

## **Introdução**

A escolha de um método analítico depende, entre outros, do objetivo do estudo, da facilidade na coleta dos dados e da disponibilidade de recursos. No caso do estudo de sistema radicular, as avaliações têm sido efetuadas, em geral, de duas maneiras: diretamente no perfil do solo ou através de raízes lavadas obtidas por diferentes métodos de coleta. Em ambos, aplica-se perfeitamente o processamento de imagens como uma das formas de aumentar a precisão e tempo de análise.

O processamento de imagens facilita a determinação do comprimento, da área superficial, do volume e da análise da distribuição radicular ao longo do perfil de solo. Estes parâmetros, quando calculados manualmente, são extremamente trabalhosos, sendo este o motivo dos estudos do sistema radicular ter tido avanço mais significativo após a introdução de técnicas de imagens. E foi com este objetivo que foi desenvolvida a metodologia do SIARCS, inicialmente para estudo de perfil e posteriormente para raízes lavadas.

O objetivo deste material é fazer uma atualização das técnicas de imagens que estão sendo utilizadas atualmente na geração da nova versão do software SIARCS, que é um avanço à metodologia já difundida. Nesta nova versão, estão sendo utilizadas técnicas de processamento de imagens que permitem precisão maior nas análises além de cálculos de parâmetros de interesse por classes de diâmetros de forma totalmente automática. Não obstante, a aquisição da imagem no campo, que é algo que sempre demandou muito tempo e trabalho, o método tem sofrido alterações positivas com as novas câmeras digitais e sistemas de armazenamento com capacidade cada vez maiores e mais rápidos.

Sendo assim, será apresentada uma revisão de métodos de aquisição de imagens em condições de campo e laboratório de todo o processo, ou seja, abertura da trincheira, preparo do perfil de solo, até a análise das imagens.

## **Método SIARCS**

Por vezes os métodos de estudo das raízes foram compilados ( BÖHM, 1979; BOX JR., 1996), no intuito de fornecer aos interessados uma base sólida de aprendizado e de comparação, facilitando a escolha do mais apropriado. Nestas compilações, os métodos mais usuais e amplamente discutidos são: escavação; monolito; trado; perfil de parede; parede de vidro; e recipiente, cada um com suas vantagens, desvantagens e aplicabilidade. Quando o estudo se dá sob condições naturais de campo, os métodos do trado e do monolito são os mais comumente utilizados, sendo que, após o trabalho de campo, ambos resultam em amostras (solo + raízes) que são submetidas à lavagem para separação das raízes. As raízes lavadas são, então, estudadas quanto à morfologia (diâmetro, comprimento, etc) e quanto ao acúmulo de biomassa (peso).

Enquanto o peso seco das raízes sempre foi o parâmetro mais comum e facilmente medido a partir de raízes lavadas, o comprimento e o diâmetro das raízes sempre foram muito demorados e trabalhosos de se determinar. Somente com o desenvolvimento de técnicas de análise de imagem estes dois parâmetros passaram a ser mais usualmente estudados neste tipo de amostra (BOX JR., 1996). Grandes esforços neste sentido foram conduzidos por estudiosos de raízes no mundo todo, desenvolvendo técnicas que utilizam imagens digitais (JORGE e

CRESTANA, 2005) e um destes esforços é o método do SIARCS lançado em 1996 (EMBRAPA, 1996).

Os resultados com o SIARCS<sup>®</sup> apresentados por Crestana et al., (1994), mostraram a viabilidade da metodologia na avaliação da distribuição do sistema radicular de plantas cultivadas. A partir deste, vários trabalhos foram realizados em diferentes culturas, tais como: milho (BASSOI et al. 1994a; BASSOI et al. 1994b; ABI SAAB et al. 1996; JORGE et al. 1996), forrageiras (ROCHA FILHO et al. 1996), soja (CRESTANA et al. 1994), videira (BASSOI e ASSIS, 1996), citrus (CINTRA e NEVES, 1996); e sistemas de manejo, tais como: semeadura direta e preparo convencional (FANTE Jr. et al. 1994; GUIMARÃES et al. 1996). Vários outros continuam sendo efetuados apresentando ótimas correlações.

De forma geral, a avaliação de raízes com o SIARCS, tem sido efetuada de duas maneiras: diretamente no perfil de solo ou através de raízes lavadas (BOHM, 1979), levando em conta o custo, a precisão e o tempo de análise.

#### *Principais métodos utilizados para coleta de informações de raízes*

A escolha do método depende, entre outros, do objetivo do estudo, da facilidade na coleta dos dados e da disponibilidade de recursos. A coleta de informações no campo é uma tarefa bastante árdua e é feita de diferentes formas: método do monólito, do trado, da parede do perfil, parede de vidro, dentre outros.

##### *- Métodos de raízes lavadas*

Um dos métodos mais utilizados para o estudo de raízes é o método do monólito, ou seja, a retirada de um monólito de solo e a separação de raízes por lavagem. Mesmo sendo um método padrão, existem algumas variações do método, tais como: placa de pregos, anéis volumétricos, etc. Entre estas, o método com placa de pregos se destaca como referência no estudo de raízes (IVO, 1999).

Por meio deste método, uma amostra representativa do sistema radicular é retirada através do uso de uma prancha especial, a qual, através dos pregos que possui, permite a permanência das raízes em posições próximas às suas posições naturais, mesmo após o procedimento da lavagem da amostra.

Uma vez retirada a placa com pregos, faz-se o processo de lavagem, onde se consome muito tempo. Porém, para facilitar o trabalho, as amostras devem ser imersas em recipientes com água e dependendo da textura do solo, adiciona-se também um dispersante, por 12 a 24 horas. Depois da saturação, o solo é retirado com o auxílio de um jato de água sob baixa pressão, de baixo para cima da placa evitando a perda de raízes.

Apesar deste método ser trabalhoso e consumir muito tempo, ele é sempre utilizado como um método padrão, pois a partir dele, é possível fazer um estudo tanto qualitativo como quantitativo das raízes e além disso, entre os métodos do monólito, este é o que possui maior exatidão dos resultados.

A análise das raízes, propriamente dita, pode ser efetuada por processamentos de imagens específicos para raízes lavadas, SIARCS (JORGE e CRESTANA, 2005). Estes processamentos específicos permitem a quantificação de raízes lavadas, de forma muito menos trabalhosa, mais rápida e detalhada, viabilizando o estudo da distribuição do sistema radicular no tempo e no espaço, bem como um maior número de repetições experimentais.

##### *Métodos do perfil de solo*

Este método pode também ser denominado de Método da Trincheira (JORGE, 1996) e fundamenta-se na abertura de trincheiras para melhor visualização e avaliação da distribuição das raízes da planta em estudo. A avaliação da distribuição de raízes *in situ*, consiste em cavar uma trincheira ao lado da planta e remover uma fina camada da parede do perfil, de modo a

expor as raízes, que depois são contadas e registradas em desenhos ou tabelas (BOHM, 1979). Uma variação do método, onde os perfis de raízes são filmados, tem sido utilizada para análise a partir de imagens digitais (JORGE, 1996).

Para cada tipo de cultura é definida uma condição para abertura de trincheira: posição, comprimento, largura e profundidade. (JORGE et al. 1996; JORGE, 1999; MEDINA, 1999). O estudo do perfil de raízes fornece informações com bom nível de precisão a serem incorporadas ao sistema de produção agrícola, sendo algumas destas citadas a seguir:

- Cultivares recomendados: parâmetros de comportamento, desenvolvimento e densidade de raízes na rizosfera de cultivares a serem lançados no mercado;
- Tecnologia de cultivo: avaliações do perfil de enraizamento de diferentes cultivares ou espécies sob condições diferenciadas de sistemas de manejo do solo;
- Compactação: avaliação e diagnóstico do desenvolvimento radicular sob condições de solo compactado, correlacionando o comportamento da distribuição de raízes no perfil em função da profundidade de ocorrência, da compactação generalizada horizontal e do estado estrutural compactado com presença de fissuras;
- Interface solo–raiz: possibilidade de se obter uma visão morfológica do perfil do solo através de densidade, morfologia, diâmetro, ramificações, disposição e orientação das raízes;
- Sistema de semeadura direta: avaliação mais criteriosa do desenvolvimento radicular através de fissuras e bioporos, tipos de vazios que podem propiciar colonização radicular satisfatória no perfil do solo sob semeadura direta, mesmo com a ocorrência neste sistema de elevados valores de densidade do solo na camada mais superficial; e
- Fatores edáficos: com os dados do perfil de enraizamento analisados, tem-se uma comparação destes com os parâmetros físicos, químicos e biológicos do solo.

Para obtenção dos dados, pode ser feita uma contagem a partir da exposição das raízes na tela reticulada. Uma outra variação é a anotação da presença ou da ausência das raízes, utilizando a mesma tela. Outra forma é a análise de imagens a partir de imagens tiradas do perfil de solo com raízes (JORGE et al. 1999).

