

## APLICAÇÃO DE LUZ UV-C COMO FERRAMENTA NA CONSERVAÇÃO DE ARTE RUPESTRE

Igor S. Constantino<sup>1</sup>; Benedito B. F. Filho<sup>1</sup>; Wilkins O. Barros<sup>1</sup>; Rubens S. Soares<sup>1</sup>; Tetisuelma L. Alves<sup>1,2</sup>; Francisco E. P. dos Santos<sup>3</sup>; Gabrielly J. V. Silva<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Química - Universidade Federal do Piauí (UFPI) - Teresina, PI, 64049-550, Brasil

<sup>2</sup>Departamento de Química - Instituto Federal do Maranhão (IFMA) - Bacabal, MA, 65700-000, Brasil

<sup>3</sup>Departamento de Física - Universidade Federal do Piauí (UFPI) - Teresina, PI, 64049-550, Brasil

<sup>4</sup>Departamento de Estatística - Universidade Federal do Piauí (UFPI) - Teresina, PI, 64049-550, Brasil

igorconstantinopuf@ufpi.edu.br

**Palavras-Chave:** Conservação, arte rupestre, luz UV-C.

### Introdução

A conservação do patrimônio cultural, especialmente de sítios com arte rupestre, está diretamente relacionada a ambientes naturais, geralmente abrigos rochosos, que apresentam pinturas e gravuras rupestres em suas superfícies. Esses locais, que preservam registros das sociedades passadas, possuem um valor histórico, cultural e científico inestimável. Por meio dessas representações, é possível compreender aspectos do cotidiano e da organização social dos povos originários no território brasileiro (Williams; Koeneman; P. Taçon, 2019).

Dessa forma, a preservação da arte rupestre é uma preocupação central na preservação do patrimônio cultural, enfrentando desafios únicos devido à sua exposição ao ambiente natural ou a ações antrópicas (Farias, *et al.*; 2017). Nos dias atuais, esse tema tem despertado crescente interesse entre a comunidade científica, resultando em análises e abordagens que buscam minimizar os danos e garantir a sobrevivência dessas manifestações artísticas pré-coloniais. No entanto, apesar dos esforços, a conservação eficaz de arte rupestre continua sendo um desafio devido à complexidade dos materiais envolvidos e à influência de fatores ambientais, uma vez que esse patrimônio está exposto ao tempo. Nesse cenário, a arqueometria surge como uma ferramenta interdisciplinar para a análise e preservação dessas expressões culturais, pois alia ciências naturais, como a física e a química, às ciências humanas (Farias *et al.*, 2017).

A cidade de Inhuma está situada no estado do Piauí, Brasil. Criada oficialmente em 17 de maio de 1954, seu processo de povoamento teve início no começo do século XX, impulsionado pela chegada de comerciantes atraídos pela exploração da maniçoba. Esse município é onde se localiza o sítio arqueológico Apertados, que é a localidade de interesse do presente estudo. Ele tem sido alvo de uma série de desafios relacionados à conservação. Entre os principais problemas, destacam-se os efeitos da degradação natural, como o crescimento de microrganismos, como líquens, fungos e microflora, que comprometem a integridade dos pigmentos e gravuras, podendo danificar até as superfícies rochosas (Moura J. I. *et al.*, 2022).

Em busca de soluções para minimizar esses problemas, este trabalho propõe o desenvolvimento e a implementação de um método inovador de conservação utilizando a luz ultravioleta tipo C (UV-C). Esta tecnologia emergente tem mostrado grande potencial na desinfecção microbiológica, sendo capaz de inativar organismos biológicos nocivos, como fungos e bactérias (Pfendler *et al.*, 2020).].

## Material e Métodos

### Levantamento Fotográfico e Amostragem do Sítio dos Apertados

Inicialmente, realizou-se um levantamento fotográfico do sítio Apertados, seguido do seu entorno externo e, por fim, da parte interna do mesmo, onde estão localizados os grafismos. Em seguida, as capturas foram feitas com o auxílio de uma escala de 10 cm, onde ela foi fixada e próxima das pinturas. Coletou-se seis amostras, entre pinturas rupestres e um fragmento de rocha que serviu de branco analítico, com diferentes tonalidades de vermelho, que foram etiquetadas e armazenadas em pequenos tubos plásticos (eppendorfs), estéreis e secos. Realizou-se a coleta de alguns microrganismos presentes no local também. Utilizou-se algumas lâminas e um pequeno martelo para adquirir alguns miligramas das amostras.

