

UFRRJ

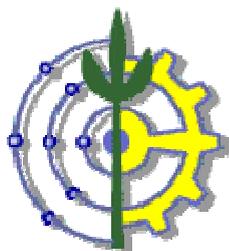
**INSTITUTO DE AGRONOMIA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA
CIÊNCIA DO SOLO**

DISSERTAÇÃO

**Variabilidade Espacial da Qualidade
Físico-Hídrica dos Solos de uma Unidade
de Pesquisa em Produção Agroecológica**

André Luis Oliveira Villela

2007



**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE AGRONOMIA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA
CIÊNCIA DO SOLO**

**VARIABILIDADE ESPACIAL DA QUALIDADE
FÍSICO-HÍDRICA DOS SOLOS DE UMA UNIDADE DE PESQUISA
EM PRODUÇÃO AGROECOLÓGICA**

ANDRÉ LUIS OLIVEIRA VILLELA

Sob a Orientação do Professor
Marcos Bacis Ceddia

e co-orientação do Professor
Carlos Alberto Alves Varela

Dissertação submetida como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Ciências**, no Curso de Pós-Graduação em Agronomia, Área de Concentração em Ciência do Solo.

Seropédica, RJ
Julho de 2007

Solicitar ficha catalográfica

É permitida a cópia parcial ou total desta dissertação, desde que seja citada a fonte.

**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE AGRONOMIA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA -CIÊNCIA DO SOLO**

ANDRÉ LUIS OLIVEIRA VILLELA

Dissertação submetida como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Ciências**, no Curso de Pós-Graduação em Agronomia, área de Concentração em Ciência do Solo.

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 13/07/2007.

Marcos Bacis Ceddia. Dr. UFRRJ
(Orientador)

Sidney Rosa Vieira. Ph.D. IAC

José Guilherme Marinho Guerra. Dr. Embrapa Agrobiologia

DEDICATÓRIA

Aos meus pais Edson Villela e Nely Oliveira, os grandes responsáveis por tudo que fiz e ainda farei. A cada dia tenho mais certeza que o amor, educação e respeito vêm de berço.

As minhas irmãs Andréia e Adriana. Nossa infância e adolescência foram fundamentais para a minha formação como ser humano, vocês estarão para sempre nas minhas melhores lembranças.

OFEREÇO

A minha esposa Elaine, minha companheira de todos os momentos, princípio e fim de toda formosura. Foram 100.000 km percorridos, para me aconchegar nos teus olhos, eu andaria muito mais se preciso fosse.

As minhas filhas Gabriela e Mariana, que mesmo sem entender, sofreram com minha ausência em tantos momentos importantes. Aproveitem a fantasia, que esse mundo de amanhã depende do seu amor.

HOMENAGEIO

Aos meus orientadores Bacis e Varella, que me confiaram seu conhecimento, respeito e profissionalismo. Serei eternamente grato e honrado por estes anos de tão agradável amizade.

AGRADECIMENTOS

Meus sinceros agradecimentos a todos aqueles que contribuíram para a concretização deste trabalho, em especial à:

UFRRJ por ter sido uma extensão de minha casa nesses últimos nove anos.

Departamento de Solos por possibilitar minha participação neste curso.

CNPq por toda ajuda financeira.

SIPA por ser o campo de “batalha” deste e tantos outros trabalhos.

Comitê de orientação, por toda paciência e esforço.

Professores e funcionários do Departamento de Solos, pelo conhecimento e convívio.

Funcionários do SIPA, pela amizade e colaboração.

Amigos e colegas da UFRRJ, por seu inestimável convívio.

Minha família pelo apoio e compreensão, em especial ao meu primo Eduardo, companheiro de aventuras, em no mínimo 60.000 km de estradas.

Professor Sidney Vieira do IAC, pelo apoio em vários momentos de dificuldade.

Amigos Glécio e Célia do IAC, grandes colaboradores deste trabalho.

Professor Daniel Fonseca, grande amigo e incentivador de meu ingresso neste curso.

Professor Raul de Lucena, meu primeiro orientador nesta casa, pela acolhida que foi fundamental na escolha do meu caminho profissional.

Todos aqueles que embora não tenham sido citados aqui, são parte deste trabalho e com toda certeza serão levados para sempre em minhas saudades.

RESUMO

VILLELA, André Luis Oliveira. **Variabilidade espacial da qualidade físico-hídrica do solo de um sistema em produção agroecológica**. 2007. 44f. Dissertação (Mestrado em Agronomia, Ciência do Solo). Instituto de Agronomia, Departamento de Solos, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2007.

O conhecimento da qualidade físico-hídrica dos solos é de grande importância no gerenciamento e planejamento de atividades agrícolas. Vários trabalhos são apresentados na literatura, visando identificar e relacionar a qualidade físico-hídrica dos solos com o desempenho das culturas. No entanto, em sua maioria, os resultados obtidos são pouco viáveis quando se pretende fazer o mapeamento da variabilidade espacial, sobretudo em grandes áreas. O objetivo desse trabalho foi avaliar a viabilidade de alguns indicadores físico-hídricos para mapear a qualidade físico-hídrica dos solos de uma área de pesquisa com sistema de produção agroecológica (SIPA). A área de estudo está localizada no município de Seropédica-RJ e compreende um território de 6,24 hectares coberto com pastagem e rotação de culturas em sistemas de glebas. Nesta área foi feita uma grade de amostragem onde se determinou os seguintes atributos físico-hídricos na camada de 0 a 0,30 m: Água facilmente disponível (AFD), porosidade de aeração (PA), resistência a penetração (RP) e taxa de infiltração estabilizada (TIE). Em cada ponto da grade foi feito o georreferenciamento com DGPS, determinando-se também a altitude. Amostras indeformadas nas profundidades de 0-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m foram coletadas para a determinação da textura, retenção de água a 10 kPa (CC), 80kPa e 1500 kPa (PMP), densidade do solo e densidade das partículas. A partir dos dados de retenção e umidade foram estimados os atributos AFD ($AFD = \theta_{CC} - \theta_{80kPa}$), porosidade total ($PT = 1 - \frac{D_s}{D_p}$) e porosidade de aeração ($PA = PT -$

CC). A TIE foi determinada através de um Permeômetro modelo IAC e a RP através do penetrômetro modelo Planalsucar. A partir dos dados utilizou-se o software Geoestat para avaliar a dependência espacial dos atributos e indicadores físico-hídricos (AFD, PA, RP e TIE) bem como interpolação por krigagem ordinária. Os mapas de variabilidade espacial foram organizados em um Sistema de Informação Geográfica (SIG), onde se efetuou a organização das classes de cada mapa em ótima, não restritiva e restritiva para desenvolvimento de lavouras. Posteriormente, os mapas de cada tema foram sobrepostos para geração do mapa de qualidade físico-hídrica do solo. De modo geral, os atributos físico-hídricos apresentam significativa correlação com altitude e teores de argila e areia, sendo que todos apresentaram dependência espacial. Sendo que o modelo ajustado variou entre gaussiano (altitude e argila), esférico (AFD e PA) e exponencial (RP e TIE). A integração dos indicadores água facilmente disponível, porosidade de aeração, resistência à penetração e taxa de infiltração estabilizada, no SIG, mostrou-se tecnicamente viável. Portanto, este procedimento pode ser usado para mapeamento da variabilidade espacial da qualidade físico-hídrica dos solos, sendo útil também para detectar as áreas mais vulneráveis à degradação física.

Palavras - chave: Qualidade Físico-hídrica. Geoestatística. Zonas de Manejo. Agroecologia. Agricultura de Precisão.

ABSTRACT

VILLELA, André Luis Oliveira. **Spatial variability of physical - hydric soil quality of an agroecological production system**. 2007. 44p. Dissertation (Master Science in Agronomy, Soil Science). Instituto de Agronomia, Departamento de Solos, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2007.

The knowledge of physical hydric soil quality indicators is crucial during planning and management of agriculture activities. Many articles had been written to identify and to correlate the physical hydric soil quality and crop production. However, the most part of the results are not reliable for mapping spatial variability, mainly in large areas. The objective of this study was to evaluate the feasibility of some indicators to map physical hydric quality of soils in a research area with agroecological production system (SIPA). The study site was located in the municipality of Seropédica, Rio de Janeiro State, Brazil. It has an area of 6.24 hectares, with coverage of pasture and a rotation of crops in a small plot system. A regular square grid was applied for soil sampling and measurement of the following physical hydric attributes, at 0.0 to 0.30m soil depth: Available water capacity (AWC), aeration porosity (AP), penetration resistance (PR), and water soil infiltration rate (WSIR). In each grid point, UTM coordinates and altitudes were determined using DGPS equipment. Undisturbed soil samples, at 0.0-0.10, 0.10-0.20 and 0.20-0.30m soil depth, were collected to analyze water retention at 10kPa (FC - Field Capacity), 80kPa (limit of tensiometer reading) and 1500kPa (PWP - Permanent Wilting Point), soil bulk and particle density, and soil texture. From the moisture retention data it was estimated AWC ($AWC = \theta_{CC} - \theta_{80kPa}$), the total porosity from soil densities ($TP = 1 - \frac{\rho_s}{\rho_p}$), and the aeration

porosity from total porosity and field capacity ($AP = TP - FC$). The WSIR was determined using a Permeameter IAC (Guelph modified), and the PR with a penetrometer of impact (Planalsucar model). The geostatistics evaluation of spatial dependence of AWC, AP, PR and WSIR indicators, as well as the interpolation by ordinary krigging, was performed by the GEOESTA software. The spatial variability maps of the indicators were stored in a Geographic Information System (GIS), where the map classes were organized into: suitable, not restricted, and restricted for plant development. Thereafter, the maps were overlaid to generate the soil physical hydric quality map. In general, all soil physical hydric attributes presented significant correlation with altitude and clay and sand content, and also showed spatial dependence. The semivariograms varied in relation to the best fit model, Gaussian to altitude and clay content, spherical to AWC and AP, and exponential model to PR and WSIR. The integration in the GIS of the indicators AWC, AP, PR and WSIR showed to be technically reliable. Thus, this procedure may be used to map spatial variability of soil physical hydric quality and also to detect the areas most vulnerable to physical degradation.

Key words: Physical Hydric Quality. Geostatistic. Management Zones. Agroecology, Precision Agriculture.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO DA LITERATURA.....	2
2.1 Indicadores Físico-Hídricos	2
2.1.1 Disponibilidade hídrica	3
2.1.2 Aeração.....	5
2.1.3 Resistência à penetração (RP).....	5
2.1.4 Taxa de infiltração estável (TIE)	6
2.2 Qualidade Físico-hídrica dos Solos	8
2.3 Sistemas de Informações Geográficas	10
2.4 Variabilidade Espacial	11
2.5 Geoestatística	11
3. MATERIAL E MÉTODOS	14
3.1 Área de Estudo	14
3.2 Sistematização dos Dados	16
3.3 Amostras de Solo	17
3.4 Análises Físico-Hídricas	18
3.4.1 Estudo volumétrico do solo	18
3.4.2 Testes de resistência à penetração.....	19
3.4.3 Testes de Infiltração TIE	20
3.5 Análise Geoestatística	21
3.6 Criação dos Mapas Temáticos no SIG	22
3.7 Classificação Físico-Hídrica	22
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	25
4.1 Análise Estatística Descritiva	25
4.2 Análise de Variabilidade Espacial	28
4.3 Mapas de Altitude e Atributos Físicos	29
5. CONCLUSÕES	38
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	39
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	40

1. INTRODUÇÃO

Os sistemas agroecológicos visam o manejo sustentável da unidade de produção, com enfoque sistêmico que privilegia a preservação ambiental, a agrobiodiversidade, os ciclos biológicos e a qualidade de vida do homem, visando a sustentabilidade social, ambiental e econômica no tempo e no espaço. Baseiam-se na conservação dos recursos naturais e não utilizam fertilizantes de alta solubilidade, agrotóxicos, antibióticos, aditivos químico-sintéticos, hormônios, organismos transgênicos e radiações ionizantes (Neves et al., 2004).

O Sistema Integrado de Pesquisa em Produção Agroecológica (SIPA) também conhecido como “Fazendinha Agroecológica do km 47” é um espaço destinado ao exercício da agroecologia. O SIPA foi implantado em 1993 no município de Seropédica-RJ e vem sendo conduzido em parceria entre a EMBRAPA, a Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro e a Empresa de Pesquisa Agropecuária do Estado do Rio de Janeiro. Segundo Almeida et al. (1983) apud Jesus (2003) a “Fazendinha” é uma referência de pesquisa sistêmica e tem buscado desenvolver tecnologias sustentáveis e adequadas aos agroecossistemas locais. No entanto, tem se observado grande variabilidade temporal, espacial e temática das atividades realizadas, uma vez que a coleta das informações é, com frequência, diferenciada e feita por vários profissionais, e que os métodos tradicionais de experimentação não se adaptam perfeitamente à proposta de trabalho. Como consequência, torna-se difícil a sistematização dos dados coletados em sistemas de informação geográficas impedindo o conhecimento dos fenômenos e da performance do sistema como um todo.

Alguns trabalhos têm sido conduzidos no SIPA utilizando sistemas de informação geográfica (SIG), destacando-se inicialmente Jesus (2003) e Rocha (2004) e mais recentemente Dias (2007) que espacializou os dados de fertilidade química e do uso dos solos do SIPA. Quanto às características físicas do solo, várias campanhas de campo foram feitas com o intuito de caracterizar a variabilidade espacial de diversos atributos.

Existem inúmeras publicações que tratam da correlação entre atributos físicos do solo e o desenvolvimento vegetal, porém, permanecem ainda dúvidas sobre as melhores metodologias e critérios globais para a espacialização e caracterização da qualidade físico-hídrica dos solos.

Assim, o objetivo deste trabalho foi levantar e sistematizar dados sobre diversos indicadores físico-hídricos dos solos do SIPA em um SIG, permitindo a avaliação da qualidade física do solo do SIPA.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Indicadores Físico-Hídricos

Vários fatores não-pedológicos influenciam os processos de transferência de ar e água entre a atmosfera e a rizosfera. Aí incluídos estão os fatores climáticos e fitológicos (Hillel, 1980a; Reichardt, 1990). Tudo que influencia as taxas de evapotranspiração e de respiração do sistema radicular afeta, de certa forma, a eficiência dos processos de troca de ar e água dentro dos vazios do solo. Dentre os fatores supracitados, destacam-se: chuva, radiação solar, temperatura (atmosférica e do solo), vento, umidade do ar, morfologia e espécie e variedade vegetal, etc.

Um solo que tenha estrutura física adequada para o desenvolvimento de certo cultivo em dado clima pode não ser propício para outra cultura, ou para a mesma cultura num clima distinto, razão por que a adequação dos solos quanto à capacidade de fornecer ar e água às raízes é um tema complexo (Ottoni Filho, 2003). Uma característica essencial de um solo produtivo do ponto de vista de fertilidade física é sua capacidade de troca de água e ar com as raízes em quantidades adequadas, e outra é que não ofereça impedimento mecânico ao desenvolvimento radicular.

Os estudos dos indicadores da qualidade físico-hídrica do solo e sua relação com o desenvolvimento das plantas não são recentes. Letey (1985) publicou um artigo em que expressa seu ponto de vista sobre o assunto e discute de forma pragmática as propriedades físicas do solo que afetam o desenvolvimento das plantas. O autor relaciona e discute as quatro propriedades físicas do solo que afetam diretamente o crescimento das plantas: a água, o oxigênio, a temperatura e a resistência à penetração (RP). Silva, et al. (2001) afirmaram que todos os fatores físicos do solo, diretamente relacionados ao crescimento das plantas, são dependentes da umidade do solo e condicionados pela compactação do mesmo. O efeito da umidade sobre a porosidade de aeração (PA) e a RP é intensificado pelo aumento da densidade do solo e pela quantidade de poros de pequeno tamanho, que caracterizam o incremento do grau de compactação do solo. Estes autores relatam ainda que para solos com estrutura adequada, a disponibilidade hídrica atua como limitante. Entretanto, a PA e a RP, mais sensíveis à deterioração física do solo do que a disponibilidade hídrica e tornam-se limitantes quando a estrutura é degradada. A partir dessas relações de dependência é possível estabelecer uma faixa na qual a disponibilidade hídrica, PA e RP não restringem o crescimento das plantas: o Intervalo Hídrico Ótimo. O conceito do intervalo hídrico ótimo (IHO) foi desenvolvido por Silva et al. (1994) e foi introduzido por Letey (1985) como "least limiting water range" (LLWR) e traduzido e utilizado no Brasil por Orellana et al. (1997) e Tormena et al. (1998) como expressão do termo LLWR em espanhol e português. Este conceito integra em um índice os conceitos das variáveis RP, PA e disponibilidade hídrica, permitindo inferir sobre a qualidade física de um solo para a expansão radicular das plantas.

Também é senso comum que, quanto à PA, o solo arenoso e permeável é mais adequado que o argiloso e adensado. Neste último, com frequência, pouquíssimas culturas podem sustentar-se em climas úmidos, uma vez que grande parte do volume total de poros está ocupada com água. Visto pelo lado da disponibilidade hídrica, entretanto, solos arenosos não irrigados, homogêneos e permeáveis, são comumente incapazes de manter qualquer vegetação que não aquelas resistentes a déficits hídricos. Dessa forma, é evidente a relevância das propriedades físico-hídricas dos solos quanto a sua fertilidade física, e que, de certa forma, pode existir uma competição envolvendo os indicadores PA e disponibilidade hídrica nos solos cultivados, já que ar e água dividem seus espaços nos vazios do solo.

O desenvolvimento vegetal é também diretamente afetado pelas temperaturas do solo, sendo, portanto, um importante fator de produção e colheita, influenciando diretamente os processos metabólicos dos vegetais. A temperatura do solo, porém, afeta de forma mais significativa a agricultura nas regiões de clima temperado, principalmente em função do congelamento de parte do solo durante determinado período do ano. Portanto, no presente trabalho, não foram avaliadas as temperaturas dos solos.

A resistência do solo à penetração (RP) constitui um dos atributos físicos considerados na avaliação da qualidade do solo e seu manejo. A RP é uma das características que melhor simulam as condições do desenvolvimento das raízes das plantas (Tormena & Roloff, 1996). Segundo Larson & Allmaras (1971) o desenvolvimento radicular é restringido pela elevada resistência do solo, associada à compactação deste.

A permeabilidade é uma das grandezas pedológicas que mais diz respeito aos processos dinâmicos nos vazios do solo. A condutividade hidráulica saturada no perfil mais superficial é fortemente relacionada com a taxa de infiltração básica (Hillel, 1980a; Bouwer, 1986) e com a permeabilidade dos macroporos no perfil, já que a condutividade hidráulica não saturada decresce significativamente a partir da saturação, com a diminuição do potencial matricial e do tamanho dos poros que retém água (Hillel, 1980b). A taxa de infiltração básica, portanto, além de ser uma grandeza relacionada com as taxas reais de infiltração e de escoamento superficial, pode também ser vista como medida relativa, parcial, da permeabilidade de ar nos macroporos (Otoni Filho, 2003).

Com base nas argumentações acima, é provável que haja considerações sobre a negligência de importantes propriedades físicas do solo como densidade, textura, agregação, estabilidade dos agregados, e tamanho e distribuição dos poros, uma vez que estas são comumente mensuradas e amplamente utilizadas também como indicadores da qualidade físico-hídrica do solo. Porém suas relações com o desenvolvimento vegetal se dão por seus efeitos na disponibilidade de água e ar, na temperatura e resistência do solo a penetração, sendo, portanto, seus efeitos indiretos (Letey, 1985).

