

Capítulo 1

Tomografia computadorizada de raios X ou gama

Carlos Manoel Pedro Vaz, Sílvio Crestana,
João de Mendonça Naime, Paulo Estevão Cruvinel

1. Introdução

A tomografia computadorizada (TC) de raios X ou gama é uma técnica que permite a visualização e a medida de parâmetros físicos do interior de materiais sem destruí-los, ou seja, é uma técnica não destrutiva de caracterização morfológica e medida de propriedades físicas de amostras e materiais. É, assim, uma excelente ferramenta não invasiva para a caracterização da estrutura e de estudos de processos dinâmicos em materiais de diversos tipos e composições, como amostras biológicas, minerais, tanto de materiais porosos como de líquidos. É uma técnica baseada na atenuação de radiação ionizante pela matéria e na reconstrução matemática de projeções radiológicas do objeto em estudo em diversas direções, sendo que as seções transversais reconstruídas (imagens) do objeto podem ser combinadas para a visualização tridimensional do mesmo. A Figura 1 apresenta um esquema ilustrativo do princípio da técnica e dois exemplos de imagens obtidas.

Sua utilização mais difundida e de impacto na sociedade tem sido no diagnóstico médico, no qual a técnica foi primeiramente introduzida e é mundialmente conhecida, sendo que a sua criação trouxe imensuráveis benefícios e melhorias na qualidade de vida da população, tanto que já em 1979 houve grande reconhecimento com o agraciamento do Prêmio Nobel de Medicina aos seus criadores. Em outras áreas correlatas à área médica, como a veterinária e a biomedicina, a tomografia tem sido também utilizada, mas o alto custo desses equipamentos tem inibido a sua utilização de forma mais

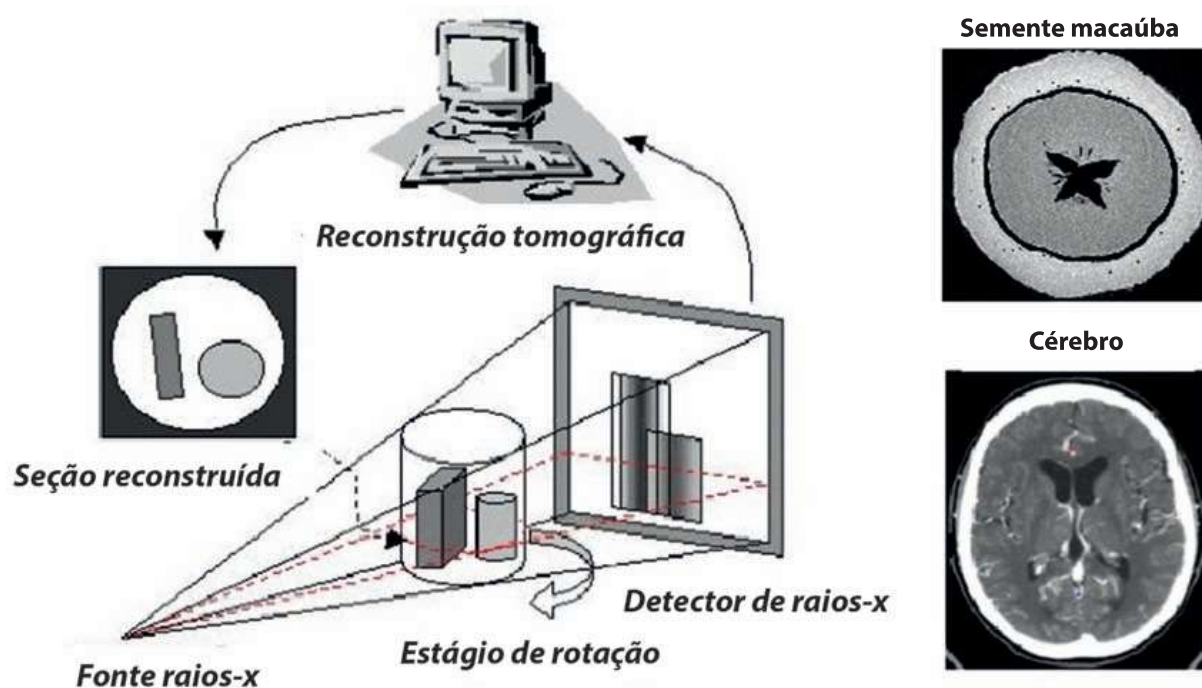


Figura 1. Esquema ilustrativo do processo de aquisição de imagens tomográficas.

abrangente em outras áreas, como a ciência dos materiais, botânica, zoolo-
gia, geologia, solos, eletrônica, mecânica, odontologia e farmácia.

Visando a criação de alternativas aos equipamentos médicos comerciais disponíveis, alguns grupos de pesquisa no Brasil e em outros países têm se dedicado ao desenvolvimento de equipamentos customizados para diversas aplicações, como a ciência do solo, fisiologia de plantas, geologia e paleontologia, dentre outras. Particularmente na área de ciência do solo, houve grande avanço na utilização da tomografia computadorizada para o estudo de processos de infiltração de água no solo e de medida de propriedades como a densidade, a umidade e a porosidade. Esses trabalhos foram pioneiramente desenvolvidos na década de 1980 por Petrovic et al. (1982), Hainsworth e Aylmore (1983) e Crestana et al. (1985). No Brasil, liderados pelo Dr. Sílvio Crestana, um grupo de pesquisadores da Embrapa Instrumentação Agropecuária iniciou trabalhos para o desenvolvimento de equipamentos simples, com preços muito inferiores aos comerciais e dedicados a estudos na área agrícola, como da caracterização de solos e avaliação de processos relacionados à irrigação, à erosão, à compactação, à germinação de sementes, dentre outros. Depois de mais de duas décadas de pesquisas nessa área, o grupo da Embrapa Instrumentação Agropecuária desenvolveu um tomógrafo de raios gama de primeira geração com resolução milimétrica, um tomógrafo de raios-X com resolução micrométrica, um tomógrafo de raios gama para uso em campo (portátil) e um tomógrafo de raios gama

portátil com arquitetura de feixe em leque (segunda geração), que diminui para alguns minutos o tempo para aquisição de uma imagem, que é de algumas horas para os equipamentos de primeira geração (Figura 2). Mais detalhes da construção desses equipamentos podem ser encontrados em Macedo et al. (2007).



Figura 2. Tomógrafos da Embrapa Instrumentação Agropecuária.

Mesmo com essas desvantagens relacionadas ao tempo de aquisição das imagens, um grande número de trabalhos de pesquisa, teses e trabalhos científicos foi gerado com o desenvolvimento desses equipamentos. A Tabela 1 descreve a cronologia desses desenvolvimentos, bem como alguns trabalhos publicados, tipos de aplicações e estudos realizados, com foco principal em problemas relacionados à ciência do solo, germinação de sementes, madeiras e outros. Em um outro esforço, no sentido da popularização da técnica da tomografia na ciência agrária, o grupo da Embrapa construiu equipamentos de tomografia para outros grupos de pesquisa, como o da Universidade Federal de Pelotas (UFPel) e o do Centro de Energia Nuclear na Agricultura (Cena-USP), no intuito de que a mesma pudesse ser acessada e utilizada em projetos de pesquisa visando a solução de problemas na área de física e manejo dos solos, principalmente. Em uma publicação recente, Pires et al. (2010) apresenta uma revisão de literatura detalhada dos 25 anos de contribuições dos grupos brasileiros de tomografia computadorizada e destaca o pioneirismo do grupo da Embrapa Instrumentação Agropecuária.

Tabela 1. Desenvolvimentos e algumas aplicações do grupo de tomografia da Embrapa Instrumentação e parceiros.

Ano	Tipo	Publicações	Desenvolvimento/ aplicação
1985	Metodologia	Crestana (1985) Crestana et al. (1985)	Medida da densidade e da umidade dos solos; germinação de sementes
1987	Instrumentação	Crestana et al. (1986) Cruvinel, (1987) Cruvinel et al. (1990)	Minitomógrafo
1989	Metodologia	Crestana et al. (1992) Vaz (1989) Vaz et al. (1989)	Estudos da compactação dos solos
1993	Metodologia	Posadas e Crestana (1993)	Infiltração preferencial da água no solo
1994	Instrumentação	Naime (1994)	Tomógrafo de campo
1997	Instrumentação	Biassusi et al. (1999) Cassaro (1994)	Tomografia de duplo feixe
1997	Instrumentação	Macedo (1997)	Desenvolvimento do microtomógrafo
1998	Metodologia	Macedo et al. (1998)	Medidas de selamento superficial solo
2001	Instrumentação	Naime (2001)	Tomógrafo com feixe em leque
2002	Metodologia	Macedo et al. (2002)	Densidade de madeira
2002	Metodologia	Fante-Junior et al. (2002)	Compactação em solo sob pivô central
2003	Metodologia	Cruvinel et al. (2003)	Avaliação de danos por besouros em madeiras
2005	Metodologia	Pedrotti et al. (2005)	Aplicações em sistema de plantio direto
2009	Metodologia	Cruvinel et al. (2009)	Processamento e reconstrução 3D para estudos de fluxo preferencial da água no solo
2011	Metodologia	Vaz et al. (2011) Beraldo et al. (2012)	Distribuição do tamanho de poros de solos Medidas da porosidade de solo em diferentes sistemas de manejo

Mais recentemente, surgiram alternativas comerciais de tomógrafos laboratoriais em uma faixa de preços acessíveis e de menor custo quando comparados aos preços dos equipamentos médicos, com resoluções e características mais favoráveis para a utilização em áreas diferentes das médicas. Esses equipamentos possibilitam a obtenção de imagens tomográficas com resolução de alguns micrometros em amostras de alguns centímetros de diâmetro. O equipamento permite também a obtenção de múltiplas imagens (feixe em cone) e a posterior reconstrução 3D do objeto, além da visualização e navegação no interior da imagem reconstruída com recursos computacionais sofisticados. Nas seções seguintes, serão apresentados diversos resultados e aplicações da técnica de tomografia computadorizada para alguns materiais de interesse do agronegócio.

2 Aplicações da tomografia computadorizada no agronegócio

Logo após o início do uso dos primeiros tomógrafos na área médica, em meados da década de 1970 (AMBROSE, 1973; HOUNSFIELD, 1973), iniciaram-se estudos para se avaliar a aplicabilidade da tomografia em pesquisa de outros materiais e áreas do conhecimento, como na avaliação de materiais arqueológicos (HEINEMANN, 1978), na certificação de materiais (VAINBERG et al., 1982), estudos em solos (CRESTANA et al., 1985; HAINSWORTH; AYLMOORE, 1983 e PETROVIC et al., 1982) e árvores (ONOE et al., 1983). Atualmente, a tomografia é uma técnica muito difundida e utilizada em diversas áreas, como na indústria, na caracterização de materiais biológicos, minerais e nos estudos de processos físicos químicos e biológicos. A Tabela 2 e a Figura 3 apresentam uma evolução das publicações (busca realizada na base ISI-Web of Knowledge) em estudos de materiais relacionados às áreas agrícolas e agroindustriais. Observa-se que até o ano 2000 houve um aumento consistente, mas relativamente pequeno, quando comparado com o aumento das publicações ocorridas após esse período e mais significativamente após 2005. Isso se deve ao grande desenvolvimento das tecnologias de raios X, detectores de radiação e sistemas computacionais velozes, que culminou no aparecimento de tomógrafos comerciais de bancada de alta resolução e com custo acessível para a pesquisa pré-clínica e de materiais (STOCK, 2008). Observa-se que as áreas de solos e ossos são as que mais utilizam a TC, sendo, portanto, as que mais se desenvolveram em termos de metodologias de análise e aplicações.

