

RESEARCH ARTICLE

BIOPROSPECÇÃO MICROBIANA EM AZULEJOS HISTÓRICOS DA ACADEMIA PERNAMBUCANA DE LETRAS (APL), RECIFE, BRASIL

Microbial Bioprospecting on Historic Tiles at the Pernambuco Academy of Letters (APL), Recife, Brazil

Emanuella Maria da Conceição, Henry Socrates Lavalle Sullasi, Clara Diana Figueirôa Santos, Norma Buarque de Gusmão, Teresinha Gonçalves da Silva, Vitória Cristina Santiago Alves, Sarah Signe do Nascimento, Jôuldes Matos Duarte

Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), Brasil
(✉ henry.lavalle@ufpe.br)

RESUMO. O estado de Pernambuco, no Brasil, é considerado uma das regiões com maior número de edificações adornadas com fachadas de azulejos. Estes painéis estão vulneráveis às ações da biodeterioração microbiana. O objetivo desta pesquisa foi realizar uma bioprospecção superficial dos fungos e bactérias dos painéis de azulejos da Academia Pernambucana de Letras (APL). Para o isolamento dos microrganismos foram utilizados seis meios de cultura, três para fungos (BDA, MEA e PGRBA) e três para bactérias (MH, R2 e TSA). A identificação da população microbiana foi por taxonômica clássica. Além disso, fragmentos de azulejos foram analisados por microscópio eletrônico de varredura (MEV), microscopia de fluorescência e espectroscopia de fluorescência de raios X (FRX). Os meios de cultura com melhores resultados foram o MEA, PGRBA, TSA e R2, totalizando 362 cepas isoladas. As imagens microscópicas revelaram biofilmes microbianos entre o vitrificado e o corpo cerâmico.

PALAVRAS-CHAVE. Patrimônio cultural, painéis de azulejo, biodeterioração, microrganismos, Brasil.

ABSTRACT. The state of Pernambuco, Brazil, is considered one of the regions with the highest number of buildings adorned with tile facades. These panels are vulnerable to microbial biodeterioration. The objective of this research was to perform a surface bioprospecting of fungi and bac-

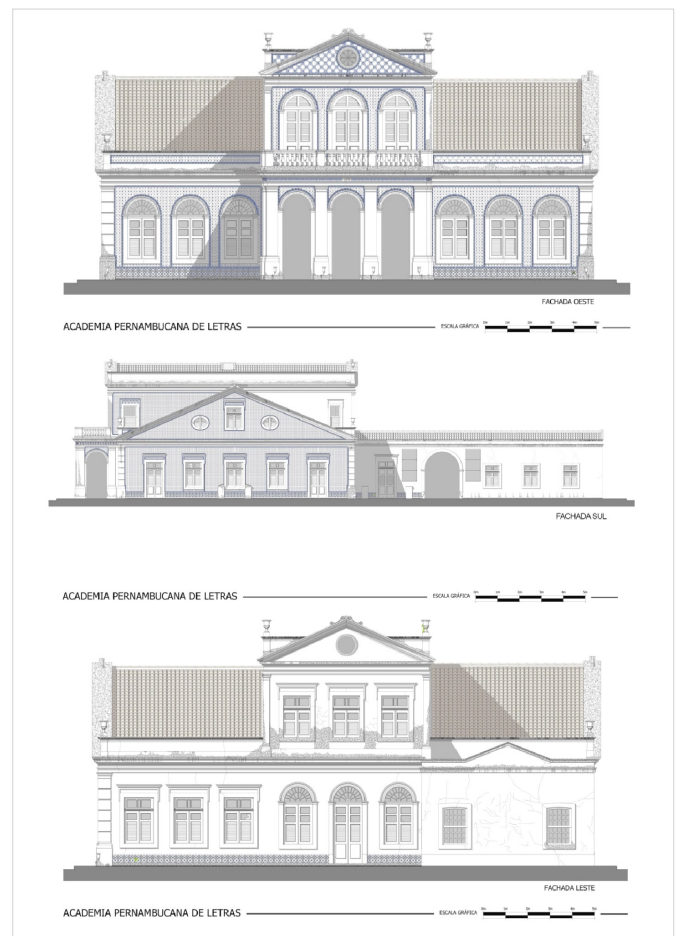


Figura 1. Desenho arquitetônico da Academia Pernambucana de Letras (APL). Fonte: Passos, 2015.

Received: November 12, 2025. Accepted: December 29, 2025. Published: January 17, 2026.

Edited & Published by Pascual Izquierdo [P. I. Egea]. Arqueol. Iberoam. Open Access Journal.
Creative Commons License (CC BY 4.0). <https://n2t.net/ark:49934/404>. <https://purl.org/aia/5701>.

teria present on the tile panels of the Pernambuco Academy of Letters (APL). Six culture media were used to isolate the microorganisms—three for fungi (BDA, MEA, and PGRBA) and three for bacteria (MH, R2, and TSA). The microbial population was identified using classical taxonomy. In addition, tile fragments were analyzed by scanning electron microscopy (SEM), fluorescence microscopy, and X-ray fluorescence spectroscopy (XRF). The culture media with the best results were MEA, PGRBA, TSA, and R2, totaling 362 isolated strains. Microscopic images revealed microbial biofilms between the glaze and the ceramic body.

KEYWORDS. *Cultural heritage, tile panels, biodeterioration, microorganisms, Brazil.*

1. INTRODUÇÃO

Os bens patrimoniais preservam a memória e o legado de uma Nação, reunindo valores históricos, materiais e estéticos de suas populações e território (Costa *et al.* 2015; Pedrazani 2022). Os painéis de azulejos são exemplos de bens imóveis e integrados que fazem parte dos tesouros do patrimônio cultural brasileiro (El Nouhy 2013; Menezes 2021).

Os painéis de azulejos difundindo-se principalmente nos estados do Pará, Maranhão, Pernambuco, Rio de Janeiro e Rio Grande do Sul. Nestas regiões encontram-se os maiores e mais significativos acervos de azulejos históricos do Brasil (Cavalcanti & Cruz 2002; Silva 2025).

Em Pernambuco a cultura de revestir edificações nas áreas internas ou externas de diferentes espaços foi um marco da arquitetura civil e religiosa, tornando segundo Simões o estado em que o azulejo se “nacionaliza brasileiro”. Uma das edificações que expressa bem o empoderamento dos azulejos na arquitetura civil de Pernambuco é a Academia Pernambucana de Letras (APL), também conhecida como Casarão do Barão Rodrigues Mendes (Passos 2015; Rached 2018).

Os painéis de azulejos das fachadas externas da APL, estão expostos a diversos intemperismos, tais como fatores antropogênicos (descaso do poder público, abandono do proprietário e vandalismos) e fatores ambientais: físicos (radiação solar, chuvas, umidade e ventos), químicos (sais minerais e poluição atmosférica) e bióticos (animais, plantas e microrganismos).

Os fatores bióticos, ou também chamados biodeterioradores, são apontados como um dos principais causadores de danos aos azulejos, com destaque ao ataque

microbiano que causa danos irreversíveis à obra, devido à composição mineral do substrato e às condições ambientais específicas, abrigam comunidades microbianas adaptadas a situações de estresse físico-químico e limitação nutricional (Coleine 2022; Stanaszek-Tomal 2024; Rotondi 2024)

A atuação isolada ou combinada desses fatores tem contribuído para a perda progressiva desse valioso patrimônio brasileiro. A identificação dos microrganismos deterioradores é um passo importante para entender os mecanismos da biodeterioração, para o desenvolvimento de tratamentos mais específicos e estabelecimento de novas biotecnologias. A presente pesquisa teve como objetivo realizar uma bioprospecção dos fungos e bactérias possivelmente causadores da biodeterioração dos painéis de azulejos de um dos mais importantes patrimônios culturais do Brasil, a Academia Pernambucana de Letras.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Local de estudo

As amostras de azulejos foram retiradas das fachadas da Academia Pernambucana de Letras (APL). O casarão da APL está situado na cidade do Recife, Pernambuco, Brasil, em uma área urbana com intenso fluxo diário de veículos automotores, e a cerca de 560 metros de distância do Rio Capibaribe. A edificação possui três fachadas com azulejos, a leste, oeste e sul; o lado norte não possui azulejos. A Figura 1 apresenta o desenho arquitetônico da Academia Pernambucana de Letras, detalhe para as fachadas de azulejos portuguesas do século XIX.

2.2 Coleta das amostras

As coletas foram realizadas em 11 pontos das fachadas leste, oeste e sul (Figura 2). Diferentes elementos, tais como a distância do solo, umidade, incidência solar, manchas e estado de conservação dos azulejos foram considerados para a escolha dos pontos. Com auxílio de uma espátula esterilizada, realizou-se uma raspagem delicada e superficial da região do rejunte para não danificar a peça. Também foram retiradas amostras da parte vitrificada, parcialmente soltas, assim como fragmentos da chacota exposta dos azulejos mais deteriorados. Em seguida o material foi acondicionado em placas de Petri esterilizadas e levadas ao Laboratório de Microbiologia Ambiental e Industrial (LAMAI), depar-



Figura 2. Mapeamento dos pontos de coleta nas fachadas de azulejos da Academia Pernambucana de Letras, Recife, Pernambuco, Brasil. 1) Janela Direita no Alto Rui (JDAR), 2) Janela Direita no Baixo Rui (JDBR), 3) Arcos Rui Barbosa (AR), 4) Porta Rui (PR), 5) Janela Superior Rui (JSR), 6) Janela Esquerda no Alto Rui (JEAR), 7) Janela Esquerda no Baixo Rui (JDBR), 8) Janela Malaquias (JM), 9) Porta no Alto Malaquias (PAM), 10) Porta no Baixo Malaquias (PBM) e 11) Janela do Estacionamento (JE).

tamento de Antibióticos do Centro de Biociências da UFPE (DANTI-CB/UFPE).

2.3 Isolamento e purificação dos microrganismos

Foram preparadas suspensões com os fragmentos dos azulejos e dos rejuntas, sendo pesado 0,1g e transferido para tubos de ensaio contendo 5 mL de água destilada esterilizada, após homogeneização, em agitador de tubos de ensaio, por um minuto para favorecer o desprendimento de estruturas microbianas da amostra. Depois, 100 μ L da suspensão foram transferidas para placas de Petri contendo meios de cultura: Batata Dextrose Ágar (BDA), Rosa de Bengala Peptona Glicose (PGRBA) e Extrato de Malte Ágar (EMA) suplementados com cloranfenicol (50 mg/L) para os fungos; e Ágar Mueller-Hinton (MH), Ágar Triptona de Soja (TSA) e R2

suplementados com 50 mg/L de nistatina para culturas bacterianas. As placas de Petri foram mantidas a 30 °C por 168 horas, a cada 24 horas realizada a contagem das unidades formadoras de colônia (UFC) e no sétimo dia a purificação das colônias.

