

A preservação de restos arqueobotânicos e o processo de análise por microtomografia de raios X

Cristina Marilyn Calo*
Marcia A. Rizzutto**

CALO, C.M.; RIZZUTTO, M.A. A preservação de restos arqueobotânicos e o processo de análise por microtomografia de raios X. R. Museu Arq. Etn. 40: 90-103, 2023.

Resumo: O uso de microtomografias de raios X para o estudo de restos macroscópicos de plantas recuperadas em sítios arqueológicos é uma prática relativamente recente em Arqueologia. No entanto, a técnica possui amplo espectro de aplicações em áreas de pesquisa muito diversas. Os diferentes trabalhos relacionados com a aplicação apontam a não destrutividade dos procedimentos microtomográficos como um de seus atributos relevantes, juntamente com a alta qualidade de discriminação das imagens tridimensionais geradas no processo. Este trabalho explora a importância dessa característica da microtomografia em relação a diferentes aspectos do estudo e da preservação dos macrorrestos arqueobotânicos. Ao preservar a integridade e habilitar a reanálise dos objetos examinados, a microtomografia de raios X permite otimizar a qualidade dos resultados e expandir a gama de técnicas analíticas aplicadas em seu estudo. Essa vantagem manifesta-se tanto na pesquisa em curso como naquelas que podem ser desenvolvidas no futuro sobre os mesmos objetos, usando técnicas e abordagens novas ou melhoradas. Além da preservação do objeto físico, a microtomografia providencia réplicas virtuais tridimensionais que podem ser utilizadas com finalidade analítica ou como respaldo da informação gerada. Aliás, esses modelos digitais apresentam grande adaptabilidade aos mecanismos de compartilhamento e disponibilização de dados de pesquisa, assim como podem ter efeitos notáveis na ênfase do valor visual dos materiais arqueobotânicos.

Palavras-chave: Microtomografia de raios X; Arqueobotânica; Técnicas não destrutivas; Macrorrestos; Preservação.

Introdução

Este artigo tem por objetivo apresentar algumas ideias em relação ao uso de técnicas tomográficas de alta resolução, especificamente a denominada microtomografia

de raios X, na abordagem arqueológica de diversos objetos e materiais de origem vegetal. O trabalho foca-se na possibilidade de realizar análises não destrutivas como uma das principais vantagens atribuídas à técnica microtomográfica e explora o impacto desse atributo no estudo e preservação de materiais arqueobotânicos.

A Arqueobotânica pode ser entendida como uma especialidade da Arqueologia que busca dar resposta a diversas problemáticas arqueológicas, com base no estudo de evidências

* Pesquisadora colaboradora do Museu de Arqueologia e Etnologia da Universidade de São Paulo. <marilncalo@usp.br>

** Professora livre-docente do Instituto de Física da Universidade de São Paulo. <rizzutto@usp.br>

macroscópicas e microscópicas de material botânico procedentes de sítios arqueológicos (Archilla, Giovannetti & Lema 2008). Tais evidências podem estar presentes como parte de objetos utilitários ou artísticos, como por exemplo os artefatos de madeira esculpida, a cestaria e as representações de plantas no passado. No entanto, as evidências botânicas encontram-se mais frequentemente como vestígios de diferentes atividades passadas, seja o carvão de fogueiras, os múltiplos restos decorrentes da preparação e consumo de alimentos, do cultivo de plantas, entre outras.

Os estudos em Arqueobotânica integram um conjunto de etapas teórico-metodológicas que se complementam com diferentes conceitos, métodos e técnicas comuns às ciências que estudam o reino vegetal, as quais são selecionadas e ajustadas em função do tipo de vestígios estudados. Várias técnicas de microscopia, por exemplo, são amplamente utilizadas nas análises de macrorrestos arqueobotânicos para examinar atributos estruturais que resultam invisíveis a olho nu, mas que podem fornecer informações sobre seus aspectos taxonômicos, tafonômicos e ecológicos (Pearsall 2016).

A microtomografia de raios X para acessar dados na escala microscópica tem aplicações relativamente recentes em áreas afins à Arqueobotânica, tais como a Paleobotânica ou os estudos agrônômicos e florestais, assim como existe um crescente interesse na técnica dentro de diversas especialidades da Arqueologia. Além disso, há uma tendência geral na difusão da técnica através de um amplo espectro de disciplinas e campos de estudo desde a década de 1980, que se dá em paralelo ao dinâmico desenvolvimento científico-tecnológico da microtomografia de raios X e à crescente disponibilidade de sistemas microtomográficos de laboratório e acesso a fontes de raios X do tipo síncrotron¹ (Galante *et al.* 2018).

1 “tais fontes [síncrotron] produzem radiação em ordens de magnitude mais intensas que as fontes de tomógrafos de laboratório, permitindo a obtenção de imagens em um menor tempo de aquisição, e atingindo resoluções espaciais da ordem de micrômetros, ou até dezenas de nanômetros, em alguns casos.” (Galante *et al.* 2018: 282)

Nos últimos 10 anos, a técnica de microtomografia de raios X, juntamente com os procedimentos computacionais de análise de imagens microtomográficas, tem sido usada para o estudo de variados tipos de materiais arqueológicos e com objetivos de pesquisa também diversos. Entre eles podem-se citar, por exemplo, alguns trabalhos de identificação de inclusões em artefatos de pedra e cerâmica (Obata, Miyaura & Nakano 2020; Ward *et al.* 2019), caracterização de pastas cerâmicas (Kahl & Ramminger 2012; Lima *et al.* 2007), objetos e decorações metálicas (Azeredo *et al.* 2019; Machado *et al.* 2019), análises de material ósseo humano e de outros animais e processos de mumificação (Beck *et al.* 2012; Bello, De Groote & Delbarre 2013; Boschin *et al.* 2015; Johnston *et al.* 2020; Nava *et al.* 2017), visualização de escritos antigos sobre suportes dobrados e frágeis (Stabile *et al.* 2021), estudos de processos tafonômicos em sedimentos e artefatos (McBride & Mercer 2012; Ngan-Tillard *et al.* 2015; Villagran *et al.* 2019), e identificação de materiais arqueobotânicos (Calo *et al.* 2019; Calo *et al.* 2020; Coubray, Zech-Matterne & Mazurier 2010; Haneca *et al.* 2012; Mizuno, Torizu & Sugiyama 2010; Murphy & Fuller 2017; Stelzner & Million 2015; Zong *et al.* 2017) (Barron, Pritchard & Denham 2022; Barron & Denham 2018).