2.1.1 Disponibilidade hídrica

O conceito de água disponível (AD) surge da necessidade de se determinar a quantidade de água armazenada no solo e disponível para que as plantas completem seus processos vitais. Considera-se que a avaliação da AD se faz pela diferença entre a capacidade de campo (CC) e a umidade obtida na câmara de pressão a 1.500 kPa (ponto de murcha permanente-PMP). Esta diferença é chamada de capacidade hídrica, capacidade de água disponível, disponibilidade hídrica ou água disponível no solo (Salter & Williams, 1965a; Bernardo, 1984; Reichardt, 1990). Este cálculo, embora antigo, é usado até os dias de hoje, principalmente em projetos de irrigação, onde é necessário estimar a lâmina de água armazenada no solo e a quantidade a ser irrigada para se restabelecer a CC.

Durante muitos anos esse conceito de AD foi motivo de controvérsias, pois alguns pesquisadores consideravam que parte da água neste intervalo de umidade (CC - PMP), não é efetivamente disponível para as plantas, pois omite características intrínsecas do sistema radicular. Em face disto, é possível 'que a tensão de água na base das raízes encontre-se abaixo de 1.500 kPa (PMP) e até mesmo próxima da tensão na CC, e ainda assim, a planta apresentar severo estresse hídrico (Boedt & Verheye, 1985; Cassel & Nielsen, 1986). Além disso, o conceito de AD é puramente volumétrico, não considera a distribuição da condutividade hidráulica não saturada no perfil.

Três posições surgiram então, em relação ao conceito de água disponível. Alguns pesquisadores acreditavam que toda a AD, obtida através da fórmula anteriormente citada, está igualmente disponível para as plantas, e que quando a umidade do solo alcança o PMP, a planta paralisa abruptamente absorção de água e murcha. Outra corrente acreditava que ao se

diminuir o conteúdo de água, a partir da CC em direção ao PMP, a disponibilidade de água é diminuída gradualmente e a planta pode não conseguir absorver água antes de atingir o PMP. A terceira escola se posicionava de forma intermediária às duas visões, alegando que na faixa de umidade entre a CC e o PMP existe um ponto crítico, a partir do qual a disponibilidade de água e a atividade vegetal reduzem de forma intensa com a diminuição da umidade.

De forma gráfica a visão das três escolas pode ser mais bem entendida, como mostrado abaixo:

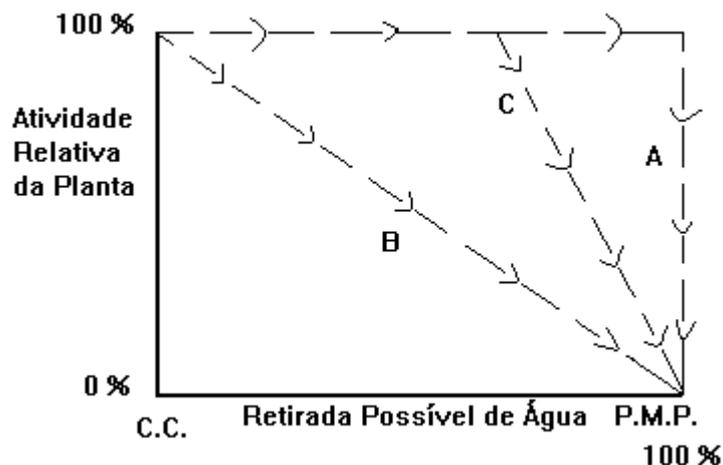


Figura 1. Três hipóteses que contemplam a disponibilidade de água do solo para as plantas: A- Disponibilidade de água desde a CC até o PMP; B- Disponibilidade de água diminui gradualmente com o decréscimo da umidade; C- Disponibilidade de água até um nível crítico. (Adaptado de Hillel, 1980).

Mais recentemente, com a introdução de novos conceitos relacionando o potencial total da água do solo, condutividade hidráulica e fluxo no solo e na planta, tornou-se claro que a interação solo-planta é dinâmica e que os conceitos estáticos de PMP, AD, CC, água gravitacional, etc, não se adaptam ao verdadeiro comportamento da água no solo. Com a consideração destes novos conceitos não se alterou o valor quantitativo da água disponível no solo, mas entendeu-se que a disponibilidade da água do solo não era determinada exclusivamente por propriedades do solo e sim outros fatores como as características da planta e do ambiente. Surgia então o conceito de sistema Solo-Planta-Atmosfera como um contínuo. Esta forma de abordar a disponibilidade de água para as plantas considera que o caminhamento da água à atmosfera, através das plantas, se dá em resposta a um gradiente de potencial de água, o qual decresce quando passa do solo para a planta e por fim para a atmosfera. Desta forma, o fluxo de água ocorre em um sistema solo-planta-atmosfera contínuo e dinâmico, governado por fatores do solo, da planta e da atmosfera. Assim, pode-se constatar que o modelo estático baseado nos conceitos de CC, PMP e AD, é uma simplificação dos fatores envolvidos no processo de captação de água pelas plantas.

Voltando às divisões das escolas que discordavam do significado do conceito de água disponível, pode-se constatar que o conceito referente à curva A do gráfico (Figura 1), se aplica melhor a solos de textura arenosa e baixa evapotranspiração, onde a curva de sucção de água aumenta de forma abrupta com a secagem do solo. O conceito referente à curva C se aplica melhor sob condições intermediárias de textura e evapotranspiração, enquanto que o conceito referente à curva B, é melhor adaptado às condições extremas de evapotranspiração potencial, com clima quente e seco, com ventos fortes e grande radiação solar. Com isso evidencia-se que as escolas estavam baseadas em experimentações limitadas sob algumas

condições climáticas e de solo, e que desta forma os resultados dificilmente seriam concordantes, daí gerando tantas discussões.

Deve-se ter claro ainda, que apesar das limitações do conceito de AD, baseado na subtração dos valores da CC pelo PMP, este atributo ainda representa o método prático mais utilizado no monitoramento da água do solo, em projetos de irrigação e em estudos de qualidade físico-hídrica de solos. Porém, o conceito implica em irrigações pouco freqüentes, que promovem momentos de precária aeração para as culturas, bem como déficit severo (Hillel, 1980a). Considerando-se o conceito solo-planta-atmosfera como um contínuo, verifica-se a importância de monitorar a água no solo por meio de medições que considerem a demanda energética exigida para que a planta possa absorver água do solo. Uma das possibilidades tecnológicas existentes é o uso de tensiômetros. O uso do tensiômetro implica em fixar a tensão limite em 0,08 MPa, uma vez que após esta tensão considera-se que haja diminuição no rendimento das culturas (Gonçalves et al., 2002).

Na maioria dos solos agricultáveis a faixa de operação do tensiômetro abrange mais de 50% do total de água disponível às plantas, podendo chegar a 75% ou mais em solos de textura arenosa. Consequentemente, em situações onde se deseja manter a tensão em valores pequenos, que são favoráveis ao desenvolvimento das plantas, o uso do tensiômetro é recomendado (Righes et al. 2003). Neste trabalho utilizou-se o conceito de Água Facilmente Disponível (AFD), como sendo o teor de água armazenado no solo entre a CC e o ponto crítico descrito no gráfico anterior na Curva C (tensão à 80KPa-tensão máxima de trabalho dos tensiômetros).

De acordo com Bureau of Reclamation (1953), solos com condições físicas favoráveis ao desenvolvimento vegetal apresentam valores superiores a 6% de água disponível total.

2.1.2 Aeração

Um perfil bem drenado internamente, garante de forma geral, boa aeração ao sistema radicular, pois, se forem volumosos os macroporos com ar, o processo de difusão de gases no solo é facilitado, devido ao aumento da convecção do ar. e da transferência de gases nos poros (Hillel, 1980b), tanto a permeabilidade do solo quanto a quantidade de água que sai do perfil durante o processo de drenagem interna afetam o caráter aerador dos solos.

Quanto à drenagem interna, a quantidade de água que drena desde a saturação do perfil até a capacidade de campo do solo, é chamada de porosidade drenável, porosidade livre ou capacidade de ar (Hillel, 1980b; Cruciani, 1983). Outros autores (Archer & Smith, 1972; Thomasson, 1978) denominaram a capacidade de ar como a diferença entre a porosidade total e a umidade em certo nível de tensão (normalmente 60 ou 50 cm de coluna d'água).

Cannell (1977), apud Silva (2002), detalha a relação entre o crescimento de plantas e a aeração do solo, em que as condições físicas do solo, favoráveis ao desenvolvimento vegetal, são associadas com uma porosidade de aeração (PA) mínima de 10%.

2.1.3 Resistência à penetração (RP)

As plantas podem ser diretamente afetadas por um fator freqüentemente referido como resistência mecânica do solo. Isto tem referência com a dificuldade que as raízes encontram no crescimento em camadas densas ou compactadas, ou ainda a dificuldade que as sementes encontram para emergência. Para representar e mensurar estas dificuldades, são utilizadas sondas (penetrômetros) que ao serem introduzidas no solo permitem a inferência de como a resistência mecânica do solo poder afetar o crescimento das plantas (Taylor, 1971) apud Letey (1985). A resistência à penetração é condicionada pela textura, densidade do solo e conteúdo de água.

Os penetrômetros têm por finalidade medir a resistência do solo à penetração, não servindo para medir a compactação do solo em termos absolutos, uma vez que a resistência a penetração varia em função do teor de água no solo. Todavia, permite uma orientação sobre a extensão das camadas mais adensadas e da profundidade de preparo do solo (Casagrande, 1991). O penetrômetro de impacto tem sido amplamente utilizado no campo para caracterizar a compactação provocada pelo uso e manejo do solo, em razão do baixo custo, da não-necessidade de calibração freqüente e do fato de os resultados independermos do operador (Tormena & Roloff, 1996).

As limitações dos penetrômetros são descritas por Camargo (1983): (a) a umidade do solo pode mascarar diferenças de densidade; (b) a resistência ao penetrômetro é influenciada pela textura; (c) a utilidade do penetrômetro na medida da compactação do solo é limitada a medidas feitas no solo à mesma umidade; (d) a maioria dos penetrômetros tem diâmetro maior que as porções das raízes que estão se alongando; (e) a ponta das raízes tem normalmente camadas de mucilagem que reduzem o atrito na superfície de contato com o solo, quando comparado ao do penetrômetro; (f) a raiz se deforma facilmente, enquanto a ponta do penetrômetro é rígida; (g) deve-se tomar cuidado ao usar o penetrômetro em solos pedregosos; (h) penetrômetros diferentes, em solos iguais, dão medidas diferentes de RP.

Os penetrômetros rotineiramente utilizados para a avaliação da compactação, são denominados em função do princípio de penetração, de estáticos, em que o conjunto é pressionado contra o solo, e a RP é registrada em um dinamômetro e, de dinâmicos, em que a haste penetra no solo em decorrência do impacto de um peso que cai em queda livre de uma altura constante (Stolf, 1991).

O penetrômetro de impacto registra a RP por unidade de profundidade, registrando assim a RP máxima na seção. A penetração é feita por meio de um peso constante, que percorre uma distância também constante sob a ação da gravidade, fazendo com que não haja interferência do operador, e o equipamento resulta de um equipamento robusto e leve (Casagrande, 2002).

Canarache (1990) sugere que valores maiores que 1,1MPa de RP começam a oferecer limitações ao crescimento radicular pleno. Unger e Kaspar (1994) citam valores de 0,7 a 1,4 como responsáveis por redução do crescimento radicular em 50 e 80% respectivamente, e que valores de 2 MPa são suficientes para que ocorra 100% de redução do crescimento, sendo este valor o ponto crítico mais freqüentemente observado na literatura em geral. Porém, outros pesquisadores como Sene et al. (1985), consideram críticos os valores que variam de 6,0 a 7,0 MPa para solos arenosos e em torno de 2,5 MPa para solos argilosos.

2.1.4 Taxa de infiltração estável (TIE)

Infiltração é o nome dado ao processo pelo qual a água penetra no solo através de sua superfície (Bernardo, 1995; Libardi, 1995), ou seja, é a entrada de água no solo através da interface solo-atmosfera. Assim, durante uma chuva ou irrigação, parte desta pode infiltrar e parte pode escorrer pela superfície do solo (Libardi, 2000). A velocidade (ou taxa) de infiltração básica (VIB) ou a taxa de infiltração estável (TIE) é expressa, em geral, em termos de altura de lâmina d'água, ou volume de d'água por unidade de área e tempo, geralmente, nas unidades de mm/h, cm/h ou l/s (Bernardo, 1995). Conhecer as características de infiltração de um solo é importante na definição de práticas hidráulicas e no dimensionamento e manejo de sistemas de irrigação.

A infiltração pode dar-se em todos os sentidos, na vertical (para cima e para baixo), na horizontal e em qualquer ângulo. Isto acontece porque a água sempre procura pontos de menor potencial total (Reichardt, 1978). O movimento da água no solo é regido basicamente pelas forças correspondentes aos potenciais mátrico e gravitacional. Em geral, no início da infiltração o potencial mátrico é o mais importante e, ao longo do tempo, progressivamente,

destaca-se o potencial gravitacional (Germann, 1983). No sentido vertical, para baixo, a infiltração tende a se dar mais rapidamente devido à influência da componente gravitacional (Reicahrtdt, 1978). Entretanto, quando o movimento da água ocorre, preponderantemente, por meio de poros grandes, o potencial mátrico tem efeito desprezível e o gravitacional constitui o principal componente de força que governa a infiltração vertical (Germann, 1983).

Em termos gerais, a taxa de infiltração (TI) é um processo desacelerado, isto é, diminui com o aumento do tempo de aplicação d'água. Inicialmente a TI é relativamente alta, e vai diminuindo, gradativamente, até um valor quase constante. Nesse ponto, em que a variação da TI é muito pequena, praticamente nula, ela é chamada de TIE (Bernardo, 1995). O valor da TIE de um solo é um fator de grande importância em irrigação, pois é ele que indicará quais os métodos de irrigação mais viáveis para aquele solo, bem como determinará a intensidade de precipitação máxima que poderá ser permitida na irrigação por aspersão.

A TIE é uma das características do solo mais difíceis de se caracterizar no campo, por causa de sua variabilidade espacial e temporal e já que não depende apenas da permeabilidade e das propriedades físicas e químicas do perfil do solo e da água, mas também das condições existentes no momento em que se efetua a sua medição (Silveira et al., 2001). O fluxo da água varia, inclusive, durante a infiltração pela orientação das partículas, lavagem do material mais fino, etc (Klar, 1984). Portanto, são vários os fatores que podem, em menor ou maior grau, condicionar a taxa de infiltração estável: teor de umidade inicial; condutividade hidráulica; permeabilidade; matéria orgânica; textura e estrutura; variabilidade espacial e manejo dos solos. Quanto à textura, por exemplo, solos de textura mais grosseira podem ter taxas de infiltração básicas bastante altas (superiores a 250 mm/h) e os argilosos compactados podem ter valores próximos à zero.

Como nos tempos prolongados de infiltração vertical o potencial gravitacional (com gradiente unitário) é predominante, espera-se que a TIE se aproxime da condutividade hidráulica saturada dos horizontes superficiais do solo, sendo, por isto, uma medida relativa, da permeabilidade do perfil do solo.

Vários são os métodos de campo para a determinação da TIE. Os mais usuais são: Método da "entrada-saída" d'água no sulco, método do "infiltrômetro de sulco", método do balanço d'água no sulco, método das bacias, método do "infiltrômetro de duplo anel", método do "infiltrômetro de aspersor" (Bernardo, 1995) ou mais recentemente, o método do permeâmetro IAC ou permeâmetro de Guelph modificado (Vieira et al., 1981). O mais utilizado é o do "infiltrômetro de duplo anel" (Embrapa, 1979; Bernardo, 1995).

Por muitos anos, várias tentativas foram feitas para medir infiltração e condutividade hidráulica no campo. Essas técnicas têm mostrado limitações teóricas e práticas incluindo baixa precisão, equipamentos complexos e de baixa confiabilidade, exigência de grandes quantidades de água e longos tempos para cada medição e a necessidade de dois ou mais operadores treinados. Segundo Vieira (1981), medições de permeabilidade, infiltração e condutividade hidráulica do solo, podem ser facilmente efetuadas no campo com permeâmetro de campo de carga constante, desenvolvido na Seção de Conservação do Solo do Instituto Agrônomo de Campinas, com o objetivo de atender às aplicações mais variadas na pesquisa agrônoma e em práticas agrícolas e sanitárias, mantendo como premissas a facilidade de operação, portabilidade, confiabilidade, precisão, e baixa necessidade de treinamento.

O permeâmetro modelo IAC, em condições de campo, obedece ao princípio de Mariotte, para medições de permeabilidade na superfície ou no perfil do solo saturado, por meio do fornecimento de água, mantendo carga hidráulica constante e conhecida. Seu projeto assegura que pequenos reparos possam ser facilmente efetuados no próprio campo, sem a necessidade de conhecimentos especializados para tanto. É construído inteiramente de materiais duráveis e não corrosivos, tendo a maior parte de suas peças em PVC, alumínio, e

acrílico. O peso total do equipamento, com reservatório cheio, é de aproximadamente 5 kg, o que permite o fácil transporte no campo. Dependendo do estado de umidade e do tipo do solo, pode-se efetuar cerca de 20 medições em 8 horas de trabalho, gastando para tanto, no máximo, 50 litros de água (Vieira et al., 1988).

O princípio de funcionamento é o seguinte: quando uma carga hidráulica constante é estabelecida em orifício aberto no solo, um bulbo saturado é rapidamente formado. O formato desse bulbo depende grandemente das características do solo. Assim que o bulbo saturado for estabelecido, o fluxo de água do orifício atinge valor constante, o qual pode ser medido. O fluxo constante, juntamente com os dados referentes à geometria das medições, ou seja, carga hidráulica e diâmetro do orifício podem ser usados para calcular a condutividade saturada de campo com precisão, rapidez e facilidade.

Devido à sua portabilidade, rapidez de medições e economia de água, o permeâmetro modelo IAC constitui-se em um equipamento que facilita a pesquisa sobre a variabilidade espacial da condutividade hidráulica do solo, de interesse em projetos de irrigação, conservação do solo e agricultura de precisão (Vieira et al., 1988).

2.2 Qualidade Físico-hídrica dos Solos

Das quatro condições físicas diretamente relacionadas com o crescimento de plantas, a água é considerada a dominante. As outras três são afetadas pelo conteúdo de água, como esquematizado e mostrado na Figura 2.



Figura 2: Representação esquemática entre água e os parâmetros físicos do solo que afetam diretamente o crescimento de plantas (Letey, 1985).

Valores de densidade do solo (DS) e tamanho e distribuição dos poros afetam a relação entre água e valores de porosidade de aeração (PA) e resistência à penetração (RP). A relação entre água e aeração é oposta àquela entre água e resistência à penetração. Aumentos de conteúdo de água diminuem a aeração, o que é indesejável, mas diminui a RP, o qual é desejável. O efeito da água nestes dois parâmetros é intensificado pelo incremento dos valores de densidade do solo (DS) e a presença de microporosidade. O alcance do ótimo conteúdo de água para o crescimento das plantas geralmente é avaliado baseado na disponibilidade de água na planta por si. O limite superior é usado associado com a capacidade de campo (CC) e o limite inferior pelo ponto de murcha permanente ou pelo potencial de água a partir do qual

não há redução do crescimento de plantas. Porém, esta faixa ótima de água não limitante (FANL) poderá ser afetada pela PA e pela RP, principalmente em solos mal estruturados com altos valores de DS. A PA é possivelmente limitante para o crescimento radicular na CC, e um menor conteúdo de água é requerido para adequadas PA. Por outro lado, a RP, que restringe o crescimento radicular pode ocorrer mesmo com teores de umidade mais altos do que o valor que seria considerado limitante para as plantas com base na água disponível (AD). Em outras palavras, a FANL pode ser reduzida pobre PA e alta RP em alguns solos. Na medida em que aumentam os valores de DS e/ou ocorre piora na estrutura, a FANL se torna estreita, como ilustra a Figura 3.