2.1 Aplicações na área de solos

A resolução espacial da imagem e o espectro energético da radiação utilizada são dois parâmetros importantes que definem o tipo de aplicação

e estudo a serem realizados. Em uma escala de resolução milimétrica e com a utilização de raios gama (radiação monoenergética) é possível se quantificar, pela análise das imagens de amostras de solo, a densidade global e umidade dos solos (CRESTANA et al., 1992) e realizar estudos da dinâmica da

Tabela 2. Número de trabalhos publicados com a aplicação da TC na avaliação de materiais de interesse do agronegócio e ambiente (base Scopus e Web of Knowledge).

Ano	Solos	Madeiras	Insetos	Sementes	Alimentos	Ossos
1982-1985	3	0	0	0	0	2
1986-1990	10	0	0	0	0	1
1991-1995	19	0	0	0	1	8
1996-2000	33	6	0	0	0	38
2001-2005	54	17	4	1	5	94
2006-2010	135	55	22	11	18	205
Total	254	78	26	12	24	348

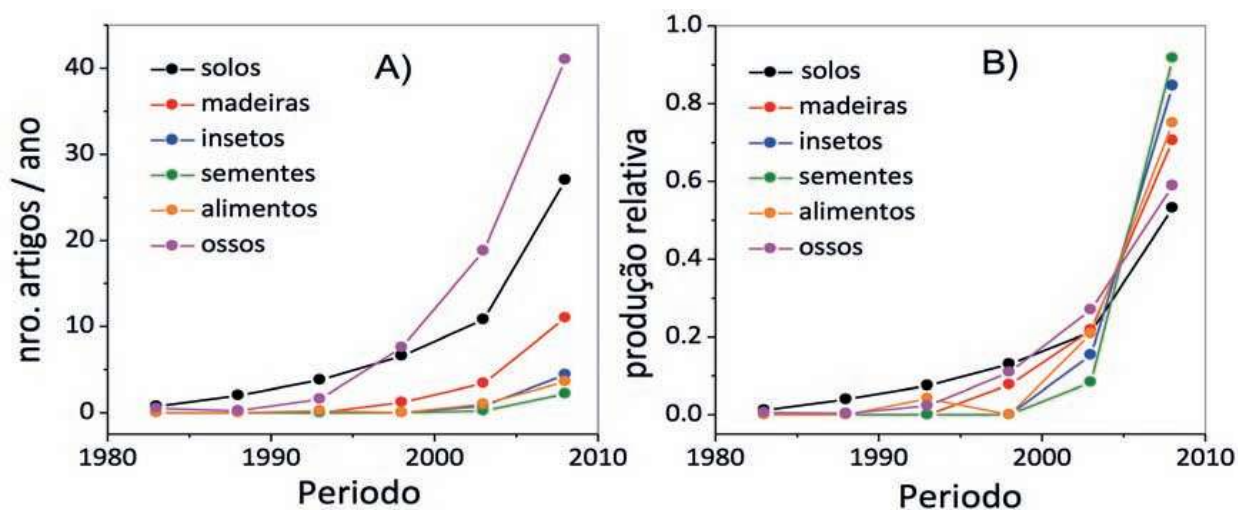


Figura 3. Evolução das publicações utilizando a tomografia em materiais de interesse do agronegócio. Em A) o número de artigos e em B) a produção relativa.

água (CRESTANA et al., 1985), compactação (VAZ et al., 1992), efeitos da densidade na emergência de sementes de milho (REIS et al., 2006), dentre outros. Em Macedo et al. (2007) é apresentada uma síntese dos principais resultados obtidos pelo grupo da Embrapa e seus parceiros na pesquisa de solos com a TC na escala milimétrica, utilizando os equipamentos desenvolvidos pelo grupo.

Como demonstração do potencial de análise qualitativa e quantitativa da TC aplicada a solos, apresentamos a seguir alguns resultados destacados do trabalho de Modolo et al. (2008). A TC em escala milimétrica, obtida pelo tomógrafo de campo com feixe em leque (NAIME, 2001), foi utilizada

para estudar os efeitos sobre a germinação da semente e a emergência da plântula de soja causadas pelas cargas aplicadas pela roda compactadora da semeadora-adubadora, combinadas com a umidade do solo, em sistema de plantio direto. A TC em amostras indeformadas de solo possibilitou quantificar os perfis das densidades média e máxima do solo, permitindo a caracterização da densidade desde a superfície até a profundidade analisada. Tomografias em diferentes alturas das colunas de solo foram realizadas para localizar visualmente as sementes e avaliar as interfaces.

A Figura 4 ilustra algumas imagens tomográficas obtidas para determinação do perfil de densidade do solo na linha de semeadura, para os diferentes teores de água do solo e cargas aplicadas pela roda compactadora.

Nas Figuras 5a, 5b e 5c estão os perfis dos valores médios da densidade média do solo obtida por TC nos teores de água $0,27 \text{ kg kg}^{-1}$, $0,31 \text{ kg kg}^{-1}$ e $0,36 \text{ kg kg}^{-1}$, respectivamente. Nota-se que na superfície do solo os tratamentos U1C4, U2C4 e U3C4, compostos pela maior carga aplicada pela roda compactadora sobre a semente (140 N), tenderam a apresentar os maiores valores de densidade média do solo.

As cargas aplicadas pela roda compactadora elevaram a densidade do solo no plano vertical da linha de semeadura abaixo da profundidade de semeadura, quando comparada com os valores obtidos antes do plantio (MODOLO et al., 2008).

Em uma escala de resolução micrométrica e com a utilização de raios X de tubos (policromáticos) é possível visualizar a macroporosidade, os agregados e partículas individuais dos solos. Além disso, os equipamentos modernos, que utilizam feixe em cone e detector bidimensional fornecem milhares de seções (tomografias) durante uma única aquisição e que podem ser combinadas para a visualização tridimensional das estruturas porosas e de agregados dos solos. Imagens microtomográficas de amostras de solos têm sido utilizadas em estudos de ecologia de solos, para o estudo do efeito das minhocas na qualidade, funcionalidade e serviços ambientais dos solos (BLOUIN et al., 2013; CAPOWIEZ et al., 2011) e diversidade e organização de micróbios no solo (CRAWFORD et al., 2012; NUNAN et al., 2006). A medida da distribuição da macroporosidade pela microtomografia tem sido muito útil em estudos de manejo dos solos (DEURER et al., 2009; KIM et al., 2010; KUMAR et al., 2010), na modelagem do espaço poroso com a avaliação da morfologia e arquitetura tridimensional do solo (KOHNE et al., 2011; MOONEY, KOROSAK, 2009; NGOM et al., 2011), em estudos de processos na interface solo-raiz (CARMINATI et al., 2009; FEENEY et al. 2006) ou solo-água (COSTANZA-ROBINSON et al., 2012; HOPMANS et al., 1992) e do efeito da matéria orgânica na agregação dos solos (ANANYEVA et al., 2013; ZHOU et al., 2012, 2013).

A seguir serão apresentados alguns exemplos de imagens microtomográficas de amostras de solo que ilustram o potencial da técnica para

estudos na área. A Figura 6 apresenta uma sequência de microtomografias de um Latossolo Vermelho Amarelo distrófico (LVAd) e um Latossolo Vermelho distroférico (LVdf) com tamanho de amostras variando de 4 cm a 0,5 cm e resolução espacial da imagem de 30 μm a 3 μm . Nas amostras maiores (menor resolução espacial) observam-se bioporos e macroagregados e nas amostras menores (com maior resolução) observam-se os macroporos, microagregados e partículas de areia e silte. Partículas com coeficientes de atenuação muito altos (pontos brancos nas imagens) são devido à partículas de óxidos de ferro, titânio e manganês presentes nas amostras e podem ser identificadas e quantificadas devido aos seus altos contrastes de atenuação comparados com outros minerais, como os aluminossilicatos e o quartzo (VAZ et al., 2011).

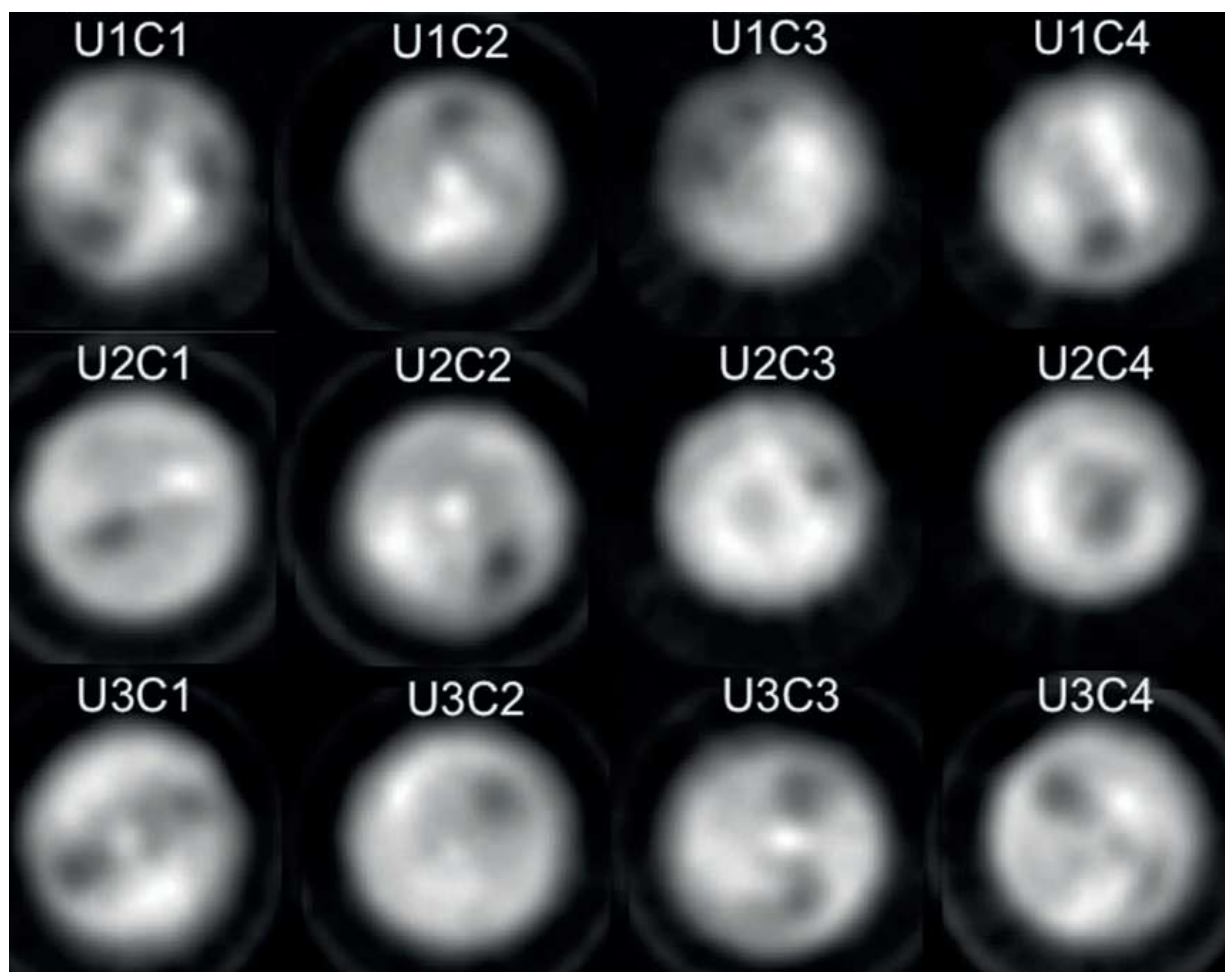


Figura 4. TC de amostras de solo na região da semente, para os diferentes teores de água do solo e cargas aplicadas pela roda compactadora.