### Análise Elementar por Espectrometria de Fluorescência de Raios-X portátil

Utilizou-se o espectrômetro portátil da Thermo Fisher Scientific, modelo Niton XL3t Ultra, onde o equipamento possui um tubo de raios-X com ânodo de Ag (prata), detector de deriva de silício (SSD) e opera com uma voltagem de 50 kv, possui uma corrente de 200  $\mu$ A e uma potência de 2 W. A utilização do ED-XRFp se faz necessária para se ter uma análise elementar das pinturas rupestres, logo, tem-se um entendimento das propriedades químicas dos grafismos. Essa varredura foi realizada nas amostras, com uma duração de 60 segundos, sendo 15 segundos para os quatros filtros e com um ponto focal de 3 mm.

### Análise Molecular por Espectroscopia Raman

Utilizou-se um sistema de microscopia Raman, utilizando um laser de argônio operando a 758 nm e 200 mW de potência de saída. Onde essa análise foi realizada com retroespelhamento, com um espectrômetro triplo T64000 (Jobin Yvon Horiba) acoplado a um sistema CCD para a obter os dados da radiação espalhada. A fenda do espectrômetro foi ajustada para uma resolução de  $2 \text{ cm}^{-1}$ , e o feixe foi focado na amostra com o auxílio de um microscópio Olympus BX40. Foram coletados espectros nas regiões de 100 a  $900 \text{ cm}^{-1}$ , com 4 acumulações de 60 segundos e intervalos de 5 minutos entre cada medição.

### Arqueometria Experimental: Ensaios Suporte Sedimentado

Foi utilizado um suporte rochoso, que foi subdividido em quatro partes. Em seguida, prepararam-se tintas à base de ocres coletadas na etapa de amostragem. Esses pigmentos foram processados de acordo com as técnicas utilizadas pelos povos antigos. No entanto, a rocha foi analisadas por fluorescência de raios X portátil (ED-XRFp) antes da aplicação das tintas, e os ocres também foram caracterizados antes de serem transformados em recursos pigmentantes, em seguida, foram colocados camadas de microflora sobre os quatros quadrantes da rocha pigmentada e por fim, foi incidido a luz UV-C sobre esses microrganismos.

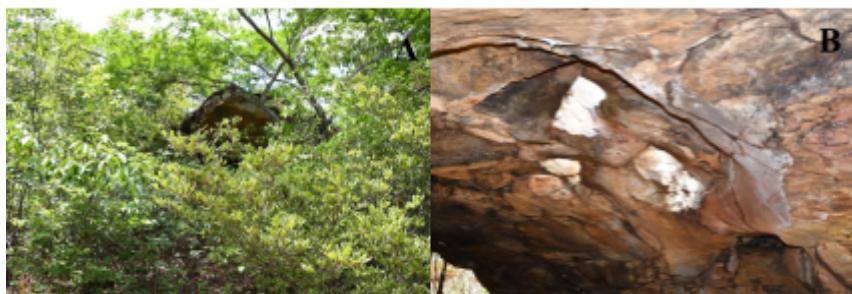
## Resultados e Discussão

### Levantamento fotográfico e Amostragem do Sítio dos Apertados

O sítio dos Apertados está localizado nas coordenadas S 060 38.743' e W 041O 47.497' (Moura, 2022), possuindo uma abertura para o lado Leste. Ele é um abrigo rochoso, sua entrada possui árvores típicas da região, onde é possível observar uma ponta do teto da

rocha, como mostra a Figura 1.a. Na parte interior, nota-se a presença de algumas aberturas no teto, como mostra a Figura 1.b. No paredão é possível observar uma variedade de artes rupestres, com colorações vermelhas, mas é notória a diferença de tonalidade entre os grafismos. Essas pinturas têm o formato não figurativo, como pontos e outras figuras geométricas.