O método de avaliação depende do objetivo proposto. Quando se deseja saber os efeitos do manejo do solo, é suficiente a avaliação da distribuição das raízes no perfil pelas anotações de presença ou ausência. Quando se busca avaliar o efeito de determinados tratamentos no desenvolvimento das plantas ou no sistema radicular, a técnica da contagem é rápida e simples, porém não mantém o registro dos perfis. Pode-se ainda atribuir notas às raízes, classificando-as conforme os diferentes tamanhos encontrados. Ainda no campo, são encontradas anotações como: tipo, diâmetro, disposição, orientação e localização das raízes no perfil do solo. E, a forma mais fácil de eliminar a subjetividade encontrada nestas análises, manter registro dos dados e melhorar a precisão é através do processamento de imagens, conforme relata Jorge (1999), quando descreve o SIARCS<sup>®</sup>, metodologia para análise de raízes em perfil do solo por processamento de imagens. A partir de imagens digitalizadas dos perfis pode-se determinar o comprimento, a distribuição e a área ocupada pelas raízes (CRESTANA et al. 1994; GUIMARÃES et al. 1996; JORGE e CRESTANA, 1996).

Na Figura 1, pode-se observar um perfil de solo filmado para a análise de raízes por processamento de imagens.



Figura 1: Imagem típica de um perfil de solo com raízes (JORGE e CRESTANA, 2005).

#### *Técnicas de imagens digitais na avaliação de raízes*

Os métodos de análise de imagens, tanto de raízes lavadas como de perfil de solo, seguem o fluxograma apresentado na Figura 2.

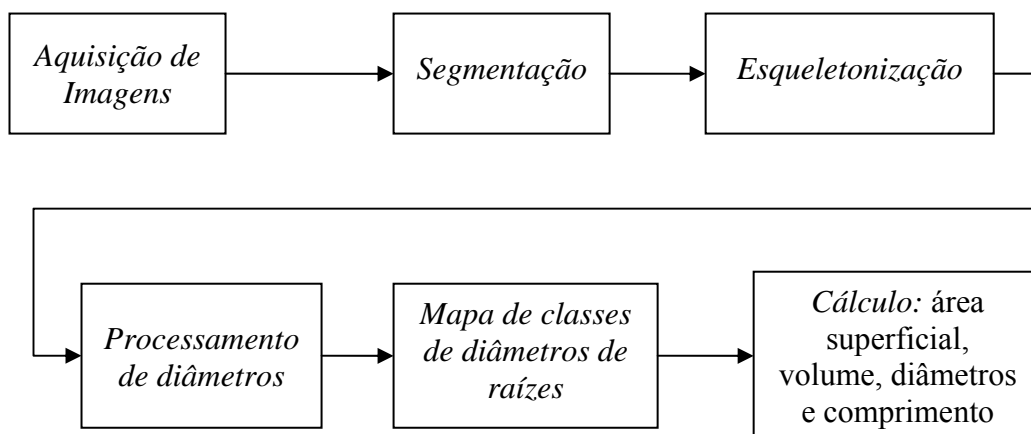


Figura 2: Passos de processamento de imagens para análise de raízes

A *aquisição das imagens* de raízes deve seguir as recomendações de Jorge (1996), e que serão descritas a seguir, passando então para o processo de *segmentação* da imagem para separar as raízes do fundo, achar o *esqueleto* das mesmas e aplicar o método de *processamento de diâmetros*. Com os diâmetros e o esqueleto gera-se o *mapa de classes de diâmetros* e a posterior análise através dos *cálculos* dos parâmetros de interesse, ou seja, comprimento, área superficial, volume e diâmetros médios ponderados.

#### *a) Revisão sobre aquisição das imagens descrita em Jorge (1996)*

Muitas das definições das condições de abertura da trincheira, como: a posição, o comprimento, a largura e a profundidade, devem ser estudadas anteriormente, e com base no tipo da cultura e nos objetivos desejados.

Em culturas plantadas em linha, a trincheira pode ser aberta transversalmente à essa linha, de forma a evidenciar o efeito do manejo do solo, por exemplo, na distribuição do sistema radicular; ou longitudinalmente, evidenciando o comportamento das raízes ao longo da área afetada pela passagem das máquinas.

Em plantas perenes, é conveniente realizar a abertura da trincheira tanto transversal como longitudinalmente (Figura 3), de forma a se obter o maior número de informações em uma mesma planta. No caso de anuais ou semi-perenes, recomenda-se a abertura transversal, uma vez que a avaliação do sistema radicular está geralmente associada ao manejo do solo (Figura 4).

A distância do perfil à planta é outro ponto importante a ser considerado. Em geral, em plantas anuais e semi-perenes, avalia-se o perfil a 0,05 m da planta. Em plantas perenes, esta distância pode ser de até 1 m, quando então podem ser retiradas camadas de solo de 0,20 em 0,20 m, para avaliação de raízes a diferentes distâncias da planta.

O comprimento da trincheira está diretamente relacionado com o espaçamento entre plantas. Normalmente, para culturas anuais, avalia-se metade da entrelinha, de cada lado da planta de referência. Para culturas perenes, em relevo plano, o comprimento da trincheira deve atingir o centro da entrelinha a partir do tronco. A largura está relacionada com a distância de filmagem, observando-se sempre, um bom posicionamento do operador. A profundidade depende da cultura, de seu estágio de desenvolvimento, dos tratamentos, bem como dos objetivos do estudo.

A abertura da trincheira pode ser feita por meio de escavação manual ou através de retroescavadeira, dependendo do número de repetições utilizadas no experimento, do tipo e da umidade do solo e do tamanho da trincheira. No caso da abertura com retroescavadeira, é necessário maior cuidado na demarcação prévia da área a ser escavada. As dimensões da trincheira devem exceder às do perfil que será analisado, em cerca de 0,20 m.



Figura 3: Abertura de trincheira longitudinalmente à linha para uma cultura perene. (Fonte: Experimento com citrus - Universidade Estadual de Londrina - UEL).



Figura 4: Abertura da trincheira transversalmente à linha para uma cultura anual ou semi-perene. (Fonte: Experimento com milho - Universidade Estadual de Londrina - UEL).

Um dos principais cuidados após a abertura da trincheira, é o nivelamento do perfil a ser estudado, o qual deve ficar o mais vertical possível, com o auxílio de uma pá reta ou vanga. Esta prática facilita a fixação da tela reticulada utilizada na filmagem, evitando-se erros na avaliação. Nesta operação, todas as raízes expostas na abertura da trincheira são cortadas rente ao perfil.

A exposição das raízes para posterior filmagem é feita com um instrumento pontiagudo, que pode ser um estilete ou uma faca. Nesta operação, remove-se uma pequena camada de solo, em torno de 0,01 m, procurando-se expor as raízes presentes no perfil.

Dependendo da textura e da umidade do solo, este preparo pode ser feito utilizando-se outros equipamentos, como por exemplo, um rastelo manual ou um rolo escarificador. Na Figura 5, apresenta-se o rolo escarificador desenvolvido pelo CNPDIA-EMBRAPA, constituído de um rolo cilíndrico de madeira com pregos dispostos na forma espiral. O

modelo do escarificador a ser utilizado para exposição das raízes deve ser ajustado às condições específicas de cada local, quanto à dureza do solo e ao teor de umidade. Tais condições definirão o tamanho dos pregos, o peso e as dimensões do escarificador.

Todos estes implementos e procedimentos não devem proporcionar muita deformação no perfil e devem permitir boa exposição das raízes, sem, entretanto, removê-las.

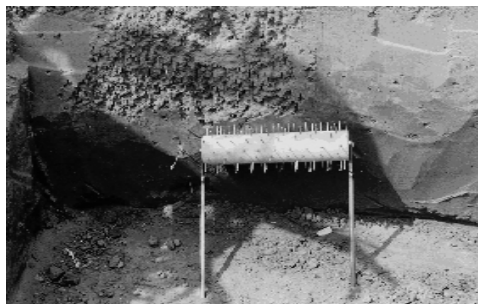


Figura 5: Detalhes do rolo escarificador desenvolvido pelo CNPDIA-EMBRAPA.

Para a análise, é imprescindível que haja um bom contraste entre as raízes e o solo, o que nem sempre é conseguido com o preparo do perfil. Em alguns casos, é necessário um tratamento complementar, que pode envolver desde a pintura de todo o perfil, até o simples umedecimento através de um pulverizador costal, e conseqüente escurecimento do solo.

Para a pintura, pode-se utilizar tinta "spray" de esmalte sintético, em geral branco ou amarelo, dependendo da cor do solo, aplicando-se sobre toda área a ser estudada, ou ainda, localizadamente (Figura 6). Uma vez aplicada a tinta, esta adere às raízes e ao solo. Desta forma, algum tipo de energia deve ser aplicada para retirá-la do solo, mantendo, no entanto, as raízes pintadas. Em geral, a pulverização via pressurização d'água é eficiente para tal. Complementando-se a retirada da tinta do perfil, utiliza-se faca ou estilete.

