

JOÃO HERBERT MOREIRA VIANA

**ANÁLISE DE IMAGENS MICROPEDOLÓGICAS COM UTILIZAÇÃO
DO PROGRAMA *QUANTIPORO* E SUA APLICAÇÃO AO ESTUDO
DE UMEDECIMENTO E SECAGEM EM AMOSTRAS DE LATOSSOLOS**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS - BRASIL
2001

**Ficha catalográfica preparada pela Seção de Catalogação e
Classificação da Biblioteca Central da UFV**

T

V614a
2001

Viana, João Herbert Moreira, 1966-

Análise de imagens micropedológicas com utilização do programa Quantiporo e sua aplicação ao estudo de umedecimento e secagem em amostras de latossolos / João Herbert Moreira Viana. – Viçosa : UFV, 2001. 70p. : il.

Orientador: Elpídio Inácio Fernandes Filho
Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Viçosa

1. Latossolos. 2. Solos – Análise de imagens. 3. Solos – Porosidade. 4. Solos – Métodos de calibração. 5. Solos – Agregação. 6. Solos – Ciclos de umedecimento e secagem. I. Universidade Federal de Viçosa. II. Título.

CDD 19.ed. 631.4

CDD 20.ed. 631.4

JOÃO HERBERT MOREIRA VIANA

**ANÁLISE DE IMAGENS MICROPEDOLÓGICAS COM UTILIZAÇÃO
DO PROGRAMA *QUANTIPORO* E SUA APLICAÇÃO AO ESTUDO
DE UMEDECIMENTO E SECAGEM EM AMOSTRAS DE LATOSSOLOS**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 22 de fevereiro de 2001.

Prof. Hugo Alberto Ruiz
(Conselheiro)

Prof. Liovando Marciano da Costa

Prof. Gilberto Fernandes Correa

Prof^a Cristine Carole Müggler

Prof. Elpídio Inácio Fernandes Filho
(Orientador)

Aos meus pais, pela oportunidade de ter chegado aonde cheguei, pelo apoio e pela dedicação neste período.

AGRADECIMENTO

À Providência Divina, por tudo que tenho recebido, especialmente pelos benefícios que não pude ainda perceber.

À Universidade Federal de Viçosa e ao Departamento de Solos, pela oportunidade concedida.

Aos Professores Elpídio Inácio Fernandes Filho e Carlos Ernesto G. R. Schaefer, pela oportunidade oferecida e confiança depositada, especialmente por sua amizade e companhia neste período.

Aos Professores Hugo A. Ruiz, Liovando Marciano da Costa, Gilberto F. Correa e Cristine C. Muggler, pelas sugestões oferecidas e por sua participação em minha defesa de tese.

Aos Professores do Departamento de Solos, pelas lições recebidas, pela amizade e pelo apoio.

A todos os colegas de curso, pela amizade e pelo companheirismo.

Aos companheiros do Laboratório de Geoprocessamento, pela amizade e ajuda recebida.

Aos amigos que, mais que colegas, passaram a fazer parte de minha vida.

BIOGRAFIA

JOÃO HERBERT MOREIRA VIANA, natural de Belo Horizonte (MG), é filho de Herbert Viana e Edy da Glória Moreira Viana. Graduou-se em Agronomia pela Universidade Federal de Viçosa em março de 1990, tendo exercido a profissão como autônomo e produtor rural durante esse período. No segundo semestre de 1999, iniciou seus estudos para obtenção do título de Mestre nesta mesma universidade, submetendo-se à defesa de tese em fevereiro de 2001.

ÍNDICE

	Página
RESUMO	viii
ABSTRACT	x
1. INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO 1	
ANÁLISE DE IMAGENS MICROPEDOLÓGICAS: CALIBRAÇÃO DE FILTROS E PROCEDIMENTOS DO PROGRAMA <i>QUANTIPORO</i> ...	3
RESUMO	3
SUMMARY	4
INTRODUÇÃO	5
CONCEITOS BÁSICOS SOBRE TRATAMENTO DIGITAL DE IMAGENS	8
MATERIAL E MÉTODOS	11
1. Imagens	11
2. Equipamentos	13
3. Programa	13
4. Procedimentos de medição	13

4.1. Medições de área	13
4.2. Medições de perímetro	14
5. Calibração dos filtros	14
5.1. Filtro de realce	14
5.2. Filtro de limiar	14
5.3. Filtro de mediana	15
6. Calibração da resolução	15
RESULTADOS E DISCUSSÃO	17
1. Calibração de medição de área	17
1.1. Filtro de realce	17
1.2. Filtro de limiar	17
1.3. Resultados de erros acumulados dos filtros de realce e limiar para valores de área	20
2. Calibração de medição de perímetro	21
2.1. Filtro de realce	21
2.2. Filtro de limiar	21
3. Calibração de medição de perímetro para o filtro de mediana	23
4. Calibração de medição de área e perímetro para a figura-padrão	25
CONCLUSÕES	30
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	31
CAPÍTULO 2	
REORGANIZAÇÃO DA ESTRUTURA MICROGRANULAR DE LATOSSOLOS: EFEITOS DE CICLOS DE UMEDECIMENTO E SECAGEM	33
RESUMO	33
SUMMARY	34
INTRODUÇÃO	35
REVISÃO DE LITERATURA	36
MATERIAL E MÉTODOS	38
1. Solos	38
2. Preparo das amostras	40
3. Obtenção e processamento das imagens	41

4. Análise dos dados	41
RESULTADOS E DISCUSSÃO	43
1. Descrições morfológicas das amostras	43
2. Principais alterações observadas	44
2.1. Mudanças na porosidade total	44
2.2. Mudanças na forma e orientação dos poros – poros planares e microporos intra-agregados	53
2.3. Resultados das alterações da porosidade em LP e LR	55
CONCLUSÕES	64
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	65
2. RESUMO E CONCLUSÕES	69

RESUMO

VIANA, João Herbert Moreira, M.S., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2001. **Análise de imagens micropedológicas com utilização do programa *QUANTIPORO* e sua aplicação ao estudo de umedecimento e secagem em amostras de Latossolos.** Orientador: Elpídio Inácio Fernandes Filho. Conselheiros: Carlos Ernesto Gonçalves Reynaud Schaefer e Hugo Alberto Ruiz.

O objetivo deste trabalho foi observar e medir as modificações estruturais decorrentes da aplicação de ciclos de umedecimento e secagem em amostras de cinco Latossolos de diferentes propriedades químicas e mineralógicas, submetidas à destruição de seus agregados por moagem a seco, e comparadas às mesmas amostras mantidas integrais. Foi também observado o efeito da aplicação de ácido húmico em pó aos tratamentos submetidos aos ciclos. As amostras foram passadas em peneira de 1,00 mm e, a seguir, separadas em tratamento mantido integral e tratamento moído em almofariz de cerâmica e passado em peneira de 0,105 mm. Os dois grupos foram então separados em tratamentos mantidos secos e tratamentos que receberam os ciclos de umedecimento e secagem. Estes últimos foram ainda uma vez subdivididos em dois grupos, um dos quais recebeu a adição de ácido húmico em pó, moído e passado em peneira de 0,053 mm, resultando em

seis tratamentos totais. Os tratamentos foram então montados em colunas, montadas com latas de alumínio furadas no fundo e colocadas sobre placas de Petri. O conjunto foi montado em casa de vegetação, onde recebeu a aplicação dos ciclos. Estes se constituíram na aplicação semanal de água deionizada vertida nas placas, que saturava as amostras por ascensão capilar. Foram realizados dez ciclos de umedecimento e secagem. Ao final dos ciclos, o material foi seco e impregnado com resina de poliéster. Após o endurecimento, foram efetuados cortes verticais dos blocos e, destes, foram preparadas lâminas finas para microscopia. Estas lâminas foram levadas para observação em microscópio óptico e lupa e fotografadas, e as fotos, digitalizadas em *scanner*. As imagens digitais assim obtidas foram então processadas e quantificadas com o uso do Programa *QUANTIPORO*, desenvolvido no DPS/UFV. Os resultados mostram modificações substanciais na forma e no padrão da estrutura após a aplicação dos ciclos, no caso dos tratamentos que sofreram moagem, os quais apresentaram estruturas na forma de prismas e blocos e poros planares. Essas mudanças foram atribuídas a uma acomodação dos agregados com a retração da massa, que se seguiu ao processo de secagem. Foi também efetuada a calibração deste programa de análise de imagens, para verificação de seu desempenho. Os resultados desta calibração indicaram que os erros atribuídos aos ajustes dependentes da interferência do usuário se encontraram dentro de limites considerados aceitáveis para efeito de interpretação dos resultados. Indicam também a dependência de imagens de boa qualidade para minimizar os erros e a necessidade de desenvolvimento dos filtros para aperfeiçoar a separação de feições de interesse.

ABSTRACT

VIANA, João Herbert Moreira, M.S., Universidade Federal de Viçosa, February 2001. **Micropedological image analysis with the software *QUANTIPORO* and its use in the study of wetting and drying cycles in Latosol samples.** Adviser: Elpídio Inácio Fernandes Filho. Committee members: Carlos Ernesto Gonçalves Reynaud Schaefer e Hugo Alberto Ruiz.

The aim of this work was to observe and measure structural modifications due to wetting and drying cycles on samples of five Latosols of different chemical and mineralogical properties, after dry grinding, compared to the bulk samples. The effect of humic acid added to samples was also studied. The samples were sieved in a 1,00 mm sieve and split in a control group and a group ground in a mortar and sieve in a 0,105 mm sieve. From both groups samples were kept dry as a control, and the others were submitted to wetting and drying cycles. This last group was split in two, to one of them powdered humic acid was added, resulting in a total of six groups. The groups were placed in aluminum container columns, applying 10 cycles of wetting and drying by capillarity, followed by air drying. In the end of the cycles, the samples were dried and impregnated with polyester resin, cut in blocks and used to prepare thin sections for microscopy. Thin sections were observed and photographed

in optical microscope. The photos were digitalized with a desk scanner. The digital images were processed and quantified with the *QUANTIPORO* software. The calibration of this image analyzer software was also made to check its performance. Important changes were observed on ground samples on both shape and structural pattern with wetting and drying cycles, mainly formation of blocky and prismatic structures and planar voids. Those changes were attributed to re-organization of soil aggregates during the shrinkage of the aggregate mass following the drying process. The calibration of the software was made to check its performance. The results showed that the users' dependent offset errors were into acceptable limits for result interpretation. They also showed the dependence on high quality images to reduce errors and the demand for digital filters' upgrade for improving the separation of shapes of interest.

1. INTRODUÇÃO

A estrutura constitui-se em uma das propriedades de maior importância na determinação do comportamento de um solo. Sua natureza dinâmica e sua interação com os fatores de formação do solo levam à necessidade do conhecimento detalhado dos mecanismos responsáveis por suas mudanças para a construção de modelos preditivos, visando subsidiar as decisões relativas ao uso e manejo dos solos.

O conhecimento da gênese e estabilidade dos agregados e microagregados nos Latossolos ainda é motivo de dúvidas e controvérsia na literatura. Por serem estes os principais solos agrícolas dos Cerrados e dada a sua relevância socioeconômica e ambiental, o conhecimento de sua dinâmica de agregação é essencial para o estabelecimento de práticas de manejo sustentado. O surgimento e agravamento de problemas físicos decorrentes de seu uso intensivo refletem, em parte, esse desconhecimento. Deve-se salientar a inexistência de experiências anteriores de uso intensivo destes solos tropicais, como pontos de referência. O uso e a ocupação destes solos têm ocorrido em ritmo acelerado, antes da geração destes conhecimentos, cabendo à pesquisa agrícola retomar a dianteira dos fatos, para evitar que danos irreversíveis possam ser cometidos.

Este trabalho teve por objetivo o estudo de modificações estruturais em amostras de agregados de Latossolos de diversas naturezas, submetidos à moagem a seco e a ciclos de umedecimento e secagem, buscando fornecer informações adicionais que subsidiem as discussões sobre sua gênese. Visou também incorporar, e testar, o uso de uma ferramenta de análise quantitativa de imagens digitais ao estudo das propriedades de solos. Esta ferramenta - programa de computador desenvolvido para atender às necessidades específicas da Ciência de Solo -, ao permitir a geração e manipulação de dados quantitativos de forma rápida e econômica, poderá servir para teste e desenvolvimento de modelos matemáticos mais adequados à predição e ao entendimento dos processos relativos à formação de estrutura no solo.

CAPÍTULO 1

ANÁLISE DE IMAGENS MICROPEDOLÓGICAS: CALIBRAÇÃO DE FILTROS E PROCEDIMENTOS DO PROGRAMA *QUANTIPORO*

RESUMO

Foram efetuadas medições para a calibração do programa *QUANTIPORO*, desenvolvido no Departamento de Solos/UFV, com o objetivo de avaliar e estimar os erros sistemáticos cometidos durante o processo de medição de imagens pelo programa. Esses erros são oriundos da necessidade de conversão da imagem original em uma imagem binária. Durante o processo de conversão existe a necessidade de decisões subjetivas do usuário quanto aos limites das feições na imagem e eliminação de alta frequência devido a ruídos, efetuadas com o uso de filtros digitais. Foi quantificado o erro cometido quando da aplicação destes filtros. Os resultados indicam que os erros são muito dependentes da qualidade inicial da imagem, mas se encontram dentro de limites aceitáveis para as interpretações dos resultados. Indicam também a necessidade de aperfeiçoamento dos filtros do programa,

visando a eliminação de ruídos de fundo e o aprimoramento da discriminação de feições de interesse na imagem.

Termos de indexação: quantificação de porosidade, análise de imagem, método de calibração.

SUMMARY

Measurements were made for the calibration of the software *QUANTIPORO*, developed in the Department of Soil Science/UFV, aiming to estimate the systematic errors during the measuring process made by the program. These errors occur due to the conversion of the original image to its binary form. In the conversion process, users' subjective decisions about the limits of the boundary of objects in the images are taken, as well as elimination of high frequency due to background noise, both performed by digital filters. The errors during the applications of these filters were quantified. The results show that errors are dependent on the primary image quality, but are constrained within reasonable limits for the result's interpretation. They also indicate the necessity for filter upgrades aiming the background noise elimination and better boundary identification in the images.

Index terms: porosity quantification, image analysis, calibration method.

INTRODUÇÃO

A micropedologia, conforme concebida originalmente por KUBIËNA (1938), tornou-se uma ciência essencialmente descritiva, o que, em parte, se deve às dificuldades técnicas e operacionais de quantificar os objetos observados. Técnicas de quantificação manuais, como contagem com o auxílio de retículos e contagem de pontos, por serem tediosas e demoradas, têm desestimulado e inviabilizado seu uso rotineiro em grande quantidade de imagens. Por outro lado, há crescente demanda por sistemas de análise de imagens para aplicações em estudos de caracterização e dinâmica da porosidade e estrutura dos solos, tanto na área de manejo quanto em gênese, como recentemente demonstrado em diversas aplicações por estudos pontuais (TOVEY et al., 1992; FARIA et al., 1998; SANTOS, 2000; SCHAEFER et al., 2001).

O desenvolvimento de tecnologias de obtenção, processamento e quantificação de imagens baseadas no uso de microcomputadores e de seus periféricos permite agora que as etapas lentas do processo sejam efetuadas de forma rápida e automática. Essas tecnologias apresentam a vantagem adicional do baixo custo e da compatibilidade com os recursos da maioria dos usuários, além da facilidade de uso. Tecnologias de aquisição e processamento de imagens anteriormente usadas, além de caras, exigiam treinamento especializado (CONWAY e

JENKINS, 1983). Uma discussão mais detalhada de processamento de imagens aplicado à micromorfologia do solo pode ser encontrada em MORAN (1992).

Como exemplo do uso da quantificação, podem-se citar alguns trabalhos recentes. SCHAEFER et al. (2001) estudaram a forma e a distribuição dos poros em diferentes sistemas de preparo de solo por meio de imagens em preto e branco obtidas de seções de blocos impregnados com resina e corados com corante sensível à luz ultravioleta. BARROS et al. (2000) estudaram a transformação e reversibilidade da estrutura de solo por morfologia quantitativa, utilizando-se de análise de imagens obtidas por câmera de vídeo acoplada a microscópio e processando-as em uma estação Sun, aplicando o programa Noesis Visilog. MACKIE-DAWSON et al. (1995) analisaram o crescimento de raízes de *Lolium perenne*, submetido a diferentes tratamentos, fotografadas e analisadas em um sistema de análise de imagens AMS Systems III, com programa próprio. DELEPORTE et al. (1997) aplicaram a análise de imagens ao estudo da modificação de padrões de húmus de florestas utilizando-se de imagens obtidas com uma câmera de vídeo Sony CCD, processadas pelo mesmo equipamento do trabalho de BARROS et al. (2000).

As etapas de geração da imagem são essencialmente as mesmas, ou seja, coleta da amostra, preparo, impregnação, corte e montagem em lâminas finas para microscopia. A aquisição das imagens a partir daí fica dependente dos recursos instrumentais disponíveis. Pode-se produzir a imagem digital direta, via filmadoras e câmeras de vídeo digitais, ou fotografias convencionais, digitalizadas posteriormente. A etapa seguinte, crucial no processo, é o processamento da imagem. Embora programas para tratamento e quantificação de imagens já se encontrem disponíveis no mercado, muitos dos quais altamente sofisticados, há carência de produtos desenvolvidos especificamente para o uso em micromorfologia.

O uso de programas como ferramenta de obtenção de dados e tratamento destes exige o conhecimento e o controle da qualidade e do desempenho desta, e a calibração desta ferramenta se constitui no

conjunto de procedimentos destinados a conhecer o comportamento do programa em face de um conjunto de dados conhecido, que servirá de controle para as medições efetuadas no material a ser processado. Esta calibração pode ser efetuada também diretamente nos dados reais, com o objetivo de se obter o intervalo de confiança para os ajustes feitos durante as operações e que dependem de interferência do usuário (procedimentos não-automáticos). O presente trabalho apresenta os resultados de calibração efetuados para o programa *QUANTIPORO*, desenvolvido no DPS/UFV, usado como ferramenta de análise de imagens obtidas de lâminas finas de solos em estudos de micromorfologia.

CONCEITOS BÁSICOS SOBRE TRATAMENTO DIGITAL DE IMAGENS

As imagens digitais são consideradas, para efeito dos procedimentos de tratamento e quantificação, como um conjunto constituído por l linhas e c colunas, em que cada ponto representa o valor de cor da imagem. Estes pontos são denominados *pixels* (do inglês “*picture element*”, ‘elemento da imagem’) e representam a menor unidade da imagem, sendo seu limite de resolução. Estes pontos representam uma média amostral das cores naquela parte do objeto a partir do qual se originou a imagem. O valor real do pixel é função do tipo de imagem utilizada, variando de alguns quilômetros de lado em imagens de satélite a poucos nanômetros em imagens de microscopia eletrônica de alta resolução ou microscopia de força atômica.