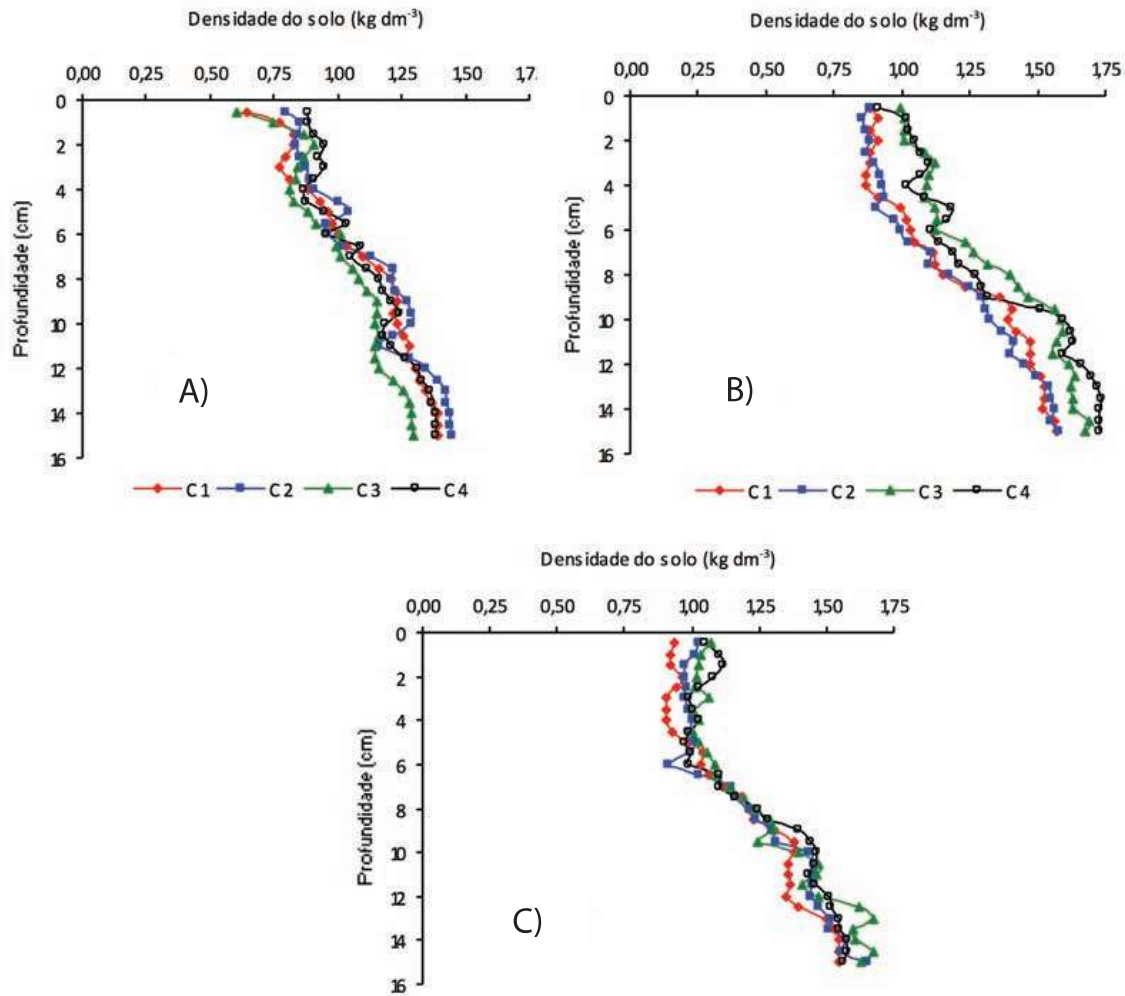


Figura 5. Perfis da densidade média do solo obtida por TC para os teores de água do solo: A) $U = 0,27 \text{ kg kg}^{-1}$; B) $U = 0,31 \text{ kg kg}^{-1}$ e C) $U = 0,36 \text{ kg kg}^{-1}$.

A partir das imagens de tons de cinza (Figura 6) utiliza-se procedimentos de binarização da imagem (KULKARNI et al., 2012), possibilitando a segmentação dos objetos de interesse, por exemplo os poros ou minerais do solo. Nesse caso, é possível se obter a distribuição dos poros do solo, dos agregados ou das partículas de óxidos de Fe, Ti e Mn (VAZ et al., 2011).

Adicionalmente, diagnósticos de parâmetros físicos dos solos têm sido obtidos utilizando-se scanners tomográficos com uma série de métodos de reconstrução de imagens bidimensionais e volumétricas, inclusive com o uso de ferramentas de ambientes de realidade virtual (BOTEGA, 2008; BOTEGA; CRUVINEL, 2007b; BOTEGA; CRUVINEL, 2007a; CRESTANA, 1985; CRUVINEL, 1987; CRUVINEL; BOTEGA, 2009; CRUVINEL et al., 2009; ELBAKRI; FESSLER, 2002; JANG-IL et al., 2009; JEONG et al., 2009; MACEDO, 1997; MACEDO et al., 2002; MINATEL, 2003; NAIME, 1994; NAIME, 2001; PAN, 2008; PEDROTTI et al., 2003; PEREIRA, 2007; VAZ, 1989; VAZ et al., 1989).

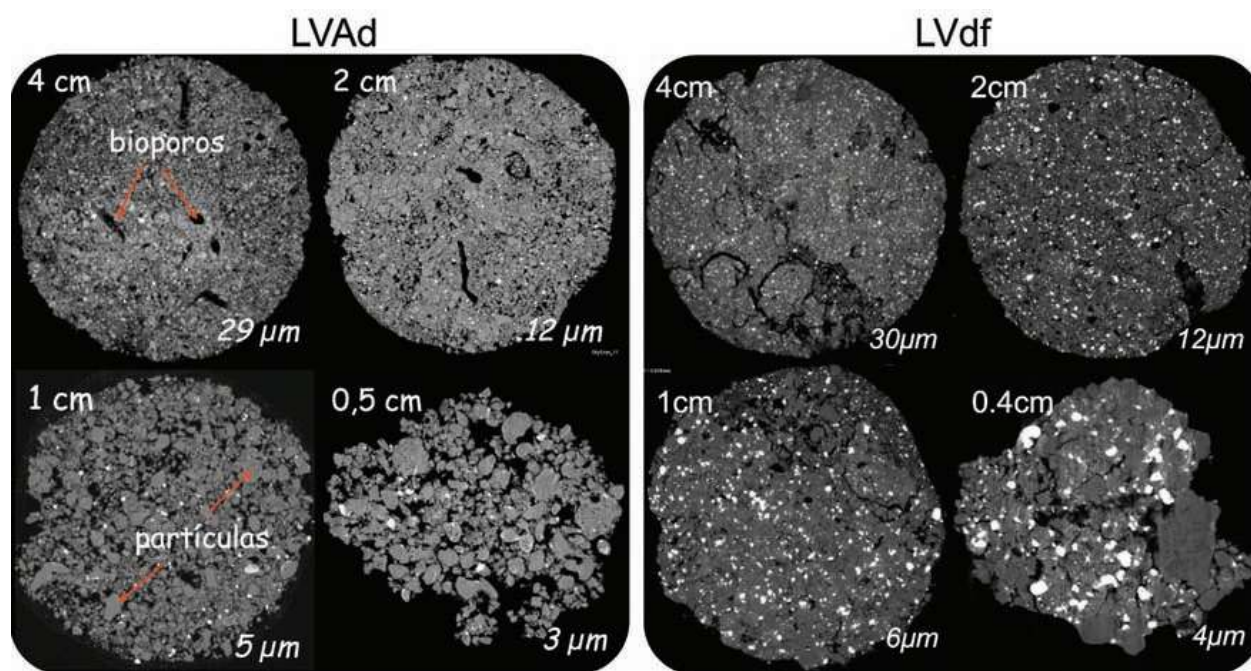


Figura 6. Microtomografias dos solos LVAd e LVdf com diferentes tamanhos de amostras (4 cm a 0,4 cm) e resoluções espaciais das imagens (30 µm a 3 µm).

A realidade virtual nasceu nos anos 1980 com iniciativas creditadas a Bolt e Lanier, sob a necessidade de diferenciar simulações computacionais tradicionais dos mundos sintéticos que começavam a despontar (BOLT, 1980; LANIER, 1984). Desenvolvedores de software e pesquisadores buscaram definir esses novos métodos baseados em suas próprias experiências, tornando-as difundidas. Tecnicamente, o termo relata uma experiência imersiva e interativa baseada em imagens geradas por computadores, renderizadas ou não em tempo real (PIMENTEL; TEIXEIRA, 1995). Sob a perspectiva tecnológica, o objetivo principal da realidade virtual é fazer o participante sentir sua presença no mundo virtual (JACOBSON, 1994).

Na TC, a medida da intensidade de fótons emitida por uma fonte de raios X e a intensidade captada por um detector na outra extremidade da linha de propagação possibilita a determinação da relação de atenuação devido ao objeto que está presente entre a fonte e o detector. Essa relação de atenuação é um dado utilizado para o processo de reconstrução, o qual possibilita a obtenção de um mapa de coeficientes de atenuação linear¹ da secção transversal da amostra em estudo. Cada dado armazenado é, na realidade, uma média de valores que traduzem

¹ Coeficientes de atenuação linear (cm^{-1}). Informação relacionada ao fator de atenuação de raios X ao interagir com a matéria, o qual é função da energia do feixe incidente e da composição elementar da matéria.

a composição do material presente no caminho de propagação do feixe de iluminação.

Muito tem se avançado nas técnicas instrumentais para a aplicação da TC na agricultura, entretanto, uma série de desafios são ainda encontrados e envolvem o estabelecimento de modelos e algoritmos que possam melhorar a qualidade da relação sinal/ruído das projeções tomográficas, a qualidade das imagens e, principalmente, as técnicas de reconstrução multidimensional ou ainda as que possam trazer uma melhor visualização e amigabilidade na interface homem-máquina.

Exemplos de técnicas de processamento para a melhoria da qualidade da imagem e para a visualização 3D de imagens tomográficas são apresentadas a seguir para amostras de um Latossolo Vermelho (146 mm de diâmetro e 100 mm de altura), analisadas no minitomógrafo da Embrapa (energia de 59,9 keV, 150 mm de translação total, 1 mm de passo linear, 180° de rotação total, 1,2° de passo angular e 4 segundos de tempo de contagem por amostra de projeção).

A Figura 7 apresenta uma imagem tomográfica de uma amostra deformada de Latossolo Vermelho, a qual foi reconstruída e filtrada para ganhos em qualidade nas medidas dos coeficientes de atenuação linear (cm^{-1}). Um exemplo de reconstrução volumétrica usando planos interpolados é apresentado na Figura 8.

Na existência de poros conexos, formam-se os chamados caminhos preferenciais (*fingering*), ou seja, trajetos comuns do fluxo de água em solos. Para a caracterização de tais eventos, foram utilizados os processos implementados sobre o sistema de visualização e análise de amostras reconstruídas volumetricamente (Figura 9).