Em culturas perenes, pode-se optar pela pintura individual das raízes, conforme mostrado na Figura 7. Uma vez pintado o perfil, espera-se alguns segundos para secagem. Dependendo da umidade do ar, a secagem será mais ou menos rápida, sendo em média de 30 segundos.



Figura 6: Pintura do perfil com "spray" de esmalte sintético de secagem rápida e de cor branca. (Fonte: Experimento com milho na Fazenda Experimental de Pindorama - CNPDIA-EMBRAPA).

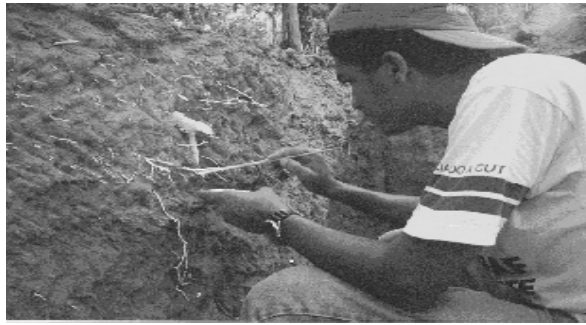


Figura 7: Pintura individualizada das raízes utilizada em culturas perenes.(Fonte: Experimento com videira - CPATSA-EMBRAPA).

Nas imagens das Figuras 8-a e 8-b, pode-se verificar um exemplo do contraste obtido com a pintura do perfil.

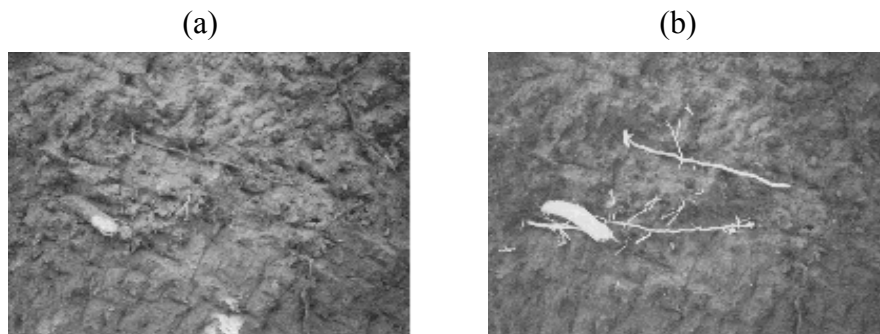


Figura 8: (a) Imagem de um perfil com raízes sem pintura com pouco contraste solo-raiz. (b) Imagem do perfil pintado com bom contraste solo-raiz. (Fonte: Experimento com videiras - CPATSA-EMBRAPA).

A obtenção da imagem digital, deve ser feita levando-se em consideração alguns fatores: a delimitação da área a ser analisada, a identificação da quadrícula, a quantidade de luz incidente e a posição da câmara em relação ao perfil.

A delimitação da área a ser fotografada é feita com o auxílio de um sistema reticulado. Em geral, utiliza-se o reticulado de 1 m de largura por 1 m de profundidade, com malha de 0,20 x 0,20 m (Figura 9).

Em culturas perenes, pode-se confeccionar um reticulado do tamanho do perfil a ser avaliado, com intuito de se evitar a movimentação do mesmo e a demarcação das posições filmadas. Pode-se ainda optar pela utilização de uma malha um pouco maior, em torno de 0,25 x 0,25 m para se reduzir o número de imagens por perfil.

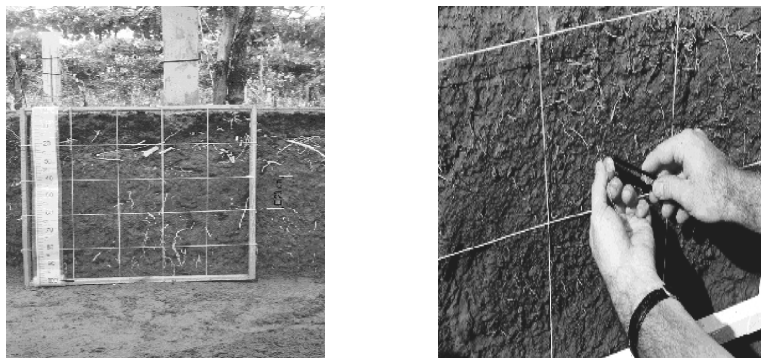


Figura 9: Sistema reticulado de 1x1 m com malha de 0,20 x 0,20 m.(Fonte: Experimento com videiras - CPATSA-EMBRAPA).

Com a subdivisão do perfil para tomadas de imagens através das quadriculas do sistema reticulado, faz-se necessária a identificação de cada uma destas para que se facilite o processo de digitalização das imagens.

Outro ponto a se considerar é o posicionamento do sistema reticulado no perfil, que deve evitar que as depressões apareçam nas quadriculas. Para isto, deve-se utilizar um pequeno ajuste na inclinação da tela em relação ao terreno, e, quando não for possível, descontar esta área durante a análise.

Estando devidamente demarcada e identificada a área a ser fotografada, deve-se tomar os devidos cuidados com as condições de iluminação e quantidade de luz para posterior tomada. Nesta fase do trabalho, deve-se evitar a luz solar direta sobre o perfil, pois esta provoca reflexos no solo, dificultando a análise das raízes. Em dias nublados, encontra-se a condição ideal para obtenção de imagens. No entanto, ainda se faz necessário um pequeno sombreamento na parte superior do reticulado, de forma a se evitar que a interface deste com a superfície tenha um nível mais intenso de luz. Este procedimento é extremamente importante em dias ensolarados, quando também pode-se utilizar o sombreamento atrás da trincheira, acrescentando-se sombreamento localizado, com o auxílio de uma lona ou similar (Figura 10).



Figura 10: Sombreamento atrás da trincheira complementado com o sombreamento localizado. (Fonte: Experimento com citrus - Universidade Estadual de Londrina).

Em casos mais extremos, principalmente quando se opta pelo simples umedecimento para se obter o contraste solo-raiz, e também, quando a cor do solo dificulta este contraste, pode-se utilizar a obtenção de fotos noturnas ou o recobrimento total da trincheira durante o dia, ambos com iluminação artificial. Em casos mais apurados, utiliza-se um fotômetro para checar o nível de iluminação ao longo do perfil e definir o nível de sombreamento.

Contornados os problemas de iluminação, inicia-se a obtenção da imagem do perfil. Nesta etapa, deve-se tomar o máximo de cuidado com o posicionamento da câmara, que deve ser disposta perpendicularmente ao perfil a ser analisado. Não é necessário utilizar tripé para posicionar a câmara; no entanto, deve-se evitar ângulos na fotografia (Figura 10), procurando-se posicionar a mesma perpendicular ao eixo central da quadricula a ser imageada.

A aquisição de imagens de raízes lavadas para avaliação através do SIARCS® é feita a partir de amostras coletadas pelos diferentes métodos, monolito, trado, placa com pregos etc. (JORGE et al, 1994). Todos estes passam pelo processo de aquisição de uma amostra de solo com raízes para posterior separação.

Uma vez retirado o bloco de solo com raízes, estas devem ser separadas do mesmo. Diferentes formas de separação têm sido utilizadas, sendo a mais simples o peneiramento da amostra ainda seca. Para tanto, deve-se fazer uso de peneiras de diferentes malhas, de tal forma que se consiga separar todos os diâmetros de raízes presentes na amostra.

Outra forma de separação bastante utilizada, muitas vezes depois do peneiramento a seco, é a lavagem das raízes, de tal forma a retirar todos os fragmentos de solo e de matéria



orgânica presentes. Nesta etapa, também se utilizam peneiras de diferentes malhas.

Durante a lavagem, deve-se limpar ao máximo as raízes para que elas fiquem sem resíduos de solo e de outros detritos, tais como: palha, insetos etc.

Muitas vezes, antes da lavagem as amostras são secas em estufa para evitar sua deterioração até a completa lavagem e separação das raízes. Neste caso, as amostras são hidratadas, permanecendo submersas em água durante 24h.

Uma vez lavadas, as raízes devem ser espalhadas sobre uma bandeja de vidro disposta diretamente sobre o “scanner” de mesa. O espalhamento das raízes é feito com o auxílio de pinças, que também podem ser utilizadas para retirar alguns detritos ainda presentes (Figura 11). Posteriormente, com o auxílio de uma tesoura preparam-se as amostras com aproximadamente 5 cm de comprimento, não sendo necessário a secção de todos os segmentos da raiz. Depois, adiciona-se uma fina camada de água, adicionando uma pequena porcentagem de sal, o suficiente para cobrir a bandeja, procurando-se distribuir as raízes ao longo da mesma (Figura 12). O sal ajuda no empuxo das raízes finas minimizando problemas de bolhas de ar. Nesta etapa, deve-se tomar o cuidado de posicionar as raízes mais grossas longitudinalmente ao “scanner”.