No sistema de cores RGB, usado nas imagens deste trabalho, as cores são formadas a partir da combinação dos comprimentos de onda vermelho, verde e azul. Estas cores são combinadas para produzir a imagem colorida, e a informação contida em cada pixel é composta pelos valores relativos destas. Este valor é discreto, variando de 0 a 255, o que corresponde a 2^8 unidades de informação (bits). A combinação das três cores primárias permite a formação de 2^{24} ou 16.777.216 cores diferentes, mais que o suficiente para representar o universo de cores discerníveis pela vista humana.

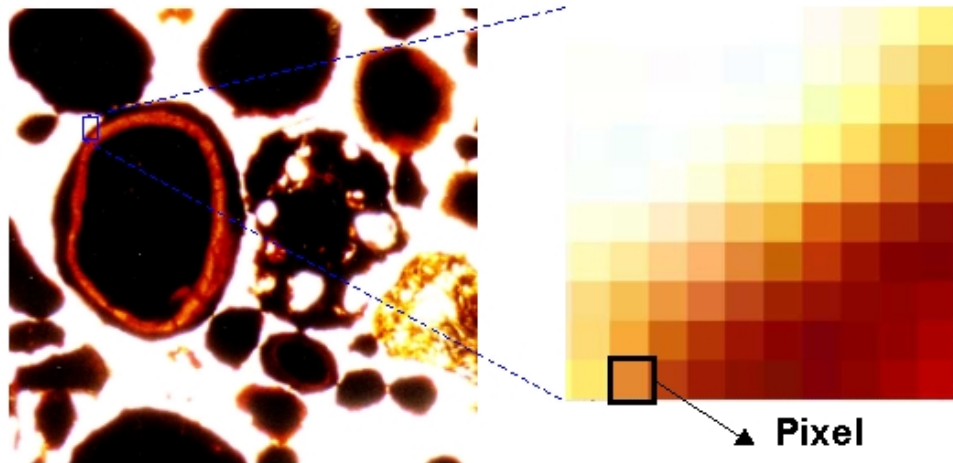


Figura 1 – Imagem original (microfotografia de agregados vistos em microscópio ótico) e detalhe desta, mostrando os pixels.

Estas imagens podem ser decompostas em três imagens (cada uma carregando a informação da participação desta cor na formação daquela imagem) em tons de cinza, em que os valores de 0 a 255 passam a representar os valores de brilho de cada pixel, ou uma única imagem, em que o valor de brilho passa a representar uma média dos três. Esta imagem pode ainda ser convertida em sua forma binária, ou seja, constituída apenas pelos valores de preto e branco: 0 e 255.

Os tratamentos aplicados a uma imagem incidem sobre esses valores, alterando-os em função de operações específicas, as quais se constituem em operações matemáticas e/ou lógicas sobre o valor de cada pixel, retornando ao final, como resultado, uma nova imagem. Algumas operações exigem a transformação da imagem em sua forma binária, como a determinação de poros e matriz em uma imagem de seção fina de solo.

As operações sobre imagens são realizadas por meio de filtros digitais, que são matrizes numéricas geralmente no formato $n \times n$, sendo n o número de linhas e colunas destas, denominadas máscara. Esta é aplicada sobre todos os pontos da imagem, varrendo a imagem a partir do canto superior esquerdo, avaliando os pixels em uma posição (x,y) e seus vizinhos adjacentes.

No caso dos filtros de média, é feita a multiplicação dos coeficientes da máscara pelos valores dos pixels da imagem original, e o resultado, dividido pelo somatório dos valores da máscara. O resultado é então atribuído ao pixel da imagem filtrada. O valor a ser atribuído ao pixel poder ser, além da média, a mediana ou a moda de seus vizinhos, ou uma combinação adequada aos objetivos do usuário.

$$Máscara = \begin{bmatrix} c_1 & c_2 & c_3 \\ c_4 & c_5 & c_6 \\ c_7 & c_8 & c_8 \end{bmatrix}$$

Equação para os filtros de média:

$$IF_5 = \frac{\sum_{i=1}^n C_i \times VN_i}{\sum_{i=1}^n C_i}$$

Exemplo de aplicação de filtro (resultado de sua aplicação ao pixel central):

<i>Filtro</i>	<i>Imagem original (IO)</i>	<i>Imagem filtrada (IF)</i>
$Máscara = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$	$\Rightarrow IO = \begin{bmatrix} 2 & 8 & 6 \\ 2 & 8 & 6 \\ 2 & 2 & 8 \end{bmatrix}$	$\mapsto IF = \begin{bmatrix} 2 & 8 & 6 \\ 2 & 5 & 6 \\ 2 & 2 & 8 \end{bmatrix}$

As operações de quantificação são basicamente operações de contagem de pixels, sendo realizadas em toda a área da imagem, ou em setores seleccionados.

MATERIAL E MÉTODOS

1. Imagens

Foram efetuadas medidas de área e perímetro em cinco imagens consideradas representativas do conjunto a ser estudado. As imagens-base foram importadas pelo programa em seu formato original como arquivo do tipo matricial (Windows Bitmap), não-comprimido, sendo então processadas e gerando como produto final novas imagens e planilhas. Estas últimas foram exportadas para um programa de estatística e, posteriormente, analisadas.

As imagens foram provenientes de um experimento em laboratório, onde cinco amostras de diferentes Latossolos, designadas LA, LE, LF, LR e LP, foram submetidas à moagem e a ciclos sucessivos de umedecimento e secagem.

As imagens analisadas foram as apresentadas na Figura 2, com suas características mostradas no Quadro 1.

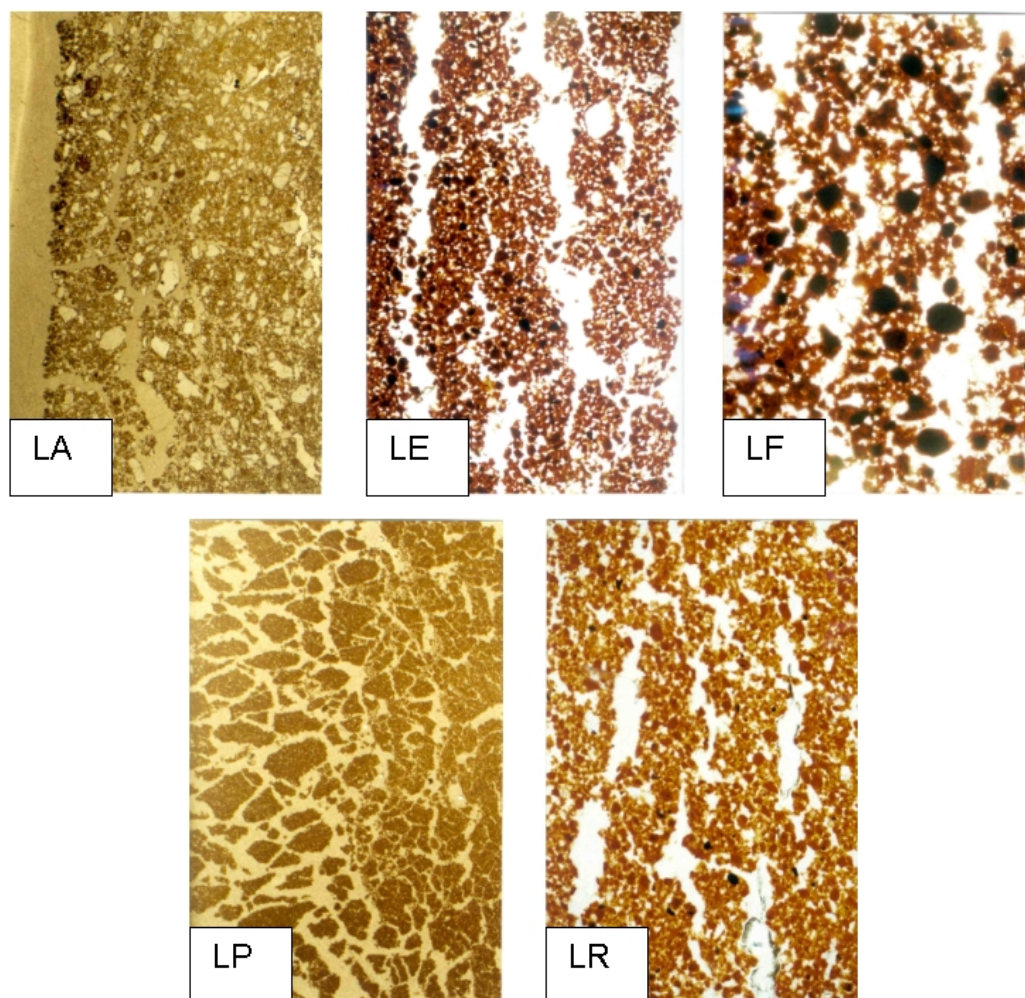


Figura 2 – Imagens originais usadas para os procedimentos de calibração.

Quadro 1 – Descrição das imagens utilizadas nas medições

Imagem	Tamanho (kb)	Formato (pixels) Largura x comprimento	Resolução (dpi)*	Cor (24 bits)
LA	6076	1158 x 1790	300	2 ²⁴
LE	6149	1173 x 1789	300	2 ²⁴
LF	6128	1166 x 1793	300	2 ²⁴
LP	6110	1162 x 1794	300	2 ²⁴
LR	5841	1166 x 1709	300	2 ²⁴

* DPI = *Dots per inch*, pontos por polegada.

Estas imagens foram originadas de fotografias em papel digitalizadas em *scanner* HP Scanjet 4C, em uma resolução de 300 dpi (pontos por polegada), equivalente a um pixel de 84,66 μm de lado.

2. Equipamentos

O processamento das imagens foi efetuado em um computador equipado com processador Pentium III® (Intel, Inc), 700 MHz, e disco rígido de 30 Gb de capacidade de armazenamento, ligado a um *scanner* HP Scanjet 4C.

3. Programa

O processamento das imagens foi efetuado em um programa especialmente desenvolvido para este fim pelo Prof. Elpídio I. Fernandes Filho, denominado *QUANTIPORO*, e escrito em linguagem Delphi® (Borland, Inc.). Este trabalho faz parte dos testes para aprovação deste programa, que se encontra ainda em fase de testes.

As análises estatísticas, como as curvas de regressão apresentadas, foram efetuadas no programa Statistica®, versão 5.0, da Statsoft, Inc.

4. Procedimentos de medição

4.1. Medições de área

As medidas de área consistem na contagem de pixels da imagem, após sua transformação em imagem preto e branco. As áreas em preto são atribuídas à parte sólida do solo, e as brancas, ao espaço poroso. A contagem é feita automaticamente pelo programa, por um comando na barra de ferramentas (*Resultados*), que fornece uma planilha com os resultados das áreas medidas em pixels e percentual. A área atribuída a cada pixel é função da resolução da imagem de entrada. Neste caso, as imagens têm resolução de 300 dpi, o que dá um valor de 7168,4 μm^2 (0,0071684 mm^2) por pixel.

4.2. Medições de perímetro

As medidas de perímetro são efetuadas de forma semelhante às de área, por contagem de pixels. Para isso, utiliza-se do artifício de individualizar os pixels da borda por um filtro específico, denominado detector de bordas. Estes pixels contados representam o contorno das áreas pretas, sendo então considerado como comprimento do objeto medido a medida do lado, da diagonal, ou uma média destas medidas do pixel multiplicada pelo total de pixels. No caso destas imagens, o valor do lado do pixel é de 0,085 mm.

5. Calibração dos filtros

5.1. Filtro de realce

O filtro de realce consiste em um conjunto de operações matemáticas entre a imagem original e as cópias modificadas, com o objetivo de produzir maior contraste, facilitando as operações posteriores de transformação em imagem binária. O filtro deve ser aplicado usando-se um ajuste (*offset*), buscando o melhor balanço de cores na imagem resultante. O procedimento de calibração consistiu em variar o nível de ajuste em um intervalo grande, de modo que sejam obtidos valores finais de área e perímetro, após os procedimentos de transformação para imagem binária, e com estes valores calcular a equação de regressão para a reta de ajuste. A partir desta equação, pode-se obter uma estimativa da variação esperada para o valor da área medida em função da escolha do valor deste ajuste dentro de uma faixa.

5.2. Filtro de limiar

O filtro de limiar consiste em uma operação lógica que segmenta a imagem em dois campos distintos, convertendo todos os valores de pixels da imagem para valores de preto ou branco (RUSS, 1995). Nessa

operação, o valor a ser atribuído a um pixel é determinado pela comparação do valor deste com um valor-limite, o limiar, fixado pelo usuário. Todos os valores acima serão convertidos em valores de branco, e todos os abaixo, em preto. A calibração deste filtro consistiu, como no caso anterior, na variação do limiar dentro de uma faixa e no cômputo da área e do perímetro resultantes. Com os valores, foram geradas equações de regressão e, a partir destas, a estimativa da variação nas medidas esperadas para aquela faixa.

5.3. Filtro de mediana

O filtro de mediana consiste em um filtro que opera substituindo os valores de cada pixel pelo valor da mediana dos pixels da vizinhança. Seu efeito principal consiste na redução de pixels isolados, grande parte destes ruído ou artefatos, que ocasionam distorções principalmente nas medidas de perímetro. Sua calibração consistiu na avaliação de seu efeito antes e após o filtro de limiar, comparado com a imagem medida sem sua aplicação.

6. Calibração da resolução

A resolução é o menor valor de comprimento ou área que se pode discriminar em uma imagem, sendo limitada pela capacidade óptica do equipamento e, no caso dos microscópios ópticos, pelo comprimento da luz utilizada. Embora a resolução das fotos empregadas fosse maior que a do *scanner*, um incremento nesta última não implica necessariamente maior informação, pois a qualidade final das imagens é limitada pela resolução dos instrumentos utilizados e por artefatos ocasionados pela impregnação. Esses artefatos aparecem nas imagens como um fundo difuso nas áreas de poros e dificultam a determinação exata dos limites dos objetos. As medidas de área e, principalmente, de perímetro são afetadas pela resolução utilizada. Isto ocorre pelo método de medição por contagem de pixels, que aumentam em número com o aumento da

resolução, de forma não-proporcional ao decréscimo em suas dimensões.

Para testar o efeito da resolução na medição de área e perímetro, uma figura-padrão foi digitalizada em diferentes resoluções, processada e medida segundo os procedimentos descritos nos itens sobre medições.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

As equações geradas e a estimativa da variação calculada para uma variação de 10 unidades de realce e limiar são mostradas a seguir.

1. Calibração de medição de área

1.1. Filtro de realce

Os valores de área estão expressos em porcentagem da área total, sendo o resultado das equações a área de sólidos no Quadro 2. A imagem LA foi realçada de 40 até 130, e as demais, de 0 a 90.

1.2. Filtro de limiar

Os valores de área estão expressos em porcentagem da área total, sendo o resultado das equações a área de sólidos no Quadro 3. As imagens foram preliminarmente realçadas, sendo a imagem LA com fator 100, e as demais, com fator 60.

Quadro 2 – Resultados de variação da área medida (Filtro de realce)

Imagem	Equação de Regressão	r	Variação da área medida (%) para uma variação de 10 unidades de realce
LA	$LA = 94,007 - 0,4505 \times \text{Ajuste}$	-0,9882	4,5
LE	$LE = 59,767 - 0,0996 \times \text{Ajuste}$	-0,9830	1,0
LF	$LF = 49,009 - 0,1071 \times \text{Ajuste}$	-0,9891	1,1
LP	$LP = 67,731 - 0,2027 \times \text{Ajuste}$	-0,9857	2,0
LR	$LR = 68,775 - 0,1569 \times \text{Ajuste}$	-0,9763	1,6

Quadro 3 – Resultados de variação da área medida (Filtro de limiar)

Imagem	Equação de Regressão	r	Variação da área medida (%) para uma variação de 10 unidades de limiar
LA	$LA = -7,377 + 0,45829 \times \text{Ajuste}$	0,99489	4,6
LE	$LE = 41,118 + 0,09871 \times \text{Ajuste}$	0,99972	1,0
LF	$LF = 27,776 + 0,11003 \times \text{Ajuste}$	0,99995	1,1
LP	$LP = 23,426 + 0,24014 \times \text{Ajuste}$	0,99671	2,4
LR	$LR = 38,707 + 0,16677 \times \text{Ajuste}$	0,99717	1,7

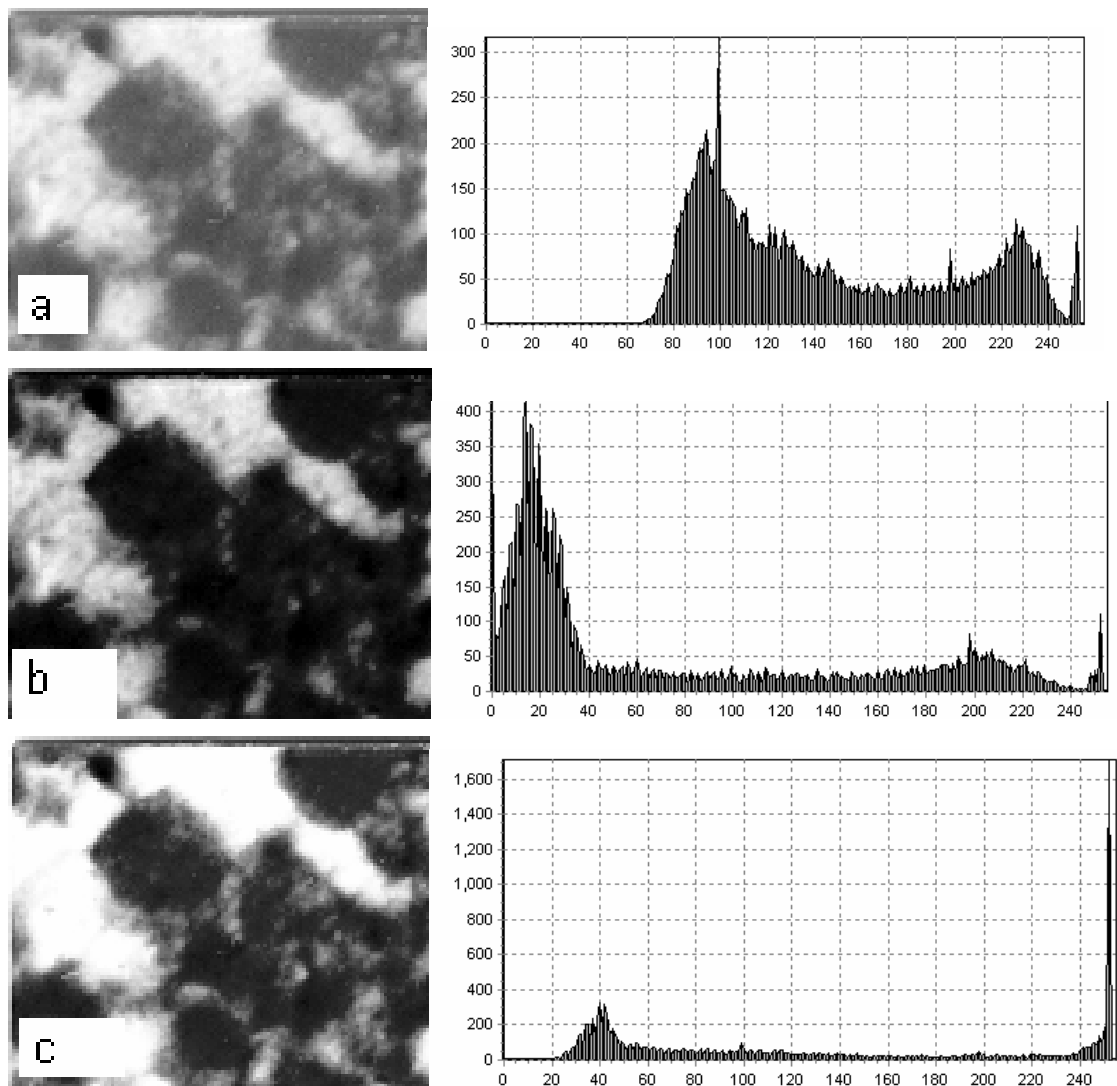


Figura 3 – Fragmento da imagem LE em tons de cinza e seu histograma (a) e efeito da aplicação do filtro de realce com ajuste 0 (b) e 90 (c). O gráfico traz na abscissa o valor do pixel e, na ordenada, sua frequência.