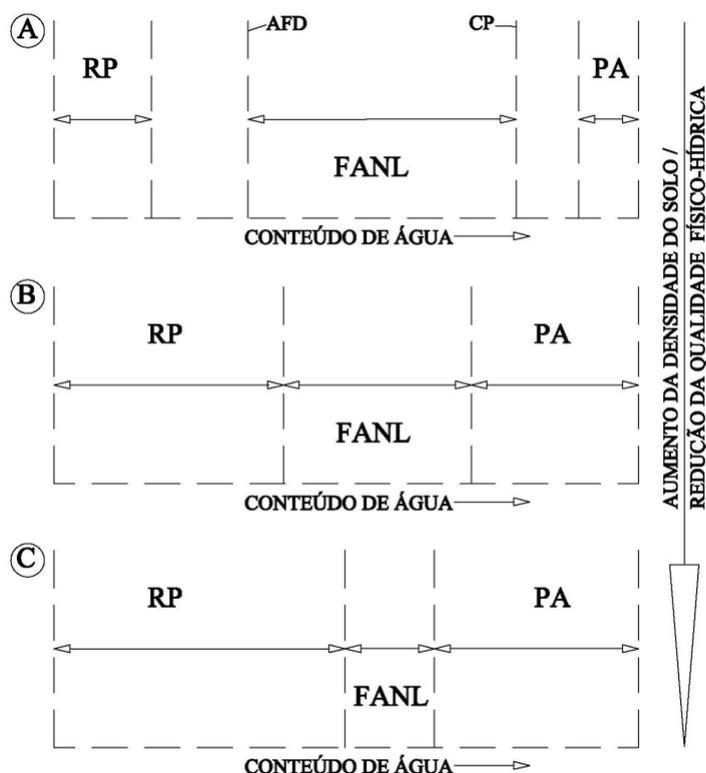


Figura 3: Relação entre compactação/adensamento do solo e o desenvolvimento de plantas. Adaptado de Camargo et al. (1997) e Letey (1985).

Embora a diversidade de aspectos de produtividade de um determinado solo sejam temas de alternativas de manejo, estes são física e economicamente difíceis de manejar. Diferentes potenciais são também esperados para diferentes solos em função de suas propriedades físicas. A medição tradicional das propriedades físicas, como DS, índice de estabilidade dos agregados, textura, etc., não têm sido muito úteis na avaliação da produtividade potencial do solo. A informação de AFD em diferentes profundidades é proposta como sendo o melhor método de caracterização das propriedades físicas do solo quando a produtividade é considerada. Esta informação também provê diretrizes de manejo (Letey, 1985).

Segundo Ottoni Filho (2003), é possível elaborar um sistema de classificação dos solos que considere algumas características estritamente pedológicas relacionadas com o espaço poroso do solo. Com esse enfoque, poderiam ser classificados solos de diversas classes texturais e até solos orgânicos com boa drenagem. Nessa linha de raciocínio destaca-se o trabalho de Thomasson (1978), que propõe um sistema de classificação baseado em dois componentes volumétricos dos vazios.

2.3 Sistemas de Informações Geográficas

Historicamente o mapa analógico foi o método mais comum de representação das informações espaciais, com as primeiras versões aparentemente anteriores ao primeiro alfabeto. O manejo e manipulação de dados espacialmente relacionados, usando técnicas computacionais, começou em 1960 e cresceu rapidamente em 1990. Este crescimento rápido está relacionado à disponibilidade de computadores com alta velocidade de processamento, o que também levou ao desenvolvimento da disciplina de geoprocessamento (Petersen et al., 1995). O geoprocessamento utiliza técnicas matemáticas e computacionais para o tratamento de informações geográficas (Câmara & Medeiros, 1998). Os instrumentos computacionais do geoprocessamento são chamados de sistemas de informações geográficas (SIG)¹. De acordo com Borrough (1990), SIG é um conjunto de ferramentas de coleta, armazenamento, recuperação, transformação e apresentação dos dados do mundo real, para um propósito particular. Os SIG permitem a realização de análises complexas, ao integrar dados de diversas fontes e ao criar bancos de dados georreferenciados². Os dados geográficos em um SIG descrevem objetos do mundo real em termos de: a) sua posição em relação a um sistema de coordenadas (pode ser obtido através de GPS³); b) seus atributos (ex. cor, pH, custo) são relacionados a uma posição; e c) é possível simular interrelações entre atributos do mundo real para estudar o fenômeno e o relacionamento entre atributos (relação topológica⁴). Uma vez armazenados em um SIG, os dados podem ser acessados, transformados e manipulados interativamente. Eles podem servir como um campo de testes para estudos de processos ambientais ou para analisar os resultados de testes, ou ainda para antecipar possíveis resultados dos planos de decisão. Segundo Xavier da Silva (1999), o geoprocessamento é um método que propicia a visão da situação ambiental como um todo (visão holística) de forma operacionalizada.

Os SIGs podem facilitar na identificação de fatores limitantes da produtividade das culturas, tornando viável a execução de análises complexas que envolvem o estudo da variabilidade espacial e temporal de atributos. Contudo, para se estimar a variabilidade torna-se necessário fazer inferência sobre valores não medidos com o uso de interpoladores. A geoestatística incorporada ou associada aos SIGs, tem se mostrado adequada ao mapeamento da variabilidade espacial e temporal, e representa uma promissora ferramenta para trabalhos com SIG (Valeriano e Prado, 2001). A qualidade e conseqüentemente a utilidade dos mapas elaborados em SIGs, em geral derivados por reclassificação e recombinação, é resultante da qualidade da informação e dos procedimentos utilizados, ambos intimamente associados a forma como os dados estão representados. Técnicas de mapeamento que utilizam ferramentas geoestatísticas, associadas a modelos fuzzy encontram-se na literatura recente, tanto para o

¹ SIG – O termo sistema significa que os SIG são constituídos de vários programas computacionais interrelacionados e ligados, mas com diferentes funções; o termo informação implica que os dados processados em um SIG podem ser transformados em informação; o termo geográfico significa que a localização dos dados é conhecida, ou pode ser calculada, em termos das coordenadas (latitude e longitude) (Bonham-Carter, 1996).

² Dados georreferenciados – são dados relacionados por meio de coordenadas, isto é, toda informação está relacionada a uma posição em um sistema de coordenadas (Rossitier, 1999).

³ O Global Positioning System (GPS) foi desenvolvido pelos militares americanos para fins de determinação precisa do posicionamento de um ponto na superfície terrestre. A precisão do posicionamento fornecido pelo sistema é, de modo geral, 20 metros, o qual é baseado em uma probabilidade de erro de 5%. É possível diminuir ainda mais o erro de posicionamento com o emprego do GPS no modo diferencial (DGPS).

⁴ Relação topológica – topologia é a estrutura de relacionamentos espaciais (vizinhança, proximidade, pertinência) que pode ser estabelecida entre objetos geográficos. A capacidade de armazenar a topologia de um mapa é uma das características básicas que distinguem um SIG de um sistema CAD (Projeto Auxiliado por Computador) (Câmara & Medeiros, 1998).

mapeamento de solos como de aptidão agrícola. Os mapas temáticos derivados por essas novas técnicas de mapeamento, representam as informações de solos como um contínuo, pois consideram a variabilidade espacial das propriedades do solo, possibilitando assim o armazenamento e recuperação num SIG de informações com maiores possibilidades de interação com outras variações ambientais.

2.4 Variabilidade Espacial

De acordo com Plant (2001) a variabilidade espacial pode ser influenciada por: diferenças de topografia, estrutura do solo, características do lençol freático, microclima e práticas de manejo. Tradicionalmente os experimentos agrícolas utilizam a estatística clássica para avaliação dos resultados, baseando-se na independência entre as amostras e de técnicas como casualização e repetição. A análise dos dados é feita sob a hipótese de independência estatística ou distribuição espacial aleatória, o qual permite o uso de métodos estatísticos como a análise de variância e de parâmetros como o coeficiente de variação. No entanto, é comum situações de estudo em que a análise de variância não tem sentido, quando não se considera a distância entre as observações (Vieira, 2000). Nestes casos, é necessário admitir a presença de dependência espacial entre as observações e a técnica de avaliação dos dados se dá através da geoestatística. A geoestatística objetiva o estudo dos fenômenos que flutuam no tempo e/ou no espaço, oferecendo uma relação de ferramentas determinísticas e estatísticas que possibilitam entender e modelar a variabilidade espacial (Deutsch & Journel, 1998).

Ao se amostrar uma área para fins de caracterização de algum atributo do solo, além da sua descrição, freqüentemente deseja-se fazer estimativas para locais não amostrados (inferência). No entanto, estimativas requerem modelos que descrevam como o fenômeno se comporta em locais não amostrados. Nas situações em que se tem um conhecimento suficientemente detalhado dos processos físicos e químicos que geram os dados, permitindo entender o fenômeno como um todo, modelos determinísticos são apropriados (Isaaks & Srivastava, 1989). No entanto, poucos processos nas ciências da terra são compreendidos a ponto de permitir o uso desses modelos, assim, frequentemente recorre-se ao uso dos interpoladores, que estimam valores para o atributo sob estudo em locais não amostrados.

2.5 Geoestatística

Todos os conceitos de geoestatística têm suas bases teóricas em funções e variáveis aleatórias. Uma função aleatória, pelo fato de ser contínua, pode ser submetida a uma grande gama de hipóteses, sem as quais a dedução de equações é impossível. Quando se tem algumas realizações de certa variável aleatória e deseja-se estimar valores para locais não amostrados, se faz necessário a introdução de uma restrição de que a variável regionalizada seja estacionária estatisticamente. Segundo Vieira (2000), uma variável regionalizada é estacionária se os momentos estatísticos da variável aleatória $Z(x_i+h)$ forem os mesmos para qualquer vetor h . A pressuposição de estacionariedade dos dados possibilita a existência da repetição, isto é, fazer observações em pontos diferentes e considerar como pertencentes a uma mesma população com os mesmos momentos estatísticos (Vieira, 2000). Segundo Deutsch & Journel (1998), a estacionariedade é uma propriedade do modelo e assim torna-se mais uma decisão do que uma hipótese de trabalho. De fato a estacionariedade é uma pressuposição do modelo e pode mudar com a escala do trabalho e com a disponibilidade de dados.

Para a geoestatística o variograma tem papel crucial, pois ele é chave para descrever e entender a variabilidade espacial de forma quantitativa, bem como fazer previsões a respeito do fenômeno estudado (McBratney & Webster, 1986). O variograma é uma função matemática (eq-1) definida para representar o nível de dependência espacial entre duas

variáveis aleatórias locais. Estas duas variáveis X e Y podem ser: o mesmo atributo em duas posições diferentes (autovariograma), dois atributos diferentes medidos na mesma posição (covariância das variáveis) e dois atributos diferentes medidos em duas posições (variograma cruzado).

$$2\gamma(h) = E\{[Z(x_i) - Z(x_i+h)]^2\} \quad (\text{eq-1}) \quad \text{onde:}$$

$2\gamma(h)$ – é a variância em função do vetor h;

E – valor esperado;

$Z(x_i)$ – valor da variável na posição x_i

$Z(x_i+h)$ - valor da variável na posição x_i+h .

O semivariograma (eq-2) é a mesma função anterior acrescida do fator de divisão 2, função $\gamma(h)$. O fator 2 é utilizado com a finalidade de cancelamento e simplificação da equação e porque a quantidade mais freqüentemente utilizada é $\gamma(h)$ e não $2\gamma(h)$.

$$\gamma(h) = (1/2) E\{[Z(x_i) - Z(x_i+h)]^2\} \quad (\text{eq-2})$$

O semivariograma também pode ser representado como um gráfico da função de dependência espacial em relação à distância (Figura 4).

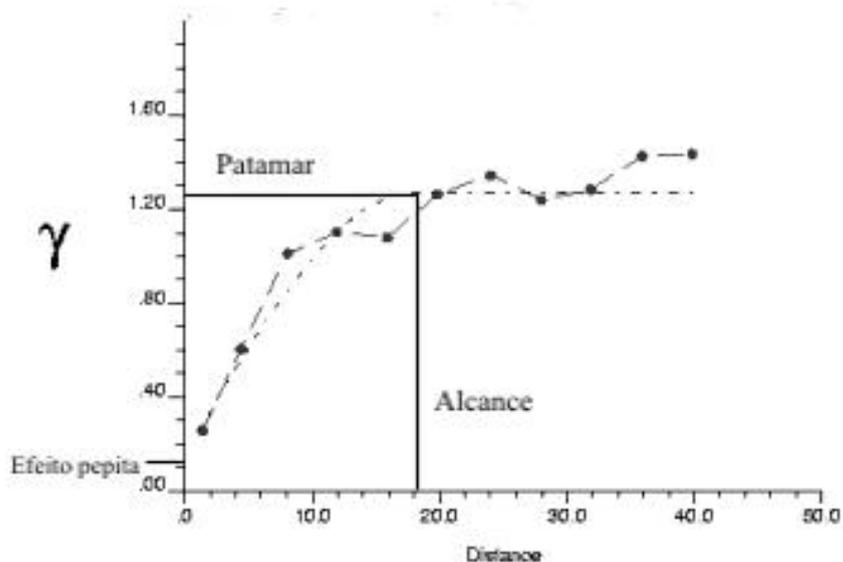


Figura 4: Representação gráfica do semivariograma

Ao semivariograma experimental calculado a partir das observações, associam-se modelos teóricos de semivariograma, definidos pelo tipo de modelo (linear, esférico, gaussiano, exponencial, potencial) e pelos parâmetros numéricos efeito pepita, patamar e alcance. No exemplo da Figura 4, o semivariograma experimental está plotado em vermelho, enquanto que o modelo teórico (esférico) é a linha pontilhada em preto. O efeito pepita revela a descontinuidade do semivariograma para distâncias menores do que a menor distância entre

as amostras. O efeito pepita é causado por variabilidade em pequena escala, por erro de amostragem, de determinação, ou do limite do equipamento. A medida que h aumenta, $\gamma(h)$ também aumenta até um valor máximo no qual se estabiliza, denominado patamar. O patamar é aproximadamente igual à variância dos dados, $\text{Var}(z)$. Por meio do patamar pode-se medir a variabilidade do fenômeno. O alcance refere-se à distância na qual $\gamma(h)$ atinge o patamar e representa a distância limite de dependência espacial. Dentro dos limites do alcance, as medições são correlacionadas umas às outras, o que permite que se façam interpolações para espaçamentos menores do que os amostrados. Devido a isto o alcance é utilizado para avaliar o grau de continuidade espacial dos dados. Além do alcance, as medições apresentam distribuição espacial aleatória e podem ser consideradas independentes entre si e a estatística clássica pode ser aplicada sem restrições.

Conhecido o semivariograma da variável e havendo dependência espacial entre as amostras, é possível fazer a interpolação nos intervalos entre as amostragens e criar mapas de isolinhas ou de superfície através da “krigagem”. A krigagem é uma coleção de técnicas de regressão linear generalizada para minimizar uma estimativa da variância definida a partir de um modelo para uma covariância (Deutsch & Journel, 1998). Trata-se de um interpolador que não apresenta tendência e possui variância mínima. De acordo com Vieira (2000), a Krigagem é uma média móvel ponderada, onde os pesos são variáveis de acordo com a variabilidade espacial expressa no semivariograma. O que torna a Krigagem um interpolador ótimo é a maneira como os pesos são distribuídos (eq-3).

$$z^*(x_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i z(x_i) \quad (\text{eq-3}) \quad \text{onde:}$$

$z^*(x_0)$ – valor a ser estimado;

N – número de valores medidos, $z(x_i)$, envolvidos na estimativa; e.

λ_i – são os pesos associados a cada valor medido, $z(x_i)$.

A utilização da técnica de Krigagem para a inferência de pontos não amostrados (transformação de dados discretos em dados contínuos) em propriedades do solo é inicialmente apresentada nos trabalhos de Burges & Webster (1980a, e 1980b), Webster & Burges (1980), Burges et al. (1981), Vieira et al. (1981), Yost et al. (1982) e Braga e Druck (1993). Esses autores mostraram a boa adequação dos interpoladores geoestatísticos aos dados de solos e consideraram que a krigagem apresenta estrutura teórica desejável, condições favoráveis de implementação e uma estabilidade às variações amostrais.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Área de Estudo

O Sistema Integrado de Produção Agroecológica (SIPA) – “Fazendinha Agroecológica do km 47” foi criado em 1993 com a finalidade de abrir um espaço para o exercício da agroecologia em bases científicas, explorando os recursos naturais disponíveis. Foi estruturada para a busca do aproveitamento racional das potencialidades locais, dentro de uma estratégia que tenciona contribuir para dar sustentabilidade à atividade produtiva no meio rural, integrando a produção vegetal e animal (Neves, 2004).

O SIPA está inserido na região da Baixada Fluminense, no município de Seropédica, RJ, entre os meridianos 43 40'00'' e 43 41'10'' de longitude oeste de Greenwich e os paralelos de 22 44'30'' e 22 45'30'' de latitude Sul. O clima é quente e úmido, prevalecendo temperaturas elevadas no verão e amenas no inverno, cuja classificação climática é do tipo Aw (EMBRAPA, 1999).

A Fazendinha possui uma área total aproximada de 59 hectares, destes, uma área de 5,05 ha vem sendo manejada sob sistemas de rotação distribuídos espacialmente em policultivos dentro de glebas de plantio. Desta área de glebas foram mapeados 3,26 ha englobando 17 glebas. Em adição foram incluídos 2,98 ha de pastagens (denominada gleba 0) (Figura 5). Portanto, foram mapeados 6,24 ha entre glebas e área de pasto. Para este estudo, as amostras de solo foram tomadas na sua camada superficial (0-0,30m).

As etapas do trabalho foram divididas em:

- a- Levantamento, coleta e tabulação de dados
- b- Análises de variabilidade espacial e geração dos mapas de atributos físicos;
- c- Sistematização dos dados em um sistema de informações geográficas; e
- d- Geração dos mapas de qualidade físico-hídrica.

