa de solo tem a se desintegrar e quebrar em um determinado tamanho de pequenos fragmentos sob a aplicação de uma pressão (UTOMO; DEXTER, 1981);

Hard-Setting = é um atributo do solo que caracteriza horizontes, que quando secos, desenvolvem alta resistência mecânica e estruturação aparente pouco expressa ou ausente (maciça) e quando úmidos perdem boa parte dessa resistência, tornando-se friáveis (GIAROLA et al., 2003; McDONALD et al., 1998; MULLINS et al., 1990; MULLINS, 1999). Segundo Dexter (2003b) isso ocorre, principalmente, devido ao menisco formado pelas moléculas de água que restam entre as partículas do solo durante o processo de secamento.

Workability = definido como o tamanho que os agregados do solo permanecem após as operações de preparo (DEXTER, 2003b).

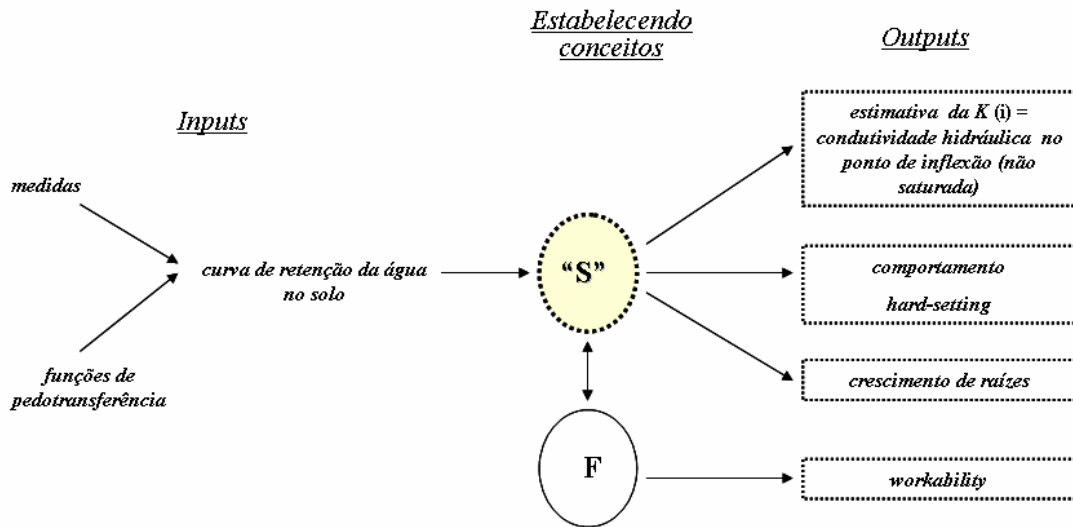


Figura 5 – Diagrama contendo a estrutura lógica do parâmetro "S". O diagrama mostra como os "inputs" (dados de entrada) levam às estimativas das propriedades físicas do solo e o comportamento dessas propriedades exibidos nos "outputs" (saídas). Ao centro estão os conceitos (S e F) que fazem a ligação entre os "inputs" e os "outputs" (Adaptado de Dexter, 2003c)

2.4 Material e métodos

2.4.1 Descrição das áreas de estudo

Para a realização do estudo foram escolhidas duas localidades contendo classes de solos diferentes (Latossolo e Argissolo). Dentro de cada localidade foi escolhido um local contendo a Terra Preta de Índio (TPI) e um local com o solo adjacente. A TPI é caracterizada pela presença do horizonte A antrópico e o solo adjacente é o solo que representa a classe de solo escolhida, sem a presença do horizonte A antrópico. A localização geográfica das áreas onde foram realizadas as coletas de solo é exibida na Figura 7.

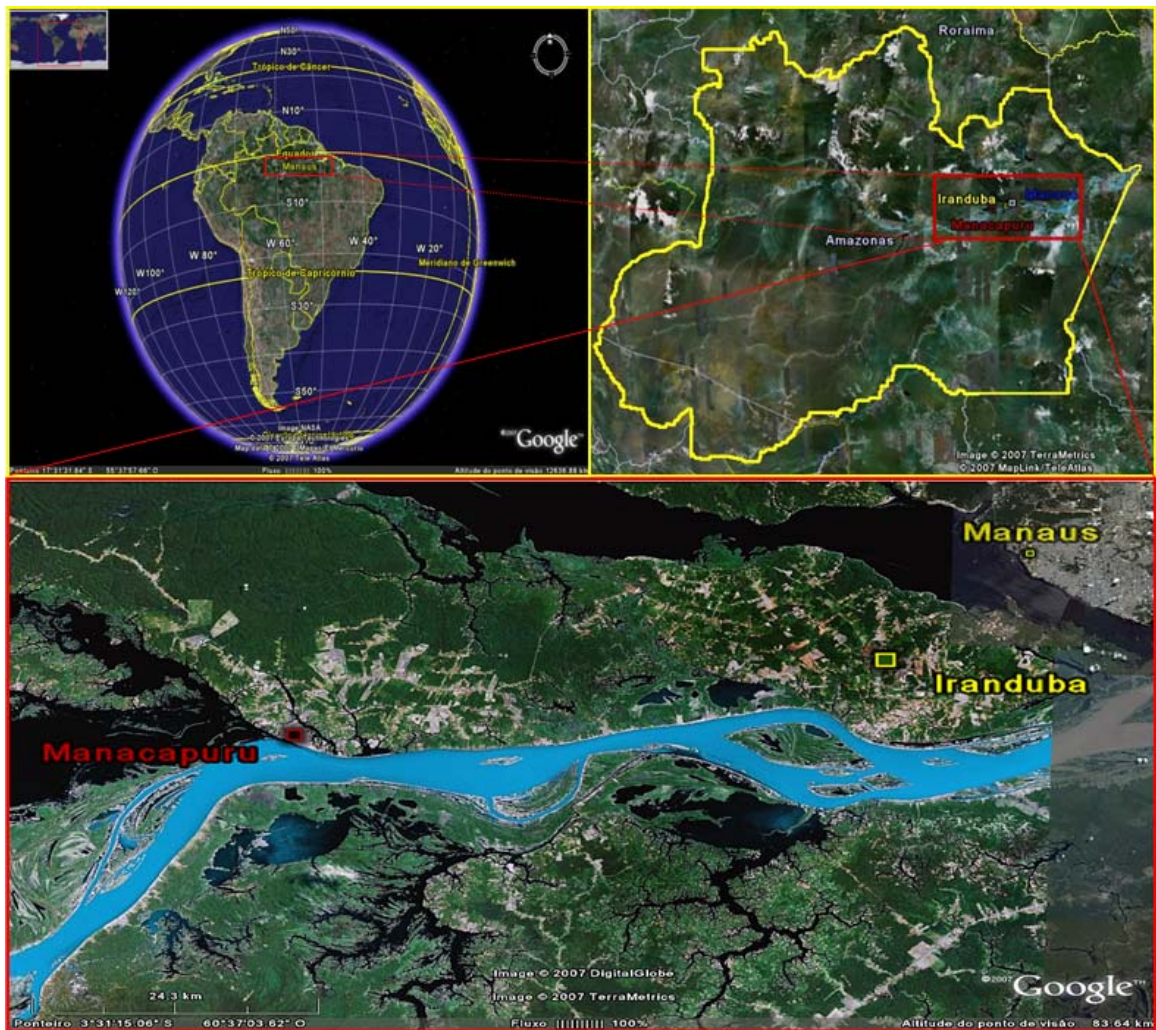


Figura 7 - Localização geográfica das áreas de estudo, no detalhe os municípios de Iranduba e de Manacapuru, localizados no Estado do Amazonas

Argissolo

A primeira área está localizada na estação experimental da EMBRAPA Amazônia Ocidental (Campo Experimental do Caldeirão) no município de Iranduba, Estado do Amazonas, localizado a aproximadamente 22 km de Manaus (Figura 7). O clima da região é classificado como tropical chuvoso e úmido.

O local onde as amostras da TPI foram retiradas está situado sob uma floresta secundária com aproximadamente 20 anos de idade (Figura 8).

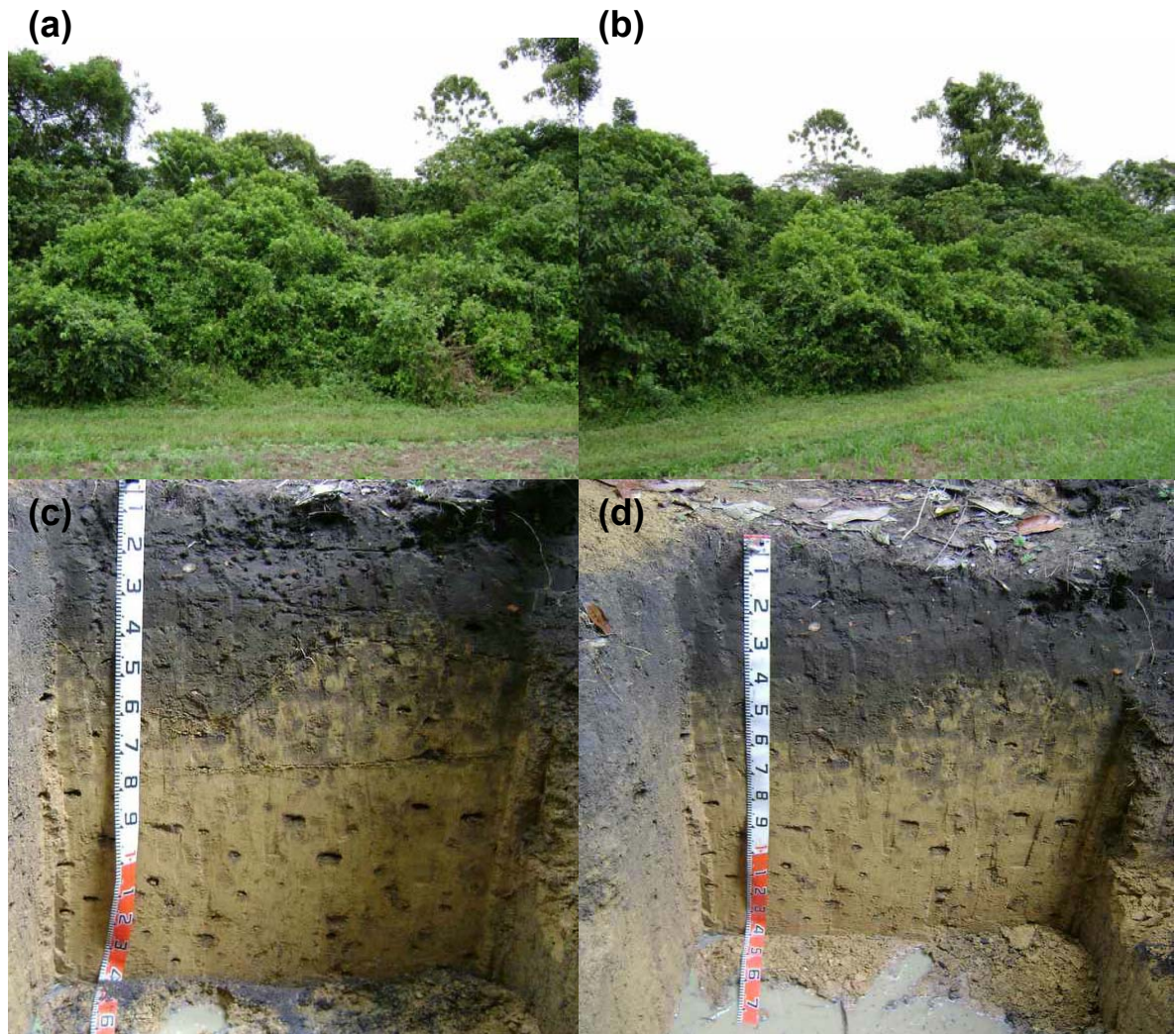


Figura 8 – Áreas onde foram realizadas as amostragens de solo, em (a) e (b) floresta secundária (capoeira), em (c) e (d) Terra Preta de Índio, localizados na Estação experimental da EMBRAPA Amazônia Ocidental, município de Iranduba, Estado do Amazonas

O local onde as amostras do solo adjacentes foram coletadas está situado sob uma floresta secundária (Figura 9), localizada a alguns metros da faixa de ocorrência da TPI. O solo adjacente foi classificado como Argissolo Amarelo Tb Distrófico (Figura 3).



Figura 9 – Áreas onde foram realizadas as amostragens de solo, em (a) e (b) floresta secundária (capoeira), em (c) e (d) perfil de um Argissolo (solo adjacente), localizados na Estação experimental da EMBRAPA Amazônia Ocidental, município de Iranduba, Estado do Amazonas

Latossolo

A segunda área está localizada em uma pequena propriedade agrícola dentro de uma extensa faixa de TPI, denominada Costa do Laranjal, situada no município de Manacapuru, Estado do Amazonas, localizado a aproximadamente 80 km de Manaus (Figura 7). O clima da região é classificado como tropical chuvoso e úmido.

O local onde as amostras da TPI foram retiradas está situada sob um pomar de laranja (Figura 10).



Figura 10 – Áreas onde foram realizadas as amostragens de solo, em (a) e (b) pomar de laranja, localizados na Costa do Laranjal, município de Manacapuru, Estado do Amazonas

Pelo fato da Terra Preta de Índio estar localizada em um pomar de laranja, não foi possível a abertura de um perfil para a descrição morfológica do solo. Dessa forma, a descrição e classificação do solo foram realizadas em uma área próxima ao local de amostragem. A área escolhida para a abertura do perfil possui características semelhantes ao local de coleta do solo (Figura 11).



Figura 11 – Perfil de Terra Preta de Índio próximo ao local de amostragem, em (a) e (b) Terra Preta de Índio, em (c) detalhe de um fragmento de cerâmica encontrado no perfil de solo, em (d) o contraste entre blocos de TPI e o solo adjacente (Latosolo), localizados na Costa do Laranjal, município de Manacapuru, Estado do Amazonas

O solo adjacente foi classificado como Latossolo Amarelo Tb Distrófico, situado sob uma área de floresta secundária, a poucos metros da área de ocorrência da TPI.

2.4.2 Amostragem de solo

A amostragem de solo foi realizada em cada uma das quatro áreas selecionadas, retirando-se 30 amostras de solo com estrutura indeformada (anéis volumétricos de 5 cm de altura x 5 cm de diâmetro) na profundidade de 0-0,5 m e duas amostras de solo (estrutura indeformada) com o formato de blocos (7 x 15 x 22 cm) utilizando-se caixas de ferro galvanizado para o acondicionamento das amostras (Figura 16), na profundidade de 0-0,15 m.

2.4.3 Coleta e preparo das amostras

No laboratório as amostras coletadas em anéis volumétricos foram preparadas, retirando-se o excesso de solo, de maneira que o solo amostrado ocupasse somente o volume interno do anel. Em seguida, uma tela permeável foi colocada no fundo dos anéis de maneira que a mesma permita o fluxo de água/ar e impeça a perda de solo. Após a realização deste procedimento os anéis foram saturados através da elevação gradual de uma lâmina de água numa bandeja.

As amostras coletadas em blocos de ferro galvanizado foram colocadas em bandejas de plástico contendo uma pequena lâmina de água (± 1 cm). O objetivo deste procedimento é iniciar o processo de umedecimento (capilaridade), tornando o bloco de solo friável para o destorroamento manual e obtenção de agregados de solo.

As análises químicas foram realizadas a partir de amostras de terra retiradas dos blocos de solo. O pH do solo foi medido com um eletrodo de vidro em solução do solo com relação 1:2,5 em água destilada e KCl 1M. O cálcio (Ca), magnésio (Mg) e alumínio (Al) foram extraídos por KCl 1 mol/L e determinados por espectrometria de absorção atômica. Para o fósforo (P), potássio (K), ferro (Fe), zinco (Zn) e manganês (Mn) o extrator utilizado foi o Mehlich-1 e para o H⁺Al o extrator utilizado foi o acetato de cálcio 0,5 mol/L – pH 7,0. O carbono orgânico foi medido pelo método Walkley-Black, com modificações descritas em Embrapa (1997). Na análise de todos os elementos descritos a metodologia utilizada foi de acordo com Embrapa (1997).

2.4.4 Características químicas

As características químicas dos horizontes dos solos adjacentes e das TPI são exibidos na Tabela 1:

Tabela 1 - Características químicas dos horizontes das Terras Pretas de Índio e dos solos adjacentes localizados nos municípios de Iranduba e de Manacapuru, Estado do Amazonas

Solo	pH H ₂ O	C* g kg ⁻¹	P --- mg kg ⁻¹ ---	K ---	Ca ----- cmol kg ⁻¹ -----	Mg -----	Al -----	H+Al -----	V %	Fe ----- mg kg ⁻¹ -----	Zn -----	Mn -----
Latossolo	4,13	28,1	9	32	0,5	0,1	1,9	10,43	7	209	6	8
<i>TPI</i>												
Latossolo	6,14	50,3	260	57	12,5	1,8	0,0	7,08	67	26	37	287
Argissolo	4,83	24,7	32	55	2,9	0,5	0,3	11,28	24	102	15	50
<i>TPI</i>												
Argissolo	5,17	40,1	140	37	7,1	1,2	0,1	3,95	68	35	31	140

* Walkley-Black

2.5 Análises

2.5.1 Granulometria e carbono do solo

As análises granulométricas e de carbono orgânico do solo foram realizadas a partir de amostras de terra retiradas dos blocos de solo. A análise granulométrica foi realizada pelo método da pipeta (EMBRAPA, 1997) e os dados de carbono orgânico do solo foram obtido por cromatografia gasosa utilizando um Analisador Automático (Elementar CHNOS Vario EL – Alemanha).

2.5.2 Umidade gravimétrica (θ_g)

A umidade gravimétrica foi obtida pela secagem da amostra a 105°C até massa constante e calculada pela seguinte equação:

$$\theta_g = \left(\frac{msu - mss}{mss} \right) \quad (1)$$

Onde θ_g = umidade gravimétrica (kg kg^{-1}); m_{su} = massa de solo úmida (kg) e m_{ss} = massa de solo seco a 105°C (kg).

2.5.3 Umidade volumétrica (θ)

A umidade volumétrica foi obtida pela seguinte equação:

$$\theta = \left(\frac{\theta_g \rho_s}{\rho_a} \right) \quad (2)$$

Onde θ = umidade volumétrica ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$); θ_g = umidade gravimétrica (kg kg^{-1}); ρ_s = densidade do solo (Mg m^{-3}) e ρ_a = densidade da água (Mg m^{-3}).