2.2 Aplicações na área de madeiras

A madeira é um material extremamente organizado com características estruturais bem definidas nas diferentes escalas, as quais são importantes para os processos biológicos na madeira viva e para a indústria de processamento. Essas características da micro e nano estrutura incluem a presença e a distribuição de diferentes tipos de células, como traqueídes, fibras, parênquima longitudinal e radial e vasos, e em uma escala menor, a orientação das paredes das células e microfibrilas que conferem à madeira a resistência elástica e a dureza (MAYO et al., 2010). A microtomografia de raios X é uma técnica poderosa e muito útil para estudos relacionados à caracterização anatômica e de processos industriais da madeira (BELINI et al., 2011), mas é ainda relativamente nova e pouco explorada, apresentando, portanto, grande potencial para aplicações científicas e tecnológicas.

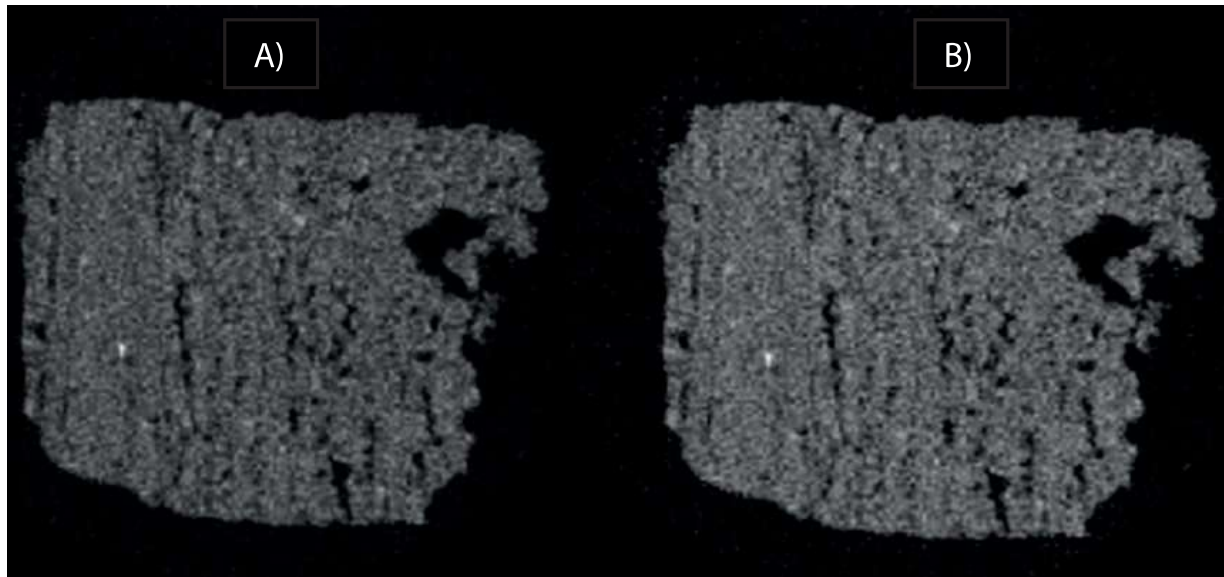


Figura 7. Exemplo de imagem tomográfica obtida por reconstrução bidimensional para uma amostra de latossolo vermelho, em A) imagem ruidosa, em B) imagem filtrada.

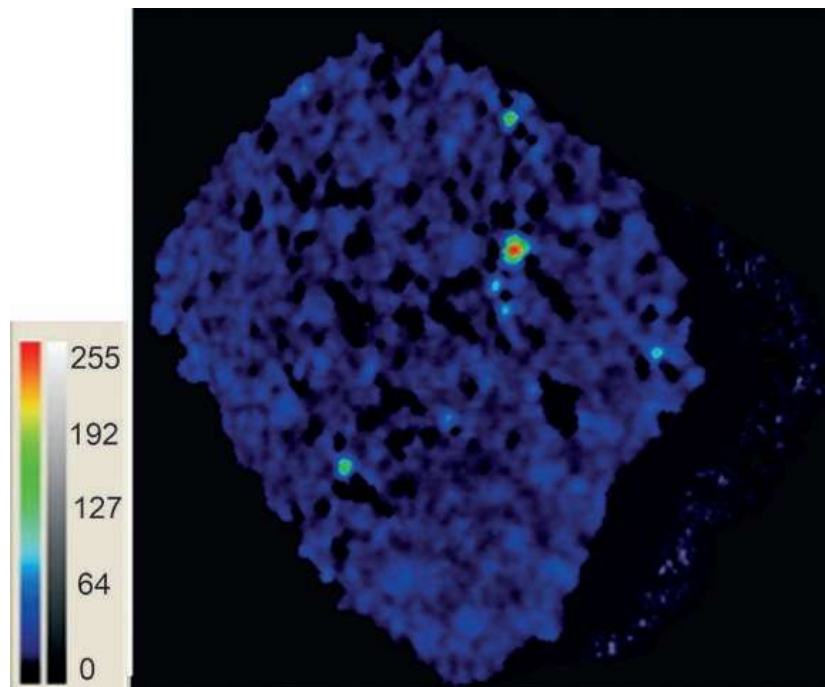


Figura 8. Imagem tomográfica obtida por reconstrução volumétrica para uma amostra de Latossolo Vermelho reconstruída considerando três planos reais (obtidos com medidas tomográficas) e dez planos intermediários obtidos com interpolação B spline-wavelet.

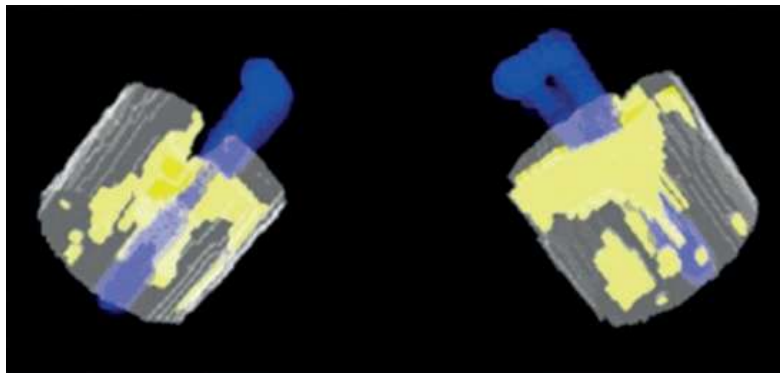


Figura 9. Resultados em duas perspectivas de estudo de caso em ambiente de realidade virtual a partir da obtenção das imagens obtidas por reconstrução tomográfica volumétrica com amostra deformada de Latossolo Vermelho com representações de caminhos preferenciais da água (na pseudo cor azul), e os espaços vazios (na pseudo cor amarela), obtidos por interconexão dos voxels vizinhos.

Em trabalhos recentes, a microtomografia de raios X de alta resolução tem sido utilizada como uma ferramenta para estudos da anatomia da madeira de diversas espécies (BELINI et al., 2011; PANTHAPULAKKAL; SAIN 2013; SVEDSTROM et al., 2012), medida do comprimento de fibras em compósitos de fibras curtas e madeiras (CHINGA-CARRASCO et al., 2013; MIETTINEN et al., 2012), na avaliação microscópica da ação e efeito de adesivos (MODZEL, et al., 2011), ceras (SCHOLZ et al., 2010) e revestimentos (VAN DEN BULCKE et al., 2010), ataques de larvas, insetos e fungos (JENNINGS; AUSTIN, 2011; VAN DEN BULCKE et al., 2009), dentre outras.

Imagens microtomográficas de amostras de algumas espécies de madeira, como de jatobá, pinheiro, peroba e amburana são apresentadas nas Figuras 10 e 11. As amostras possuem tamanho de cerca de 1 cm e a resolução espacial da imagem é de 6 μm . As imagens (cortes transversais, longitudinais e radiais) são apresentadas em tons de cinza, nos quais o preto representa os vazios (ar), cinza claro materiais de menor densidade e cinza escuro materiais de maior densidade. Pontos mais esbranquiçados podem ser devidos à presença de pequenos aglomerados de cristais, resinas, gomas e outros materiais.

2.3 Aplicações na área de alimentos e sementes

A microtomografia de raios X tem se mostrado muito útil para a visualização e a medida da microestrutura de produtos de cereais porosos e produtos alimentícios em geral, como grão de arroz (ZHU et al., 2012) e de café (FRISULLO et al., 2012), produtos alimentícios extrudados (ZHU et al., 2010), aerados (LIM; BARIGOU, 2004), massas (BELLIDO et al., 2006), pães (LASSOUED et al., 2007),

biscoitos (PAREYT et al., 2009), e chocolates (FRISULLO et al., 2010) entre outros. Entretanto, em estudos da anatomia dos órgãos internos de sementes, a técnica é ainda muito pouco explorada. O conhecimento da estrutura da semente é importante, para que, ao manuseá-la, se evite ou minimize as injúrias mecânicas que podem levar à perda da qualidade, por exemplo. As sementes possuem atributos de qualidade genética, física, fisiológica e sanitária que

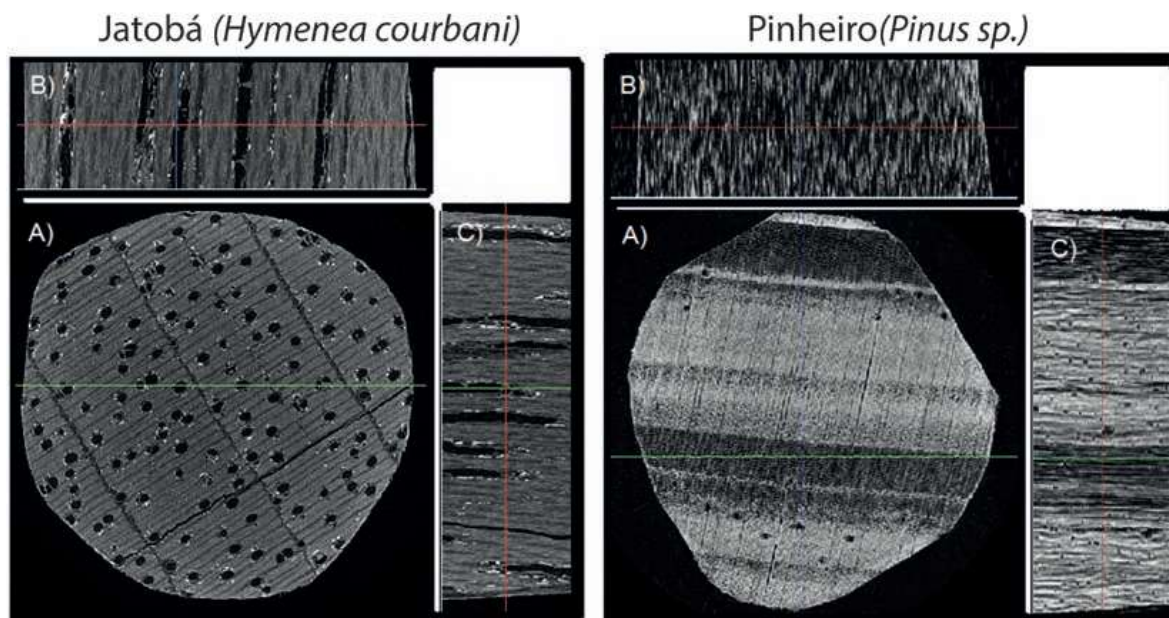


Figura 10. Imagens microtomográficas de amostras de madeira de Jatobá (esquerda) e Pinheiro (direita), mostrando o plano transversal (A), coronal (B) e sagital (C).