Na sequência os isolados fúngicos foram semeados em meio BDA com 50 mg/L de cloranfenicol, e os bacterianos em ISP2 (International *Streptomyces* Project 2) e MH, ambos contendo 50 mg/L nistatina. Posteriormente, o material semeado foi incubado a 30 °C por cinco dias. Todo o ensaio foi realizado em triplicata. Os resultados foram analisados estatisticamente pelo teste *T*.

2.4 Identificação morfológica dos fungos

Para os fungos filamentosos, a identificação foi realizada através da técnica de cultura em lâmina de Sidrim

et al. (2004). Para a identificação através de taxonomia clássica de todas as amostras de fungos, foram observadas características macroscópicas (coloração, aspecto e diâmetro das colônias) e microscópicas (microestruturas somáticas e reprodutivas). A identificação foi realizada através de literatura específica, como Parker (1982), Domsch (1993), Hesseltine & Fennel (1955), Jacobs & Botha (2008), Pitt *et al.* (1988), Klich (2002), Raper e Thom (1949) e Subrahmanyam (1983). As leveduras foram identificadas por testes bioquímicos de acordo com Barnett *et al.* (2000) e Hoog (2000).

2.5 Identificações morfológicas das bactérias

Para os isolados bacterianos, procedeu-se ao teste de coloração de Gram, catalase e de oxidase, tendo como base a literatura Bergey *et al.* (1923). Os resultados dos testes e das colorações foram utilizados para efetuar a identificação dos microrganismos presentes nas amostras. Enquanto que, os isolados de actinobactérias realizou-se a observação da micromorfologia, cada linhagem foi cultivada pela técnica de microcultivo segundo a técnica de Shirling e Gottlieb (1966).

2.6 Microscopia eletrônica de varredura

Amostras da parte vitrificada e pedaços do biscoito dos azulejos foram lavados e fixados em uma solução contendo 2,5% de glutaraldeído/4% de formaldeído em um tampão de cacodilato de sódio 0,1 M a pH 7,2, posteriormente submetidas a ponto crítico usando CO₂ líquido e revestido com ouro coloidal e, por último, as amostras foram montadas em suporte de alumínio, examinadas e fotografadas em microscópio eletrônico de varredura JEOL-5600LV seguindo a técnica adaptada de Neto *et al.* (2017). Os procedimentos de preparo e leitura das amostras foram realizados no Laboratório de Imunopatologia Keizo Asami (LIKA), UFPE.

2.7 Microscopia de fluorescência

A técnica de coloração da parede celular fúngica foi aplicada utilizando o corante fluorescente *Calcofluor White M2R* para visualizar estruturas filamentosas no biofilme presente nos fragmentos de azulejos obtidos. Seguindo a técnica Harrington (2003), o preparo e leitura das amostras foram feitas no Núcleo de Pesquisas em Ciências Ambientais da Universidade Católica de Pernambuco.

2.8 Composição mineralógica dos azulejos

Com o objetivo de caracterizar a composição mineralógica dos azulejos da Academia Pernambucana de Letras, as peças foram analisadas por espectroscopia de fluorescência de raios X (FRX) no DEN-UFPE (Departamento de Energia Nuclear) na Universidade Federal de Pernambuco (UFPE).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Influência dos múltiplos meios de cultura na quantificação (UFC) e no isolamento microbiano

As unidades formadoras de colônias (UFC) bacterianas aparecerem após 24 horas e os fungos filamentosos e leveduras após 48 horas. De acordo com o teste *T*, o número de UFC bacterianas foi maior que dos fungos (ver Tabelas 1 e 2).

As bactérias são organismos procarióticos que se desenvolvem mais rápido do que os fungos, devido a sua organização celular apresentar estruturas mais simples e ao método de reprodução, divisão celular, ser menos complexo em comparação aos organismos eucarióticos como os fungos (Chen 2022; Wang & Kuzyakov 2024). Porém, em relação ao número de isolamento, a quantidade de fungos foi maior do que os isolados bacterianos, 197 e 164, respectivamente.

Fungos são frequentemente mais resistentes a ambientes de baixa umidade, variações grandes de temperatura, pH desfavorável, salinidade e escassez de nutrientes, condições que tipicamente ocorrem em contextos patrimoniais e concomitantemente em peças como livros, fotografias, quadros, esculturas, artefatos arqueológicos, painéis de azulejos, entre outros bens históricos. Estas características de resistência microbiana, voltadas ao ambiente patrimonial não são tão comuns entre os organismos procariotos (Sepcic *et al.* 2011; Venâncio *et al.* 2017; Bardgett & Caruso 2020; Mutungi *et al.* 2024).

Trabalhos como o de Alonso-Reyes *et al.* (2025) e Chandra *et al.* (2025) destacam que em ambientes com limitação de carbono ou energia fungos tendem a se sobressair frente às bactérias, em parte pela sua capacidade de utilizar substratos mais complexos ou sobreviver em estados de dormência ou crescimento muito lento, o que pode explicar porque o número de isolados fúngicos em nosso estudo foi maior do que o de bactérias.

Para garantir resultados fidedignos no processo de isolamento microbiano, ressalta-se a necessidade do controle das condições de incubação e os tipos de meios de cultura. Estes precisam ser adequados e levando em consideração as características específicas de crescimento dos diferentes tipos de microrganismos, eucarióticos e procarióticos, para que os resultados não sejam tendenciosos.

Com relação à utilização dos meios MH e TSA, não foram observadas diferenças estatisticamente significativas no número de unidades formadoras de colônias bacterianas entre ambos. No entanto, quando comparados ao meio R2, esses dois meios apresentaram maior quantidade de UFC (ver Tabela 1), embora o maior número de isolados de actinobactérias tenha sido registrado no R2. Do mesmo modo, entre os meios seletivos para fungos (BDA, MEA e PGRBA) não se verificou diferença estatística significativa; contudo, o maior número de colônias leveduriformes foi obtido no meio PGRBA.

A observação de que os meios de teor nutricional mais baixo, como R2 e PGRBA, favoreceram um maior número de unidades formadoras de colônias leveduriformes e actinobactérias corrobora com estudos que indicam que microrganismos de crescimento lento (*slow-growers*) ou oligotróficos apresentam melhor desenvolvimento em condições de menor disponibilidade de nutrientes (Kato *et al.* 2018; Buah *et al.* 2020).

Do ponto de vista nutricional, estes meios originalmente desenvolvidos para o isolamento de microrganismos de ambientes oligotróficos, ou seja, ambientes que apresentam baixas concentrações de carbono e nitrogênio assimiláveis (Doughty *et al.* 2016). Essa característica favorece microrganismos capazes de metabolizar substratos mais complexos ou escassos, permitindo o crescimento de colônias lentas, evidenciando que o teor reduzido de nutrientes minimiza a competição com espécies de crescimento rápido (Buah *et al.* 2020).

Corroborando com Cabo-Verde *et al.* (2015), a carga microbiana superficial do painel de azulejos Grande Vista de Lisboa não apresentou diferença significativa ($P > 0,05$), possivelmente devido ao método superficial de coleta e ao uso exclusivo do meio TSA. Os autores destacam que o número de isolados depende do meio empregado e das interações microbianas na amostra, evidenciando a importância da escolha do meio para o crescimento microbiano. De forma complementar, Coutinho *et al.* (2013) demonstraram que o uso de diferentes meios permitiu identificar maior diversidade de microrganismos do que análises exclusivamente

moleculares. Nessa mesma direção, os estudos como os de Antonelli *et al.* (2024) e De Luca *et al.* (2024) reforçam que tanto o método de coleta quanto o tipo de meio empregado são determinantes para a recuperação de microrganismos viáveis em bens patrimoniais.

Esses resultados indicam que a seleção adequada de meios de cultura exerce influência direta sobre a diversidade microbiana recuperada de superfícies patrimoniais como os painéis de azulejos. Demonstra-se, dessa maneira, a importância de utilizar fundamentalmente dois tipos de meio de cultura, um de amplo espectro nutricional (MH ou TSA para bactérias, BDA ou MEA para fungos) e outro com baixo teor nutricional (R2 e PGRBA); sendo essa uma estratégia eficaz para a bioprospecção de microrganismos raros ou de crescimento lento, os quais podem apresentar potencial metabólico diferenciado e relevância para estudos de biotecnologia e conservação de patrimônio.

De forma geral, procura-se o isolamento de microrganismos presentes nas obras degradadas por metodologias convencionais de isolamento em meios de cultura, complementadas com técnicas independentes de cultura. Nesse sentido, a combinação de métodos dependentes e independentes de cultura, é possível obter uma visão mais completa da diversidade microbiana presente em bens patrimoniais (Caldeira *et al.* 2015). Nessa perspectiva, alguns dos isolados obtidos no presente estudo encontram-se em processo de identificação molecular.

3.2 Correlação entre os pontos de coleta com a presença dos microrganismos

O maior número de unidades formadoras de colônias e isolados microbianos foram obtidos nos pontos 1 e 2 da fachada oeste; paralelamente as menores frequências de crescimento foram nos pontos 5, 8, 9 e 10, fachadas oeste e sul (ver Figura 1 e 2 e Tabelas 1 e 2).

Provavelmente um dos fatores que contribuiu para a diversidade microbiana encontrada na fachada oeste foi o estado de conservação dos azulejos. Os painéis apresentavam diversos tipos de patologias, tais como fragmentos soltos de vitrificado, craquelê, biscoito exposto e várias manchas (ver Figura 3).

Na fachada sul os painéis haviam passado recentemente por um processo de restauro, o que possivelmente explica o menor número de isolados microbianos observados. No entanto, a frequência de fungos nessa área foi mais significativa do que a de bactérias. Essa diferença pode estar relacionada ao método de higienização.

Tabela 1. Número de unidades formadoras de colônias (UFC) de isolados bacterianos relacionando o ponto de coleta e o meio de cultivo. MH (Mueller Hinton), TSA (Ágar Tripton de Soja), R2 (meio para heterotróficas).