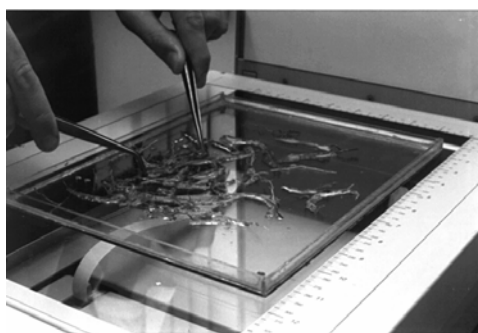


Figura 11: Espalhamento das raízes e retirada de pequenos fragmentos de solo ou de palha efetuados diretamente sobre o “scanner” de mesa.



Figura 12: Utilização de uma fina camada de água para separar as raízes dispostas sobre uma bandeja de vidro colocada diretamente sobre o “scanner” de mesa.

Durante a distribuição, quando possível pode ser feito o agrupamento das raízes por classes de diâmetros similares. Com esta operação, evitam-se sombras provenientes das raízes grossas sobre as muito finas. Este cuidado facilita a análise.

Uma vez concluída a distribuição das raízes, coloca-se uma borda feita de isopor ao redor da bandeja, conforme figura 13, com o objetivo de evitar sobras provenientes das frestas ocasionadas devido à altura da bandeja, quando fechada a tampa do “scanner”. Finalmente, fecha-se a tampa do mesmo e se inicia a digitalização.



Figura 13: Borda de isopor colocada ao redor da bandeja de vidro para evitar sombras.

As dimensões das bandejas utilizadas no CNPDIA-EMBRAPA foram de: 15 x 21; 20 x 25 e 21 x 30 cm, todas com 1 cm de altura.

Uma variação também utilizada no preparo das amostras de raízes mais finas é a utilização de papel-filtro para distribuição destas, evitando-se a utilização de água sobre o “scanner”. Neste caso, após a limpeza das raízes e separação de detritos, coloca-se um papel-filtro dentro da peneira de menor malha, e dentro d’água procura-se distribuir as raízes evitando-se sobreposição (Figura 14). Retira-se com cuidado a peneira da água e espera-se secar por alguns minutos. Enquanto isso, prepara-se outra amostra. Quando terminada a secagem do papel-filtro, no qual se encontram as raízes, coloca-se o mesmo sobre o “scanner” e procede-se à digitalização.

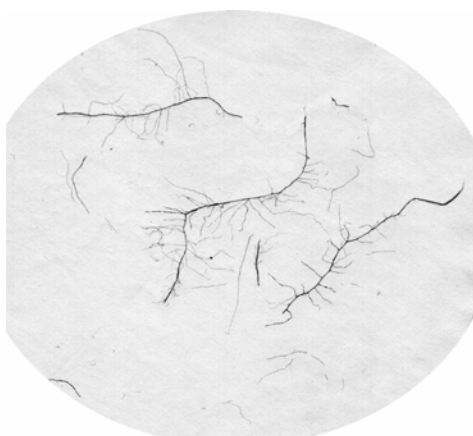


Figura 14: Papel-filtro depois de seco com a distribuição das raízes efetuada dentro d’água.

Também pode-se utilizar as amostras de raízes lavadas secas em estufa. Neste caso, faz-se a distribuição das mesmas diretamente sobre o “scanner” de mesa, tomando-se os mesmos cuidados descritos para as amostras dentro d’água.

#### *b) Segmentação*

Dependendo do processo de aquisição da imagem, os valores de cor ou tons de cada pixel da imagem se concentram em uma pequena faixa de valores, resultando numa imagem escura ou clara que pode esconder alguns detalhes. Neste caso, é necessário fazer um pré-processamento de realce de contraste mudando os valores originais de intensidade de modo a utilizar melhor a faixa de valores numéricos disponíveis, aumentando-se assim o contraste entre os objetos de uma cena e seu fundo. A chave para se entender as técnicas de realce por contraste, consiste em entender o conceito de histograma de uma imagem. Um histograma é uma representação gráfica dos valores de intensidade, ou cor, contidos em uma imagem. Para imagens em tons de cinza, esses valores variam de 0 a 255, podendo ser representados

graficamente como sendo o eixo  $x$  do gráfico de ocorrências de cada um desses valores, conforme a Figura 15. Quando são imagens coloridas, em geral são três gráficos, um para cada componente de cor, ou seja, R (vermelho), G (verde) e B (azul), sendo cada um deles variando de 0 a 255, no eixo  $x$ . Na Figura 15 é apresentado um exemplo de uma imagem de perfil de solo típico obtida em tons de cinza e o respectivo histograma.

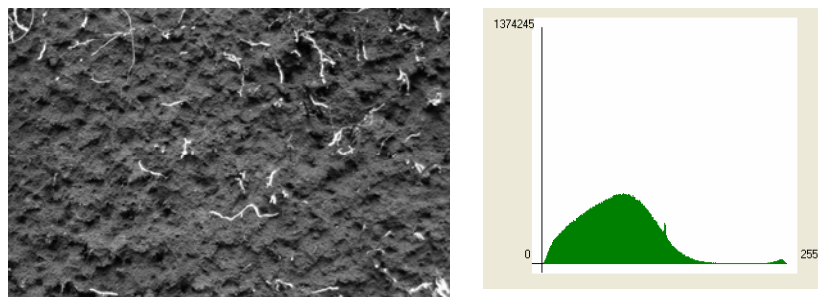


Figura 15: Imagem em tons de cinza de perfil de raízes e o respectivo histograma.

Por meio da manipulação do histograma de uma imagem, é possível aplicar vários realces na imagem. O objetivo da técnica é expandir faixas estreitas de valores de intensidades tipicamente presentes em uma imagem para uma faixa mais ampla. Esta é uma das técnicas mais simples de realce por manipulação do histograma. Ela envolve a identificação dos limites inferior e superior do histograma e a aplicação de uma transformação linear, logarítmica ou exponencial para aumentar sua faixa estreita para toda a faixa existente de níveis de cinza. Um aumento linear expande uniformemente esta pequena faixa para que a mesma cubra toda a faixa de valores de 0 a 255. Isto aumenta o contraste na imagem com áreas de tons claros aparecendo mais claras e áreas de tons escuros aparecendo mais escuras.

A segmentação de imagens é um processo que tipicamente particiona o domínio espacial de uma imagem em subconjuntos mutuamente exclusivos, chamados regiões, onde cada região é uniforme e homogênea com respeito a algumas propriedades como tom ou textura e cujos valores diferem, em alguns aspectos e significados, das propriedades de cada região vizinha. Um bom processo de segmentação deve resultar em regiões que sejam uniformes e homogêneas com respeito a alguma característica. Por exemplo, nível de cinza ou textura. Regiões adjacentes devem ter valores significativamente diferentes com respeito à característica segmentada.

A segmentação pode ser implementada por diferentes técnicas, como por exemplo, a limiarização (*thresholding*), detecção de bordas e extração de regiões. A utilizada no SIARCS é a limiarização, e representa o processo mais simples de segmentação. A limiarização é a transformação da imagem de entrada  $f(x,y)$  gerando uma imagem de saída  $g(x,y)$  da seguinte forma:  $g(x,y) = 1$  para  $f(x,y) \geq T$  e  $g(x,y) = 0$  para  $f(x,y) < T$ , onde  $T$  é o limiar escolhido para se estabelecer a segmentação. Como resultado tem-se uma imagem binária, onde, geralmente o objeto e/ou a região de interesse são classificados com valor “1” e o fundo ou o restante com valor “0”.

A segmentação automática através do uso de limiar é feita com métodos de detecção automática do nível de limiarização. Se algumas propriedades da imagem são conhecidas previamente, a escolha do limiar para segmentação é simplificada. A detecção do limiar pode ser efetuada de diferentes formas: avaliando a forma do histograma e seus vales, determinando o limiar ótimo, etc. Uma das formas mais utilizadas de limiarização automática é a limiarização de Otsu (1979).

Em histogramas com dois picos bem distintos, o limiar pode ser determinado como o mínimo entre os dois máximos locais. Estes histogramas mostram a presença de duas características bem distintas na imagem, como pode ser observado na Figura 16. Observando

a imagens de raízes da Figura 16a nota-se que as raízes possuem tons escuros, próximos da intensidade zero e o fundo com tom de cinza próximo de 128. Pelo histograma da imagem, apresentado na Figura 16b, nota-se um pico central referente aos tons de cinza do fundo e um pico junto ao eixo do zero relativo às raízes. Neste sentido, uma limiarização com corte no meio entre os dois picos resultaria numa boa segmentação da imagem, como pode ser visto na Figura 17.