As principais características da técnica estão associadas à escala micrométrica alcançada nas imagens e a possibilidade de reconstruir modelos tridimensionais dos objetos estudados. Estas imagens em alta resolução da estrutura interna dos materiais são de grande interesse nas mais diversas áreas da Arqueologia e em outros campos do conhecimento. No entanto, um dos aspectos notáveis da técnica microtomográfica, geralmente referido nos estudos aplicados, resulta da combinação de todos os atributos mencionados com o caráter não destrutivo, que preserva os materiais examinados. A não destrutividade dos processos de aquisição e análise de imagens é um fator fundamental na preservação dos objetos em estudo, com finalidades específicas para cada campo de conhecimento.

Uma forma de explorar a relevância dessa característica da microtomografia em relação à preservação dos restos macroscópicos de plantas é considerá-los, junto com os materiais arqueológicos em geral, como objetos multidimensionais. Em cada uma destas “dimensões” ou “versões” os materiais assumem diferentes atributos e estão sujeitos a diferentes interesses (Carman 2002). O autor detalha que na dimensão do registro arqueológico, os restos são interpretados como conjuntos de evidências sobre as quais interessa sobretudo aplicar procedimentos teórico-metodológicos para produzir conhecimento sobre o passado. Já na dimensão dos recursos arqueológicos e do patrimônio, os materiais são interpretados principalmente como objetos de aplicação de mecanismos de preservação e gestão. A preservação dos recursos arqueológicos tem como finalidade assegurar a existência a longo prazo dos materiais para a pesquisa arqueológica. Na dimensão patrimonial, a preservação supõe a proteção de objetos de interesse e acesso público além de acadêmico, os quais são também capazes de criar e sustentar sentidos de identidade coletiva (Carman 2002; Watson 2020).

No presente trabalho, estas ideias funcionam como guias para revisar e descrever o rol da não destrutividade das análises por microtomografia e os efeitos da preservação dos materiais na pesquisa arqueobotânica.

Sobre a microtomografia de raios X

Existem várias referências bibliográficas especializadas na descrição dos mecanismos, princípios, tecnologia instrumental e processos computacionais envolvidos no uso da técnica de microtomografia de raios X (Appoloni & Cesáreo 1994; Baruchel *et al.* 2000; Salvo *et al.* 2003; Stock 2008). No entanto, uma forma de compreender o funcionamento geral da técnica está relacionada à produção de imagens radiográficas e tomográficas de extenso uso na medicina. Estas técnicas se encontram na base do desenvolvimento da microtomografia de raios X de aplicação industrial e científica.

Numa radiografia, o objeto irradiado se situa no centro de um sistema composto por uma fonte de raios X e um detector. As radiações emitidas pela fonte interagem com a estrutura do objeto segundo o princípio físico da absorção de raios X e têm sua intensidade diminuída em função das interações que ocorrem com o material que as absorve, de modo que, ao chegar ao detector, sua intensidade se encontra reduzida ou atenuada.

As principais interações da radiação com a matéria que nos interessam de imediato ocorrem na forma de efeito fotoelétrico e efeito Compton. A atenuação da energia das radiações ocorre de maneira exponencial em função da espessura do material absorvedor e de sua densidade (quantidade de átomos por volume). Isso significa que, quanto mais espesso o material, menor será a energia da radiação que chega ao detector depois de atravessá-lo (se atravessá-lo). Por outro lado, quanto maior a energia dos fótons da radiação incidente, maior será também sua capacidade de penetração, embora se aumente, também, a probabilidade das interações ocorrerem – a radiação se propaga por uma distância maior e conseqüentemente, interage mais. Matematicamente, a atenuação dos fótons (ou da radiação) é bem representada pela equação:

$$I = I_0 e^{-\mu x}$$

em que I_0 é a intensidade da radiação incidente, I é a intensidade da radiação que emerge do material, x é a espessura do material absorvedor e μ é o coeficiente de atenuação linear total, relacionado à densidade do material e à probabilidade de os fótons serem absorvidos.

Todavia, a tomografia de raios X tem como base a obtenção de uma série destas radiografias – também chamadas projeções individuais – de um mesmo objeto. Essas radiografias são obtidas com diferentes posições angulares de modo que, por intermédio de um processo computacional baseado em um algoritmo de reconstrução, seja possível reconstruir a partir

de uma sequência de lâminas bidimensionais a estrutura interna do objeto tomografado. Assim, pode-se processar computacionalmente o conjunto final de imagens bidimensionais por meio de um algoritmo específico que permitirá gerar o volume, ou imagem tridimensional, da estrutura integral (interna e externa) desse objeto.

Uma vez que as imagens são geradas em altas resoluções, é possível observar detalhes e estruturas de tamanhos geralmente menores do que 100 μm , o que se diferencia da técnica tomográfica convencional, motivo por que a denominamos como microtomografia de raios X. Tal diferenciação está relacionada com variações na instrumentação e nos parâmetros técnicos alcançados pelos sistemas tomográficos de alta resolução e isto que se distingue dos tomógrafos mais conhecidos de uso médico.

Nos instrumentos microtomográficos, os raios X emitidos podem provir de diferentes tipos de fontes, como um sistema de luz síncrotron, um acelerador linear ou um tubo de raios X, cuja radiação incide diretamente no objeto. No arranjo experimental utilizado necessita-se também de um suporte giratório em que é colocado o objeto. O suporte permite que o objeto se apresente em diferentes

posições ou ângulos consecutivos. Em cada uma destas posições as radiações que atravessam o objeto projetam uma imagem dele em um detector específico, comumente uma CDD² bidimensional. No detector, cada fóton criará um par de carga dentro de um dos elementos da matriz do detector, que irá se acumulando ao longo da exposição. Depois, cada elemento da CDD é lido ou adquirido digitalmente ao transferir sua carga pixel por pixel, até completar todas as colunas de pixels, que serão armazenadas num sistema computacional (Stock 2008). A Figura 1 apresenta um desenho esquemático dos principais componentes de um sistema tomográfico.

A reconstrução tomográfica de um objeto é um processo computacional intensivo que envolve um algoritmo específico de reconstrução. Vários destes algoritmos têm sido desenvolvidos desde 1917 (Radon 1986), alguns deles com base em métodos matemáticos amplamente utilizados, como a Filtered Back Projection (FBP) ou a Direct Fourier Inversion (DFI) (Stock 2008). Com o avanço da tecnologia, a necessidade de algoritmos cada vez mais rápidos e precisos derivou em uma dinâmica acelerada também na indústria do *software* de tratamento e análise de imagens reconstruídas.