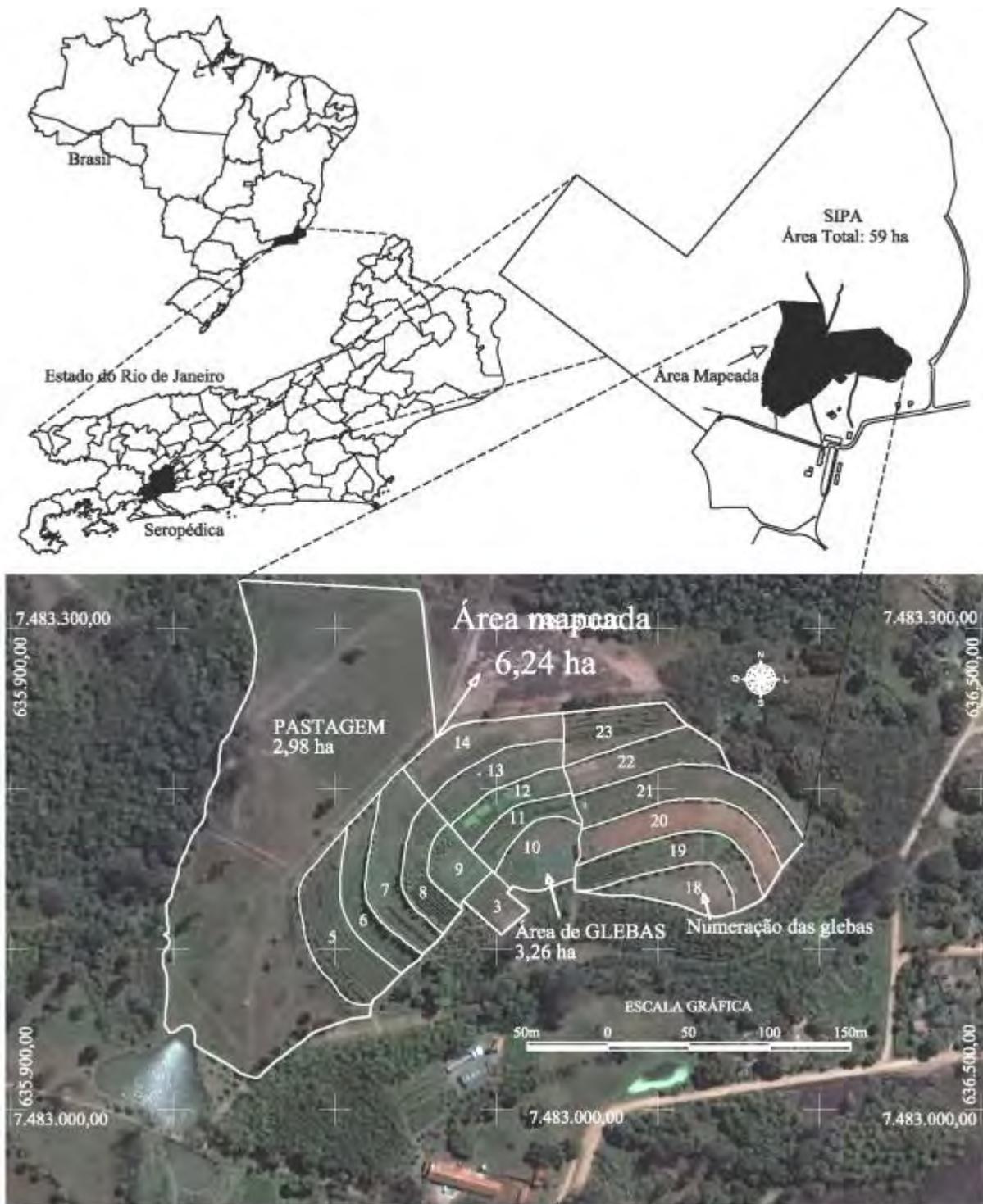
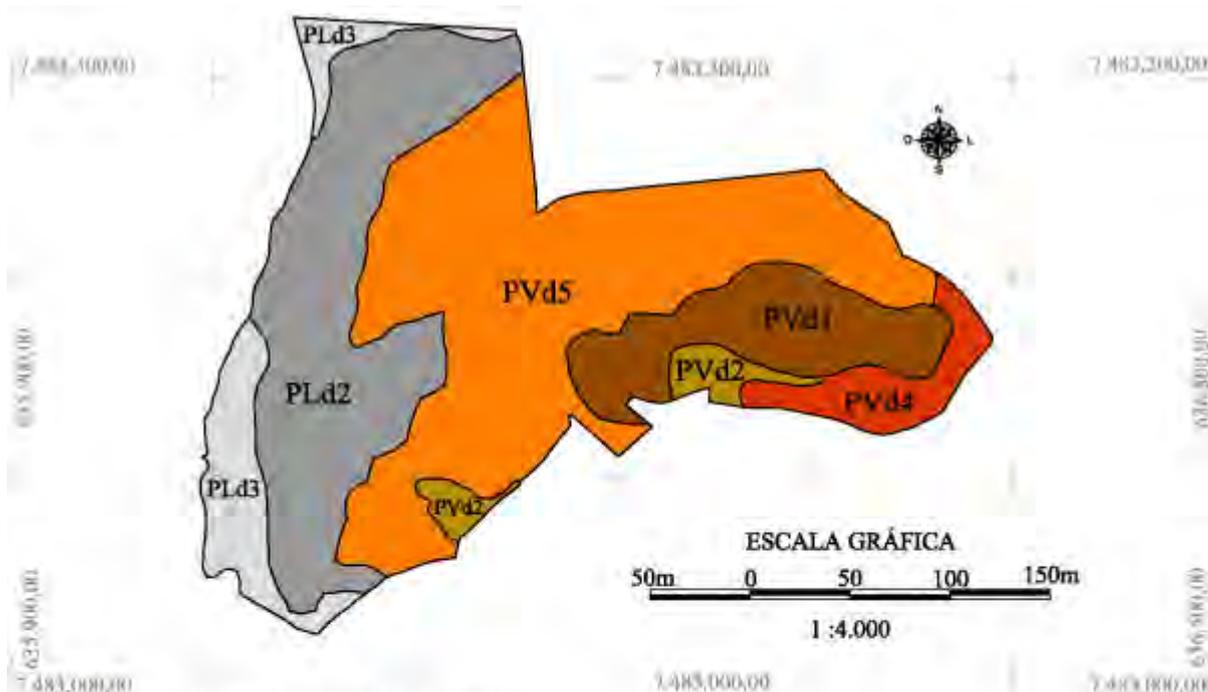


Figura 5: Localização da área estudada no Sistema Integrado de Produção Agroecológica (SIPA), em Seropédica (RJ).

É apresentada na Figura 6 uma ampliação do mapa semi-detalhado com as classes de solos existentes na área do SIPA (Embrapa, 1999), onde se observa o predomínio das classes de Argissolos e Planossolos.



Legenda CLASSES DE SOLOS

- PVd1- Argissolo Vermelho Amarelo Distrófico A moderado textura média/argilosa fase floresta tropical subcaducifólia relevo plano;
- PVd2- Argissolo Vermelho Amarelo distrófico A moderado textura arenosa/média fase floresta tropical subcaducifólia relevo ondulado;
- PVd4- Argissolo Amarelo Distrófico A moderado textura média/argilosa fase pedregosa I floresta tropical subcaducifólia relevo forte ondulado;
- PVd5- Associação de Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico A moderada textura média/argilosa fase floresta tropical subcaducifólia relevo suave ondulado + Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico A moderado textura argilosa/muito argilosa fase floresta tropical subcaducifólia relevo suave ondulado;
- PLd2- Planossolo Distrófico A moderado textura arenosa/média fase floresta tropical subcaducifólia relevo suave ondulado;
- PLd3- Associação de Planossolo Distrófico A moderado textura arenosa/média fase floresta tropical subcaducifólia relevo plano + Glei Pouco Húmico Distrófico textura argilosa fase campo higrófilo de várzea relevo plano de várzea.

Figura 6: Ampliação da carta pedológica (escala 1:10.000), adaptado de Embrapa (1999)

3.2 Sistematização dos Dados

A sistematização das informações do SIPA foi feita em um sistema de informação geográfica. O mapa base com resolução de 4 metros foi composto das seguintes informações: mapa planialtimétrico, imagem Quick bird com pixels de 0,6 m, adquirida no ano de 2004, e mapa de solos (Embrapa, 1999).

Os mapas de variabilidade espacial de atributos e de qualidade físico-hídrica do solo foram gerados por “krigagem” através do programa computacional GEOESTAT e sistematizados no SIG “Arc View” versão 3.2a. Os pontos de coleta das amostras foram

georreferenciados no sistema UTM com precisão sub métrica (DGPS – “modelo Trimble-GeoExplorer 3”).

3.3 Amostras de Solo

A amostragem do solo foi feita em duas etapas, sendo que a primeira foi realizada no ano de 2001, por equipe do setor de Física do Solo da UFRRJ, e seguiu um modelo de grade irregular. Para aperfeiçoar a modelagem dos semivariogramas foram feitas algumas coletas em intervalos menores, de acordo com características que denotaram maior variabilidade nos solos. Este procedimento é recomendado por Trangmar et al. (1985). As características utilizadas para a escolha de pontos mais adensados foram: variação no relevo (mapa de altimetria), solos (mapa de solos) e histórico de comportamento dos cultivos nas glebas. Considerando a frequência de amostragem e a área total de 6,24 ha, foram feitas medições e coletas de solo em 122 pontos (Figura 7). As amostras de solos foram retiradas nas profundidades de 0 – 0,10, 0,10 – 0,20 e 0,20 – 0,30 m para determinação dos seguintes atributos: textura, DS, CC, 80 kPa, PMP, PA, textura e PT. Já no ano de 2006, foi criada uma nova grade irregular, com espaçamentos variando em torno de 20-40 m para execução dos testes de infiltração e RP, tendo sido o primeiro realizado em superfície (Permeâmetro de Campo) e adotado como sendo representativo da infiltração do perfil considerado, e o segundo mensurado na faixa de 0-0,30 m (Penetrômetro). Foram feitas medições em 169 Pontos (Figura 8).

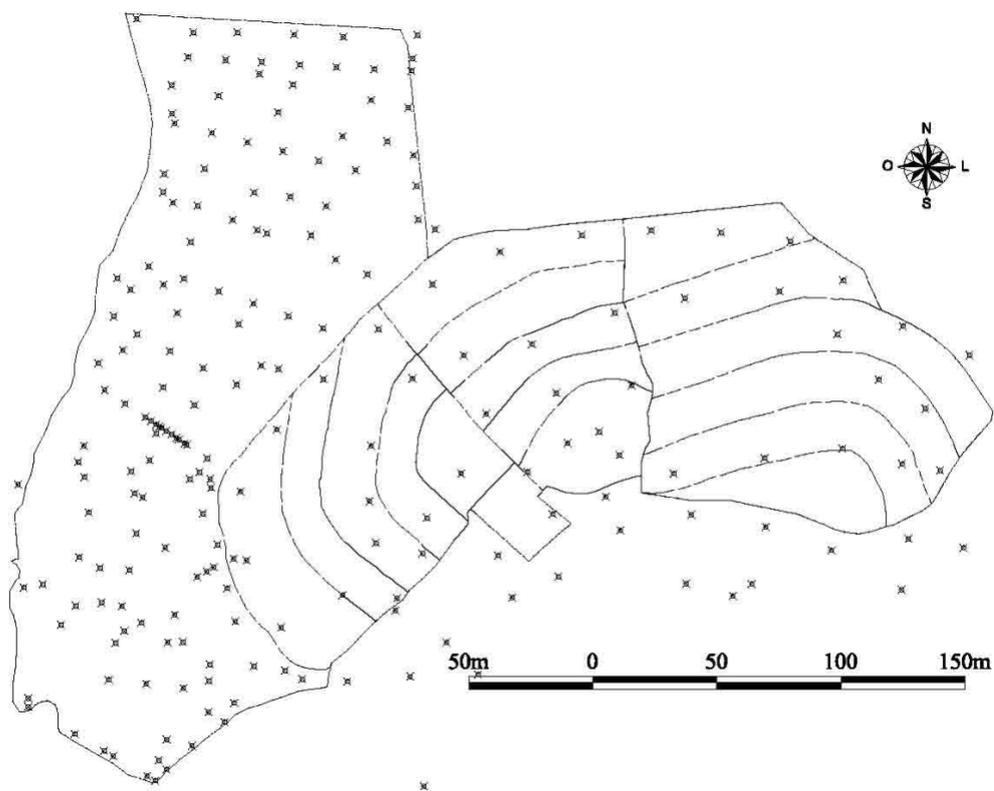


Figura 7: Grade de amostragem 1 de solos na área do SIPA, realizada em 2001.

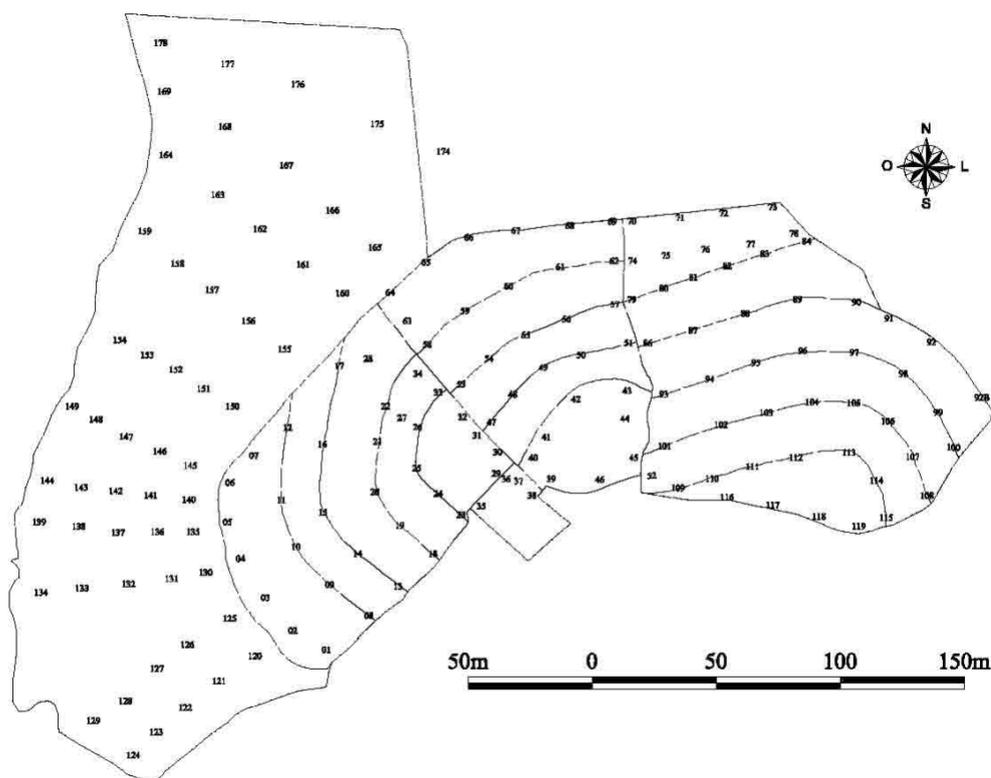


Figura 8: Grade de amostragem 2 de solos na área do SIPA, realizada em 2006.

3.4 Análises Físico-Hídricas

3.4.1 Estudo volumétrico do solo

Em cada ponto da grade de amostragem, foram abertas mini trincheiras de 0,30 m de profundidade (Figura 7), onde foram coletadas amostras nos intervalos de 0 – 0,10, 0,10 – 0,20 e 0,20 - 0,30 m, para determinação dos seguintes parâmetros físicos, de acordo com Embrapa (1997):

- granulometria do solo (areia fina, areia grossa, silte, argila total e argila naturalmente dispersa), pelo método da pipeta;
- umidade do solo nas tensões 10 KPa (adotada como capacidade de campo, U_{cc}), 80KPa (tensão correspondente ao limite de funcionamento do tensiômetro, U_{ft}) e 1500 KPa (tensão correspondente ao ponto de murcha permanente, U_{pmp});
- densidade do solo (anel volumétrico); e
- densidade das partículas (balão volumétrico).

Os dados analíticos foram transformados em planilhas de granulometria, densidade do solo e das partículas, porosidade total (método indireto) e disponibilidade de água no solo, através da krigagem. O mesmo tratamento foi dado aos resultados dos testes de RP e TIE. Após a modelagem dos semivariogramas, foram gerados os mapas de variabilidade espacial dos atributos.

O critério utilizado para a subdivisão dos dados de água facilmente disponível foi baseado no intervalo de classes sugerido por Bureau (1953), que sugere o seguinte intervalo de classes: baixa ($ADT < 6\%$), média ($6 = ADT = 12\%$) e alta ($ADT > 12\%$). Este intervalo de classes foi subdividido para 4 classes e a unidade convertida para mm (profundidade

0,10m): restritivo (ADT < 6mm), não restritivo (6 = ADT = 9 mm), bom (9 < ADT =12 mm) e ótimo (ADT > 12 mm). Como a unidade de capacidade de armazenamento de água adotada foi água facilmente disponível, foram elaboradas curvas de retenção de água do solo, onde se verificou que para os solos em estudo, a AFD corresponde a 63 % da água disponível total. Então o fator 0,63 foi multiplicado pelos valores de ADT, e se obteve então o seguinte intervalo de classes adotado: restritivo (AFD < 3,9mm), não restritivo (3,9 = AFD = 5,67 mm), bom (9 < AFD =12 mm) e ótimo (AFD > 12 mm).

Segundo Bureau (1953), são utilizadas as seguintes classes de Porosidade de Aeração (PA): baixa (PA < 10%), média (10 = PA = 20 %) e alta (PA > 20 %). Este intervalo de classes foi adaptado e utilizado conforme descrito a seguir: restritivo (PA < 10%), não restritivo (10 = PA = 20 %), bom (20 < PA = 30 %) e ótimo (PA > 30 %).

3.4.2 Testes de resistência à penetração

Foi utilizado o penetrômetro dinâmico ou de impacto desenvolvido por Stolf (1991). Foram amostrados pontos até a profundidade de 0,30 m. A determinação foi realizada no solo com umidade próxima à capacidade de campo (48 horas após uma chuva de aproximadamente 8 mm). Foram coletadas três amostras compostas de solo para determinação da umidade nas Glebas 0, 8 e 13 e os teores foram respectivamente 6,2, 19,1, e 15,5%. Para o cálculo da resistência foi utilizada a fórmula descrita por Stolf (1991). Os dados foram expressos em Kgf/cm² e multiplicados pelo fator 0,098099 para a transformação dos resultados em MPa, como descrito nas equações a seguir:

$$R = \frac{F}{A}$$

em que,

R = resistência, kgf/cm²;

F = força da resistência, kgf;

A = área da base do cone, cm²;

sendo,

$$F = (M + m)g + \frac{M}{M + m} \cdot \frac{Mgh}{x}$$

em que,

M = massa que provoca o impacto, kg;

m = massa dos demais componentes, kg;

g = aceleração da gravidade, 9,81 m.s⁻²;

h = altura de queda, cm

x = penetração por impacto, cm.

O intervalo de classes utilizado para os dados de resistência à penetração (RP) foram baseados em Arshad et al. (1996), que estabelece como ponto crítico o valor de 2,0 MPa, como sendo limitante ao desenvolvimento de raízes. O intervalo de classes adotado foi: restritivo (PA > 2 MPa); não restritivo (2 = PA = 1,32 MPa); bom (1,32 < PA = 0,66 MPa); e ótimo (PA < 0,66 MPa).

3.4.3 Testes de Infiltração TIE

Os testes foram realizados com o permeâmetro modelo IAC, no ano de 2006. O orifício feito no solo (trado caneca) para introdução da sonda foi de 0,10 m e foi utilizada uma carga hidráulica de 0,05m. A condição de fluxo constante foi considerada estabilizada após a quarta leitura igual consecutiva. Os dados foram considerados como representativos da TIE no perfil. Os cálculos da condutividade hidráulica saturada de campo, K_{fs} e do potencial matricial de fluxo, ϕ_m , foram feitos com o auxílio do programa computacional ONEHEAD em linguagem FORTRAN, que utiliza a equação básica para a condição de fluxo sob carga constante (H), dentro do orifício cilíndrico de raio a .

$$Q = \left(\frac{2pH^2}{C} + p a^2 \right) K_{fs} + \left(\frac{2pH}{C} \right) f_m \quad (1)$$

em que,

Q = fluxo constante

H = carga hidráulica

a = raio do orifício

C = fator que considera a geometria das medições, de acordo com a textura do solo.