**Figura 1:** Entrada do sítio Apertados (A) e aberturas no Teto dos (B).

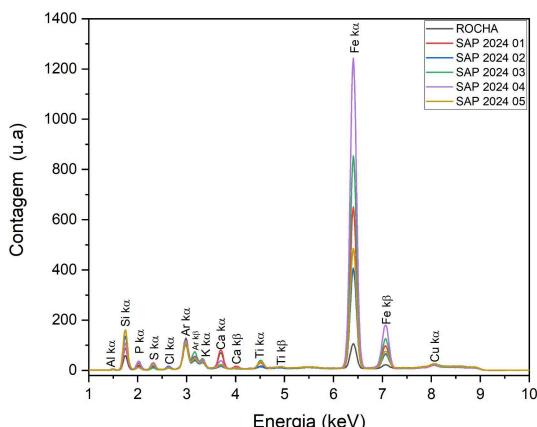


Fonte: Acervo do grupo de pesquisa, 2024

### Análise Elementar por Espectrometria de Fluorescência de Raios-X

As análises por pXRF são utilizadas para realizar estudos elementares de materiais (Asfora, 2010). Na arqueometria, a XRF se faz indispensável, pois os estudos podem ser realizados *in situ*. Fazendo com que essa técnica seja não-destrutiva, pois é um patrimônio cultural da humanidade. Por tanto, a técnica foi realizada para entender como é a composição elementar das amostras, com isso, é possível entender quais componentes elementares se diferenciam entre as amostras pigmentadas e o branco analítico, que é a rocha (Figura 2).

**Figura 2:** Análise de pXRF para o suporte rochoso e as cinco amostras de pigmento vermelho com diferentes tonalidades.



Fonte: Autores, 2025.

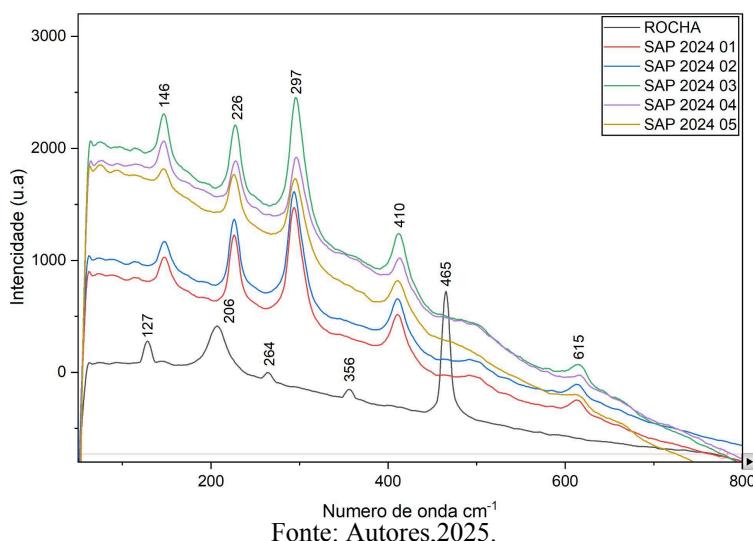
No espectro elementar da Figura 2 observa-se elementos como alumínio (Al), silício (Si), enxofre (S), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg) e fósforo (P), são associados ao suporte rochoso, logo, os teores devem ser parecidos em cada análise (Cavalcante et., 2015). Normalmente, em sítios arqueológicos encontram colorações e tonalidades do vermelho, o elemento responsável por isso é o ferro (Fe), ele é encontrado na goethita e/ou hematita. Em todas as amostras, é possível notar a presença dos sinais bem distintos desse elemento, na forma de ferro. O branco também apresenta sinais, porém, ele tem um comportamento muito inferior, quando comparado aos das pinturas. Por fim, podemos dar destaque para a amostra SAP 04, onde ela apresenta o maior sinal para o Fe, logo, entende-se deve apresentar uma

tonalidade mais forte, pois quanto maior a concentração de óxido de ferro, mais forte será sua tonalidade (Cavalcante, 2012).

### Análise Molecular por Espectroscopia Raman

Nas amostras analisadas do sítio dos Apertados, notou-se um alto teor de ferro, de acordo com a análise elementar, para entender a origem mineral desse elemento, utilizou a espectroscopia Raman como técnica de análise mineralógica (Figura 3).

