



DESCOMPLICANDO A CIÊNCIA: EXPLORANDO AS CIDADES INVISÍVEIS DOS MICRORGANISMOS UTILIZANDO FERRAMENTAS DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL GENERATIVA

*DEMYSTIFYING SCIENCE: EXPLORING THE INVISIBLE CITIES OF
MICROORGANISMS USING GENERATIVE ARTIFICIAL
INTELLIGENCE TOOLS*

*DESCOMPLICANDO LA CIENCIA: EXPLORANDO LAS CIUDADES
INVISIBLES DE LOS MICROORGANISMOS MEDIANTE
HERRAMIENTAS DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL GENERATIVA*

DOI: 10.5281/zenodo.22218231



Andrwey Augusto Galvão Viana¹

Carlos Gabriel Andrade Barbosa²

Felipe Soares da Silva³

Fernanda Borges Martins⁴

Fernanda Ellen Constantino da Silva⁵

Jeniffer Gabrielly de Souza Pereira⁶

Maria Eduarda Nascimento Peixoto da Silva⁷

1 Mestre em Biotecnologia. E-mail: andrwey-viana@hotmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-3134-8184>

2 Biomédico. E-mail: andradebarbosacarlosgabriel@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-5350-227X>

3 Biólogo. E-mail: felipeesoares@outlook.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-3932-2107>

4 Agroecóloga. E-mail: nandaborgges@hotmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3022-7460>

5 Farmacêutica. E-mail: nanda.ellen.ne@gmail.com.

6 Bióloga. E-mail: gabriellyjeniffer283@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2696-3027>

7 Biomédica. E-mail: peixotoduda8@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-8007-3794>





*Marina de Lourdes Ribeiro Alves Coelho*⁸

*Natan Fernandes Gomes Emmanuel*⁹

*Noêmia Vieira de Lucena*¹⁰

*Samuel Emiliano Monte Leite*¹¹

*Vinícius Cavalcante Moraes*¹²

*Ulrich Vasconcelos*¹³

RESUMO

O ensino de Microbiologia apresenta desafios particulares, pois a compreensão do mundo microscópico exige que os estudantes conceituem estruturas e processos que não são diretamente observáveis. Este estudo explorou o uso de ferramentas de Inteligência Artificial (IA) generativa para traduzir conceitos relacionados aos biofilmes microbianos em representações educacionais simplificadas, contextualizadas e visualmente acessíveis. Um grupo multidisciplinar de estudantes de Pós-Graduação das áreas de Ciências Biológicas e Ciências Ambientais desenvolveu materiais destinados a facilitar o letramento visual e a compreensão dos biofilmes bacterianos. A atividade compreendeu quatro etapas: distribuição de doze temas relacionados aos biofilmes, pesquisa teórica individual, ideação e prototipagem utilizando ferramentas de IA generativa e documentação reflexiva sobre o processo cognitivo e o uso ético da IA. Os materiais resultantes empregaram analogias, infográficos, antropomorfismo, situações cotidianas e ilustrações de caráter científico para representar a organização, o desenvolvimento, as interações e o controle dos biofilmes. Diferentes estratégias de construção de *prompts* produziram recursos educacionais acessíveis e podem ser empregadas para reduzir barreiras de abstração, bem como democratizar o conhecimento científico, desde que o conteúdo gerado seja criticamente analisado e validado.

Palavras-chave: Biofilmes; Educação científica; Inteligência artificial generativa; Letramento visual; Microbiologia.

ABSTRACT

Teaching Microbiology presents challenges, as understanding the microscopic world requires students to conceptualize structures and processes that are not directly observable. This study explored the use of generative Artificial Intelligence (AI) tools to translate concepts related to microbial biofilms into simplified, contextualized, and visually accessible educational representations. A multidisciplinary

8 Bióloga. E-mail: coelhomarinaalves@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-6148-669X>

9 Biomédico. E-mail: natanemmanuel123@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8902-0515>

10 Biomédica. E-mail: noemia_lucena@hotmail.com.

11 Biomédico. E-mail: samuelemilianomonte@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-5152-8422>

12 Biotecnologista. E-mail: viniciusc.moraes@live.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-2835-1174>

13 Doutor em Engenharia de Processos Químicos e Bioquímicos. E-mail: u.vasconcelos@cbiotec.ufpb.br. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8289-2230>

Revista *OWL Journal*, Campina Grande - PB, v. 4 n. 9 (2026) - ISSN 2965-2634

A Revista *OWL Journal* está licenciada com uma Licença Creative Commons Atribuição (CC BY)





group of graduate students in biological and environmental sciences developed materials aimed at facilitating visual literacy and understanding of bacterial biofilms. The activity comprised four stages: assignment of twelve biofilm-related topics, individual theoretical research, ideation and prototyping using generative AI tools, and reflective documentation of the cognitive process and the ethical use of AI. The resulting materials employed analogies, infographics, anthropomorphism, everyday situations, and scientific illustrations to represent biofilm organization, development, interactions, and control. Different prompt-construction strategies produced accessible educational resources and can be used to reduce barriers to abstraction, as well as to democratize scientific knowledge, provided that the generated content is critically analyzed and validated.

Keywords: Biofilms; Science education; Generative artificial intelligence; Visual literacy; Microbiology.

RESUMEN

La enseñanza de la Microbiología presenta desafíos, ya que la comprensión del mundo microscópico exige que los estudiantes conceptualicen estructuras y procesos que no son directamente observables. Este estudio exploró el uso de herramientas de Inteligencia Artificial (IA) generativa para traducir conceptos relacionados con las biopelículas microbianas en representaciones educativas simplificadas, contextualizadas y visualmente accesibles. Un grupo multidisciplinar de estudiantes de posgrado de las áreas de ciencias biológicas y ambientales desarrolló materiales destinados a facilitar la alfabetización visual y la comprensión de las biopelículas bacterianas. La actividad comprendió cuatro etapas: asignación de doce temas relacionados con las biopelículas, investigación teórica individual, ideación y creación de prototipos mediante herramientas de IA generativa y documentación reflexiva sobre el proceso cognitivo y el uso ético de la IA. Los materiales resultantes emplearon analogías, infografías, antropomorfismo, situaciones cotidianas e ilustraciones científicas para representar la organización, el desarrollo, las interacciones y el control de las biopelículas. Diferentes estrategias de construcción de prompts produjeron recursos educativos accesibles y pueden utilizarse para reducir las barreras de abstracción, así como para democratizar el conocimiento científico, siempre que el contenido generado sea analizado críticamente y validado.

Palabras clave: Biopelículas; Educación científica; Inteligencia artificial generativa; Alfabetización visual; Microbiología.

1. INTRODUÇÃO

A inteligência artificial generativa (IA) é uma das ferramentas mais disruptivas no século XXI, de propósito geral, que causa diferentes impactos em todas as atividades humanas (LAMB, 2024). Exatamente porque é caracterizada como uma tecnologia transformadora, vanguardista e provocadora, a IA causa um amplo debate sobre ética, confiabilidade e





responsabilidade (CUTRIM; MAGALHÃES; COSTA, 2023). Este debate ético sobre o uso de IA generativa é fundamental e legítimo porque diferentes ferramentas compõem um processo transformador que vem se estabelecendo de forma permanente nos vários setores da sociedade, em que a educação se destaca como um dos mais impactados (SILVA e KAMPFF, 2023).

O uso de IA na educação produz diferentes dilemas aos profissionais da área cujos vieses podem ser positivos ou negativos. Isto obriga os educadores redesenharem suas estratégias pedagógicas, explorando a valorização da elaboração, ética, letramento e pensamento crítico dos alunos (AZAMBUJA e SILVA, 2024). Como impactos positivos, Figueredo *et al.* (2023) destacaram nove pontos, a saber: 1) adaptação individual, permitindo o ajuste do material e do ritmo de estudo de acordo com o perfil de cada aluno; 2) autonomia, por garantir ao estudante o gerenciamento da forma como aprende; 3) verificação de aprendizado criativa e não restrita à avaliação tradicional; 4) correção imediata, por detectar lacunas em tempo real; 5) apoio ao docente na otimização do tempo e redução da sobrecarga; 6) aumento do interesse, por tornar o tema e aula mais envolventes; 7) inclusão tecnológica, promovendo ajustes de ritmo, nível de dificuldade e participação ativa de estudantes com limitações; 8) aumento da produtividade acadêmica; e 9) acesso à diferentes plataformas possibilitando a adaptação e personalização do estudante na organização lógica dos conteúdos.