2.5.4 Condutividade hidráulica saturada (K_{sat})

Após a saturação das amostras de solo (anéis volumétricos), foi escolhido um total de doze anéis de cada área amostral para a determinação da condutividade hidráulica saturada. A K_{sat} foi obtida de acordo com método da carga decrescente (REYNOLDS; ELRICK, 2002). As amostras foram colocadas em um equipamento para a aplicação de carga hidráulica conforme ilustrado na Figura 12. Este equipamento é composto de um recipiente com um orifício, que durante sua abertura permite que a água escoe estabelecendo um fluxo de água através da amostra de solo colocada no interior do recipiente. O deslocamento de água sobre a amostra de solo, de altura L , no tempo t , corresponde a um deslocamento de água entre duas alturas (h_0 e h_1), dessa forma a K_{sat} pode ser calculada por meio da seguinte equação:

$$K_{sat} = \left(\frac{\phi}{\phi_s} \right)^2 \left(\frac{L}{t} \right) \text{Ln} \left(\frac{h_0}{h_1} \right) \quad (3)$$

Onde ϕ = diâmetro do anel cilíndrico sem solo (m); ϕ_s = diâmetro do anel com solo (m); L , h_0 e h_1 são alturas dadas em metros (m), t é o tempo em segundos (s) e, K_{sat} é a condutividade hidráulica saturada $m\ s^{-1}$.

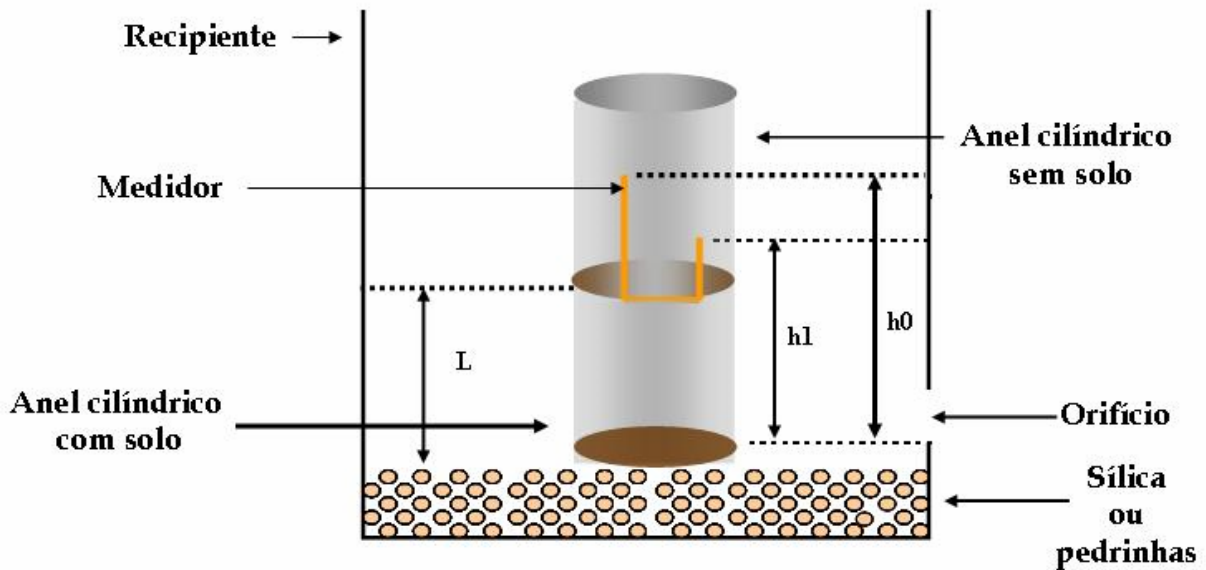


Figura 12 – Esquema ilustrado dos equipamentos utilizados para determinar a condutividade hidráulica saturada pelo método de carga decrescente

2.5.5 Curvas de retenção da água no solo e de resistência à penetração de raízes (RP)

Após a realização das medidas de K_{sat} , os anéis volumétricos foram colocados novamente dentro de uma bandeja com água para garantir que continuassem saturados. Após um período de 24 horas na bandeja com água, as amostras foram subdivididas em seis grupos de cinco repetições e submetidas aos seguintes potenciais (ψ): -5, -10, -30, -50, -100, -200 kPa, através de pressões aplicadas em placas porosas conforme Klute (1986). As placas foram colocadas dentro de painéis de pressão comuns adaptadas para o procedimento de extração de água (Figura 13a). A outra parte da curva de retenção da água no solo foi obtida mediante o destorroamento dos

blocos de solo coletados nas caixas de ferro galvanizado para a obtenção de agregados de solo. Utilizando-se de uma peneira, agregados com diâmetro médio de 4,0 mm foram retirados dos blocos de solo e em seguida submetidos aos potenciais de -400, -800 e -1500 kPa. Um conjunto de panelas próprias para o procedimento de extração de água em altas tensões (Figura 13b) foi utilizado para completar a determinação da curva de retenção da água no solo.

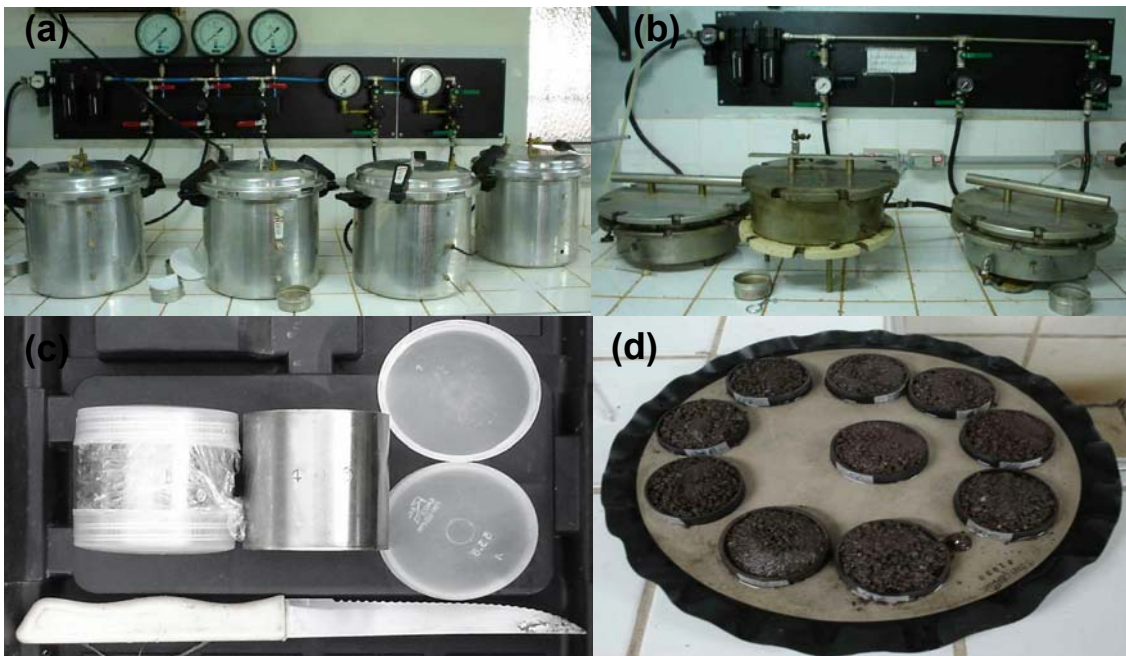


Figura 13 – Equipamentos utilizados para a determinação da curva de retenção da água no solo, em (a) panelas de pressão comuns adaptadas para a extração de água em baixas tensões, em (b) panelas desenvolvidas para a extração de água em altas tensões, em (c) anéis volumétricos utilizados na coleta de amostras indeformadas e em (d) agregados de solo utilizados em altas tensões. Laboratório de Física do Solo, ESALQ/USP, Piracicaba

Ao final do procedimento de determinação da curva de retenção, os dados obtidos foram ajustados à equação de van Genuchten (1980) para a obtenção dos parâmetros θ_s , θ_r , α , m e n , dada pela seguinte expressão:

$$\theta = \theta_{res} + \frac{\theta_{res} - \theta_{sat}}{\left[1 + (\alpha |\psi|)^n\right]^m} \quad (4)$$

Onde θ = umidade volumétrica do solo ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$); θ_{res} = umidade volumétrica residual ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$); θ_{sat} = umidade volumétrica de saturação ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$); $|\psi|$ = potencial matricial (cm); adotando-se a restrição: [$m = 1-(1/n)$; α (hPa^{-1})] e n são parâmetros empíricos do modelo.

À medida que as amostras de solo eram retiradas das placas, iniciava-se o procedimento de leituras de resistência à penetração. Para determinação da RP foi utilizado um penetrômetro desenvolvido no Laboratório de Física do Solo da ESALQ/USP (Figura 14a) descrito por Tormena et al. (1998).

As medidas de RP foram obtidas através de um sistema automatizado de aquisição de dados e armazenadas num arquivo de texto do próprio sistema. Foram descartadas as medidas feitas na superfície da amostra até 1,0 cm de profundidade uma vez que a RP aumenta até uma determinada profundidade, e depois tende a tornar-se constante. A frequência de amostragem corresponde à coleta de um valor de RP a cada 0,6767 segundos, obtendo-se aproximadamente 200 leituras, das quais um valor médio foi utilizado (Figura 14b). O sistema de aquisição de dados fornece os valores em kgf, sendo que estes foram convertidos para MPa. O procedimento de leituras de RP foi efetuado em todas as amostras de solo (amostras indeformadas), exceto àquelas em forma de agregados. Dessa forma, obteve-se a curva RP em função da curva de retenção da água no solo.

A curva de resistência à penetração, relação funcional entre a resistência à penetração (RP) e a umidade volumétrica do solo (θ), foi ajustada por meio da equação utilizada por Busscher et al. (1997), descrita pela seguinte equação

$$RP = a \theta^b \quad (5)$$

Onde: RP = resistência do solo à penetração (MPa); θ = umidade volumétrica do solo ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$); a e b = coeficientes empíricos da equação.

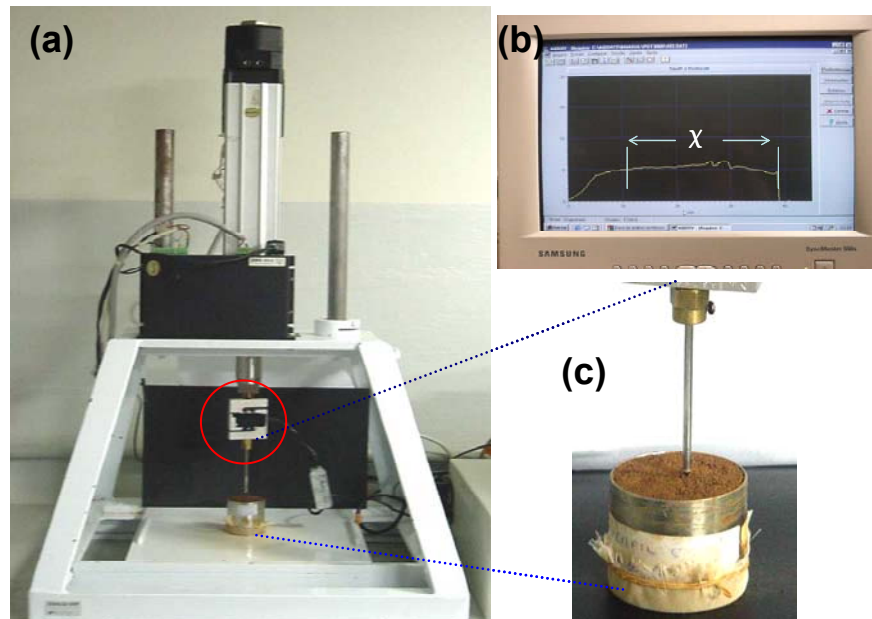


Figura 14 – Equipamentos utilizados para a determinação da resistência do solo à penetração de raízes, em (a) penetrômetro de laboratório, no detalhe a célula de carga (20 kg), em (b) layout do software de aquisição de dados, no detalhe a área do gráfico considerada para as medidas de RP, em (c) detalhe da agulha de 4,0 mm acoplada à célula de carga. Laboratório de Física do Solo, ESALQ/USP, Piracicaba

2.5.6 Densidade de partículas (ρ_p)

As determinações de densidade de partículas do solo foram realizadas utilizando-se um picnômetro de gás, modelo ACCUPYC 1330 (Micromeritics Instrument Corporation®). As amostras de solo utilizadas nas análises foram passadas em peneiras de 2,0 mm de abertura e secas em estufa a aproximadamente 45° C por 24 horas. Após a secagem, retirou-se aproximadamente 8,0 g de solo seco para serem processados no picnômetro. O sistema de aquisição de dados do equipamento realiza três leituras e fornece ao final da análise um valor médio de densidade de partículas.

2.5.7 Densidade do solo (ρ_s) e volume de poros

Terminadas as séries de leitura de RP, as amostras foram levadas à estufa onde foram secas a 105°C por 24 horas, para a determinação do conteúdo da massa de solo seco e assim obter-se a densidade do solo (ρ_s) conforme Blake e Hartge (1986), dada pela seguinte expressão:

$$\rho_s = \left(\frac{m_{ss}}{vt} \right) \quad (6)$$

Onde ρ_s = densidade do solo (Mg m^{-3}); m_{ss} = massa de solo seco a 105°C (Mg); vt = volume total (m^3).

A porosidade total do solo (α) foi calculada a partir dos valores de densidade do solo e de densidade de partículas, segundo a expressão:

$$\alpha = [1 - (\rho_s / \rho_p)] \quad (7)$$

Onde α = porosidade total do solo ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$); ρ_s = densidade do solo (Mg m^{-3}); ρ_p = densidade de partículas (Mg m^{-3}).

A macroporosidade (poros > 0,03 mm) foi calculada pela diferença entre o volume do conteúdo de água no potencial de -5 kPa e a porosidade total:

$$\text{Macroporosidade} = \alpha - \theta_{-5\text{kPa}} \quad (8)$$

Onde Macroporosidade ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$); α = porosidade total do solo ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$); $\theta_{-5\text{kPa}}$ = umidade do solo no potencial de -5 kPa ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$).

A partir dos valores de α foi possível calcular os valores de umidade em que a porosidade de aeração (Pa) é ≤ 10 %:

$$\alpha = [1 - (\rho_s / \rho_p)] - 0,1 \quad (9)$$

2.6 Qualidade estrutural do solo

2.6.1 Estabilidade de agregados

Para a realização das análises de estabilidade de agregados foram coletadas amostras indeformadas de solo na profundidade de 0-0,1 m. No laboratório as amostras foram colocadas para secar ao ar por um período de 24 horas. Após a secagem as amostras foram destorroadas manualmente quebrando-se os agregados maiores em tamanhos menores. Em seguida todo o material foi passado em duas peneiras, uma de 4,0 mm e outra de 2,0 mm, obtendo-se agregados de solo com esta classe de diâmetro (Figura 15a).

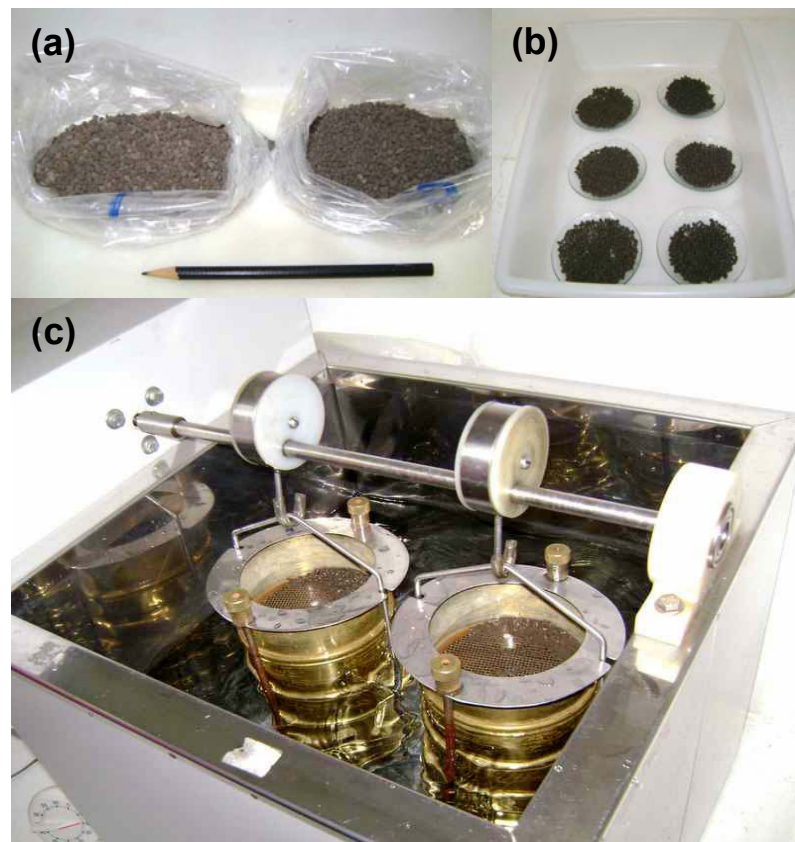


Figura 15 – Materiais e equipamentos utilizados para a determinação da estabilidade de agregados do solo, em (a) agregados de solo após o peneiramento entre 2,0 e 4,0 mm; em (b) processo de umedecimento dos agregados em placas de vidro, em (c) aparelho de oscilação vertical (Modelo MA 148) com capacidade para dois jogos de peneiras. Laboratório de Física de Solos, EMBRAPA Amazônia Ocidental, Manaus

Terminado o processo de peneiramento, retirou-se uma quantidade de 20 g de solo para a determinação da umidade e 20 g para a realização do teste de estabilidade de agregados. A amostra retirada para a determinação da umidade foi colocada em estufa a 105°C por 24 horas. As amostras de solo retiradas para o teste foram colocadas em uma placa de vidro e umedecidas continuamente durante um período de 2 horas (Figura 15b) utilizando-se um spray de água. Este procedimento garantiu que as amostras estivessem completamente saturadas para a realização do teste.

Após o umedecimento as amostras de solo foram colocadas dentro de uma peneira de 2,0 mm que faz parte de um jogo composto por outras 4 peneiras de 1,0 mm, 0,5 mm, 0,25 mm e 0,106 mm. As peneiras foram empilhadas e colocadas dentro do aparelho de oscilação vertical (Figura 15c) na seguinte seqüência: 2,0 mm (parte superior), 1,0 mm, 0,5 mm, 0,25 mm e 0,106 mm (parte inferior). Dentro do aparelho, as amostras foram agitadas durante 15 minutos, com uma amplitude de 4,0 cm de altura e 66 oscilações por minuto. Ao término do processo de agitação, o conteúdo de cada peneira foi transferido para um recipiente e em seguida levado à estufa para secagem (24 horas, 105°C).

O princípio do método baseia-se em medir a quantidade e distribuição do tamanho dos agregados que são estáveis em água, relacionando-os com os que não desintegram pela tamisação. O procedimento adotado está de acordo com a metodologia proposta por Kemper e Chepil (1965) com modificações de acordo com EMBRAPA (1997).