Figura 16: Imagens de raízes lavadas e seu histograma

### Limiarização de Otsu

O método de limiarização bimodal de Otsu (OTSU, 1979) é baseado na análise de discriminante. A operação de limiarização é considerada como sendo o particionamento dos pixels de uma imagem de  $l$  níveis de cinza em duas classes,  $C_0$  e  $C_1$ , que podem representar o objeto e o fundo, ou vice-versa, sendo que esta partição se dará no nível de cinza  $t$ , desta forma  $C_0 = \{0, 1, \dots, t\}$  e  $C_1 = \{t + 1, t + 2, \dots, l\}$ .

O método de Otsu como proposto disponibiliza meios para se analisar outros aspectos além da seleção de um limiar ótimo para uma dada imagem. Para a seleção do limiar  $t^*$  de uma imagem, as classes de probabilidades  $\omega_0$  e  $\omega_1$  indicam as porções das áreas ocupadas pelas classes  $C_0$  e  $C_1$ . As médias de classes  $\mu_0$  e  $\mu_1$  servem como estimativa dos níveis médios das classes na imagem original em níveis de cinza. Além disso, o valor máximo de  $\eta$ , denotado por  $\eta^*$ , pode ser usado como medida para avaliar a separabilidade das classes  $C_0$  e  $C_1$  na imagem original ou a bimodalidade do histograma. Esta é uma medida bastante significativa pois é invariante para transformações afins da escala de níveis de cinza e é determinada unicamente dentro do intervalo  $0 \leq \eta \leq 1$ .

O limite inferior (zero) é obtido somente quando uma dada imagem tenha um nível de cinza único e constante e o limite superior (um) é obtido somente quando imagens de dois valores são dadas.

Em imagens digitais, a uniformidade dos objetos tem papel importante na separação destes objetos do fundo. De fato, a abordagem de Otsu para limiarização de imagens em nível de cinza é eficiente com base na uniformidade medida entre as duas classes  $C_0$  e  $C_1$  a serem segmentadas. O método proposto se caracteriza por sua natureza não paramétrica e não supervisionada de seleção de limiar e tem as seguintes vantagens:

- O processo como um todo é muito simples. São utilizados somente os momentos cumulativos zero e de primeira ordem do histograma de níveis de cinza;
- Uma extensão direta para problemas que exijam vários limiares é viabilizada face ao critério no qual o método está baseado, qual seja, a análise de discriminantes;
- Um limiar ótimo (ou conjunto de limiares) é selecionado de forma automática e estável, não baseado na diferenciação (uma propriedade local como um vale), mas sim na integração (propriedade global) do histograma;
- Viabiliza a análise de outros aspectos importantes, tais como estimativa dos níveis médios das classes, avaliação da separabilidade das classes, etc;
- O método é extremamente genérico; cobre um largo escopo de processos de decisão não supervisionados; o conjunto de suas aplicações não se limita a binarização de imagens em

níveis de cinza tal como descrito anteriormente, mas também pode ser utilizado em outros casos de classificação não supervisionada no qual um histograma de alguma característica discriminativa que classifique objetos esteja disponibilizado.

Cabe ressaltar, no entanto, que o limiar calculado não é apropriado para imagens nas quais as variâncias dos níveis de cinza de objetos e fundo ou populações de pixels correspondentes sejam extremamente diferentes.

Na Figura 17 pode ser visto uma limiarização por Otsu comparada com uma limiarização manual. O resultado é totalmente aceitável para esta aplicação.

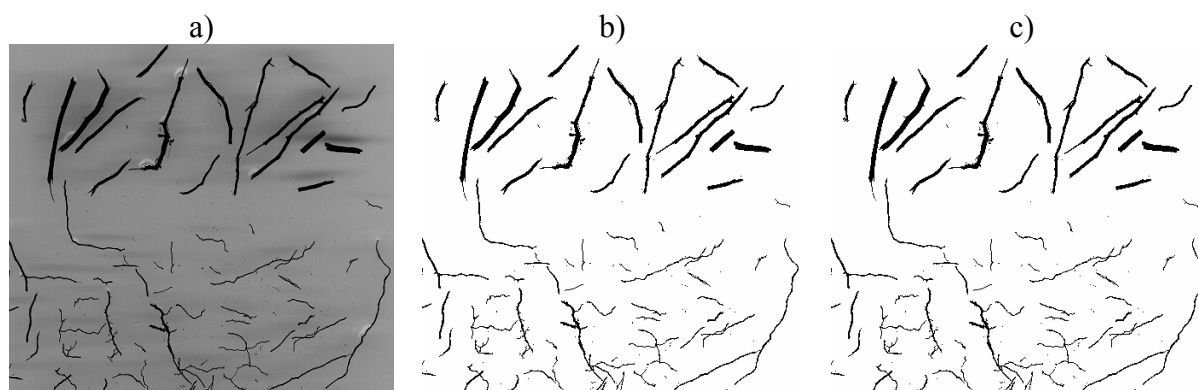


Figura 17: Imagem de raízes (a) e tratadas com segmentação por limiarização manual (b) automática por Otsu (c).

### c) Esqueletonização

A técnica de esqueletonização (skeletonizing algorithm) é frequentemente utilizada para obter o esqueleto de uma região através do seu afinamento. Afinamento é o processo de redução de uma forma para uma versão simplificada que ainda retém as características essenciais do objeto original. A versão afinada da forma é chamada de esqueleto. O esqueleto de uma região pode ser definido em termos da Transformação do Eixo Médio (*Medial Axis Transformation*) - MAT.

A MAT de uma região  $R$  com fronteira  $B$  é obtida da seguinte forma: para cada ponto  $p$  em  $R$ , encontra-se seu vizinho mais próximo em  $B$ . Se  $p$  tem mais de um vizinho à mesma distância mínima, diz-se que  $p$  pertence ao eixo médio (esqueleto) de  $R$ .

Os algoritmos de esqueletonização excluem de forma sucessiva diversas camadas da extremidade (borda) de um padrão até que apenas o esqueleto permaneça. A exclusão de um ponto  $p$  dependerá dos *pixels* da vizinhança deste ponto. De acordo com o modo de como se examinam os pixels, estes algoritmos podem ser classificados como iterativos ou não iterativos.

Os algoritmos de afinamento iterativos são aqueles que produzem o esqueleto através da exclusão repetitiva das características da borda do objeto. Eles podem ser subdivididos em duas categorias: sequenciais e paralelos. Nos algoritmos sequenciais, os pixels são examinados para exclusão em uma sequência fixa em cada iteração, e a exclusão de  $p$  na  $n$ -ésima iteração depende de todas as operações que tenham sido realizadas até aquele momento. Por outro lado, nos algoritmos paralelos, a exclusão na  $n$ -ésima iteração depende apenas dos pixels da iteração  $n-1$ . Por isso, todos os pixels podem ser analisados independentemente, de forma paralela a cada iteração.

Os algoritmos de afinamento não-iterativos são aqueles que extraem o esqueleto de um objeto a partir de uma varredura na imagem. Eles produzem o esqueleto do objeto diretamente em um único passo sem examinar individualmente todos os pixels. De certa forma esses algoritmos são mais intuitivos que os métodos iterativos e geram esqueletos que conservam

propriedades globais, além disso, conseguem manter a conectividade do objeto durante o processo de afinamento.

O problema para os algoritmos de afinamento é o de determinar quais pixels são redundantes em uma imagem. Por outro lado, no processo de afinamento os pixels que devem ser removidos são primeiramente marcados e posteriormente removidos em um segundo passo. Este processo é repetido até que não existam mais pixels redundantes, até o ponto que os pixels remanescentes são aqueles que pertencem ao esqueleto do objeto. Este método chamado de afinamento é caracterizado por sucessivas deleções e é um método bastante utilizado na prática. O esqueleto gerado do objeto precisa permanecer intacto e deve respeitar as seguintes propriedades:

- As regiões afinadas precisam ter um pixel de largura;
- Os pixels que formam o esqueleto precisam permanecer próximos do centro da região de cruzamento de regiões. É necessário que os pixels do esqueleto formem o mesmo número de regiões que a imagem original apresentava.

Vários métodos já foram implementados e testados, conforme pode ser observado em Plotze e Bruno (2005). No entanto, um dos métodos mais rápidos e com bons resultados para o estudo de raízes é o método *Zhang-Suen* (1984).

#### Método *Zhang-Suen*

A idéia básica do método *Zhang-Suen* é decidir se um determinado pixel será eliminado olhando somente seus oito vizinhos. Existem duas regras para decidir se o pixel deve ou não ser removido.

A primeira regra diz que o pixel somente pode ser apagado o número de conectividade do mesmo for igual a um. Isto significa que o pixel é conectado somente a uma única região. Se um pixel possuir o número de conectividade igual a dois então, duas regiões conectadas poderão se separar e isto viola a terceira propriedade de eskeletonização.