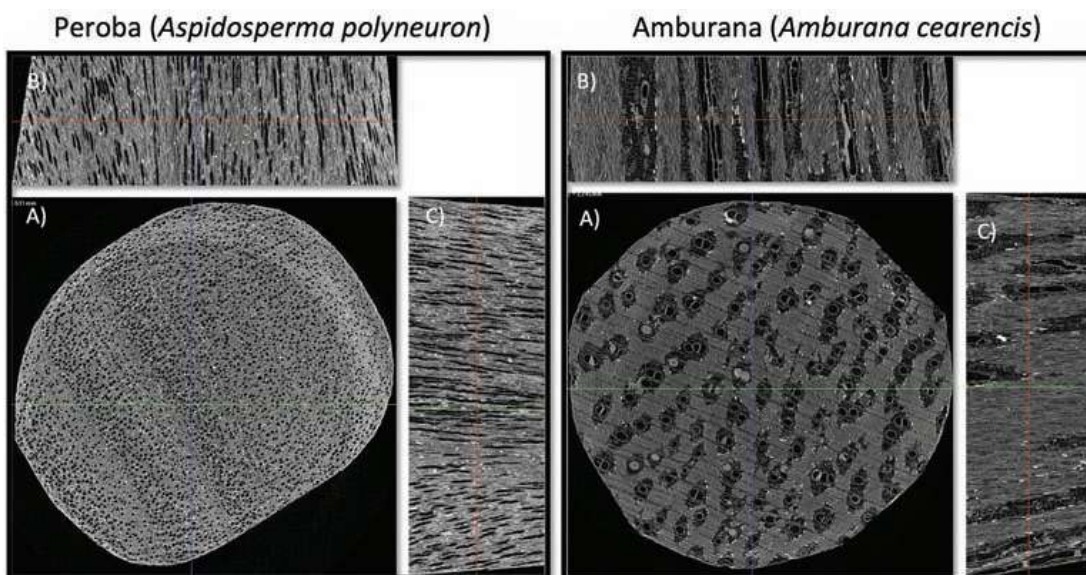


Figura 11. Imagens microtomográficas de amostras de madeira de Jatobá (esquerda) e Pinheiro (direita), mostrando o plano transversal (A), coronal (B) e sagital (C).

conferem a garantia de um bom desempenho agrônômico (KRZYŻANOWSKI et al., 2008). Assim, a avaliação não destrutiva e de alta resolução espacial da anatomia interna de sementes, como aquela fornecida pela microtomografia de raios X, consiste em uma excelente ferramenta para a pesquisa na área de tecnologia de sementes. Nas Figuras 12, 13 e 14 são apresentados alguns exemplos de microtomografias de sementes que evidenciam o potencial da técnica e os contrastes em termos de variações de densidade e composição dos diversos materiais que compõem essas sementes.

2.4 Aplicações na área de insetos

O conhecimento detalhado da estrutura anatômica de insetos é fundamental para um melhor entendimento das suas funções e evolução (DE ALMEIDA et al., 2012). Tal detalhamento pode ser obtido tradicionalmente por meio de técnicas de dissecação e análise histológica por estereomicroscopia e microscopia eletrônica de varredura e, mais recentemente, por meio da

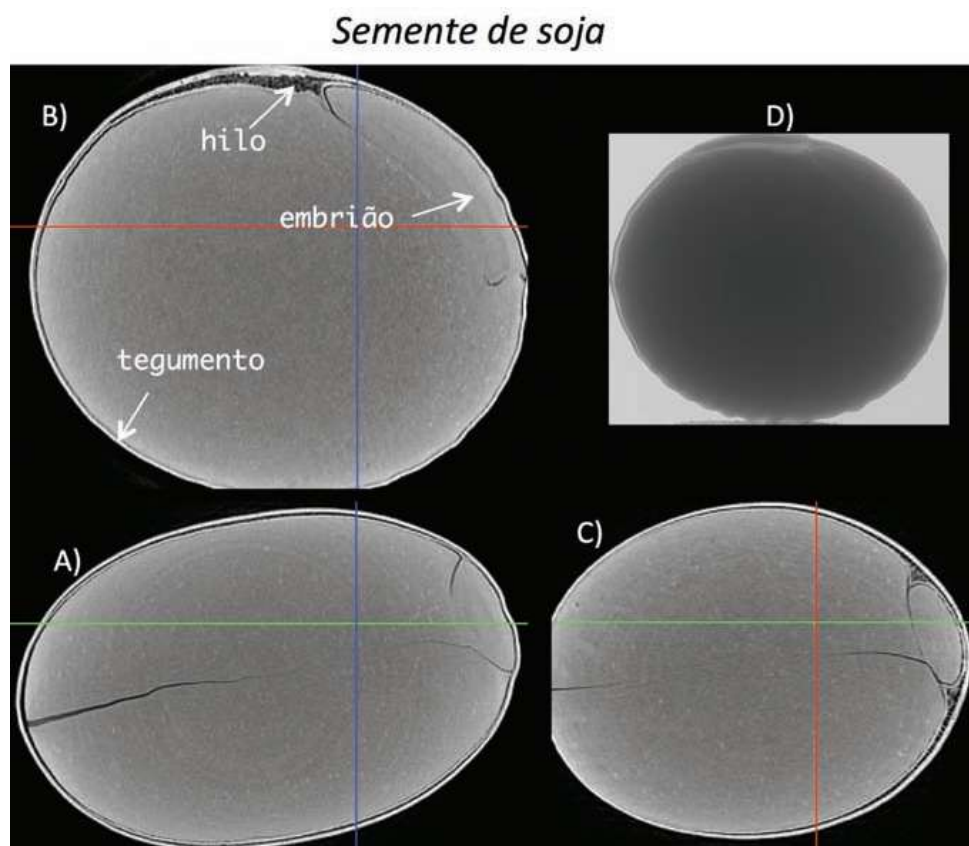


Figura 12. Microtomografias de semente de soja no sentido transversal (A), coronal (B) e sagital (C) e em (D) a projeção radiográfica da semente.

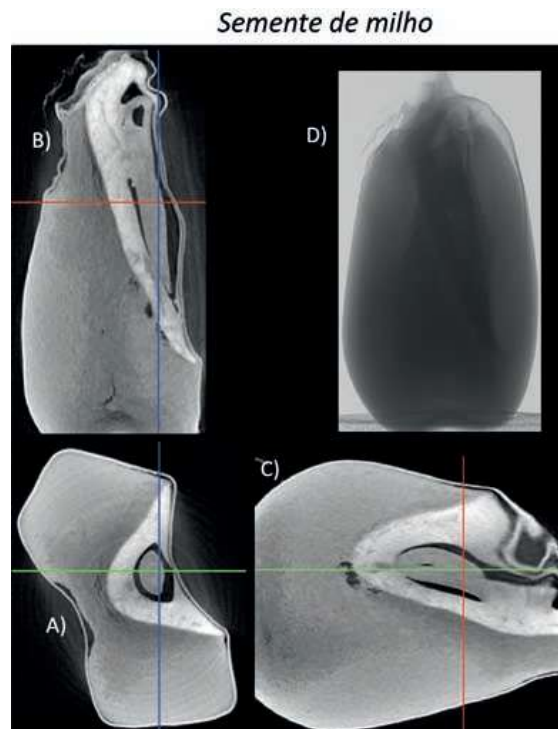


Figura 13. Microtomografias de semente de milho no sentido transversal (A), coronal (B) e sagital (C) e em (D) a projeção radiográfica da semente.

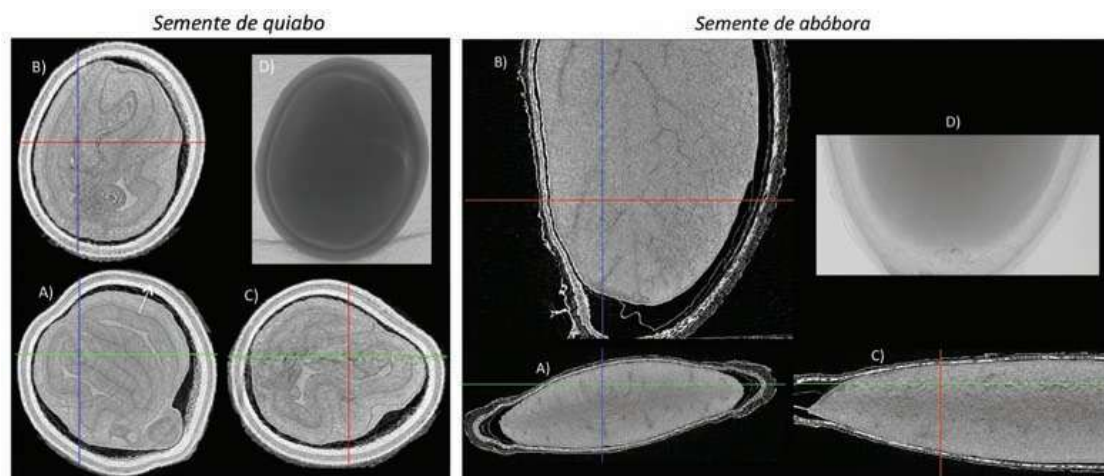


Figura 14. Microtomografias de sementes de quiabo e de abóbora no sentido transversal (A), coronal (B) e sagital (C) e em (D) projeções radiográficas das sementes.

microtomografia de raios X (HORNSCHEMEYER et al., 2002; POSTNOV et al., 2002) e a microtomografia síncrotron com contraste de fase (DE ALMEIDA et al., 2012; PERREAU; TAFFOREAU, 2011). Um número considerável e crescente de trabalhos científicos tem sido publicados anualmente em estudos evolutivos com formigas, abelhas, besouros e outros insetos, tanto com os insetos

inteiros e vivos, como de suas partes (cabeça, tórax ou abdome). As imagens microtomográficas de insetos possibilitam a visualização tridimensional da microestrutura e organização biológica, visando a classificação morfológica. Como exemplo, Li et al. (2011) utilizaram a microtomografia de raios X em estudos funcionais do músculo de controle da mandíbula de besouro. Zhang et al. (2010) identificaram músculos da cabeça e tórax de *Quedius beesonii*. Honnicke et al. (2010) utilizaram a microtomografia com contraste de fase para a identificação do sexo de insetos sugadores de plantas, com características externas similares, pela visualização tridimensional da genitália desses insetos.

A Figura 15 apresenta a projeção radiológica e os cortes microtomográficos de uma vespa (6 mm de comprimento), onde é possível visualizar cabeça, tórax, abdome, patas e antenas, bem como detalhes do exoesqueleto, músculo e microestrutura dos órgãos internos.

Algumas espécies de besouros têm elevado impacto econômico em florestas e indústrias de móveis. Exemplo recente é aquele produzido pelo besouro *Anophophora glabripennis*, uma espécie conhecida nos Estados Unidos como Asian Longhorn, que tem produzido danos significativos em várias florestas americanas, representando uma ameaça que poderá encontrar transporte não intencional para países da América do Sul, inclusive para o Brasil. Em 2003, houve a apresentação de um novo método com base no uso de TC e processamento de imagens digitais para detecção de injúrias causadas por besouros em florestas. Os resultados mostram a correta identificação da localização de besouros em árvores vivas, como também fornecem uma avaliação do estrago temporal causado (CRUVINEL et al., 2003).