A estabilidade de agregados é expressa pelo diâmetro médio geométrico (DMG), obtido pela seguinte equação:

$$DMG = \exp \left\{ \frac{\sum p_i \ln d_i}{\sum p_i} \right\} \quad (10)$$

Onde p_i = peso dos agregados retidos em cada uma das peneiras (g) e $\ln d_i$ = logaritmo natural do diâmetro médio das classes de peneiras utilizadas (mm).

2.6.2 Resistência tênsil de agregados e friabilidade

A resistência tênsil dos agregados (Y_{\max}) foi determinada utilizando-se um dinamômetro eletrônico digital, modelo Lutron FG-20kg-323 (Figura 16c), fabricado pela Impac (<http://www.impac.com.br>), através dos procedimentos e preparo de amostras descritos por Imhoff et al. (2002), calculada conforme Dexter e Kroesbergen (1985), a partir do diâmetro efetivo do agregado, proposto por Watts e Dexter (1998), por meio da eq. (11):

$$Y_{\max} = 0,576 \times \left(\frac{P}{D^2} \right) \quad (11)$$

Onde: 0,576 = valor da constante de proporcionalidade da relação entre o estresse compressivo aplicado e o estresse tênsil gerado no interior do agregado; P = força aplicada no ponto de fratura do agregado (N); D = o diâmetro efetivo de cada agregado (m).

Considerando que a densidade dos agregados é constante, o diâmetro efetivo, sugerido por Watts e Dexter (1998) é calculado pela eq. (12):

$$D_{\text{efetivo}} = D_m \cdot \left(\frac{M}{M_0} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (12)$$

Onde: D_m = diâmetro médio dos agregados (mm), calculado pela média entre os valores das aberturas das malhas das peneiras utilizadas na separação dos agregados; M = massa do agregado seco a 105 °C (g); M_0 = massa média dos agregados (g).

A friabilidade do solo (F) foi calculada através do método do coeficiente de variação proposto por Watts e Dexter (1998):

$$F = \frac{\sigma_y}{Y} \pm \frac{\sigma_y}{Y\sqrt{2n}} \quad (13)$$

Sendo: σ_y = desvio padrão dos valores de RT medidos; Y = média dos valores de RT obtidos e o n = número de repetições. O segundo termo é o erro padrão do coeficiente de variação.

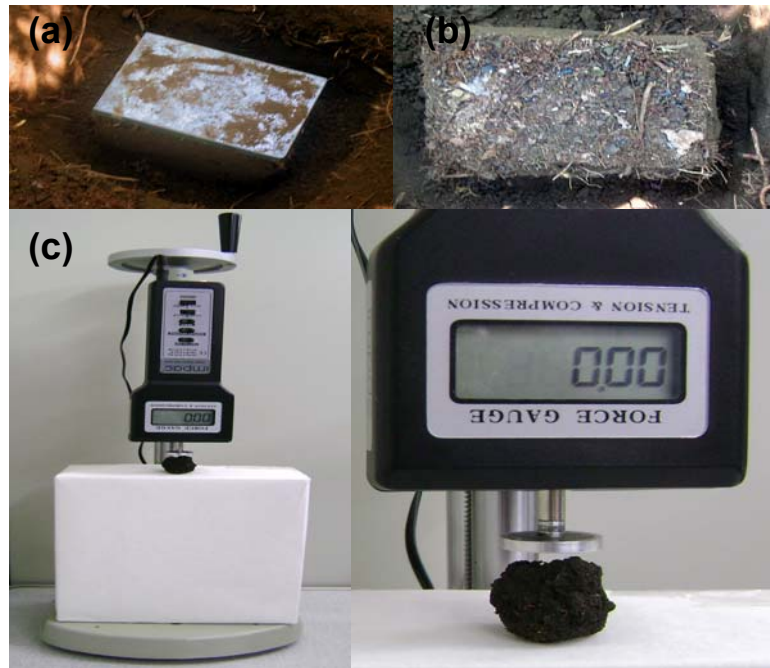


Figura 16 – Blocos de solo e equipamento utilizado para a determinação da resistência tênsil de agregados do solo, em (a) bloco de solo de um dos solos adjacentes; em (b) bloco de solo de uma das Terras Pretas de Índio, em (c) dinamômetro eletrônico digital. Laboratório de Física do Solo, ESALQ/USP, Piracicaba

2.7 Indicadores de Qualidade Física do Solo

2.7.1 Intervalo Hídrico Ótimo (IHO)

O procedimento de estimativa do Intervalo Hídrico Ótimo seguiu a metodologia descrita por Silva et al. (1994), onde é necessária a obtenção de alguns parâmetros e das seguintes considerações:

- (i) a umidade do solo na capacidade de campo (θ_{CC} , no potencial de -10 kPa) (HAISE et al., 1955);
- (ii) a umidade do solo no ponto de murcha permanente (θ_{PMP} , no potencial de -1500 kPa) (RICHARDS; WEAVER, 1944);

(iii) a umidade do solo em que a porosidade de aeração é $\leq 10\%$ (θ_{PA}) (GRABLE; SIEMER, 1968), calculada como:

$$[1 - (\rho_s / \rho_p)] - 0,1 \quad (14)$$

Onde os valores de ρ_p foram medidos para cada uma das amostras utilizando o picnômetro de gás citado no item 2.5.6;

(iv) a umidade do solo em que a RP é 2,0 MPa (θ_{RP}) (LIPIEC; HÄKANSSON, 2000). Os itens (i) e (ii) foram determinados a partir da curva de retenção de água no solo, enquanto o item (iv) foi estimado a partir da curva de resistência do solo à penetração.

O IHO foi calculado com a diferença entre o limite superior e o inferior dos conteúdos de água. São quatro as possibilidades no cálculo do IHO, dependendo dos valores dos quatro parâmetros (WU et al., 2003):

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

$$\mathbf{IHO} = \theta_{CC} - \theta_{PMP};$$

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

$$\mathbf{IHO} = \theta_{CC} - \theta_{RP};$$

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

$$\mathbf{IHO} = \theta_{PA} - \theta_{PMP};$$

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

$$\mathbf{IHO} = \theta_{PA} - \theta_{RP}.$$

Para a realização dos cálculos matemáticos e estatísticos, que estão inseridos na metodologia do IHO, foi utilizada uma rotina dentro do ambiente do software estatístico SAS, desenvolvida por Leão et al. (2005).

2.7.2 Parâmetro S

A estimativa do “S” necessita dos parâmetros gerados a partir da curva de retenção da água no solo ajustados ao modelo de van Genuchten (1980). Assim, o parâmetro S pode ser calculado como o valor da inclinação, em módulo, da tangente à curva de retenção no seu ponto de inflexão (DEXTER, 2004a), conforme eq. (15):

$$S = -n (\theta_{\text{sat}} - \theta_{\text{res}}) \left[\frac{2n-1}{n-1} \right] \left(\frac{1}{n} \right)^{-2} \quad (15)$$

Onde θ = umidade volumétrica do solo ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$); θ_{res} = umidade volumétrica residual ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$); θ_{sat} = umidade volumétrica de saturação ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$); $|\psi|$ = potencial matricial (kPa) e n é um parâmetro empírico (MUALEM, 1976).

2.8 Análises estatísticas

Todas as análises estatísticas deste trabalho foram feitas utilizando o software SAS (Statistical Analysis System Institute, 2000). A análise exploratória dos dados foi realizada utilizando a rotina do PROC MEANS. Ao final, os resultados foram submetidos à análise de variância (two-way Anova), utilizando a rotina do PROC GLM e as médias foram comparadas pelo teste (LSD) considerando a probabilidade de erro de no máximo 5% para se considerar significativa a diferença entre as médias. A normalidade dos dados de densidade do solo e de resistência tênsil foi testada por meio do teste estatístico de Shapiro-Wilk com o objetivo de verificar se os dados foram extraídos de uma população com distribuição normal.

2.9 Resultados

2.9.1 Curva de retenção da água no solo (CRA) e curva de resistência à penetração (CRP)

Os dados referentes à granulometria, carbono orgânico do solo e disponibilidade de água dos horizontes das TPI e dos solos adjacentes são apresentados na Tabela 2:

Tabela 2 - Dados da análise granulométrica, carbono orgânico do solo (C), teores de água na capacidade de campo (θ_{CC}), no ponto de murcha permanente (θ_{PMP}) e água disponível (θ_{AD}) dos horizontes das Terras Pretas de Índio e dos solos adjacentes

Solo	Argila	Silte	Areia	C*	θ_{CC}	θ_{PMP}	θ_{AD}
	<0,002 mm	0,05-0,002 mm	2-0,05 mm				
----- g kg ⁻¹ -----				----- m ³ m ⁻³ -----			
Latossolo	310	60	630	31,80 (0,2)	0,28 (0,6)	0,16 (0,6)	0,12 (17,5)
TPI Latossolo	390	100	510	51,50 (2,5)	0,36 (1,5)	0,23 (0,3)	0,13 (11,9)
Argissolo	170	60	770	26,10 (11,5)	0,21 (0,7)	0,11 (0,3)	0,10 (9,6)
TPI Argissolo	240	110	650	41,80 (5,6)	0,31 (0,4)	0,17 (0,1)	0,14 (14,4)

*Analisador Automático; valores entre parênteses representam \pm o erro padrão da média $\times 10^{-2}$

No horizonte da TPI Latossolo foram encontrados teores de água significativamente maiores ($p < 0,001$) na capacidade de campo e no ponto de murcha permanente (Tabela 2). Em relação aos teores de água disponível (θ_{AD}) não foram encontradas diferenças estatísticas entre o horizonte da TPI Latossolo e o solo adjacente (Latossolo). No entanto, os teores de θ_{AD} foram estatisticamente mais elevados no horizonte da TPI Argissolo quando comparada ao respectivo solo adjacente (Argissolo). Dessa forma, em relação à disponibilidade de água, os quatro horizontes estudados puderam ser agrupados na seguinte seqüência: θ_{AD} TPI Argissolo $>$ θ_{AD} TPI Latossolo $>$ θ_{AD} Latossolo $>$ θ_{AD} Argissolo.

As TPI exibiram teores de carbono orgânico do solo (C) estatisticamente maiores quando comparadas aos horizontes dos solos adjacentes (Tabela 2). Na TPI Latossolo

foram obtidos os teores mais elevados de C enquanto que os menores teores foram obtidos no horizonte do Argissolo.

As medidas de resistência à penetração realizadas no conteúdo de água equivalente à capacidade de campo ($\psi = -10$ kPa) revelaram que a TPI Argissolo exibiu o valor médio mais elevado (RP = 0,89 MPa), com variação entre 0,73 a 0,99 MPa. No horizonte da TPI Latossolo obteve-se valores médios de 0,86 MPa, com variação entre 0,61 a 1,28 MPa. Por outro lado, os horizontes dos solos adjacentes exibiram valores médios na faixa de 0,53 MPa para o Argissolo, com variação entre 0,41 a 0,62 MPa e 0,79 MPa no Latossolo, variando de 0,49 a 1,22 MPa (Figura 17)

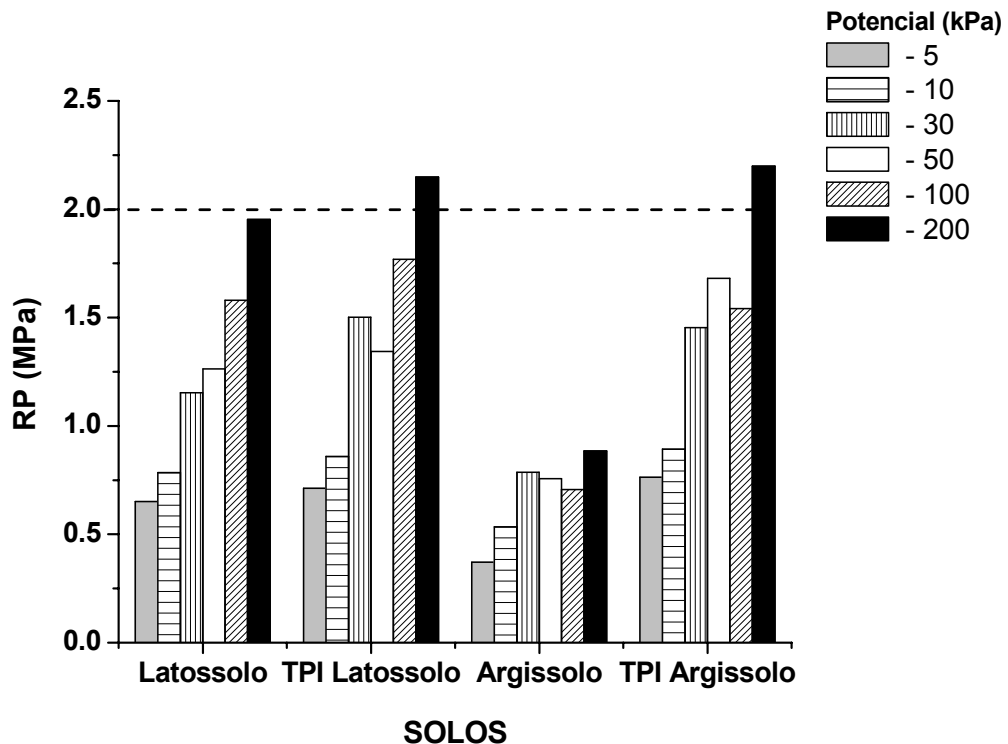


Figura 17 - Valores médios de resistência à penetração (RP) em função dos potenciais mátricos nos horizontes das Terras Pretas de Índio e dos solos adjacentes. A linha pontilhada representa o valor de RP (2 MPa) considerado crítico para o crescimento de plantas

Na Figura 17 pode-se observar a maioria dos valores de RP abaixo dos níveis considerados críticos ($RP \geq 2,0$ MPa) para o crescimento de plantas. Os valores acima do nível crítico foram obtidos nos horizontes das TPI, que com o secamento do solo, superaram o nível crítico de RP para o crescimento de plantas. Os elevados valores de RP foram obtidos em teores de água maiores que os encontrados no ponto de murcha permanente ($\psi = -1500$ kPa), no potencial de -200 kPa.

Os resultados obtidos a partir do ajuste da eq. (5) são apresentados nas equações 16, 17, 18 e 19. A resistência à penetração foi negativamente correlacionada com a umidade do solo. O modelo ajustado explicou acima de 70% da variabilidade da RP para os horizontes dos solos adjacentes e acima de 80% para os horizontes das TPI, todos altamente significativos ($p < 0,001$).

$$\begin{aligned} \text{Argissolo: } RP &= 0,1227 * \theta^{-0,9047} \\ R^2 &= 0,74 \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} \text{TPI Argissolo: } RP &= 0,0255 * \theta^{-3,0592} \\ R^2 &= 0,90 \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} \text{Latossolo: } RP &= 0,0298 * \theta^{-2,5755} \\ R^2 &= 0,95 \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} \text{TPI Latossolo: } RP &= 0,0279 * \theta^{-3,2079} \\ R^2 &= 0,87 \end{aligned} \quad (19)$$

As maiores diferenças no comportamento dos coeficientes a e b foram observadas entre os horizontes do Argissolo e o horizonte da TPI Argissolo. Os horizontes do Latossolo e da TPI Latossolo apresentam valores relativamente semelhantes para o coeficientes a e b.

A resposta da RP à variação nos teores água no solo foi mais acentuada nos horizontes das TPI (Figura 18) e no horizonte do Latossolo. O horizonte do Argissolo exibiu a menor variação de RP em função do conteúdo de água que as amostras de solo foram submetidas nos potenciais da CRP.

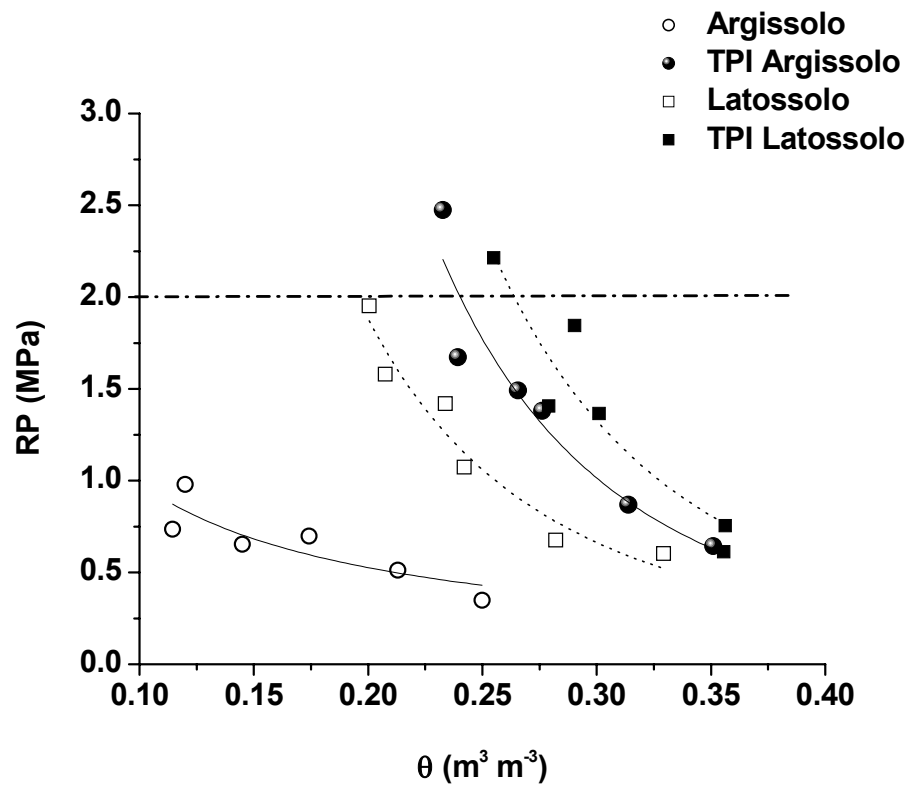


Figura 18 - Valores médios de resistência à penetração (RP) em função da umidade volumétrica (θ) nos horizontes das Terras Pretas de Índio e dos solos adjacentes

2.9.2 Densidade do solo (ρ_s) e Porosidade do solo

A frequência de distribuição da densidade do solo seguiu a distribuição normal para os horizontes dos solos adjacentes (Argissolo: $W=0,9737$, $p<W=0,68$; Latossolo: $W=0,9433$, $p<W=0,13$) e para as TPI (TPI Argissolo: $W=0,9476$, $p<W=0,17$; TPI Latossolo: $W=0,9499$, $p<W=0,19$) (Figura 19)

No horizonte do Argissolo a amplitude foi de 1,18 a 1,40 Mg m^{-3} e para o horizonte da TPI Argissolo foi entre 1,12 e 1,31 Mg m^{-3} . No horizonte do Latossolo a ρ_s variou de 1,08 a 1,28 Mg m^{-3} e no horizonte da TPI Latossolo a variação foi de 1,00 a 1,18 Mg m^{-3} .