A segunda regra é que o pixel somente pode ser apagado se este tiver mais de um e menos de sete vizinhos. Esta regra assegura que os pixels resultantes foram retirados sucessivamente das bordas da região da imagem, e não de suas partes internas. Para afinar uma região estas regras devem ser aplicadas para todos os pixels que pertencem a região, e os pixels que satisfazem as condições acima podem ser removidos.

Para realizar a eskeletonização de *Zhang-Suen* toma-se por base sempre a comparação do pixel que se está tentando eliminar sobre seus oito vizinhos. Existem quatro regras que devem ser aplicadas se e somente se as quatro forem satisfeitas, o pixel poderá ser eliminado. Tais regras asseguram que se o pixel em questão for eliminado não fará com que diferentes regiões ligadas por ele passem a ficar separadas. Também assegura que a eliminação de pixels sempre ocorrerá nas bordas do objeto.

A Figura 18 mostra uma imagem simulada de raízes lavadas e o resultado da eskeletonização por *Zhang-Suen* com 2, 4 e 10 iterações implementadas no software SIARCS®.

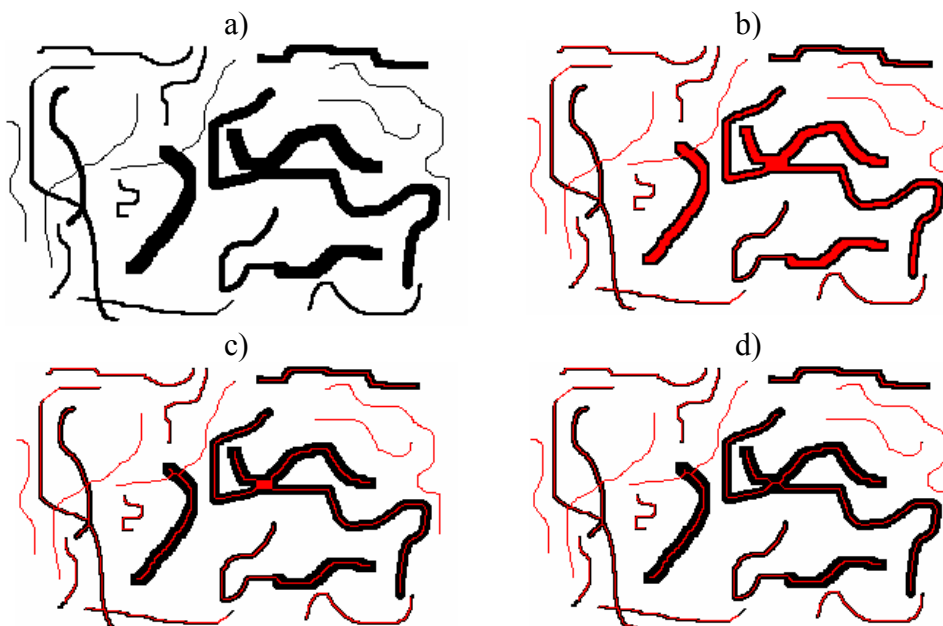


Figura 18. Imagem simulada de raízes (a) e resultados da esqueletonização por Zhang-Suen com 2 iterações (b), 4 iterações (c) e 10 iterações (d) implementadas no software SIARCS®.

#### *d) Determinação de diâmetros*

A abordagem utilizada na determinação de diâmetros é a morfologia matemática (MM), que é uma boa opção de ferramenta de processamento de imagens para lidar com problemas em Ciência do Solo.

A utilização da morfologia matemática na área de Processamento Digital de Imagens foi inicialmente proposta por Georges Matheron e Jean Serra, e consiste no estudo da forma, isto é, o estudo da estrutura geométrica de entidades presentes em uma imagem (SERRA, 1982; FACON, 1996). O seu objetivo é extrair informações relativas à geometria e à topologia de um conjunto desconhecido de uma imagem. A grande chave da morfologia matemática é o elemento estruturante. O elemento estruturante é um conjunto cuja forma e tamanho são conhecidos. Esse elemento é comparado, a partir de uma transformação, ao conjunto desconhecido da imagem. O seu formato e seu tamanho possibilitam testar e quantificar de que maneira o elemento estruturante “está ou não está contido” na imagem. Marcando-se, na imagem resultante, as posições onde o elemento estruturante inclui-se na imagem original, obtém-se uma primeira resposta sobre a estrutura geométrica das entidades presentes na imagem.

A morfologia matemática representa um ramo do processamento não linear e permite processar imagens com objetivos de realce, de segmentação, de detecção de bordas, de esqueletização, de afinamento, de análise de formas, dentre outros. As técnicas morfológicas se aplicam tanto em imagens binárias como para imagens em tons de cinza e coloridas (FACON, 1996). Ao contrário de outras técnicas de processamento de imagens, a morfologia matemática não requer cálculos matemáticos complexos, dispensa a fase de treinamento e não há necessidade de determinação de parâmetros, como é o caso das redes neurais, contornos ativos e algoritmos genéticos, respectivamente.

Em imagens binárias, os conjuntos em questão são membros do espaço inteiro bidimensional  $Z^2$ , onde cada elemento do conjunto é um vetor 2D cujas coordenadas são as coordenadas  $(x, y)$  do pixel preto (por convenção) na imagem. Imagens com mais níveis de cinza podem ser representadas por conjuntos cujos elementos estão no espaço  $Z^3$ . Neste caso,

os vetores têm três elementos, sendo os dois primeiros as coordenadas do pixel e o terceiro seu nível de cinza.

Para a determinação de diâmetros se utiliza a transformada de distância morfológica.

Um dos objetivos de reconhecimento de formas binárias é imitar a habilidade humana em se reconhecer uma variedade de formas em uma imagem. Uma dessas técnicas pode ser o cálculo da função distância que pode ajudar a identificar subconjuntos em conjuntos complexos. No caso do estudo de raízes, é utilizada para caracterização de classes de diâmetros das raízes.

Partido da definição da erosão em nível de cinza:

$$\varepsilon_g(f)(x) = \min\{f(y) - g(y - x) \mid y \in (B + x) \cap E\}$$

Para cada pixel  $p$ , a Transformada de Distância (TD) representa a distância do pixel  $p$  ao fundo, dada por:

$$TD_g(f)(x) = \min\{n \in N \mid p \notin \varepsilon_{ng}(f)(x)\}$$

O algoritmo para uma abordagem morfológica da função distância de uma imagem binária foi definida em Facon (1996), da seguinte forma:

- Uma nova imagem  $X$  é criada onde os pixels pretos da imagem binária  $X$  são alterados com um valor "infinito" (qualquer valor maior que a maior distância) e os pixels brancos da imagem (correspondentes ao fundo) são alterados com o valor 0.
- A nova imagem  $X$  é rastreada de duas maneiras, a primeira da esquerda para direita de cima para baixo, e a segunda da direita para esquerda de baixo para cima.
- A Função Distância é determinada por erosão em níveis de cinza de  $X$ .
- A erosão pode ser realizada com qualquer elemento estruturante que será dividido em duas “metades” para acelerar o processo. A primeira “metade”  $E1$  do elemento estruturante vai de seu primeiro ponto superior esquerdo até o seu centro não incluído. A segunda “metade”  $E2$  começa imediatamente depois do centro 2 do elemento estruturante até o seu último ponto inferior direito. Desse modo a primeira parte do rastreamento é realizar a erosão na imagem com o  $E1$  e depois com o  $E2$  como descrito anteriormente.

Um exemplo do mapa de distâncias pode ser visto da Figura 19.



Figura 19: Imagem binária (a) e a transformada de distância (b).

#### e) Mapa de classes de diâmetros

Depois de segmentada a imagem de raízes pelos métodos de limiarização, sendo o mais usual, a limiarização de Otsu já descrita, determina-se o esqueleto da imagem e a transformada de distância. A informação dada pela transformada de distância é o mapa de classes de diâmetros de raízes e que pode ser separado e visualizado segundo o esqueleto gerado. Para melhor entendimento é apresentado um exemplo na Figura 20. Neste, a imagem típica de raízes lavadas (a), é processada gerando o esqueleto sobre as raízes. O esqueleto é colorido segundo a classe de diâmetros determinada na transformada de distância (b) e (c). As classes de diâmetros podem ser visualizadas em forma de histograma de frequência (d).