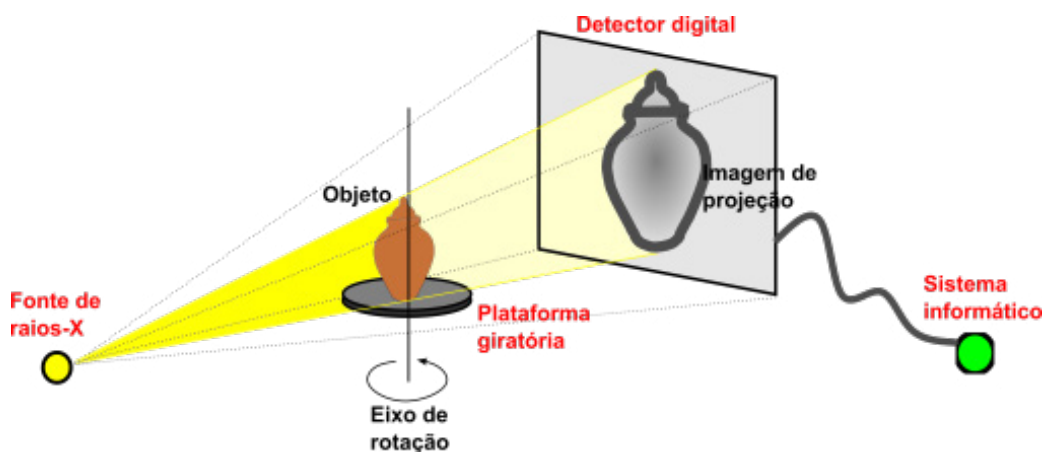


Fig. 1. Esquema básico de um sistema de microtomografia de raios X.

Fonte: figura elaborada a partir de Noel *et al.* (2005: 80).

2 Câmaras CCD (*charge coupled device*), ou seja, equipamento de carga acoplada, utilizado para a obtenção de imagens digitalizadas.

O estudo não destrutivo de materiais arqueobotânicos por meio de imagens microtomográficas

As imagens microtomográficas de raios X são geradas a partir de um tipo de radiação que é capaz de atravessar os materiais e assim de fornecer informação espacial, estrutural e quantitativa sobre as diferenças na densidade das estruturas e microestruturas internas presentes na sua trajetória. A junção de informações das diferentes atenuações dos raios X permite compor um mapa digital dessas morfologias, sejam elas superficiais ou internas, e construir imagens e modelos virtuais delas. O caráter não destrutivo dessa técnica se sustenta tanto nesse procedimento minimamente invasivo de obtenção de imagens do interior dos objetos como nos processos analíticos que, sem intervenção nos objetos físicos, se aplicam sobre essas imagens e modelos virtuais.

Cabe mencionar que ainda são escassos os estudos que avaliam os possíveis danos devidos à interação da radiação aplicada no processo de microtomografia sobre material vegetal. Muitos trabalhos envolvem danos de radiação em material biológico e estão relacionados à dosimetria de radiação, principalmente para exames clínicos. No que se refere às aplicações em Arqueologia, por exemplo, tem se estudado o impacto da exposição de material aDNA (ADN antigo) à radiação síncrotron (Immel *et al.* 2016). Há também avaliações sobre o grau em que tal interação pode alterar os resultados de datações ESR (Ressonância de Spin Eletrônico) sobre material dentário fóssil (Duval & Martín-Francés 2017). Desse modo deve-se ter em mente um protocolo das seqüências de análises com uso de radiação que serão realizadas no objeto, para não haver prejuízos em um tipo de análise posterior decorrente de análise anterior.

Em geral, o caráter não destrutivo da microtomografia é entendido principalmente em relação à estrutura física dos objetos estudados. Vários aspectos se vinculam ao fato de que os princípios de funcionamento da microtomografia tornam praticamente

desnecessário qualquer procedimento invasivo de preparação da amostra para a execução das análises, a não ser nos casos específicos em que os experimentos assim o requeiram. Os efeitos e resultados esperados pela aplicação destes procedimentos prévios à análise podem ser emulados nas etapas posteriores de análise das imagens microtomográficas, sem a participação do objeto físico e por procedimentos inteiramente virtuais executados sobre as lâminas digitais bidimensionais e os modelos tridimensionais em alta resolução. Essa possibilidade, além de otimizar alguns procedimentos analíticos, tem consequências relevantes na preservação do objeto físico em estudo, tanto no presente imediato como também no longo prazo, mantendo-o ao resguardo da degradação que pode derivar do manuseio em laboratório.

Alguns dos procedimentos invasivos da análise de estruturas microscópicas podem ser, por exemplo, o tingimento ou o recobrimento da amostra com alguma substância química particular, muito usados nas análises de microscopia. Se bem esse tipo de tratamento da amostra pode ser integrado ao estudo com microtomografias como meio de incrementar o contraste das imagens, a coloração e ajustes de contraste das estruturas internas de um objeto podem ser efetuadas sobre a imagem virtual. Outro procedimento utilizado na microscopia é a impregnação com resinas para consolidar a amostra e facilitar o corte e laminado do objeto em análise. Nas Figuras 2A e 2B mostram-se alguns exemplares de conjuntos de frutos arqueológicos, um dos quais tem sido utilizado para obter uma série de lâminas usando um micrótomo. No entanto, este tipo de procedimento de corte privilegia uma certa direção de corte que pode limitar as possibilidades de exame do objeto. Em contrapartida, utilizando-se a microtomografia, esses cortes podem ser feitos sem utilização de substâncias consolidantes, com base em procedimentos computacionais sobre o modelo virtual tridimensional da amostra (Figuras 3A, 3B e 3C). Dessa forma, também é possível obter cortes e lâminas sobre diferentes planos de visualização, tantos quantos

sejam necessários para o exame do objeto (Calo *et al.* 2020).

O corte e a laminação, assim como outros procedimentos computacionais que podem ser realizados sobre as imagens microtomográficas, como a segmentação de estruturas tridimensionais de interesse, as medições e cálculos de índices e parâmetros, entre outros, têm como base a teoria e o método do processamento e análise de imagens digitais e se sustentam no uso de algoritmos desenvolvidos para tal fim (Figuras 3 e 4). A digitalização das análises de materiais arqueobotânicos apresenta também grande potencial para a automação dos procedimentos analíticos e processamento de dados de imagem pela aplicação de recursos de *machine-learning* e *deep-learning*.