Figura 4 – Efeito da aplicação do filtro de limiar no fragmento da imagem LE da Figura 3, nos níveis de limiar 100 (a), 140 (b) e 200 (c).

1.3. Resultados de erros acumulados dos filtros de realce e limiar para valores de área

Considerando-se um erro de ajuste de 10 unidades para mais ou para menos nos dois ajustes, os valores de erros acumulados máximos (erro de realce x erro de limiar) são os apresentados no Quadro 4.

Os resultados apresentados permitem afirmar que as variações nas medições feitas encontram-se dentro de limites aceitáveis, já que se espera que o usuário não cometa um erro maior que 10 unidades para os ajustes. A medida de área é menos sensível a erros derivados dos ajustes dependentes do usuário, porém fica evidente a dependência do sistema quanto a imagens de boa qualidade. A existência de artefatos (objetos não existentes na imagem original introduzidos pelos procedimentos de preparo e obtenção das amostras e das imagens) e o elevado nível de ruído de fundo dificultam o processamento e tornam necessários pré-tratamentos das imagens. Processamentos adicionais podem ocasionar novas distorções, além de maior complexidade nas operações e a necessidade da disposição de programas adequados para esta tarefa, o que é indesejável do ponto de vista da necessidade de redução de custos e erros de processamento.

Quadro 4 – Imagem e seu erro acumulado correspondente, em %

Imagem				
%				
LA	LE	LF	LP	LR
9,3	2,0	2,2	4,5	3,3

2. Calibração de medição de perímetro

2.1. Filtro de realce

Os valores são expressos em pixels; para o filtro de limiar foram usados os mesmos valores empregados na calibração do filtro de mediana (Quadro 7). Os resultados encontram-se no Quadro 5.

Quadro 5 – Resultados de variação de perímetro medido (Filtro de realce)

Imagem	Equação de Regressão (em Pixel)	r	Variação de perímetro medido (%) para uma variação de 10 unidades de realce
LA	$LA = 4,355 \times 10^5 - 1345 \times \text{Realce}$	-0,9742	3,7
LE	$LE = 1,569 \times 10^5 + 276,7 \times \text{Realce}$	0,95769	1,6
LF	$LF = 1,948 \times 10^5 + 30,5 \times \text{Realce}$	0,92054	0,2
LP	$LP = 1,169 \times 10^5 + 1407,6 \times \text{Realce}$	0,99203	7,5
LR	$LR = 1,227 \times 10^5 + 774,9 \times \text{Realce}$	0,96785	4,8

2.2. Filtro de limiar

Os valores são expressos em pixels, e os valores usados para o filtro de realce foram os mesmos da calibração do filtro de mediana (Quadro 7). Os resultados estão no Quadro 6.

Quadro 6 – Resultados de variação de perímetro medido (Filtro de limiar)

Imagem	Equação de Regressão (em Pixel)	r	Variação de perímetro medido (%) para uma variação de 10 unidades de limiar
LA	$LA = 6,582 \times 10^5 - 2039 \times \text{Limiar}$	-0,8353	5,8
LE	$LE = 2,054 \times 10^5 - 228,1 \times \text{Limiar}$	-0,9977	1,3
LF	$LF = 2,055 \times 10^5 - 68,99 \times \text{Limiar}$	-0,9686	0,4
LP	$LP = 3,541 \times 10^5 - 1167,0 \times \text{Limiar}$	-0,9999	6,5
LR	$LR = 2,743 \times 10^5 - 819,9 \times \text{Limiar}$	-0,9984	5,4

Quadro 7 – Tratamento da imagem anterior à medição

Tratamento	Imagem				
	LA	LE	LF	LP	LR
Valor do ajuste do filtro no programa					
Filtro de realce	110	60	60	60	60
Filtro de limiar	110	140	110	130	130

Os valores de variação indicam a maior sensibilidade dessa medida aos ajustes, fazendo-se necessário um ajuste mais criterioso para evitar distorções acentuadas nos resultados. Aqui, a dependência de bom contraste na imagem inicial parece ser mais crítica. O uso de filtros para pixels isolados pode ser aventado como alternativa, mas, como se verá a seguir para o filtro de mediana, não é necessariamente melhor que o uso da imagem bruta.

3. Calibração de medição de perímetro para o filtro de mediana

As imagens foram tratadas com filtro de realce, binarizadas com filtro de limiar e convertidas com o filtro detector de bordas, conforme o Quadro 7. A medida de comprimento foi efetuada com base na contagem direta de pixels, em três situações:

- Sem tratamento da imagem (apenas os filtros de realce e limiar).
- Com aplicação do filtro de mediana antes do filtro de limiar.
- Com aplicação do filtro de mediana após o filtro de limiar.

Os resultados da medição encontram-se no Quadro 8.

As diferenças percentuais resultantes da aplicação dos tratamentos são apresentadas no Quadro 9.

Quadro 8 – Resultados de medição de comprimento

Tratamento	Imagem				
	LA	LE	LF	LP	LR
Comprimento em número de pixels					
Apenas filtro limiar	320.319	258.642	294.639	191.221	206.873
Filtro de mediana antes do filtro limiar	197.783	142.171	181.419	129.979	133.798
Filtro de mediana após filtro limiar	197.825	142.638	181.316	129.983	134.271

Quadro 9 – Diferenças nos valores de perímetro obtidos após aplicação dos tratamentos às imagens

Comparação	Imagem				
	LA	LE	LF	LP	LR
Diferenças entre os tratamentos %					
Entre imagem não-tratada e aplicação de filtro de mediana antes do filtro limiar	38,2	45,0	38,4	32,0	35,3
Entre imagem não-tratada e aplicação de filtro de mediana após o filtro limiar	38,2	44,9	38,4	32,0	35,1
Entre aplicação de filtro de mediana antes e após o filtro limiar	0,02	0,3	0,05	0,003	0,4

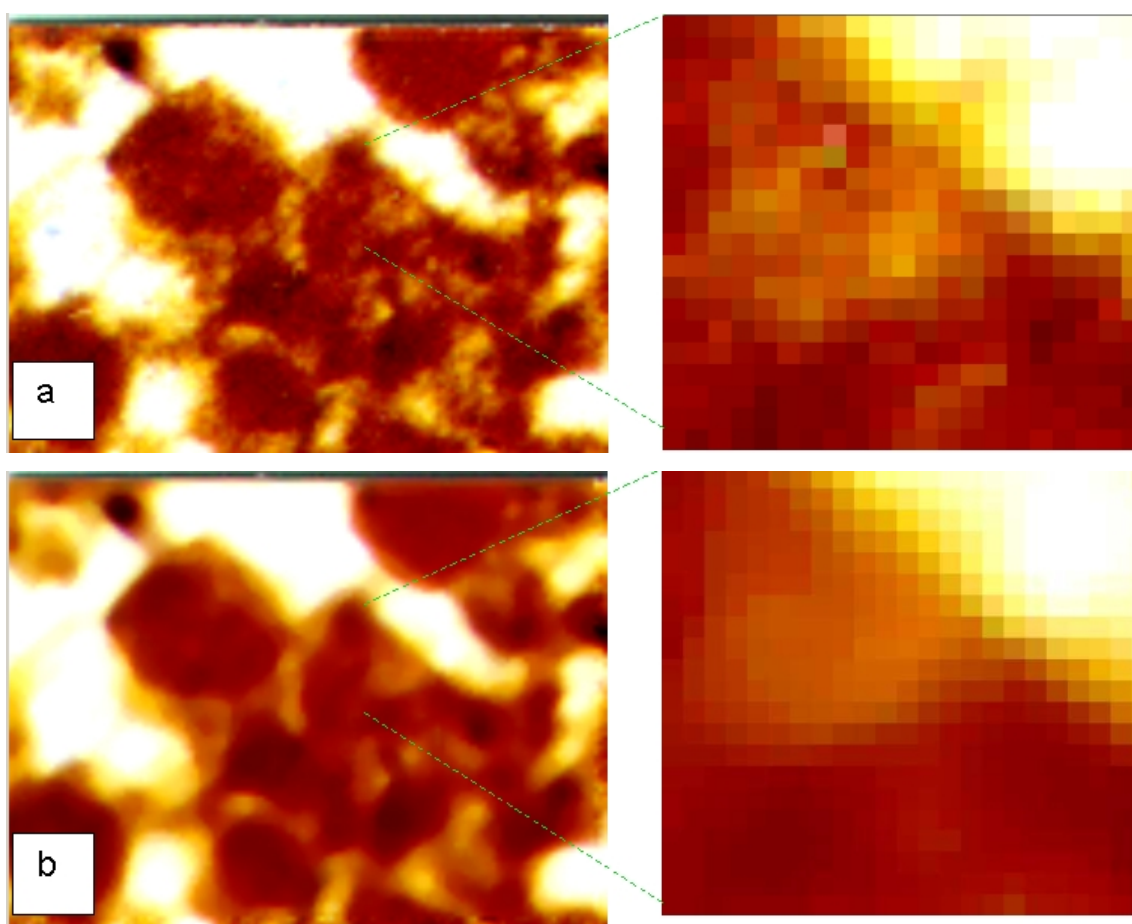


Figura 5 – Resultado da aplicação do filtro de mediana sob fragmento da imagem LR e detalhes correspondentes. Em (a) está a imagem sem a aplicação do filtro e em (b) a mesma após a aplicação do filtro.

Os resultados da aplicação do filtro de mediana indicam sua grande influência no resultado final, quando comparado com o tratamento sem o filtro. Não há diferença expressiva entre a aplicação antes e após o filtro de limiar (Quadro 9). A aplicação deste filtro sob essa perspectiva passa a depender da decisão do usuário quanto à necessidade de eliminação de ruído de fundo ou de qual dos resultados permite melhor ajuste ao modelo teórico em estudo e se correlaciona melhor com outras medidas.

4. Calibração de medição de área e perímetro para a figura-padrão

Foram desenhadas duas figuras em forma de círculo, com diâmetros de 28 e 25 mm, denominadas figuras-teste TC₁ e TC₂, impressas em papel e digitalizadas com o auxílio do *scanner* Scanjet 4C. Foram utilizadas as resoluções de 75, 150, 300 e 600 dpi. As figuras foram então processadas e medidas, conforme os procedimentos já descritos.

No Quadro 10 e nos gráficos das Figuras 7, 8, 9 e 10 são mostrados também os resultados do cálculo da área ($A = (D^2/4) \times \pi$) e do perímetro ($P = d \times \pi$) teóricos da figura, com base nas medidas de diâmetro das figuras feitas pelo programa.

A análise dos dados do Quadro 8 e das Figuras 7, 8, 9 e 10 permite verificar que a digitalização em resoluções diferentes não afetou de modo expressivo as áreas medidas. Esse fato está de acordo com as expectativas, já que esse aumento se reflete apenas nos pixels da periferia, numericamente pouco significantes no cômputo geral.

Quadro 10 – Áreas e perímetros medidos das figuras-teste TC₁ e TC₂, digitalizados em diferentes resoluções

Figuras-teste	Resolução DPI	Característica					
		Área medida		Área teórica mm ²	Perímetro medido		Perímetro teórico Mm
		Pixels	mm ²		Pixels	mm	
TC ₁	75	5255	602,72	611,22	324	132,45	87,64
	150	20953	600,80		679	138,76	
	300	83617	599,40		1773	181,2	
	600	337870	605,50		5630	287,7	
TC ₂	75	4248	487,22	497,40	294	120,19	79,06
	150	16917	485,07		599	122,43	
	300	68037	487,71		1558	159,23	
	600	274935	492,71		4774	243,96	

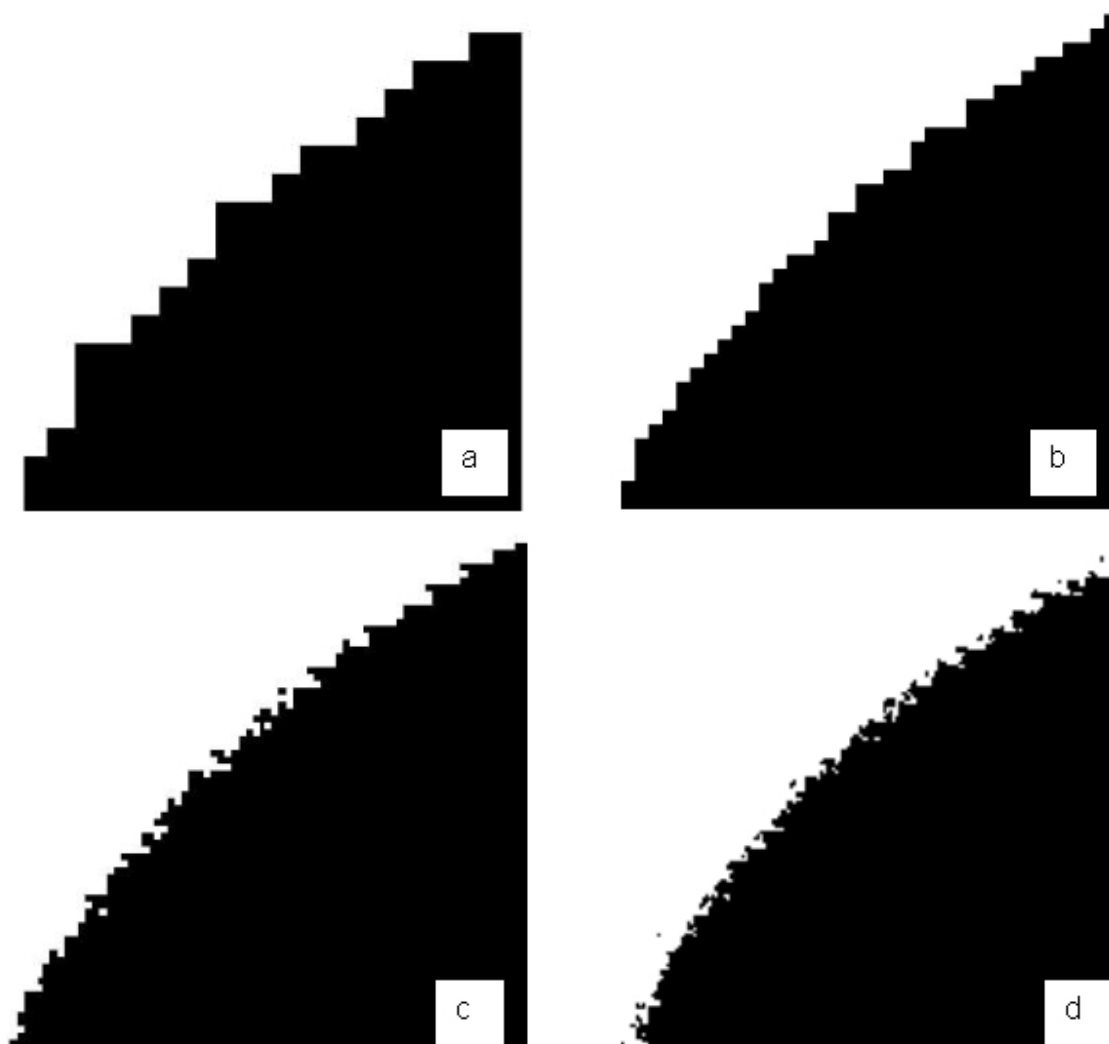


Figura 6 – Efeito da resolução (tamanho de pixel) sobre a borda da figura-teste TC₁: (a) 75 dpi, (b) 150 dpi, (c) 300 dpi, (d) 600 dpi.

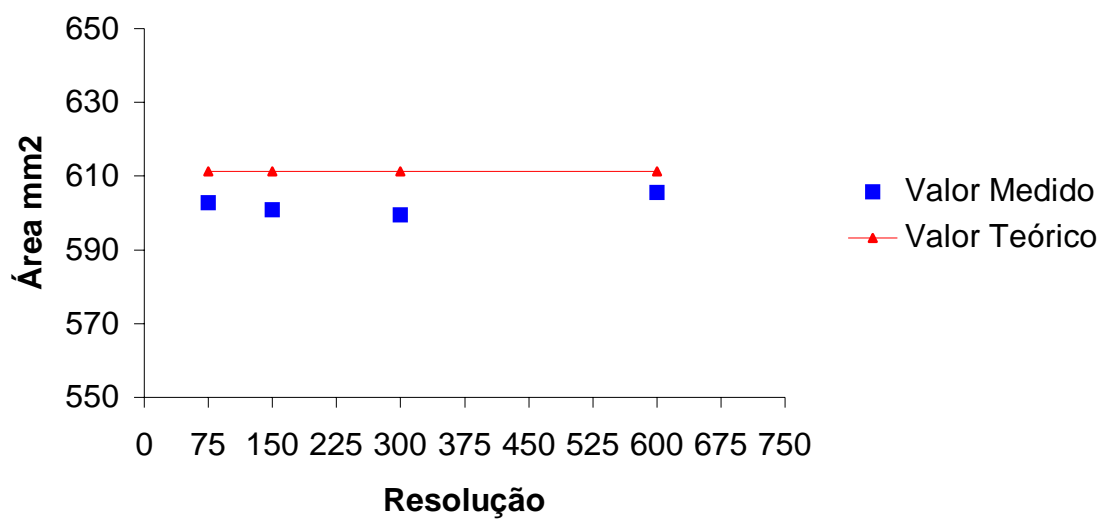


Figura 7 – Gráfico de área para a figura-teste TC₁.