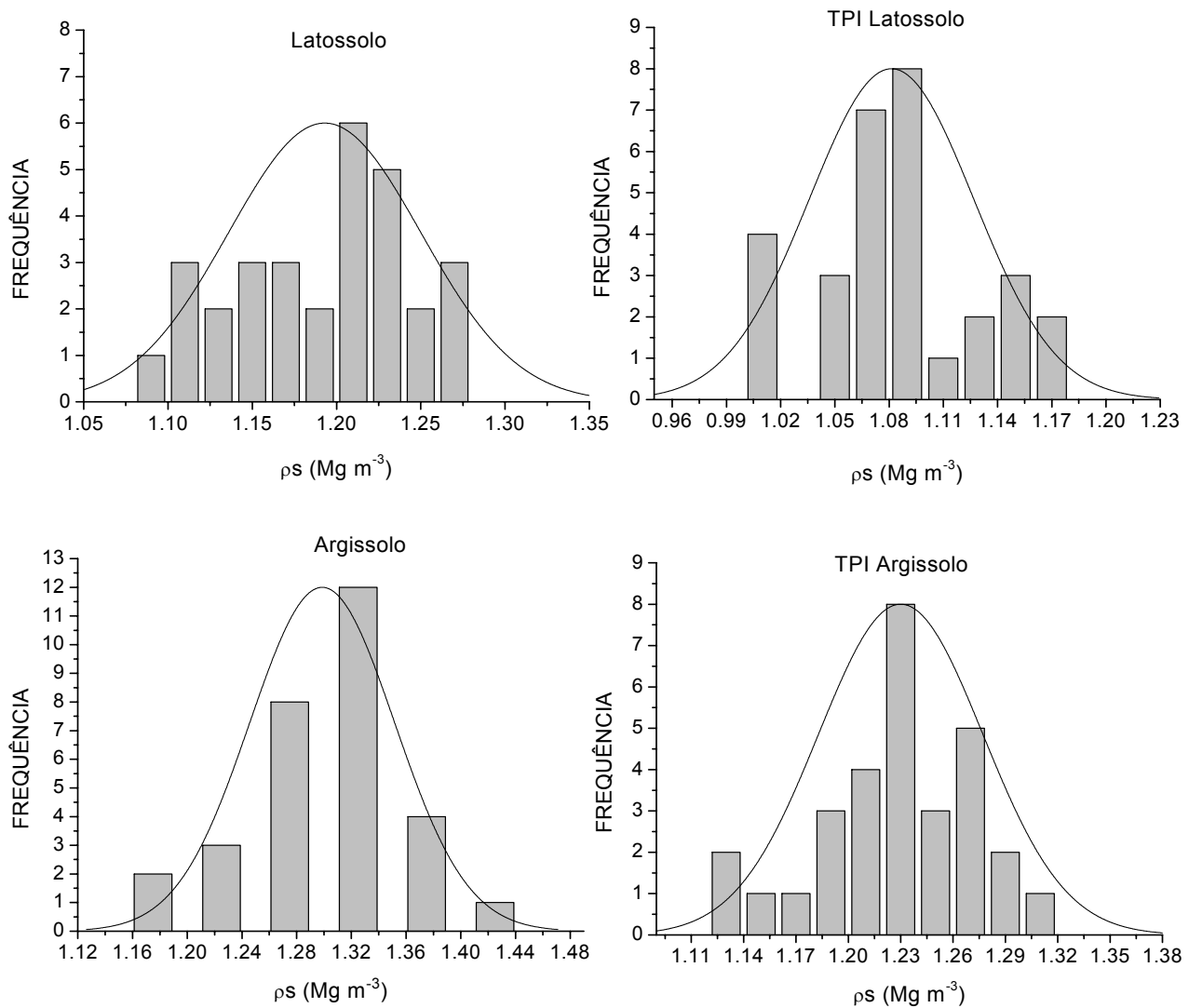


Figura 19 - Frequência de distribuição da densidade do solo (ρ_s) nos horizontes das TPI e dos solos adjacentes

Entre os quatro horizontes, o menor valor do coeficiente de variação (CV) foi obtido no horizonte da TPI Argissolo (CV = 3,79%) e o maior foi obtido no horizonte do Latossolo (CV = 4,72%). A TPI Latossolo e o Argissolo apresentaram valores semelhantes para o CV (4,14%).

A densidade do solo foi estatisticamente menor nos horizontes das TPI em comparação aos valores obtidos nos horizontes dos solos adjacentes (Figura 20).

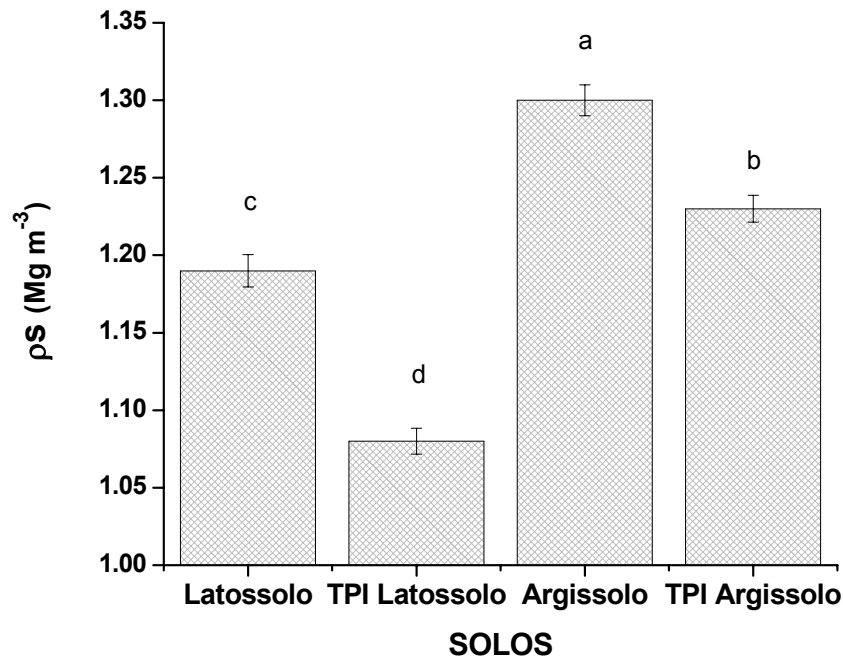


Figura 20 - Valores médios de densidade do solo (ρ_s) nos horizontes das Terras Pretas de Índio e dos solos adjacentes. As barras referem-se ao erro padrão da média. Valores seguidos por letras diferentes indicam diferenças significativas entre os horizontes dos solos ($p < 0,05$) pelo teste LSD

Os resultados da porosidade total (α) são exibidos na Figura 21. No horizonte do Argissolo o valor médio de α foi igual a $0,50 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ e no horizonte da TPI Argissolo foi igual a $0,53 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. Os horizontes do Argissolo e da TPI Argissolo apresentaram valores significativamente menores para a porosidade total quando comparados aos valores apresentados pelos horizontes do Latossolo e da TPI Latossolo.

Com relação à macroporosidade, apenas o horizonte do Argissolo exibiu valores estatisticamente menores que os demais horizontes. A variação da macroporosidade foi de $0,23$ a $0,27 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ no Argissolo, $0,31$ a $0,36 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ no Latossolo, $0,32$ a $0,36 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ na TPI Argissolo e de $0,30$ a $0,39 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ na TPI Latossolo. A microporosidade exibiu valores estatisticamente menores na TPI Argissolo, onde a variação encontrada de $0,13$ a $0,24 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$.

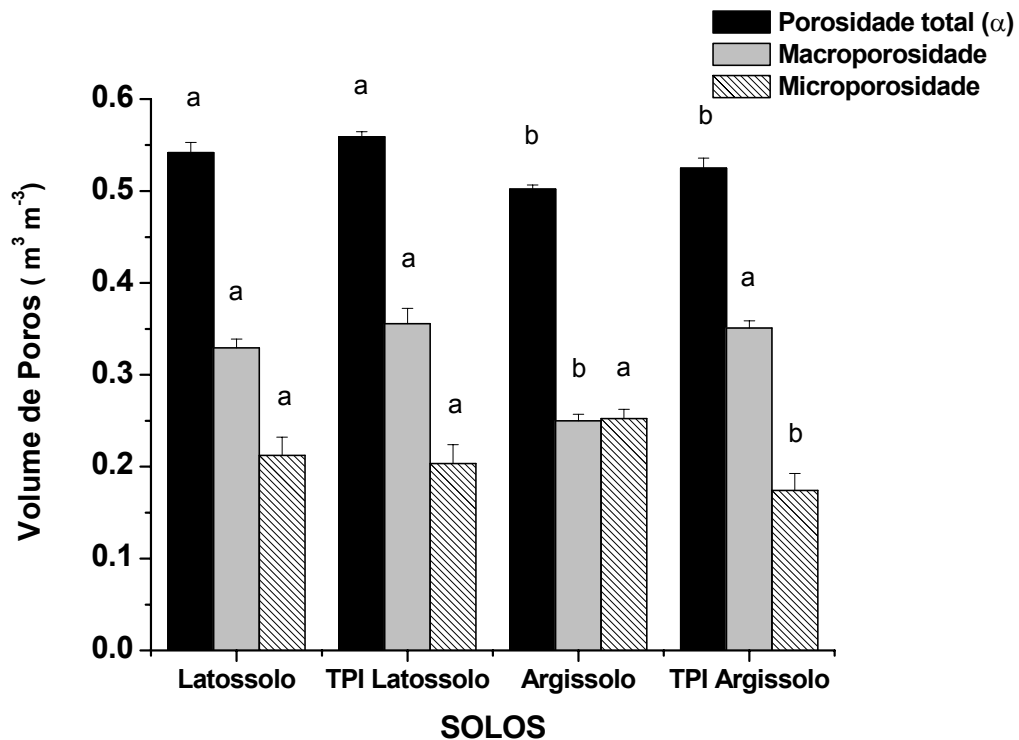


Figura 21 - Valores médios de macroporos, microporos e da porosidade total (α) nos horizontes das Terras Pretas de Índio e dos solos adjacentes. As barras referem-se ao erro padrão da média. Valores seguidos por letras diferentes indicam diferenças significativas entre os horizontes dos solos ($p < 0,05$) pelo teste LSD

Todos os horizontes apresentaram valores adequados para porosidade de aeração (P_a), considerando o valor mínimo de $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. Tais valores foram obtidos em condições de umidade acima dos valores associados à capacidade de campo ($\psi = -10 \text{ kPa}$). Na capacidade de campo, os maiores valores da P_a foram obtidos nos horizontes dos solos adjacentes, sendo $0,19 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ no Argissolo e $0,16 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ no horizonte do Latossolo. Já os horizontes das TPI apresentaram valores muito próximos ao valor mínimo, sendo igual a $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ na TPI Latossolo e $0,11 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ na TPI Argissolo.

2.9.3 Condutividade hidráulica saturada (Ksat)

As maiores amplitudes nos dados de Ksat foram obtidas no horizonte da TPI Latossolo e no horizonte do Latossolo, variando entre 111 a 655 mm h^{-1} e 165 a 533 mm h^{-1} , respectivamente. O coeficiente de variação obtido no Latossolo foi igual a 41% e na TPI Latossolo igual a 49%. A amplitude de valores de Ksat obtida no Argissolo foi de 254 a 632 mm h^{-1} , com o CV igual a 33%. A TPI Argissolo apresentou pequena variação para os valores de Ksat. A amplitude encontrada neste horizonte foi 203 a 237 mm h^{-1} e o CV igual a 5%.

Em relação aos valores médios de Ksat, não foram observadas diferenças estatísticas entre os horizontes das TPI e dos solos adjacentes (Figura 22).

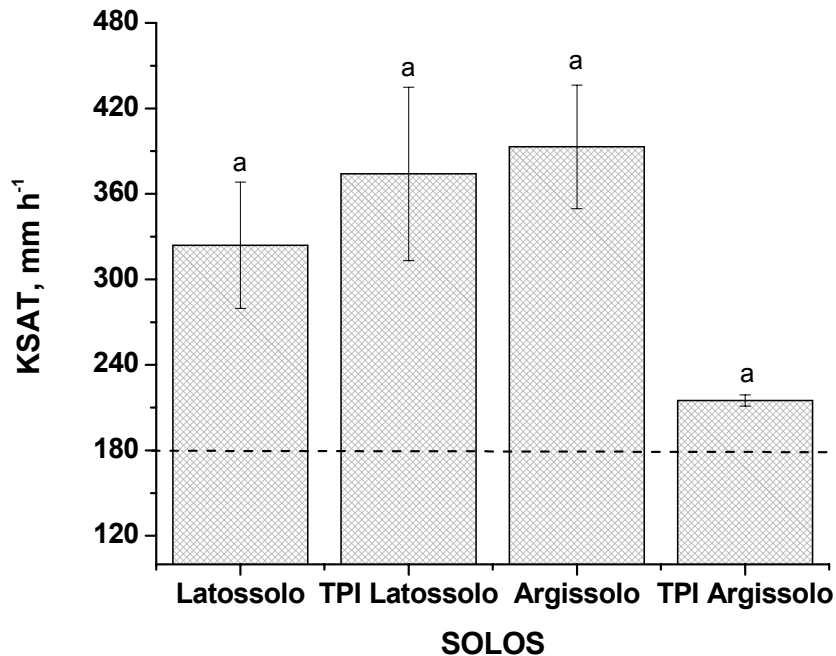


Figura 22 - Valores médios de condutividade hidráulica saturada (Ksat) nos horizontes das Terras Pretas de Índio e dos solos adjacentes. As barras referem-se ao erro padrão da média. A linha tracejada indica o limite superior da faixa de Ksat "ideal" segundo Reynolds et al. (2003). Valores seguidos por letras diferentes indicam diferenças significativas entre os horizontes dos solos ($p < 0,05$) pelo teste LSD

2.9.4 Resistência Tênsil de Agregados (RT) e Friabilidade (F)

A resistência tênsil de agregados apresentou uma distribuição log-normal para os horizontes dos solos adjacentes (Argissolo: $W=0,9691$, $p<W=0,2434$; Latossolo: $W=0,9716$, $p<W=0,3171$) e para as TPI (TPI Argissolo: $W=0,9827$, $p<W=0,7617$; TPI Latossolo: $W=0,9630$, $p<W=0,1252$) (Figura 23)

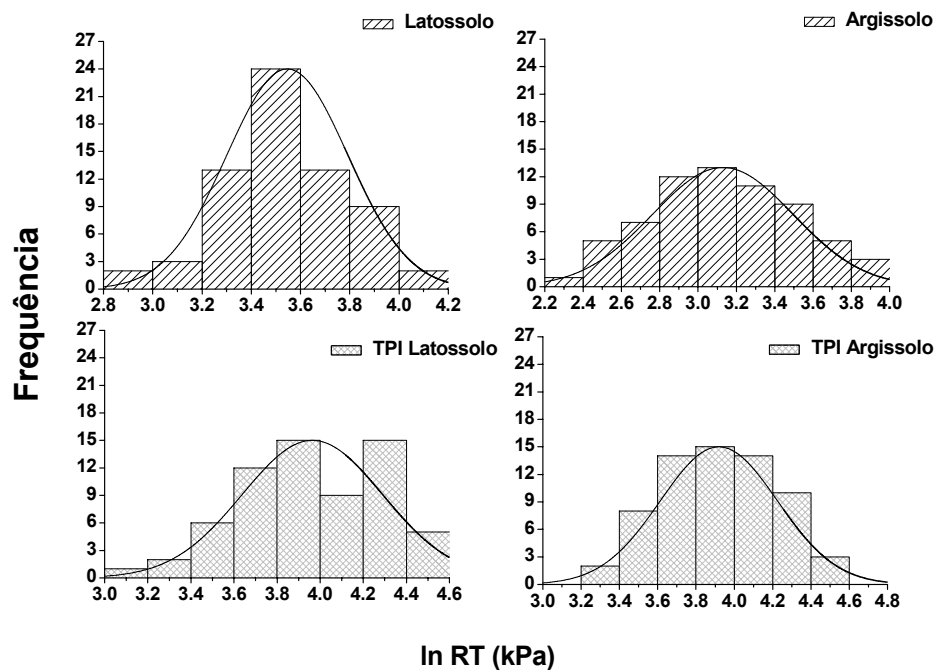


Figura 23 - Frequência de distribuição da resistência tênsil (RT) nos horizontes das TPI e dos solos adjacentes

Nos solos adjacentes a RT variou de 11,16 a 38,30 kPa no Argissolo e entre 26,03 a 58,11 kPa no Latossolo. A TPI Latossolo apresentou valores entre 28,95 a 83,90 kPa e a TPI Argissolo entre 31,47 e 83,79 kPa.

A RT foi estatisticamente maior nas TPI quando comparada aos valores médios obtidos nos horizontes dos solos adjacentes (Figura 24).

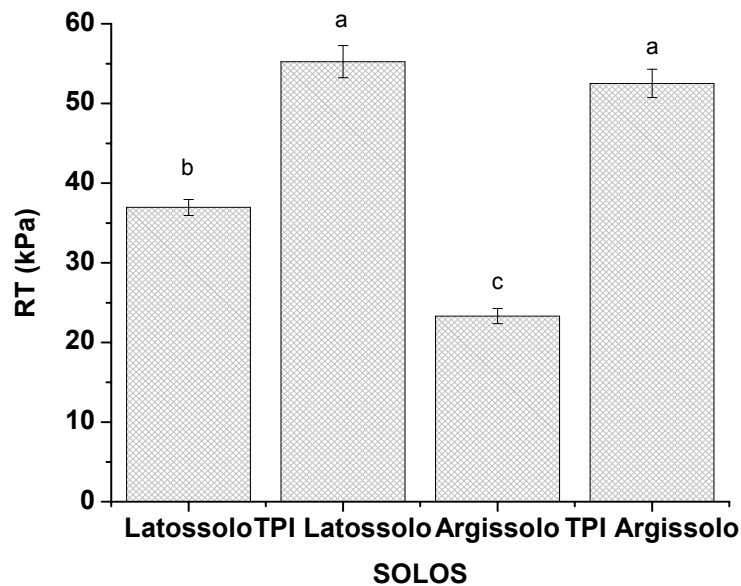


Figura 24 - Valores médios de resistência tênsil de agregados (RT) nos horizontes das Terras Pretas de Índio e dos solos adjacentes. As barras referem-se ao erro padrão da média. Valores seguidos por letras diferentes indicam diferenças significativas entre os horizontes dos solos ($p < 0,05$) pelo teste LSD

Os valores médios de friabilidade (F) calculados a partir do método do coeficiente de variação foram de 0,24 para o Latossolo e 0,37 para o Argissolo. As TPI apresentaram valores intermediários, sendo 0,32 para a TPI Latossolo e 0,31 para a TPI Argissolo. A classificação proposta para os valores de F é apresentada na Tabela 3. A friabilidade obtida a partir dos valores de RT classificou todos os horizontes na mesma categoria. Dessa forma, de acordo com a classificação que estabelece classes de solo conforme os valores de friabilidade, todos os horizontes estudados podem ser classificados como friáveis.