Por último, uma outra questão a levar em conta em relação ao uso de microtomografias

no estudo de objetos e materiais arqueológicos são as limitações ao tamanho da amostra segundo as características do sistema de microtomografia utilizado. Alguns instrumentos de laboratório de maior porte admitem a sondagem de objetos de tamanho da ordem de 50 cm de diâmetro e 50 kg de peso, com os quais um objeto de dimensões maiores pode, em determinadas circunstâncias, precisar de uma amostragem que envolve algum grau de intervenção no material. Praticamente a mesma situação se dá no caso dos objetos arqueológicos imóveis, que não podem ser transportados em sua totalidade ao laboratório ou que se veem impedidos por protocolos específicos. No caso do limite inferior, alguns instrumentos atualmente também permitem análises de materiais para estudar estruturas nanométricas

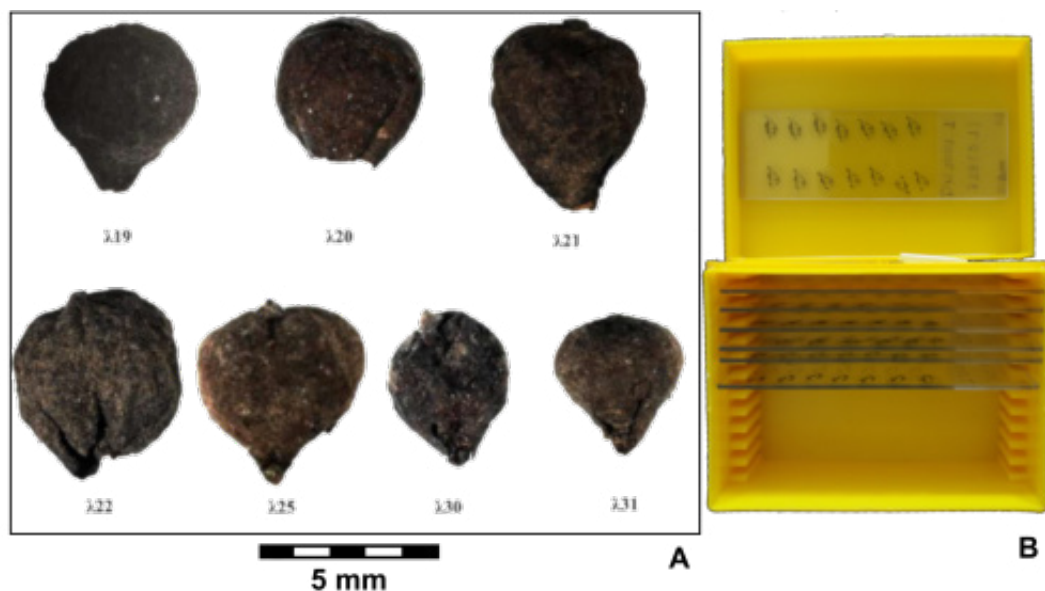


Fig. 2. (A) Conjunto de restos arqueobotânicos recuperados no sítio arqueológico Monte Castelo (RO). (B) Conjunto de 96 lâminas de 8 μ m de espessura em corte longitudinal obtidas por microtomização aplicada sobre um dos exemplares. O conjunto foi fixado em FAA (formaldeído, ácido acético, 50% etanol), desidratado em etanol, incluído em resina (Historesin Leica) e laminado usando um micrótomo rotatório Microm HM340E. As lâminas foram logo tingidas com azul de toluidina 0,05% em *buffer* de acetato de sódio pH 4,7 e fixadas sequencialmente em lâminas de vidro para microscópio (Laboratório de Anatomia Vegetal, Instituto de Biologia, UNICAMP).

Fonte: Furquim (2018: 200) e Furquim *et al.* (2021). Foto: Laura Furquim.