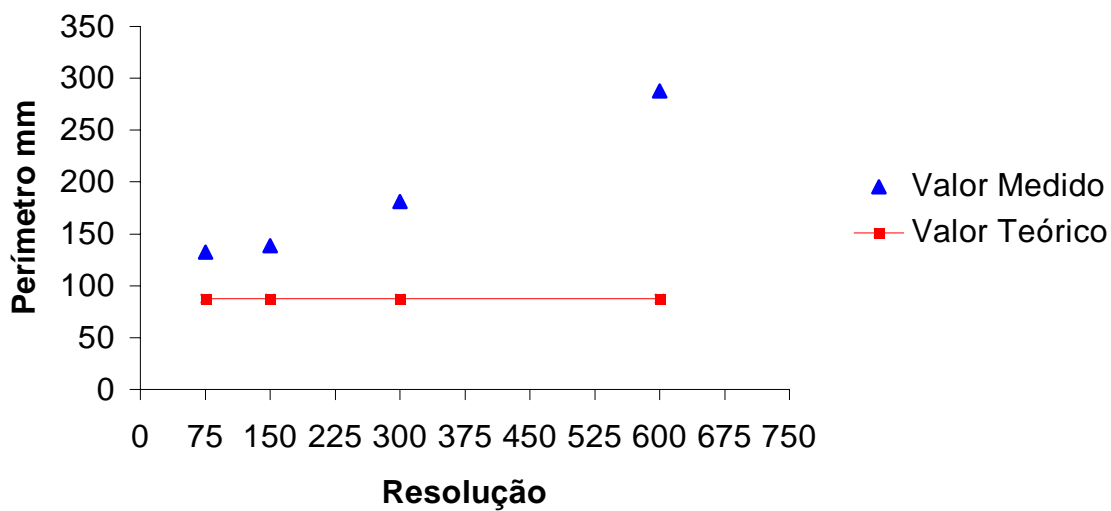


Figura 8 – Gráfico de perímetro para a figura-teste TC₁.

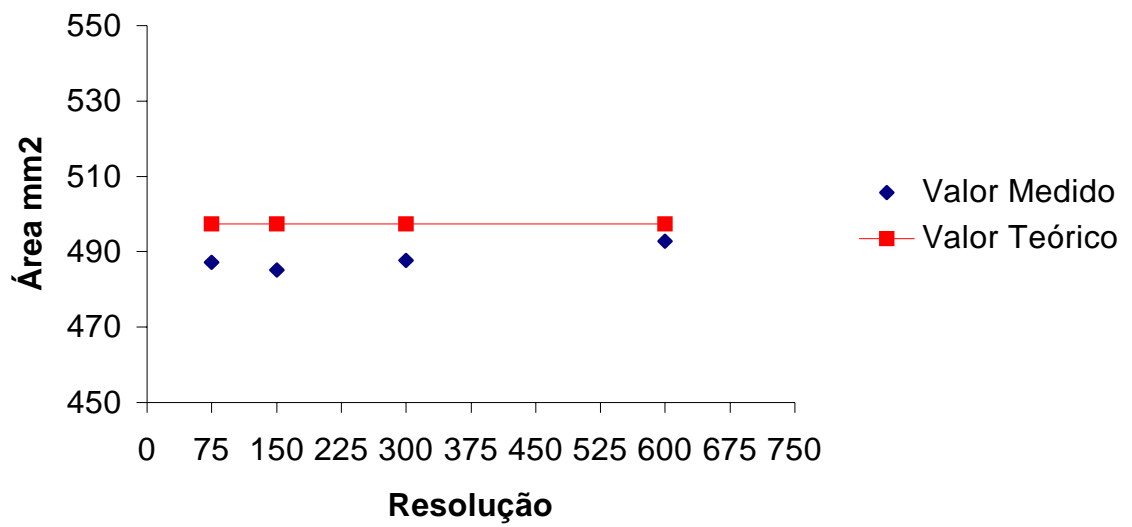


Figura 9 – Gráfico de área para a figura-teste TC₂.

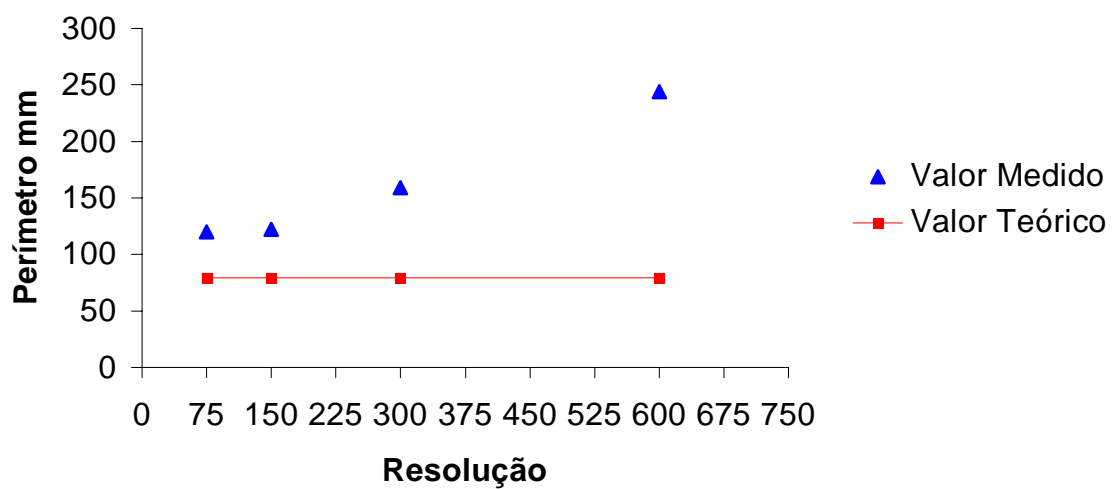


Figura 10 – Gráfico de perímetro para a figura-teste TC₂.

A medida do perímetro, por sua vez, foi muito afetada pelo aumento da resolução, sofrendo incremento exponencial com o aumento da resolução. Isso se reflete na maior sensibilidade às imperfeições da borda realçadas após o filtro de limiar (Figura 6). Como a medida é feita contando-se os pixels da periferia apenas, mesmo pequenos aumentos podem ser significativos na soma geral. Os problemas de definição da periferia dos agregados contra a matriz de resina do fundo ficam mais evidentes aqui. O desvio fica mais evidente quando se compara o valor medido com o cálculo teórico feito a partir do diâmetro medido.

A aplicação do filtro de mediana pode reduzir a medida do perímetro ao suavizar a borda, reduzindo o erro em relação à medida teórica, pelo menos neste caso. Medidas precisas da borda são limitadas pela resolução da foto original e devem ser tomadas com ressalvas, até que se possa correlacioná-las com medidas de superfície mais confiáveis.

CONCLUSÕES

A análise dos dados provenientes dos ensaios de calibração permite concluir que o programa apresenta desempenho adequado quanto aos desvios esperados naqueles ajustes que dependem de interferência do usuário.

O ponto crítico é a disponibilidade de imagens de boa qualidade, sem artefatos ou ruído de fundo em excesso. A implementação de novos filtros e procedimentos de ajuste, como filtros para segmentação por textura (RUSS, 1995), se torna necessária para facilitar a manipulação de imagens com pouco contraste ou problemas de iluminação. Os resultados atuais, no entanto, são animadores quanto ao uso de procedimentos semi-automáticos como ferramenta-padrão para quantificação de imagens.

Há necessidade também do desenvolvimento de ferramentas estatísticas adequadas para tratamento e interpretação dos dados gerados, levando-se em conta a espacialização das variáveis no modelo. O uso de geoestatística pode ser uma alternativa para quantificar a variabilidade espacial. A adequação de seu uso vai depender dos objetivos e das necessidades do modelo experimental em estudo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BARROS, E.; CURMI, P.; HALLAIRE, V.; CHAUVEL, A. & LAVELLE, P. Role of macrofauna in the transformation and reversibility of soil structure of an Oxisol during forest to pasture conversion. *Geoderma*, ??aceito para publicação??. 2000. p.??
- CONWAY, J. & JENKINS, D. A simple procedure for the quantification of void shapes in soil thin sections. In: *Soil Micromorphology. BULLOCK, P. & MURPHY, C.P., eds. Techniques and Applications. A.B. Academic Publishers, Berkhamsted, 1983. p.??*
- DELEPORTE, S.; HALLAIRE, V. & TILLIER, P. Application of image analysis to a quantitative micromorphological study of forest humus. *Eur. J. Soil Biol.*; 33:83-88, 1997.
- FARIA, L.C.; SCHAEFER, C.E.G.R.; RUIZ, H.A. & COSTA, L.M. Effects of weed control on physical and micromorphological properties of a Brazilian Ultisol. *R. Bras. Ci. Solo*, 22:731-741, 1998.
- KUBIËNA, W. *Micropedology*. Collegiate Press, Ames., 1938. 243p.
- MaCKIE-DAWSON, J.; DARBYSHIRE, J.F. & WIMADASA, G.D. Video-enhanced photography of lateral roots of perennial ryegrass, *Lolium perenne* L., with and without potassium fertilizer amendments. *Eur. J. Soil Biol.*, 31:81-86, 1995.

- MORAN, C.J. Image processing and soil micromorphology. In: RINGROSE-VOASE, A.J. & HUMPHREYS G.S., eds. Soil Micromorphology: Studies in Management and Genesis. Proc. IX Int. Working Meeting on Soil Micromorphology, Townsville, Australia, Elsevier, 1992. p.459-482. (Developments in Soil Science, 22)
- RUSS, J.C. The image processing handbook. 2.ed. Boca Raton, CRC Press. 674p. 1995.
- SCHAEFER, C.E.G.R.; SOUZA, C.M.; VALLEJOS M.; F.J.; VIANA, J.H.M.; GALVÃO, J.C.C. & RIBEIRO, L.M. Características da Porosidade de um Argissolo Vermelho Amarelo submetido a diferentes sistemas de preparo de solo. R. Bras. Ci. Solo, 25:775-779, 2001.
- STATSOFT, INC. STATISTICA for Windows [Computer Program Manual]. StataSoft, Inc., Tulsa. 1997.
- TOVEY, N.K.; SMART, P.; HOUNSLOW, M.W. & LENG, X.L. Automatic orientation mapping of some types of soil fabric. In: MERMUT, A.R. & NORTON, L.D., eds. Digitalization, processing and quantitative interpretation of image analysis in soil science and related areas. Geoderma, 53:179-200, 1992.

CAPÍTULO 2

REORGANIZAÇÃO DA ESTRUTURA MICROGRANULAR DE LATOSSOLOS: EFEITOS DE CICLOS DE UMEDECIMENTO E SECAGEM

RESUMO

Um experimento foi conduzido em casa de vegetação, com o objetivo de examinar as modificações provocadas por ciclos de umedecimento e secagem em amostras de Latossolos de diferentes mineralogias, em agregados integrais ou quando submetidos à moagem. Amostras de terra fina seca ao ar foram passadas em peneira de 1,0 mm e subdivididas em grupos: solo integral não-moído e solo moído em almofariz e passado em peneira de 0,105 mm. O solo moído foi ainda subdividido em solo moído puro ou adicionado de ácido húmico purificado misturado. Os materiais foram então montados em colunas constituídas por cilindros de alumínio e submetidos a dez ciclos sucessivos de umedecimento, realizados por ascensão capilar, seguidos por secagem ao ar, com intervalo de sete dias entre cada umedecimento. Após o término dos ciclos, os solos foram impregnados com resina de poliéster, montando-se lâminas finas para microscopia. As

lâminas foram levadas para observação em microscópio óptico e fotografadas, e as fotos, digitalizadas. As imagens digitais foram então analisadas e quantificadas com o uso do programa QUANTIPORO, desenvolvido no DPS/UFV. Os resultados mostraram modificações substanciais na forma e no padrão da estrutura após a aplicação dos ciclos nos tratamentos que sofreram moagem. Essas mudanças foram atribuídas a uma reacomodação dos agregados com a retração da massa latossólica, que se seguiu ao processo de secagem. As mudanças ocorreram em todos os materiais estudados, levando a uma estrutura diferente daquela esperada para esses solos. Não houve tendência à reversão nas mudanças ocorridas após os dez ciclos.

Termos de indexação: agregados, ciclos de umedecimento e secagem, estrutura do solo.

SUMMARY

A greenhouse experiment was conducted to examine the structural modifications due to wetting-drying cycles in samples in Latosols (Oxisols) with different mineralogical properties submitted to dry grinding, compared with bulk samples. Air-dried soil samples were sieved in a 1,00 mm sieve and separated into two groups. One was kept as the control group and the other was ground in a mortar and sieved in a 0,105 mm sieve. This second was also split into two groups, one of which added with powdered humic acid. The groups were placed in aluminum container columns, applying 10 cycles of wetting by capillarity followed by air-drying. In the end of the cycles, the samples were impregnated with resin, cut in blocks and thin-sectioned for microscopy. Thin sections were observed in optical microscope, photographed and the photos were digitalized. The resulting images were analyzed and quantified with the *QUANTIPORO* Software. Important changes were observed on ground samples on both shape and structural pattern with

wetting and drying cycles. These changes were attributed to re-organization of soil aggregates during the shrinkage of the aggregate mass following the drying process. The changes were observed in all materials with different patterns from the original soil. No trend for reversion to the original structure was observed after the cycles.

Index terms: aggregation, wetting-drying cycles, soil structure.

INTRODUÇÃO

A estrutura e a textura são as propriedades físicas consideradas mais importantes no crescimento das plantas. A natureza dinâmica da primeira, no entanto, torna o conhecimento dos fatores e mecanismos de sua variação no tempo e espaço essencial para a modelagem e predição do comportamento do solo sob uso.

A formação da estrutura, ou do arranjo espacial das partículas do solo, dá origem a padrões de distribuição dos constituintes do solo, gerando espaços ocupados pela matéria sólida separados por espaços vazios, os poros. A existência de descontinuidades na fase sólida tem importantes conseqüências para o comportamento físico do solo, como a percolação e difusão de fluidos, a resistência mecânica, a ruptura e a penetração de raízes.

O conhecimento desses mecanismos de formação e estabilidade da estrutura ainda é incipiente, principalmente no que se refere a solos tropicais. Faz-se necessário construir e testar modelos de formação e manutenção da estrutura, aliados aos trabalhos já tradicionais sobre estabilidade de agregados sob diversas condições de uso e manejo.

Este trabalho traz uma contribuição ao estudo experimental das alterações decorrentes da aplicação de ciclos de umedecimento e secagem e redução do tamanho dos agregados por moagem a seco na estrutura de Latossolos. Visa também gerar informações para subsidiar as discussões sobre a gênese da estrutura dos Latossolos.

REVISÃO DE LITERATURA

As conseqüências da aplicação de ciclos de umedecimento e secagem em solos têm sido objeto de estudo de alguns trabalhos e teses. No entanto, pouco se fez em termos de modelos descritivos e preditivos para a interação destes ciclos com os processos de formação de estrutura do solo.

OLIVEIRA (1992) e OLIVEIRA (1994) avaliaram a estabilidade de agregados submetidos a estes ciclos, relatando a fragmentação dos agregados expostos a ciclos de umedecimento e secagem, com modificações em suas propriedades, atribuídas à exposição de matéria orgânica e cátions de seu interior. JANTSCH (1997) concluiu, em experimento de laboratório com condições controladas, que as condições para surgimento de camadas adensadas estão relacionadas à mineralogia e aos ciclos de umedecimento e secagem, em condições de temperaturas elevadas, associadas à umidade baixa, que favorecem o fracionamento dos agregados. O trabalho de SANTOS (2000) relatou a formação de crostas estruturais e fendilhamento, associados à migração de colóides e hidratação diferencial, em experimento com variação dos tempos de secagem entre ciclos de umedecimento. ALUKO e KOOLEN (2000) estudaram um modelo para a ação das forças capilares na formação de pontes interagregados no qual a força de coesão entre agregados é atribuída ao filme de umidade entre estes, sendo variável em função desta.

Mudanças microestruturais foram descritas por TESSIER et al. (1990), em trabalho comparativo entre diversas velocidades de hidratação de argilas de mineralogia 1:1 e 2:1, em que a exposição de material caulínico a uma rápida hidratação provocou o surgimento de agregados de partículas de tamanho entre 0,5 e 10 μm , enquanto o umedecimento lento provocou arranjo grosseiro face a face, sem descontinuidades além das originadas de rearranjo. Uma hidratação intermediária provocou o surgimento de fraturas, criando agregados de partículas de 5 μm de diâmetro.

O uso de técnicas de análise de imagens para estudos quantitativos e qualitativos de estrutura de solo tem se tornado mais comum na literatura, com o advento de equipamentos e programas mais acessíveis (MACBRATNEY et al., 1992; HALLETT et al., 1995; HORN et al., 1995; DELEPORTE et al., 1997; BARROS et al., 2000). Estas técnicas, associadas à micromorfologia, permitem o estudo quantitativo de modificações estruturais em amostras indeformadas, após seu preparo e sua montagem em lâminas (MORAN, 1992).

Algumas limitações da análise de imagens são decorrentes da necessidade de se trabalhar com imagens bidimensionais para se inferir mudanças em corpos tridimensionais, além dos problemas inerentes à digitalização e ao processamento das imagens, o que leva à necessidade de cuidados na análise dos resultados e de estudos para sua validação (THOMPSON et al., 1992). Estes estudos devem caminhar em conjunto com o desenvolvimento de ferramentas matemáticas para reconstrução dos objetos tridimensionais a partir das imagens, como a Estereologia e a Morfologia Matemática (HORGAN, 1998), e de ferramentas estatísticas adequadas para análise de variáveis regionalizadas, como a Geoestatística (VIEIRA, 2000). Os problemas de representatividade e amostragem também carecem de estudos para validação e extrapolação dos resultados.