	UFC				Nº de isolados (unidade)			
	MH	TSA	R2	Total	MH	TSA	R2	Total
Ponto								
1	277,5	322,1	15,6	615,2	9	10	7	26
2	86,7	54,0	33,2	174	7	6	6	19
3	183,9	125,7	14,1	323,8	6	8	9	23
4	50,3	39,6	27,7	117,7	5	5	2	12
5	99	31,3	0,0	130,3	1	1	0	2
6	149,3	94,6	60,7	304,7	8	5	5	18
7	168,8	101,6	47,4	317,9	9	5	6	20
8	49,0	78,5	7,2	134,8	5	5	0	10
9	9,5	19,6	3,0	32,2	6	4	1	11
10	10,2	9,8	4,0	24,1	5	5	1	10
11	52,3	51,8	40,4	144,5	4	6	3	14
								165

Tabela 2. Número de unidades formadoras de colônias (UFC) dos isolados de fungos relacionando o ponto de coleta e o meio de cultivo. BDA (Batata Dextrose Ágar), MEA (Ágar Extrato de Malte), PGRBA (Ágar Dicloran-Rosa de Bengala Cloranfenicol).

	UFC				Nº de isolados			
	BDA	MEA	PGRBA	Total	BDA	MEA	PGRBA	Total
Ponto								
1	2,2	4,2	0,9	7,4	8	5	5	18
2	6,6	4,4	11,1	22,2	13	13	11	37
3	0,5	1,5	0,5	2,8	6	6	1	13
4	1,2	0,9	0,2	2,3	6	6	1	13
5	0,6	1,3	0,0	1,9	2	5	0	7
6	5,3	6,6	0,7	12,7	13	11	4	28
7	5,6	3,6	1	10,2	13	11	5	29
8	0,4	0,3	0,3	1,1	1	1	2	4
9	2,0	1,7	2,7	7,5	6	5	7	18
10	2,3	2,6	0,9	5,9	6	7	5	18
11	1,5	2,6	3,3	7,4	4	5	3	12
								197



Figura 3. Detalhe do painel de azulejo da APL. Setas indicando as patologias encontradas na fachada oeste. A e C: *esfoliação* (desagregação com desprendimento de lâminas); B: *macha preta no rejunte*; D: *trinca* (fissura no corpo cerâmico); E: *perda* (ausência de parte do azulejo); F: *mancha preta aderida ao biscoito do azulejo*; G: *eflorescência* (depósitos brancos sobre o corpo cerâmico) e H: *craquelê* (microfissuras da superfície esmaltada).

zação empregado durante o processo de conservação, que tende a remover com maior eficiência microrganismos superficiais como as bactérias, enquanto os fungos, dotados de estruturas filamentosas (hifas), conseguem penetrar e se fixar na matriz porosa do substrato, resistindo à remoção. Tais observações são coerentes com estudos anteriores que documentam a penetração de hifas em argamassas e rochas, a resistência de biofilmes frente a procedimentos convencionais de limpeza e a recorrência de recolonização microbiana após tratamentos incompletos (Boniek *et al.* 2017; Gadd 2024; Ilies *et al.* 2024; Maillard 2023; Prieto 2024).

Apesar de apresentar azulejos deteriorados, o ponto 5 exibiu o menor número de UFC e de isolados microbianos, provavelmente por ser o local de coleta mais alto, fator que provavelmente limitou a sobrevivência ou a bioreceptividade (estabelecimento) microbiano.

Ambientes elevados reduz a exposição a microrganismos do solo, que frequentemente colonizam superfícies inferiores, tendem a ter ar mais seco, menos partículas suspensas, e podem comprometer o metabolismo microbiano, pois muitas bactérias necessitam de umidade constante para replicação ativa. Enquanto, alguns fungos conseguem sobreviver em condições de baixa

umidade ou alternância entre períodos úmidos/secos por meio de estruturas de resistência ou redução do metabolismo (Warscheid *et al.* 2000; John *et al.* 1988; Giacomucci *et al.* 2011).

Alta exposição à radiação solar (UV) e condições de forte insolação aumentam o estresse para microrganismos. A radiação UV pode danificar a estrutura do DNA, membranas celulares, proteínas e outros constituintes celulares, especialmente dos organismos procarióticos que tendem a ser menos protegidos estruturalmente. Fungos, em contrapartida, podem possuir mecanismos de proteção (pigmentos como melanina, espessamento das paredes celulares, produção de esporos ou estados de dormência) que conferem maior resistência a esses estresses (Ruibal *et al.* 2018; Ilies *et al.* 2024).

Estudos em edifícios históricos mostram que paredes ou elementos arquitetônicos mais próximos do solo ou com menor exposição ao sol têm maior diversidade microbiana e abundância do que aqueles mais elevados ou mais expostos (Ruibal *et al.* 2009; Fuentes *et al.* 2021).

Os resultados obtidos para o ponto 5 ilustram como alguns fatores ambientais (altura, exposição solar intensa, baixa umidade) influenciaram para diminuir a car-

Tabela 3. Relação das bactérias identificadas por testes bioquímicos.

Coloração	Forma	Coloração de Gram	Catalase	Oxidase
Creme	Cocos	+	-	-
Creme	Cocobacilos	+	+	-
Creme	Estafilococos	+	+	-
Creme	Diplococos	+	+	-
Creme	Bastonetes	+	+	-
Creme	Bastonetes curtos	+	-	-
Creme	Bastonetes longos	+	+	-
Creme	Diplobastonetes	+	+	-
Creme	Streptobacilos	+	+	-
Laranja	Cocos	+	+	-
Laranja	Diplococos	+	+	-
Laranja	Bastonetes	+	+	+
Laranja	Diplobastonetes	+	+	-
Mostarda	Cocos	+	+	-
Rosa	Cocos	+	+	-
Amarelos	Cocos	+	+	-
Amarelos	Cocobacilos	+	+	-
Amarelos	Bastonetes	+	+	-
Amarelos	Bastonetes curtos	+	+	-

ga bacteriana cultivável, enquanto fungos demonstram uma resistência maior nessas condições, provavelmente graças a adaptações estruturais e metabólicas.

Esses achados reforçam a necessidade de que intervenções de conservação não considerem apenas o estado visível da superfície, mas que incluam avaliação microclimática, orientação dos elementos arquitetônicos e protocolos específicos de higienização que possam atingir microrganismos alojados em poros ou fissuras, sobretudo em fachadas expostas. Essa abordagem

integrada não apenas melhora a efetividade das limpezas, mas também contribui para preservar a integridade do patrimônio, evitando recolonizações rápidas e danos recorrentes.

3.3 Diversidade fúngica e bacteriana encontrada nos painéis de azulejos da APL

As bactérias encontradas nas fachadas de azulejos correspondem a 45,6% da comunidade microbiana. A

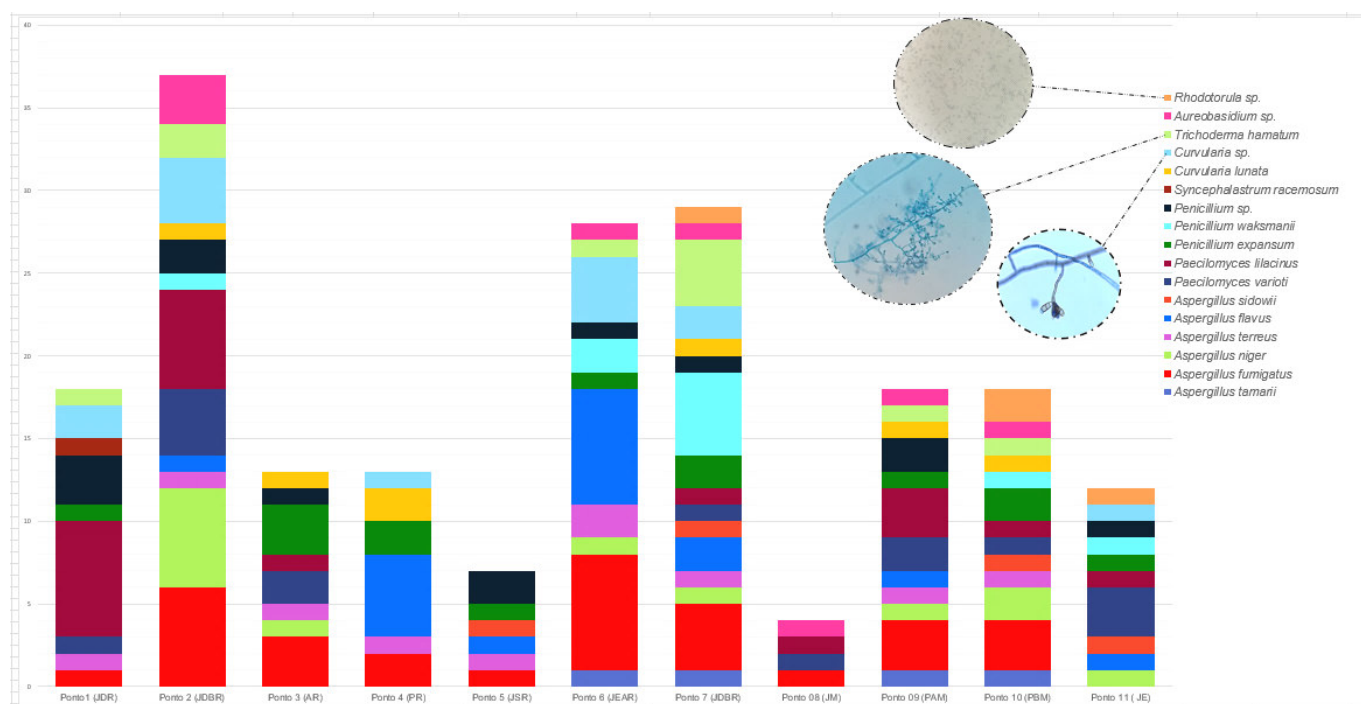


Figura 4. Identificação das cepas fúngicas isoladas nos painéis de azulejos da Academia Pernambucana de Letras (APL).

partir das análises morfológicas e testes bioquímicos foram observadas diferentes estruturas, provavelmente pertencentes ao grupo Firmicutes, apresentando os seguintes arranjos: bastonetes curtos e longos, diplobastonetes, cocos, cocobacilos e diplococos (ver Tabela 3 e Figura 7). Colaborando com o estudo de Laiz *et al.* (2003) identificou também bactérias na sua grande maioria pertencentes ao grupo Firmicutes, assim como Pepe *et al.* (2010) e Mateus *et al.* (2013) também isolaram bactérias com morfologia de bastonetes e cocos. O grupo Firmicutes é composto por bactérias com capacidade de produzir EPS (matriz de polímeros extracelulares), o que permite a fixação e sobrevivência em ambientes inóspitos como em monumentos de pedra e painéis de azulejos, tal como também foi descrito por Coutinho *et al.* (2013), Ma *et al.* (2025), Skipper *et al.* (2022) e Liu *et al.* (2021).