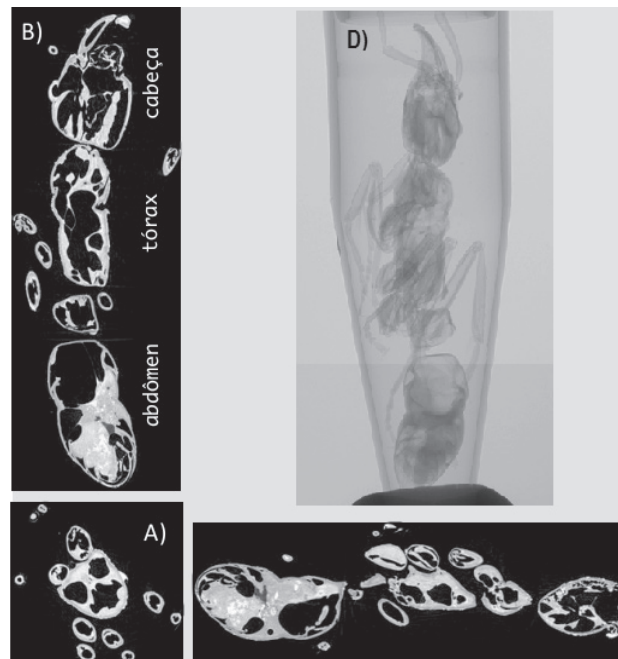


Figura 15. Microtomografias de uma vespa no sentido transversal (A), coronal (B) e sagital (C) e as composições das projeção radiográfica em 3 partes (D).

2.5 Exemplos de outros materiais

As Figuras 16 e 17 apresentam imagens de outros materiais nos quais a microtomografia pode fornecer informações interessantes da estrutura interna, como a cana-de-açúcar, espinhos, ossos, areias e esferas de vidro.

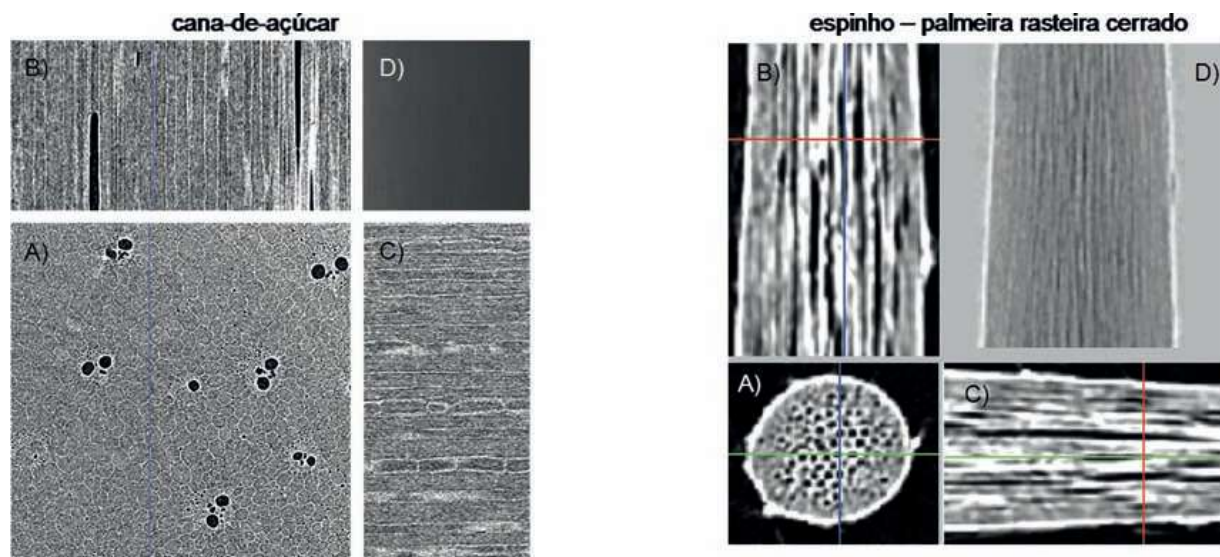


Figura 16. Microtomografia de amostras de cana-de-açúcar (esquerda) e espinho de palmeira rasteira do cerrado (direita), no sentido transversal (A), coronal (B) e sagital (C) e as projeções radiográficas (D).

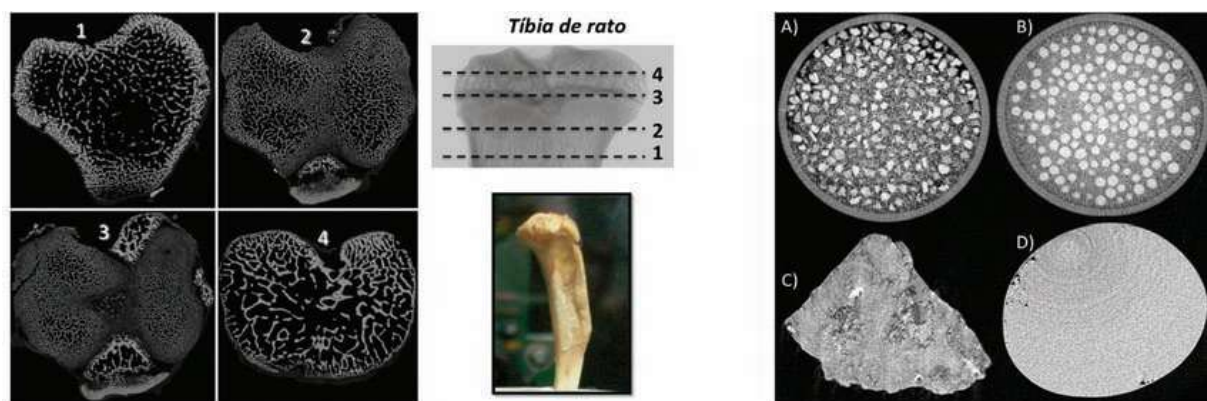


Figura 17. Imagens microtomográficas do osso da tíbia de rato em várias posições (esquerda) e à direita, de recipientes com areia grossa (1 mm a 2 mm) misturada com areia fina (0,1 mm a 0,25 mm) (A), esferas de vidro de 2 mm de diâmetro misturadas com esferas de 0,1 mm (B), um grão de areia de 2 mm (C) e uma esfera de vidro de 2 mm (D).

3 Perspectivas futuras

A tomografia computadorizada de raios X trouxe grandes benefícios como uma técnica não invasiva de diagnóstico médico. Outras áreas como a ciência do solo, de rochas, arqueologia, tecnologia de madeiras, bioengenharia, engenharia de materiais e metalurgia também se beneficiaram da técnica em aplicações para a caracterização da estrutura interna e o estudo de processos dinâmicos no interior dos materiais estudados. Os avanços em instrumentação que ocorreram de forma mais significativa nos últimos dez anos, em termos de sistemas computacionais, detectores de raios X e fontes de raios X com microfoco, proporcionaram o surgimento de um grande número de oportunidades para a pesquisa, incluindo aplicações *in-situ*, bem como para o lançamento de equipamentos comerciais de bancada para aplicação na análise de materiais biológicos e minerais, com excelente resolução espacial e rapidez.

Adicionalmente, mais de uma dezena de aceleradores síncrotron espalhados ao redor do mundo implementaram e disponibilizaram sistemas de microtomografia para estudos de materiais, em particular aqueles de interesse agrícola. Dessa forma, um incremento impressionante no uso da técnica de tomografia computadorizada de raios X (principalmente a de resolução micrométrica) pôde ser constatada nos últimos 5 anos. Portanto, pode-se especular que, em um futuro não muito distante, a microtomografia de raios X será uma técnica difundida e rotineira na maioria das universidades e centros de pesquisa, como é, por exemplo, a microscopia eletrônica de varredura.

A Embrapa Instrumentação tem se destacado ao longo dos anos no desenvolvimento de tomógrafos com resolução milimétrica, para laboratório e campo, e micrométrica, bem como na aplicação dessa técnica em estudos agropecuários. Neste capítulo foi apresentado um histórico desses desenvolvimentos realizados pelo grupo, bem como aplicações em pesquisas em diversas áreas da agropecuária. Foram apresentados alguns resultados e exemplos da microtomografia de raios X aplicada a solos, madeiras, sementes, insetos, plantas, ossos e partículas. Na pesquisa agropecuária e no agro-negócio, a técnica tem um grande potencial de contribuição para auxiliar no entendimento e na solução de problemas como doenças de plantas e solos, avaliação da qualidade de sementes, madeiras, alimentos e estudos básicos de botânica, entomologia, ecologia, dentre outros.

Com a ampliação do uso da técnica, outros aspectos como a normatização de procedimentos de análise e treinamento de pessoal para operação

Conceitos e aplicações da instrumentação para o avanço da agricultura

desses equipamentos na pesquisa são temas que a Embrapa Instrumentação Agropecuária poderá também contribuir, pelo pioneirismo e expertise acumulada.

Referências

AMBROSE, J. Computerized transverse axial scanning (tomography). 2. Clinical application. **British Journal of Radiology**, [S. l.], v. 46, n. 552, p. 1023-1047, 1973.

ANANYEVA, K.; WANG, W.; SMUCKER, A. J. M.; RIVERS, M. L.; KRAVCHENKO, A. N. Can intra-aggregate pore structures affect the aggregate's effectiveness in protecting carbon? **Soil Biology and Biochemistry**, [S. l.], v. 57, p. 868-875, 2013.

BELINI, U. L.; TOMAZELLO-FILHO, M.; CASTRO, V. R.; MUNIZ, G. I. B.; LASSO, P. R. O.; VAZ, C. M. P. Microtomografia de raios X (microCT) aplicada na caracterização anatômica da madeira de folhosa e de conífera. **Floresta e Ambiente**, Rio de Janeiro, v. 18, p. 30-36, 2011.

BELLIDO, G. G.; SCANLON, M. G.; PAGE, J. H.; HALLGRIMSSON, B. The bubble size distribution in wheat flour dough. **Food Research International**, [S. l.], v. 39, n. 10, p. 1058-1066, 2006.

BERALDO, J. M. G.; CRUVINEL P. E.; SCANNAVINO JUNIOR, F. A. Evaluation of soil porosity under different management systems using computed tomography. In: 4TH INTERNATIONAL CONGRESS OF THE EUROPEAN CONFEDERATION OF SOIL SCIENCE SOCIETIES, 2012, Bari. [**Anais...**]. Bari: European Confederation of Soil Science Societies, 2012.

BIASSUSI, M.; PAULETTO, E. A.; CRESTANA, S. Estudo da deformação de um vertissolo por meio da tomografia computadorizada de dupla energia simultânea. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 23, n. 1, p. 1-8, 1999.

BLOUIN, M.; HODSON, M.E.; DELGADO, E.A.; BAKER, G.; BRUSSAARD, L.; BUTT, K.R.; DAI, J.; DENDOOVEN, L.; PERES, G.; TONDOH, J.E.; CLUZEAU, D.; BRUN, J.J. A review of earthworm impact on soil function and ecosystem services. **European Journal of Soil Science**, [S. l.], v. 64, n. 2, p. 161-182, 2013.

BOLT, R. A. Put-that-there: Voice and gesture at the graphics interface. **ACM SIGGRAPH Computer Graphics**, New York, v. 14, n. 3, p. 262-270, 1980.

BOTEGA, L. C.; CRUVINEL, P. E. Three-dimensional soil physics image analysis based on a virtual reality environment. In: SYMPOSIUM ON VIRTUAL REALITY, 9., 2007, Petrópolis. **Anais...** Petrópolis: SBC, p. 333-335, 2007a.

BOTEGA, L. C.; CRUVINEL, P. E. Desenvolvimento de ambiente de realidade virtual para análise de solos agrícolas. In: WORKSHOP DE REALIDADE VIRTUAL E AUMENTADA, 2007, Itumbiara. Porto Alegre: SBC, 2007b.