**Figura 3:** Espectro Raman do suporte rochoso e das cinco amostras de pigmento vermelho com diferentes tonalidades



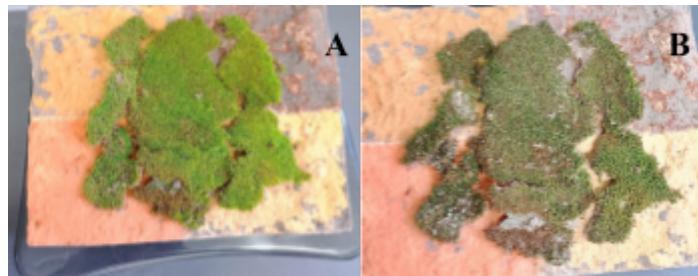
Fonte: Autores, 2025.

A análise dos espectros revelou bandas características de hematita ( $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ) nos picos em 226, 297, 410 e 615  $\text{cm}^{-1}$ . Esses resultados corroboraram os dados obtidos por ED-XRFp, que indicaram alta concentração de Fe nos pigmentos, confirmando que as tintas minerais eram baseadas em ocres ricos nesse elemento. Além disso, a banda em 146  $\text{cm}^{-1}$ , identificada nos pigmentos, é compatível com anatásio ( $\text{TiO}_2$ ), possivelmente relacionada a contaminações adquiridas ao longo do tempo. Na amostra de rocha, foram observados picos em 127, 206 e 465  $\text{cm}^{-1}$  atribuídos ao quartzo ( $\text{SiO}_2$ ), enquanto as bandas em 264 e 356  $\text{cm}^{-1}$  sugerem a presença de feldspatos, interpretados como fases aluminossilicáticas com diferentes associações estruturais. No entanto, são necessárias análises adicionais e comparação com bibliotecas espectrais específicas de minerais (RRUFF, SDBS) para confirmação (Rodrigues *et al.*, 2018).

### Arqueometria Experimental: Ensaios Suporte Sedimentado

Na investigação da eficiência da luz UV-C em microfloras, líquens, musgos e outros é necessário obter os parâmetros de emissão da radiação ultravioleta do tipo C (UVC) sobre os microorganismos e as pinturas. Assim, neste teste, utilizou-se uma fina camada de musgos para sofrer a radiação ultravioleta do tipo C. Em seguida, utilizou-se uma capela, na qual foi instalada uma lâmpada UVC conectada a um suporte adaptado, mantido a 90 cm de altura em relação ao plataforma e disposto em um ângulo de 90°. A radiação foi aplicada sobre as placas durante 4 horas diárias, com interrupções a cada 60 minutos para registro da evolução do processo, totalizando 12 horas de exposição, como comprova a Figura 4.a e 4.b. Porém, notou que o método não era energeticamente favorável para eliminação desses seres, pois demandava uma quantidade muito grande de energia e tempo de emissão, logo, entende-se que fica difícil de replicar esses parâmetros em um sítio arqueológico, onde, são encontrados normalmente distantes de fontes de energia e quaisquer outros recursos.

**Figura 4:** Início da emissão da luz UV-C (A) e após 12 horas de emissão (B).



Fonte: Autores, 2025.

Baseando-se no trabalho de Pfendler (2020), que utilizou-se de uma menor distância entre a lâmpada e o material de estudo, o suporte incidente de radiação foi colocado em uma distância 45 cm do suporte rochoso diminuído para, onde o processo foi repetido novamente. Com isso, notou-se uma grande mudança nos liquens presentes na amostra, onde eles começaram a ter uma diminuição em suas colônias e foram perdendo sua coloração. Isso ocorreu em apenas quatro horas, assim é importante realizar etapas futuras, para se ter parâmetros mais confiáveis e que possa ser aplicado sobre essa microflora, sendo necessário realizar esse processo para outros tipos de microrganismos como, líquens e fungos. Por fim, é essencial desenvolver um sistema mais compacto, já que o objetivo é levá-lo para campo, também é necessário que essa técnica seja aplicada tomando todos os cuidados possíveis, para que não seja perigoso para os pesquisadores que irão manipular esses instrumentos, uma vez que a radiação ultravioleta é prejudicial à saúde humana contudo, este parâmetro tem que evitar ou eliminar riscos de degradação das artes rupestre.