Dos 165 isolados bacterianos, 13% são de bactérias filamentosas, foram identificados dois gêneros: *Streptomyces* sp. e *Nocardioipsis* sp. O filo Actinobactéria foi encontrado em substratos mineralógicos ricos em ferro, potássio, magnésio e outros. Tais componentes químicos também foram vistos nos azulejos da APL (Figura 8). Apesar da fachada estar exposta à sazonalidade de chuvas, o que poderia favorecer a remoção de microrganismos aderidos à superfície, as actinobactérias podem ter mantido sua fixação graças à sua morfologia filamentosa e à formação de hifas que penetram e se ancoram na matriz porosa do substrato.

Outra característica relevante de alguns actinomicetes é a produção de pigmentos em condições de estresse (Oliveira 2017; Sandmann 2021; Viegas *et al.* 2023). Tais pigmentos podem estar relacionados às manchas pretas observadas no painel de azulejos (Figura 3). Em alinhamento com esses achados, estudos como o de Gaylarde *et al.* (2017) e Ettenauer *et al.* (2010) investigaram as manchas pretas em fachadas externas de monumentos e as vincularam à presença de bactérias filamentosas, reforçando a hipótese de que essas cepas contribuem para a descoloração e deterioração patrimonial. Nas fachadas de azulejos da APL foram isolados 16 morfotipos de fungos, sendo 70% destes pertencentes ao gênero *Aspergillus*, com destaque as espécies *Aspergillus fumigatus* (39%) e *Aspergillus flavus* (18%), como mostra a Figura 4. De acordo com a literatura há escassos registros do isolamento de *Aspergillus fumigatus* em azulejos históricos, sendo reportado apenas um caso em revestimentos de painéis portugueses do século XVIII (Cabo-Verde *et al.* 2015). No entanto, espécies desse gênero têm sido frequentemente associadas à biodeterioração de monumentos pétreos e ambientes museológicos (Sharma *et al.* 2010; De la Rosa-García *et al.* 2011; Gupta *et al.* 2023). Outros dois morfotipos bastante frequentes nos painéis da APL foram os gêneros *Penicillium* sp. e *Curvularia* sp., com 25% e 20% respectivamente.

Os gêneros *Penicillium* sp. e *Aspergillus* sp. são considerados uns dos fungos mais cosmopolitas, oportu-

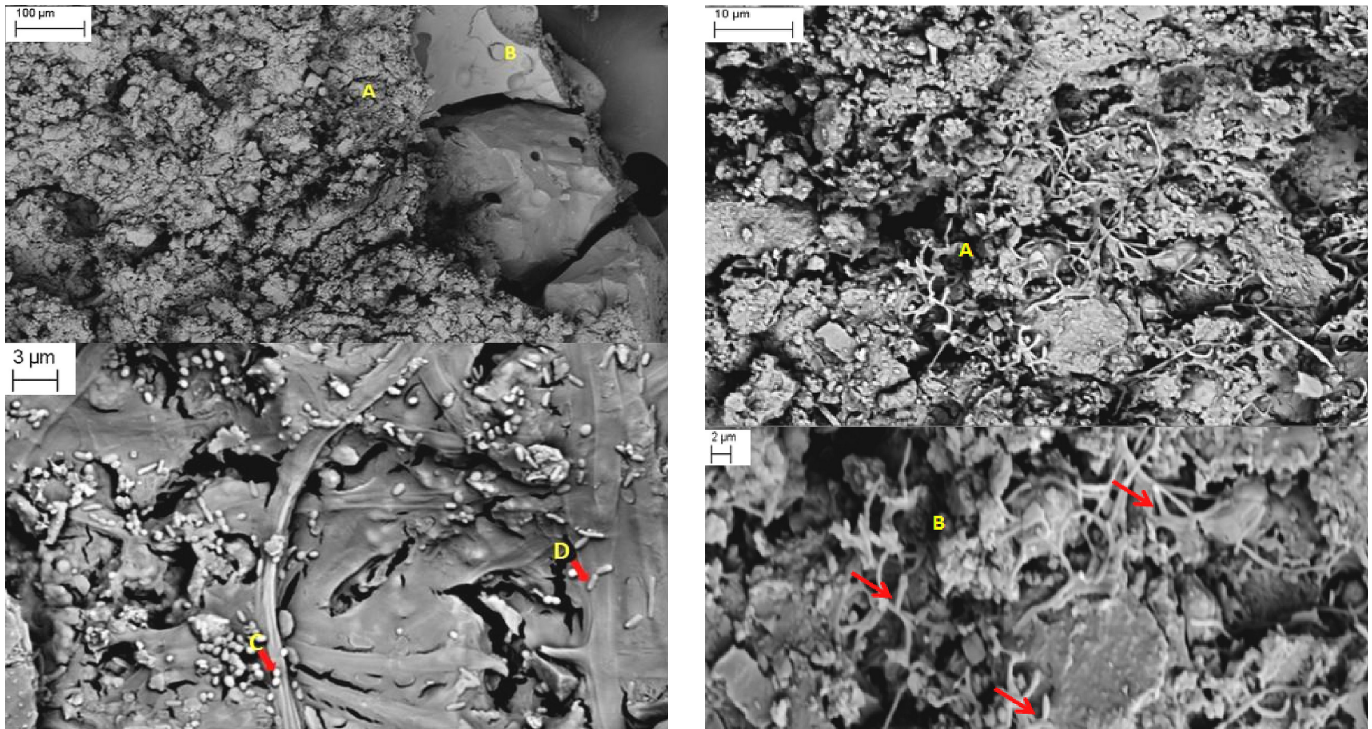


Figura 5 (esquerda). Detalhe da mancha verde entre o vitrificado e o corpo cerâmico do ponto 3 da fachada oeste: A) densa massa microbiana e B) superfície livre de contaminação, observa-se os vacúolos formados durante o cozimento da cerâmica. Em C) seta indica as estruturas bacterianas, com os arranjos na forma de cocos, e seta D) na forma de bastonetes. Figura 6 (direita). Imagem obtida da amostra do ponto 1 da fachada oeste: A) emaranhado de filamentos e B) imagem ampliada dos filamentos, a seta indica possíveis conidióforos sem esporos.

nistas e pulverulentos. Seus esporos são resistentes e facilmente disseminados, já foram isolados até em vitrais por Carmona *et al.* (2006) e Rodrigues *et al.* (2014), a superfície de vidro assim como a superfície vitrificada dos azulejos é um substrato extremamente limitado de nutrientes, porém esses organismos conseguem se desenvolver em tais superfícies, o que pode ser explicado pela sua natureza osmofílica, xerofílica e capacidade de produzir ácidos orgânicos e inorgânicos (Gharieb 2000; Tiquia-Arashiro *et al.* 2019; Meyer 2023).

Alguns grupos de fungos conseguem obter os nutrientes necessários à sua sobrevivência em superfícies inóspitas, como vidros, metais, pedras e azulejos, por meio da excreção de compostos inorgânicos (ácido carbônico, nítrico, sulfúrico) e de ácidos orgânicos (entre eles oxálico, cítrico, láctico, fumárico e glucônico), que promovem a solubilização de minerais e disponibilizam íons essenciais. Além disso, eles podem formar complexos de quelação com cátions metálicos presentes em minerais (silicatos, óxidos de ferro, magnésio, biotita, olivina e diferentes fosfatos), favorecendo tanto a obtenção de nutrientes quanto a fixação e penetração no substrato; o que pode contribuir para o aparecimento de manchas e pátinas nos azulejos (Caneva *et al.* 1991; Gadd *et al.* 2007; Dakal 2012). Nesse sentido, a ativi-

dade acidificante é o fator mais efetivo de impacto dos fungos, sendo muitas vezes considerada como uma reação adaptativa às mudanças ambientais (Videla *et al.* 2003; Sazanova *et al.* 2014). Além disso, a produção de ácidos orgânicos sugere uma vantagem competitiva para fungos filamentosos em relação a outros microrganismos, diminuindo o pH ambiental (Liaud *et al.* 2014; Zhang *et al.* 2023).

Os fungos melanizados, como o *Curvularia* sp. estão entre os fungos mais prejudiciais, atacando e penetrando nas superfícies dos monumentos de pedra, como visto por Cappitelli *et al.* (2007), De Leo *et al.* (2022) e Matos *et al.* (2023), que pesquisaram sobre fungos produtores de melanina que atacam polímeros sintéticos utilizados no patrimônio cultural.

Coutinho *et al.* (2013) observou fungos dematiáceos envolvendo algas mortas em biofilme presentes em superfícies de azulejos vitrificados do Palácio Nacional da Pena em Sintra, Portugal. Assim como Sterflinger (2010), Simonovicová *et al.* (2004) e Paiva *et al.* (2023) observaram a presença de fungos melanizados em monumentos culturais.