Como impactos negativos, a IA torna desafiadora questões éticas, como aspectos ligados ao uso de dados sensíveis e da vida privada, decisões discriminatórias ou injustas, apropriação indevida de propriedade intelectual, plágio, ausência de análise crítica, reforço de desigualdades sociais, dependência excessiva das ferramentas, desinformação e preconceito contra as ferramentas, refletindo a carência de políticas de formação continuada para profissionais da educação (NUNES e MERCADO, 2025).

É importante notar que a disseminação de modelos de IA generativa contribui para a superação de obstáculos educacionais, promovendo a democratização do saber (OLIVEIRA *et al.*, 2026). Isto se torna uma estratégia pedagógica significativa quando aplicada a





componentes curriculares que versam sobre a aprendizagem de conceitos desconexos da realidade dos estudantes e que exigem um certo grau de abstração, como as ciências da natureza (SANTOS e GERALDO, 2025). Neste contexto, a Microbiologia está inserida porque exige um elevado nível de abstração, podendo causar ruídos na compreensão para muitos alunos. A Microbiologia é a ciência que investiga os microrganismos (bactérias, fungos, vírus, algas, protozoários) e suas interações com o meio (MEDEIROS *et al.*, 2017).

A percepção e compreensão sobre o “invisível” é desafiadora e complexa porque exige do aluno a idealização de processos multidimensionais não observáveis em escala macro. Além disso, alguns fatores contribuem para esta dificuldade verificada em alguns estudantes, por exemplo: 1) necessidade de abstração; 2) esquecimento do que é aprendido por memorização sem que os novos conceitos interajam com o conhecimento anterior e/ou com a realidade do aluno; 3) associação dos microrganismos com doenças em detrimento ao seu papel transformador e benéfico, prejudicando a visão do microcosmo; 4) ausência de estrutura para desenvolvimento de atividades práticas; e 5) a influência do senso comum que é construído pelo que é disseminado pela mídia, como doenças, epidemias e biodeterioração, que contribuem e reforçam a visão negativa e limitada sobre microrganismos (SOUZA; AZEVEDO; SODRÉ, 2015).

Ressalta-se também que tais atitudes igualmente fomentam a misofobia, isto é, o medo irracional de adoecer por meio do contato direto ou indireto com microrganismos. O indivíduo supervaloriza a ameaça, obrigando-o praticar excessos de higiene pessoal e desinfecção de ambientes (ALPI *et al.*, 2023).

2. APRESENTANDO O BIOFILME

O que há de semelhanças entre a cárie dentária ou uma película viscosa sobre o prato de água de um cachorro com a proteção do trato intestinal ou a evolução que permitiu vida em diferentes ambientes naturais e artificiais, incluindo seus extremos? A pergunta é respondida com uma única palavra: biofilme. O biofilme pode ser definido como uma comunidade





microbiana organizada, estruturada de forma mista ou axênica, aderida a superfícies bióticas ou abióticas.

Os biofilmes são envolvidos em uma matriz extracelular autoproduzida, composta majoritariamente por exopolissacarídeos (EPS), além de proteínas, DNA extracelular (eDNA) e água (HALL-STOODLEY *et al.*, 2004; FLEMMING e WINGENDER, 2010). Esse arranjo confere tolerância a diferentes estresses ambientais, tais como dessecação, radiação, ataques do sistema imune, agentes antimicrobianos, bem como certa resistência à remoção por forças físicas (SANTOS *et al.*, 2018). Contudo, a colonização e estabilidade do biofilme dependem de características tanto dos microrganismos como da natureza do material que eles irão se aderir.

Os biofilmes foram descritos pela primeira vez na história em 1663 por Anthony van Leeuwenhoek (1632-1723), reconhecido no século XX como um dos patronos da Microbiologia. Ele observou “agregados com um número inconcebível de animáculos de diversos tipos” a partir de amostra de um fermento da sua própria língua (HØIBY, 2014). “Agregados” foram igualmente descritos em 1864 por Louis Pasteur (1822-1895) no famoso estudo com vinhos, mas somente entre os anos 1920 e 1930 os termos limo e incrustação começam a ser empregados nos trabalhos realizados em ambientes naturais, aquático doce, com Arthur T. Henrici (1889-1943) e marinho, com Claude Ephraim Zobell (HØIBY e CIOFU, 2018). Zobell (1902-1989) se tornou a autoridade mais importante em microbiologia marinha a partir de seu estudo em píeres, quando observou um número significativo de bactérias aderidas num período entre 2 e 4 h.

O estudo de biofilmes permaneceu no ostracismo até os anos 1970 quando John William “Bill” Costerton (1934-2012) o trouxe à luz de forma pioneira, tornando-se posteriormente autoridade mundial e “pai do biofilme” no contexto de ambientes hospitalar e fabril. A teoria foi cunhada durante a investigação de infecções por *Pseudomonas aeruginosa* em pacientes portadores de fibrose cística, impulsionando abordagens na área clínica (LAPPIN-SCOTT; BURTON; STOODLEY, 2014).





Seus estudos reconheceram a vida séssil como estilo de vida preferencial microbiano em detrimento da vida planctônica, contribuindo aos avanços no conhecimento sobre biofilmes. Esse período se estende desde os anos 1980 quando importantes descobertas foram realizadas em termos morfológicos e moleculares, utilizando modelos multidimensionais e multiespécies (JAMAL *et al.*, 2018).

Em razão dessas descobertas, os principais microrganismos modelos nos estudos com biofilmes são *P. aeruginosa*, para bactérias e *Candida albicans*, para fungos (KUMAR e KUMAR, 2024; LETIZIA; DIGGLE; WHITELEY, 2025). Em complemento, ambas as espécies são caracterizadas pela versatilidade, plasticidade e possuem vias regulatórias e de comunicação por sinalização química bem conhecidas (PANG *et al.*, 2025). A relevância desses modelos também se dá pelo fato de ambas as espécies coexistirem e interagirem. Isto reflete na arquitetura, metabolismo, virulência e susceptibilidade a antimicrobianos (KAHL *et al.*, 2023). Em complemento, a ordem de colonização entre as duas espécies influencia a composição dos biofilmes, configurando o efeito de prioridade (ARÉVALO-JAIMES; ADMELLA; TORRENTS, 2025).

Dependendo da literatura de referência, o ciclo de um biofilme apresenta de 4 a 6 etapas. Neste texto foi adotado o conceito de 4 etapas: migração; adesão e colonização; maturação; e desprendimento (COSTERTON e WILSON, 2004). A colonização do biofilme inicia com a migração das células flageladas e reconhecimento da superfície. A adesão irreversível das células só ocorre em função de certos fatores físicos e/ou químicos, sendo mandatórios: a presença de um fluido, com ou sem turbulência; disponibilidade de nutriente; e uma superfície compatível para adesão.

Outros fatores que contribuem de maneira significativa para a colonização do biofilme são a natureza e topografia da superfície, a hidrofobicidade da parede celular, forças eletrostáticas, disponibilidade de oxigênio, temperatura e pH (UGWU *et al.*, 2025).

Em complemento, a transição de estado planctônico para séssil é regulada pelo aumento intracelular do segundo mensageiro, dinucleotídeo cíclico monofosfato de guanosina





(c-di-GMP). Isto revela o complexo sistema de sinalização e comunicação celular envolvido em todo o ciclo do biofilme (HENGGE, 2009).

O processo de amadurecimento do biofilme cria um microambiente com formatos característicos de pilar ou em cogumelos, unidos por pontes que funcionam como um sistema circulatório primitivo de distribuição de nutrientes, oxigênio e remoção de metabólitos resíduos (COSTERTON *et al.*, 1999; YIN *et al.*, 2019).

Contudo, a organização em cogumelo além de conferir mais estabilidade, favorece a transferência horizontal de genes e produção de diferentes fenótipos num mesmo microambiente (FLEMMING *et al.*, 2016; ZHAO; SUN; LIU, 2023). A escassez de nutrientes, aumento de densidade celular e das pressões exercidas pelo ambiente ativam fatores regulatórios do biofilme, iniciando a etapa do desprendimento. Há estimulação de fosfodiesterases que degradam c-di-GMP intracelular, ativando a expressão do flagelo. Simultaneamente, ocorre a secreção de enzimas dispersivas, como proteases, alginato-liases e dispersina B, responsáveis pela ruptura do EPS, permitindo a dispersão das células com ou sem flagelos, bem como de pedaços de biofilme, que seguem o fluxo e colonizam novas superfícies (WANG *et al.*, 2023).