- BOTEGA, L. C. **Análise de imagens tomográficas da ciência do solo em ambiente de realidade virtual**. 2008. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2008.
- CAPOWIEZ, Y.; SAMMARTINO, S.; MICHEL, E. Using X-ray tomography to quantify earthworm bioturbation non-destructively in repacked soil cores. **Geoderma**, Amsterdam, v. 162, n. 1-2, p. 124-131, 2011.
- CARMINATI, A.; VETTERLEIN, D.; WELLER, U.; VOGEL, H. J.; OSWALD, S. E. When roots lose contact. **Vadose Zone Journal**, [S. l.], v. 8, n. 3, p. 805-809, 2009.
- CÁSSARO, F. A. M. **Tomografia de dupla energia simultânea para caracterização física de um meio poroso deformável**. 1994. 119 p. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Física e Química, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1994.
- CHINGA-CARRASCO, G.; SOLHEIM, O.; LENES, M.; LARSEN, A. A method for estimating the fibre length in fibre-PLA composites. **Journal of Microscopy**, Oxford, v. 250, n. 1, p. 15-20, 2013.
- COSTANZA-ROBINSON, M. S.; ZHENG, Z.; HENRY, E. J.; ESTABROOK, B. D.; LITTLEFIELD, M. H. Implications of surfactant-induced flow for miscible-displacement estimation of air-water interfacial areas in unsaturated porous media. **Environmental Science and Technology**, Washington, v. 46, n. 20, p. 11206-11212, 2012.
- CRAWFORD, J. W.; DEACON, L.; GRINEV, D.; HARRIS, J. A.; RITZ, K.; SINGH, B. K.; YOUNG, I. Microbial diversity affects self-organization of the soil-microbe system with consequences for function. **Journal of the Royal Society Interface**, [S. l.], v. 9, n. 71, p. 1302-1310, 2012.
- CRESTANA, S. **A tomografia computadorizada como um novo método para estudo da física da água no solo**. 1985. 145 p. Tese (Doutorado) - Universidade de São Paulo, 1985.
- CRESTANA, S.; CESAREO, R.; MASCARENHAS, S. Using a computed tomograph miniscanner in soil science. **Soil Science**, [S. l.], v. 142, n. 1, p. 56-61, 1986.
- CRESTANA, S.; CRUVINEL, P. E.; VAZ, C. M. P.; CESAREO, R.; MASCARENHAS, S.; REICHARDT. Calibração e uso de um tomógrafo computadorizado em ciência do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 16, p. 161-167, 1992.
- CRESTANA, S.; MASCARENHAS, S.; POZZI-MUCELLI, R. S. Static and dynamic 3-dimensional studies of water in soil using computed tomographic scanning. **Soil Science**, [S. l.], v. 140, n. 5, p. 326-332, 1985.
- CRUVINEL P. E., PEREIRA M. F. L.; SAITO J. H., DA COSTA L. F., Performance improvement of tomographic image reconstruction based on DSP processors. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, New York, v. 58, n. 9, p. 3295–3304, 2009.
- CRUVINEL, P. E. **Minitomógrafo de raios X e raios-gama computadorizado para aplicações multidisciplinares**. 1987. 329 p. Tese (Doutorado) - Universidade Estadual de Campinas, 1987.

Conceitos e aplicações da instrumentação para o avanço da agricultura

CRUVINEL, P. E.; CESAREO, R.; CRESTANA, S.; MASCARENHAS, S. X-and Gamma-rays computerized minitomograph scanner for soil science. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, New York, v. 39, n. 5, p. 745-750, 1990.

CRUVINEL, P. E.; NAIME, J. DE M.; BORGES, M.; MACEDO, A.; ZHANG, E. A. Detection of beetle damage in forest by X-ray CT image. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 27, n. 5, p. 747-752, 2003.

CRUVINEL, P. E.; BOTEGA, L. C. **Caracterização física de caminhos preferenciais da água em solos agrícolas em ambiente de realidade virtual**. São Carlos, SP: Embrapa Instrumentação Agropecuária, 2009. 9 p. (Embrapa Instrumentação Agropecuária. Circular Técnica, 48).

DE ALMEIDA, A. P.; SOARES, J.; MENESES, A. A. M.; CARDOSO, S. C.; BRAZ, D.; GARCIA, E. S.; GONZALEZ, M. S.; AZAMBUJA, P.; BARROSO, R. C. Phase contrast X-ray synchrotron imaging for assessing external and internal morphology of *Rhodnius prolixus*. **Applied Radiation and Isotopes**, [S. l.], v. 70, n. 7, p. 1340-1343, 2012.

DEURER, M.; GRINEV, D.; YOUNG, I.; CLOTHIER, B. E.; MULLER, K. The impact of soil carbon management on soil macropore structure: a comparison of two apple orchard systems in New Zealand. **European Journal of Soil Science**, [S. l.], v. 60, n. 6, p. 945-955, 2009.

ELBAKRI, I. A.; FESSLER, J. A. Statistical image reconstruction for polyenergetic X-ray computed tomography. **IEEE Trans Med Imaging**, [S. l.], v. 21, n. 2, p. 89-99, 2002.

FANTE-JÚNIOR, L.; OLIVEIRA, J. C. M.; BASSOI, L. H.; VAZ, C. M. P.; MACEDO, A.; BACCHI, O. O. S.; REICHARDT, K.; CAVALCANTI, A. C.; SILVA, F. H. B. B. Tomografia computadorizada na avaliação da densidade de um solo do semi-árido brasileiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [S. l.], v. 26, p. 835-842, 2002.

FEENEY, D. S.; CRAWFORD, J. W.; DANIELL, T.; HALLETT, P. D.; NUNAN, N.; RITZ, K.; RIVERS, M.; YOUNG, I. M. Three-dimensional microorganization of the soil-root-microbe system. **Microbial Ecology**, [S. l.], v. 52, n. 1, p. 151-158, 2006.

FRISULLO, P.; LAVERSE, J.; BARNABÀ, M.; NAVARINI, L.; DEL NOBILE, M. A. Coffee beans microstructural changes induced by cultivation processing: An X-ray microtomographic investigation. **Journal of Food Engineering**, [S. l.], v. 109, p. 175-181, 2012.

FRISULLO, P.; LICCIARDELLO, F.; MURATORE, G.; DEL NOBILE, M. A. Microstructural characterization of multiphase chocolate using X-ray microtomography. **Journal of Food Science**, [S. l.], v. 75, n. 7, p. E469-76, 2010.

HAINSWORTH, J. M.; AYLMOORE, L. A. G. The use of computer-assisted tomography to determine spatial-distribution of soil-water content. **Australian Journal of Soil Research**, [S. l.], v. 21, n. 4, p. 435-443, 1983.

HEINEMANN, S. Computerized axial tomography Application to archaeological material. **Anthropological Journal of Canada**, [S. l.], v. 16, n. 3, p. 13-16, 1978.

HONNICKE, M. G.; CUSATIS C.; RIGON, L.; MENK, L. R.; ARFELLI, F.; FOERSTER, L. A.; ROSADO-NETO, G. H. External and internal structure of weevils (Insecta: Coleoptera)

investigated with phase-contrast X-ray imaging. **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A**, [S. I.], v. 620, p. 589-593, 2010.

HOPMANS J. W.; VOGEL T.; KOBLIK P.D. X-ray tomography of soil-water distribution in one-step outflow experiments. **Soil Science Society America Journal**, [S. I.], v. 56, n. 2, p. 355-362, 1992.

HORNSCHEMEYER, T.; BEUTEL, R.G.; PASOP, F. Head structures of *Priacmaserrata* Leconte (Coleoptera, Archostemata) inferred from X-ray tomography. **Journal of Morphology**, [S. I.], v. 252, n. 3, p. 298-314, 2002.

HOUNSFIELD, G. N. Computerized transverse axial scanning (tomography). 1. Description of system. **British Journal of Radiology**, [S. I.], v. 46, n. 552, p. 1016-1022, 1973.

JACOBSON, L. **Garage virtual reality**. Indianapolis: SAMS Pub, 1994.

JANG-IL, S.; SUNGDO, C.; SEUNG-HO, S. Distortion correction of reconstructed three-dimensional image in an integral imaging system combined with a single imaging lens. **Applied Optics**, New York, v. 48, p. 3108-3119, 2009.

JENNINGS J. T.; AUSTIN, A. D. Novel use of a micro-computed tomography scanner to trace larvae of wood boring insects. **Australian Journal of Entomology**, [S. I.], v. 50, p. 160-163, 2011.

JEONG, T. M.; PARK, J. R.; KO, D.; LEE, J. Direct reconstruction of an object from dual exposure Fourier intensity measurements. **Applied Optics**, New York, v. 48, p. 2890-2898, 2009.

KIM, H.; ANDERSON, S. H.; MOTAVALLI, P. P.; GANTZER, C. J. Compaction effects on soil macropore geometry and related parameters for an arable field. **Geoderma**, Amsterdam, v. 160, n. 2, p. 244-251, 2010.

KOHNE, J. M.; SCHLUTER, S.; VOGEL, H. J. Predicting solute transport in structured soil using pore network models. **Vadose Zone Journal**, [S. I.], v. 10, n. 3, p. 1082-1096, 2011.

KRZYZANOWSKI, F. C.; FRANÇA NETO, J. DE B.; HENNING, A. A.; COSTA, N. P. DA. **A semente de soja como tecnologia e base para altas produtividades: série sementes**. Londrina: Embrapa Soja, 2008. 8 p. (Embrapa Soja. Circular técnica, 55).

KULKARNI, R.; TULLER, M.; FINK, W.; WILDENSCHILD, D. Three-dimensional multiphase segmentation of X-ray CT data of porous materials using a Bayesian Markov Random Field framework. **Vadose Zone Journal**, [S. I.], v. 11, n. 1, 2012.

KUMAR, S.; ANDERSON, S. H.; UDAWATTA, R. P.; GANTZER, C. J. CT-measured macropores as affected by agroforestry and grass buffers for grazed pasture systems. **Agroforest Systems**, [S. I.], v. 79, n. 1, p. 59-65, 2010.

LANIER, J. **Visual programming languages**. [S. I.]: Scientific American, 1984.

LASSOUED, N.; BABIN, P.; VALLE, G. D.; DEVAUX, M. F.; RÉGUERRE, A. L. Granulometry of bread crumb grain: contributions of 2D and 3D image analysis at different scale. **Food Research International**, [S. I.], v. 40, n. 8, p. 1087-1097, 2007.

Conceitos e aplicações da instrumentação para o avanço da agricultura

LI, D.; ZHANG, K.; ZHU, P.; WU, Z.; ZHOU, H. 3D configuration of mandibles and controlling muscles in rove beetles based on micro-CT technique. **Analytical and Bioanalytical Chemistry**, [S. l.], v. 401, n. 3, p. 817-825, 2011.

LIM, K. S.; BARIGOU, M. X-ray micro-computed tomography of cellular food products. **Food Research International**, [S. l.], v. 37, n. 10, p. 1001-1012, 2004.

MACEDO, A. **Construção e uso de um tomógrafo com resolução micrométrica para aplicações em ciências do solo e do ambiente**. 1997. 129 p. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1997.

MACEDO, A.; NAIME, J. M.; VAZ, C. M. P.; CRESTANA, S.; CRUVINEL, P. E. Tomografia computadorizada de raios X e gama para investigação não-invasiva do solo. In: MARTIN-NETO, L.; VAZ, C.M.P.; SILVIO CRESTANA (Org.). **Instrumentação avançada em ciência do solo**. São Carlos: Embrapa Instrumentação Agropecuária, v.1, p.159-223, 2007.