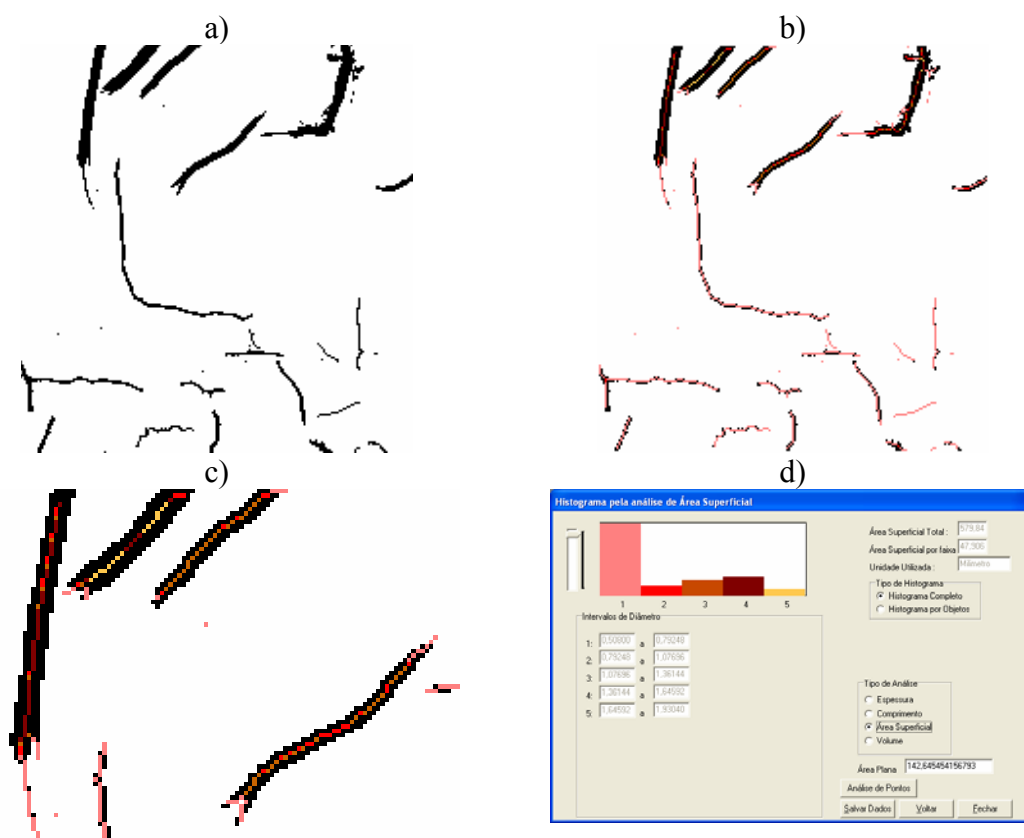


Figura 20: Imagem de raiz binarizada (a), o esqueleto classificado pela transformada de distância (b) e com zoom (c) e o (d) histograma de frequências das classes de diâmetros (JORGE e CRESTANA, 2005).

*f) Cálculos: área superficial, volume, comprimento e diâmetros*

A partir das classes de diâmetros, efetua-se o cálculo de comprimento de raízes por faixa de diâmetro. Considerando a raiz como sendo um modelo cilíndrico, pode-se calcular facilmente a área superficial das raízes pelo cálculo da área da superfície de um cilindro, com comprimento e diâmetros conhecidos. Para cada classe de diâmetro, também é possível calcular os valores totais ou médios ponderados. Da mesma forma, se calcula o volume, que é dado pelo volume de um cilindro.

Todas as etapas descritas são aplicadas tanto para raízes lavadas, como para raízes em perfil de solo, ou seja, efetua-se a segmentação das imagens, o cálculo do esqueleto, a transformada de distância e a análise. O diferencial é a segmentação, que para raízes em perfil não se deve aplicar o método de Otsu, por apresentar muitos problemas devido a variação de padrão de cor e condições de preparo do perfil de solo.

Para análise do perfil, é muito importante o cuidado na aquisição da imagem, conforme descrito por Jorge (1996) e Jorge (1999).

A limiarização manual complementada de operações de retoque manual na imagem ainda é a melhor forma para segmentação das imagens, conforme proposto no sistema SIARCS® (EMBRAPA, 1996). Porém, para perfis bem preparados e com bom contraste, várias outras técnicas de segmentação por cor podem ser utilizadas.

Na Figura 21, podem ser observados os resultados da segmentação através do SIARCS 3.0 para o perfil da Figura 1. Neste caso, tem-se apenas a determinação de comprimento a partir do esqueleto da imagem.

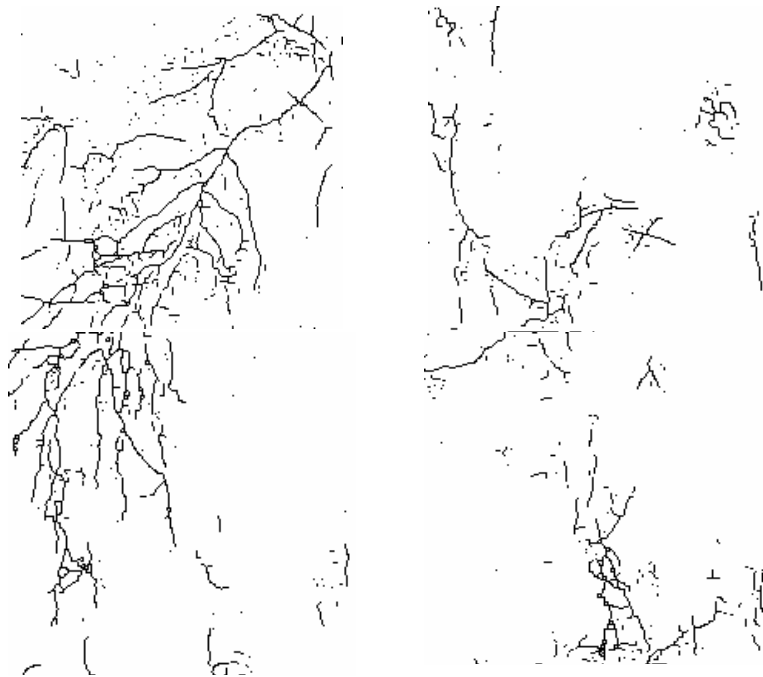


Figura 21: Segmentação da imagem de perfil de raízes da Figura 1 através do SIARCS 3.0(JORGE e CRESTANA, 2005).

Aplicando-se a transformada de distância, também pode ser feito o mesmo processo para determinação de classes de diâmetros, como pode ser visto na Figuras 22 e 23.

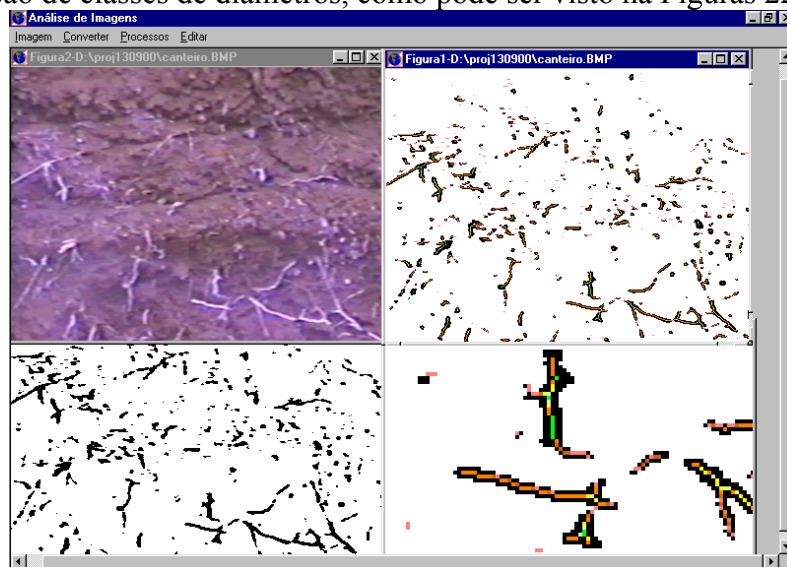


Figura 22: Imagem de perfil de raízes e seu processamento com a nova versão do SIARCS (JORGE e CRESTANA, 2005).

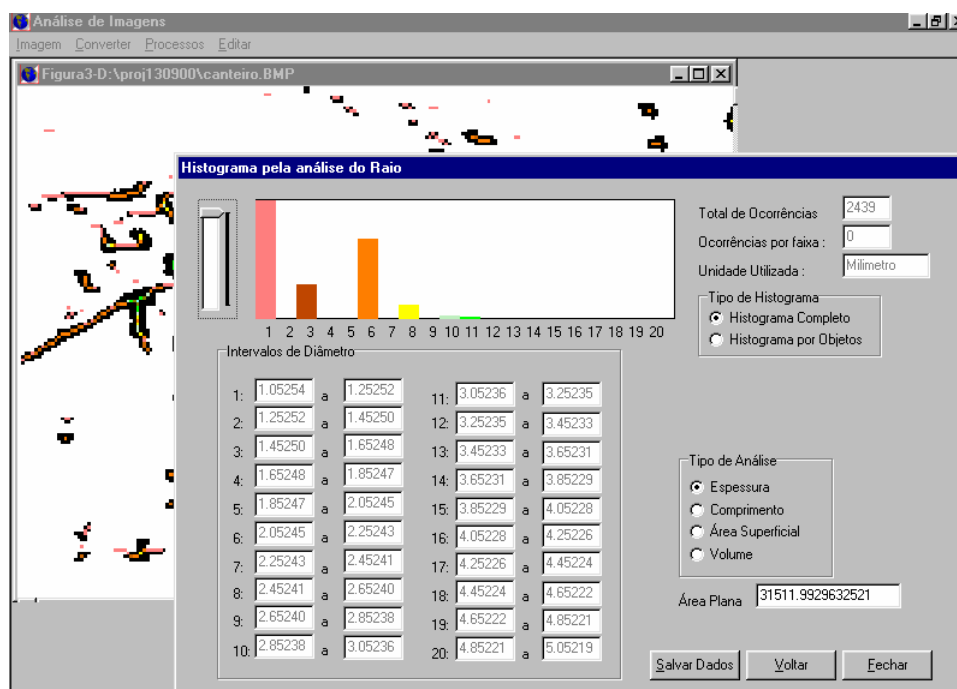


Figura 23: Histograma de distribuição de diâmetros das raízes (JORGE e CRESTANA, 2005).