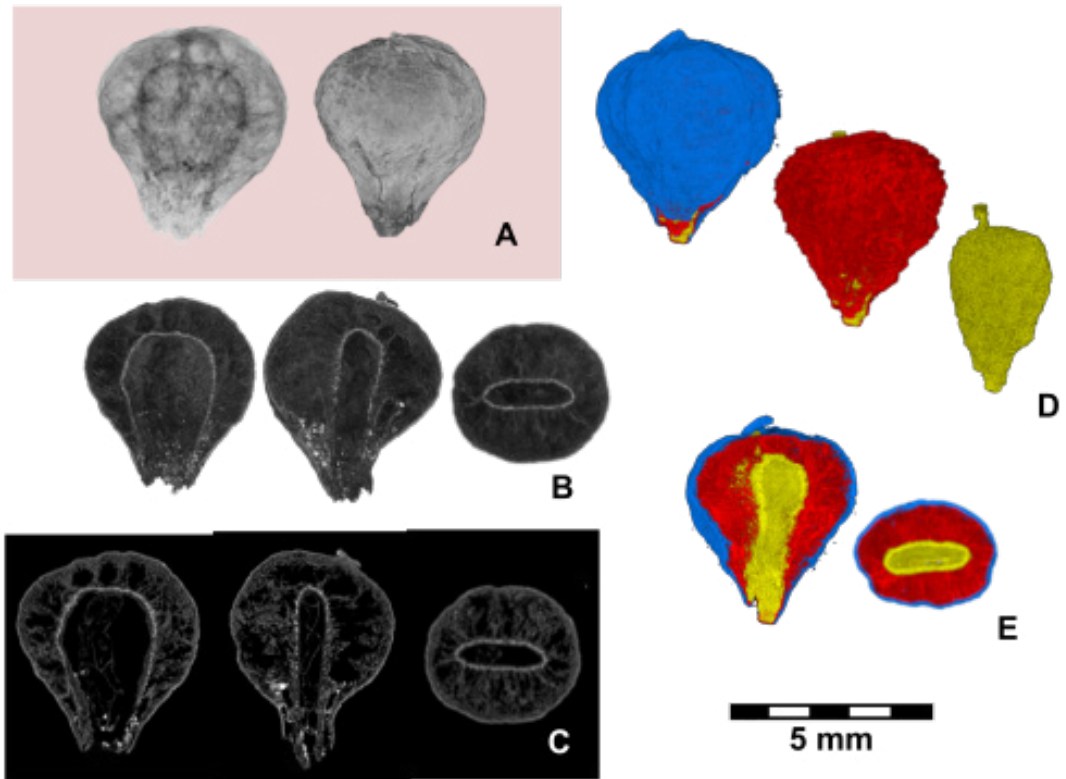


Fig. 3. (A) Imagem microtomográfica de projeção e volume reconstruído de um dos exemplares arqueobotânicos microtomografados de Monte Castelo (RO). (B) Cortes sobre diferentes planos obtidas a partir do volume reconstruído. (C) Lâminas reconstruídas sobre diferentes planos de corte. (D) Segmentação 3D, destaque e coloração das três camadas anatômicas presentes no interior do exemplar estudado. (E) Volume reconstruído com as três camadas em posição anatômica expostas em corte longitudinal e transversal. Instrumental e *software* de reconstrução: (A, B, C) MicroCT Skyscan 1272 (Bruker) e *software* Skyscan NRecon1.6.10.4, Laboratório Nacional de Nanotecnologia, Centro Nacional de Pesquisas em Energia e Materiais (LNNano-CNPEN); (E, D) MicroCT Phoenix v|tome|x (GE) e *software* Phoenix datos|x 2.3.0.844 - RTM, Museu de Zoologia, Universidade de São Paulo (MZ-USP). *Software* de processamento de imagens: CT Analyzer - CT Volume (Bruker) e ImageJ (Rueden *et al.*, 2017; Schneider, Rasband & Eliceiri 2012).

Fonte: Figura elaborada com base em Calo *et al.* (2019:6).

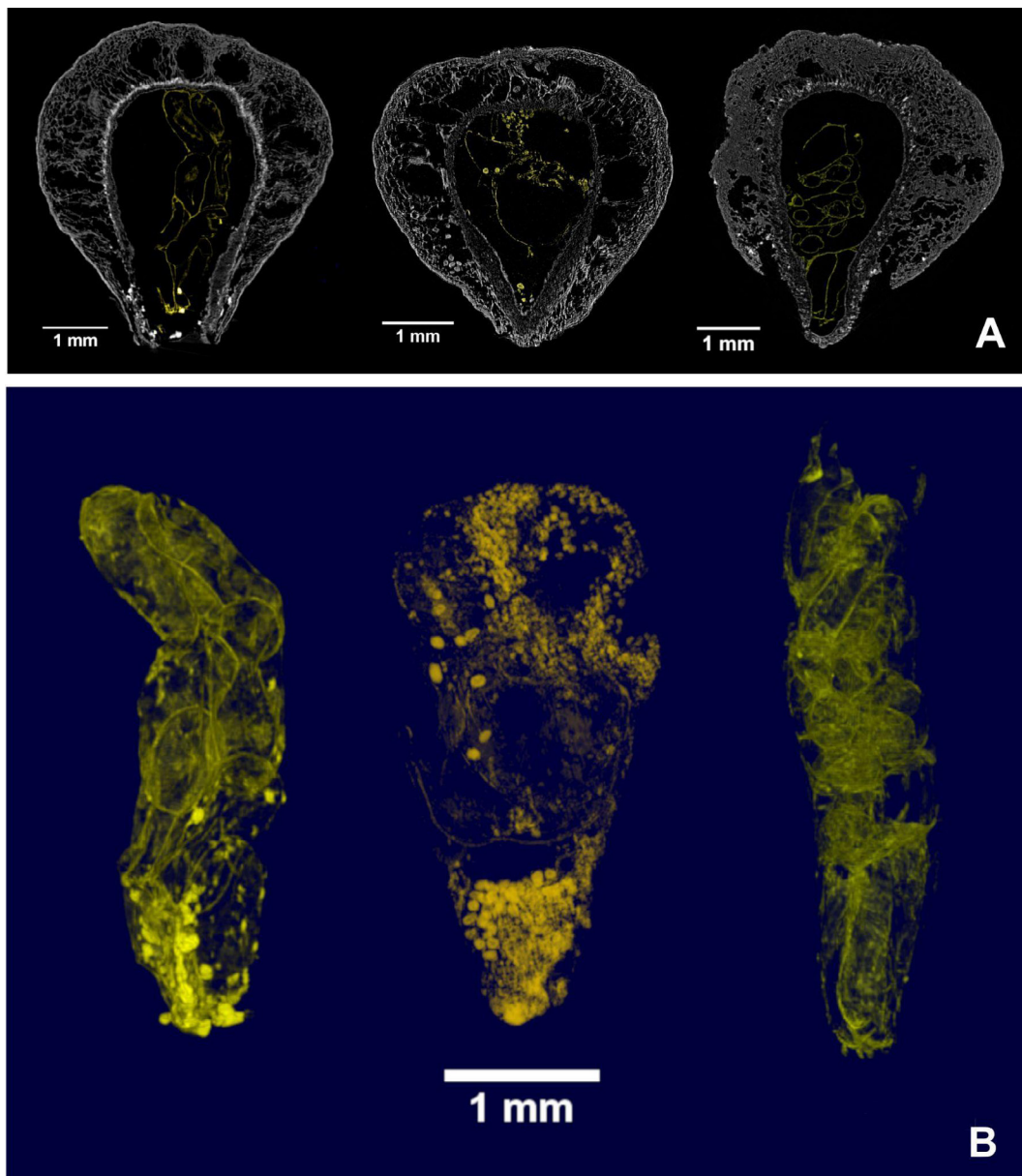


Fig. 4. (A) Lâminas extraídas de três dos exemplares microtomografados de Monte Castelo (RO), com aplicação digital de cor na estrutura anatômica presente no interior da cavidade central. (B) Reconstruções 3D de cada uma destas estruturas. Instrumental e *software* de reconstrução: MicroCT Skyscan 1272 (Bruker) e *software* Skyscan NRecon1.6.10.4, LNNano-CNPEM. Software de processamento de imagens: CT Analyzer - CT Volume (Bruker) e ImageJ (Rueden *et al.* 2017; Schneider, Rasband & Eliceiri 2012).

Fonte: figura elaborada com base em Calo *et al.* (2019: 10).

A preservação dos restos arqueobotânicos e os modelos virtuais tridimensionais gerados por microtomografia de raios X

A não destrutividade dos processos de aquisição e análise de imagens microtomográficas contribui à preservação dos materiais arqueobotânicos. Uma parte importante do interesse na técnica tem como base essa relação e os benefícios decorrentes da preservação física e virtual dos restos vegetais. Essas qualidades podem ser revisadas e organizadas em relação ao esquema das três dimensões dos materiais arqueológicos proposto no trabalho de Carman (2002) e comentado acima.