Tabela 3 – Classificação do solo quanto à Friabilidade (F) de acordo com o método do coeficiente de variação

Parâmetro	Classes
$F < 0,10$	Não friável
$F = 0,10 - 0,20$	Levemente friável
$F = 0,20 - 0,50$	Friável
$F = 0,50 - 0,80$	Muito friável
$F > 0,80$	Mecanicamente instável

2.9.5 Estabilidade de agregados

A TPI Argissolo apresentou quantidades estatisticamente maiores de agregados nas classes de 2,0, 1,0 e < 0,106 mm de diâmetro. Entretanto, o solo adjacente apresentou quantidades estatisticamente maiores de agregados na classe de 0,25 mm (Figura 25).

Os valores médios de DMG (diâmetro médio geométrico) do horizonte da TPI Argissolo e do solo adjacente são exibidos no eixo y, lado direito da Figura 25. Na TPI Argissolo foram obtidos valores de DMG estatisticamente maiores quando comparados aos valores obtidos no solo adjacente.

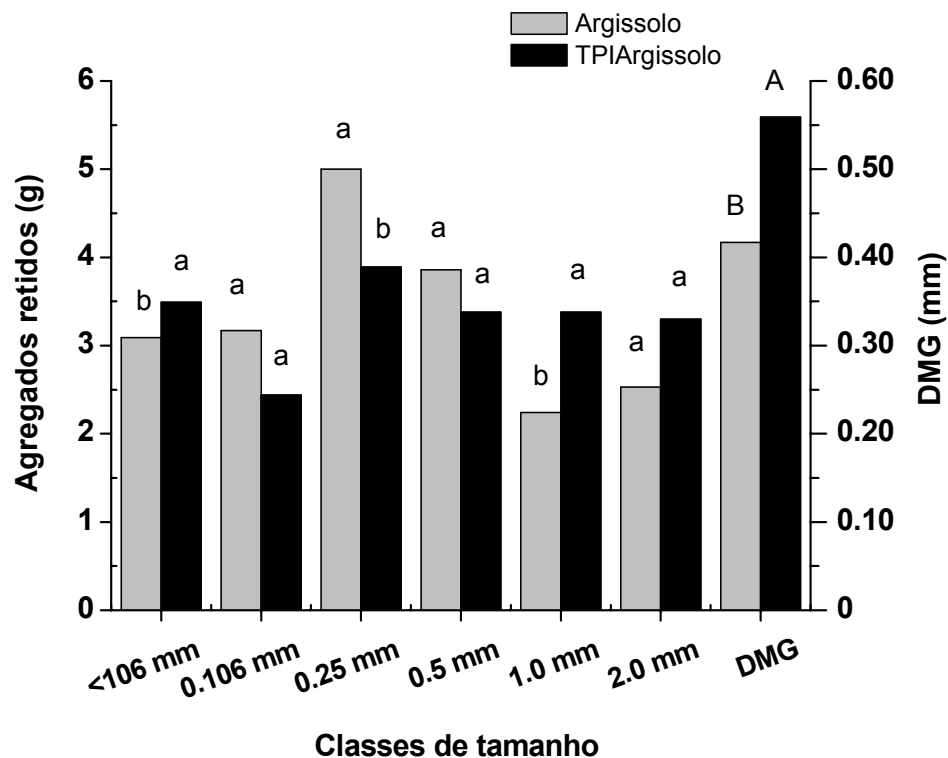


Figura 25 - Valores médios da massa de agregados retidos em diferentes classes de tamanho (eixo y lado esquerdo da figura) e diâmetro médio geométrico (DMG) localizado no eixo y, lado direito da figura. Valores seguidos por letras diferentes indicam diferenças significativas entre os horizontes dos solos ($p < 0,05$) pelo teste LSD.

Não foram encontradas diferenças estatísticas no DMG e nas quantidades de agregados retidos na TPI Latossolo e no solo adjacente (Figura 26).

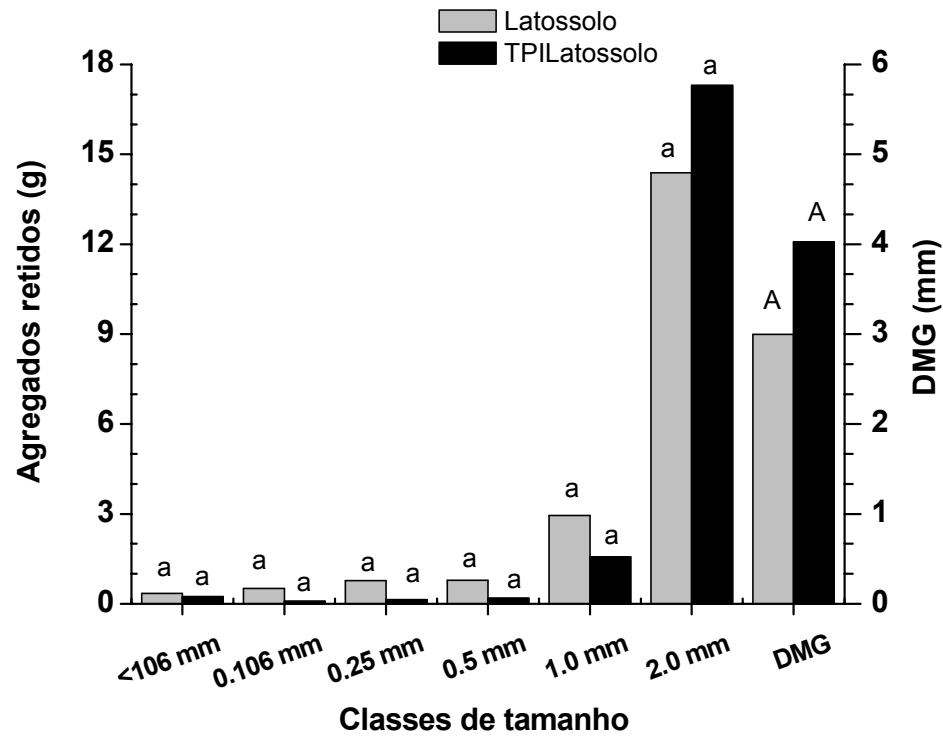


Figura 26 - Valores médios da massa de agregados retidos em diferentes classes de tamanho (eixo y lado esquerdo da figura) e diâmetro médio geométrico (DMG) localizado no eixo y, lado direito da figura. Valores seguidos por letras diferentes indicam diferenças significativas entre os horizontes dos solos ($p < 0,05$) pelo teste LSD.

2.9.6 Intervalo Hídrico Ótimo (IHO) e S

A Figura 27 exibe o Intervalo Hídrico Ótimo dos horizontes das TPI e dos solos adjacentes.

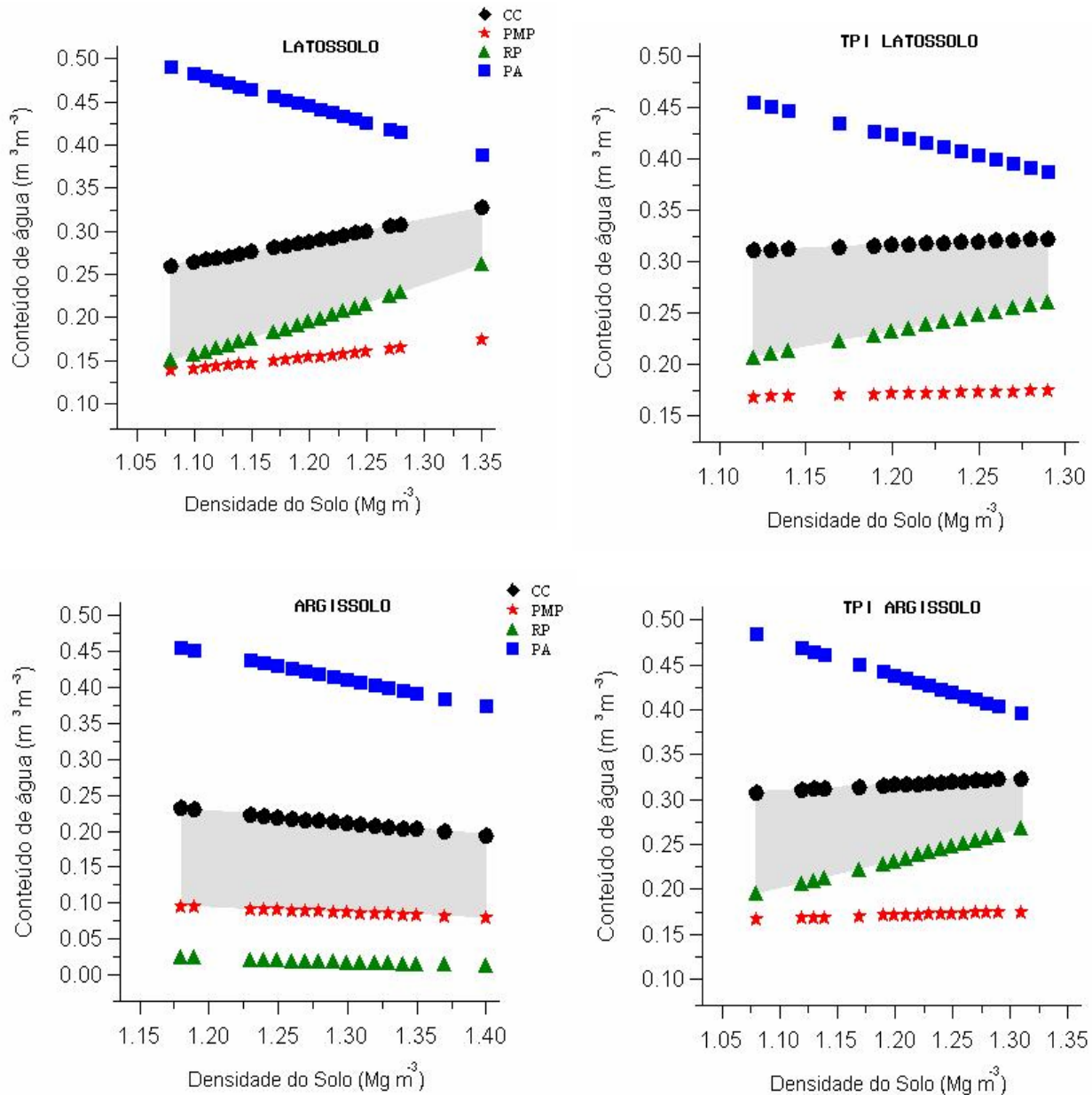


Figura 27 – Variação do conteúdo de água em função da densidade do solo, nos horizontes das Terras Pretas de Índio e nos solos adjacentes, nos níveis críticos de resistência à penetração de 2,0 MPa (RP), capacidade de campo (CC), ponto de murcha permanente (PMP) e porosidade de aeração 10%. A área hachurada dos gráficos representa o Intervalo Hídrico Ótimo (IHO)

Os valores do IHO obtidos nos horizontes dos solos adjacentes foram estatisticamente maiores que os valores obtidos nas TPI. Em todos os horizontes houve um decréscimo na porosidade de aeração (PA) em função do aumento da densidade do solo. A RP atuou como o limite inferior do IHO em todos os horizontes, com exceção do horizonte do Argissolo que teve o IHO limitado pela disponibilidade de água associado à capacidade de campo (CC) e ao ponto de murcha permanente (PMP), conseqüentemente, o $IHO = \theta_{AD}$ (água disponível). Com o aumento da densidade do solo, ocorreu um acréscimo da CC nos horizontes do Latossolo, TPI Latossolo e TPI Argissolo e uma diminuição no Argissolo. Já os valores do PMP aumentaram no Latossolo e diminuíram no Argissolo, enquanto que nas TPI não foram alterados.

O IHO foi negativamente correlacionado com os valores de densidade do solo, com exceção do horizonte do Argissolo (Figura 28).

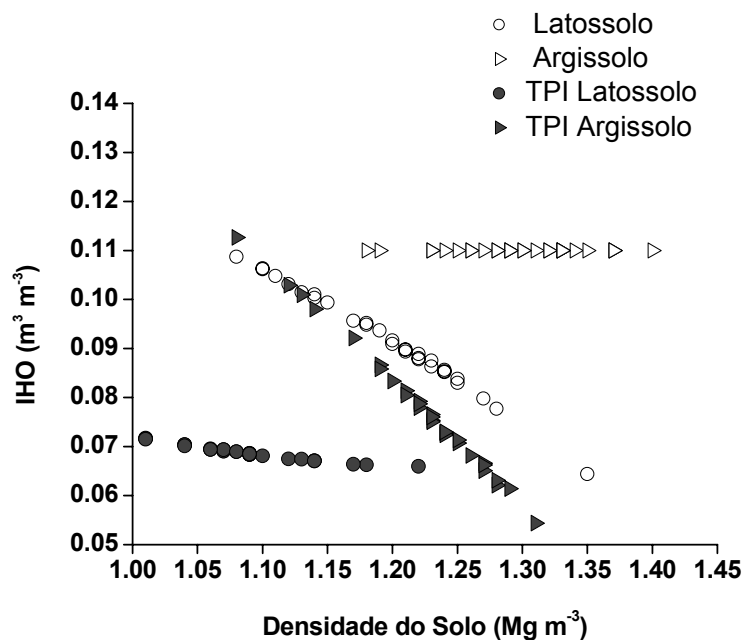


Figura 28 – Variação do Intervalo Hídrico Ótimo (IHO) em função da densidade do solo, nos horizontes das TPI e dos solos adjacentes

Nos horizontes das TPI e dos solos adjacentes foram obtidos valores de “S” maiores que o limite considerado adequado para a qualidade estrutural do solo, $S = 0,035$ (Figura 29).

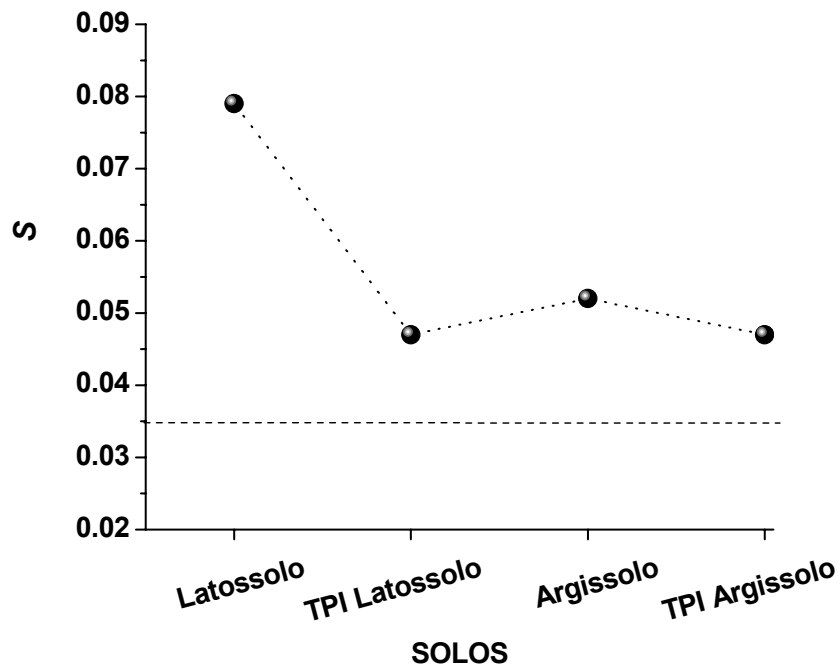


Figura 29 – Valores médios do índice de qualidade do solo "S" nos horizontes das Terras Pretas de Índio e dos solos adjacentes. A linha tracejada indica o limite onde S = 0,035

De um modo geral, os valores de "S" obtidos nos horizontes das TPI foram menores que os obtidos nos horizontes dos solos adjacentes. Entre os horizontes antrópicos, a TPI Latossolo e a TPI Argissolo apresentaram valores semelhantes. Nos horizontes dos solos adjacentes, o Latossolo exibiu valores de estatisticamente maiores que os encontrados no horizonte do Argissolo.

2.10 Discussão

Os maiores teores de θ_{CC} e θ_{AD} encontrados nas TPI estão relacionados principalmente à porosidade estrutural do solo e aos teores de carbono orgânico. O solo ao drenar esvazia primeiramente os poros estruturais, sem a interferência da composição mineralógica na retenção de água. Em seguida, com a continuação da drenagem do solo, a porosidade textural (composição mineralógica) passa a atuar no processo de retenção de água. Para Hillel (1998), a parte da curva de retenção referente aos potenciais mais baixos (parte úmida) depende principalmente do efeito da capilaridade e da distribuição do tamanho de poros, afetados pela estrutura do solo.

Dessa forma, os teores de água obtidos na capacidade de campo são influenciados principalmente pela porosidade estrutural, que reflete as práticas de manejo, a compactação do solo e o cultivo, afetando diretamente as demais propriedades físicas do solo (GUÉRIF et al., 2001; DEXTER, 2004). Devido principalmente à contribuição da matéria orgânica, os teores de água (θ_{PMP}) obtidos nas TPI, foram mais elevados que os teores obtidos nos solos adjacentes. A retenção de água em potenciais mais altos ($\psi = -1500$ kPa) tem pouca influência da estrutura do solo, sendo influenciada pela granulometria, pela mineralogia e pelas propriedades da matéria orgânica (HILLEL, 1998). A água retida neste potencial corresponde à água presente nos poros de dimensões microscópicas e em películas ao redor das partículas de solo (BRADY; WEIL, 2003). A diferença nos teores de água provavelmente reflete os elevados teores de carbono encontrados nas TPI (Tabela 2) devido ao aumento da área superficial das partículas de solo envolvidas pela matéria orgânica, já que a composição granulométrica e mineralógica das TPI e dos solos adjacentes são semelhantes (LIMA et al., 2002).

De acordo com Lehmann et al. (2003), a matéria orgânica desempenha um importante papel na retenção de água das TPI, principalmente nos horizontes mais arenosos. Geralmente, teores elevados de matéria orgânica aumentam o conteúdo de água disponível, ao melhorarem a agregação e pela criação de mesoporos (0,2 – 10 μm de diâmetro). Hillel (1998) sugere que o aumento da agregação do solo, resultante do

aumento nos teores de matéria orgânica, tem um feito maior nos teores de água retidos na capacidade de campo do que àqueles retidos no ponto murcha permanente.