Em suma, o biofilme é uma organização que remete a complexidade de uma metrópole. Longe de um aglomerado celular passivo e estático, a transição do estado planctônico para o sésil, bem como o contrário, é mediada por redes de sinalização, estabelecendo um estilo de vida coletivo caracterizado por cooperação social, regulação metabólica coordenada e compartilhamento de bens públicos sintetizados ou assimilados (DONLAN, 2002). Atualmente, os esforços na pesquisa sobre biofilmes concentram-se na elucidação da estrutura, funcionalidade e interações moleculares e celulares que ocorrem para mantê-los (MUKHI e VISHWANATHAN, 2022).





3. METODOLOGIA

A proposta desse trabalho foi experimental e visou traduzir a temática do biofilme para uma linguagem gráfico-textual simplificada, acessível para estudantes do ensino médio, com material produzido através da utilização de ferramentas de IA generativa, por um corpo discente multidisciplinar de formação nas áreas de ciências biológicas, biotecnologia e ciências da saúde, matriculado em dois programas de Pós-Graduação.

Os alunos foram estimulados a aplicar conceitos de transposição didática (CHEVALLARD, 2005), com fins de letramento visual em Microbiologia, objetivando a compreensão sobre o tema “biofilmes”, fazendo um paralelo à sociedade humana, seja por semelhança na sua organização e diversidade, seja pela influência dessas estruturas no cotidiano.

A atividade foi estruturada em quatro fases, a saber: 1) divisão dos alunos em doze temas; 2) imersão teórica individual, utilizando bibliografia disponível em banco de bases científicas; 3) ideação e prototipagem, com livre uso de ferramentas de IA generativa para a criação de representações visuais; e 4) documentação reflexiva dos discentes sobre o processo cognitivo e o uso ético da ferramenta de IA.

4. O PROCESSO E A CONSTRUÇÃO DAS IMAGENS

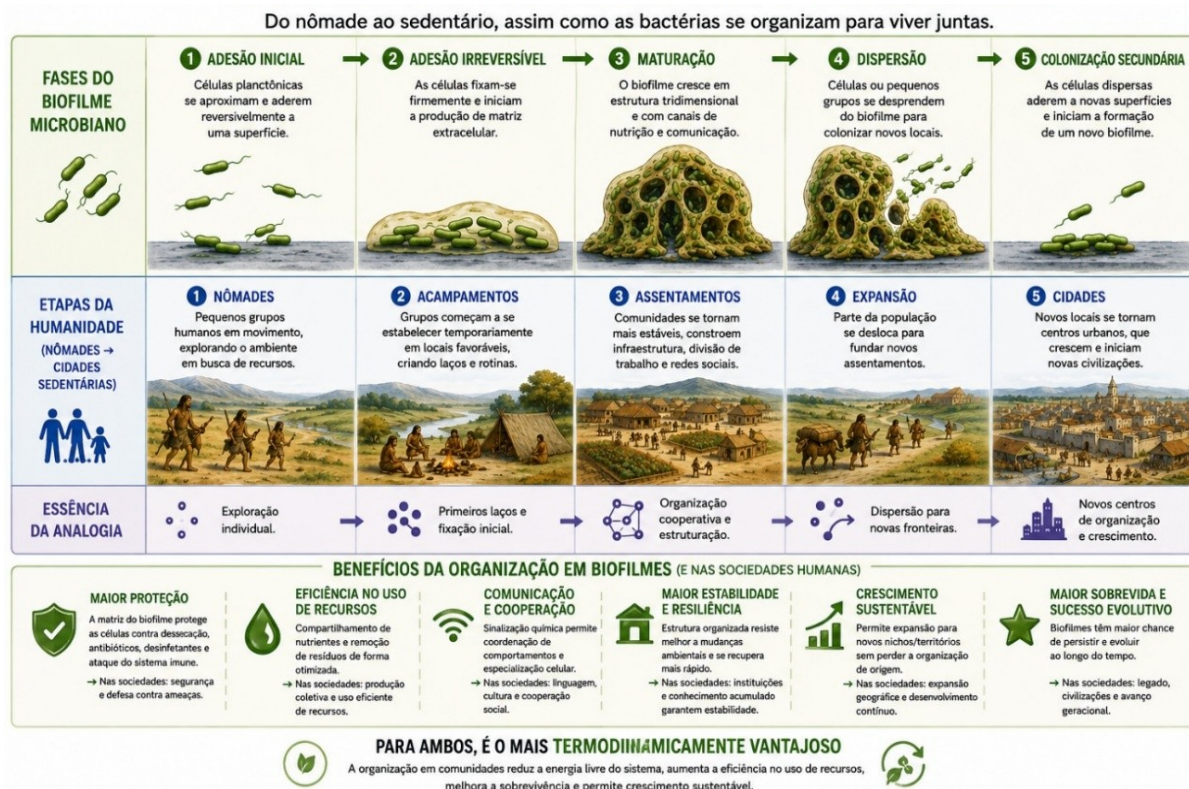
A introdução ao estudo do biofilme na visão criativa de Vinícius Moraes deve considerar a analogia da estrutura microbiana e organização vida das pessoas em sociedade (Figura 1) foi descrita da seguinte forma:

O raciocínio que me levou a esse diagrama foi justamente a analogia que costumo fazer quando eu explico biofilmes e a razão de serem a forma de vida preferencial em microrganismos. A vida em biofilme é preferencial devido a resistência, comunicação, menor gasto de energia e acesso mais abundante a nutrientes. (Moraes, V.C., Biotecnologista)





Figura 1– Analogia entre o biofilme microbiano e as sociedades humanas



Nota – Elaborado pelo autor com auxílio do chat GTP (2026). *Prompt* utilizado: [faça-me um diagrama traçando uma analogia entre as fases de desenvolvimento de um biofilme microbiano e o processo que a humanidade passou de nômades a desenvolver cidades sedentárias. Por favor destacar que para ambos é o mais termo dinamicamente vantajoso e destacar os benefícios da organização em biofilmes].

Do ponto de vista da morfologia e organização do biofilme elaborada por Felipe da Silva (Figura 2), o biofilme é apresentado como “uma porta de entrada visual para quem nunca ouviu falar (do tema)” [SIC] e assim o autor define sua criação:

Escolhi a visão em corte transversal porque ela resolve o maior desafio de representar esse tema: biofilme não é uma coisa “achatada” – é uma estrutura tridimensional, com relevo, canais e arquitetura própria, e isso só fica claro se cortarmos a estrutura ao meio. As bactérias aparecem em tons de azul/verde para remeter à ideia de “vida microscópica” de forma amigável, sem apelar para o clichê de “bactéria = perigo/vermelho”. A matriz extracelular (EPS) foi pensada em um tom âmbar translúcido e viscoso de propósito, a ideia aqui é as pessoas possam sentir visualmente a textura de “gel grudento” que dá nome popular ao biofilme. As torres em formato de cogumelo foi para tentar demonstrar a morfologia clássica, e escolhi deixá-la visível porque ela ajuda a entender que o biofilme tem “arquitetura”, não é uma massa desorganizada de bactérias empilhadas. Os pequenos canais entre as



torres representam os canais de água, que levam nutrientes e removem resíduos (um detalhe que costuma surpreender quem pensa em biofilme apenas como "sujeira"). Por fim, o efeito de *zoom* (da superfície macroscópica, de um dente, até a visão microscópica) foi incluído para ancorar a imagem na experiência cotidiana do espectador, mostrando que aquilo que ele imagina como "uma coisa embaçada visível a olho nu" é, na verdade, uma comunidade organizada em escala microscópica (Silva, F.S, Bióloga).

Figura 2 – Representação de um biofilme



Nota – Elaborado pelo autor com auxílio do ChatGPT (2026). *Prompt* utilizado no idioma inglês: [Scientific illustration, digital art style, cutaway cross-section view of a bacterial biofilm growing on a solid surface. Show rod-shaped and coccus bacteria (in soft blue and teal tones) attached to a smooth grey surface at the bottom, embedded inside a translucent, glossy, gel-like extracellular matrix (EPS) rendered in semi-transparent amber/gold. Depict the classic mushroom-shaped microcolony towers rising from the surface, with visible thin water channels running between them like tiny rivers, showing nutrient flow (small arrows or particle dots). Include a magnifying glass or zoom-in effect in one corner transitioning from a macro view (a slimy film on a pipe or tooth surface) to the microscopic view of bacteria in the matrix. Clean, modern infographic aesthetic, soft lighting, high detail, white background, educational poster style, no text or labels, vibrant but scientifically plausible color palette, 4k, ultra-detailed].