Se considerarmos os restos arqueobotânicos na dimensão dos recursos de pesquisa a longo prazo, a disponibilização das amostras originais e suas réplicas virtuais para a aplicação futura de novas técnicas e abordagens ainda não desenvolvidas resulta em uma clara vantagem a respeito de métodos de análise mais invasivos. Já em um prazo mais curto, a possibilidade de realizar estudos complementares, repetir análises, corroborar resultados e aplicar ajustes experimentais representam benefícios da preservação tangíveis também na dimensão do registro ou evidências em processo de análise. Neste plano, o potencial e a versatilidade do processamento analítico dos modelos virtuais têm repercussões positivas sobre a quantidade e qualidade da informação obtida sobre as amostras preservadas.

Ao referirmos aos benefícios da preservação dos restos arqueobotânicos na dimensão do patrimônio arqueológico, é possível apontar algumas ideias que não são exaustivas. Os estudos de patrimônio representam uma área de conhecimento ampla e complexa que excede os alcances deste artigo. No entanto, pode-se mencionar que o efeito visual associado aos modelos digitais tridimensionais gerados por microtomografia ajuda a pensar os materiais arqueobotânicos na dimensão do patrimônio arqueológico. A visualidade dos objetos tem um papel destacado na negociação entre os discursos acadêmicos e públicos em torno de sua representatividade em termos do mundo físico e simbólico (Carman 2002; Watson 2020).

A visualização possui em si mesma uma notável relevância cultural e a interpretação dos materiais do patrimônio arqueológico se apoia, em parte, na possibilidade de representação e exibição visual dos objetos (Watson 2020). A produção de modelos tridimensionais contribui para realçar a “visualidade” dos materiais arqueobotânicos, geralmente pouco considerados em termos de exibição e representação visual além da pesquisa, e assim remarcar sua significância histórica e cultural.

A respeito dessa observação, as perspectivas mais recentes em relação aos estudos de Patrimônio Cultural apontam as dificuldades que surgem ao tentar transferir a valoração histórica, estética e visual, tradicionalmente conferidas aos objetos do patrimônio, ao campo dos objetos que formam parte de atividades de pesquisa. No que diz à Arqueologia, é interessante notar que alguns materiais de estudo, como as grandes construções históricas, os sítios arqueológicos monumentais, os objetos de surpreendente beleza artística e destreza técnica e as grandes coleções, estão imbuídos de uma significância e valor patrimonial que não é diretamente atribuível a outros muitos materiais que também formam parte da pesquisa arqueológica (Joyce 2003; Lourenço & Wilson 2013).

Entre estes materiais se encontram os restos fragmentários das plantas utilizadas no passado e também os restos de ossos derivados do consumo de animais, subprodutos da talha lítica, amostras de solos antropizados, entre outros. É possível também incluir neste grupo algumas ferramentas analíticas produzidas nos estudos arqueológicos, como as coleções de referência de material comparativo atual de origem diversa. A contribuição do discurso e da prática arqueológica e das especialidades é de particular relevância para denotar a significância histórica e atribuir visibilidade a este conjunto de materiais arqueológicos. (Joyce 2003; Lourenço & Wilson 2013). A integração da microtomografia de raios X na pesquisa arqueobotânica colabora com essa prática ao providenciar imagens que, por sua natureza tomográfica e tridimensional, destacam a visualidade dos materiais, além de funcionar como ferramenta para sua análise e preservação.

Comentários finais

O processo de produção de imagens microtomográficas de restos arqueobotânicos macroscópicos permite tanto a preservação das amostras como a documentação de modelos virtuais que replicam as características morfológicas internas e externas de cada exemplar, de acordo com os parâmetros experimentais estabelecidos. Ao mesmo tempo, o processo de análise das imagens microtomográficas é aplicado integralmente sobre as imagens e modelos digitais e não sobre o objeto físico, o que diminui as possibilidades de alterar ou destruir o material pelo tratamento em laboratório. A preservação é possível devido a que esta técnica admite o contornamento de uma série de procedimentos de preparação de amostras para o exame de atributos microscópicos, especialmente os internos, que são comuns a outras técnicas como a microscopia de luz e microscopia eletrônica de varredura (MEV).

É importante notar aqui que nem todos os estudos arqueobotânicos baseados em restos macroscópicos têm necessariamente por objeto obter informações sobre a estrutura e microestrutura interna dos restos. No entanto, alguns processos de identificação taxonômica dos exemplares estudados, aspectos da formação dos depósitos arqueobotânicos, questões cronológicas e sobre o uso das plantas no passado, podem ser contrastados com dados da estrutura, organização e outros atributos morfológicos internamente presentes nos macrorrestos. Quando esse é o caso, a microtomografia de raios X representa uma alternativa ou complemento a outras técnicas que também fornecem acesso a dados da estrutura interna, mas que não permitem recuperar integralmente o material estudado (Calo *et al.* 2020).

A possibilidade de preservar os exemplares microtomografados em estado íntegro tem efeitos tanto na qualidade dos resultados de pesquisa como na gestão a longo prazo das coleções de materiais arqueobotânicos. A preservação do objeto físico amplia o alcance dos resultados ao prover mais de uma oportunidade de aplicação e ajustes dos procedimentos experimentais no longo e curto prazo. Também expande o espectro de técnicas de estudo que podem ser

adotadas (estudos multiabordagens), o que inclui propostas analíticas baseadas no desenvolvimento futuro de outras técnicas e à luz de problemáticas e abordagens inovadoras.

Aliás, as imagens geradas nos estudos por microtomografia de raios X podem ter um rol além de dar sustento às análises não destrutivas e contribuir para a preservação das amostras. A réplica digital tridimensional de alta resolução representa um excelente meio de documentação dos materiais que se conservam por meio de bases de dados destinadas à consulta, compartilhamento e reuso de dados de imagem (Jeffrey 2014). Os modelos tridimensionais podem referenciar detalhadamente coleções inteiras para uso na comparação e identificação de exemplares e como respaldo das coleções físicas e da informação publicada. Por último, as imagens de microtomografia também contribuem para incrementar o valor visual dos restos arqueobotânicos, colocando em destaque a preocupação pelo resguardo e a valorização dos diversos tipos de materiais envolvidos na pesquisa arqueológica.