Outros gêneros filamentosos isolados neste estudo foram o *Trichoderma* e o *Paecilomyces*. Espécies de *Trichoderma* são frequentemente relatadas em superfícies

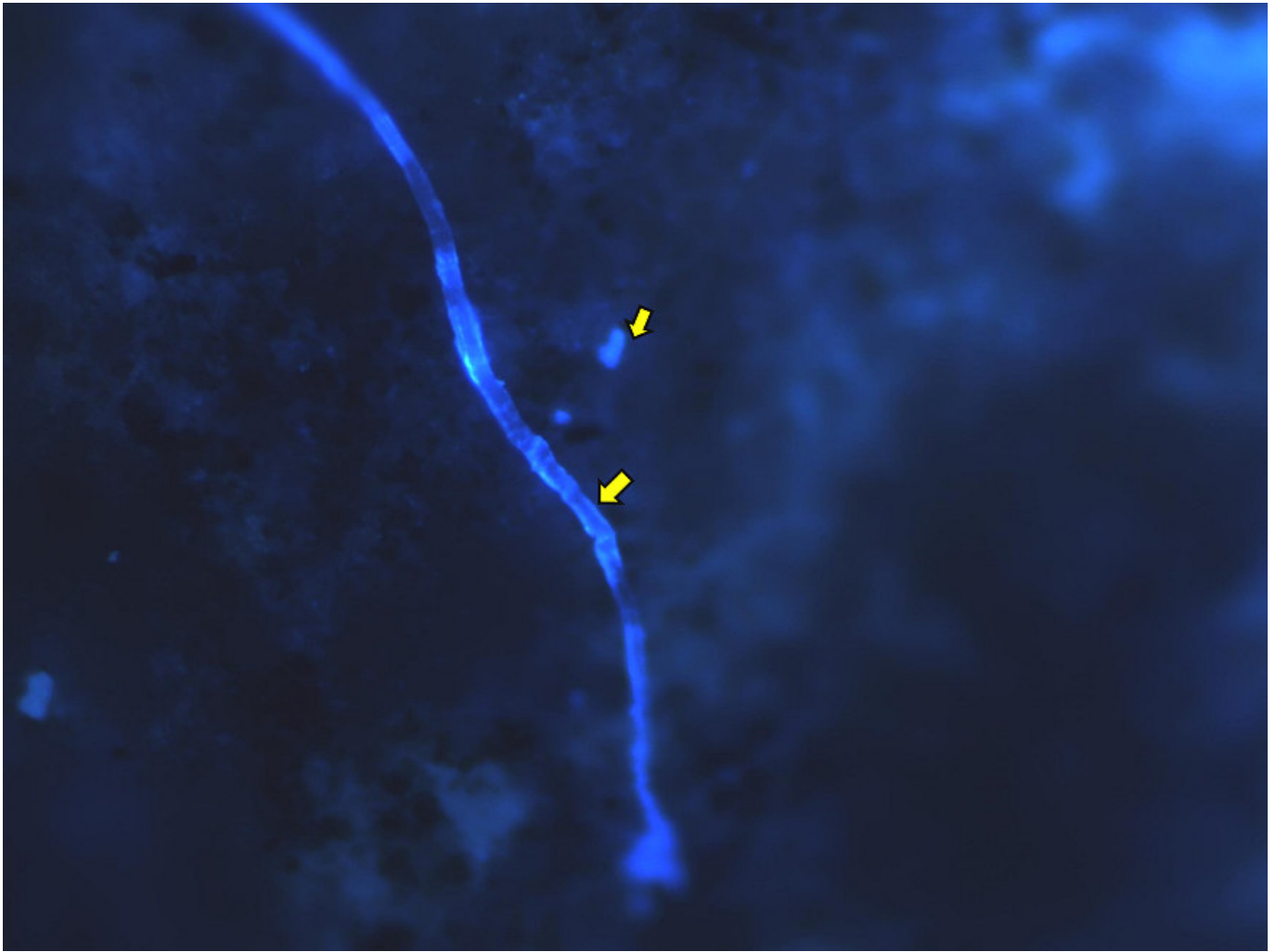


Figura 7. Imagem por microscopia de fluorescência. Setas indicam hifas fúngicas coradas com *Calcofluor White*.

de pedras; atuam como agentes de biodeterioração direta (por produção de enzimas hidrolíticas) e também podem exercer efeitos antagonistas sobre outros fungos, o que explica variações locais na composição fúngica (El Hagrassy *et al.* 2022; De Luca *et al.* 2024; Sterflinger & Piñar 2013).

O gênero *Paecilomyces*, por sua vez, é comumente encontrado em ambientes internos e em materiais orgânicos e inorgânicos de acervos. Sua presença em substratos de alvenaria e superfícies internas tem sido associada à tolerância a variações ambientais e à produção de enzimas capazes de degradar componentes orgânicos e contribuir para o processo de deterioração (Houbraken *et al.* 2010; Nguyen *et al.* 2016).

Em relação à espécie *Syncephalastrum racemosum*, pertencente ao antigo filo Zigomycota (Hibbett *et al.* 2007), sua ocorrência foi apenas ponto 1 da fachada oeste. A frequência de isolamento dos zigomycotas foi inferior aos demais gêneros nesta pesquisa. Este fato pode estar relacionado com as características do subs-

trato vitrificado, baixa porosidade, reduzida retenção de umidade e menor disponibilidade de nutrientes que limitam a aptidão ecológica de fungos tipicamente associados a solo e matéria orgânica (Richardson 2009). Da mesma forma que a competição microbiana e a predominância de outros gêneros amplamente distribuídos, como *Aspergillus*, *Penicillium* e fungos com coloração escura em diversos nichos epilíticos, é provável que a presença desses microrganismos impeça o desenvolvimento de *Syncephalastrum* em azulejos expostos (Coutinho *et al.* 2015; Trovão & Portugal 2021).

Após buscas sistemáticas realizadas nas bases de pesquisas, não foram encontrados registros revisados por pares que documentem o isolamento de *Syncephalastrum racemosum* a partir de azulejos vitrificados. Assim, os resultados aqui apresentados configuram, possivelmente, o primeiro relato documentado desse gênero associado a esse tipo de substrato em contexto patrimonial. Mas os zigomycotas já foram citados em outros trabalhos de biodeterioração de monumentos his-

tóricos a base de barro (tijolos e pau-a-pique) como os de Rhodes (2015), Fazio *et al.* (2015) e em acervos bibliográficos (Reis-Menezes *et al.* 2011).

Os fungos *Aureobasidium* sp. e *Rhodotorula* sp. constituíram os únicos gêneros de leveduras isolados neste estudo. A ocorrência de *Aureobasidium* e *Rhodotorula* em superfícies de patrimônio já foi documentada por diversos trabalhos. *Aureobasidium* é relatada em vidros históricos, azulejos vitrificados e cerâmicas antigas, sendo tipicamente associada a biofilmes superficiais tolerantes a variações higrométricas (Macedo *et al.* 2021; Coutinho *et al.* 2019).

Rhodotorula, por sua vez, tem sido isolada de superfícies líticas e biofilmes epilíticos em monumentos expostos, e estudos recentes também a identificaram em contextos de alteração de pátinas e em substratos sujeitos a clima tropical (Segal-Kischinevzky *et al.* 2022; Sitzia *et al.* 2023; Gostincar *et al.* 2024).

Os fungos apresentam ampla plasticidade ecológica, podendo ser encontrados em diversos habitats, aquáticos ou terrestres, em ambientes naturais e artificiais. Seus esporos são amplamente disseminados pelo vento, pela água, por insetos, aves e até mesmo pela atividade humana (Isola *et al.* 2016; Brimblecombe *et al.* 2022). No contexto do casarão da APL, localizado em uma área densamente arborizada, próxima a um curso d'água e com intenso fluxo de visitantes e de veículos automotores, cria-se um microambiente propício à dispersão e deposição de microrganismos.

A presença de compostos orgânicos voláteis, como os alcanos resultantes da queima de combustíveis fósseis, pode favorecer o desenvolvimento de fungos capazes de metabolizar hidrocarbonetos (Herrera & Videla 2004; Negi *et al.* 2019; Petraretti *et al.* 2021). Tal relação é corroborada pelos resultados obtidos no presente estudo, que demonstram elevada diversidade microbiana (Tabelas 1 e 2) e evidências morfológicas claras de colonização fúngica e bacteriana observadas por microscopia eletrônica de varredura dos fragmentos de azulejos da APL (ver Figuras 5, 6 e 7).

No presente trabalho foi observada uma expressiva diversidade microbiana, tanto de fungos quanto de bactérias, com predominância de fungos, corroborando com os achados de Coutinho *et al.* (2015). Esses autores, ao investigar a microbiota associada a três tipos de cerâmicas, tijolos, telhas e azulejos vitrificados, relataram que a maior diversidade fúngica ocorreu nos azulejos vitrificados. Embora esse tipo de material apresente superfície lisa e impermeável, o que teoricamente reduziria sua biorreceptividade, na prática observou-

se o contrário. Os azulejos históricos, sobretudo os que compõem acervos arquitetônicos expostos ao ar livre, estão sujeitos aos intemperismos ambientais (radiação solar, variações térmicas, umidade e deposição de partículas atmosféricas).

Os intemperismos podem favorecer o desprendimento do rejunte, a formação de microfissuras no esmalte e o acúmulo de material particulado sobre a superfície, fatores que aumentam a rugosidade e a retenção de umidade, criando microambientes propícios à colonização microbiana (Sanjad *et al.* 2002; Silva *et al.* 2013). Assim, a perda gradual da integridade do vitrificado configura um importante caminho de acesso e fixação dos microrganismos nos azulejos históricos.

A identificação de microrganismos envolvidos na biodeterioração é uma das etapas mais importantes no processo de preservação e conservação de materiais de construção e deve ser feita antes de qualquer intervenção. Essa identificação facilita a compreensão do papel desempenhado pelos microrganismos no processo de biodeterioração, correlacionando a interação entre a atividade do organismo e o material. Além disso, tratamentos mais eficientes para mitigação só podem ser alcançados com o conhecimento da comunidade microbiana e seus efeitos (Coutinho *et al.* 2013). Portanto, a presença de gêneros como *Aspergillus*, *Penicillium*, *Curvularia*, *Trichoderma* e *Paecilomyces* nos isolados reforça a necessidade de avaliações funcionais adicionais (ensaios enzimáticos e análise de potencial deteriogênico) e de monitoramento direcionado durante intervenções de conservação.

3.4 Análises das estruturas aderidas ao vitrificado

As imagens de MEV da região interna do vidro permitiram observar a interação dos microrganismos com a zona de interface entre a camada vitrificada e o corpo cerâmico. Na Figura 5 é possível visualizar a diferença da região do vitrificado livre de contaminação e a outra região com uma densa camada microbiana, o que sugere que elas são a causa do desprendimento do vitrificado, provavelmente como resultado de mudanças de volume, penetração na matriz cerâmica e liberação de substâncias metabólicas, como ácidos orgânicos e inorgânicos, como ocorre em materiais de pedra (Gorbushina 2007).

Na Figura 6 observam-se filamentos dispersos, dispostos de forma perpendicular a possíveis conidióforos, estruturas reprodutivas típicas de fungos filamentosos.

A ausência de conídios aderidos aos conidióforos pode estar relacionada ao estágio de desenvolvimento do micélio ou à remoção dessas estruturas durante a preparação da amostra para análise no MEV, uma vez que os esporos são facilmente dispersáveis.

Resultados semelhantes foram obtidos por Sanjad *et al.* (2014), Gaylarde *et al.* (2017) e Wang *et al.* (2022), que também relataram estruturas filamentosas fúngicas em superfícies cerâmicas e rochosas de monumentos históricos. As imagens obtidas por microscopia de fluorescência corroboram com as observações do MEV (Figura 7), evidenciando a presença de estruturas fúngicas no ponto 2, área que apresentou a maior diversidade de fungos isolados. De modo semelhante, Aliança *et al.* (2017) e Coutinho *et al.* (2013) observaram estruturas microbianas e alterações químicas associadas à colonização fúngica em azulejos históricos por meio de microscopia eletrônica de varredura.