Como hipótese de trabalho, considera-se que ciclos de umedecimento e secagem controlados provocam reestruturação diferenciada entre agregados integrais de Latossolos e agregados destruídos por moagem a seco.

MATERIAL E MÉTODOS

1. Solos

Utilizaram-se amostras de cinco Latossolos, obtidas no Banco de Solos do Departamento de Solos da Universidade Federal de Viçosa, previamente caracterizadas (Quadros 1 a 4).

Quadro 1 – Classificação, localização e material de origem dos solos

Solo	Classificação anterior	Local de coleta	Localização	Material de origem
LA	Latossolo Amarelo	Linhares - ES	S 19 ^o 07' W 40 ^o 05'	Sedimentos do Grupo Barreiras
LP	Latossolo Pálido	São Gotardo - MG	S 19 ^o 21' 17" W 46 ^o 07' 04"	Sedimento de cobertura detrítica laterítica
LE	Latossolo Vermelho-Escuro	Barroso - MG	S 21 ^o 10' 16" W 43 ^o 59' 59"	Calcário
LR	Latossolo Roxo	Capinópolis - MG	S 18 ^o 43' 41" W 49 ^o 33' 20"	Basalto
LF	Latossolo Ferrífero	Belo Horizonte - MC	S 20 ^o 07' 40" W 43 ^o 57' 53"	Itabirito

Fonte: adaptado de FERNANDES (2000).

Quadro 2 – Características físicas dos solos estudados

Solo	Areia	Silte	Argila	Relação silte/argila	Densidade	
					Solo	Partícula
	g/kg				g/cm ³	
LA	660	0	340	0	1,51	2,63
LP	50	90	860	0,10	1,11	2,46
LE	390	300	310	0,97	nd	2,56
LR	400	130	470	0,28	1,04	2,81
LF	780	140	80	1,75	1,59	4,08

Fonte: adaptado de FERNANDES (2000).

Quadro 3 – Características químicas dos solos estudados

Solo	pH		C.O.	P	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Al ³⁺	H + Al	SB	CTC		V	M
	H ₂ O	KCl									t	T		
	g/kg		mg/dm ³	cmol _c /dm ³						%				
LA	4,6	4,0	4,8	0,9	0,1	0,2	0,1	1,0	3,0	0,4	1,4	3,4	12	72
LP	5,2	5,0	10,8	0,3	0,0	0,2	0,0	0,0	3,0	0,2	0,2	3,2	5	0
LE	6,2	6,0	26,4	3,4	0,0	11,4	3,3	0,0	0,3	14,7	14,7	15,0	98	0
LR	5,0	4,3	4,0	0,6	0,0	0,2	0,1	0,5	3,3	0,3	0,8	3,6	9	60
LF	4,5	4,5	19,6	1,7	0,0	0,5	0,0	0,1	6,6	0,5	0,6	7,1	7	16

Fonte: adaptado de FERNANDES (2000).

Quadro 4 – Quantificação mineralógica da fração argila efetuada pelo software ALOCA

Solo	Gibbsita	Caulinita	Goetita	Hematita
	g/kg			
LA	67	123	36	0
LP	426	99	37	0
LE	284	73	51	51
LR	161	183	53	80
LF	20	19	157	235

Fonte: adaptado de FERNANDES (2000).

2. Preparo das amostras

A unidade experimental foi constituída por um cilindro de alumínio, com dimensões de 6,5 por 7,0 cm, perfurado no fundo e forrado com papel-filtro, que continha o solo até uma altura de aproximadamente 2 cm. As unidades experimentais foram colocadas sobre bases de placas de Petri, e o conjunto, montado sobre bancada localizada em casa de vegetação.

Após o preparo, foram iniciados os ciclos de umedecimento e secagem, realizados entre fevereiro e abril de 2000. Os ciclos se iniciavam com a adição de água deionizada na base das placas de Petri. A água era colocada em quantidade suficiente para que ocorresse saturação da amostra por capilaridade. Após a ascensão do líquido até a superfície, o excesso de água na base das placas era descartado. O material era então deixado para secar ao ar por sete dias, quando um novo ciclo era iniciado, com a repetição do umedecimento.

Ao final dos dez ciclos, o material foi levado para a estufa a 45°C por uma semana e impregnado com resina de poliéster, segundo o método descrito por CASTRO (1985) e MURPHY (1986). As amostras impregnadas foram deixadas para endurecimento e cura da resina por 60 dias. Após a cura, foi efetuado o corte das amostras em serra de disco diamantado e procedeu-se à montagem das amostras em lâminas delgadas. As amostras foram preparadas a partir dos cortes efetuados verticalmente no setor mediano dos blocos. As lâminas mostram um corte ao longo do eixo vertical dos blocos.

Foram retiradas amostras (fragmentos superficiais da crosta com cerca de 2 mm²) para observação de feições de interesse em microscópio eletrônico de varredura. Os tratamentos aplicados a cada solo estão no Quadro 5.

Quadro 5 – Tratamentos experimentais aplicados em cada um dos solos utilizados no ensaio

Identificação	Moagem	Aplicação de ciclos	Adição de ácido húmico
M ₀ A ₀	-	-	-
M ₀ A ₁	-	x	-
M ₀ A ₁ + AH	-	x	x
M ₁ A ₀	x	-	-
M ₁ A ₁	x	x	-
M ₁ A ₁ + AH	x	x	x

3. Obtenção e processamento das imagens

As lâminas delgadas foram fotografadas em microscópio óptico Olympus AX-70, sob luz plana e polarizada, magnificadas 40x e 100x , e em lupa Olympus SZH com 7,5x de magnificação sob luz plana. As fotografias, obtidas com filme Kodak Gold 100 ASA, foram então reveladas e digitalizadas através de um *scanner* HP Scanjet 4C, para um formato matricial (Windows BITMAP).

As imagens digitais foram processadas com a utilização do programa *QUANTIPORO*, desenvolvido no DPS/UFV, a partir do qual foram obtidas porosidade total, distribuição, orientação e forma de poros.

4. Análise dos dados

Foi efetuada uma descrição das feições morfológicas observadas nas imagens antes e após os ciclos. A partir dessa análise, feita com as imagens em diferentes magnificações e o auxílio dos dados obtidos por meio do programa *QUANTIPORO*, procedeu-se a uma interpretação qualitativa dos resultados e foi feita uma proposta para explicar as modificações observadas.

Não foram efetuadas comparações estatísticas entre os tratamentos com e sem moagem dos agregados, pois o peneiramento removeu a fração areia grossa e média ($> 0,105$ mm), resultando em um fator de variação adicional. As comparações se fizeram em termos qualitativos, levando-se em conta que o teor de areia nestes solos é baixo e a sua atividade, em termos físicos, é muito inferior à das frações mais finas.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

1. Descrições morfológicas das amostras

As características micromorfológicas das amostras utilizadas estão descritas no Quadro 6.

Quadro 6 – Síntese das principais características microestruturais dos solos estudados

Solo	Microestrutura	Grau de arredondamento
LA	Grãos compactos coesa, formada, microgregados	Fraca e fortemente soldada e arestada
LP	Microgranular e grãos interligados	Forte com tendência a framboidal (contornos irregulares, discreta bicromia)
LV	grãos interligados e microgranular forte	Moderado, com tendência a formas poligonais, facetadas
LE	Parte microgranular forte e grãos interligados	Forte nos agregados > 200 μm
LF	Micronódulos grandes microgranular forte	Muito forte, com superfície concrecionada e lisa

As amostras não-móidas apresentam a estrutura microgranular característica dos Latossolos, mais evidentes nos materiais gibbsíticos (LE, LR e LP). No LF, os agregados se apresentam sob a forma de micronódulos, muito resistentes à moagem e com concreções de ferro (Figura 6d). O LA apresenta estrutura coesa, com menor expressão de arredondamento e agregados arestados e soldados, condizente com sua mineralogia caulínica.

2. Principais alterações observadas

2.1. Mudanças na porosidade total

As variações na porosidade podem ser observadas nas Figuras 1 a 5 e nos Quadros 7 a 14. Em todos os tratamentos sem desagregação não houve variação expressiva da porosidade total ou da porosidade por camadas entre as testemunhas mantidas secas e os tratamentos que sofreram os dez ciclos de umedecimento e secagem (imagens nas Figuras 1 a 5 e gráficos da porosidade nas Figuras 10 a 14).

Já nos tratamentos em que os agregados foram destruídos, ocorreu significativa mudança na quantidade de poros e na distribuição destes após os ciclos. A mudança do padrão observado entre os tratamentos pode ser atribuída a um mecanismo de acomodação e rearranjo das partículas após os ciclos. Os agregados, nestes tratamentos, se apresentaram como unidades maiores (blocos angulares ou prismas, como no LR e LP, ou placas e lâminas acunhadas, em LA, LF e LR), com macroporosidade entre estas unidades e uma microporosidade interna discernível, apesar de não quantificável pela resolução utilizada.

A redução do tamanho dos agregados levou a uma acomodação inicial destes, resultando em baixa macroporosidade. Esta acomodação pode ser evidenciada nas fotomicrografias, que mostram a estrutura interna dos agregados (Figuras 6 e 7).

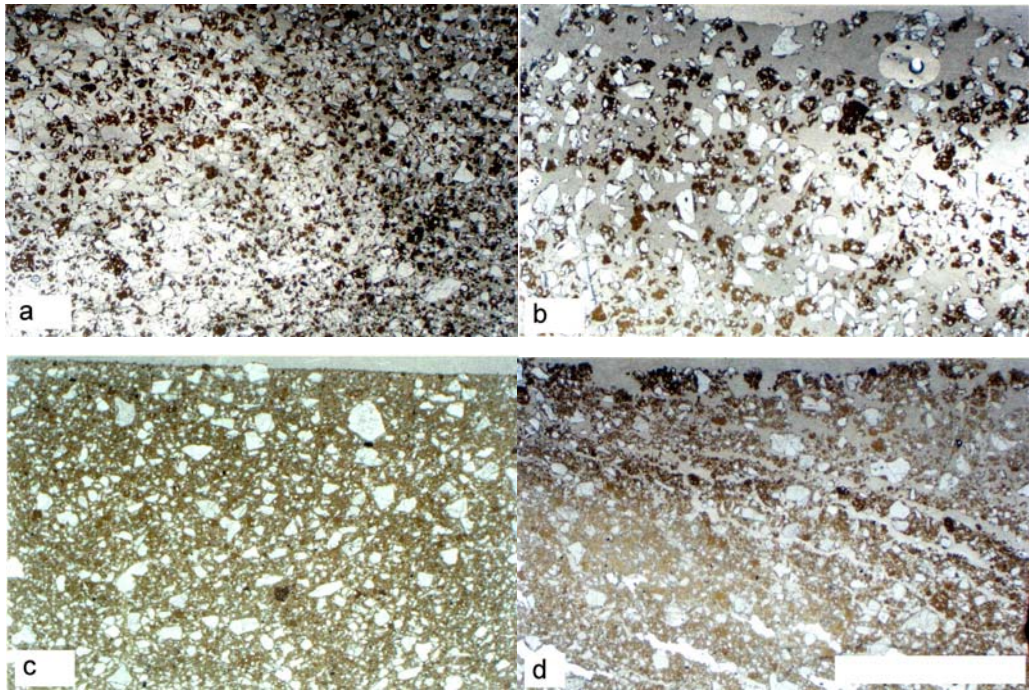


Figura 1 – Efeito dos ciclos: testemunha não-desagregada LA M0A0 (a) e testemunha desagregada LA M1A0 (b). Tratamentos após dez ciclos: não-desagregado LA M0A1 (c) e desagregado LA M1A1 (d), ampliados 7,5x (barra: 5 mm).

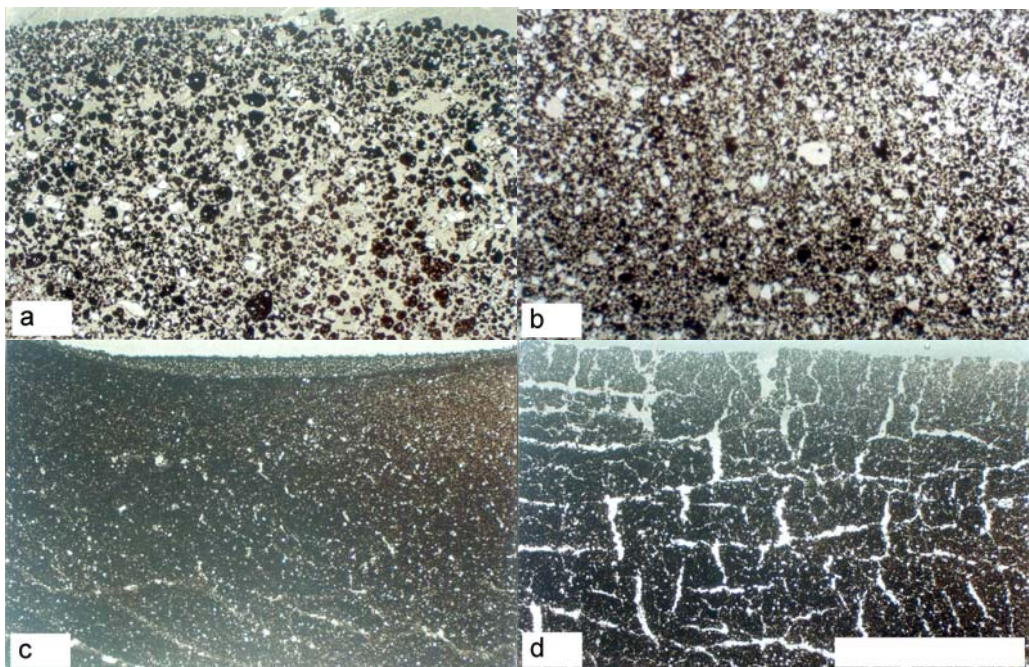


Figura 2 – Efeito dos ciclos: testemunha não-desagregada LE M₀A₀ (a) e testemunha desagregada LE M₁A₀ (b). Tratamentos após dez ciclos: não-desagregado LE M₀A₁ (c) e desagregado LE M₁A₁ (d), ampliados 7,5x (barra: 5 mm).

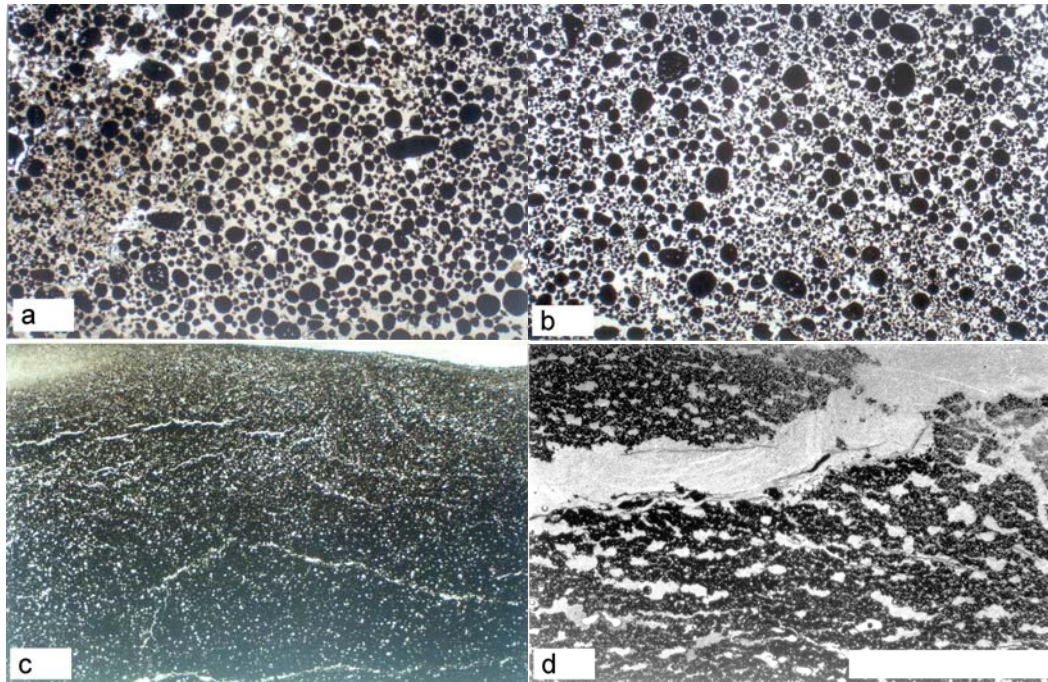


Figura 3 – Efeito dos ciclos: testemunha não-desagregada LF M_0A_0 (a) e testemunha desagregada LF M_1A_0 (b). Tratamentos após dez ciclos: não-desagregado LF M_0A_1 (c) e desagregado LF M_1A_1 (d), ampliados 7,5x (barra: 5 mm).

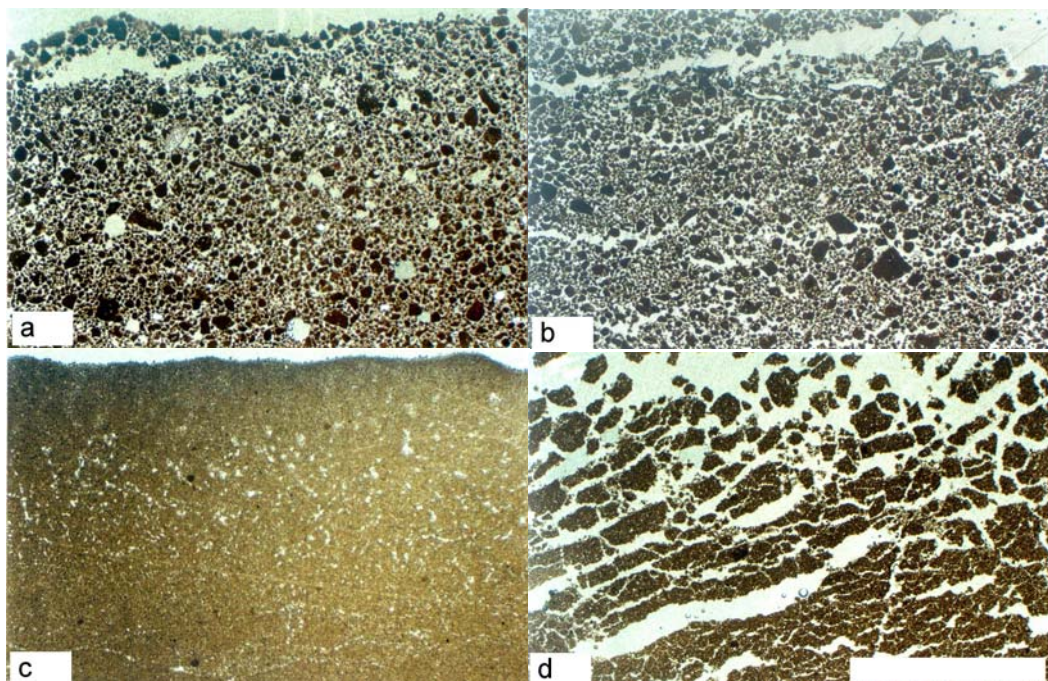


Figura 4 – Efeito dos ciclos: testemunha não-desagregada LP M_0A_0 (a) e testemunha desagregada LP M_1A_0 (b). Tratamentos após dez ciclos: não-desagregado LP M_0A_1 (c) e desagregado LP M_1A_1 (d), ampliados 7,5x (barra: 5 mm).