O valor de C foi calculado usando equações ajustadas aos gráficos originais, na fórmula:

$$C = A \frac{a H^B}{a^B}$$

em que,

A e B são os parâmetros de ajuste segundo a Tabela 1.

Tabela 1: Parâmetros de ajuste A e B , para o cálculo do fator C .

Textura do Solo	A	B
1- Arenoso	0.59822327899	0.647467571
2- Argiloso ou franco estrut.	0.5939456566	0.6365011232
3- Sem estrutura	0.5697527087	0.6237229652

Foi calculada também a infiltração saturada tridimensional, usando-se a taxa constante e a geometria do orifício a partir da relação entre o volume de água infiltrada (L) e a área molhada do orifício (m^2).

O volume de água infiltrada (L) foi calculado por:

$$V = \frac{p D_p^2}{4} Q 10^{-3}$$

em que,

D_p^2 = diâmetro do reservatório do permeâmetro (cm);

Q = taxa constante (cm/min) encontrada para a carga hidráulica.

A área (m^2) molhada no orifício foi calculada por:

$$A = \frac{\alpha_p D_o^2}{4} + p D_o H_2 \frac{\bar{\theta}}{\theta} 10^{-4}$$

em que,

D_o = o diâmetro do orifício (cm);

H_2 = carga hidráulica (cm).

Dividindo V por A e efetuando todos os cancelamentos possíveis tem-se:

$$I = 60 \frac{\alpha_p D_o^2}{D_o^2 + 4 D_o H_2 \frac{\bar{\theta}}{\theta}} Q$$

em que,

I = infiltração (mm/h);

Q = taxa constante (mm/min).

Tabela 2: Categorias de meios porosos para estimativa de α^* (Elrick et al. 1989)

Categoria de meios porosos	Valor de α^* (m^{-1})
Materiais argilosos sem estrutura (cobertura de mineração, depósitos marinhos ou lacustres)	1
Solos de textura fina e sem estrutura	4
Solos estruturados de argila a franco. Também inclui areais finas e outros meios sem estrutura	12
Areia grossa e muito grossa. Também inclui solos altamente estruturados com rachaduras e macroporos	36

Para o atributo taxa de infiltração estável (TIE) foi adotado o seguinte intervalo de classe: restritivo ($TIE < 50 \text{ mm.h}^{-1}$); não restritivo ($50 = TIE = 100 \text{ mm.h}^{-1}$); bom ($100 > TIE = 150 \text{ mm.h}^{-1}$); e ótimo ($TIE > 150 \text{ mm.h}^{-1}$).

3.5 Análise Geoestatística

Inicialmente, foram realizadas análises descritiva e exploratória das variáveis, a verificação da dependência espacial e a interpolação pelo método de “krigagem”. Para a primeira análise de cada propriedade, foram construídos gráficos da distribuição dos dados no campo, “post plot”. Este procedimento é importante para o conhecimento preliminar da distribuição dos dados na área, além de se verificar a possível existência de tendência dos valores, negando a estacionariedade intrínseca. Este procedimento também permite observar a existência de anisotropia (ocorrência de variabilidade espacial dos dados diferenciada de acordo com a direção). Existindo estacionariedade, foi feita a análise estrutural dos dados, para a construção de um modelo estatístico que descrevesse a variabilidade dos fenômenos estudados.

3.6 Criação dos Mapas Temáticos no SIG

As planilhas contendo os dados interpolados de cada atributo com a extensão .txt foram importadas para o programa computacional Arc View GIS versão 3.2a. Cada atributo foi associado a um tema e adicionado em uma vista do SIG no formato de arquivo .shp. Estes arquivos foram convertidos para o formato matricial através do comando “convert to grid”. A resolução espacial de saída foi configurada para 2 m (4 m²). Os atributos foram inicialmente separados em 9 classes de intervalos iguais (padrão do programa Arcview). Para facilitar as análises os intervalos foram reclassificados conforme descrito a seguir:

O tema altitude foi reclassificado e apresentado em 12 classes (cotas 26 a 38) onde cada classe representa a variação de um metro na altitude do mundo real. As cores apresentadas nos mapas representam gradientes de tons de um único matiz.

A variabilidade espacial do tema teor de argila foi reclassificada e apresentada em seis classes, onde cada uma representa a variação de 5 % de argila. As cores apresentadas no mapa representam gradientes de tons de um único matiz.

Os atributos físico-hídricos utilizados para análise e interpretação da qualidade físico-hídrica do solo (AFD, PA, RP e TIE) foram reclassificados em quatro classes, sendo a pior classe de cada tema, considerada como sendo potencialmente restritiva ao desenvolvimento vegetal e apresentam coloração vermelha (quanto mais restritivo o atributo mais forte o tom do vermelho).

Para AFD o intervalo de classes e sua respectiva interpretação foram definidos como: 0-3,9 mm, restritivo; 3,9-5,67 mm, não restritivo; 5,67-7,56 mm, bom; e > 7,56 mm, ótimo.

O atributo PA foi reclassificado em: 0-10 %, restritivo; 10-20 %, não restritivo; 20-30 % bom; e > 30%, ótimo.

As classes de RP foram: >2 MPa, restritivo; 1,32-2 MPa, não restritivo, 0,66-1,32 MPa, bom; e < 0,66 MPa, ótimo.

No caso da TIE foram adotadas as seguintes classes: 0-50 mm.h⁻¹, restritivo; 50-100 mm.h⁻¹, não restritivo; 100-150 mm.h⁻¹, bom; e >150 mm.h⁻¹, ótimo.

Embora seja importante eliminar o caráter subjetivo na avaliação dos atributos do solo, em função da natureza utilitária de cada estudo, é recomendável o uso de diferentes intervalos de classes para cada atributo físico-hídrico, de acordo com as características de clima e cultura local. Neste sentido os valores críticos de cada indicador, a profundidade e outras características inerentes a medição devem ser arbitradas para uma determinada cultura ou grupo de culturas. Os intervalos de classe foram criados visando o desenvolvimento da metodologia, sem absolutamente, a pretensão de se estabelecer ou mesmo padronizar valores de referência para cada indicador, o que deverá ser feito sempre, em função das características de cada situação específica.

3.7 Classificação Físico-Hídrica

A classificação físico-hídrica foi conduzida considerando-se os fatores que influenciam diretamente o desenvolvimento vegetal, AFD, PA e RP (Letey, 1985), sendo também adicionado um componente, TIE que além de ser um dado relevante para o estudo da aeração do solo, também se constitui um instrumento de manejo agrícola, pois está relacionado com os processos de compactação, erosão e drenagem dos solos (Otoni Filho, 2003). A ordem seqüencial em que são relacionados os indicadores, reflete a ordem de influência destes, sobre o desenvolvimento vegetal, sendo: AFD>PA>RP>TIE (Letey, 1985).

Para a apresentação do mapa de qualidade físico-hídrica, as classes de cada indicador foram isoladas no SIG através do comando ‘query’. Com cada classe individualizada foi possível compor então o mapa de qualidade físico-hídrica (Figura 9). O mapa apresentado não é produto de álgebra entre os atributos, e sim uma sobreposição de classes dos diversos

atributos e profundidades. Portanto, as classes que aparecem no topo da legenda tem prioridade de apresentação sobre as demais.

Com o intuito de evitar o excesso de classes no mapa de qualidade, as classes boa e ótima (que apresentam altos valores para AFD, PA e TIE e baixos valores para RP) foram agrupadas em uma única classe.

O mapa de qualidade físico-hídrica (QFH) apresentado é um exemplo dentre os vários mapas que podem ser gerados, quando se têm informações sobre culturas, exigências quanto aos atributos físico-hídricos e profundidade do sistema radicular. Assim, para uma determinada cultura, cuja profundidade efetiva do sistema radicular não ultrapasse os 0,20m de profundidade, as classes referentes às leituras na profundidade entre 0,20-0,30 m poderão ser desabilitadas no SIG, o que resultará em um novo mapa de QFH.

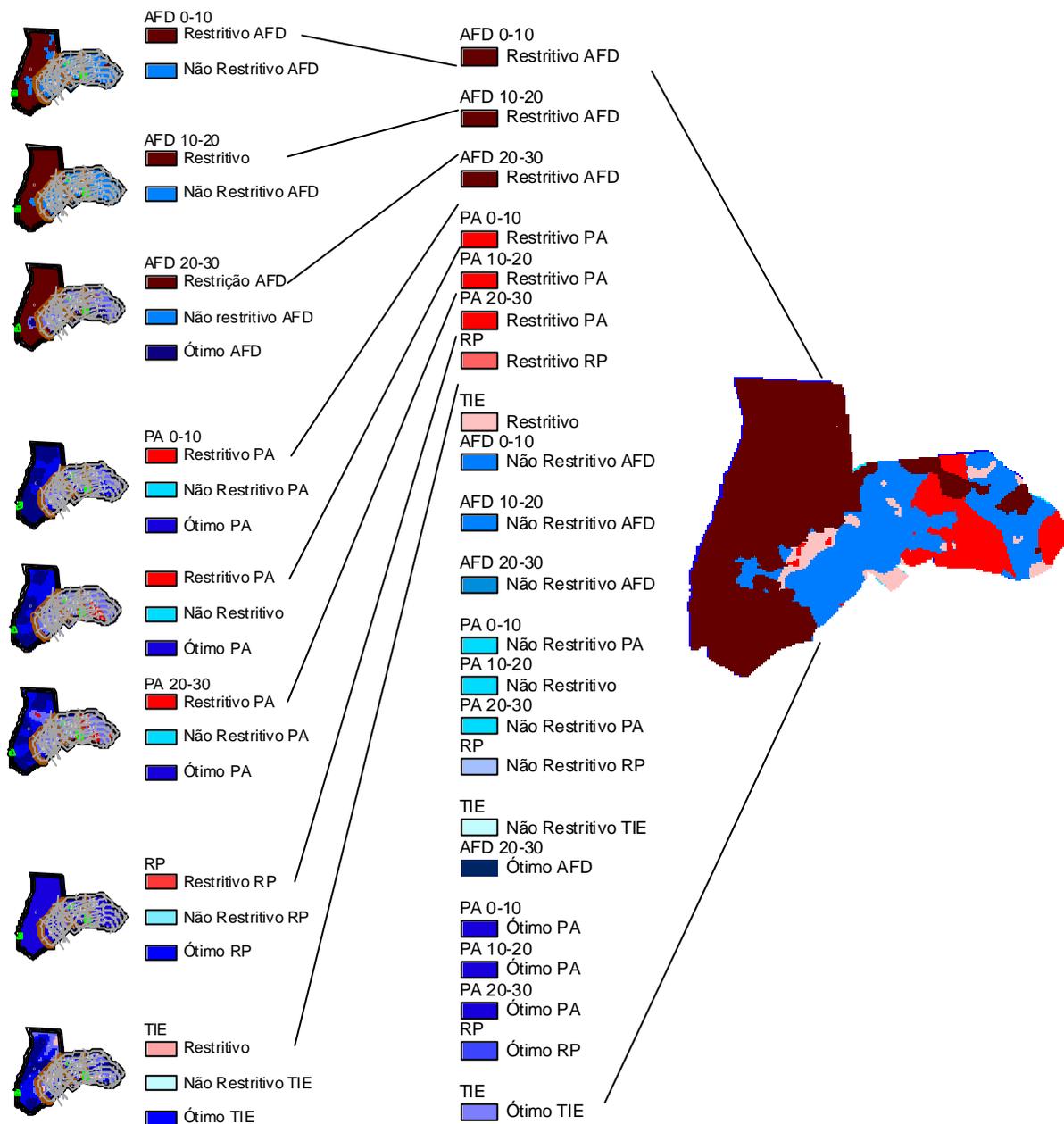


Figura 9: Metodologia utilizada para a composição do mapa de Qualidade Físico-hídrica.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Análise Estatística Descritiva

Na Tabela 3 são apresentados os parâmetros estatísticos descritivos dos dados. Nota-se que a área apresenta altitude entre 26,23 a 37,58m e que em média a textura, nas três profundidades é muito similar, sendo classificada como areia franca. O predomínio desta classe textural, no entanto não esclarece adequadamente toda a variabilidade em profundidade.

Nota-se que, em função da ocorrência na área, de solos pertencentes às classes Argissolo e Planossolo, os quais apresentam elevado gradiente textural em profundidade, constata-se que ocorre aumento dos valores máximos de argila nas camadas subsuperficiais, tendo reflexos na elevação do coeficiente de variação e desvio padrão. Outro aspecto marcante da área é que a textura tem uma forte influência nos demais atributos físicos, ou seja, baixa retenção de água (CC, 80 kPa e PMP) e disponibilidade de água (AFD e ADT), elevada porosidade total e de aeração. A influência da textura predominantemente arenosa também explica os altos valores de TIE e baixos de RP.

Embora a avaliação da variabilidade espacial dos dados por geoestatística não condicione que os dados devam ter distribuição normal (Tabela 3), pode-se inferir sobre a normalidade dos dados. Então, dados que apresentam distribuição normal possuem valores similares de média, mediana, moda e assimetria, variando em torno de 0 a 0,5 (Webster 2001). Considerando estes parâmetros, constata-se que apenas altitude, AFD, PT e PA apresentam valores de assimetria próximos da faixa mencionada, enquanto retenção de água (CC, 80 kPa, e PMP), ADT, areia, silte, argila, RP e TIE não apresentam distribuição normal. Constata-se também para a maioria dos atributos a tendência de elevação da assimetria nas camadas mais profundas.

Tabela 3: Estatística descritiva de altitude e atributos físico-hídricos *na área do SIPA*.

0-0,10 m	Altitude	CC	80kPa	PMP	AFD	ADT	Areia	Silte	Argila	PT	PA
	m	cm ³ .cm ⁻³	g.kg ⁻¹	g.kg ⁻¹	g.kg ⁻¹	%	%				
Número de dados	122	122	122	122	122	122	122	122	122	122	122
Minimo	26,23	4,1	2,4	1,0	0,1	1,2	57,0	0,0	0,0	28,6	6,5
Mediana	30,28	11,5	8,1	5,3	3,4	4,7	86,5	6,0	7,0	41,1	28,6
Maximo	37,58	36,1	31,8	22,5	6,1	35,0	97,0	23,0	34,0	59,2	43,9
Média	30,80	13,9	10,6	6,8	3,4	7,2	83,0	6,2	10,9	41,2	27,3
Curtose	-0,09	0,2	0,5	2,4	-0,6	4,8	0,0	4,3	0,0	0,5	0,2
Assimetria	0,66	1,0	1,1	1,5	-0,2	2,3	-1,0	1,4	1,0	0,3	-0,7
CV	0,08	0,5	0,6	0,6	0,4	1,0	0,1	0,6	0,8	0,1	0,3
Desvio padrão	2,46	7,6	6,8	4,3	1,5	6,8	10,3	3,4	8,9	5,6	8,3
0,10-0,20 m	Altitude	CC	80kPa	PMP	AFD	ADT	Areia	Silte	Argila	PT	PA
Número de dados	122	111	111	111	111	111	111	111	111	111	111
Minimo	26,23	3,6	1,5	0,8	0,5	1,6	42,0	0,0	0,0	17,1	2,6
Mediana	30,28	9,6	6,4	4,1	3,5	4,5	87,0	6,0	7,0	37,4	26,2
Maximo	37,58	32,2	25,6	23,5	8,8	25,5	97,0	28,0	40,0	51,2	44,0
Média	30,80	12,0	8,6	6,1	3,4	5,9	83,3	6,2	10,6	36,8	24,8
Curtose	-0,09	0,3	0,3	2,4	0,1	8,0	1,0	6,9	0,9	1,4	-0,5
Assimetria	0,66	1,1	1,2	1,7	0,5	2,7	-1,2	1,9	1,3	-0,5	-0,5
CV	0,08	0,6	0,8	0,8	0,5	0,7	0,1	0,7	0,9	0,2	0,3
Desvio padrão	2,46	7,4	6,5	5,1	1,6	4,4	11,3	4,0	9,2	5,8	8,5
0,20-0,30 m	Alt	CC	80kPa	PMP	AFD	ADT	Areia	Silte	Argila	PT	PA
Número de dados	122	113	113	113	113	113	113	113	113	113	113
Minimo	26,23	3,2	1,4	1,1	0,7	2,1	47,0	0,0	0,0	14,0	3,3
Mediana	30,28	9,0	5,3	3,7	3,2	4,7	88,0	6,0	7,0	36,0	24,3
Maximo	37,58	33,9	29,5	23,7	8,2	28,2	96,0	17,0	40,0	66,0	60,9
Média	30,80	12,3	8,9	6,4	3,4	5,9	82,1	5,9	12,1	35,6	23,3
Curtose	-0,09	-0,2	-0,1	0,3	0,6	13,4	-0,4	0,6	-0,2	4,0	0,4
Assimetria	0,66	1,0	1,0	1,2	0,9	3,3	-0,9	0,7	1,0	0,6	0,1
CV	0,08	0,7	0,8	0,9	0,5	0,7	0,2	0,6	0,9	0,2	0,4
Desvio padrão	2,46	8,5	7,5	5,8	1,6	4,3	12,6	3,5	10,6	6,6	10,2
0-0,30 m	RP	TIE									
Número de dados	169	168									
	MPa	mm.h-1									
Minimo	0,2	12,1									
Mediana	0,5	111,7									
Maximo	2,3	483,0									
Média	0,7	120,3									
Curtose	1,8	3,7									
Assimetria	1,5	1,6									
CV	0,7	0,7									
Desvio padrão	0,5	81,3									

CC - capacidade de campo, 80kPa - umidade à 80kPa, PMP - ponto de murcha permanente, AFD - água facilmente disponível, PT - porosidade total, PA - porosidade de aeração, RP - resistência a penetração e TIE - taxa de infiltração estável.

Na Tabela 4 são apresentados os coeficientes de correlação linear de Pearson (r), entre os atributos físico-hídricos e altitude. O conhecimento da correlação entre as variáveis permite estabelecer quantitativamente a relação entre os atributos avaliados, bem como aperfeiçoar a qualidade dos mapas, através de interpolação por cokrigagem (não foi contemplada neste trabalho).

Tabela 4: Coeficientes de correlação linear de Pearson (r) entre os atributos estudados.