A vida em biofilme é vantajosa e preferencial no mundo microbiano. Jeniffer Pereira ilustrou a vida em comunidade, comparada à vida livre (Figura 3), criando um cenário comparativo, mas entendendo que a vida livre microbiana tem suas características particulares, caso contrário a seleção natural já a teria dissipado.

A ilustração foi idealizada para representar, de forma lúdica e educativa, os estilos de vida planctônico e sésil dos microrganismos, ela isolada simboliza a vida planctônica, enquanto a ciranda representa a organização coletiva no biofilme. Foram utilizados personagens, cores e elementos visuais simples para facilitar a



compreensão pelo público-alvo. As vantagens da vida sésil foram destacadas para mostrar como a vida em comunidade favorece a sobrevivência microbiana (Pereira, J.G.S., Licenciada em Ciências Biológicas).

Figura 3 – Os dois estilos de vida bacteriana



Nota – Elaborado pela autora com auxílio do Chat GTP (2026). Prompt utilizado: [Chat, é discutido que os microrganismos possuem dois estilos de vida, o planctônico e o sésil. O estado **planctônico**, caracterizado por células livres ou suspensas no meio, e o estado **sésil**, no qual as células se encontram associadas a superfícies ou organizadas em comunidades, frequentemente constituindo biofilmes. A adoção do estilo de vida sésil pode conferir importantes vantagens adaptativas, sobretudo em ambientes sujeitos a condições adversas, uma vez que a associação a superfícies e a formação de comunidades estruturadas favorecem a retenção e o aproveitamento de nutrientes, as interações e a comunicação entre células e uma maior tolerância a diferentes estresses ambientais. Nos biofilmes, essas vantagens são potencializadas pela produção de uma matriz extracelular que contribui para a coesão e estabilidade da comunidade e pode reduzir a exposição das células a agentes antimicrobianos e outros fatores de estresse. Baseado nisso pode criar um desenho para utilização de caráter informativo, para escolas públicas e privadas de ensino fundamental, sobre esse estilo de vida. Mostrando a partir de uma bactéria sozinha e já outra uma bactéria com outras bactérias formando uma ciranda trazendo as vantagens do estilo de vida sésil?].

Marina Coelho trouxe a ideia do biofilme no cotidiano, apresentando a ideia dual, do bem e do mal, na visão do senso comum sobre as bactérias (Figura 4). A criação da identidade visual partiu da seguinte premissa:

A ilustração apresenta uma cena dividida em quatro partes do cotidiano: uma criança escovando os dentes, um banheiro com limo no azulejo, uma pia com restos de comida e um ambiente natural com pedras em um rio. Em todas as cenas, pequenos “personagens” representando bactérias aparecem agrupados em estruturas semelhantes a uma camada gelatinosa, simbolizando o biofilme. As bactérias são ilustradas como figuras coloridas e amigáveis, algumas sorrindo e outras com expressão travessa, para diferenciar biofilmes benéficos e prejudiciais. Ao pensar na



elaboração da figura, busquei aproximar o conceito de biofilme da realidade cotidiana, especialmente para um público leigo e infantil. A ideia central foi representar os biofilmes como “comunidades de bactérias”, quase como pequenas cidades, para facilitar a compreensão. Por isso, optei por ilustrar diferentes cenários comuns (dentes, banheiro, cozinha e natureza) mostrando que os biofilmes estão presentes em vários ambientes. Além disso, quis transmitir que nem todos os biofilmes são necessariamente prejudiciais. Para isso, utilizei personagens com expressões diferentes, alguns amigáveis e outros mais “bagunceiros”, indicando que alguns podem ser importantes para o equilíbrio ambiental, enquanto outros podem causar problemas, como doenças ou sujeira. O uso de cores vibrantes e estilo *cartoon* foi pensado para tornar o conteúdo mais acessível, atrativo e fácil de compreender (Coelho, M.L.R.A, Bióloga).

Figura 4 – Biofilmes: as pequenas cidades escondidas das bactérias



Nota – Elaborado pela autora com auxílio do Gemini Notebook (2026). *Prompt* utilizado: [crie uma ilustração educativa para o público infantil. A ilustração apresenta uma cena dividida em quatro partes do cotidiano: uma criança escovando os dentes, um banheiro com limo no azulejo, uma pia com restos de comida e um ambiente natural com pedras em um rio. Em todas as cenas, pequenos “personagens” representando bactérias aparecem agrupados em estruturas semelhantes a uma camada gelatinosa, simbolizando o biofilme. As bactérias são ilustradas como figuras coloridas e amigáveis, algumas sorrindo e outras com expressão travessa, para diferenciar biofilmes benéficos e prejudiciais. Representar bactérias como pequenos personagens coloridos vivendo juntos em uma camada gelatinosa. Estilo *cartoon*, colorido, didático, amigável para crianças, fundo limpo, alta resolução. Busque aproximar o conceito de biofilme da realidade cotidiana, especialmente para um público leigo e infantil. Por isso, ilustre diferentes cenários comuns (dentes, banheiro, cozinha e natureza) mostrando que os biofilmes estão presentes em vários ambientes. Além disso, transmita que nem todos os biofilmes são necessariamente prejudiciais. Para isso, utilize personagens com expressões diferentes, alguns amigáveis e outros mais “bagunceiros”, indicando que alguns podem ser importantes para o equilíbrio ambiental, enquanto outros podem causar problemas, como doenças ou sujeira].



A linha do tempo da evolução dos estudos sobre biofilmes (Figura 5) foi idealizada pela discente Fernanda Ellen, de forma que seja preenchida por alunos, como um exercício interativo de avaliação do aprendizado.

Foi selecionada uma versão de linha do tempo ilustrada e didática, devido aos muitos marcos temporais que foram essenciais e que integram a história do estudo dos biofilmes. O intuito é que durante o estudo do tópico os estudantes tivessem acesso a ilustração e a utilizassem como base para anotações, auxiliando na visualização dos acontecimentos durante a passagem do tempo. Dessa forma, após a realização do texto base sobre os momentos históricos que integram o estudo dos biofilmes foi necessário destacar e listar as datas e nomes/títulos que seriam usados na linha temporal, esse processo foi realizado manualmente, restando 7 marcos principais (Silva, F.E.C., Farmacêutica).