### Conclusões

Os resultados obtidos neste estudo evidenciam a complexidade dos processos de degradação que afetam as pinturas rupestres do sítio arqueológico dos Apertados, ressaltando a necessidade de métodos eficazes de conservação. Nesse contexto, a aplicação da radiação UV-C mostra-se uma alternativa promissora para a conservação das pinturas rupestres, sobretudo no controle da proliferação de microorganismos. Entretanto, para validar a eficácia desse método, torna-se indispensável a realização de análises elementares e moleculares antes e após a exposição. A espectroscopia de fluorescência de raios X portátil (ED-XRFp) revelou a composição elementar das pinturas e do suporte rochoso, destacando o elevado teor de ferro, elemento essencial para as diferentes tonalidades de vermelho presentes nos grafismos. Aliado a isso, a espectroscopia Raman corroborou os resultados obtidos por ED-XRFp, confirmado a presença de hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) como pigmento responsável pela coloração vermelha. Também foram identificados picos característicos de anatásio, feldspatos e quartzo evidenciando a interação entre os minerais da rocha e os constituintes das pinturas.

Esses resultados reforçam a relevância da obtenção de dados precisos para o realizar a radiação UV-C como ferramenta de conservação preventiva e corretiva. Contudo, ainda se faz necessária a otimização de parâmetros, como a distância da fonte emissora e o tempo de exposição, a fim de assegurar a eficácia e a segurança do método. Estudos futuros deverão concentrar-se no aperfeiçoamento das técnicas analíticas e no controle rigoroso da aplicação da radiação, garantindo uma estratégia de preservação eficiente e sustentável do patrimônio rupestre.

### Agradecimentos

Ao Grupo de Tecnologia Analítica Aplicada (GTAA), Interdisciplinary Chemistry Laboratory (ICL) e à Universidade Federal do Piauí (UFPI).

## Referências

ASFORA, Viviane Khoury. **Fluorescência de Raios X por dispersão de energia aplicada à caracterização de tijolos de sítios históricos de Pernambuco.** Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas Nucleares. Recife, 2010.

CAVALCANTE, L. C. D. **Caracterização Arqueométrica de Pinturas Rupestres PréHistóricas, Pigmentos Minerais Naturais e Eflorescências Salinas de Sítios Arqueológicos.** 204 f. Tese (Doutorado em Química) - Departamento de Química, Universidade Federal de Minas Gerais, 2012.

CAVALCANTE, L. C. D.; FABRIS, J. D.; LAGE, M. C. S. M. Eflorescências Salinas Do Sítio De Arte Rupestre Pedra Do Castelo, Piauí, Brasil. CLIO: **Revista de Pesquisa Histórica**, v. 30, n. 1, p. 120-142, 2015.

FARIAS FILHO, B. B; LAGE, M. C. S. M.; LIMA, R. A. M. Estudo Químico De Eflorescências Salinas Do Sítio Arqueológico Toca Exú Do Jurubeba Do Parque Nacional Serra Da Capivara, Piauí, Brasil. **Química Nova**, v. 40, n. 9, p. 983-988, 2017.

JENKINS, GI **Transdução de sinal em respostas à radiação UV-B.** Annu. Rev. Plant Biol. 2009 , 60 , 407–431.

MOURA, J. I. **Metodologias analíticas aplicadas ao estudo de paleo-sedimentos e pinturas rupestres em sítios arqueológicos do piauí.** Orientadora: Maria Conceição S. M. Lage. 2022. Tese de Doutorado (Química Analítica) - Universidade Federal do Piauí, Teresina, 2022.

PFENDLER, S. et al. Factors inducing bryophyte growth on prehistoric pigments and effect of UV-C treatment. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 28, n. 3, p. 2987–2994, 8 set. 2020.

RODRIGUES, M. I. C.; DA SILVA, J. H.; ERONI, F. P. S.; DENTZIEN-DIAS, P.; CISNEROS, J. C.; DE MENEZES, A. S.; FREIRE, P. T. C.; VIANA, B. C.; Physicochemical analysis of Permian coprolites from Brazil. **Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy** 189: 93-99, 2018.

SONG, B.-M. et al. Ultraviolet-C light at 222 nm has a high disinfecting spectrum in environments contaminated by infectious pathogens, including SARS-CoV-2. **PLOS ONE**, v. 18, n. 11, p. e0294427, 28 nov. 2023.

WILLIAMS, S.; KOENEMAN, T.; P. TAÇON. **The Importance of Conserving Rock Art: A Conversation at the Jibbon Petroglyph Royal National Park, Australia.** Rock Art Research, 36 , 189-198. 2019