0-0,10 m	Altitude	CC	80kPa	PMP	AFD	ADT	Areia	Silte	Argila	PT	PA
Altitude	1.000										
CC	0.669	1.000									
80kPa	0.670	0.986	1.000								
PMP	0.461	0.469	0.467	1.000							
AFD	0.388	0.649	0.516	0.278	1.000						
ADT	0.460	0.827	0.813	-0.109	0.554	1.000					
Areia	-0.707	-0.894	-0.896	-0.606	-0.514	-0.620	1.000				
Silte	0.293	0.398	0.371	0.505	0.359	0.127	-0.564	1.000			
Argila	0.711	0.884	0.897	0.515	0.458	0.667	-0.947	0.274	1.000		
PT	0.098	0.246	0.240	0.158	0.172	0.176	-0.232	0.113	0.234	1.000	
PA	-0.549	-0.752	-0.744	-0.323	-0.480	-0.641	0.664	-0.289	-0.654	0.453	1.000
10,0-20,0 m	Altitude	CC	80kPa	PMP	AFD	ADT	Areia	Silte	Argila	PT	PA
Altitude	1.000										
CC	0.329	1.000									
80kPa	0.342	0.984	1.000								
PMP	0.254	0.816	0.806	1.000							
AFD	0.134	0.648	0.500	0.512	1.000						
ADT	0.263	0.748	0.732	0.227	0.504	1.000					
Areia	-0.316	-0.912	-0.923	-0.813	-0.478	-0.603	1.000				
Silte	0.181	0.445	0.440	0.474	0.282	0.207	-0.633	1.000			
Argila	0.315	0.916	0.934	0.784	0.453	0.644	-0.941	0.338	1.000		
PT	-0.068	0.183	0.175	0.176	0.141	0.107	-0.252	0.108	0.257	1.000	
PA	-0.333	-0.747	-0.739	-0.592	-0.469	-0.579	0.624	-0.315	-0.624	0.516	1.000
20,0-30,0 m	Alt	CC	80kPa	PMP	AFD	ADT	Areia	Silte	Argila	PT	PA
Alt	1.000										
CC	0.693	1.000									
80kPa	0.689	0.988	1.000								
PMP	0.650	0.886	0.868	1.000							
AFD	0.454	0.687	0.567	0.640	1.000						
ADT	0.494	0.782	0.782	0.403	0.496	1.000					
Areia	-0.682	-0.918	-0.928	-0.885	-0.531	-0.620	1.000				
Silte	0.295	0.511	0.508	0.547	0.339	0.273	-0.676	1.000			
Argila	0.713	0.928	0.941	0.878	0.526	0.651	-0.970	0.481	1.000		
PT	-0.019	0.115	0.092	0.075	0.184	0.123	-0.101	-0.064	0.141	1.000	
PA	-0.591	-0.761	-0.766	-0.691	-0.454	-0.573	0.701	-0.469	-0.684	0.557	1.000
0-30,0 m	TIE	MPa									
TIE	1.000										
MPa	-0.050	1.000									

Valores em negrito são significativos no nível de 5%.

Pode-se observar ainda na Tabela 4, que com exceção de PT nas três profundidades e AFD e silte (na profundidade de 0,10-0,20 m), os demais atributos apresentam correlação

significativa com altitude. Na profundidade 0,10-0,20 m ocorre também uma redução acentuada nas correlações.

A correlação significativa entre os atributos físicos e altitude é especialmente útil. Além de comprovar a relação entre o fator de formação relevo e o padrão de variabilidade espacial dos atributos físico-hídricos, possibilita o uso da altitude, variável relativamente fácil de medir e com boa precisão, para aperfeiçoar a interpolação dos demais atributos (cokrigagem).

Outra informação importante que se pode extrair da Tabela 4 é que a altitude apresenta correlação positiva e significativa com praticamente todos os atributos, sendo negativa apenas para o teor de areia e PA. Assim, conforme se atinge cotas mais elevadas, diminui-se os teores de areia e, conseqüentemente, de porosidade de aeração. Os atributos CC, 80 kPa, PMP, AFD e ADT, de forma similar a altitude, também se correlacionam significativamente com todos os atributos, com exceção apenas de PT. Como a retenção de água é governada por fenômenos de adsorção e capilaridade, constata-se a correlação positiva destes atributos com o teor de argila e negativa para areia e PA.

Ainda na Tabela 4 é apresentada a correlação entre os atributos RP e TIE em que se verifica a não correlação entre estes indicadores. Não se pode determinar a correlação entre RP e TIE com altitude, textura, disponibilidade de água e PA.

Do exposto nas Tabelas 3 e 4, pode-se ter um entendimento sobre a variação dos atributos físico-hídricos na paisagem. Conforme se eleva a cota, aumenta-se o teor de argila, a retenção e disponibilidade de água e reduz-se a porosidade de aeração.

4.2 Análise de Variabilidade Espacial

Na Figura 10 são apresentados os semivariogramas experimentais e respectivos modelos ajustados para os indicadores físico-hídricos AFD, PA, RP e TIE, bem como de argila e altitude. Todos os indicadores e atributos apresentaram dependência espacial, variando no que se refere ao modelo ajustado.

De acordo com Isaaks & Srivastava (1989), o modelo ajustado aos semivariogramas experimentais sugere a continuidade espacial do fenômeno investigado. Segundo esses autores, fenômenos que apresentam modelo gaussiano ajustado apresentam função aleatória mais contínua, aumentando o caráter errático com modelos, respectivamente, esféricos e exponencial.

Por esse critério, altitude e argila nas profundidades de 0-0,10 e 0,10-0,20 m apresentaram modelo gaussiano e, portanto maior continuidade. Por outro lado os indicadores RP e TIE apresentam modelos exponenciais, portanto mais erráticos. De forma intermediária AFD e PA apresentaram modelo esférico nas três profundidades.

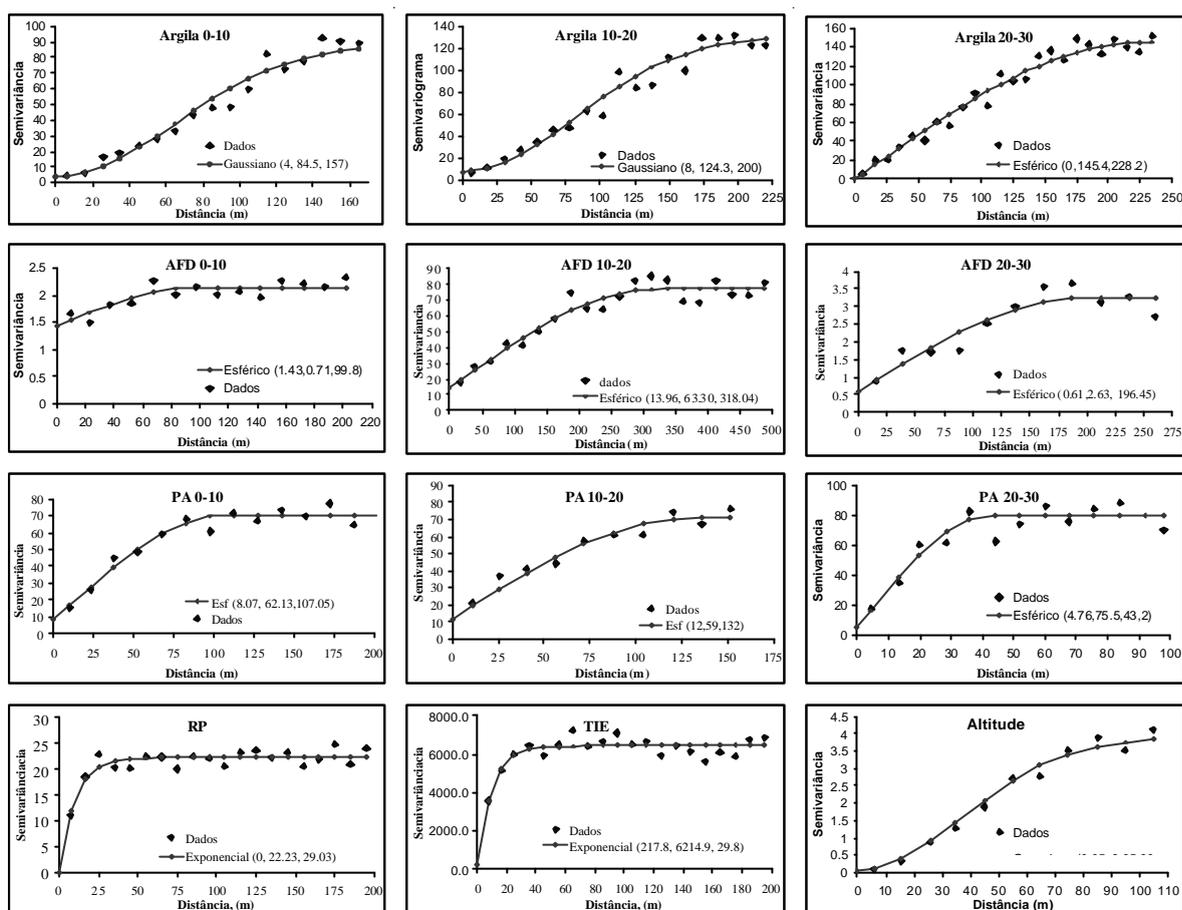


Figura 10: Semivariogramas da altitude e atributos físico-hídricos na área do SIPA.

O padrão de variabilidade espacial observado é coerente, ou seja, atributos do solo que dependem muito da porosidade apresentam padrão mais errático. É o caso típico de RP e TIE, os quais são fortemente influenciados por atividades antrópicas e da biota do solo.

Analisando os parâmetros dos semivariogramas, pode-se avaliar o grau de dependência espacial de cada indicador e parte desses em profundidade. Os parâmetros são efeito pepita (C_0), patamar (C_0+C_1) e alcance (a). A sua avaliação confirma a menor dependência espacial dos indicadores RP e TIE (menor alcance). Ainda, a exceção de AFD na profundidade de 0-0,10 m, todos os atributos apresentaram, proporcionalmente, pequenos valores de efeito pepita, o que seria classificado por Cambardella (1994), como grau forte de dependência espacial. Analisando os atributos argila, AFD e PA nas três profundidades, constata-se que em todos o efeito pepita é menor na profundidade 0,20-0,30 m (menor erro aleatório) e maior na camada de 0-0,10 m.

4.3 Mapas de Altitude e Atributos Físicos

A Figura 11 mostra que a pastagem apresenta de modo geral, cotas menores que as áreas de glebas, cada intervalo de classe tem amplitude de 1 metro com variação total de 12 metros. Tanto nas glebas quanto na pastagem, existe uma diferença de altitude de 7 metros entre a menor e a maior cota. As glebas localdas nas cotas mais elevadas são: 3, 9, 10, 18, 19, e 20. As localdas em cotas mais baixas são: 5, 6, 7 e 14.

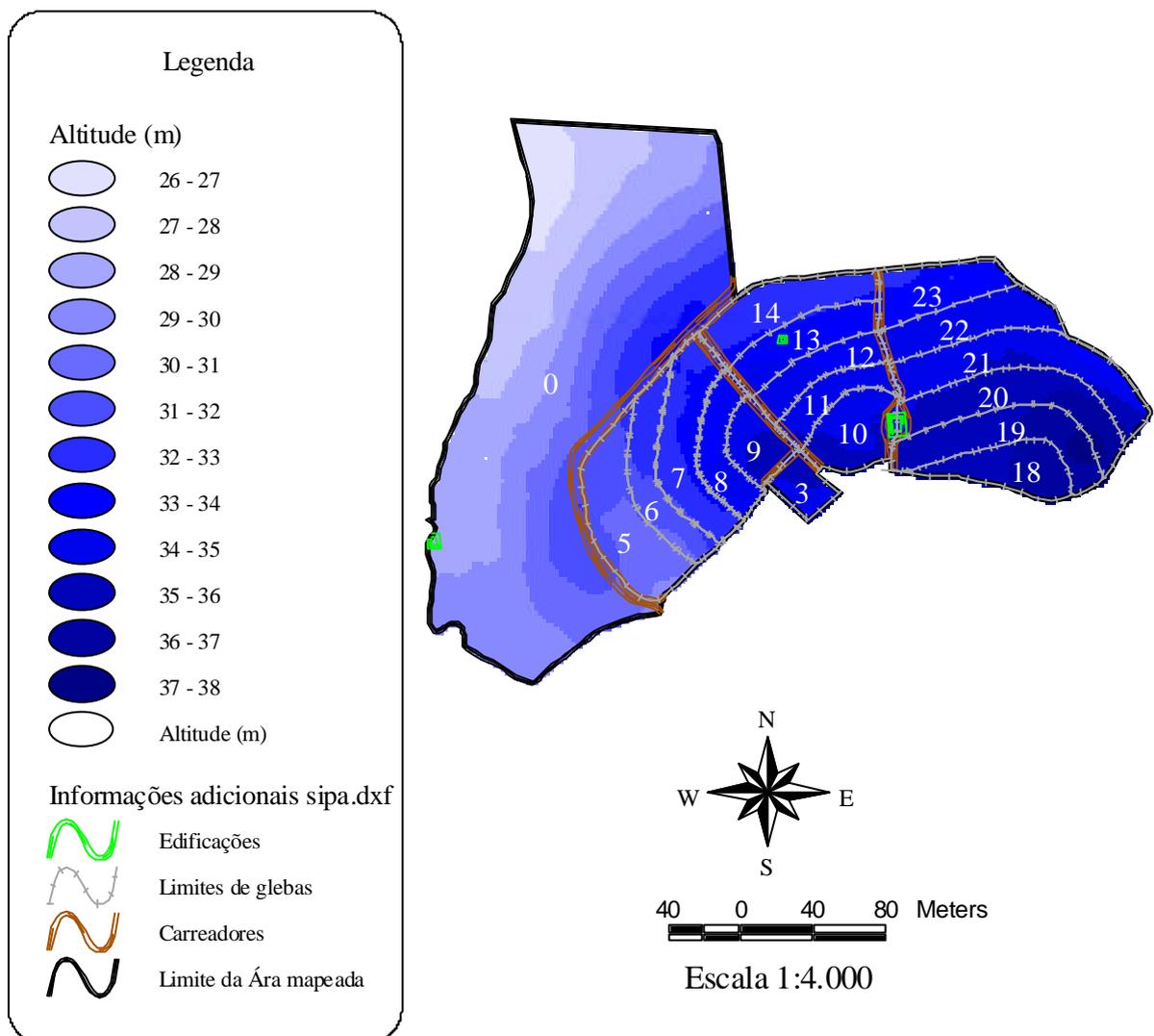


Figura 11: Variabilidade espacial da altitude na área do SIPA.

A variabilidade espacial dos teores de argila está correlacionada com a variação da altitude (Tabela 4), apresentando valores mais altos nas áreas de cotas elevadas e valores mais baixos nas áreas de cotas baixas. Todos os indicadores estudados são influenciados pela textura, uma vez que a mesma tem relação direta com a estruturação do solo, distribuição do espaço poroso e capacidade de retenção de água. Foram observados incrementos de argila em função da profundidade, devido aos processos pedogenéticos que atuam na área.

Observando-se o mapa de argila (Figura 12), verifica-se, de modo geral, que a área de pastagem e glebas adjacentes apresentam solos de textura arenosa em seus primeiros 0,30 m com exceção de uma pequena área (próximo aos limites entre as glebas 7, 14 e 0) de cotas relativamente elevadas, onde a textura é média de 0,10m e argilosa de 0,10 a 0,30 m. Já a área de glebas apresenta textura média predominando nas glebas 7, 11, 12 e 23 e textura argilosa na maior parte das terras das glebas 8, 9, 10, 18, 19, 20, 21 e 22.

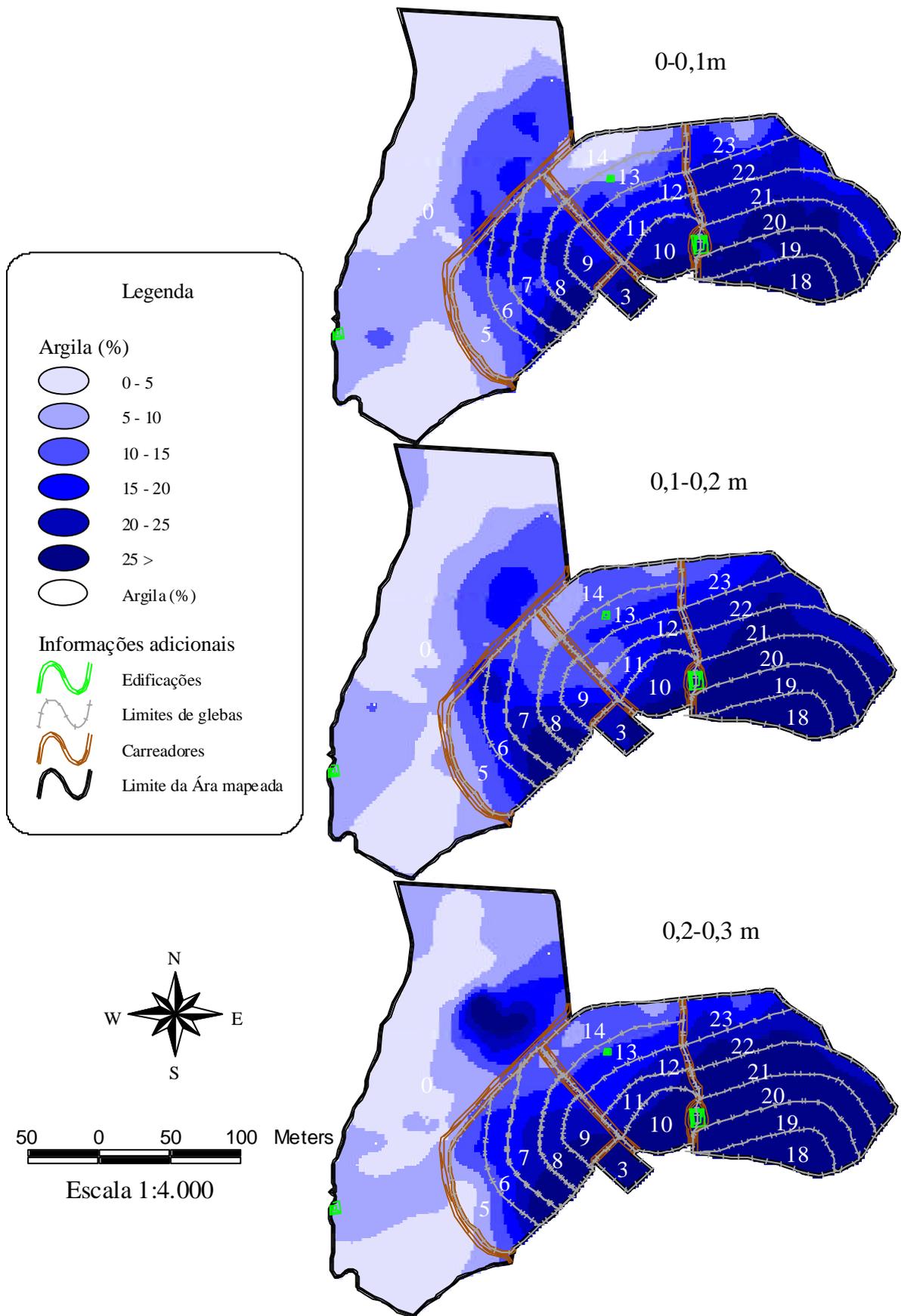


Figura 12: Variabilidade espacial dos teores de argila na área do SIPA.

De modo geral, as restrições por Água Facilmente Disponível - AFD (Figura 13), predominam na área de pastagem. Esta classe ocorre também em parte das glebas adjacentes à pastagem. Na área de pastagem ocorre ainda uma pequena área, de cotas relativas e teores de argila sensivelmente elevados (próximo ao limite entre pastagem e gleba 5), onde se observam altos valores de AFD principalmente na profundidade de 0-0,3 m. Com exceção das já citadas glebas adjacentes à pastagem, todas as outras apresentam valores considerados como não restritivos ao desenvolvimento vegetal. Valores considerados ótimos foram encontrados apenas na profundidade 0,20-0,30m em parte das glebas 3, 6, 7, 8, 10, 11, 18, 19 e 20. Valores considerados restritivos também foram observados em partes das glebas 21, 22 e 23.