Figura 5 – Evolução do estudo com biofilmes



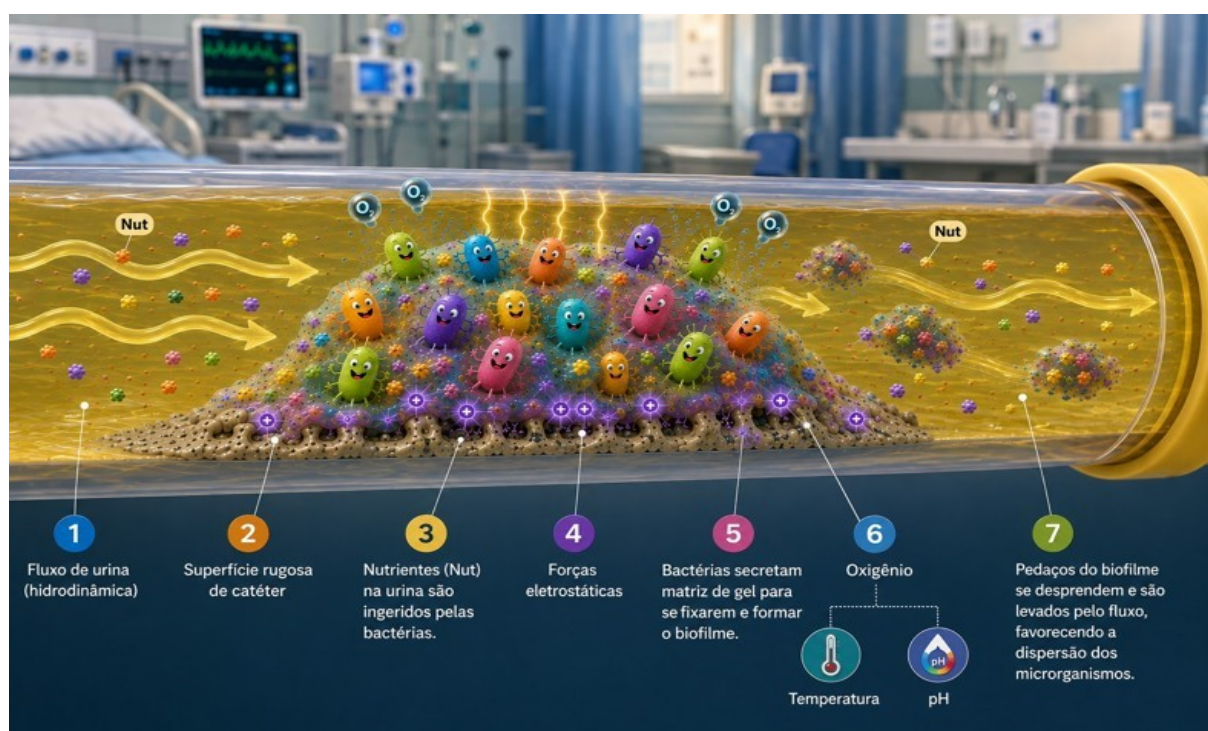
Nota – Elaborado pela autora com auxílio do Leonardo.Ai (2026). *Prompt* utilizado: [linha do tempo ilustrada didática horizontal mostrando 7 marcos principais da evolução dos biofilmes; estilo *cartoon* e limpo, visual científico e acessível para público acadêmico e estudantes; paleta de cores em tons de verde (musgo, esmeralda) e creme suave; fundo claro com textura sutil; linha de conexão fina e contínua em tom acinzentado; pontos de destaque circulares em cada marco com sombra suave; cada marco com ilustração *cartoon* relacionado ao conteúdo (microscópio antigo; barril de vinho; limo em cascos de navio; placa de Petri; *pier*; imagem de *Pseudomonas aeruginosa* na fibrose cística; microscópio de varredura), título curto e data abaixo do ícone; tipografia sans-serif legível com hierarquia clara (título maior, data menor); espaço reservado para legenda e notas explicativas abaixo da cada marco; iluminação suave, sombras sutis, alta resolução, composição equilibrada, margens generosas; estética coerente entre ícones (traço uniforme, espessura consistente); incluir marcação discreta de escala temporal (linhas menores entre marcos), ordenados da esquerda para a direita (1683-Anthony van Leeuwenhoek, 1864-Louis Pasteur, 1920s-Angst, 1930s-Arthur Henrichi, 1935-Zobell e Allen, 1970s-Costerton, 1990s-Atualidade-Avanço científico)].



Diferentes fatores ambientais estão implicados na colonização de biofilmes, entretanto, três são primordiais e obrigatórios no entendimento sobre estas organizações microbianas: hidrodinâmica de um fluido, superfície de adesão e disponibilidade de nutrientes (Figura 6). O discente Carlos Barbosa assim descreve sua idealização:

O projeto da imagem iniciou-se, primeiramente, com a busca pelo entendimento do que são os biofilmes microbianos e do tema “Fatores físico-químicos da colonização de biofilmes”. A partir disso, foi realizada a pesquisa da IA generativa mais indicada para a formulação da imagem, sendo observados critérios de preço e qualidade da imagem gerada. A formulação da imagem buscou trazer um aspecto mais de uma animação trazendo elementos físico-químicos que favorecem a colonização capazes de serem descritos visualmente como o fluxo do fluido, o substrato rugoso e outros. Todavia, foi vista a necessidade de acrescentar um pequenas descrições em texto na imagem, a fim de torná-la mais educativa e autoexplicativa, não exceder no caráter abstrato. No que se refere à ambientação, buscou-se representar um ambiente hospitalar, a fim de ressaltar a relevância e preocupação quanto ao tema na área da saúde (Barbosa, C.G.A., Biomédico).

Figura 6 – Fatores físico-químicos para a colonização de biofilmes



Nota – Elaborado pelo autor com auxílio do ChatGPT (2026). *Prompt* utilizado: [Bom dia, Chat! Gostaria que você me ajudasse a fazer ilustração médica educativa em 3D, voltada para um público leigo, de um biofilme



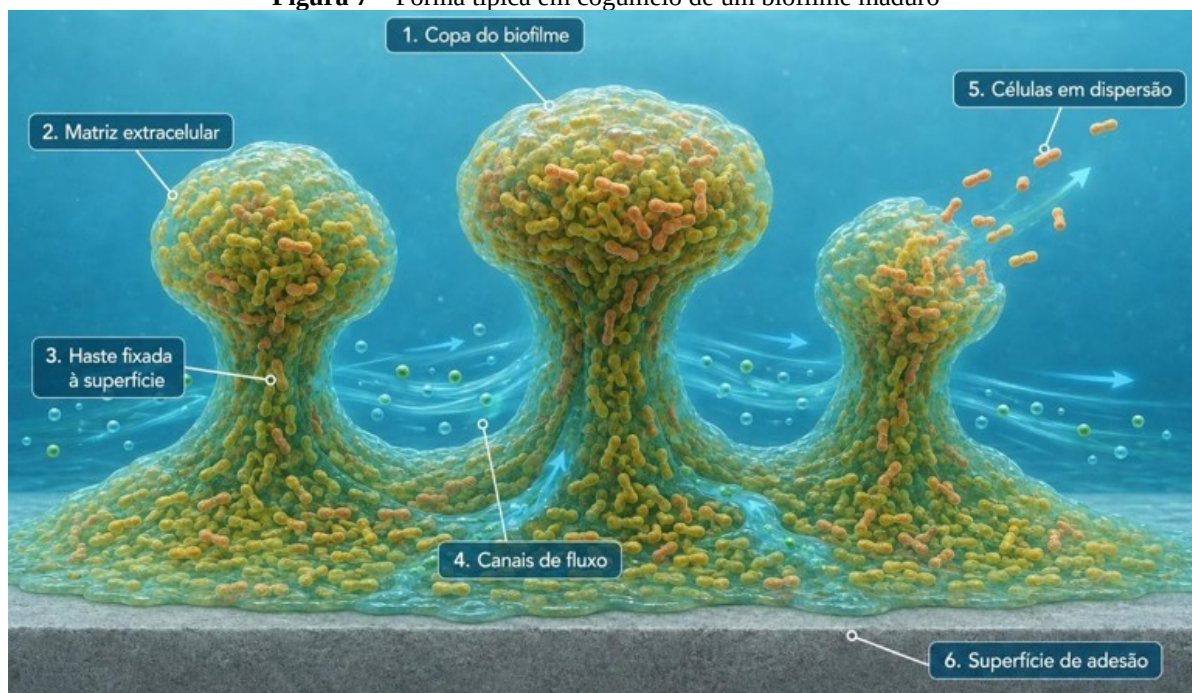
microbiano colonizando uma superfície hospitalar sólida texturizada e rugosa (como um catéter ou tubo de respiração artificial). A imagem deve mostrar bactérias (microrganismos) estilizadas e amigáveis no interior do biofilme e deve enfatizar metaforicamente os fatores físico-químicos descritos a seguir que favorecem a formação do biofilme: 1. Setas ondulada-representando o fluxo de água (hidrodinâmica) e um ambiente úmido; 2. Superfície irregular (texturizada)-representando a rugosidade da superfície e esta firma o biofilme frente ao movimento da corrente de água; 3. Pequenos flocos coloridos no líquido e sendo ingeridos pelas bactérias-representando a riqueza de nutrientes no ambiente; 4. Pequenas linhas magnéticas brilhantes representando a atração elétrica (forças eletrostáticas); 5. Algumas bactérias secretando uma matriz de gel protetora e colorida para se fixarem à superfície e fornecer a morfologia do biofilme.; 6. Bactérias respirando nas extremidades do biofilme, a fim de representar a disponibilidade de oxigênio no ambiente ao redor do biofilme. Demonstre o biofilme como um local de proteção para as bactérias. O estilo deve lembrar uma animação moderna da Pixar ou uma exposição de museu de ciências voltada para crianças e curiosos. Cores vivas, estilo visual claro e amigável, informativo e sem texto]. Observação: outros 4 *prompts* foram usados para ajustes da imagem e composição da ilustração final (não apresentados).