Além do SIARCS® desenvolvido pela Embrapa, existem outras opções de software no mercado disponíveis para análise de raízes, como o CI – 600 ([www.cid-inc.com./products/ci-600](http://www.cid-inc.com./products/ci-600)), o WinRhizo ([www.regent.qc.ca](http://www.regent.qc.ca)) e o MSU Roots Tracer ([www.roots.rsgis.msu.edu/roots.doc](http://www.roots.rsgis.msu.edu/roots.doc)).

### Referências bibliográficas

- ABI SAAB, O.J.G.; RALISCH, R.; MEDINA, C.C.; JORGE, L.A.C.; TRIBULATTO, M.C.; SILVA JÚNIOR, D.A. Effect of four levels of liming on an alic soil on the root development of corn (*Zea mays* L.). 8p. In: International Symposium on Plant-Soil Interactions at Low pH, IV. Belo Horizonte, **Proceedings...**, Sete Lagoas. 1996.
- BASSOI, L.H.; FANTE JÚNIOR, L.; JORGE, L.A.C.; CRESTANA, S.; REICHARDT, K. Distribuição do sistema radicular do milho irrigado em terra roxa estruturada latossólica: I: comparação de metodologias. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v.51, n.3, p.513-518, set./dez. 1994a.
- BASSOI, L.H.; FANTE JÚNIOR, L.; JORGE, L.A.C.; CRESTANA, S.; REICHARDT, K. Distribuição do sistema radicular do milho irrigado em terra roxa estruturada latossólica: II: comparação entre cultura irrigada e fertirrigada. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v.51, n.3, p.541-548, set./dez. 1994b.
- BASSOI, L.H.; ASSIS, J.S. Considerações sobre a utilização dos métodos do perfil auxiliado pelo processamento de imagens digitais e do monolito, na análise da distribuição de raízes no solo. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE INSTRUMENTAÇÃO AGROPECUÁRIA-SIAGRO, I, São Carlos-SP, 1996. **Anais...** São Carlos: EMBRAPA-CNPDIA, 1996.
- BOHM, W. **Methods of studying root systems**. New York, Springer-Verlag, 1979. 194p.
- BOX Jr., J.E. Modern methods for root investigations. In: WASEL, Y., ESHEL, A., KAFKAFI, U. **Plant roots. The hidden half**, 2.ed. New York: Marcel Dekker, 1996. p.193-237.
- CINTRA, F.L.D.; NEVES, C.S.V.J. Aspectos metodológicos do estudo do sistema radicular de plantas perenes através de imagens. **Boletim Informativo da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**. Campinas, v.21, n.3, set./dez. 1996.

CRESTANA, S.; GUIMARÃES, M.F.; JORGE, L.A.C.; RALISCH, R.; TOZZI, C.L.; TORRENETO, A.; VAZ, C.M.P. Avaliação da distribuição de raízes no solo auxiliada por processamento de imagens digitais. **Rev. bras. Ci. do Solo**, Campinas, v.18, n.3, p.365-371, set./dez. 1994.

EMBRAPA (Brasília, DF), Lúcio André de Castro Jorge, Silvio Crestana. **Sistema integrado para análise de raízes e cobertura do solo - SIARCS**. BR NPI 004276. Patente requerida em dez. 1996.

FACON, J. (1996) Morfologia Matemática: Teoria e Exemplos. PUC-Paraná, Curitiba.

FANTE JÚNIOR, L.; JORGE, L.A.C.; REICHARDT, K.; CRESTANA, S. Avaliação do sistema radicular por diferentes métodos. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA: PEQUENA PROPRIEDADE X DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL, 10, Florianópolis, jul. 1994. **Resumos...** Florianópolis: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1994. p.318-319. ref.104.

GUIMARÃES, M.F.; JORGE, L.A.C.; DE MARIA, I.C.; TAVARES FILHO, J.; BICUDO, S.J.; CRESTANA, S. Três metodologias de avaliação de raízes: descrição, limitações e vantagens. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE INSTRUMENTAÇÃO AGROPECUÁRIA-SIAGRO, I, São Carlos-SP, 1996. **Anais...** São Carlos:EMBRAPA-CNPDI, 1996.

IVO, W.M. Monólito com Placas de Pregos. In: WORKSHOP SOBRE SISTEMA RADICULAR: METODOLOGIAS E CASOS, 1., Aracajú, SE, 1999. **Anais...**Aracajú: EMBRAPA-Tabuleiros Costeiros, 1999.p.269-274

JORGE, L.A.C. Descrição detalhada do método de trincheira com produção de imagens para uso de SIARCS®. In: WORKSHOP SOBRE SISTEMA RADICULAR: METODOLOGIAS E CASOS, 1., Aracajú, SE, 1999. **Anais...**Aracajú: EMBRAPA-Tabuleiros Costeiros, 1999.p.255-267

JORGE, L.A.C.; **Circular Técnica 01/96** – EMBRAPA/CNPDI, São Carlos – SP, 1996.

JORGE, L.A.C.; CRESTANA, S. Recomendações práticas para utilização do SIARCS 3.0 nos estudos de raízes, cobertura vegetal, folhas e outras aplicações. São Carlos: EMBRAPA-CNPDI, 1996. 34p. (EMBRAPA-CNPDI. **Recomendação Técnica**, 4).

JORGE, L. A. C.; CRESTANA, S. Processamento de Imagens em Ciência do Solo - raízes, morfologia e cobertura do solo. In: MARTIN NETO, L.; VAZ, C. M. P.; CRESTANA, S. (Eds.). **Instrumentação avançada em ciência do solo**. São Carlos, SP: Embrapa Instrumentação Agropecuária, 2005. no prelo.

JORGE, L.A.C.; RALISCH, R.; ABI SAAB, O.J.G; MEDINA, C.C.; GUIMARÃES, M.F.; NEVES, C.S.V.J.; CRESTANA, S.; CINTRA, F.L.D.; BASSOI, L.H.; FERNANDES, S.B.V. Aquisição de imagens de raízes. In: JORGE, L.A.C., ed. Recomendações práticas para aquisição de imagens digitais analisadas através do SIARCS. São Carlos: EMBRAPA-CNPDI, 1996. (EMBRAPA-CNPDI. **Circular Técnica**, 1). p. 2-28.

MEDINA,C.C. Método da trincheira com contagem manual das raízes.In: WORKSHOP SOBRE SISTEMA RADICULAR: METODOLOGIAS E CASOS, 1., Aracajú, SE, 1999. **Anais...**Aracajú: EMBRAPA-Tabuleiros Costeiros, 1999.p.275-281

OTSU, N. "A Threshold Selection Method from Gray-level Histograms", IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, v. SMC 9, no 1, pp.62-66, 1979NICHOLLS, H.J.**The Encyclopedia of Model Aircraft**, Octopus Books Limited, London, 1979.

PLOTEZE, R. O., BRUNO, O. M. Estudo e comparação de algoritmos de esqueletonização para imagens binárias. IN: IV Congresso Brasileiro de Computação – CBComp 2004. **Anais...**, p.59-64. 2005

ROCHA FILHO, J. da; JORGE, L.A.C.; PRIMAVESI, O.; CRESTANA, S. Distribuição radicular de forrageiras, afetada pela intensidade de manejo, avaliada por análise de imagens digitais. In: CONGRESSO LATINO AMERICANO DE CIÊNCIA DO SOLO, 13, Águas de

Lindóia-SP, ago. 1996. **Solo suelo 96**. Campinas: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1996. 5p. CD-ROM.

SERRA, J. (1982) *Image Analysis and Mathematical Morphology*, Academic Press, London.

ZHANG, T. Y.; SUEN, C. Y. A fast parallel algorithm for thinning digital patterns. **Communications of the ACM**, New York, v. 27, n. 3, p. 236-239, 1984.