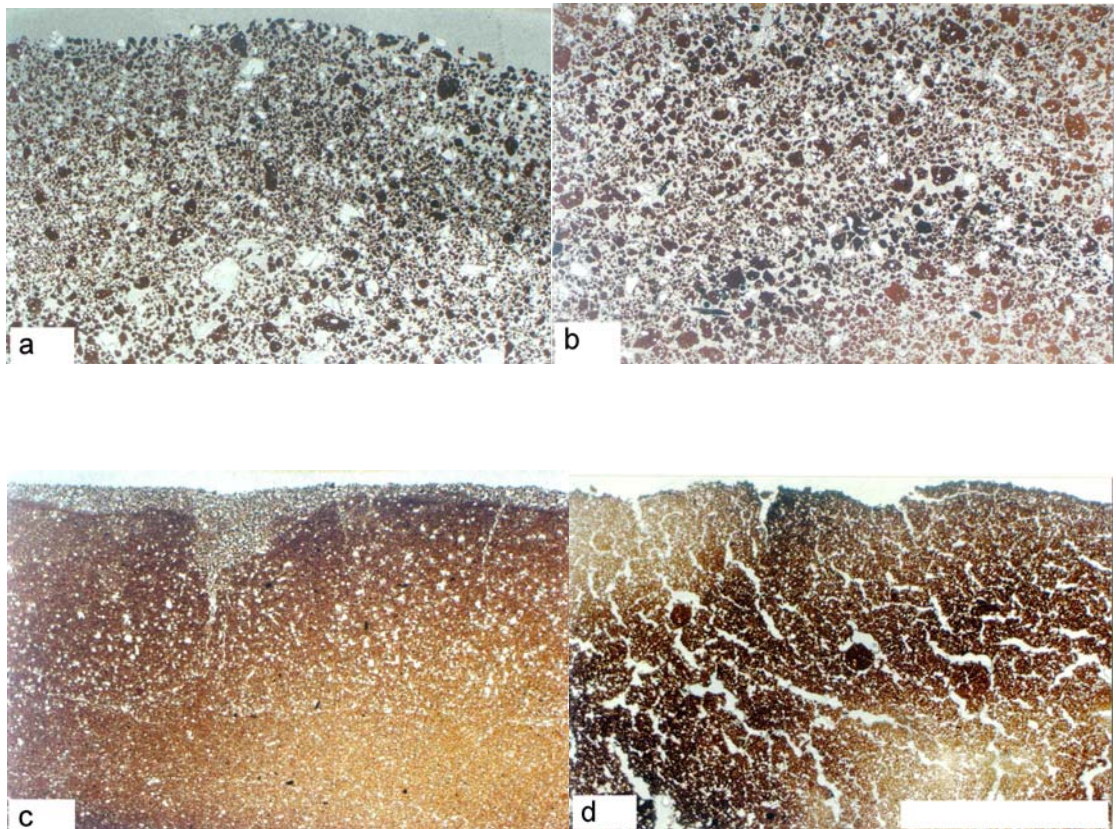


Figura 5 - Efeito dos ciclos: testemunha não-desagregada LR M_0A_0 (a) e testemunha desagregada LR M_1A_0 (b). Tratamentos após dez ciclos: não-desagregado LR M_0A_1 (c) e desagregado LR M_1A_1 (d), ampliados 7,5x (barra: 5 mm).

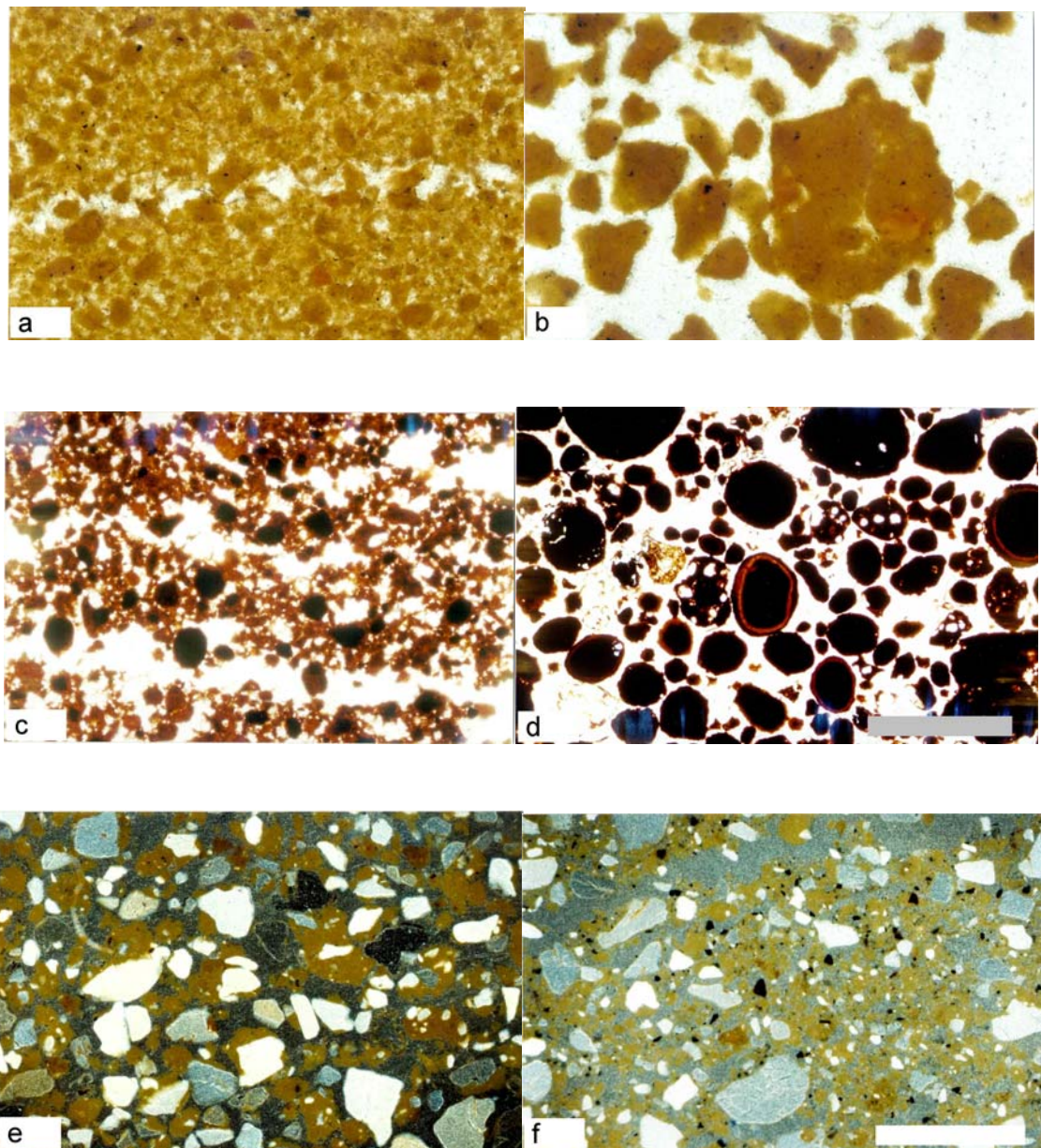


Figura 6 – Micrografias de LP M_1A_0 (a), LP M_0A_0 (b), LF M_1A_1 (c), LA M_0A_0 (e) e LA $M_1A_1 + AH$ (f), ampliadas 100x (barra: 250 μm), e LF M_0A_0 (d), ampliada 40x (barra: 100 μm).

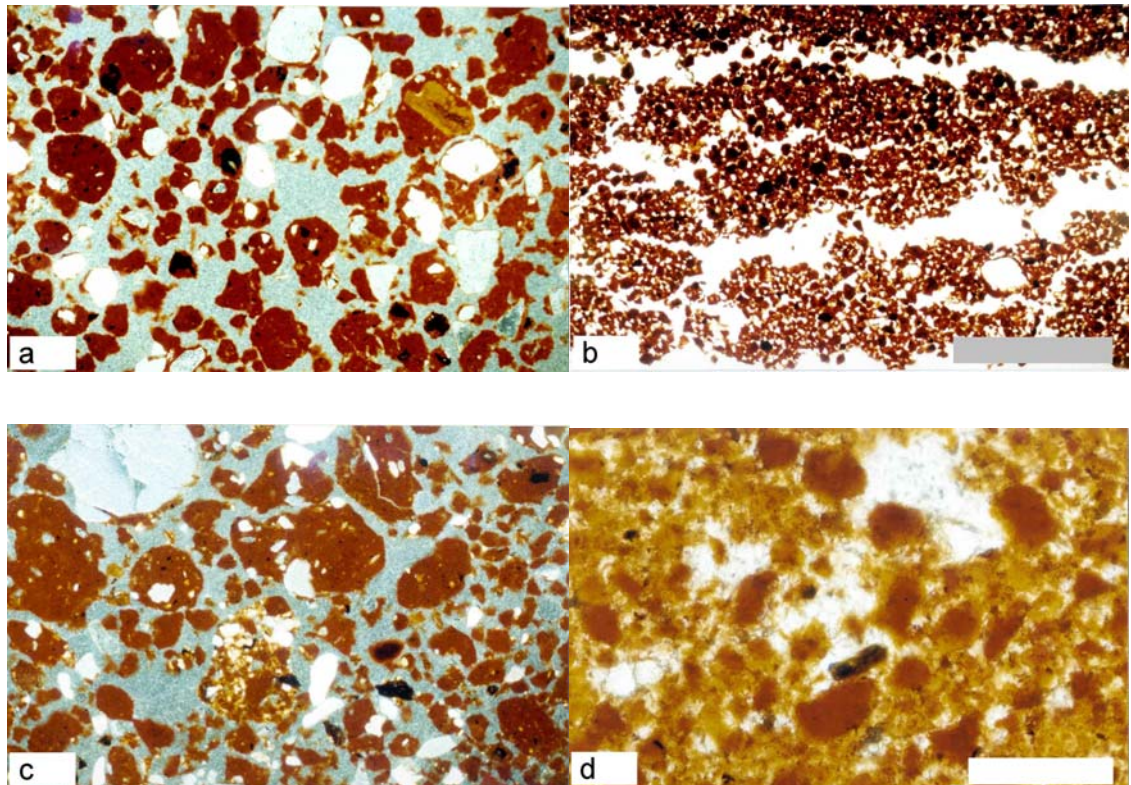


Figura 7 – Micrografias de LE M_0A_0 (a), LE M_1A_0 (b) e LR M_0A_0 (c), ampliadas 40x (barra: 250 μm), e LR M_1A_1 (d), ampliada 200x (barra: 50 μm).

A hidratação do material levou à formação de filmes de água entre os agregados, cujas superfícies específicas tinham sido ampliadas pela redução do tamanho. A exposição de cargas do interior dos agregados após sua fragmentação também pode ter auxiliado a hidratação destes (OLIVEIRA, 1992). Com a desidratação, houve incremento progressivo da tensão na massa, até a ruptura em forma de fendas verticais e/ou horizontais, a partir de pontos de fraqueza na superfície. Ao atingir a umidade de equilíbrio, as partículas se reorganizaram, podendo ter ocorrido a formação de ligações estáveis entre os agregados (BARTOLI, 1992; IWATA et al., 1988). Como não possuem argila expansiva, conforme se verifica na mineralogia desses materiais (FERNANDES, 2000), nem houve qualquer evidência de dispersão de argila ou movimentos de agregados ou partículas, as hidratações posteriores não levaram ao fechamento das fendas, conforme observado durante a condução do experimento, e os blocos e crostas formados

permaneceram aparentemente estáveis. O experimento não permitiu medir esta estabilidade, mas mostrou que a estrutura formada a partir desta reorganização não se modificou significativamente em função apenas de reidratação, não retornando à estrutura original após o fim dos ciclos.

A diferença entre os resultados dos tratamentos com e sem moagem parece estar relacionada à maior superfície específica, à forma mais irregular e ao menor tamanho dos agregados menores, que possibilitam o surgimento de maior quantidade de filmes de hidratação e maior capacidade de retração e acomodação da massa de agregados. O tamanho menor dos agregados também os torna mais suscetíveis às forças da tensão superficial entre agregados, devido à menor relação entre sua massa e a tensão do filme capilar (Figura 8).

Não foi observado efeito da aplicação de ácido húmico para nenhum dos tratamentos ou solos. Esse fato pode ser atribuído à não-dissolução deste ácido nos tratamentos, em virtude de sua elevada peptização e baixa solubilidade, permanecendo como partículas discretas (Figura 6f), apesar do reduzido tamanho de partícula ($< 0,053$ mm).

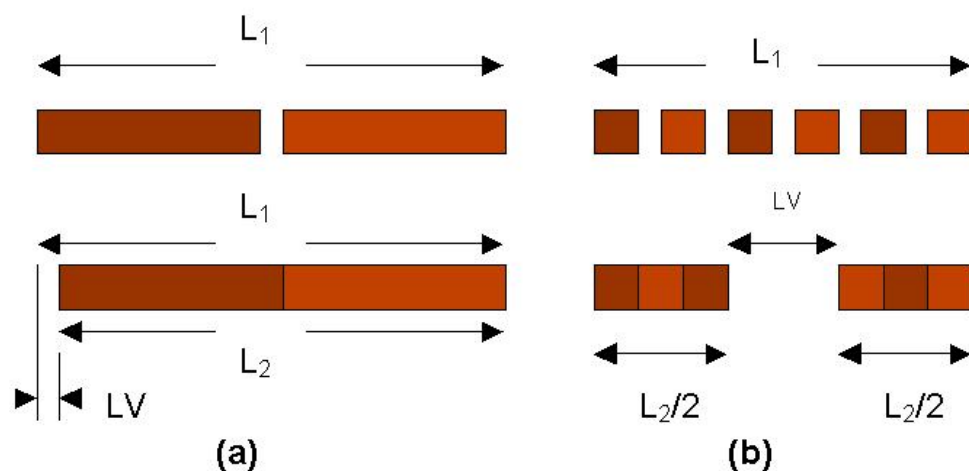


Figura 8 – Modelo esquemático para retração da massa de agregados. No caso dos agregados maiores (a), o espaço gerado LV por retração é muito inferior ao dos agregados menores (b). O esquema não está na escala real.

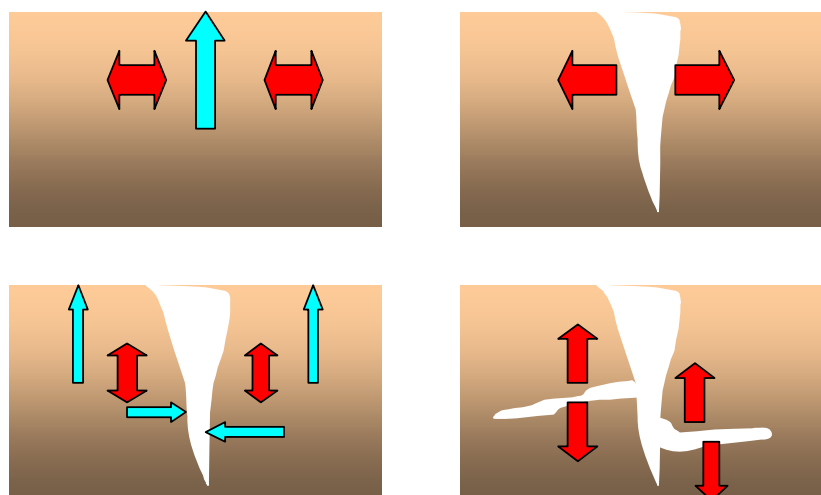


Figura 9 – Modelo de formação de poros planares horizontais e verticais (baseado em CHERKOV e RAVINA, 1998). As setas em azul representam o fluxo de água e, em vermelho, a tensão interna da massa.

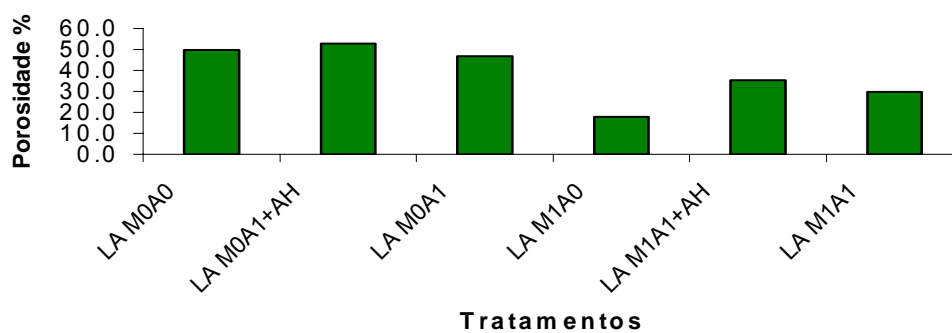


Figura 10 - Resultados de porosidade para LA.

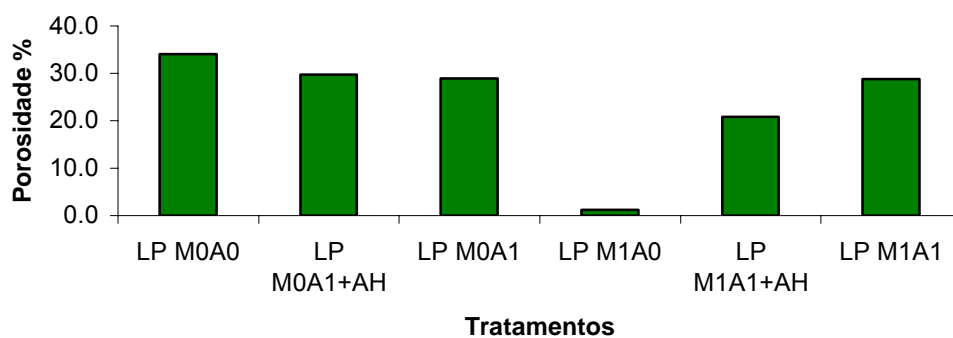


Figura 11 – Resultados de porosidade para LP.