Outras morfologias unicelulares são observadas, como cocos e bastonetes bacterianos (ver Figura 5), que correspondem ao ponto 4 da fachada oeste, colaborando com os resultados obtidos, onde o número de UFC bacterianos foi maior do que dos fungos.

3.5 Composição mineralógica dos azulejos

Na análise por fluorescência de raios (FRX) do biscoito ou chacota do azulejo do século XIX (Figura 8a), identificou-se principalmente os elementos cálcio (Ca), ferro (Fe) e potássio (K), que constituem os minerais predominantes da matriz cerâmica. Um dos marcadores que pode indicar uma diferença cronológica é a quantidade de cálcio, pois quanto maior o tempo de exposição, maior a absorção de cal proveniente das argamasas de assentamento pela chacota (Carvalho *et al.* 2021).

Em relação aos pigmentos azul e branco (Figuras 8b e 8c), observam-se picos para os elementos potássio (K), cálcio (Ca), chumbo (Pb) e cobalto (Co). O cobalto é amplamente reconhecido como o principal agente colorante dos pigmentos azuis utilizados em azulejos portugueses dos séculos XVII ao XIX (Coentro *et al.* 2012; Bandiera *et al.* 2024); enquanto a presença de chumbo está associada ao pigmento branco e ao vidrado de base estanífera, em que o dióxido de chumbo (PbO₂) atuava como fundente e estabilizador (Inberg *et al.* 2020; Cubuk 2023).

Logo, a análise composicional por FRX reforça a importância desses elementos como marcadores tecnológicos e cronológicos na caracterização de cerâmicas históricas fornecendo informações acerca das interações

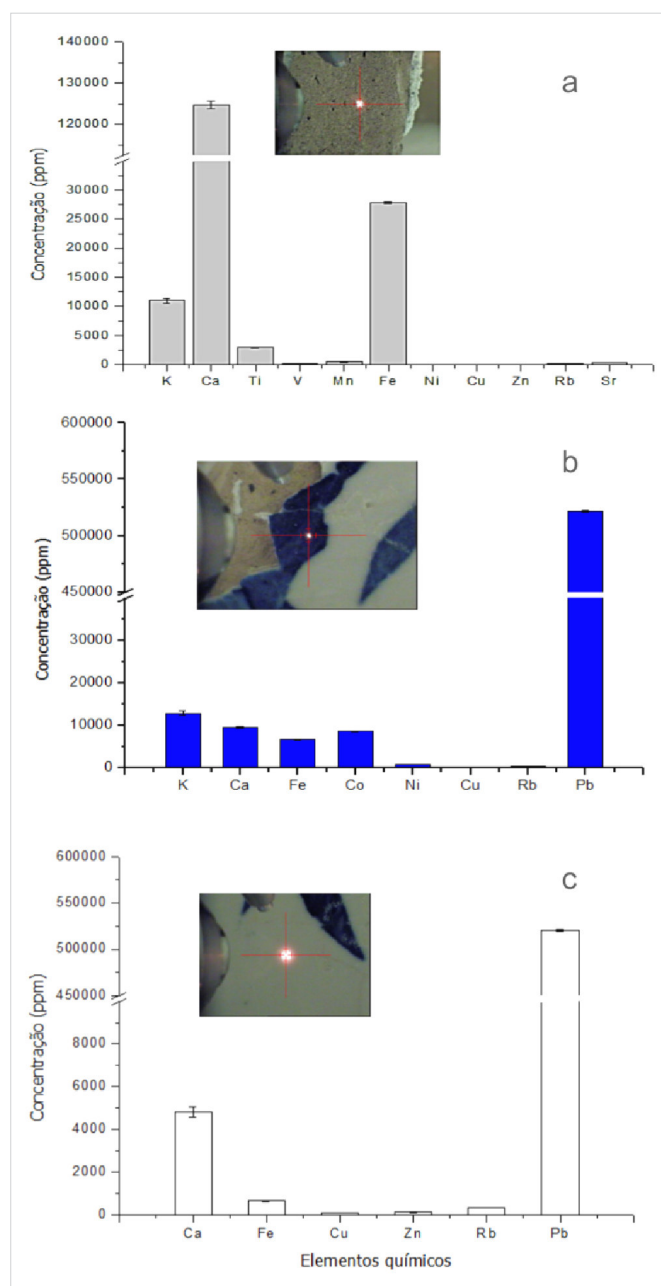


Figura 8. Gráfico da composição mineralógica dos azulejos do século XIX da APL: a) no biscoito, b) no vitrificado no pigmento azul, c) no vitrificado no pigmento branco.

químicas entre os elementos constituintes da chacota e os pigmentos ao longo do tempo (Lins *et al.* 2021).

Esses resultados físico-químicos, entretanto, não se limitam ao contexto histórico ou tecnológico, mas se relacionam também aos processos biológicos observados neste estudo. A presença de elementos como ferro, cálcio e potássio pode influenciar diretamente a biorreceptividade dos azulejos, favorecendo o desenvolvimento de microrganismos capazes de metabolizar ou interagir com esses íons metálicos (Yadav *et al.* 2025). Assim como compostos de chumbo (Pb) e cobalto (Co) presentes nos pigmentos e vidrados podem atuar como

agentes seletivos, favorecendo microrganismos tolerantes a metais pesados, como descrito para os gêneros de *Aspergillus* sp. e *Penicillium* sp. (Liaquat *et al.* 2020; Gajewska *et al.* 2022).

Dessa forma, a interação entre os componentes inorgânicos e a comunidade microbiana reforça a hipótese de que a biodeterioração dos azulejos históricos resulta de processos sinérgicos entre os intemperismos abióticos e bióticos.

4. CONCLUSÃO

A utilização de múltiplos meios de cultura mostrou-se uma estratégia eficaz para bioprospecção dos microrganismos associados aos painéis de azulejos da APL, sendo possível obter um total de 361 isolados, distintos entre fungos e bactérias. Esse número reflete uma considerável abundância ecológica, sobretudo quando se consideram as condições limítrofes estabelecidas pelo substrato cerâmico. O emprego de meios com baixo valor nutricional favoreceu a prospecção de actinobactérias e leveduras, evidenciando que o teor reduzido de nutrientes minimiza a competição com espécies de crescimento rápido. Tais resultados reforçam a importância da seleção criteriosa dos meios de cultura em estudos de microbiota patrimonial, especialmente quando se utilizam metodologias convencionais de isolamento.

Nesse sentido, a presença de culturas puras de isolados permite efetuar estudos de simulação laboratorial, em condições controladas e a utilização de elevadas densidades celulares pode tornar-se uma ferramenta útil na compreensão de alguns mecanismos da biodeterioração. Ao passo que atende também à necessidade de informar aos responsáveis em cuidar do patrimônio cultural sobre os possíveis impactos dos microrganismos identificados.

Entre as três fachadas dos painéis de azulejos, a oeste foi a que expressou mais evidências patológicas, sendo

possível comprovar que houve relação entre o estado de conservação dos painéis de azulejos com a presença dos microrganismos através da ocorrência dos números de isolados e as figuras analisadas pelos microscópios. As análises microscópicas revelaram densas massas microbianas localizadas entre o vitrificado e o biscoito, particularmente nos pontos 1 e 2 da fachada oeste que coincidiram com as áreas mais deterioradas. Estes achados indicam a possibilidade de que o processo de deterioração das fachadas de azulejos da Academia Pernambucana de Letras tenha relação com a biodeterioração microbiana.

Com relação à diversidade das cepas prospectadas, as bactérias foram associadas aos filos Firmicutes e Actinobactéria, grupos frequentemente associados a ambientes oligotróficos e a processos iniciais de colonização de substratos minerais. Dentre os fungos filamentosos, destacaram-se *Aspergillus fumigatus* e *Syncephalastrum racemosu*, que são espécies raramente relatadas em substratos cerâmicos em contexto patrimonial.

Em síntese, a bioprospecção microbiana aplicada aos bens culturais constitui uma abordagem promissora para o conhecimento, valorização e preservação do patrimônio material, possibilitando a aplicação de estratégias de conservação preventiva e restaurativa mais adequadas. Além disso, o conhecimento da diversidade microbiana contribui para o desenvolvimento de soluções biotecnológicas sustentáveis, como o uso de biocidas naturais ou microrganismos antagonistas em biolimpeza e biocontrole. Essa abordagem evidencia a importância da integração entre microbiologia, conservação e ciências do patrimônio, promovendo uma visão ampliada dos bens culturais como ecossistemas vivos, complexos, dinâmicos e interativos. Assim, o estudo dos microrganismos associados aos acervos culturais representa não apenas uma forma de proteger o patrimônio físico, mas também um meio de compreender a relação intrínseca entre cultura, tempo e natureza.

Agradecimentos

Este trabalho contou com apoio financeiro do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), Brasil, Processos n.º 420187/2023-5 e n.º 443168/2023-7.

REFERÊNCIAS

- ALONSO-REYES, D.G. *ET ALII.* 2025. Echoes of 1816: Microbial Footprints in Heritage Artifacts from Argentina's Museum of Independence. *Frontiers in Microbiology* 16: 1611832.
- ALIANÇA, A.S.S. *ET ALII.* 2017. *In vitro* evaluation of cytotoxicity and leishmanicidal activity of phthalimido-thiazole derivatives. *European Journal of Pharmaceutical Sciences* 105: 1-10.