As TPI apresentam uma elevada porosidade estrutural, condicionando principalmente teores de água mais elevados na capacidade de campo (θ_{cc}). A presença da porosidade estrutural é relacionada a uma qualidade física do solo adequada ao crescimento de plantas, enquanto os solos que possuem apenas a porosidade textural estão relacionados a condições físicas inadequadas (DEXTER, 2004). Assim, em relação à disponibilidade de água, os resultados indicam que plantas cultivadas nas TPI estão menos sujeitas a enfrentar condições de estresse hídrico do que àquelas cultivadas nos solos adjacentes, favorecidas pelas melhores condições estruturais do solo. Os altos teores de água disponível que as TPI exibem já haviam sido relatados anteriormente, por meio de observações da vegetação que continuava verde mesmo nas estações secas (LEHMANN et al., 2003 apud HARTT, 1885).

Para efeito de comparação, a RP pode ser medida quando o solo está em condições de umidade equivalentes à capacidade de campo (θ_{cc}), $\psi = -10$ KPa (SMITH et al., 1997). As medidas de RP neste potencial revelaram valores muito próximos entre os quatro horizontes, indicando que em teores de água equivalentes à capacidade de campo a RP não restringe o crescimento das raízes. Estes resultados corroboram com as conclusões do trabalho de Smith et al. (1997), no qual os autores observaram pequenas diferenças nos valores de RP em teores de água próximos à saturação e à capacidade de campo, dentro de uma ampla faixa de densidade do solo. Segundo os autores, com uma única medida de RP é muito difícil inferir sobre a resposta da RP através de uma ampla faixa de umidade, havendo a necessidade de uma curva de resistência à penetração, na qual as medidas de RP são realizadas em diferentes teores de água.

A capacidade de campo é o limite superior da disponibilidade de água, a partir da θ_{cc} começa a faixa denominada “água disponível” (θ_{AD}), tendo como limite inferior o ponto de murcha permanente (VIEHMEYER; HENDRICKSON, 1927). Dentro da θ_{AD} , teoricamente, as plantas não encontram limitações relacionadas à disponibilidade de água, pois a água está retida às partículas do solo com uma quantidade relativamente baixa de energia, permitindo que seja extraída pelo sistema radicular das plantas.

Embora haja condições hídricas adequadas, os resultados apontam que o sistema radicular das plantas cultivadas em TPI pode ser afetado pela resistência à penetração (RP) antes mesmo de ser afetado pelo estresse hídrico, nos teores de água próximos ao ponto de murcha permanente.

A RP pode afetar o sistema radicular em comprimento e diâmetro (MEROTTO; MUNDSTOCK, 1999) e na direção preferencial do crescimento (IIJIMA et al., 1991), restringindo o crescimento das plantas. Os valores de RP, obtidos nas TPI, estão acima dos níveis considerados críticos ($RP \geq 2,0$ MPa) para o crescimento de plantas (TAYLOR et al., 1966; MATERECHERA et al., 1991; SILVA et al., 1994). A influência da RP no crescimento das plantas é constantemente mencionada por agricultores que possuem cultivos em áreas de TPI. Os agricultores, através da observação no campo, costumam mencionar que as TPI secam muito mais rápido que os solos adjacentes e que se apresentam “mais duras” quando secas, afetando a produtividade das plantas quando a estação seca é prolongada. Embora as TPI retenham mais água que os solos adjacentes, o fato de se tornarem mais duras quando secas foi constatado pela curva de resistência à penetração (Figura 18). Os sinais apresentados pelos coeficientes a partir do ajuste da eq. (5) indicaram que a RP variou negativamente com a umidade volumétrica do solo, corroborando com resultados de outros autores (SILVA et al., 1994; TORMENA et al., 1998; BETZ et al., 1998). De acordo com as curvas de RP, observa-se que com o secamento do solo, os valores de RP das TPI tendem a aumentar em magnitudes diferentes quando comparados aos aumentos observados nos solos adjacentes.

A RP, dependendo do tipo de solo, pode ser influenciada pela distribuição do tamanho e formato de partículas, pela mineralogia da argila, pelo conteúdo de óxidos amorfos, pela matéria orgânica e composição química da solução do solo (GERARD, 1965; BYRD; CASSEL, 1980; STITT et al., 1982). Neste aspecto, as principais diferenças entre os horizontes das TPI e os horizontes dos solos adjacentes estão relacionadas à maior retenção de água e os teores mais elevados de carbono orgânico e alguns íons presentes no solo (Tabela 2). De acordo com Hartge (1975), a matéria orgânica fortalece a ligação do menisco da água com a matriz do solo. Dessa forma, o incremento da RP só ocorre dentro de uma determinada faixa de umidade do solo com

a presença da matéria orgânica do solo. Isto indica que os elevados teores de carbono orgânico nas TPI provavelmente contribuem para aumentar o impedimento mecânico do solo, a partir de uma determinada faixa de umidade, expondo as plantas às restrições físicas quando ocorre variação nos teores de água do solo.

Para Tardieu (1994), um solo com valores elevados de densidade do solo pode não ser limitante ao crescimento de raízes quando se encontra úmido. Entretanto, quando este mesmo solo se encontra seco, poderá apresentar condições limitantes ao crescimento radicular devido aos elevados valores de RP. Isto se deve ao fato da RP incorporar efeitos do conteúdo de água, textura e condição estrutural do solo. No caso dos solos adjacentes, a RP do Argissolo não foi influenciada pela densidade do solo em nenhum dos potenciais aplicados. Por outro lado, a RP do Latossolo foi influenciada pela densidade do solo quando o solo encontrava-se com teores de água acima dos valores relacionados à capacidade de campo e quando estava mais seco ($\psi = -200$ KPa). Em ambas as TPI, a RP foi influenciada pela densidade do solo quando o solo estava úmido, próximo à capacidade de campo, e quando o solo estava mais seco.

Apesar das restrições mencionadas, as plantas cultivadas nas TPI apresentam produtividades superiores às encontradas nos solos adjacentes. Isto indica que a faixa de RP que ocorre no solo, provavelmente não é suficiente para afetar o crescimento das plantas e, devido à disponibilidade de água não ocorre com tanta frequência, embora haja a possibilidade. Por outro lado as TPI, como já mencionado, apresentam condições químicas mais adequadas às plantas. Assim, as plantas cultivadas nas TPI apresentam produtividades elevadas favorecidas pelas condições químicas, o que provavelmente compensa a ocorrência de restrições físicas.

Os resultados mostram que é necessário o entendimento dos mecanismos de como a matéria orgânica atua no solo, principalmente em relação à quantidade e qualidade do material que forma esta fração e suas interações com as partículas do solo. Para Smith et al. (1997), a identificação dos fatores que afetam a RP é importante para a avaliação dos efeitos da compactação nas propriedades do solo e crescimento de plantas, trafegabilidade do solo e período das operações de preparo. Piccolo e Mbagwu (1999) relatam que as informações a respeito dos efeitos da matéria orgânica na estrutura do solo ainda são empíricas e escassas. O esclarecimento dessas

informações é necessário para que as práticas de manejo do solo, relacionadas à matéria orgânica, sejam adequadas.

Com relação à densidade do solo (ρ_s), os menores valores encontrados nas TPI estão de acordo com os resultados obtidos por Kern e Kämpf (1989), que atribuíram tais valores aos elevados teores de matéria orgânica que estes horizontes antrópicos possuem. Entretanto, Teixeira e Martins (2003a) encontraram alguns valores de ρ_s maiores nas TPI quando comparados aos solos adjacentes.

Segundo Kern (1988), é de se esperar maiores valores de ρ_s em locais onde ocorreu algum tipo de ocupação humana, exceto àqueles em que a matéria orgânica diminuiu o efeito do período de ocupação sobre a estrutura do solo. A densidade do solo foi negativamente correlacionada com os teores de carbono orgânico solo. Neste contexto, comparando os valores de ρ_s dentro de cada classe de solo (TPI vs solo adjacente) observa-se que, apesar do uso das TPI para exploração agrícola, a matéria orgânica foi capaz de diminuir o impacto decorrente do uso do solo, preservando condições estruturais adequadas ao cultivo de plantas. Segundo Chan (2002), a ρ_s depende da composição (mineral e orgânica) e das condições estruturais do solo. Solos com a mesma composição granulométrica e com condição estrutural semelhante possuem valores de densidade do solo muito próximos, a menos que haja diferença nos teores de carbono do solo.

De acordo com os critérios estabelecidos por Brady e Weil (2003), os horizontes das TPI e dos solos adjacentes possuem condições estruturais adequadas para o crescimento de plantas, pois os valores de porosidade total de todos os horizontes ultrapassam $0,5 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. Além da porosidade total, os horizontes apresentaram valores de condutividade hidráulica saturada - K_{sat} (Figura 22) acima da faixa considerada ideal (entre 18 a 180 mm h^{-1}) para promover rápida infiltração e redistribuição da água disponível às plantas, reduzir o escoamento superficial e erosão do solo, além de drenar o excesso de água (REYNOLDS et al., 2003). Segundo os autores, solos com valores de K_{sat} acima desta faixa podem drenar relativamente rápido, impossibilitando que a matriz do solo retenha água adequadamente. Os valores de K_{sat} dos horizontes estudados exibiram alta variabilidade, com exceção da TPI Argissolo. Estes resultados corroboram com Teixeira (2001) que encontrou alta variabilidade nos valores de K_{sat}

obtidos através anéis de solo. Para o autor, esses valores podem fornecer algumas informações a respeito da K_{sat} , no entanto, o método não foi apropriado para a caracterização da K_{sat} de um Latossolo (textura argilosa), devido ao tamanho da amostra (representatividade) e da presença/ausência de macroporos. Os resultados obtidos estão acima da faixa de K_{sat} (65-134 mm h^{-1}) encontrada em uma floresta primária por Nortcliff e Thornes (1981), acima dos valores (72,5 mm h^{-1}) encontrados por Corrêa (1985) em um Latossolo (textura muito argilosa) sob sistema de plantio direto e abaixo dos valores (498 mm h^{-1}) encontrados pelo mesmo autor em uma floresta primária. Glaser et al. (2004) relataram melhores condições hidrológicas nas TPI quando comparadas aos solos adjacentes, no entanto, os autores não apresentaram resultados, impossibilitando a comparação com os dados obtidos neste estudo.

A macroporosidade do solo é responsável pela livre movimentação de ar e condução da água durante o processo de infiltração (BRADY; WEIL, 2003). Assim, os valores de K_{sat} provavelmente relacionam-se aos valores de macroporosidade do solo (acima de $0,3 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$), corroborando com os resultados obtidos por Glaser et al. (2004) que encontraram valores de macroporos (poros > 0,05 mm) entre 18 a 32% nas TPI e entre 13 a 21% nos solos adjacentes.

Em relação à aeração do solo, os resultados da porosidade de aeração (P_a) indicaram que dentro da faixa de θ_{AD} , todos os horizontes apresentam condições de aeração acima do limite considerado crítico ($0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) para o crescimento de plantas (GRABLE; SIEMER 1968). Em outro estudo, Lehmann et al. (2003) encontraram melhores condições de aeração nas TPI quando comparadas aos Latossolos. Segundo Gliński e Stepniewski (1985), a deficiência de oxigênio no solo afeta o crescimento de plantas de uma maneira complexa. Apenas as raízes com adequado fornecimento de oxigênio e respiração adequados podem manter as funções normais e o crescimento. Para Glaser et al. (2004), as plantas cultivadas nas TPI são favorecidas pelas condições de aeração e disponibilidade de água, superiores às condições encontradas nos solos adjacentes. No presente estudo, as condições de aeração e de umidade encontradas nas TPI foram, em alguns casos, semelhantes às encontradas nos solos adjacentes, ao contrário do que foi relatado por Lehmann et al. (2003) e Glaser et al. (2004). A semelhança encontrada é um fator positivo às TPI, uma vez que os utilizados

como referência (solos adjacentes) são solos que não foram submetidos à exploração agrícola. Assim, a cobertura vegetal presente nestes horizontes, não apresentam restrições relacionadas à disponibilidade de água e trocas gasosas.

Os resultados de resistência tênsil (RT) demonstram que os solos adjacentes possuem um comportamento distinto para este parâmetro, exibindo valores baixos e estatisticamente diferentes. No entanto, quando a RT das TPI é avaliada, ambas assumem valores mais elevados e estatisticamente iguais. Estes resultados indicam que o processo de formação contribuiu para que estes horizontes, com composição granulométrica e valores de ρ_s diferente, apresentem respostas semelhantes ao fraturamento, ou seja, rompendo o agregado do solo sob a mesma tensão aplicada. Este comportamento pode estar associado aos teores de matéria orgânica, pois as TPI apresentam teores elevados. Segundo Causarano (1993) e Perfect et al. (1995), a matéria orgânica do solo é um dos agentes que influencia a RT. O comportamento da matéria orgânica como agente agregante é discutida em maiores detalhes no parágrafo referente à estabilidade de agregados.

Em relação à friabilidade, o fato de todos os horizontes serem classificados como friáveis indica que os agregados do solo, quando submetidos às operações de preparo, tendem a se desmanchar em agregados de tamanhos menores e iguais, sem um grande dispêndio de energia por parte dos implementos agrícolas (MACKS et al., 1996). De acordo com Dexter e Watts (2000), a estrutura do solo produzida pela operação de preparo depende mais das propriedades do solo do que dos implementos agrícolas, ressaltando a necessidade de se quantificar a condição física do solo. Assim, a condição “friável” é uma característica desejável para o leito de semeadura (superfície do solo), pois reflete a condição estrutural do solo. (WATTS; DEXTER, 1998). Solos classificados como friáveis, estão com condições estruturais que se assemelham aos solos não cultivados, tais como solos de floresta ou de pastagem (WATTS; DEXTER, 1998 apud BRAUNACK et al., 1979).

A friabilidade fornece um valioso índice de qualidade estrutural do solo, em escala numérica, e que pode ser aplicado para todos os solos (DEXTER; WATTS, 2000). Os resultados indicam que as TPI exibem características próximas às de solos não cultivados. Para Watts e Dexter (1997), quanto mais carbono orgânico no solo,

mais rápida a hierarquia da estrutura do solo é desenvolvida e, maior é a resistência à desestabilização, devido às operações de preparo ou umedecimento repentino do solo.

As maiores quantidades de agregados nas classes de 2,0 e 1,0 mm encontrados no Latossolo, na TPI Latossolo e na TPI Argissolo indicam maior agregação do solo, principalmente em agregados de tamanhos maiores. Conaway e Strickling (1962) relataram que as mudanças ocorridas na estabilidade de agregados são refletidas em agregados de 0,5 a 2,0 mm. Em outro estudo, Browning et al. (1944) encontraram uma correlação positiva entre o coeficiente de agregação e as percentagens de agregados > 0,1, > 0,25 e > 0,5 mm. Segundo Norton et al. (2006), a estabilidade de agregados depende de propriedades do solo (textura, matéria orgânica, mineralogia da argila, teores de CaCO_3 e óxidos de Fe e Al), bem como de fatores externos, como o clima, operações de preparo, atividade biológica e ciclos de umedecimento e secamento. A quebra dos agregados é o resultado de uma grande variedade de mecanismos (físicos e físico-químicos). Os mecanismos diferem no tipo de energia envolvida na destruição do agregado, no tamanho da distribuição dos produtos responsáveis pela quebra e no tipo de propriedade do solo que afeta o mecanismo (AMEZKETA, 1999; KEMPER; KOCH, 1966; Le BISSONNAIS, 1996). Neste contexto, os resultados indicam uma possível relação da matéria orgânica com tamanhos específicos de agregados do solo.

A matéria orgânica afeta as propriedades e superfícies da argila, tornando os agregados mais estáveis, ao contrário do que ocorre quando a matéria orgânica não está presente. Dessa forma, as modificações das propriedades da argila podem ser a base da estabilidade dos agregados influenciados pela matéria orgânica (ROBINSON; PAGE, 1951). No caso da TPI Latossolo e do Latossolo, os resultados do DMG e da quantidade de agregados retidos indicam maior agregação do solo nas classes de 2,0 e 1,0 mm. Castro Filho et al. (2002) observaram que independente do sistema de preparo ou da profundidade do solo, os maiores teores de carbono são encontrados nas classes > 2,0 mm, indicando que grandes quantidades de carbono são associadas com aumento no tamanho dos agregados.

Os resultados referentes ao diâmetro médio geométrico (DMG) indicaram que a TPI Argissolo apresenta agregados mais estáveis à água quando comparada ao Argissolo. Essas características são de um solo menos susceptível à mecânica do

processo erosivo (dispersão, transporte e deposição). De acordo com Agassi et al. (1981), a desintegração dos agregados da superfície do solo pelo impacto das gotas de chuva é um dos mecanismos responsáveis pelo selamento superficial do solo e a primeira etapa do processo erosivo. Teixeira e Martins (2003b) encontraram valores maiores do DMG na TPI Argissolo quando comparado aos valores obtidos em outra TPI que vem sendo cultivada há mais de trinta anos. Embora os resultados obtidos no presente estudo tenham seguido a mesma tendência, os valores do DMG da TPI Argissolo foram menores que os reportados por Teixeira e Martins (2003b).

No caso da TPI Latossolo e do Latossolo, resultados semelhantes do DMG indicam que em ambos os solos os agregados mais estáveis à água estão concentrados em diâmetros maiores que 2,0 mm. Os valores do DMG da TPI Latossolo e do Latossolo foram maiores que àqueles encontrados por Teixeira e Martins (2003b) em um Latossolo sob uma capoeira (pousio) com aproximadamente vinte anos. Isto indica que o DMG reflete a qualidade estrutural do solo, pois expressa o tamanho dominante da classe de agregados do solo, podendo ser usado como um excelente índice de estabilidade de agregados do solo (ROBINSON; PAGE, 1951).

A qualidade física dos horizontes das TPI e dos solos adjacentes foi avaliada por meio do Intervalo Hídrico Ótimo (IHO). De acordo com os valores do IHO, as plantas cultivadas nos solos adjacentes estão menos sujeitas a enfrentar restrições físicas do solo relacionadas ao potencial matricial, porosidade de aeração e resistência à penetração de raízes. Isto se deve ao fato da maior amplitude do IHO obtida nos solos adjacentes. Fora da faixa do IHO a ação dos fatores que afetam diretamente o crescimento de plantas é mais acentuada e dentro da faixa as restrições são menos limitantes.

O IHO incorpora os fatores que afetam diretamente o crescimento de plantas em uma única variável, proporcionando um parâmetro mais sensível às mudanças estruturais do solo (caracterizado pela densidade do solo) do que a água disponível (SILVA et al., 1994). No caso das TPI, o manejo do solo baseado apenas no conceito de água disponível (θ_{AD}) não seria eficiente, pois poderia comprometer a produtividade das culturas já estabelecidas, restringir a emergência de plântulas e o crescimento de raízes.