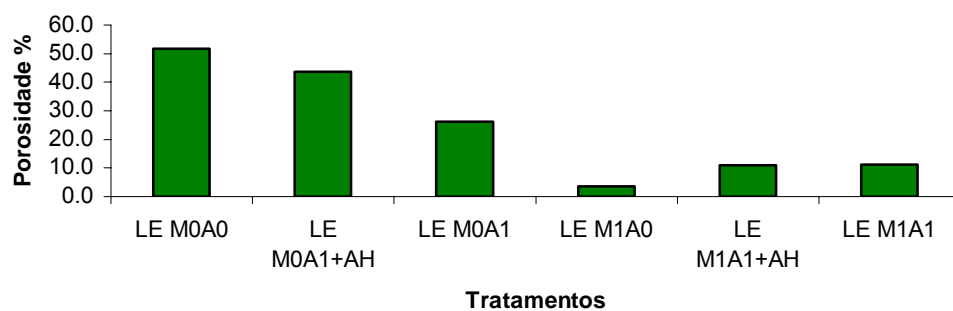


Figura 12 – Resultados de porosidade para LE.

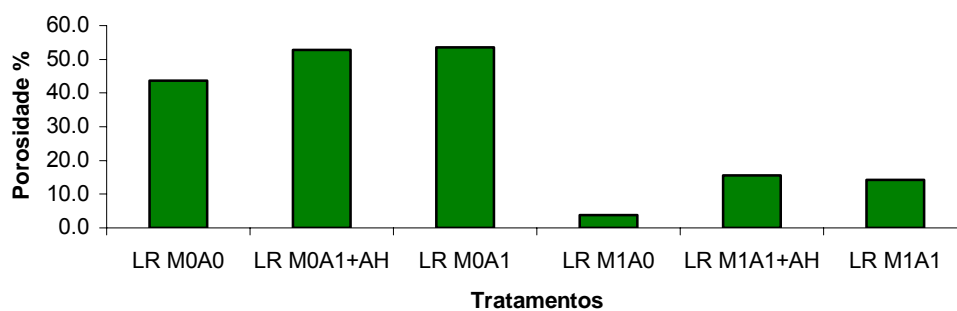


Figura 13 – Resultados de porosidade para LR.

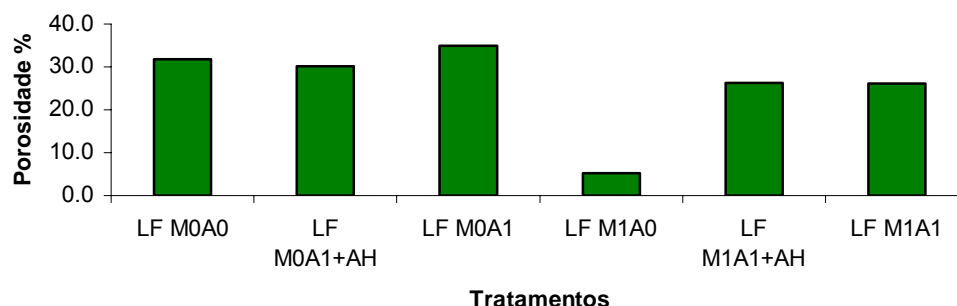


Figura 14 – Resultados de porosidade para LF.

2.2. Mudanças na forma e orientação dos poros – poros planares e microporos intra-agregados

O aparecimento de poros planares pode ser observado nas imagens (Figuras 1d, 2d, 4b, 4d e 5d) e confirmado com a análise da orientação dos poros, em que são mostradas as orientações dos eixos maiores dos poros de maior área em relação à horizontal (Figuras 15 e 16).

Nos tratamentos que sofreram desagregação, nota-se a formação de uma rede de poros planares, de orientação paralela ou subparalela à superfície. Nos solos LE e LR, houve também a formação de poros alongados de orientação vertical ou subvertical (Figuras 2b e 5d). A extensão dos poros também variou entre os solos, desde poros quase elípticos no LF até extensos poros planares, formando placas ou crostas descontínuas ou fraturadas, como em LP (Figura 4b,d).

O surgimento desses poros parece estar associado às tensões internas surgidas com a progressiva perda de água pela superfície e a retração da massa dos agregados (CHERKOV e RAVINA, 1999). TESSIER et al. (1990) propuseram que o rápido umedecimento de materiais caulíníficos provoca o surgimento de fraturas, por causa de pressões de bolhas de ar aprisionadas, que podem escapar se o

umedecimento for suficientemente lento. As diferenças entre os padrões de poros surgidos, como os poros predominantemente planares em LA, LF e LR, em relação ao padrão reticulado de poros ortogonais de LP e LE, podem estar associadas à mineralogia dos solos, mais gibbsítica nos últimos. Maiores estudos são necessários para se explicar esse comportamento e suas implicações na estabilidade e reorganização dos agregados. Considerou-se, para efeitos de interpretação, que os agregados se comportaram como corpos rígidos, com deformação plástica negligenciável.

Deve-se salientar que estudos devem ser conduzidos para se avaliar a validade do processo de amostragem adotado, tendo em vista que se estuda a natureza tridimensional de um corpo a partir de imagens bidimensionais. Princípios de estereologia devem ser incorporados às análises nesse sentido.

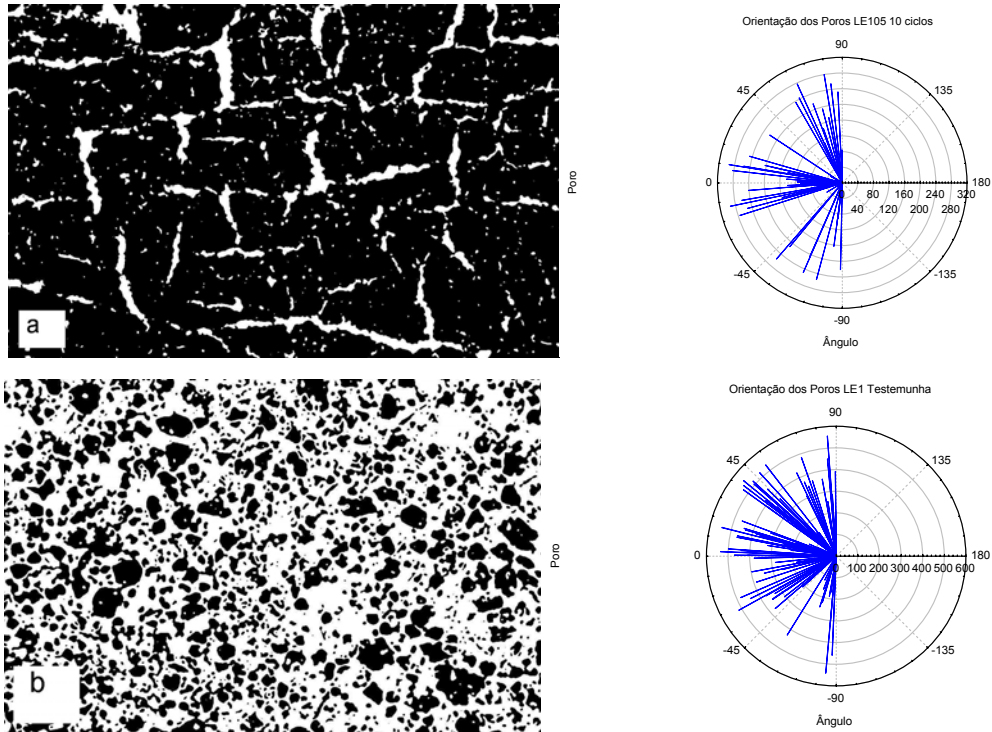


Figura 15 – Imagens processadas de LE M_1A_1 (a) e LE M_0A_0 (b) e seus respectivos espectros de orientação de poros principais.

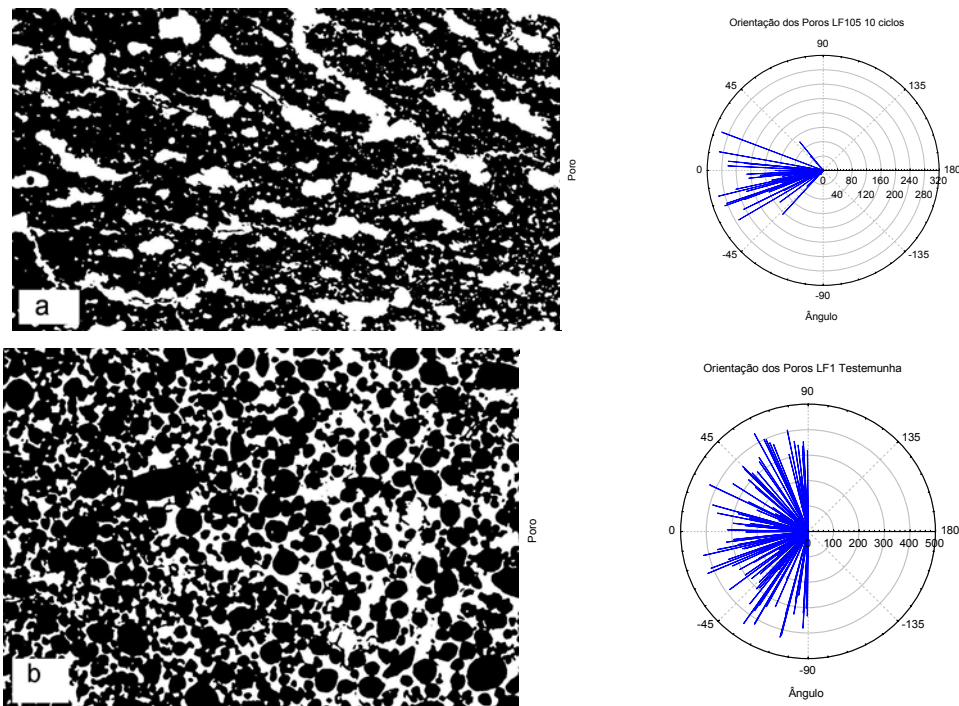


Figura 16 – Imagens processadas de LF M_1A_1 (a) e LF M_0A_0 (b) e seus respectivos espectros de orientação de poros principais.

2.3. Resultados das alterações da porosidade em LP e LR

As análises foram efetuadas em cada tratamento separadamente, pois o peneiramento ocasionou a separação da fração areia média e grossa. Embora para o Latossolo Amarelo (LP) esta fração seja muito pequena e menos ativa, por seu tamanho e sua superfície específica, a comparação entre os tratamentos moídos e não-moídos se fez apenas de forma qualitativa.

Os resultados de porosidade para os dois solos sugerem a estabilidade estrutural da macroporosidade das parcelas dos agregados não-moídos indicada pelas pequenas diferenças entre os valores de porosidade antes e após os ciclos (Figuras 10 a 14). Aparentemente o tamanho e a forma desses agregados não permitem grandes ajustes por efeitos das forças de tensão superficial do filme de água capilar. O

material se comporta como previsto para solos não-expansivos de estrutura rígida, onde não são geradas tensões mecânicas por umedecimento entre as partículas (JURY et al., 1991). Presume-se que a existência de poros maiores permitiu rápida perda de umidade e tensões menores na massa em razão do maior diâmetro destes.

A diferença dos resultados entre os tratamentos não-desagregados testemunhas e aqueles submetidos aos ciclos pode ser atribuída a pequenas reacomodações entre os agregados.

No caso dos agregados moídos, o surgimento de poros e fendas pela retração da massa de agregados durante os eventos de secagem permitiu significativo aumento da porosidade, embora a observação da microestrutura dos blocos e das crostas resultantes dessa expansão indique a manutenção de uma microporosidade entre agregados antes e após os ciclos.

Os dados sugerem que os eventos de umedecimento permitiram a acomodação das partículas menores e mais irregulares e que a existência de filmes de umidade nos microporos deu origem a tensões internas maiores durante os eventos de secagem, levando ao fendilhamento da massa. O material teria se comportado, no primeiro ciclo, de forma similar a um solo de argila expansiva, permitindo reorientação de partículas inicialmente dispostas aleatoriamente com o umedecimento e seu rearranjo no processo de secagem (IWATA et al., 1988). Após o estabelecimento do equilíbrio ao final dos primeiros ciclos, o solo tornaria a se comportar como um solo não-expansivo de estrutura rígida (JURY et al., 1991).

A relação entre o tamanho e a massa dessas partículas e as forças da tensão superficial da água e elétrica das superfícies também deve ser levada em consideração (SNYDER, 1990). Uma redução do diâmetro de dez vezes em relação ao tratamento integral resulta em redução de 1.000 vezes na massa esperada para as partículas, considerando-se a mesma densidade, e incremento de 100 vezes na área específica, considerando-se agregados esféricos. Aliado a isso, pode ocorrer uma mudança de forma, com incremento da angulosidade, rugosidade e redução da esfericidade, afetando a área de contato entre

as partículas e as forças de atrito entre partículas. Disso resulta maior suscetibilidade às demais forças atuantes durante os processos de umedecimento e secagem, permitindo movimentos relativos, rotação e interpenetração de partículas (PANAYIOTOPOULOS, 1989).

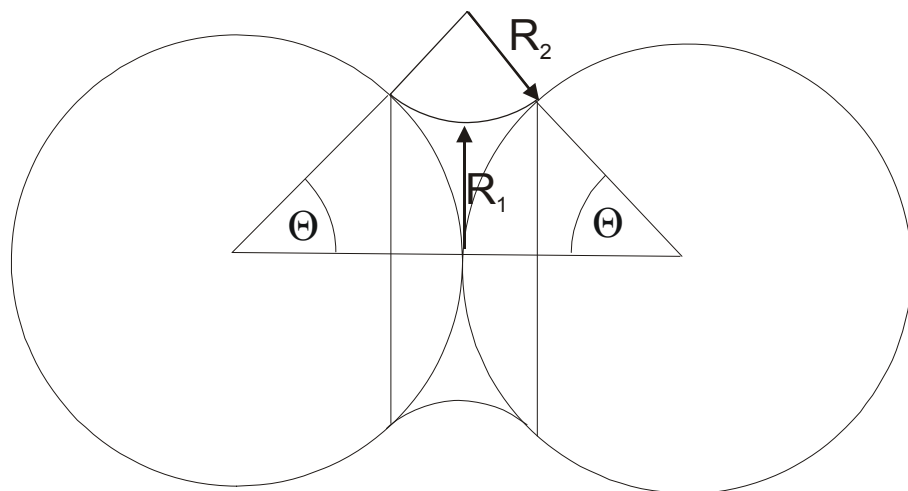
Os resultados de perímetro também seguiram a tendência mostrada para porosidade, embora seus resultados devam ser analisados com maiores reservas, em decorrência da sensibilidade dos procedimentos de medição aos processamentos e à qualidade das imagens (Quadros 11 a 14). Deve-se ter em mente também que as limitações ópticas dos equipamentos e a presença de artefatos interferem na qualidade da imagem. A medição do perímetro das estruturas pode ser utilizada para uma estimativa de sua superfície exterior e, em conjunto com o estudo da quantidade, distribuição e conectividade dos poros, pode ajudar a interpretar resultados de permeabilidade e fenômenos de superfície. Maiores estudos comparativos são necessários para se averiguar a correlação do perímetro medido com outros procedimentos de estimativa de superfície.

A atração entre os agregados durante o processo de secagem pode ser explicada pelo surgimento de forças de atração relacionadas ao filme capilar existente entre as partículas. No material hidratado, o espaço entre os agregados se encontra saturado de água e a força de atração é zero. Com a perda de água, ocorre a formação do menisco com raio negativo, que causa o surgimento de uma força capilar de atração (Figuras 17 e 18). Essa força é máxima quando o raio do menisco tende a zero. Esta força de atração pode ser estimada por:

$$F = \pi R_1 \delta (1 - R_1/R_2)$$

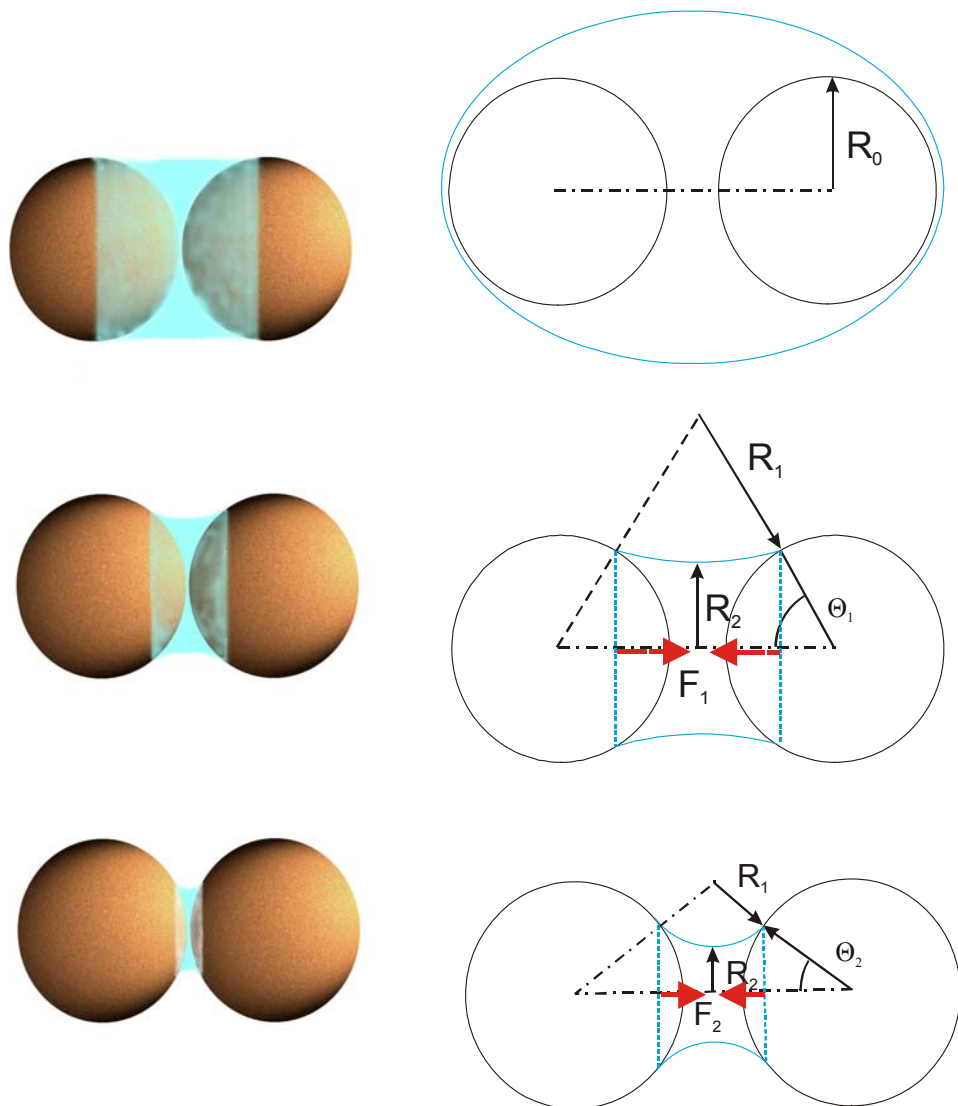
em que R_1 e R_2 são os raios principais de curvatura do menisco e δ , a tensão superficial do líquido (SCHUKIN et al., 1988).