- BANDIERA, M. *ET ALII*. 2024. The colour palette of 16th–18th century azulejos: A multi-analytical non-invasive study. *Journal of Cultural Heritage* 66: 593-601.
- BARDGETT, R.D.; T. CARUSO. 2020. Soil microbial community responses to climate extremes: resistance, resilience and transitions to alternative states. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 375, 1794: 20190112.
- BARNETT, J.A. *ET ALII*, EDS. 2000. *Yeasts: Characteristics and Identification*. Cambridge: Cambridge University Press.
- BERGEY, D.H. *ET ALII*, EDS. 1923. *Bergey's Manual of Determinative Bacteriology: A Key for the Identification of Organisms of the Class Schizomycetes*. Baltimore: Williams & Wilkins Company.
- BONIEK, D. *ET ALII*. 2017. Ecology and identification of environmental fungi and metabolic processes involved in the biodeterioration of Brazilian soapstone historical monuments. *Letters in Applied Microbiology* 65, 5: 431-438.
- BONIEK, D. *ET ALII*. 2017. Effect of Environmental Factors on Rock-inhabiting Fungal Communities from Brazilian Soapstone Samples. *Journal of Environmental Science and Engineering* B, 6: 55-71.
- BRIMBLECOMBE, P. *ET ALII*. 2022. Thermohygrometric Climate, Insects and Fungi in the Klosterneuburg Monastic Library. *Heritage* 5, 4: 4228-4244.
- CABO-VERDE, S. *ET ALII*. 2015. Microbiological and compositional features of green stains in the glaze of the Portuguese “Great View of Lisbon” tile panel. *Journal of Materials Science* 50: 6656-6667.
- CALDEIRA, A.T. *ET ALII*. 2015. Microrganismos e Património. Novas abordagens. *Magazine da Sociedade Portuguesa de Microbiologia* 4: 1-7.
- CANEVA, G. *ET ALII*, ED. 1991. *Biology in the Conservation of Works of Art*. Roma: ICCROM.
- CAPPITELLI, F. *ET ALII*. 2007. Bacterial and fungal deterioration of the Milan Cathedral marble treated with protective synthetic resins. *Science of the Total Environment* 385, 1-3: 172-181.
- CARMONA, N. *ET ALII*. 2006. Biodeterioration of historic stained glasses from the Cartuja de Miraflores (Spain). *International Biodeterioration & Biodegradation* 58, 3-4: 155-161.
- CARVALHO, P.M.S. *ET ALII*. 2021. Elemental mapping of Portuguese ceramic pieces with a full-field XRF scanner based on a 2D-THCOBRA detector. *European Physical Journal Plus* 136: 423.
- CAVALCANTI, S.T.H.; A.M. CRUZ, EDS. 2002. *O azulejo na Arquitetura Civil de Pernambuco. Século XIX*. São Paulo: Metalivros.
- CHANDRA, P. *ET ALII*. 2025. Phosphorus-solubilizing fungi improve growth and P nutrition in sorghum at variable salinity levels. *Environmental Microbiome* 20: 124.
- CHEN, Y. *ET ALII*. 2022. Soil bacteria are more sensitive than fungi in response to nitrogen and phosphorus enrichment. *Frontiers in Microbiology* 13: 999385.
- COENTRO, S. *ET ALII*. 2012. Multi-analytical identification of pigments and pigment mixtures used in 17th-century Portuguese azulejos. *Journal of the European Ceramic Society* 32, 1: 37-48.
- COLEINE, C. *ET ALII*. 2022. Fungi are key players in extreme ecosystems. *Trends in Ecology & Evolution* 37, 6: 517-528.
- COSTA, A.S.M.R. *ET ALII*. 2015. Intervention and pathways: between the structure idea and the handling of memory in Europe. *Revista de Direito da Cidade* 7, 2: 739-760.
- COUTINHO, M.L. *ET ALII*. 2013. Microbial communities on deteriorated artistic tiles from Pena National Palace (Sintra, Portugal). *International Biodeterioration & Biodegradation* 84: 322-332.
- COUTINHO, M.L. *ET ALII*. 2015. Biological colonization and biodeterioration of architectural ceramic materials: An overview. *Journal of Cultural Heritage* 16, 5: 759-777.
- COUTINHO, M.L. *ET ALII*. 2019. Biodeterioration of majolica glazed tiles by the fungus *Devriesia imbrexigena*. *Construction and Building Materials* 212: 49-56.
- CUBUK, G. 2023. Azulejos as an architectural element within the scope of design and conservation. *Cultural Heritage and Science* 4, 1: 40-48.
- DE LA ROSA-GARCÍA, S.C. *ET ALII*. 2011. Influence of fungi in the weathering of limestone of Mayan monuments. *Revista Mexicana de Micología* 33: 43-51.
- DE LEO, F. *ET ALII*. 2022. Black Fungi on Stone-Built Heritage: Current Knowledge and Future Outlook. *Applied Sciences* 12, 8: 3969.
- DE LUCA, D. *ET ALII*. 2024. Taxonomic and metabolic characterisation of biofilms colonising Roman stuccoes at Baia's thermal baths and restoration strategies. *Scientific Reports* 14: 26290.
- DING, X. *ET ALII*. 2022. Microbiome characteristics and the key biochemical reactions identified on stone world cultural heritage under different climate conditions. *Journal of Environmental Management* 302, A: 114041.

- DOMSCH, K.H. *ET ALII*. 1993. *Compendium of Soil Fungi*. San Francisco: Academic Press.
- EL HAGGRASSY, A. *ET ALII*. 2022. *Trichoderma* spp. in cultural heritage mural paintings of ancient Egyptian tomb: their antifungal and bioactivity. *Journal of the General Union of Arab Archaeologists* 7, 2: 165-183.
- EL NOUHY, H.A. 2013. Assessment of some locally produced Egyptian ceramic wall tiles. *HBRC Journal* 9, 3: 201-209.
- ETTENAUER, J. *ET ALII*. 2010. Cultivation and molecular monitoring of halophilic microorganisms inhabiting an extreme environment presented by a salt-attacked monument. *International Journal of Astrobiology* 9, 1: 59-72.
- FAZIO, A.T. *ET ALII*. 2015. Towards a better comprehension of biodeterioration in earthen architecture: Study of fungi colonisation on historic wall surfaces in Brazil. *Journal of Cultural Heritage* 16, 6: 934-938.
- FUENTES, E. *ET ALII*. 2021. Role of Exposure on the Microbial Consortia on Historical Rural Granite Buildings. *Applied Sciences* 11: 3786.
- GADD, G.M. 2007. Geomycology: biogeochemical transformations of rocks, minerals, metals and radionuclides by fungi, bioweathering and bioremediation. *Mycological Research* 111, 1: 3-49.
- GADD, G.M. *ET ALII*. 2024. Fungal biodeterioration and preservation of cultural heritage, artwork, and historical artifacts: extremophily and adaptation. *Microbiology and Molecular Biology Reviews* 88: e00200-22.
- GAJEWSKA, J. *ET ALII*. 2022. Fungal and oomycete pathogens and heavy metals: an inglorious couple in the environment. *IMA Fungus* 13: 6.
- GAYLARDE, C. *ET ALII*. 2017. Analysis of dark crusts on the church of Nossa Senhora do Carmo in Rio de Janeiro, Brazil, using chemical, microscope and metabarcoding microbial identification techniques. *International Biodeterioration & Biodegradation* 117: 60-67.
- GIACOMUCCI, L. *ET ALII*. 2011. Microbial Deterioration of Artistic Tiles from the Façade of the Grande Albergo Ausonia & Hungaria (Venice, Italy). *Microbial Ecology* 62: 287-298.
- GORBUSHINA, A.A. 2007. Life on the rocks. *Environmental Microbiology* 9, 7: 1613-1631.
- GOSTINCAR, C.; N. GUNDE-CIMERMAN. 2024. Black yeasts in hypersaline conditions. *Applied Microbiology and Biotechnology* 108: 252.
- GUPTA, S.P.; S.K. AGNIHOTRI. 2023. Isolation and Identification of Fungal Species and Scientific Preservation of World Heritage: Case of Fatehpur Sikri, Uttar Pradesh, India. *European Journal of Theoretical and Applied Sciences* 1, 5: 488-492.
- HARRINGTON, B.J.; G.J. HEGEAGE. 2003. Calcofluor White: A Review of its Uses and Applications in Clinical Mycology and Parasitology. *Laboratory Medicine* 34, 5: 361-367.
- HERRERA, L.K.; H.A. VIDELA. 2004. The importance of atmospheric effects on biodeterioration of cultural heritage constructional materials. *International Biodeterioration & Biodegradation* 54, 2-3: 125-134.
- HESELDTINE, C.W.; D.I. FENNEL. 1955. The genus *Circinella*. *Mycologia* 7, 2: 193-212.
- HIBBETT, D.S. *ET ALII*. 2007. A higher-level phylogenetic classification of the *Fungi*. *Mycological Research* 111, 5: 509-547.
- HOOG, G.S. *ET ALII*, EDS. 2000. *Atlas of Clinical Fungi*. Centraalbureau voor Schimmelcultures/Univ. Rovira i Virgili.
- HOUBRAKEN, J. *ET ALII*. 2010. Identification of *Paecilomyces variotii* in Clinical Samples and Settings. *Journal of Clinical Microbiology* 48, 8: 2754-2761.
- ILIES, D.C. *ET ALII*. 2024. Investigating the Role of Microclimate and Microorganisms in the Deterioration of Stone Heritage: The Case of Rupestrian Church from Jac, Romania. *Applied Sciences* 14, 18: 8136.
- INBERG, A. *ET ALII*. 2020. A Tale of Two Tiles: Characterization of Floor Tiles from the Nineteenth-Century Akko Tower Shipwreck (Israel). *Coatings* 10, 11: 1091.
- ISOLA, D. *ET ALII*. 2016. Extremotolerant rock inhabiting black fungi from Italian monumental sites. *Fungal Diversity* 76: 75-96.
- JACOBS, K.; A. BOTHA. 2008. *Mucor renisporus* sp. nov., a new coprophilous species from Southern Africa. *Fungal Diversity* 29: 27-35.
- KLICH, M.A., ED. 2002. *Identification of Common Aspergillus Species*. Centraalbureau voor Schimmelcultures.
- LAIZ, L. *ET ALII*. 2003. Monitoring the colonization of monuments by bacteria: cultivation versus molecular methods. *Environment Microbiology* 5, 1: 72-74.
- LIAQUAT, F. *ET ALII*. 2020. Evaluation of metal tolerance of fungal strains isolated from contaminated mining soil of Nanjing, China. *Biology* 9, 12: 469.
- LIAUD, N. *ET ALII*. 2014. Exploring fungal biodiversity: organic acid production by 66 strains of filamentous fungi. *Fungal Biology and Biotechnology* 1: 1.
- LINS, S.A.B. *ET ALII*. 2021. Modular MA-XRF Scanner Development in the Multi-Analytical Characterisation of a 17th Century *Azulejo* from Portugal. *Sensors* 21, 5: 1913.