Nas TPI foi observado que o aumento da densidade do solo ocasionou a substituição do ponto de murcha permanente pela resistência à penetração (RP), compondo o limite inferior do IHO (Figura 26). Comportamento também observado no horizonte do Latossolo. Tormena et al. (1998) observaram que na utilização do IHO a RP é um importante atributo físico a ser considerado, ressaltando a importância de se avaliar os limites de RP para o crescimento de raízes em solos tropicais.

Progressivamente ao aumento da densidade do solo houve um decréscimo da porosidade de aeração, corroborando com os resultados observados em outros estudos (SILVA et al., 1994; TORMENA et al., 1998; ARAÚJO et al., 2004). O decréscimo da porosidade de aeração, observado nos quatro horizontes, não é suficiente para que a mesma substitua a capacidade de campo no limite superior do IHO, indicando que não ocorrerão restrições relacionadas à difusão de oxigênio. O aumento dos teores de água no ponto de murcha permanente, observado no Latossolo, reflete o aumento do número de partículas disponíveis para a retenção de água por unidade de volume, como ocorre durante a compactação do solo (van den BERG, 1997). Já o aumento observado na umidade retida na capacidade de campo (Latossolo, TPI Latossolo e TPI Argissolo) provavelmente deve-se à redução dos macroporos, que ao serem transformados em poros de diâmetro menor, passam a atuar na retenção de água (KERTZMAN, 1996). Resultados semelhantes foram obtidos Betz et al. (1998), Silva et al. (1994) e Tormena et al. (1999) em solos com diferentes composições granulométricas.

No caso Argissolo, IHO foi igual θ_{AD} , devido à pequena variação da RP em função do conteúdo de água (Figuras 17 e 18) e pelo fato da porosidade de aeração não substituir a capacidade de campo como limite superior do IHO (Figura 27). Assim, as plantas cultivadas neste solo podem ter seu manejo baseado na θ_{AD} , sem que ocorram restrições físicas dentro dessa faixa de água.

A densidade crítica (ρ_{sc}) indica o valor no qual o IHO = 0 (SILVA et al., 1994, IMHOFF et al., 2001). No presente trabalho não foi possível identificar a ρ_{sc} de acordo com os critérios considerados no modelo. Segundo Tormena et al. (2007), os sistemas de manejo em que ocorre maior frequência de $\rho_s < \rho_{sc}$ oferecem menores restrições físicas às plantas. Baseado no IHO, os resultados indicam que os solos não apresentam limitações ao crescimento de plantas, pois os valores de ρ_s encontrados

estão abaixo da ρ_{sc} . Assim, práticas de manejo do solo que aumentem o IHO estarão contribuindo para a melhoria das condições físicas do solo, garantindo que os valores de densidade do solo não atinjam o nível crítico. O cálculo da ρ_{sc} permite que a área em estudo seja monitorada, fornecendo respostas sobre o sucesso ou não das práticas de manejo adotadas e, no caso de áreas georeferenciadas, os locais exatos que necessitam de alguma intervenção com o objetivo de melhorar a estrutura do solo.

A qualidade física do solo avaliada por meio do índice “S”, proposto por Dexter (2004b), exibiu resultados semelhantes aos encontrados pelo Intervalo Hídrico Ótimo, onde os solos adjacentes apresentaram melhores condições estruturais quando comparados às TPI. De acordo com Dexter (2004b), o valor de $S = 0,035$ representa o limite de caracterização da estrutura do solo, valores acima do deste limite estão relacionados à condições estruturais adequadas ao crescimento de plantas. Abaixo de $0,035$ relaciona-se à solos com condições inadequadas. Baseado neste limite, os horizontes das TPI e dos solos adjacentes encontram-se com condições físicas do solo adequadas ao crescimento de plantas.

Embora a qualidade física das TPI, avaliadas pelo IHO e pelo S, tenha se mostrado abaixo dos valores obtidos nos solos adjacentes, deve-se ressaltar que são solos que vêm sendo utilizados durante várias décadas para fins agrícolas e ainda mantêm condições físicas do solo adequadas ao crescimento de plantas, considerando os limites estabelecidos pelos índices de qualidade do solo. Além disso, as TPI apresentam resultados semelhantes, e em alguns casos maiores/melhores, para as propriedades físicas avaliadas neste estudo. Neste aspecto, os horizontes antrópicos denominados Terra Preta de Índio, trata-se de um sistema de manejo do solo poderoso (na definição de resultantes) e eficiente (pela garantia de permanência das condições de manejo) para as condições tropicais (Ranzani et al., 1962), pois seria pouco provável que qualquer outro tipo de solo apresentasse propriedades físicas semelhantes às encontradas nas TPI, após o uso intensivo durante o mesmo espaço de tempo.

3 CONCLUSÕES

Baseado nos parâmetros e índices de qualidade física do solo (Intervalo Hídrico Ótimo e S), os resultados comprovaram parcialmente a hipótese testada. As Terras Pretas de Índio (TPI) apresentam condições físicas do solo adequadas ao crescimento de plantas. Entretanto, os horizontes antrópicos nas TPI não apresentam propriedades físicas mais adequadas ao crescimento de plantas que os horizontes superficiais adjacentes.

Os índices de qualidade física do solo indicaram que as TPI não apresentam degradação estrutural do solo nem condições limitantes, relacionadas aos fatores que afetam diretamente o crescimento de plantas.

As TPI possuem altos teores de carbono orgânico, ampla disponibilidade de água e baixos valores de densidade do solo. Além disso, exibem condições de aeração, porosidade e condutividade hidráulica adequadas para promover a infiltração de água e a realização das trocas gasosas. São solos com um alto potencial produtivo e que podem fornecer informações para o aprimoramento de técnicas de manejo do solo em condições tropicais.

REFERÊNCIAS

AGASSI, M.; SHAINBERG, I.; MORIN, J. Effect of electrolyte concentration and soil sodicity on infiltration rate and crust formation. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 45, p. 848–851, 1981.

AMÉZKETA, E. Soil aggregate stability: A review. **Journal of Sustainable Agriculture**, Binghamton, v. 14, p. 83-151, 1999.

ANGERS, D.A., MEHUYS, G.R. **Aggregate stability to water** In: CARTER, M.R. (Ed.). *Soil Sampling and Methods of Analysis*, Boca Raton, Ann Arbor London: Lewis Publishers, 1993. p. 651-657.

ARAUJO, M.A.; TORMENA, C.A.; SILVA, A.P. Propriedades físicas de um Latossolo Vermelho distrófico cultivado e sob mata nativa. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, n. 2, p. 337-345, 2004.

BENGOUGH, A.G.; MULLINS, C.E. Mechanical impedance to root growth: a review of experimental techniques and root growth responses. **Journal of soil Science**, London, v. 41, p. 341-358, 1990.

BENGOUGH, A.G.; CAMPBELL, D.J.; O'SULLIVAN, M.F. Penetrometer techniques in relation to soil compaction and root growth. In: SMITH, K.A.; MULLINS, C.E. (Ed.) **Soil environmental analysis: physical methods**. 2nd ed New York: Marcel Dekker, 2001. p. 377-403.

BERNOUX, M.M.Y.; ARROUAYS, D.; CERRI, C.C, VOLKOFF, B.; JOLIVET, C. Bulk density of Brazilian Amazon soils related to other soil properties. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 62, p. 743-749, 1998.

BETZ, C. L.; ALLMARAS, R.R.; COPELAND, S.M.; RANDALL, G.W. Least limiting water range: traffic and long-term tillage influences in a Webster soil. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.62, p.1384-1393, 1998.

BLAKE, G.R.; HARTGE, K.H. Bulk density. In: KLUTE, A. (Ed.). **Methods of soil analysis: physical and mineralogical methods**. 2nd ed. Madison: American Society of Agronomy, 1986. chap.13, p. 363-375.

BRADY, N.C.; WEIL, R.R. **Elements of the nature and properties of soils**. 13 th ed. New Jersey: Prentice Hall, 2003. 624p.

BROWNING, G.M.; RUSSEL, M.B.; Mc HENRY, J.R. A comparison of methods for determining and expressing soil aggregation data. **Soil Science Society of America Proceedings**, Oxford, p. 91-96, 1944.

BUSSCHER, W.J.; BAUER, P.J.; CAMP, C.R.; SOJKA, R.E. Correction of cone index for soil water content differences in a coastal plain soil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 43, p. 205-217, 1997.

BYRD, C.W.; CASSEL, D.K. The effect of sand content upon cone index and selected physical properties. **Soil Science**, Baltimore, v. 129, p.197-204, 1980.

CASTRO FILHO, C. **Effects of liming on characteristics of a Brazilian Oxisol at three levels of organic matter as related to erosion**. 1998. 261p. Dissertation (Phd) - The Ohio State of University, Columbus, 1998.

CASTRO FILHO, C.; LOURENÇO, A.; GUIMARÃES, M de F.; FONSECA, I C. B. Aggregate stability under different soil management systems in red latosol in the state of Parana, Brazil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 65, p. 45-51, 2002.

CAUSARANO, H. Factors affecting the tensile strength of soil aggregates. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 28, p. 15-25, 1993.

CHAN, K.Y. **Bulk Density**. In: LAL, R (Ed.). **Encyclopedia of Soil Science**, New York: Marcel Dekker, 2002. p. 128-130.

CONAWAY, A.W.; STRICKLING, E. A comparison of selected methods for expressing soil aggregate stability', **Soil Science Society America Proceeding**, Madison, v. 24, p. 426-430, 1962.

CORRÊA, J.C. Características físicas de um Latossolo Amarelo muito argiloso. (typic Acrorthox) do Estado do Amazonas, sob diferentes sistemas de preparo do solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 20, p. 1381-1387, 1985.

COSTA, M.L.; KERN, D.C. Geochemical signatures of archeological sites with Black Earth soils in Amazon region. **Journal of Geochemical Exploration**, Netherlands, v. 66, p. 369-385, 1999.

CULLEY, J.L.B. Density and compressibility. In: CARTER, M.R. (Ed.). **Soil Sampling and Methods of Analysis**, Boca Raton; Ann Arbor; London: Lewis Publishers, 1993, p. 529–539.

DENEVAN W.M. The Aboriginal population of Amazonia. In: DENEVAN, W (Ed.). **The native population of the Americas in 1492**. Madison: University of Wisconsin Press, 1992, p. 205-234.

DENEVAN, W.M. A bluff model of riverine settlement in prehistoric Amazonia. **Annals of the Association of American Geographers**, Washington, v. 86, n.4, p. 654-681, 1996.

DENEVAN, W.M. **Cultivated Landscapes of Native Amazonia and the Andes**. Oxford University Press, 2001. 396p.

DERENNE, S.; LARGEAU, C. A review of some important families of refractory macromolecules: Composition, origin, and fate in soils and sediments. **Soil Science**, Baltimore, v. 166, p. 833-884, 2001.

DEXTER, A.R. Advances in characterization of soil structure. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 11, p. 199-238, 1988.

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

DEXTER, A.R. Soil physical quality: Part II. Friability, tillage, tilth and hard-setting. **Geoderma**, Amsterdam, v. 120, n. 3, p. 215-225, 2004b.

DEXTER, A.R. Soil physical quality: Part III. Unsaturated hydraulic conductivity and general conclusions about S-theory. **Geoderma**, Amsterdam, v. 120, n. 3, p. 227-239, 2004c.

DEXTER, A.R. Soil physical quality. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 79, p.129-130, 2004d.

DEXTER, A.R.; KROESBERGEN, B. Methodology for determination of tensile strength of soil aggregates. **Journal of Agricultural Engineering Research**, London, v. 31, p. 139-147, 1985.

DEXTER, A.R. WATTS, C.W. Tensile strength and friability. In: SMITH, K.A.; MULLINS, C.E. (Ed.). **Soil and environmental analysis. Physical methods**, 2nd ed. New York: Marcel Dekker, 2000. p. 401-430.

DEXTER, A.R.; CZYŻ, E.A; GATE, O.P. A method for prediction of soil penetration resistance. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 93, p. 412-419, 2006.

DONAHUE, L.D.; MILLER, R.W.; SHICKLUNA, J.C. **Soils**: An introduction to soils and plant growth. 5.th ed. London: Prentice-Hall, 1983. 667p.

DORAN, J.W.; JONES, A.J. Methods for Assessing Soil Quality. In: DORAN, J.W.; JONES, A.J. (Ed). **Methods for Assessing Soil Quality** Madison: WI. Soil Science Society of America, 1996. 410p. (Soil Science Society of America Special Publication 49).

EDEN, M.J.; BRAY, W.; HERRERA, L.; McEWAN, C. Terra Preta soils and their archeological context in the Caqueta Basin of Southeast Colombia. **American Antiquity**, Washington, v. 49, p. 125-140, 1984.

EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solo**. 2.ed. Rio de Janeiro: . Centro Nacional de Pesquisa de Solos.1997. 212p_(EMBRAPA – CNPS. Documentos; 1).

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. **Manual de Métodos de Análises de Solos**. Rio de Janeiro. 1997, 212p.

FALESI, I.C. **O estado atual dos conhecimentos sobre os solos da Amazônia brasileira**. In: IPEAN (Ed.) Zoneamento agrícola da Amazônia. Boletim Técnico Instituto de Pesquisa Agropecuária Norte, Belém: Embrapa CPATU in 1980, 1972. p. 33-64.

GEE, G.W.; BAUDER, J.W. Particle-size analysis. In: KLUTE, A. (Ed.) **Methods of soil analysis: physical and mineralogical methods**. 2nd ed. Madison: American Society of Agronomy, 1986. chap.15, p.383-409.

GERARD, C.J. The influence of soil moisture, soil texture, drying conditions and exchangeable cations on soil strength. **Soil Science Society America Proceedings**, Madison, v. 29, p. 641-645, 1965.

GERMAN, L. A geographical method for anthrosol characterization in Amazonia: contributions to method and human ecological theory. In: GLASER, B.; WOODS, W. I. **Amazonian dark earth: exploration in space and time**. Berlin: Springer, 2004. p. 29-52.

GIAROLA, N.F.B.; SILVA, A.P.; IMHOFF, S.; DEXTER, A.R. Contribution of natural soil compaction on hardsetting behavior. **Geoderma**, Amsterdam, v. 113, p. 95-108, 2003.

GLASER, B. Prehistorically modified soils of central Amazonia: a model for sustainable agriculture in the twenty-first century. **Philosophical Transactions of the Royal Society B**, London, v. 362, p. 187–196, 2007.

GLASER, B.; BALASHOV, E., HAUMAIER, L., GUGGENBERGER, G.; ZECH, W. Black carbon in density fractions of anthropogenic soils of the Brazilian Amazon region. **Organic Geochemistry**, London, v. 31, p. 668-678, 2000.

GLASER, B.; GUGGENBERGER, G.; ZECH, W. Identifying the pre-Columbian anthropogenic input on present soil properties of Amazonian dark earths (Terra Preta). In: GLASER, B; WOODS, W.I. (Ed.). **Amazonian Dark Earths: Exploration in Space and Time**. Berlin: Springer, 2004. p. 145-158.

GLASER, B.; ZECH; W.; WOODS, W.I. History, current knowledge and future perspectives of geoecological research concernig the origin of Amazonian anthropogenic dark earths (Terra Preta). In: GLASER, B ; WOODS, W.I. (Ed.) **Amazonian Dark Earths: Exploration in Space and Time**. Berlin,:Springer, 2004. p. 9-17.

GLINSKI, J.; STEPNIEWSKI, W. **Soil aeration and its role for plants**. Florida: Boca Raton:CRC Press, 1985. 250p.

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

GUÉRIF, J., RICHARDS, G., DÜRR, C., MACHET, J.M., RECOUS, S.; ROGER-ESTRADE, J. A review of tillage effects on crop residue management, seedbed conditions and seedling establishment. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 61, p. 13-32, 2001.

HAISE, H.R.; HAAS, H.J.; JENSEN, L.R. Soil moisture studies of some great plains soils. II. Field capacity as related to 1/3-atmosphere percentage, and minimum point as related to 15- and 26-atmosphere percentage. **Soil Science Society of America Proceedings**, Oxford, v. 34, p. 20-25, 1955.

HARTGE, K.H. Organic matter contribution to stability of soil structure. **Soil conditioners**, Madison, n. 7, p. 103-110, 1975.

HILLEL, D. **Environmental Soil Physics**. San Diego: Academic Press, 1998. 771 p.

HIRAOKA, M.; YAMAMOTO, S.; MATSUMOTO, E.; NAKAMURA, S.; FALESI, I.C.; BAENA, A.R.C. Contemporary use and management of Amazonian Dark Earth . In: LEHMANN, J.; KERN, D. C.; GLASER, B.; WOODS, W. I. **Amazonian dark earths; origin, properties and management**. Dordrecht,: Kluwer Academic Publishers, 2003. p. 387-406.

IJIMA, M.; KONO, Y.; YAMAUCHI, A.; PARDALESJUNIOR, J.R. Effects of soil compaction on the development of rice and maize root systems. **Environmental and Experimental Botany**, Oxford, v. 31, n. 3, p. 333-342, 1991.

IMHOFF, S.; SILVA, A.P.; DIAS JÚNIOR, M.S.; TORMENA, C.A. Quantificação de pressões críticas para o crescimento de plantas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25, p. 11-18, 2001.

IMHOFF, S. **Indicadores de qualidade estrutural e trafegabilidade de latossolos e argissolos vermelhos**. 2002. 94p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.

IMHOFF, S.; SILVA, A.P.; DEXTER, A.R. Factors contributing to the tensile strength and friability of oxisols. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v. 66, p. 1656-1661, 2002.

KÄMPF, N.; KERN, D.C. O solo como registro da ocupação humana pré-histórica n a Amazônia. In: VIDAL-TORRADO, P; ALLEONI, L.R.F.; COOPER, M.; SILVA, A.P.; CARDOSO, E.J. (Org.). **Tópicos em Ciência do Solo**, Viçosa, v.6, p. 277-320, 2005.

KARLEN, D.L.; MAUSBACH, M.J.; DORAN, J.W., CLINE, R.G.; HARRIS, R.F.; KAY, B.D. Rates of change of soil structure under different cropping systems. **Advances in Soil Science**, New York, v. 12, p. 1-52, 1990.

KEMPER, W.D., CHEPIL, W.S. Size distribution of aggregates. In: BLACK, C.A. (Ed.). **Methods of soil analysis**. Madison: American Society of Agronomy, 1965. p. 499-510.

KEMPER, W.D.; KOCH, E.J. **Aggregative stability of soils from western states of U.S. and Canada**. , Canada:U.S. Dept. Agric. arid zone soils, 1966. 52p. (Technical Bulletin, 1355).