Essa tensão fornece a energia para o deslocamento e a acomodação por deslizamento e translação dos agregados. A tração resultante sobre a massa de agregados provoca então a ruptura e o fendilhamento.



Fonte: Adaptado de IWATA et al. (1988).

Figura 17 – Modelo para força de atração entre agregados. A pressão capilar é função do ângulo Θ , aumentando com a diminuição deste. A perda de água leva ao surgimento de uma força de atração entre as partículas pela curvatura do menisco, determinada por seus raios R_1 e R_2 .



Fonte: Adaptado de SCHUKIN et al. (1988).

Figura 18 – Surgimento da força de atração pela retração do filme capilar com o processo de secagem, desde a condição de saturação em que a força F é igual a zero (figura do topo) até a formação do menisco de raio R_1 negativo (figura de baixo). A perda progressiva do filme de água leva à redução do ângulo Θ ($\Theta_2 < \Theta_1$) e ao incremento da força F ($F_2 > F_1$) resultante da tensão capilar e do menisco.

Quadro 7 – Porosidade de LP com agregados não-móidos

Imagem	Porosidade			
	Repetição	Média das subamostras	Média das amostras	Desvio-padrão
	%			
LP1T1v7	36,96	34,03	32,56	2,00
LP1T1v7b	31,10			
LP1T2v7	32,63	31,17	24,7	7,17
LP1T2v7a	29,71			
LP1AH1v7	30,44	29,77	27,58	1,83
LP1AH1v7a	29,09			
LP1AH2v7	19,79	19,63	26,28	
LP1AH2v7a	19,46			
LP110c1v7	32,59	28,87	27,58	1,83
LP110c1v7c	25,15			
LP110c2v7	22,49	26,28		
LP110c2v7a	30,07			

Quadro 8 – Porosidade de LP com agregados móidos

Imagem	Porosidade			
	Repetição	Média das subamostras	Média das amostras	Desvio-padrão
	%			
LP105T1v7	1,12	1,22	1,57	0,49
LP105T1v7a	1,31			
LP105T2v7	2,71	1,92	22,09	1,75
LP105T2v7a	1,13			
LP105AH1v7b	21,34	20,85	24,51	6,07
LP105AH1v7c	20,35			
LP105AH2v7d	22,05	23,32		
LP105AH2v7e	24,58			
LP10510c1v7	30,39	28,80	24,51	6,07
LP10510c1v7b	27,20			
LP10510c2v7a	21,56	20,21		
LP10510c2v7b	18,85			

Quadro 9 – Porosidade de LR com agregados não-móidos

Imagem	Porosidade			
	Repetição	Média das subamostras	Média das amostras	Desvio-padrão
	%			
LR1T1v7	43,01	43,72	44,56	1,19
LR1T1v7a	44,43			
LR1T2v7	39,69	45,40	50,47	3,24
LR1T2v7a	51,11			
LR1AH1v7	55,03	52,76	50,39	4,43
LR1AH1v7a	50,49			
LR1AH2v7	49,07	48,18	50,39	4,43
LR1AH2v7c	47,29			
LR110c1v7	53,12	53,52	50,39	4,43
LR110c1v7a	53,92			
LR110c2v7	50,03	47,25	50,39	4,43
LR110c2v7a	44,47			

Quadro 10 – Porosidade de LR com agregados móidos

Imagem	Porosidade			
	Repetição	Média das subamostras	Média das amostras	Desvio-padrão
	%			
LR105T1v7	4,12	3,74	4,53	1,11
LR105T1v7a	3,36			
LR105T2v7	2,84	5,32	16,19	0,99
LR105T2v7b	7,79			
LR105AH1v7	14,74	15,50	16,19	0,99
LR105AH1v7a	16,26			
LR105AH2v7	17,78	16,89	15,88	2,20
LR105AH2v7a	15,99			
LR10510c1v7	14,64	14,32	15,88	2,20
LR10510c1v7a	14,00			
LR10510c2v7a	15,51	17,43	15,88	2,20
LR10510c2v7b	19,35			

Quadro 11 – Perímetro de LP com agregados não-móidos

Imagem	Perímetro			
	Repetição	Média das subamostras	Média das amostras	Desvio-padrão
cm/cm ²				
LP1T1v7	0,109	0,107	0,114	0,009
LP1T1v7b	0,104			
LP1T2v7	0,119	0,120	0,104	0,005
LP1T2v7a	0,121			
LP1AH1v7	0,109	0,107	0,104	0,005
LP1AH1v7a	0,105			
LP1AH2v7	0,096	0,100	0,104	0,013
LP1AH2v7a	0,104			
LP110c1v7	0,132	0,113	0,104	0,013
LP110c1v7c	0,093			
LP110c2v7	0,094	0,094		
LP110c2v7a	0,095			

Quadro 12 – Perímetro de LP com agregados móidos

Imagem	Perímetro			
	Repetição	Média das subamostras	Média das amostras	Desvio-padrão
cm/cm ²				
LP105T1v7	0,011	0,011	0,013	0,003
LP105T1v7a	0,010			
LP105T2v7	0,021	0,015	0,054	0,002
LP105T2v7a	0,010			
LP105AH1v7b	0,056	0,055	0,054	0,002
LP105AH1v7c	0,053			
LP105AH2v7d	0,055	0,052	0,045	0,013
LP105AH2v7e	0,050			
LP10510c1v7	0,053	0,054	0,045	0,013
LP10510c1v7b	0,055			
LP10510c2v7a	0,039	0,036		
LP10510c2v7b	0,032			

Quadro 13 – Perímetro de LR com agregados não-móidos

Imagem	Perímetro			
	Repetição	Média das subamostras	Média das amostras	Desvio-padrão
cm/cm ²				
LR1T1v7	0,155	0,162	0,143	0,028
LR1T1v7a	0,169			
LR1T2v7	0,142	0,123	0,129	0,002
LR1T2v7a	0,104			
LR1AH1v7	0,122	0,130	0,126	0,016
LR1AH1v7a	0,137			
LR1AH2v7	0,128	0,127	0,126	0,016
LR1AH2v7c	0,127			
LR110c1v7	0,106	0,137	0,126	0,016
LR110c1v7a	0,167			
LR110c2v7	0,114	0,114	0,126	0,016
LR110c2v7a	0,115			

Quadro 14 – Perímetro de LR com agregados móidos

Imagem	Perímetro			
	Repetição	Média das subamostras	Média das amostras	Desvio-padrão
cm/cm ²				
LR105T1v7	0,032	0,030	0,031	0,001
LR105T1v7a	0,027			
LR105T2v7	0,011	0,032	0,058	0,008
LR105T2v7b	0,053			
LR105AH1v7	0,054	0,052	0,062	0,008
LR105AH1v7a	0,050			
LR105AH2v7	0,066	0,063	0,062	0,008
LR105AH2v7a	0,059			
LR10510c1v7	0,057	0,056	0,062	0,008
LR10510c1v7a	0,054			
LR10510c2v7a	0,060	0,067	0,062	0,008
LR10510c2v7b	0,074			

CONCLUSÕES

A análise dos dados obtidos levou às seguintes conclusões:

- A moagem dos agregados provocou mudanças no padrão de estrutura após a aplicação de ciclos de umedecimento e secagem em relação às amostras não-móidas.
- A estrutura e o padrão de porosidade surgidos após a moagem diferem daqueles esperados para essa classe de solos. Os microagregados fragmentados se reorganizaram em agregados maiores de forma prismática, placóide ou de blocos angulares, mantendo uma microporosidade interna.
- A evidência experimental não indica qualquer tendência à reversão da estrutura original, com dez ciclos de umedecimento e secagem.
- As mudanças no padrão de estrutura ocorreram em todos os solos, com diferenças na expressão de poros planares, possivelmente devidas à diferença de mineralogia.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALUKO, O.B. & KOOLEN, A.J. The essential mechanics of capillary crumbling of structured agricultural soils. *Soil Till. Res.*, 55:117-126, 2000.
- ARCA, M.N. & WEED, S.B. Soil aggregation and porosity in relation to contents of free iron and clay. *Soil Sci.*, 101:164-170, 1966.
- BARRAL, M.T.; ARIAS, M. & GUÉRIF, J. Effects of iron and organic matter on the porosity and structural stability of soil aggregates. *Soil Till. Res.*, 46:261-272, 1998.
- BARROS, M.E.; BLANCHART, E.; NEVES, A.; DESJARDINS, T.; CHAUVEL, A.; SARARRAZIN, M. & LAVELLE, P. Relação entre a macrofauna e a agregação do solo em três sistemas na Amazônia central. In: XII Congresso Latino Americano de Ciência do Solo. ESALQ/USP–SBCS, Águas de Lindóia. CD-ROM. 1996.
- BARROS, E.; CURMI, P.; HALLAIRE, V.; CHAUVEL, A. & LAVELLE, P. Role of macrofauna in the transformation and reversibility of soil structure of an Oxisol during forest to pasture conversion. *Geoderma*, 100: (1-2)193-213, 2001.
- BARTOLI, F.; BURTIN, G. & GUÉRIF, J. Influence of organic matter on aggregation in Oxisols rich in gibbsite or in goethite. II. Clay dispersion, aggregate strength and water-stability. *Geoderma*, 54:259-274, 1992.

- BEUTLER, A.N.; SILVA, M.L.N.; CURI, N.; FERREIRA, M.M. & CRUZ, J.C. Resistência à penetração e permeabilidade do solo sob sistemas de manejo na região dos cerrados. R. Bras. Ci. Solo, 25:167-177, 1999.
- BEUTLER, A.N.; SILVA, M.L.N.; CURI, N.; FERREIRA, M.M. PEREIRA FILHO, I.A. & CRUZ, J.C. Agregação de Latossolo Vermelho distrófico típico relacionada com o manejo na região dos cerrados no estado de Minas Gerais. R. Bras. Ci. Solo, 25:129-136, 1999.
- CASTRO, S.S. Impregnação de amostras de solo para confecção de lâmina delgada. Bol. Inf. Soc. Bras. Cci. Solo, 1985.
- CHENU, C. Clay- or sand-polysaccharide associations as models for the interface between micro-organisms and soil: water related properties and microstructure. In: BRUSSAARD, L. & KOOISTRA, M.J. (Eds). Int. Workshop on Methods of Research on Soil Structure/Soil biota Interrelationship. Geoderma, 56:143-156, 1993.
- CHERKOV, V.Y. & RAVINA, I. Morphology of horizontal cracks in swelling soils. Theor. Appl. Fract. Mec., 31:19-29, 1999.
- DELEPORTE, S.; HALLAIRE, V. & TILLIER, P. Application of image analysis to a quantitative micromorphological study of forest humus. Eur. J. Soil Biol., 33:83-88, 1997.
- DORIOZ, J.M.; ROBERT, M. & CHENU, C. The role of roots, fungi and bacteria on clay particle organization. An experimental approach. In: BRUSSAARD, L. & KOOISTRA, M.J., eds. Int. Workshop on Methods of Research on Soil Structure/Soil biota Interrelationship. Geoderma, 56:179-194, 1993.
- FERNANDES FILHO, E.I. *QUANTIPORO* [Programa de Computador experimental]. DPS/UFV, Viçosa, 2001.
- FERNANDES, R.B.A. Atributos mineralógicos, cor, adsorção e dessorção de fosfatos em Latossolos do Sudeste Brasileiro. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 2000. 265p. (Tese de Doutorado)
- GRANT, C.D. & DEXTER, A.R. Generation of microcracks in moulded soils by rapid wetting. Aust. J. Soil Res., 27:169-182, 1989.
- HALLETT, P.D.; DEXTER, A.R. & SEVILLE, J.P.K. Identification of pre-existing cracks on soil fracture surfaces using dye. Soil Till. Res., 33:163-184, 1995.

- HORGAN, G.W. Mathematical morphology for analyzing soil structure from images. *Eur. J. Soil Sci.*, 49:161-173, 1998.
- HORN, R & DEXTER, A.R. Dynamic of soil aggregation in an irrigated desert Loess. *Soil Till. Res.*, 13:253-266, 1989.
- HORN, R.; DOMŻAŁ, H.; SŁOWIŃSKA-JURKIEWICZ, A. & VAN OUWERKERK, C. Soil compaction processes and their effects on the structure of arable soils and the environment. *Soil Till. Res.*, 35:23-36, 1995.
- IWATA, S.; TABUCHI, T. & WARKERTIN, B.P. *Soil-water interactions*. Marcel Dekker, Inc., New York. 380p. 1988.
- JANTSCH, R.L. Estado de agregação de materiais de Latossolos submetidos a calagem em diferentes condições de temperatura e umidade relativa. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1997. 78p. (Tese de Mestrado)
- JURY, W.A.; GARDNER, W.R. & GARDNER, W.H. *Soil physics*. John Wiley and Sons, Inc., New York. 328p. 1991.
- KAY, B.D. & DEXTER, A.R. The influence of dispersible clay and wetting/drying cycles on the strength of a Red-Brown Earth. *Aust. J. Soil Res.*, 30:297-310. 1992.
- McBRATNEY, A.B.; MORAN, C.J.; STEWART, J.B.; CATTLE, S.R. & KOPPI, A.J. Modifications to a method of rapid assessment of soil macropore structure by image analysis. In: MERMUT, A.R. & NORTON, L.D., eds. *Digitalization, Processing and Quantitative Interpretation of Image Analysis in Soil Science and Related Areas*. *Geoderma*, 53:255-274, 1992.
- MORAN, C.J. Image processing and soil micromorphology. In: RINGROSE-VOASE, A.J. & HUMPHREYS, G.S., eds. *Soil Micromorphology: Studies in Management and Genesis*. Proc. IX Int. Working Meeting on Soil Micromorphology, Townsville, Australia, July 1992. *Developments in Soil Science* 22, Elsevier, Amsterdam. p.459-482. 1992.
- MURPHY, C.P. *Thin section preparation of soils and sediments*. A. B. Academic Publishers, Berkhamsted. 149p. 1986.
- PANAYIOTOPOULOS, K.P. Packing of sands – A review. *Soil Till. Res.*, 13:101-121, 1989.

- SANTOS, C.S.V. Formação de camadas superficiais adensadas em solo argiloso em resposta a flutuações de umidade. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 2000. 70p. (Tese de Doutorado)
- SCHUKIN, E.D.; PERTSOV, A.V. & AMÉLINA, E.A. Química coloidal. Editorial Mir, Moscou. 384p. 1988.
- SNYDER, V. Scaling of mechanical stresses in soils. In: Scaling in Soil Physics: Principles and Applications. HILLEL, D. & ELRICK, D.E., eds. Soil Science Society of America, Inc., Madison. p.73-108, 1990.
- STATSOFT, INC. STATISTICA for Windows [Computer Program Manual]. StataSoft, Inc.,Tulsa. 1997.
- TESSIER, D.; BEAUMONT, A. & PEDRO, G. Influence of clay mineralogy and rewetting rate on the clay microstructure. In: Soil Micromorphology: a basic and applied Science. DOUGLAS, L.A., ed. Proceedings of the VIIIth International Work Meeting of Soil Micromorphology, San Antonio, Texas, July 1988. Developments in Soil Science, 19. Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam. p.191-198,1990.
- THOMPSON, M.; SINGH, P.; CORAK, S. & STRASZHEIM, W.E. Cautionary notes for the automated analysis of soil pore-space images. In: MERMUT, A.R. & NORTON, L.D., eds. Digitalization, Processing and Quantitative Interpretation of Image Analysis in Soil Science and Related Areas. Geoderma, 53:399-415, 1992.
- TOVEY, N.K.; SMART, P.; HOUNSLOW, M.W. & LENG, X.L. Automatic orientation mapping of some types of soil fabric. In: MERMUT, A.R. & NORTON, L.D., eds. Digitalization, Processing and Quantitative Interpretation of Image Analysis in Soil Science and Related Areas. Geoderma, 53:179-200, 1992.
- VIEIRA, S.R. Geoestatística aplicada à agricultura de precisão. In: NOVAIS, R.F.; ALVARES V.; V.H. & SCHAEFER, C.E.G.R., eds. Tópicos em Ciência do Solo, V.1. SBCS, Viçosa. p.1-54, 2000.

2. RESUMO E CONCLUSÕES

Este trabalho teve por objetivo o estudo do efeito dos ciclos de umedecimento e secagem na estrutura de Latossolos de diferentes mineralogias submetidos à destruição dos agregados por moagem a seco, comparados aos mesmos agregados integrais por meio de estudos de micromorfologia e do teste de um programa desenvolvido no Departamento de Solos da UFV para quantificação de imagens digitais de seções finas de solo.

No primeiro capítulo foi feita a calibração dos filtros e procedimentos de uso do programa *QUANTIPORO*, desenvolvido no DPS/UFV, para processamento e quantificação de imagens digitais. Os resultados de calibração indicam que os erros decorrentes dos passos de tratamento dependentes de decisões do usuário se encontram em limites aceitáveis para efeitos de interpretação dos resultados. Indicam também a necessidade de uso de imagens de boa qualidade para minimizar os erros e do aperfeiçoamento dos filtros digitais para separação de feições de interesse.

O segundo capítulo discorreu sobre o experimento onde se estudou o efeito dos ciclos de umedecimento e secagem em materiais de Latossolos submetidos à destruição dos agregados por moagem a seco. Os resultados mostraram marcantes modificações no padrão de

estrutura surgida após os ciclos no material desagregado, comparado ao material integral. As modificações consistiram na reorganização dos microagregados em estruturas em forma de blocos e prismas e no surgimento de poros planares, atribuídas a uma acomodação dos agregados com a retração da massa, que se seguiu ao processo de secagem. O processo se mostrou irreversível nas condições e no período experimental testado.