Após maduro, a arquitetura mais estável assumida por um biofilme é a de cogumelo (Figura 7). Com um ápice mais frouxo e uma base mais condensada, há instalado um ambiente em que as células pioneiras e intermediárias produzam os bens públicos e fenótipos diversos estejam na parte superior, mais fluida, permitindo as trocas de nutrientes, metabólitos, oxigênio e transferência de genes. O modelo do cogumelo foi compreendido estudando-se *Pseudomonas aeruginosa*. A construção da imagem por Fernanda Martins destaca o biofilme maduro com uma cena que sugere esgotamento de nutrientes ou alta densidade celular:

Eu pensei no desenho que fizesse uma da comparação visual direta com estruturas que lembram pequenos cogumelos, embora sejam formadas por milhares de bactérias. Escolhi um corte lateral de uma superfície de forma submersa para que fosse possível enxergar as bases mais estreitas, os topos arredondados e os espaços existentes entre as microcolônias. As bactérias aparecem como bastonetes amarelos e alaranjados para que o observador perceba que a estrutura não é um organismo único, mas uma comunidade. A camada verde azulada e translúcida representa a matriz extracelular que envolve e mantém as células reunidas. As setas azuis e as pequenas partículas sugerem o movimento de água e de substâncias dissolvidas pelos canais, enquanto a abertura em uma das copas e as bactérias que saem dela representam a dispersão. Minha intenção foi transformar algo microscópico e abstrato em uma cena simples: uma comunidade que cresce sobre uma superfície, organiza-se em relevo e, em determinado momento, libera células capazes de ocupar novos locais (Martins, F.B., Agroecóloga).



Figura 7 – Forma típica em cogumelo de um biofilme maduro



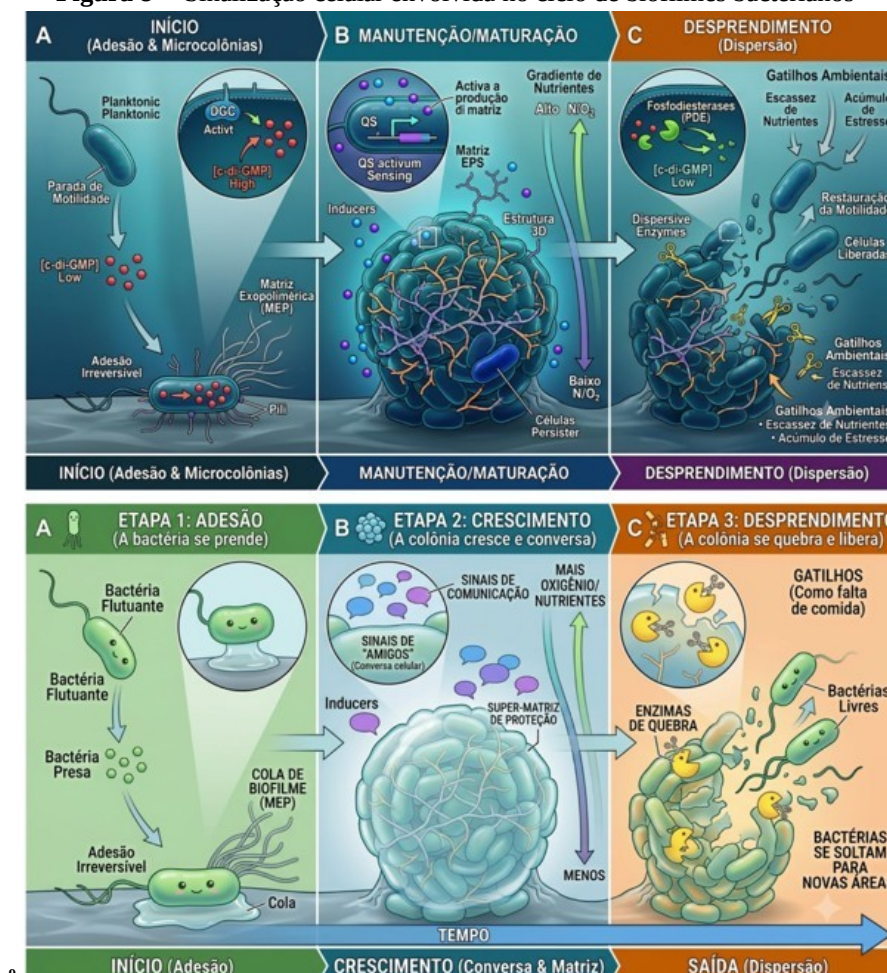
Nota – Elaborado pelo autor com auxílio do ChatGPT (2026). *Prompt* utilizado: [crie uma ilustração científica, didática e visualmente atraente sobre a forma de cogumelo de um biofilme, destinada a uma revista de divulgação científica para leitores leigos e curiosos. Imaginei três estruturas tridimensionais semelhantes a cogumelos, formadas por muitas células bacterianas agrupadas e envolvidas por uma matriz extracelular translúcida. Cada estrutura deve apresentar uma haste estreita fixada à superfície e uma copa arredondada e mais larga. Entre os agregados, represente canais por onde circulam água e nutrientes. Mostre também algumas células se desprendendo de uma das estruturas, indicando o processo de dispersão para a colonização de outros locais. Utilize tons de azul, verde e roxo, fundo claro e estilo de infográfico científico moderno. Acrescente, de maneira organizada, os rótulos: “copa do biofilme”, “matriz extracelular”, “haste fixada à superfície”, “canais de fluxo”, “células em dispersão” e “superfície de adesão”. Não coloque o título “A forma de cogumelo de um biofilme” dentro da imagem].

Todo o ciclo do biofilme é governado por processos de sinalização e comunicação celular (Figura 8), que também servem de alvos nas abordagens por novos antimicrobianos, ao tentar combater a multirresistência bacteriana. Por se tratar de um tema complexo, o discente Natan Emmanuel abordou a sinalização celular sob duas ópticas:

Duas imagens representam o mesmo conceito. Uma imagem mais técnica, mostrando moléculas e termos que podem ser conhecidas por um leitor da área biológica, mas tendo contato a primeira vez com Biofilmes e outra imagem apresentando um conteúdo mais simples, direcionada a leitores leigos. Essas imagens buscam tornar visual as etapas de um biofilme e a sinalização envolvida em cada uma delas (Emmanuel, N.F.G., Biomédico).



Figura 8 – Sinalização celular envolvida no ciclo de biofilmes bacterianos



Nota—Elaborado pelo autor com auxílio do Gemini Notebook (2026). *Prompt* utilizado: [Gemini, crie por favor uma imagem com as seguintes especificações: Estilo: Ilustração infográfica científica, limpa e moderna, paleta em azuis, roxo, laranja e verde neon sobre fundo aquoso; Composição: Diagrama sequencial em 3 painéis (A, B, C) mostrando o ciclo de vida do biofilme bacteriano ao longo do tempo. Painel A (INÍCIO): Bactéria planctônica aderindo a uma superfície. Destacar molécula $c\text{-di-GMP}$ em vermelho (alta concentração) e início da secreção de matriz (MEP/*pili*). Flagelo travado. Painel B (MANUTENÇÃO): Biofilme 3D maduro. Esferas brilhantes de autoindutores (*Quorum Sensing*), matriz EPS complexa, gradiente de O_2 e nutrientes (alto no topo, baixo na base) e células escuras no centro. Painel C (DESPRENDIMENTO): Matriz se quebrando por tesouras/enzimas dispersivas (amarelas). Baixo $c\text{-di-GMP}$ (via PDE), gatilhos de estresse/fome e bactérias flageladas se libertando].

Como mencionado anteriormente, em razão do viés clínico atribuído ao biofilme, *P. aeruginosa* e *Candida albicans* são os microrganismos modelo para a compreensão do tema (Figura 9). O discente Andrwey Viana se munuiu dessa informação, criando um material



didático em que os microrganismos foram antropomorfizados, visando atrair a atenção, ao mesmo tempo que sugere uma imagem inofensiva dos microrganismos como são esses seres na sua maioria:

A ilustração foi criada para apresentar *Candida albicans* e *Pseudomonas aeruginosa* de forma lúdica e acessível. Os microrganismos foram transformados nas personagens Dona Candida e Pseudo Mona, destacando, de maneira simples, sua importância como modelos no estudo dos biofilmes. Com isso, ciência e criatividade foram combinadas para facilitar o aprendizado e despertar a curiosidade (Viana, A.A.G., Biotecnologista).