Os mapas de porosidade de aeração (Figura 14), mostram que as áreas com restrição potencial por disponibilidade de ar às raízes são predominantes nas glebas. Nesta região, as glebas que apresentam trechos com valores restritivos são: 10, 12, 18, 19, 20, 21, 22, e 23, sendo que em algumas como 10 e 12 apresentam restrição apenas na camada de 0-0,30 m e as demais apresentam problemas nas duas últimas profundidades. Na camada superficial a maioria dos trechos apresentou valores altos (20-30 %). A pastagem, de modo geral, apresentou-se melhor do ponto de vista de PA, sobretudo nos primeiros 0,20 m, que apresentaram valores compreendidos nas classes boa e ótima. Já em profundidade, em uma área com valores muito altos de argila na pastagem pode-se observar a ocorrência de pequena área de restrição potencial ao desenvolvimento radicular por PA.

De maneira geral os valores de RP encontrados (Figura 15) foram baixos em função dos fatores pedogenéticos que atuam na região, conferindo textura arenosa aos solos, além do fato de as medições terem sido feitas com o solo úmido. Diante desta observação, pode-se esperar que novas medições deste atributo, com níveis baixos de umidade mostrem valores de RP mais restritivos. De acordo com o mapa de RP os valores considerados neste estudo como potencialmente restritivos ao desenvolvimento radicular ocorrem apenas em uma área muito pequena da gleba 13 e que valores da classe imediatamente seguinte (não restritivo) ocorre no entorno deste ponto. Valores interpretados como bons são predominantes na área de glebas e valores ótimos ocorrem em praticamente toda a área da pastagem.

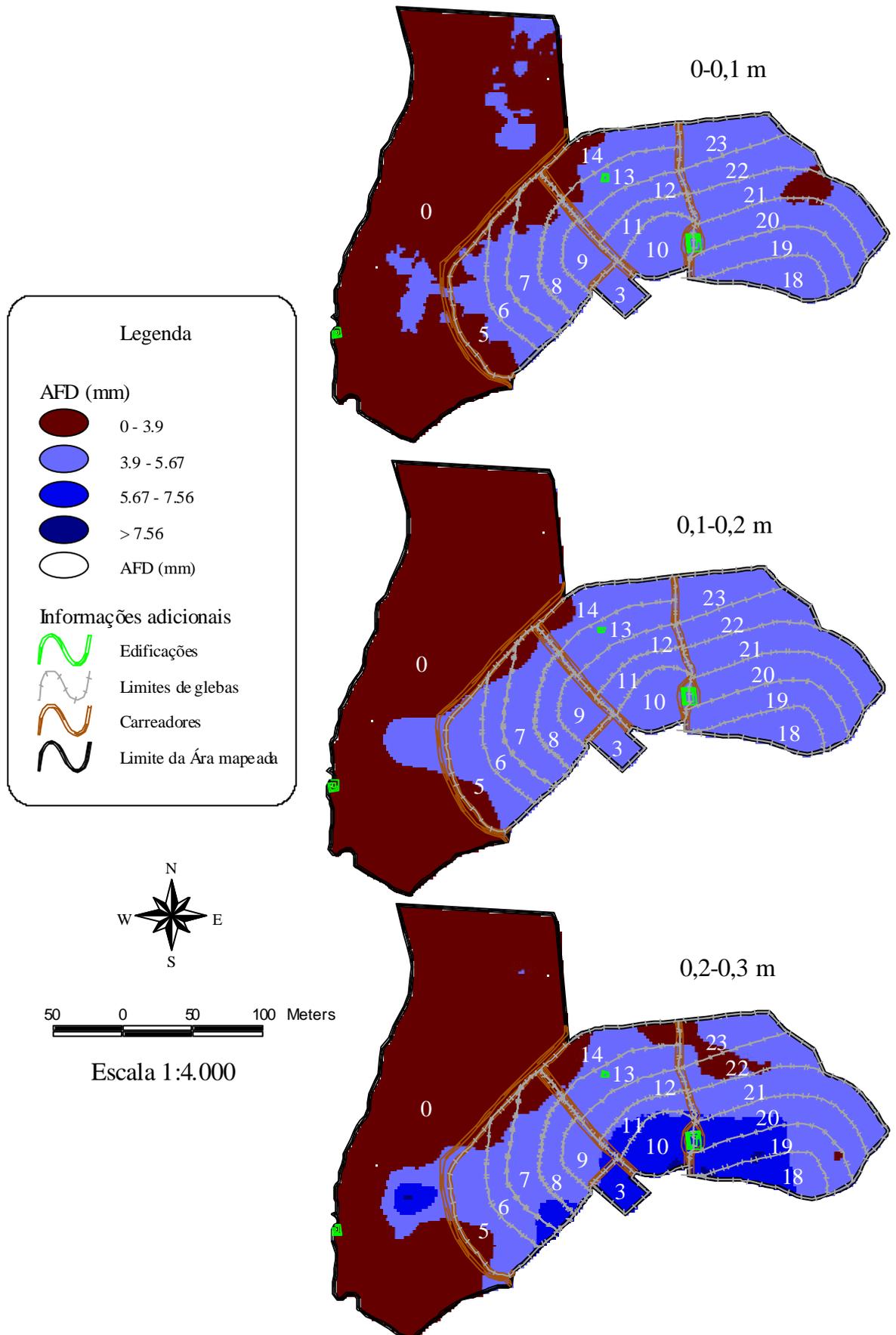


Figura 13: Variabilidade espacial da Água Facilmente Disponível na área do SIPA.

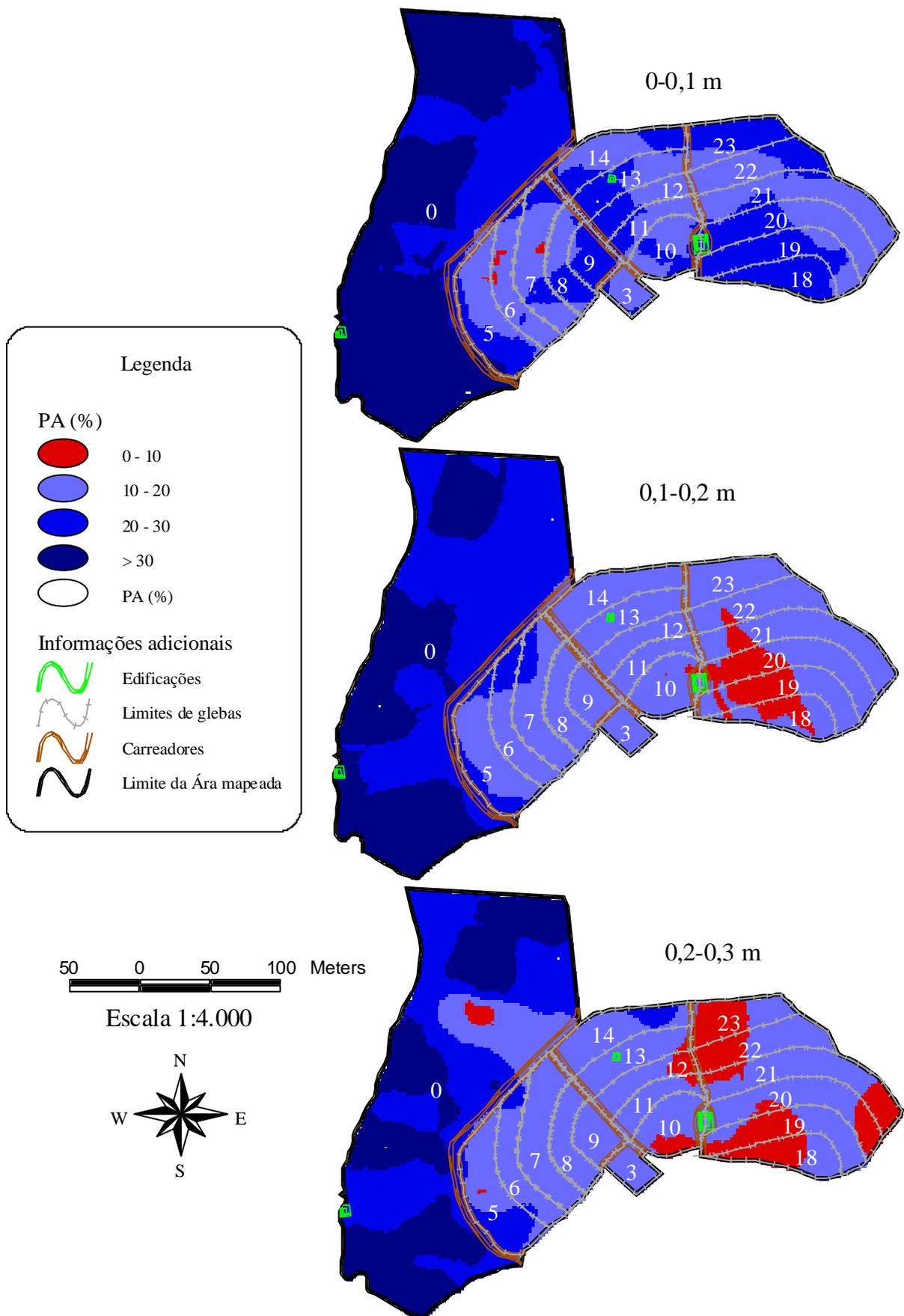


Figura 14: Variabilidade espacial da Porosidade de Aeração na área do SIPA.

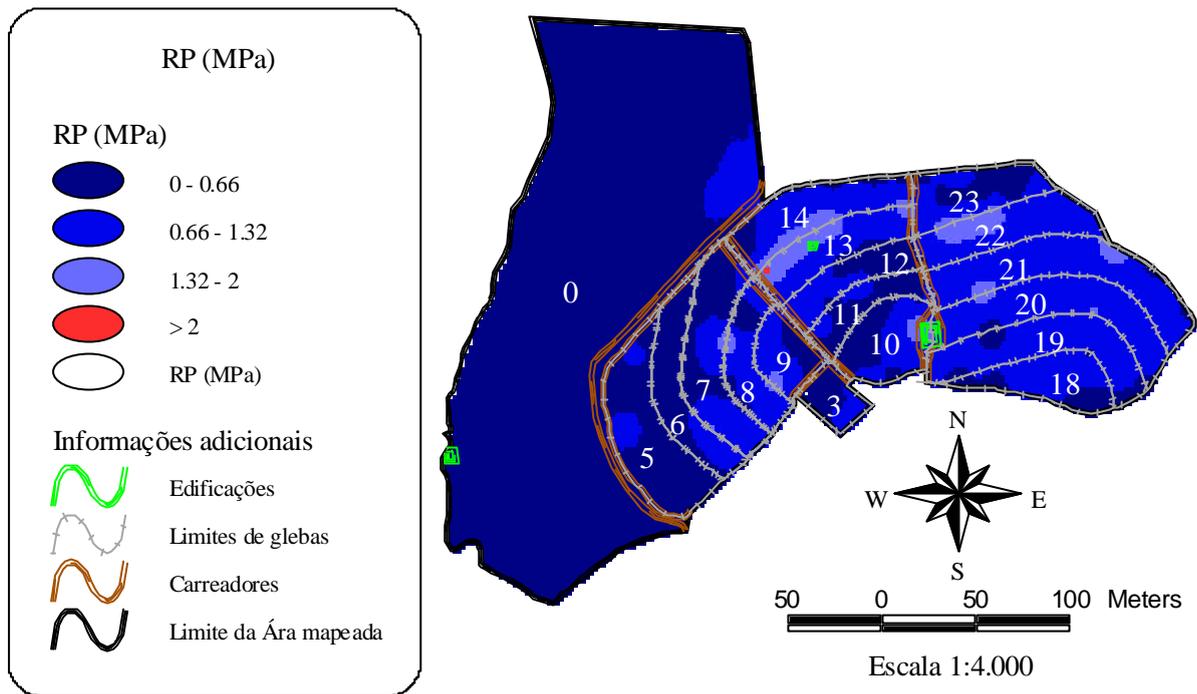


Figura 15: Variabilidade espacial da Resistência à Penetração na área do SIPA.

A observação do mapa de TIE (Figura 16) permite a constatação de que possivelmente não exista correlação entre teor de argila e TIE, porque embora se verifique considerável área de pastagem (< teores de argila) com altos valores de TIE, estes também ocorrem em áreas de glebas, que, conforme mostra a Figura 12, apresentam altos teores de argila. Esta alta variabilidade deve estar relacionada a diversos fatores como manejo, faunopedoturbação ou mesmo a erros de medição. O intervalo de classe inferior de TIE (<50mm/h), embora apareça nesta simulação como restritivo, sua restrição não é ao desenvolvimento vegetal e sim uma importante informação de manejo, onde, por exemplo, poderia ser, em determinadas situações, restritivo a utilização de sistemas de irrigação de alto volume de aplicação. A grande área da pastagem apresentou elevadas TIE tendo apenas duas pequenas manchas restritivas em sua porção Noroeste e outra também pequena nos limites desta área com a gleba 5. No tocante às glebas pode-se observar que, as que apresentam maiores áreas de superfície com restrição são: 3, 5, 6, 7 e 19. Outras áreas apresentam pequenas manchas de restrição isoladas. As glebas 20 e 21 e também a região compreendida nos limites entre as glebas 13, 14 e 23 apresentaram elevados valores de TIE (> 150 mm/h).

A Figura 17 apresenta uma sobreposição de classes onde os intervalos de cada atributo e profundidades avaliadas são apresentadas em um único mapa. Como o critério de prioridade de apresentação das classes, estabelecido para este mapa, foi no sentido da apresentação das classes restritivas para cada indicador, e que entre os atributos o critério de prioridade se dá por $AFD > PA > RP > TIE$, verifica-se que as classes mostradas na íntegra no mapa de Qualidade Físico-hídrica (QFH), foram aquelas que ocuparam posições no topo da legenda (classe restritiva de AFD nas três profundidades), ficando as subseqüentes encobertas onde houve sobreposição de pixels.

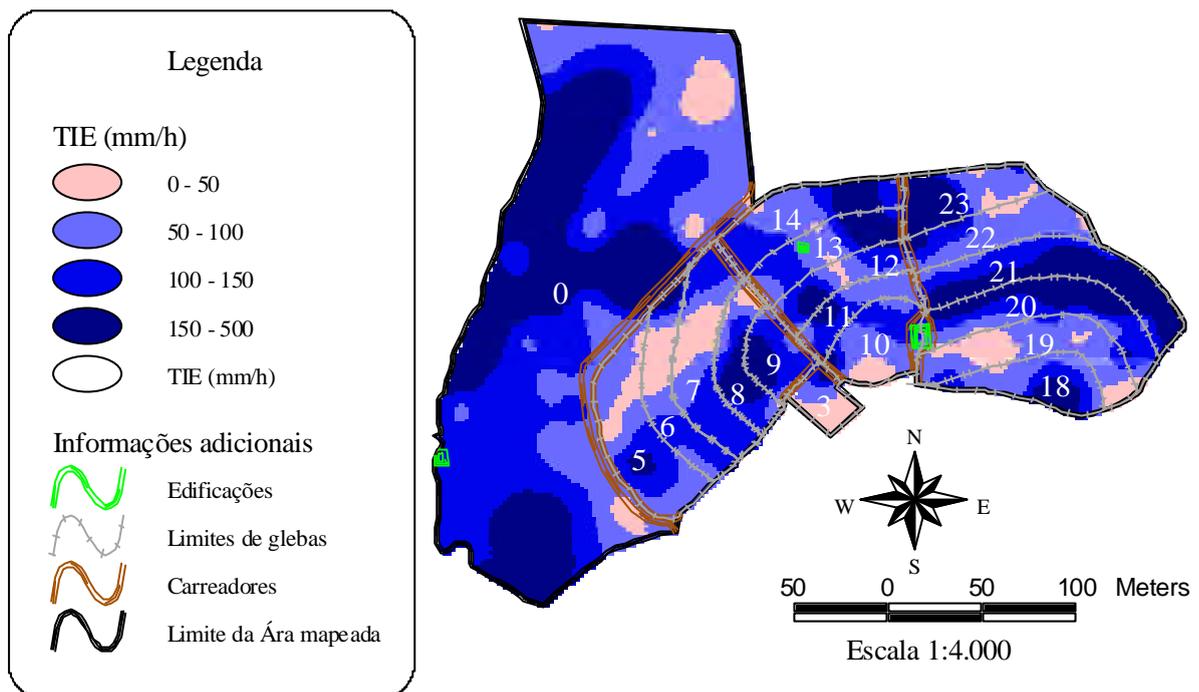


Figura 16: Variabilidade espacial da Taxa de Infiltração Estável na área do SIPA.

Como água e ar são ocupantes do espaço poroso do solo, sendo que o primeiro componente ocupa basicamente os microporos e o segundo os macroporos, a variabilidade espacial dos intervalos de classe considerados restritivos para estes indicadores, se dá de maneira oposta, como se pode observar nos mapas temáticos dos indicadores (Figuras 13 e 14). Assim, o mapa de QFH apresenta na íntegra, apenas as classes restritivas de AFD (vinho), e a maioria das áreas com classes restritivas de PA (vermelho), nas três profundidades avaliadas.

As classes restritivas de RP e TIE foram apresentadas logo após as de AFD e PA e foram encobertas por estas onde houve coincidência. Do ponto de vista de restrições, como discutido após a apresentação dos mapas de cada indicador, observa-se que a pastagem apresenta basicamente, fortes restrições de QFH principalmente por AFD, com exceção de pequenas áreas isoladas com restrições dos demais atributos. Na área das glebas observa-se o oposto, ou seja, ocorrem maiores restrições por PA e TIE, nestas áreas existem apenas pequenas manchas com a classe restritiva de AFD.

Logo após a apresentação das classes restritivas de cada indicador, foram mostradas as classes não restritivas, que foram coloridas em tons de azul claro. Nesta operação ainda com o critério de prioridade $AFD > PA > RP > TIE$, todas as áreas que não foram mapeadas como restritivas foram preenchidas, configurando-se, portanto, as regiões com melhor classificação físico-hídrica.

É importante salientar que este mapa tem função utilitária, assim, da forma que é apresentado, fornece um panorama da QFH dos solos da “Fazendinha Agroecológica do km 47”. Os critérios de prioridades, bem como o intervalo de classes, podem e deverão ser alterados sempre que houver informações específicas sobre culturas, sistemas de manejo, glebas ou mesmo peculiaridades experimentais específicas. A alteração dos intervalos de classes dentro do SIG poderá ser feita de forma simples por usuários de conhecimento básico do software. A alteração dos valores de cada indicador (novos levantamentos) para

monitoramento e ou atualização poderão ser feitas seguindo-se a metodologia aqui descrita e utilizando o mesmo banco de dados agora apresentado.