Agradecimentos

Este trabalho foi realizado com o apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) através do processo nº 2016/12867-7. Algumas das imagens apresentadas aqui foram realizadas nas instalações do Laboratório Nacional de Nanotecnologia do Centro Nacional de Pesquisa em Energia e Materiais (LNNano-CNPEN), uma Organização Social supervisionada pelo Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações (MCTI) (Proposta Experimental: Micro CT-20347). Agradecemos ao Prof. Hussam Zaher por facilitar o acesso ao sistema de microtomografia do Museu de Zoologia da USP e à equipe técnica do Laboratório de Microtomografia pela assistência na aquisição das imagens. Também agradecemos à Profa. Sandra Carmello-Guerreiro pelo apoio com a preparação da amostra para microscopia de luz no Laboratório de Anatomia Vegetal do Instituto de Biologia da Universidade Estadual de Campinas.

CALO, C.M.; RIZZUTTO, M.A. Preservation of archaeobotanical remains and the analytic process using X-ray microtomography. *R. Museu Arq. Etn.* 40: 90-103, 2023.

Abstract: X-ray microtomography use to study macrobotanical remains is a recent practice in archaeology, despite its broad spectrum of applications in several research areas, which point to the non-destructiveness of microtomographic procedures as one of its main attributes, along with the high resolution of the resulting tridimensional images. This paper explores the importance of this particular feature regarding some aspects of studying and preserving macroscopic archaeobotanical remains. By preserving the integrity and enabling the re-analysis of investigated objects, X-ray microtomography optimizes the quality of the results and expands the scope of the analytical techniques used. This advantage is expressed both in current and future research since the object can be preserved for further studies and analyses following the development of new techniques and approaches. Along with the preservation of the physical object, a tridimensional digital replica or model is generated, which can be used for analytical purposes or as a back-up for analytical data. Moreover, these virtual tridimensional models enhance the mechanisms of sharing and availability of research data and have a noticeable effect in emphasizing the visual value of archaeobotanical materials.

Keywords: X-ray microtomography; Archaeobotany; Non-destructiveness; Macrovestigies; Preservation.

Referências bibliográficas

- Appoloni, C.; & Cesáreo, R. 1994. Microscanning and microtomography with X-ray tubes. *LFNATEC – Publicação Técnica do Laboratório de Física Nuclear Aplicada*, 4(1). <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.23079.47527>
- Archilla, S.; Giovannetti, M.; Lema, V. (Comps.). 2008. *Arqueobotánica y teoría arqueológica: discusiones desde Suramérica*. Universidad de Los Andes, Facultad de Ciencias Sociales, Departamento de Antropología, CESO, Ediciones Uniandes.
- Azeredo, S.R. *et al.* 2019. Analysis of precious metals from the tomb of the “Lady of Cao” by X-ray microtomography and digital radiography. *X-Ray Spectrometry*, 48(5): 499-504. <https://doi.org/10.1002/xrs.3013>
- Barron, A.; Denham, T. 2018. A microCT protocol for the visualization and identification of domesticated plant remains within pottery sherds. *Journal of Archaeological Science: Reports*, 21: 350-358. <https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2018.07.024>
- Barron, A.; Pritchard, J.; Denham, T. 2022. Identifying archaeological parenchyma in three dimensions: Diagnostic assessment of five important food plant species in the Indo-Pacific region. *Archaeology in Oceania*, 57(3): 189-213. <https://doi.org/10.1002/arco.5276>
- Baruchel, J. *et al.* 2000. Phase imaging using highly coherent X-rays: Radiography, tomography, diffraction topography. *Journal of Synchrotron Radiation*, 7(3): 196-201. <https://doi.org/10.1107/S0909049500002995>
- Beck, L. *et al.* 2012. Checking collagen preservation in archaeological bone by non-destructive studies (Micro-CT and IBA). *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions*

- with *Materials and Atoms*, 273: 203-207.
<https://doi.org/10.1016/j.nimb.2011.07.076>
- Bello, S.M.; De Groote, I.; & Delbarre, G. 2013. Application of 3-dimensional microscopy and micro-CT scanning to the analysis of Magdalenian portable art on bone and antler. *Journal of Archaeological Science*, 40(5): 2464-2476.
<https://doi.org/10.1016/j.jas.2012.12.016>
- Boschin, F. *et al.* 2015. A Look from the Inside: MicroCT Analysis of Burned Bones. *Ethnobiology Letters*, 6(2): 258-266.
<https://doi.org/10.14237/ebl.6.2.2015.365>
- Calo, C.M. *et al.* 2020. A correlation analysis of Light Microscopy and X-ray MicroCT imaging methods applied to archaeological plant remains' morphological attributes visualization. *Scientific Reports*, 10(1): 15105.
<https://doi.org/10.1038/s41598-020-71726-z>
- Calo, C.M. *et al.* 2019. Study of plant remains from a fluvial shellmound (Monte Castelo, RO, Brazil) using the X-ray MicroCT imaging technique. *Journal of Archaeological Science: Reports*, 26: 101902.
<https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2019.101902>
- Carman, J. 2002. *Archaeology and Heritage: An Introduction*. A&C Black, London.
- Coubray, S.; Zech-Matterne, V.; Mazurier, A. 2010. The earliest remains of a Citrus fruit from a western Mediterranean archaeological context? A microtomographic-based re-assessment. *Comptes Rendus Palevol*, 9(6-7): 277-282.
<https://doi.org/10.1016/j.crpv.2010.07.003>
- Duval, M.; Martín-Francés, L. 2017. Quantifying the impact of μ CT-scanning of human fossil teeth on ESR age results: DUVAL and MARTÍN-FRANCÉS. *American Journal of Physical Anthropology*. 163: 205-212.
<https://doi.org/10.1002/ajpa.23180>
- Furquim, L.P. (2018). Arqueobotânica e mudanças socioeconômicas durante o Holoceno Médio no sudoeste da Amazônia [Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo]. <https://doi.org/10.11606/D.71.2019.tde-30112018-102517>
- Galante, D. *et al.* 2018. Aplicação de técnicas de análise síncrotron em arqueologia. *Cadernos do LEPAARQ (UFPEL)*, 15(30): 277-289.
<https://doi.org/10.15210/lepaarq.v15i30.13522>
- Haneca, K. *et al.* 2012. X-Ray sub-micron tomography as a tool for the study of archaeological wood preserved through the corrosion of metal objects. *Archaeometry*, 54(5): 893-905.
<https://doi.org/10.1111/j.1475-4754.2011.00640.x>
- Immel, A. *et al.* 2016. Effect of X-ray irradiation on ancient DNA in sub-fossil bones – Guidelines for safe X-ray imaging. *Scientific Reports*, 6: 32969.
<https://doi.org/10.1038/srep32969>
- Jeffrey, S. 2014. Archaeological informatics. In: C. Smith (Ed.). *Encyclopedia of Global Archaeology*, Springer, New York, 332-334.
https://doi.org/10.1007/978-1-4419-0465-2_1053
- Johnston, R. *et al.* 2020. Evidence of diet, deification, and death within ancient Egyptian mummified animals. *Scientific Reports*, 10(1): 14113.
https://doi.org/10.1007/978-1-4419-0465-2_1185
- Joyce, R.A. 2003. The monumental and the trace: Archaeological conservation and the materiality of the past. In: Neville, A.; Bridgland, J. (Orgs.). *Proceedings of the Conservation Theme: Of the past, for the future: Integrating Archaeology and Conservation*. The Getty Conservation Institute, Los Angeles, p. 13-18.
- Kahl, W.-A.; Ramminger, B. 2012. Non-destructive fabric analysis of prehistoric pottery using high-resolution X-ray microtomography: A pilot study on the late Mesolithic to Neolithic site Hamburg-Boberg. *Journal of Archaeological Science*, 39(7): 2206-2219.
<https://doi.org/10.1016/j.jas.2012.02.029>
- Lima, I. *et al.* 2007. Caracterização de materiais cerâmicos através da Microtomografia Computadorizada 3D. *Revista Brasileira de Arqueometria, Restauração e Conservação*, 1(2), 22-27.