- MA, C. *ET ALII*. 2025. Identifying keystone taxa and metabolisms of epilithic biofilms is crucial to the conservation of stone heritage from biodeterioration. *Frontiers in Microbiology* 16: 1600865.
- MACEDO, M.F. *ET ALII*. 2021. Biodeterioration of Glass-Based Historical Building Materials: An Overview of the Heritage Literature from the 21st Century. *Applied Sciences* 11, 20: 9552.
- MATEUS, D.M.R. *ET ALII*. 2013. Diversidade microbiológica do edifício da Sacristia Incompleta do Convento de Cristo, em Tomar, e avaliação do seu controle por biocidas. *Conservar Património* 17: 11- 20.
- MATOS, J.F. *ET ALII*. 2023. Isolamento, identificação e possível ação deteriógena de fungos no Chafariz da Glória, Ouro Preto, Minas Gerais, Brasil. *Revista de Arqueologia* 36, 2: 140-151.
- MENEZES, M.O. 2021. Azulejo como oportunidade cocriativa para (re)invenção do espaço público. *Cidades, Comunidades e Territórios* 42: 73-97.
- MUTUNGI, P.M. *ET ALII*. 2024. Fungal endophytes from saline-adapted shrubs induce salinity stress tolerance in tomato seedlings. *FEMS Microbes* 5: xtae012.
- NEGI, A.; I.P. SARETHY. 2019. Microbial Biodeterioration of Cultural Heritage: Events, Colonization, and Analyses. *Microbial Ecology* 78: 1014-1029.
- NETO, L.N.A. *ET ALII*. 2017. Synthesis, Cytotoxicity and Antifungal Activity of 5-Nitro-thiophene-thiosemicarbazones Derivatives. *Chemico-Biological Interactions* 272: 172-181.
- NGUYEN, T.T.T. *ET ALII*. 2016. Characterization of *Paecilomyces variotii* and *Talaromyces amestolkiae* in Korea Based on the Morphological Characteristics and Multigene Phylogenetic Analyses. *Mycobiology* 44, 4: 248-259.
- OLIVEIRA, J.C.M.D. 2017. *Potencial biotecnológico de actinomicetos para produção de enzimas hidrolíticas e biocontrole in vitro de Pantoea ananatis, agente causal da mancha-branca do milho*. Dissertação (Mestrado em Ciências Agrárias, Produção Vegetal). Universidade Federal de São João del-Rei, Campus Sete Lagoas, MG.
- PAIVA, D.S. *ET ALII*. 2023. Expanding the Microcolonial Black Fungi *Aeminiaceae* Family: *Saxispiralis lemnorum* gen. et sp. nov. (*Mycosphaerellales*), Isolated from Deteriorated Limestone in the Lemos Pantheon, Portugal. *Journal of Fungi* 9, 9: 916.
- PARKER, S.P., ED. 1982. *Synopsis and Classification of Living Organisms*. New York: McGraw-Hill.
- PEDRAZANI, V. 2022. Patrimônio cultural no Brasil: trajetórias de sujeitos, leis e instituições. *Humana Res* 1, 5: 22-38.
- PEPE, O. *ET ALII*. 2010. Heterotrophic microorganisms in deteriorated medieval wall paintings in southern Italian churches. *Microbiology Research* 165, 1: 21-32.
- PETRARETTI, M. *ET ALII*. 2021. Community Composition and Ex Situ Cultivation of Fungi Associated with UNESCO Heritage Monuments in the Bay of Naples. *Applied Sciences* 11, 10: 4327.
- PITT, J.I. 1988. *A Laboratory Guide to Commons Penicilium Species*. North Ryde: Commonwealth.
- RACHED, M.S. 2018. *As tramas azulejadas nas fachadas da arquitetura moderna e contemporânea brasileira*. Dissertação. Centro de Artes e Comunicação, Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento Urbano, Universidade Federal de Pernambuco.
- RAPER, K.B.; C. THOM. 1949. *A manual of the Penicillia*. Baltimore: Williams & Wilkins Company.
- REIS-MENEZES, A.A. *ET ALII*. 2011. A Survey of Fungal Contamination on Books in Public Libraries with Mechanical and Natural Ventilation. *Indoor and Built Environment* 20, 4: 393-399.
- RHODES, D. 2015. *Clay and Glazes for the Potter*. Ravenio Books.
- RICHARDSON, M. 2009. The ecology of the Zygomycetes and its impact on environmental exposure. *Clinical Microbiology and Infection* 15: 2-9.
- RODRIGUES, A. *ET ALII*. 2014. Fungal biodeterioration of stained-glass windows. *International Biodeterioration & Biodegradation* 90: 152-160.
- ROTONDI, C. *ET ALII*. 2024. Bioreceptive Ceramic Surfaces: Material Experimentations for Responsible Research and Design Innovation in Circular Economy Transition and “Ecological Augmentation”. *Sustainability* 16, 8: 3208.
- RUIBAL, C. *ET ALII*. 2009. Phylogeny of Rock-inhabiting Fungi Related to *Dothideomycetes*. *Studies in Mycology* 64, 1: 123-133.
- RUIBAL, C. *ET ALII*. 2018. Roof-Inhabiting Cousins of Rock-Inhabiting Fungi: Novel Melanized Microcolonial Fungal Species from Photocatalytically Reactive Subaerial Surfaces. *Life* 8, 3: 30.
- SANDMANN, G. 2021. Carotenoid Biosynthesis in the Phylum *Actinobacteria*. *Advances in Experimental Medicine Biology* 1261: 175-181.
- SANJAD, T.A.B.C. 2002. *Patologias e conservação de azulejos: estudo tecnológico de conservação e restauração com azulejos dos séculos XVI, XVII e XIX pertencentes às cidades de Belém e Salvador*. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo). Salvador: Universidade Federal da Bahia.

- SANJAD, T.A.B.C. *ET ALII*. 2014. Ação microbiológica nos azulejos históricos das fachadas de Belém, região amazônica. *Pós* 4, 8: 124-133.
- SAZANOVA, K.V. *ET ALII*. 2014. Formation of organic acids by fungi isolated from the surface of stone monuments. *Microbiology* 83: 516-522.
- SEGAL-KISCHINEVZKY, C. *ET ALII*. 2022. Yeasts Inhabiting Extreme Environments and Their Biotechnological Applications. *Microorganisms* 10, 4: 794.
- SEPCIC, K. *ET ALII*. 2011. Low Water Activity Induces the Production of Bioactive Metabolites in Halophilic and Halotolerant Fungi. *Marine Drugs* 9, 1: 43-58.
- SHARMA, K.; S. LANJEWAR. 2010. Biodeterioration of ancient monument (Devarbija) of Chhattisgarh by fungi. *Journal of Phytology* 2, 11: 47-49.
- SHIRLING, E.B.; D. GOTTLIEB. 1966. Methods for characterization of *Streptomyces* species. *International Journal of Systematic Bacteriology* 16, 3: 313-340.
- SIDRIM, J.J.C.; M.F.G. ROCHA, EDS. 2004. *Micologia médica à luz de autores contemporâneos*. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan.
- SILVA, Y.B.L. 2025. *Casarões, Toadas e Azulejos: A Educação Patrimonial em escolas da Rede Municipal de Ensino de São Luís, MA*. São Luís: Universidade Federal do Maranhão.
- SILVA, T.P. *ET ALII*. 2013. Ascertaining the degradation state of ceramic tiles: A preliminary non-destructive step in view of conservation treatments. *Applied Clay Science* 82: 101-105.
- SIMONOVICOVÁ, A. *ET ALII*. 2004. Airborne and soil microfungi as contaminants of stone in a hypogean cemetery. *International Biodeterioration & Biodegradation* 54: 7-11.
- SITZIA, F. *ET ALII*. 2023. Predicted Dynamic of Biodeterioration in Cultural Heritage Stones Due to Climate Changes in Humid Tropical Regions: A Case Study on the *Rhodotorula* sp. Yeast. *Heritage* 6, 12: 7727-7741.
- SKIPPER, P.J.A. *ET ALII*. 2022. A metagenomic analysis of the bacterial microbiome of limestone, and the role of associated biofilms in the biodeterioration of heritage stone surfaces. *Scientific Reports* 12: 4877.
- STANASZEK-TOMAL, E. 2024. Microorganisms in Red Ceramic Building Materials: A Review. *Coatings* 14, 8: 985.
- STERFLINGER, K. 2010. Fungi: their role in deterioration of cultural heritage. *Fungal Biology Reviews* 24, 1-2: 47-55.
- STERFLINGER, K.; G. PIÑAR. 2013. Microbial deterioration of cultural heritage and works of art – tilting at windmills? *Applied Microbiology and Biotechnology* 97: 9637-9646.
- TIQUIA-ARASHIRO, S.M.; M. GRUBE, EDS. 2019. *Fungi in Extreme Environments: Ecological Role and Biotechnological Significance*. Springer.
- TROVÃO, J.; A. PORTUGAL. 2021. Current Knowledge on the Fungal Degradation Abilities Profiled through Biodeteriorative Plate Essays. *Applied Sciences* 11, 9: 4196.
- VENÂNCIO, C. *ET ALII*. 2017. Salinity induced effects on the growth rates and mycelia composition of basidiomycete and zygomycete fungi. *Environmental Pollution* 231, 2: 1633-1641.
- VIDELA, H.A. *ET ALII*. 2003. Biodeterioro de materiales estructurales de sitios arqueológicos de la civilización maya. *Revista del Museo de La Plata* 44: 1-11.
- VIEGAS, C.A. *ET ALII*. 2023. Diversity and distribution of microbial communities on the surface of External Thermal Insulation Composite Systems (ETICS) facades in residential buildings. *International Biodeterioration & Biodegradation* 184: 105658.
- WANG, Y. *ET ALII*. 2022. Analysis and control of fungal deterioration on the surface of pottery figurines unearthed from the tombs of the Western Han Dynasty. *Frontiers in Microbiology* 13: 956774.
- WANG, C.; Y. KUZYAKOV. 2024. Mechanisms and implications of bacterial-fungal competition for soil resources. *The ISME Journal* 18, 1: wrae073.
- WARSCHEID, T.; J. BRAAMS. 2000. Biodeterioration of Stone: A Review. *International Biodeterioration & Biodegradation* 46, 4: 343-368.
- YADAV, S.; D. PURCHASE. 2025. Biodeterioration of cultural heritage monuments: A review of their deterioration mechanisms and conservation. *International Biodeterioration & Biodegradation* 201: 106066.
- ZHANG, Y. *ET ALII*. 2023. Diversity and Composition of Culturable Microorganisms and Their Biodeterioration Potentials in the Sandstone of Beishiku Temple, China. *Microorganisms* 11, 2: 429.