KERN, D.C. **Caracterização pedológica de solos com Terra Preta Arqueológica na Região de Oriximiná, Pará**. 1988. 231p. Tese (Mestrado na área de ciência do solo) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Faculdade de Agronomia, Porto Alegre, 1988.

KERN, D.C.; KÄMPF, N. Antigos assentamentos indígenas na formação de solos com Terra Preta Arqueológica na região de Oriximiná, Pará. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 3, p. 219-225, 1989.

KERN, D.C.; D'AQUINTO, G.D.; RODRIGUES, T.E.; FRAZAO, F.; SOMBROEK, W., MEYERS, T.M.; NEVES, E.G.. Distribution of Amazonian Dark Earth in the Brazilian Amazon. In: LEHMANN, J.; KERN, D. C.; GLASER, B.; WOODS, W. I. **Amazonian dark earths; origin, properties and management**, Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2003. p. 51-77.

KERTZMAN, F.F. **Modificações na estrutura e no comportamento de um Latossolo Roxo provocadas pela compactação do solo**. 1996. 176p. Tese (Doutorado em Geografia) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 1996.

LE BISSONNAIS, Y. Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility. I. Theory and methodology. **European Journal of Soil Science**, London, v. 4, p. 425–437, 1996.

LEÃO, T.P.; SILVA, A.P.; PERFECT, E.; TORMENA, C.A. An algorithm for calculating the least limiting water range of soils using a statistical analysis system. **Agronomy Journal**, Madison, v. 97, p. 1210-1215, 2005.

LEHMANN, J.; GAUNT, J.; RONDON, M. Bio-char sequestration in terrestrial ecosystem – a review. **Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change**, Netherlands, v. 11, p. 403-427, 2006.

LEHMANN, J.; KERN, D.C.; GERMAN, L.; MCCANN, J.M.; MARTINS, G.C.; MOREIRA, A. (2003) Soil fertility and production potential. In: LEHMANN, J.; KERN, D. C.; GLASER, B.; WOODS, W. I. **Amazonian dark earths; origin, properties and management**. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2003. p. 105–124.

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

LIMA, H.N.; BENITES, V.M.; SCHAEFER, C.E.G.R.; MELLO, J.W.V.; KER, J.C. Caracterização de ácidos húmicos extraídos de Terra Preta de Índio. In: ENCONTRO BRASILEIRO DE SUBSTÂNCIAS HÚMICAS, 2001, Viçosa. **Resumos...** Viçosa: Departamento de Solos, Universidade Federal de Viçosa, 2001. p. 155-156.

LIMA, H.N.; SCHAEFER, C.E.R.; MELLO, J.W.V.; GILKES, R.J.; KER, J.C. Pedogenesis and pre-Colombian land use of "Terra Preta Anthrosols" ("Indian black earth") of Western Amazonia. **Geoderma**, Amsterdam, v. 110, p. 1-17, 2002.

LIPIEC, J.; HAKANSSON, I. Influences of degree of compactness and matric water tension on some important plant growth factors. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 53, p. 87-94, 2000.

MACKS, S.P.; MURPHY, B.W.; CRESSWELL, H.P.; KOEN, T.B. Soil friability in relation to management history and suitability for direct drilling. **Australian Journal of Soil Research**, Melbourne, v. 34, n. 3, p. 343-360, 1996.

MADARI, B.E.; SOMBROEK, W.; WOODS, W.I. Research on anthropogenic dark earths soils. Could be a solution for sustainable agricultural development in the Amazon? In: GLASER, B.; WOODS, W. I. **Amazonian dark earth**: exploration in space and time. Berlin: Springer, 2004. p. 169-180.

MADARI, B.E.; TEIXEIRA, W.G.; BENITES, V de MELO.; KERN, D.C.; FALCÃO, N.P.S. **Pesquisas sobre os solos antrópicos da Amazônia (Terra Preta de Índio) e sua relevância agrônômica**. Rio de Janeiro: EMBRAPA SOLOS, 2005. 27p.

MANN, C.C. The real dirt on rainforest fertility. **Science**, Washington, v. 29, p. 922-923, 2002.

MATERECHERA, S.A.; DEXTER, A.R.; ALSTON, A.M. Penetration of very strong soils by seeding of different plant species. **Plant and Soil**, Dordrecht, v.135, n.1, p.31-41, 1991.

McDONALD, R.C.; ISBELL, R.F.; SPEIGHT, J.G.; WALKER, J.; HOPKINS, M.S. **Australian soil and land survey**: field handbook. 2nd ed. Melbourne: CSIRO, 1998. 190p.

MEGGERS, B.J. **Amazônia**: a ilusão de um paraíso. São Paulo: Itatiaia ; EDIUSP, 1987.v. 1. 239 p.

MEGGERS, B.J. **Amazônia**: man and culture in a counterfeit paradise. Washington: Smithsonian Institution Press, 1996. 214p.

MEIRELLES FILHO, J. **O livro de ouro da Amazônia**. Rio de Janeiro: Ediouro, 2004. 397p.

MEROTTO, A.; MUNDSTOCK, C.M. Wheat root growth as affected by soil strength. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 23, p. 197-202, 1999.

MONHANTY, B.P.; SKAGGS, T.H.; van GENUCHTEN, M.T. Impact of Saturated Hydraulic Conductivity on the Prediction of Tile Flow. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v. 62, p. 1522-1529, 1998.

MORAN, E.F. A ecologia das populações da Amazônia. Petrópolis: Vozes. 1990. 367p.

MUALEM, Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. **Water Resource Research**, Washington, v. 12, p. 513-522, 1976.

MULLINS, C.E.; MacLEOD, D.A.; NORTHCOTE, K.H.; TISDALL, J.M.; YOUNG, I.M. Hardsetting soils: behaviour, occurrence and management. In: LAL, R.; STEWART, B.A. (Ed.). **Soil Degradation**. New York: Springer-Verlag, v. 11, p. 37-108, 1990.

MULLINS, C.E. Hardsetting soils. In: SUMNER, M.E. (Ed.). **Handbook of soil science**. New York: CRC Press, 1999. p.G65-G87.

NEVES, E.G.; PETERSON, J.B.; BARTONE, R.N.; SILVA, C.A. Historical and socio-cultural origins of Amazonian dark earths. In: LEHMANN, J.; KERN, D.C.; GLASER, B.; WOODS, W. I. **Amazonian dark earths; origin, properties and management**, 1 Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2003. p.29-50.

NORTCLIFF, S.; THORNES, J.B. Seasonal variations in the hydrology of a small forested catchment near Manaus, Amazonas, and its implication for management. In: LAL, R.; RUSSEL, E.W. (Ed.). **Tropical Agricultural Hydrology**. New York: John Wiley 1981. 482p.

NORTON, L.D., A.I. MAMEDOV, G.J. LEVY, AND C. HUANG. Soil aggregate stability as affected by long-term tillage and clay mineralogy. **Advances in Geocology**, Netherlands, v. 38, p. 422–429, 2006.

OLIVEIRA, J. B.; JACOMINE, P. K. T.; CAMARGO, M. N. **Classes gerais de solos do Brasil**. 2.ed., Jaboticabal: FUNEP, 1992. 201p.

OLIVER, J.R. The archeology of forest foraging and agricultural production in Amazonian. In: MCEWAN, C.; BARRETO, C.; NEVES, E. (Ed.) **Unknown Amazon: culture in nature in ancient Brazil**. London: British Museum Press, 2001. p. 50-85.

OR, D.; WRAITH, J.M. Soil water content and water potential relationships. In: SUMNER, M. E. (Ed.) **Handbook of Soil Science**. Boca Raton; Washington. 2000. p. 53-85.

PABST, E. **Terra Preta do Indio - Chemische Kennzeichnung und ökologische Bedeutung einer brasilianischen Indianerschwarzerde.** 1985 421p.Tese (Doutorado) - University of Bayreuth, Germany, 1985.

PERFECT, E.; KAY, B.D.; SILVA, A.P. Influence of soil properties on the statistical characterization of dry aggregate strength. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v. 59, p. 532-537, 1995.

PETERSEN, J.B; NEVES, E.G; HECKENBERGER, M.J. Gift from the Past: Terra Preta and Prehistoric Amerindian Occupation in Amazonia. In: MCEWAN, C.; BARRETO, C.; NEVES, E.G. (Org.). **Unknown Amazon: Nature in Culture in Ancient Brazil**, London: British Museum, 2001. p. 86-105.

PICCOLO, A.; MBAGWU, J.S.C. Role of hydrophobic components of soil organic matter in soil aggregate stability. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v. 63, p. 1081-1810, 1999.

RANZANI, G.; KINJO, T.; FREIRE, O. **Ocorrências de “plaggen epipedon” no Brasil.** Piracicaba, ESALQ, 1962 12p.(Boletim Técnico ESALQ, 5),

REYNOLDS, W.D. Saturated Hydraulic Conductivity: Laboratory measurement. In: CARTER, M.R. (Ed.). **Soil sampling and methods of analysis.** Boca Raton Lewis Publication; Florida: Canadian Society of Soil Science, 1993. p. 589-598.

REYNOLDS, W.D.; ELRICK, D.E. Falling head soil core (tank) method. . In: DANE, J.H.; TOPP, G.C. **Methods of soil analysis**, 3rd ed. Madison: SSSA, 2002. p.809-812. pt. 4: Physical methods

REYNOLDS, W.D.; YANG, X.M.; DRURY, C.F; ZHANG, T.Q.; TAN, C.S. Effects of selected conditioners and tillage on the physical quality of a clay loam soil. **Canadian Journal of Soil Science**, Ottawa, v. 83, p. 318-393, 2003.

RICHARDS, L.A.; WEAVER, L.R. Fifteen atmosphere percentage as related to the permanent wilting point. **Soil Science**, Baltimore, v. 56, p.331-339, 1944.

ROBINSON, D.; PAGE, J.B. Soil aggregate stability. **Soil Science Society America Proceedings**, Madison, v. 15, p. 25-29, 1950.

RODRIGUES, T.E. Solos da Amazônia. In: ALVAREZ, V.H.; FONTES, L.E.F. (Ed.) **O solo nos grandes domínios morfoclimáticos do Brasil e o desenvolvimento sustentado**, Viçosa: SBCS, UFV, 1996. p. 51-260.

ROOSEVELT, A.C. Chiefdoms in the Amazon and Orinoco. In: DRENNAN, R.;URIBE, C. (Ed.) **Chiefdoms in the Americas.** Lanham: University Presses of America, 1987. p. 153-185.

ROOSEVELT, A.C. Amazonian anthropology: strategy for a new synthesis. In:_____. (Ed.). **Amazonian indians from prehistory to the present: anthropological perspectives**. Tuscon: University of Arizona Press, 1994. p. 1-29.

ROOSEVELT, A.C. The Lower Amazon: a dynamic human habitat. In: LENTZ, D.L. (Ed.). **Imperfect balance: landscape transformations in the precolumbian americas**. New York, 2000. p. 455–491.

ROOSEVELT, A.C. Arqueologia Amazônica. In CUNHA, M. C. da (Org.) **História dos Índios no Brasil** São Paulo: Companhia das Letras, 2002. p. 53-86.

SANCHEZ, P.A. **Properties and management of soils in the tropics**. New York: John Wiley, 1976. 618p.

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

SANCHEZ, P.A.; COCHRANE, T.T. **Soil constraints in relation to major farming systems in tropical America**. In: Priorities for Alleviating Soil-Related Constraints to Food Production in the Tropics, Los Baños: International Rice Research Institute, 1980. p.107-139.

SAS INSTITUTE. SAS/STAT. **User's guide**. Version 8.2. Cary, NC, 2001. 943p.

SCHOENHOLTZ, S.H.; VAN MIEGROET, H.; BURGER, J.A. A review of chemical and physical properties as indicators of forest soil quality: challenges and opportunities. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 138, p. 335-356, 2000.

SCHUMAN, G.E. Soil quality: a concept, definition and framework for evaluation. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 61, n. 1, p. 4-10, 1997.

SHELDRIK, B.H.; WANG, C. Particle size distribution. In: CARTER, M.R. (Ed.), **Soil sampling and methods of soil analysis**. Boca Raton: Lewis Publishers, 1993. p. 499–512.

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

SKJEMSTAD, J.O.; CLARKE, P.; TAYLOR, J.A.; OADES, J.M.; MCCLURE, S.G. The chemistry 23 and nature of protected carbon in soil. **Australian Journal of Soil Research**, Collingwood, v. 34, p. 251-271, 1996.

SMITH, C.W.; JOHNSTON, M.A.; LORENZ, S. The effect of soil compaction and soil physical properties on the mechanical resistance of south African forestry soils. **Geoderma**, Amsterdam, v. 78, n. 1/2, p. 93-111, 1997.

SMITH, N.J.H. Anthrosol and human carrying capacity in Amazonia. In: ANNALS OF THE ASSOCIATION OF AMERICAN GEOGRAPHERS, 70. 1980, Durham,. **Anais...** Durham , 1980. p. 553-566.

SOMBROEK, W.G. **Amazonian soils**. A reconnaissance of the soils of the Brazilian Amazon. Wageningen: Centre for Agricultural Publication Documentation, 1966. 292p.

SOMBROEK, W., RUIVO, M.L., FEARNESIDE, P.M., GLASER, B.; LEHMANN, J. Amazonian Dark Earths as carbon stores and sinks. In: LEHMANN, J.; KERN, D.C.; GLASER, B.; WOODS, W. I. **Amazonian dark earths; origin, properties and management**. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2003. p.125-139.

STITT, R.E.; CASSEL, D.K.; WEED, S.B.; NELSON, L.A. Mechanical impedance of tillage pans in Atlantic Coastal Plain soils and relationships with soil physical, chemical, and mineralogical properties. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 46, p. 100–106, 1982.

TARDIEU, F. Growth and functioning of roots and to root systems subjected to soil compaction: towards a system with multiple signaling. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 30, p. 217-243, 1994.

TAYLOR, H.M.; ROBERSON, G.M.; PARKER, J.J. Soil strength-root penetration relations to coarse textured materials. **Soil Science**, Baltimore, v. 102, n. 1, p.18-22, 1966.

TEIXEIRA, W. G. **Land use effects on Soil Physical and Hydraulic Properties of a Clayey Ferralsol in the Central Amazon**. 2001. 255 p. Tese (Doutorado em Naturwissenschaften) - University of Bayreuth,. Bayreuth, Alemanha, 2001.

TEIXEIRA, W.G. O manejo do solo pelas populações pré-colombianas na Amazônia brasileira: vestígios deixados nas terras pretas de índio e terras mulatas. In: REUNIÃO AMAZÔNICA DE AGROECOLOGIA, 2007 Manaus. **Anais...** Manaus, 2007. p. 47-55.

TEIXEIRA, W. G.; MARTINS, G. C. Soil physical characterization. In: LEHMANN, J.; KERN, D.C.; GLASER, B.; WOODS, W. I. **Amazonian dark earths; origin, properties and management**. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2003a. p.271-286.

TEIXEIRA, W. G.; MARTINS, G. C. Estabilidade de agregados como indicador da qualidade física do solo em Terra Preta de Índio. In: XXIX Congresso Brasileiro de Ciência do Solo, Ribeirão Preto, 2003b. **Anais...** Ribeirão Preto, 2003b. p. 1-5.

TEIXEIRA, W.G.; MARTINS, G. C.; LIMA, H.N. An Amazonian Dark Earth profile description from a site located in the floodplain (várzea) in the Brazilian Amazon. In: CONGRESSO DE ARQUEOLOGIA EN COLOMBIA, 3., 2004, Papayan. **Anais...** Papayan, 2004. 5p.

TORMENA, C.A. **Caracterização e avaliação do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Roxo**. 1998. 106 p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1998.

TORMENA, C.A.; SILVA, A.P.; LIBARDI, P.L. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Roxo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 22, p. 573-581, 1998.

TORMENA, C.A.; SILVA, A.P.; LIBARDI, P.L. Soil physical quality of a Brazilian Oxisol under two tillage systems using the least limiting water range approach. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 52, p. 223-232, 1999.

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

TOPP, G.C.; GALGANOV, Y.T.; BALL, B.C.; CARTER, M.R. Soil water desorption curves . In: CARTER, M.R. (Ed.). **Soil Sampling and Methods of Analysis**. Boca Raton: Lewis Publishers, 1993. p. 569–579.

UTOMO, W.H.; DEXTER, A.R. Soil friability. **Journal of Soil Science**, London, v. 32, n. 3, p. 203-213, 1981.

VAN DEN BERG, M.; KLAMT, E.; VAN REEUWIJK, L.P.; SOMBROEK, W.G. Pedotransfer functions for the estimation of moisture retention characteristics of Ferralsols and related soils. **Geoderma**, Amsterdam, v. 78, p. 161-180, 1997.

VAN GENUCHTEN, M.T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Madison, **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 44, p. 892-898, 1980.

VIEHMEYER, F.J.; HENDRICKSON, A.H. Soil moisture conditions in relation to plant growth. **Plant Physiology**, Rockville, v. 2, p. 71-78, 1927.

VIEIRA, L.S. **Manual de Ciência do Solo**. São Paulo: Editora Agronômica Ceres, 1975. 464p.

WARRICK, A.W.; NIELSEN, D.R. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: HILLEL, D. (Ed.). **Applications of soil physics**. New York: Academic Press, 1980. p. 319-344.

WATTS, C.; DEXTER, A.R. The influence of organic matter in reducing the destabilization of soil by simulated tillage. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 42, n. 2, p. 253-275, 1997.

WATTS, C.; DEXTER, A.R. Soil friability: theory, measurement and the effects of management and organic carbon content. **European Journal of Soil Science**, London, v. 49, p. 73-84, 1998.

WOLBACH, W.S.; ANDERS, E. Elemental carbon in sediments: determination and isotopic analysis in the presence of kerogen. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, London, v. 53, p.1637-1647, 1989.

WOODS, W.I. Development of antrosol research. In: LEHMANN, J.; KERN, D.C.; GLASER, B.; WOODS, W.I. **Amazonian dark earths; origin, properties and management**. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2003. p. 3-14.

WU, L.; FENG, G.; LETEY, J.; FERGUNSON, F.; MITCHELL, J.; McCULLOUGH-SANDEN, B.; MARKEGARD, G. Non limiting water range (NLWR) as index of soil quality as related to physical properties. **Geoderma**, Amsterdam, v. 114, p. 401-414, 2003.

ZECH, W.; HAUMAIER, L.; HEMPFLING, R. Ecological aspects of soil organic matter in tropical land use. In: McCARTHY, P.; CLAPP, C. E.; MALCOM, R. L.; BLOOM, P. R. (Ed.). **Humic substances in soil and crop sciences: Selected Readings**. Madison :American Society of Agronomy and Soil Science Society of America, 1990. p. 187-202.