- Lourenço, M.C.; Wilson, L. 2013. Scientific heritage: Reflections on its nature and new approaches to preservation, study and access. *Studies in History and Philosophy of Science Part A*, 44(4): 744-753. <https://doi.org/10.1016/j.shpsa.2013.07.011>
- Machado, A.S. *et al.* 2019. Analysis of metallic archaeological artifacts by x-ray computed microtomography technique. *Applied Radiation and Isotopes: Including Data, Instrumentation and Methods for Use in Agriculture, Industry and Medicine*, 151: 274-279. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2019.06.016>
- McBride, R.; Mercer, G.D. 2012. Assessing damage to archaeological artefacts in compacted soil using microcomputed tomography scanning. *Archaeological Prospection*, 19(1): 7-19. <https://doi.org/10.1002/arp.426>
- Mizuno, S.; Torizu, R.; Sugiyama, J. (2010). Wood identification of a wooden mask using synchrotron X-ray microtomography. *Journal of Archaeological Science*, 37(11), 2842-2845. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2010.06.022>
- Murphy, C.; Fuller, D.Q. 2017. Seed coat thinning during horsegram (*Macrotyloma uniflorum*) domestication documented through synchrotron tomography of archaeological seeds. *Scientific Reports*, 7(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-017-05244-w>
- Nava, A. *et al.* 2017. Virtual histological assessment of the prenatal life history and age at death of the upper paleolithic fetus from Ostuni (Italy). *Scientific Reports*, 7(1), 9427. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-09773-2>
- Ngan-Tillard, D. *et al.* 2015. Under pressure: a laboratory investigation into the effects of mechanical loading on charred organic matter in archaeological sites. *Conservation and Management of Archaeological Sites*, 17(2): 122-142. <https://doi.org/10.1080/13505033.2015.1124179>
- Noel, J. *et al.* 2005. Les collections muséographiques en 3D par microtomographie Rayons X. In: *Virtual Retrospect 2005*, nov. 2005, Biarritz, France. 80-84.
- Obata, H.; Miyaura, M.; Nakano, K. 2020. Jomon pottery and maize weevils, *Sitophilus zeamais*, in Japan. *Journal of Archaeological Science: Reports*, 34(Part A): 102599. <https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2020.102599>
- Pearsall, D.M. 2016. *Paleoethnobotany: A Handbook of Procedures* (3. ed.). Routledge, Abingdon.
- Radon, J. 1986. On the determination of functions from their integral values along certain manifolds. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 5(4): 170-176. <https://doi.org/10.1109/TMI.1986.4307775>
- Rueden, C.T. *et al.* 2017. ImageJ2: ImageJ for the next generation of scientific image data. *BMC Bioinformatics* 18: 529. <https://doi.org/10.1186/s12859-017-1934-z>.
- Schneider, C.A., Rasband, W.S., Eliceiri, K.W. 2012. NIH image to ImageJ: 25 years of image analysis. *Nat. Methods* 9: 671-675. <https://doi.org/10.1038/nmeth.2089>.
- Salvo, L. *et al.* (2003). X-ray micro-tomography an attractive characterisation technique in materials science. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 200: 273-286. [Disponível em < <https://bit.ly/41pKX6z> >. Acesso em: 23/02/2023.
- Stabile, S. *et al.* (2021). A computational platform for the virtual unfolding of Herculaneum Papyri. *Scientific Reports*, 11(1): 1695. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-80458-z>
- Stelzner, J.; Million, S. 2015. X-ray Computed Tomography for the anatomical and dendrochronological analysis of archaeological wood. *Journal of Archaeological Science*, 55: 188-196. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2014.12.015>

- Stock, S.R. (2008). *Microcomputed tomography: Methodology and applications* (1. ed). CRC Press, Boca Ratón.
- Villagran, X.S. *et al.* 2019. Virtual micromorphology: The application of micro-CT scanning for the identification of termite mounds in archaeological sediments. *Journal of Archaeological Science: Reports*, 24: 785-795. <https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2019.02.035>
- Ward, I. *et al.* 2019. Synchrotron X-ray tomographic imaging of embedded fossil invertebrates in Aboriginal stone artifacts from Western Australia: Implications for sourcing, distribution and chronostratigraphy. *Journal of Archaeological Science: Reports*, 26: 101840. <https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2019.05.005>
- Watson, S. (2020). Archaeology, visibility and the negotiation of heritage. In: Smith, L. Waterton, E. (Orgs.). *Taking Archaeology out of Heritage*. Cambridge Scholars Publishing, Newcastle. p. 28-47.
- Zong, Y. *et al.* 2017. Selection for Oil Content During Soybean Domestication Revealed by X-Ray Tomography of Ancient Beans. *Scientific Reports*, 7(1): 43595. <https://doi.org/10.1038/srep43595>