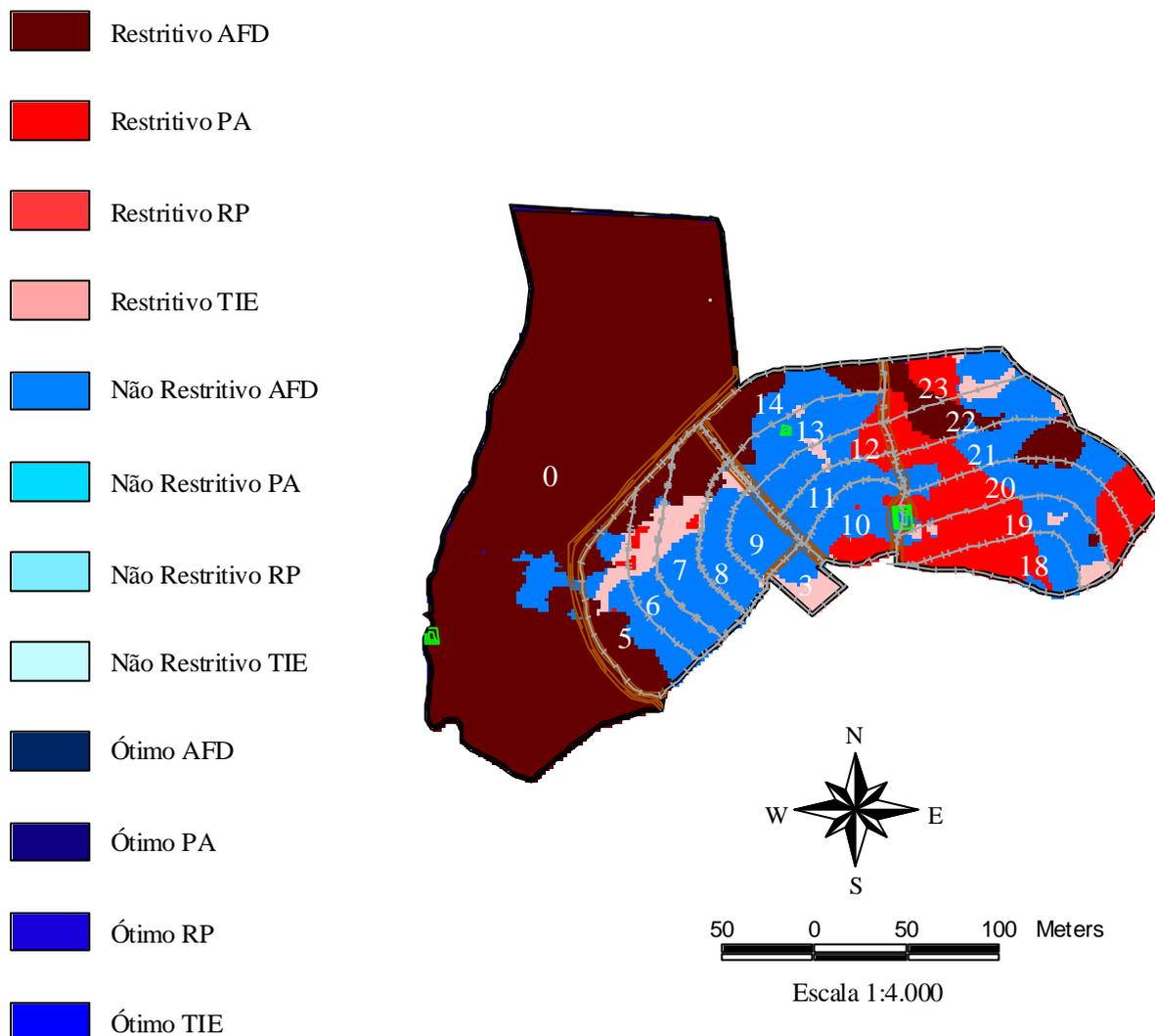


Figura 17: Variabilidade espacial da Qualidade Físico-hídrica dos solos na área do SIPA.

Dias (2007) apresenta uma série de mapas, onde entre outros, descreve quimicamente as glebas 10, 11 e 12, que também são avaliadas neste trabalho. A fusão dos bancos de dados destes trabalhos poderia ser utilizada para análises mais específicas de correlação de causas e efeitos nas pesquisas realizadas nesta área.

O mapa de QFH, de certa forma, corrobora os resultados encontrados por Silva et al. (2001), analisando o intervalo hídrico ótimo (IHO) em solos com variação textural. Onde, para os mesmos valores de densidade, solos com textura média apresentaram IHO maiores que solos de textura argilosa, devido, principalmente, a restrições muitas vezes simultâneas de PA e RP (Figura 3). Estes resultados mostram que solos argilosos tendem a apresentar graus de compactação maiores para os mesmos valores de DS. Pode-se observar que grande parte das áreas vermelhas que aparecem nas glebas do mapa de QFH é, em geral, coincidente com aquelas de textura argilosa, onde há mais de uma restrição. Caso a metodologia do IHO seja aplicada, menores valores deverão ser encontrados nestas glebas. Pode-se dizer então que a metodologia aqui proposta, além de ser viável para o mapeamento da QFH, é útil para o planejamento do uso das terras, permitindo a identificação de zonas específicas com maior potencial de degradação.

5. CONCLUSÕES

Todos os atributos físico-hídricos (Água Facilmente Disponível, Porosidade de Aeração, Resistência à Penetração e Taxa de Infiltração Estável) apresentaram dependência espacial, o que permitiu a geração de mapas de variabilidade espacial por “krigagem”.

Através da análise de correlação e de mapas de variabilidade espacial dos indicadores físico-hídricos, constata-se a relação destes com altitude e teor de argila.

A integração dos indicadores água facilmente disponível, porosidade de aeração, resistência à penetração e taxa de infiltração estabilizada em SIG mostrou-se tecnicamente viável para o mapeamento da variabilidade espacial da qualidade físico-hídrica dos solos.

A taxa de infiltração estabilizada é mais recomendada para estudos de manejo e conservação. Este parâmetro não é um indicador físico-hídrico de efeito direto no desenvolvimento das plantas e não foi avaliada no estudo como variável alternativa à porosidade de aeração.

O mapa de classificação físico-hídrica possibilitou inferir as regiões mais vulneráveis à degradação física, além de permitir a definição de zonas de qualidade físico-hídrica dos solos.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

No que se refere à metodologia proposta para o mapeamento da qualidade físico-hídrica, recomenda-se, visando reduzir o número de amostras e, conseqüentemente, o tempo consumido no trabalho de campo, o estudo de grades de amostragem mais espaçadas e que permitam encontrar mapas com qualidade físico-hídrica semelhante.

Quanto ao planejamento amostral, nos próximos trabalhos de caracterização e avaliação de indicadores físico-hídricos, recomenda-se que a TIE seja determinada no mesmo local da coleta de amostra indeformada para determinação da PA. Essa determinação co-localizada (no mesmo local) permitiria avaliar a viabilidade de se utilizar TIE como alternativa à PA, reduzindo assim o tempo de determinação para geração de mapas de qualidade físico-hídrica.

Em relação às profundidades avaliadas, devido à semelhança dos resultados encontrados nas camadas de 0-0,10 e 0,10 e 0,20 m, para esta mesma área, recomenda-se que estudos posteriores com os indicadores sejam feitos a partir de amostras referentes às camadas de 0-0,20 e 0,20-0,40 m. Esse procedimento é muito útil, pois reduz o número de amostras coletadas no campo, o custo, bem como também o tempo de determinação em laboratório. A caracterização físico-hídrica nas camadas de 0-0,20 e 0,20-0,40 m também é coincidente com as profundidades de coleta efetuadas para caracterização química, efetuadas por Dias (2007).

Para os trabalhos futuros no SIPA, recomenda-se que a base de dados gerada seja integrada com os mapas de atributos químicos, físicos e demais temas, de forma a permitir avaliações mais complexas. As avaliações em ambiente SIG envolveriam, por exemplo, o aperfeiçoamento da sistematização dos dados e desenvolvimento de algoritmos que permitiriam a análise multivariada dos fatores que influenciam no desenvolvimento de plantas, bem como para escolher melhores locais para instalação de experimentos, visando o isolamento de determinados efeitos.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARCHER, J.R.; SMITH, P.D. The relation between bulk density, available water capacity, and air capacity of soils. **J. Soil Sci.**, 23:475-480, 1972.

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

ALMEIDA, D.L.; RIBEIRO, R.L.D.; GUERRA, J.G.M. Sistema Integrado de Produção Agroecológica ("Fazendinha" Agroecológica Km 47). In: Agricultura Agroecológica. **I Encontro de Agricultura Orgânica**. 150-159 p. Livraria e Editora Agropecuária. Guaíba – RS. 1999.

ALTIERI, A.M. Agroecologia: as bases científicas da agricultura alternativa. **PTA/FASE**. Rio de Janeiro. 1989. 240p.

BERNARDO, S. **Manual de irrigação**. UFV, Viçosa. 1984. 328p.

BOEDT, L.; VERHEYE, W. Evaluation of profile available water capacity. 2. Application to irrigation on soils with different properties. **Pedologie**, 35:67-89, 1985.

BONHAM-CARTER, G.F. Geographic Information Systems for geoscientists: Modelling with GIS. **Computer methods in the geosciences**, England, Pergamon. vol. 13. 1996. 398p.

BOUWER, H. Intake rate: cylinder infiltrometer. In: KLUTE, A., ed. Methods of soil analysis. Part I. Madison, **American Society of Agronomy & Soil Science Society of America**, 1986. p.225-243.

BRAGA, L.; DRUCK, S. Analysis of soil properties by geostatistical methods. Geostatistical for next century. In: **An International Forum in Honor of Michel David's Contribution to Geostatistics**. 1993, Montreal, Quebec, Canada. Proceedings... (S. I.: s. n.), 1993.

BURGES, T.M.; WEBSTER, R. Optimal interpolation and isarithmic mapping. I. The semivariogram and punctual kriging. **J. of Soil Science**, v.31:315-332, 1980a.

BURGES, T.M.; WEBSTER, R. Optimal interpolation and isarithmic mapping. II. Block kriging. **Journal of Soil Science**, v.31:333-342, 1980b.

BURGES, T.M.; WEBSTER, R; McBRATNEY, A.B. Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties. IV. Sampling strategy. **J. of Soil Science**, v.32, p.643-659, 1981.

BURROUGH, P.A. **Principles of Geographical Information Systems for Land Resources Assessment**. (Monographs on Soil and Resources Survey). Oxford University Press. Oxford-Great Britain. 1990. 194p.

BUREAU OF RECLAMATION. Irrigated land use classification. In: **BUREAU of Reclamation Manual**. S.1., 1953. v.5.

CÂMARA, G.; MEDEIROS, J. S.de. Princípios básicos em geoprocessamento. In: **Sistemas de Informações Geográficas (Aplicações na agricultura)**. 2ª ed revista e ampliada. Serviço de Produção de Informação. EMBRAPA-CPAC. Brasília-DF. 1998. 434p.

CAMARGO, O.A.; Alleoni, L.R.F.A. **Compactação do Solo e o Desenvolvimento das Plantas**. Piracicaba. 1997. 132p.

CAMBARDELLA, C.A.; Moorman, T.B.; Novak, J.M.; Parkin, T.B.; Karlen, D.L.; Turco, R.F.; Konopka, A.E. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 58(5):1501-1511, 1994.

CANARACHE, A. PENETR – a generalized semi-empirical model estimating soil resistance to penetration. **Soil Till. Res.**, Amsterdam, 16:51-70, 1990.

CANNELL, R.Q. **Soil aeration and compaction**. Appl. Biol, v. 2:1-86, 1977.

CASAGRANDE, A.A. **Tópicos de morfologia e fisiologia de cana-de-açúcar**. Jaboticabal: FUNEP. 1991. 157p.

CASSEL, D.K.; NIELSEN, D.R. Field capacity and available water capacity. In: KLUTE, A., ed. Methods of soil analysis. Part I. Madison, **American Society of Agronomy & Soil Science Society of America**, 1986. p. 901-924.

CEDDIA, M.B. **Física do solo**. Disciplina do Curso de Pós-graduação em Agronomia-Ciência do Solo. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, 2006. 165p.

CRUCIANI, D.E. **A drenagem na agricultura**. São Paulo, Nobel, 1983. p.128-141.

DEUTSCH, C. V. & JOURNEL, A. G. **GSLIB**. Geostatistical Software Library and User's Guide. 2nd ed. Oxford University Press, 1998. 369p.

DIAS, J.E. **Avaliação do Uso e Fertilidade do Solo no Sistema Integrado de Produção Agroecológica Utilizando Geoprocessamento**. 2007. Tese (Doutorado) Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Instituto de Agronomia. 2007. 121f.

DIAS JUNIOR, M. de S.D.; FERREIRA, M.M. Informática na agropecuária: **Física do solo**. Lavras: UFLA/FAEPE, 1997. 54p.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Manual de Métodos de Análise de Solo**. Rio de Janeiro. 1979. 247p.

EMBRAPA Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Levantamento semidetalhado dos solos da área do Sistema Integrado de Produção Agroecológica (SIPA) – km 47 – Seropédica**, Rio de Janeiro, 1999. (Boletim de Pesquisa n.5)

FABIAN, A.J. & OTTONI FILHO, T.B. Determinação de capacidade de campo “in situ” ou através de equações de regressão. **Pesq Agropec Bras**, v.35:1029-1036, 2000.

FUKS, S.D. Novos modelos para mapas derivados de informações de solos. In: **Sistemas de Informações Geográficas (Aplicações na agricultura)**. 2ª edição revista e ampliada. Serviço de Produção de Informação-SPI. EMBRAPA-CPAC. Brasília-DF. 1998. 434p.

GERMANN, P.F. Slug approach to infiltration into soil with macropores. In: National Conference On Advances In Infiltration, 1983. Chicago. Proceedings. St. Joseph, **American Society of Agricultural Engineers**, 1983. p. 122-131. (ASAE Publication, 11-83. Advances in infiltration).

HILLEL, D. **Applications of soil physics**. New York, Academic Press, 1980a. p.5-49; 50-75; 147-196.

HILLEL, D. **Fundamentals of soil physics**. New York, Academic Press, 1980b. p.195-232; 265-286.

JESUS, E.L. **Avaliação da sustentabilidade Agrícola: Uma abordagem conceitual e metodológica**. 2003. 197f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. 2003.

KLAR, A.E. **A água no sistema solo-planta-atmosfera**. SP. Nobel. 1984., 385p.

ISAAKS, E.H.; SIVASTAVA, R.M. **Applied Geostatistics**. Oxford University Press, Oxford. 1989. 560 pp.

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

LIBARD, P.L. (Ed) **Dinâmica da água no solo**. 1.ed. Piracicaba, 1995. 497p.

LIBARD, P.L. (Ed) **Dinâmica da água no solo**. 2. ed. Piracicaba, 2000. 505p.

McBRATNEY, A.B.; WEBSTER, R. Choosing functions for semi-variograms of soil properties and fitting them to sampling estimates. **Journal of Soil Science**, 37:617-639, 1986.

NEVES, M.C.P.; ALMEIDA, D.L.; DE-POLLI, H.; GUERRA, J.G.M.; RIBEIRO, R.L.D. **Agricultura Orgânica – Uma estratégia para o desenvolvimento de sistemas agrícolas sustentáveis**. Seropédica, RJ: EDUR, 2004. 98p.

ORELLANA, J.A.; PILATTI, M.A.; GRENÓN, D.A. Soil quality: an approach to physical state assessment. **J. Sustainable Agric.**, v.9(2):91-108, 1997.

OTTONI FILHO, T.B. Uma classificação físico-hídrica dos solos. **R. Bras. Ci. Solo**, 27:211-222, 2003.

PETERSEN, G. W. et ali. Geographic Information Systems in agronomy. **Advances in Agronomy**. Academic Press. 1995. Vol. 55. 67-111p.

PLANT, R.E. Site specific management: the application of information technology to crop production. Computers and electronics in agriculture. **Elsevier Science B.V.**, Volume 30, 9-29 pp. 2001.

REICHARDT, K. **A água na produção agrícola**, McGraw-Hill do Brasil, 1978, 117p.

REICHARDT, K. Capacidade de campo. **R. Bras. Ci. Solo**, 12:211-216, 1988.

REICHARDT, K. **A água em sistemas agrícolas**. São Paulo, Manole, 1990. p.95-98.

RIGHES A.A.; AMARAL L.G.H.; COSTA R.D.; ROSA G.M.; WILLES J.A.; GOMES A.C. **S. Determinação da água no solo e na planta para irrigação**. Santa Maria – Imprensa Universitária, 2003. 97p.

ROSSITIER, D.G. http://wwwscas.cit.cornell.edu/landeval/le_notes. 1999.

ROCHA, R.E. **Implantação de uma base de dados georreferenciada para monitoramento e avaliação da fertilidade do solo no Sistema Integrado de Produção Agroecológica (SIPA – Fazendinha)**. 222f. Tese (Doutorado – Fitotecnia) Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ.

SALTER, P.J.; WILLIAMS, J.B. The influence of texture on the moisture characteristics of soils. I. A critical comparison of techniques for determining the available-water capacity and moisture characteristic of a soil. **J. Soil Sci.**, 16:1-15. 1965a.

SENE, M.; VEPRASKAS, M.J.; NADERMAN, G.C.; DENTON, H.P. Relationships of soil texture and structure to corn yield response to subsoiling. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, Madison, 49:422-427, 1985.

SILVA, A.P.; KAY, B.D.; PERFECT, E. Characterization of the least limiting water range. **Soil Sci. Soc. Am. J.** 58:1775-1781, 1994.

SILVA, A.P.; TORMENA, C.A.; IMHOFF, S. **Intervalo hídrico ótimo, em qualidade física do solo: métodos de estudo – sistemas de preparo e manejo do solo**. Editora Funep, Piracicaba. 2001. p. 1-20

STOLF, R. Teorias e testes experimentais de fórmulas de transformação dos dados de penetrômetro de impacto em resistência do solo. **R. Bras. Ci. Solo**, v.15:229-235. 1991

TAYLOR, H.M. Effects of soil strength on seedling emergence, root growth, and crop yield. In: **Compaction of agricultural soils**, an ASAE Monograph, Publ. American Society of Agricultural Engineers, 2950 Niles Road, St. Joseph, Michigan 49085. 1971. pp. 292-305.

THOMASSON A.J. Towards an objective classification of soil structure. **J. Soil Sci.**, 29:38-46, 1978.

TORMENA, C.A.; SILVA, A.P. & LIBARD, P.L. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Roxo sob plantio direto. **R. Bras. Ci. Solo**, v.22:573-581, 1998.

TORMENA, C.A. *et al.* Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Roxo sob plantio direto. **Rev. Bras. Ci. Solo**, v.20:333-339, 1996.

TRANGMAR, B.B.; YOST, R.S.; UEHARA, G. Application of geostatistics to spatial studies of soil properties. **Advances in Agronomy**, v 38:45-93, 1985.

UNGER, P.W.; KASPAR, T.C. Soil compaction and root growth: A review. **Agronomy Journal**, v.86:759-766, 1994.

VALDERANO, M.M.; PRADO, H. Técnicas de geoprocessamento e de amostragem para o mapeamento de atributos anisotrópicos do solo. **R. Bras. Ci. Solo**, 25:997-1005, 2001.

VIEIRA, S. R.; REYNOLDS, W.D.; TOPP, G.C. **Spatial variability of hydraulic properties in a highly structured clay soil**. In: WIERANGA, P.J. and BACHELET, D., eds. Validation of Flow and Transport Models for the Unsaturated Zone: Conference Proceedings. Las Cruces, N. M., Department of Agronomy and Horticulture, New Mexico State University, 1988. p.471-483. (Research Report 88-SS-04) (Conference Of Validation Of Flow And Transport Models For The Unsaturated Zone, Ruidoso, Novo México, 1988).

VIEIRA, S.R.; NIELSEN, D.R.; BEGGAR, J.W. Spatial variability of field measured infiltration rate. **Soil Science Society of America Journal**, v.45:1040-1048, 1981.

VIEIRA, S.R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial de solos. In: Tópicos Avançados em Ciência do Solo. **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**. 1-53 pp. 2000.

WEBSTER, R.; BURGESS, T.M. Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties. III. Changing drift and universal kriging. **Journal of Soil Science**, v.31:505-524, 1980.

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

YOST, R.S.; UEHARA, G.; FOX, R.L. Geoestatistical analysis of soil chemical properties of large land areas. I. Semi-variograms. **Soil Science Society of America Journal**, v.46:1028-1032, 1982.

XAVIER da SILVA. Geoprocessamento para análise ambiental. In: XAVIER DA SILVA. **Curso de Especialização em Geoprocessamento**. Lageop-UFRJ. 1999.