MACEDO, A.; VAZ, C. M. P.; PEREIRA, J.; NAIME, J. M.; CRUVINEL, P. E.; CRESTANA, S. Wood density determination by x- and gamma-ray tomography. **International Journal of the Biology, Chemistry, Physics and Technology of Wood**, [S. l.], v. 56, p. 535-540, 2002.

MACEDO, A.; VAZ, C. M. P.; CRESTANA, S. X-ray microtomography to investigate thin layers of soil clod. **Soil and Tillage Research**, [S. l.], v. 49, p. 249-253, 1998.

MACEDO, A.; VAZ, C. M. P.; PEREIRA, J. C. D.; NAIME, J. M.; CRUVINEL, P. E.; CRESTANA, S. Wood density determination by X- and gamma-ray tomography. **Holzforschung**, [S. l.], v. 56, n. 5, p. 535-540, 2002.

MAYO, S. C.; CHEN, F.; EVANS, R. Micron-scale 3D imaging of wood and plant microstructure using high-resolution X-ray phase-contrast microtomography. **Journal of Structural Biology**, [S. l.], v. 171, n. 2, p. 182-188, 2010.

MIETTINEN, A.; HENDRIKS, C. L. L.; CHINGA-CARRASCO, G.; GAMSTEDT, E. K.; KATAJA, M. A non-destructive X-ray microtomography approach for measuring fibre length in short-fibre composites. **Composites Science and Technology**, [S. l.], v. 72, n. 15, p. 1901-1908, 2012.

MINATEL E. R. **Modelo computacional baseado em técnicas wavelets para relacionar imagens digitais obtidas em diferentes escalas e resoluções**. 2003. 174 p. Tese (Doutorado) - Instituto de Física, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

MODOLO, A. J.; FERNANDES, H. C.; NAIME, J. M.; SCHAEFER, C. E. G. R.; SANTOS, N. T.; SILVEIRA, J. C. M. Avaliação do ambiente solo-semente por meio da tomografia computadorizada. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, p. 525, 2008.

MODZEL G.; KAMKE F. A.; DE CARLO F. Comparative analysis of a wood: adhesive bondline. **Wood Science and Technology**, [S. l.], v. 45, n. 1, p. 147-158, 2011.

MOONEY S. J.; KOROSAK D. Using complex networks to model two- and three-dimensional soil porous architecture. **Soil Science Society of America Journal**, [S. l.], v. 73, n. 4, p. 1094-1100, 2009.

- NAIME, J. M. **Projeto e construção de um tomógrafo portátil para estudos de Ciência do Solo e plantas, em campo**. 1994. 87 p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1994.
- NAIME, J. M. **Um novo método para estudos dinâmicos, in situ, da infiltração da água na região não-saturada do solo**. 2001. 146 p. Tese (Doutorado) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2001.
- NGOM, N. F.; GARNIER, P.; MONGA, O.; PETH, S. Extraction of three-dimensional soil pore space from microtomography images using a geometrical approach. **Geoderma**, Amsterdam, v. 163, n. 1-2, p. 127-134, 2011.
- NUNAN, N.; RITZ, K.; RIVERS, M.; FEENEY, D. S.; YOUNG, I. M. Investigating microbial micro-habitat structure using X-ray computed tomography. **Geoderma**, Amsterdam, v. 133, n. 3-4, p. 398-407, 2006.
- ONOE, M.; TSAO, J. W.; YAMADA, H.; YOSHIMATSU, M. Computed-tomography for use on live trees. **Materials Evaluation**, [S. l.], v. 41, n. 6, p. 748-749, 1983.
- PAN, S. D. Image reconstruction and multidimensional field estimation from randomly scattered sensors. **IEEE Transactions on Image Processing**, New York, v. 17, n. 1, p. 94-99, 2008.
- PANTHAPULAKKAL, S.; SAIN, M. Investigation of structural changes of alkaline-extracted wood using X-ray microtomography and X-ray diffraction: a comparison of microwave versus conventional method of extraction. **Journal Of Wood Chemistry And Technology**, [S. l.], v. 33, n. 2, p. 92-102, 2013.
- PAREYT, B.; TALHAOUI, F.; KERCKHOFS, G.; BRIJS, K.; GOESAERT, H.; WEVERS, M.; DELCOUR, J. A. The role of sugar and fat in sugar-snap cookies: structural and textural properties. **Journal of Food Engineering**, [S. l.], v. 90, n. 3, p. 400-408, 2009.
- PEDROTTI, A., PAULETTO, E. A.; CRESTANA, S.; HOLANDA, F. S. R.; CRUVINEL, P. E.; VAZ, C. M. P. Evaluation of bulk density of Albaquarf soil under different tillage systems using the volumetric ring and computerized tomography methods. **Soil and Tillage Research**, [S. l.], v. 80, n. 1-2, p. 115-123, 2005.
- PEDROTTI, A.; PAULETTO, E. A.; CRESTANA, S.; CRUVINEL, P. E.; VAZ, C. M. P.; NAIME, J. M.; MACEDO, A. Tomografia computadorizada aplicada a estudos de um planossolo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 38, n. 7, p. 819-826, 2003.
- PEREIRA, M. F. L. **Um modelo de reconstrução tomográfica 3D para amostras agrícolas com filtragem de Wiener em processamento paralelo**. 2007. 149 p. Tese (Doutorado) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.
- PERREAU M.; TAFFOREAU P. Virtual dissection using phase-contrast X-ray synchrotron microtomography: reducing the gap between fossils and extant species. **Systematic Entomology**, [S. l.], v. 36, n. 3, p. 573-580, 2011.
- PETROVIC, A.M.; SIEBERT, J.E.; RIEKE, P.E. Soil bulk-density analysis in 3 dimensions by computed tomographic scanning. **Soil Science Society of America Journal**, [S. l.], v. 46, n. 3, p. 445-450, 1982.

Conceitos e aplicações da instrumentação para o avanço da agricultura

PIMENTEL, K.; TEIXEIRA, K. **Virtual reality: through the end new looking glass**. 2. ed. New York: McGraw-Hill, 1995.

PIRES, L. F.; BORGES, J. A. R.; BACCHI, O. O. S.; REICHARDT, K. Twenty-five years of computed tomography in soil physics: A literature review of the Brazilian contribution. **Soil and Tillage Research**, [S. l.], v. 110, n. 2, p. 197-210, 2010.

POSADAS, A. N.; CRESTANA, S. Aplicação da teoria fractal na caracterização do fenômeno "fingering" em solos não saturados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 17, n. 1, p. 1-8, 1993.

POSTNOV, A. D. N.; SASOV, A.; VAN DYCK, D. 3D in-vivo X-ray microtomography of living snails. **Journal of Microscopy**, [S. l.], v. 205, p. 201-204, 2002.

REIS, E. F.; SCHAEFER, C. E. G. R.; FERNANDES, H. C.; NAIME, J. M.; ARAÚJO, E. F. Densidade do solo no ambiente solo-semente e velocidade de emergência em sistema de semeadura de milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, n. 5, p. 777-786, 2006.

SCHOLZ, G.; ZAUER, M.; VAN DEN BULCKE, J.; VAN LOO, D.; PFRIEM, A.; VAN ACKER, J.; MILITZ, H. Investigation on wax-impregnated wood. Part 2: Study of void spaces filled with air by He pycnometry, Hg intrusion porosimetry, and 3D X-ray imaging. **Holzforschung**, [S. l.], v. 64, n. 5, p. 587-593, 2010.

STOCK, S. R. Recent advances in X-ray microtomography applied to materials. **International Materials Reviews**, [S. l.], v. 53, p. 129-181, 2008.

SVEDSTROM, K.; LUCENIUS, J.; VAN DEN BULCKE, J.; VAN LOO, D.; IMMERZEEL, P.; SUURONEN, J. P.; BRABANT, L.; VAN ACKER, J.; SARANPAA, P.; FAGERSTEDT, K.; MELLEROWICZ, E.; SERIMAA, R. Hierarchical structure of juvenile hybrid aspen xylem revealed using X-ray scattering and microtomography. **Trees-Structure and Function**, [S. l.], v. 26, n. 6, p. 1793-1804, 2012.

VAINBERG, E. I.; KAZAK, I. A.; KUROZAEK, V. P.; PLOTKINA, G. Z. Materials and method of certification of standard specimens for checking computerized X-ray tomographs. **Soviet Journal of Nondestructive Testing**, New York, v. 18, n. 9, p. 672-677, 1982.

VAN DEN BULCKE, J.; BOONE, M.; VAN ACKER, J.; VAN HOOREBEKE, L. High-resolution X-ray imaging and analysis of coatings on and in wood. **Journal of Coatings Technology and Research**, [S. l.], v. 7, n. 2, p. 271-277, 2010.

VAN DEN BULCKE, J.; BOONE, M.; VAN ACKER, J.; VAN HOOREBEKE, L. Three-dimensional X-ray imaging and analysis of fungi on and in wood. **Microscopy and Microanalysis**, [S. l.], v. 15, n. 5, p. 395-402, 2009.

VAZ, C. M. P. **Tomografia computadorizada aplicada a estudos de compactação de solos**. 1989. 110 p. Dissertação (Mestrado) - ESALQ-CENA, Piracicaba, 1989.

VAZ, C. M. P., CRESTANA, S.; REICHARDT, K. Tomografia computadorizada na avaliação da compactação de solos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 16, p. 153-159, 1992.

VAZ, C. M. P.; CRESTANA, S.; MASCARENHAS, S.; CRUVINEL, P. E.; REICHARDT, R.; STOLF, R. Using a computed tomography miniscanner for studying tillage-induced soil compaction. **Soil Technology**, [S. I.], v. 2, p. 313-321, 1989.

VAZ, C. M. P.; DE MARIA, I. C.; LASSO, P. O.; TULLER, M. Evaluation of an advanced benchtop micro-computed tomography system for quantifying porosities and pore-size distributions of two Brazilian oxisols. **Soil Science Society of America Journal**, [S. I.], v. 75, n. 3, p. 832-841, 2011.

ZHANG, K.; LI, D.; ZHU, P.; YUAN, Q.; HUANG, W.; LIU, X.; HONG, Y.; GAO, G.; GE, X.; ZHOU, H.; WU, Z. 3D visualization of the microstructure of *Quedius beelsoni* Cameron using micro-CT. **Analytical and Bioanalytical Chemistry**, [S. I.], v. 397, p. 2143-2148, 2010.

ZHOU, H.; PENG, X.; PETH, S.; XIAO, T.Q. Effects of vegetation restoration on soil aggregate microstructure quantified with synchrotron-based micro-computed tomography. **Soil and Tillage Research**, [S. I.], v. 124, p. 17-23, 2012.

ZHOU, H.; PENG, X. H.; PERFECT, E.; XIAO, T. Q.; PENG, G. Y. Effects of organic and inorganic fertilization on soil aggregation in an Ultisol as characterized by synchrotron based X-ray micro-computed tomography. **Geoderma**, Amsterdam, v. 195, p. 23-30, 2013.

ZHU, L. J.; DOGAN, H.; GAJULA, H.; GU, M. H.; LIU, Q. Q.; SHI, Y. C. Study of kernel structure of High-amylose and wild-type rice by X-ray microtomography and SEM. **Journal of Cereal Science**, [S. I.], v. 55, p. 1-5, 2012.

ZHU, L. J.; SHUKRI, R.; DE MESA-STONESTREET, N. J.; ALAVI, S.; DOGAN, H.; SHI, Y. C. Mechanical and microstructural properties of soy protein - high amylose corn starch extrudates in relation to physicochemical changes of starch during extrusion. **Journal of Food Engineering**, [S. I.], v. 100, n. 2, p. 232-238, 2010.