Figura 9 – Representação dos organismos modelos para o estudo de biofilmes





Nota – Elaborado pelo autor com auxílio do ChatGPT (2026). *Prompt* utilizado: [entre os microrganismos mais empregados como modelos para o estudo de biofilmes destacam-se a bactéria Gram-negativa **Pseudomonas aeruginosa** e o fungo **Candida albicans**. **P. aeruginosa** é um dos organismos-modelo mais consolidados da microbiologia, amplamente utilizado para investigar adesão celular, produção de matriz extracelular, quorum sensing, sinalização por c-di-GMP, resistência a antimicrobianos e transição entre os modos planctônico e sésil (Qin et al., 2022; Letizia, Diggle & Whiteley, 2025), o que a torna útil para compreender os princípios gerais da formação de biofilmes bacterianos. **C. albicans**, por sua vez, é um importante modelo para biofilmes fúngicos, dada sua plasticidade morfológica, alternância entre levedura, pseudo-hifas e hifas, diretamente ligada à adesão, ao desenvolvimento e à maturação do biofilme (Kumar & Kumar, 2024), processo que envolve vias regulatórias como Rho1-PKC-MAPK (Pang et al., 2025). A relevância dessas espécies vai além do estudo isolado, já que ambas podem coexistir e interagir de forma inter-reino, alterando a arquitetura, o metabolismo, a virulência e a susceptibilidade a antimicrobianos das comunidades mistas (Kahl et al., 2023). Estudos recentes mostram ainda que a ordem de colonização entre as duas espécies influencia a composição desses biofilmes mistos, destacando os chamados efeitos de prioridade (Arévalo-Jaimes, Admella & Torrents, 2025). Assim, a ampla caracterização genética e fisiológica e a facilidade de manipulação experimental fazem de **P. aeruginosa** e **C. albicans** modelos essenciais tanto para os princípios básicos da formação de biofilmes quanto para a compreensão das interações em comunidades polimicrobianas. Chat baseado nesse texto, poderia criar um desenho para utilização de caráter informativo, para escolas de ensino fundamental, sobre esses organismos modelos, podendo criar personagens como a Dona Candida, uma candida com característica de senhorinha, e sua amiga a Pseudo Mona, que não é a Monalisa, é a aeruginosa, dando destaque apenas para a sua função, de forma simples, como modelo e como ajudam a ciência].

Acompanhando a ideia anterior, isto é, microrganismos são seres muito mais inofensivos que patógenos, a discente Maria Eduarda da Silva idealizou uma forma simplificada de apresentar o papel positivo do biofilme microbiano em diferentes ambientes (Figura 10):

A proposta da imagem foi ilustrar de forma clara quais os benefícios dos biofilmes para diversos nichos. A primeira imagem gerada pela IA continha os elementos e textos necessários, porém com poluição visual, o que poderia reduzir o interesse do leitor em explorar o assunto. Diante disso, foi proposto que a IA realizasse uma nova figura contendo as informações baseadas em artigos pré-selecionados e com menos poluição visual. Outrossim, a imagem foi desenvolvida a fim de contemplar os benefícios em diversos ambientes, utilizando figuras que os representassem. Logo, a figura é capaz de despertar o interesse do público geral e ser compreendida por diversos indivíduos (Silva, M.E.N.P., Biomédica)





Figura 10 – Benefícios dos biofilmes na abordagem “uma só saúde”



Nota – Elaborado pela autora com auxílio do Gemini Notebook (2026). *Prompt* utilizado: [Faça um desenho que explique os benefícios dos biofilmes num conceito “uma só saúde”. Utilize fontes dos artigos enviados para obter as informações. Eu preciso de uma figura que ilustre para leigos e curiosos do que trata o tema e que não seja poluída visualmente].

Já para a discente Noêmia Lucena coube apresentar o lado negativo da colonização de biofilmes (Figura 11). Ressalta-se o fato de que o “negativo” muitas vezes está associado à saúde e perdas econômicas e não porque são organismos impiedosos, visto que a degradação faz parte do ciclo de transformação necessário ao equilíbrio do planeta. Sobre a idealização da imagem, a aluna optou por apresentar seu tema de Mestrado:

Quando pensei na elaboração da ilustração, pedi que se transformasse um tema científico complexo que é o crescimento de biofilmes e suas consequências para diferentes materiais em uma representação visual que pudesse ser compreendida por crianças de aproximadamente oito anos. Pedi que tivesse um personagem, representado por um fungo simpático e curioso, pra ser um mediador entre a ciência e o universo infantil. A ideia foi mostrar que os fungos não são só “vilões”, mas organismos que fazem parte da natureza e que, em determinadas condições, podem colonizar superfícies e contribuir para processos de deterioração. De maneira simplificada, a sequência visual representa as etapas de chegada dos microrganismos à superfície, adesão, crescimento e formação de uma camada protetora semelhante a uma “casa” ou “escudo”, facilitando a compreensão do conceito de biofilme. Os diferentes materiais apresentados: papel, filmes de acetato, fitas VHS, disquetes, plásticos, vidros, metais e madeira foram escolhidos para demonstrar que os efeitos dessa colonização microbiana podem variar conforme as características do substrato.



As manchas, alterações de cor, fragilização, corrosão, perda de informação e deterioração estrutural simbolizam diferentes formas de biodeterioração. A intenção principal é tornar lúdico o estudo da microbiologia por meio dos desenhos, mostrando que organismos microscópicos podem produzir efeitos que são observados a olho nu (Lucena, N.V., Biomédica).

Figura 11 – Alguns danos materiais causados por colonização de biofilmes



Nota – Elaborado pela autora com auxílio do Chat GTP (2026). *Prompt* utilizado: [quero uma animação legal e de fácil compreensão sobre “desvantagens do crescimento de biofilmes em diferentes materiais”. Faço mestrado em biologia molecular e minha tese é sobre fungos. Dentro desse tema agora estou elaborando um trabalho sobre essas desvantagens para apresentar a turminha de minha menina de 8 anos. Quero um personagem simpático e curioso para mediar essa conversa entre o universo infantil e a ciência. Quero uma história que incluía vilões e mocinhos, colorida e bastante lúdica].

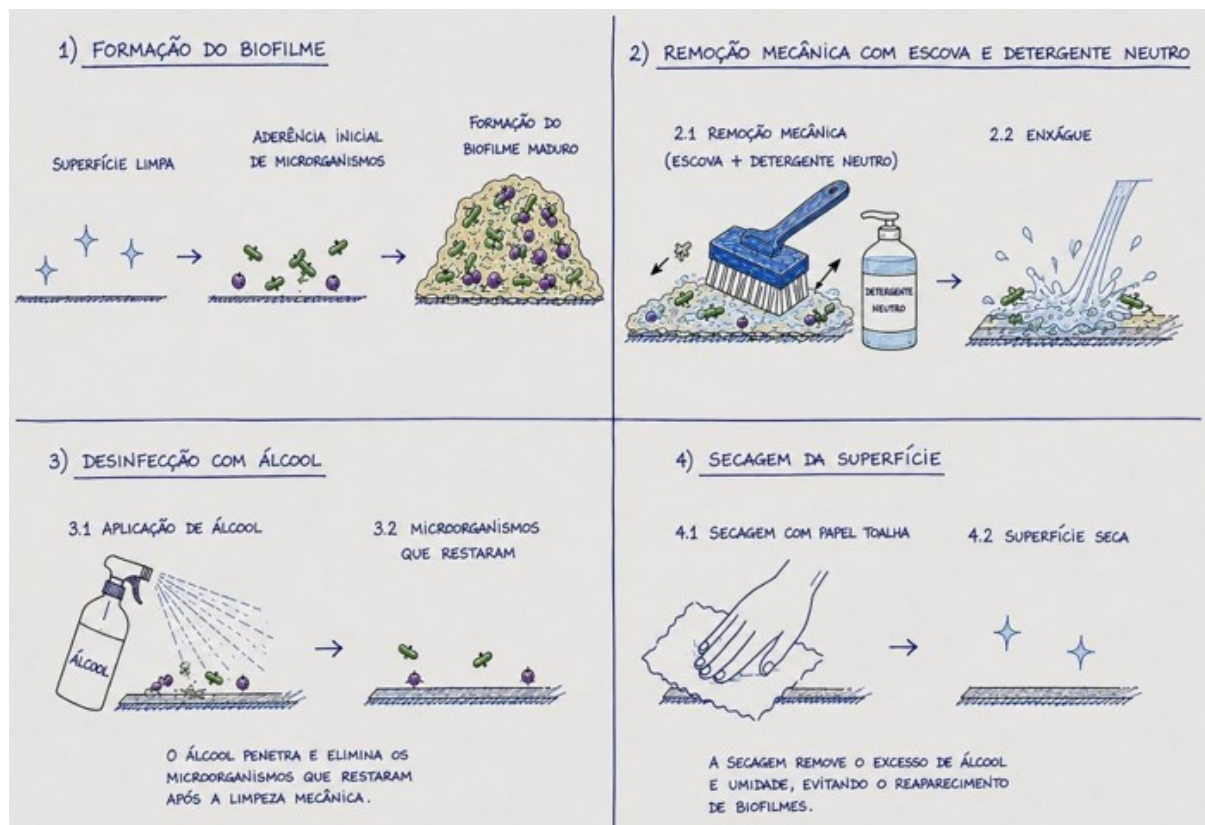
Embora resistentes, os biofilmes não são indestrutíveis e coube ao discente Samuel Leite apresentar operações cotidianas que contribuam para a erradicação de biofilmes pré-formados ou maduros (Figura 12). O seu processo de criação foi assim descrito:

Como sei que, sem um comando eficaz, a IA pode desenvolver um dado (nesse caso uma imagem) não exato, realizei as seguintes ações: 1. Anexei o DOI



de 3 referências sobre biofilmes; 2. Fiz uma imagem manuscrita, indicando os quadrantes e a sequência de uma forma de eliminação dos biofilmes; e 3. Anexei uma fotografia dessa imagem e enviei em sequência o comando para a IA transformar o desenho (Leite, S.E.M., Biomédico)

Figura 12 – Métodos domésticos de eliminação de biofilmes



Nota – Elaborado pela autora com auxílio do Chat GTP (2026). *Prompt* utilizado: [transforme esse desenho em uma imagem, mantendo a composição, sequência das etapas, posições do desenho original;] “Preserve a lógica visual do desenho feito à mão. Não adicione etapas, objetos ou conceitos que não estejam presentes no desenho. Não altere a sequência experimental.”].

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A experiência mostrou que dificuldades de abstração, particularmente na compreensão do microcosmo, podem ser minimizadas por soluções tecnológicas simples, acessíveis e disponíveis, capazes de converter ideias complexas, em formas visuais próximas da realidade do estudante. As ferramentas de IA generativa mostram-se versáteis na construção de



representações visuais contextualizadas, que exigem e, simultaneamente, promovem o letramento. Fica evidenciado que não há uma fórmula única para a construção de *prompts*. Seja partindo de comandos simples e/ou lúdicos, seja de descrições mais elaboradas, ajustadas aos objetivos e ao público-alvo, foi possível gerar materiais didáticos por meio de recursos criativos e de fácil compreensão. Isto reflete o poder da IA como uma ferramenta aliada para a democratização do conhecimento. Contudo, seu uso deve ocorrer de maneira ética e transparente, com a devida informação sobre o emprego dessas ferramentas, acompanhada da validação e da revisão crítica do conteúdo produzido. Por fim, a avaliação da efetiva superação das tradicionais dificuldades de abstração no ensino de temas complexos como biofilmes bacterianos deverá constituir o próximo caminho a ser investigado.

AVISO LEGAL

Os autores são alunos e alunas dos Programas de Pós-Graduação em Meio Ambiente e Desenvolvimento (autor 1) e Biologia Celular e Molecular (autores 2 a 12). Baseado nas diretrizes estabelecidas pela Portaria CNPq nº 2.664/2026, todos os autores e autoras declaram que durante a realização deste material foram utilizadas as seguintes ferramentas de IA Generativa: ChatGPT®/OpenAI® (versões GPT-4o e GPT5.6 Sol); ChatGTP® (ChatGPT Imagens 2.0); Gemini™/Google® (versão Gemini 3.6 Flash), Google®/Gemini™ (Gemini Notebook); e Leonardo.Ai™. Os acessos ocorreram entre os dias 14 de julho e 17 de agosto de 2026, com finalidade de gerar uma representação visual didática do tema referente aos conceitos sobre biofilmes microbianos. Em complemento, todos os autores e autoras afirmam que o conteúdo gerado e refinado com o auxílio da ferramenta de IA foi por cada um ou uma, validado e criticamente revisado em sua íntegra, sendo assumido pelo ou pela estudante, inteira responsabilidade pela veracidade, exatidão e originalidade de todas as informações, dados e conclusões apresentadas no material final.





REFERÊNCIAS

ALPI, S.V.; QUICENO, J.M.; URREGO, Y.A.; ACOSTA, C.A.G.; BERNAL, S. Actitudes sobre las enfermedades infecciosas y contagiosas en población colombiana. *Gaceta Médica de Caracas*, v. 131, n. 3, p. 3378-3387, 2023. <https://doi.org/10.47307/GMC.2023.131.n3.14>

ARÉVALO-JAIMES, B.V.; ADMELLA, J.; TORRENTS, E. Who arrived first? Priority effects on *Candida albicans* and *Pseudomonas aeruginosa* dual biofilms. *Communications Biology*, v. 8, e160, 2025. <https://doi.org/10.1038/s42003-025-07609-8>

AZAMBUJA, C.C.; SILVA, G.F. Novos desafios para a educação na Era da Inteligência Artificial. *Filosofia Unisinos*, v. 25, n. 1, e25107, 2024. <https://doi.org/10.4013/fsu.2024.251.07>

CHEVALLARD, Y. La transposición didáctica. 1ª ed. Buenos Aires: Aique Grupo Editor, 2005, 196p.

COSTERTON, J.W.; STEWART, P.S.; GREENBERG, E.P. Bacterial biofilms: a common cause of persistent infections. *Science*, v. 284, n. 5418, p. 1318-1322, 1999. <https://doi.org/10.1126/science.284.5418.1318>

COSTERTON, W.J.; WILSON, M. Introducing biofilms. *Biofilms*, v. 1, n. 1, p. 1-4, 2004. <https://doi.org/10.1017/S1479050504001164>

CUTRIM, N.C.; MAGALHÃES, D.; COSTA, M.J.M. Inteligência artificial e seus debates éticos. *Revista de Estudos Multidisciplinares*, v. 3, n. 2, p. 1-14, 2023.

DONLAN, R.M. Biofilms: microbial life on surfaces. *Emerging Infectious Diseases*, v. 8, n. 9, p. 881-890, 2002. <https://doi.org/10.3201/eid0809.020063>

FIGUEREDO, L.O.; LOPES, A.M.Z.; VALIDÓRIO, V.C.; MUSSIO, S.C. Desafios e impactos do uso de Inteligência Artificial na educação. *Revista Educação Online*, v. 18, n. 44, e18234408, 2023. <https://doi.org/10.36556/eol.v18i44.1506>

FLEMMING, H-C.; WINGENDER, J. The biofilm matrix. *Nature Reviews Microbiology*, v. 8, n. 9, p. 623-633, 2010. <https://doi.org/10.1038/nrmicro2415>





FLEMMING, H-C.; WINGENDER, J.; SZEWZYK, U.; STEINBERG, P.; RICE, S.A.; KJELLEBERG. Biofilms: an emergent form of bacterial life. *Nature Reviews Microbiology*, v. 14, n. 9, p. 563-575, 2016. <https://doi.org/10.1038/nrmicro.2016.94>

HALL-STOODLEY, L.; COSTERTON, J.W.; STOODLEY, P. Bacterial biofilms: from the natural environment to infectious diseases. *Nature Reviews Microbiology*, v. 2, n. 2, p. 95-108, 2004. <https://doi.org/10.1038/nrmicro821>

HENGGE, R. Principles of c-di-GMP signalling in bacteria. *Nature Reviews Microbiology*, v. 7, n. 4, p. 263-273, 2009. <https://doi.org/10.1038/nrmicro2109>

HØIBY, N. A personal history of research on microbial biofilms and biofilm infections. *Pathogens and Disease*, v. 70, n. 3, p. 205-211, 2014. <https://doi.org/10.1111/2049-632X.12165>

HØIBY, N.; CIOFU, O. Biofilm infections: a historical perspective. *Romanian Archives of Microbiology & Immunology*, v. 77, n. 3, p. 229, 2018.

JAMAL, M.; AHMAD, W.; ANDLEEB, S.; JALIL, F.; IMRAN, M.; NAWAZ, M.A.; HUSSAIN, T.; ALI, M.; RAFIQ, M.; KAMIL, M.A. Bacterial biofilm and associated infections. *Journal of the Chinese Medical Association*, v. 81, n. 1, p. 7-11, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jcma.2017.07.012>

KAHL, L.J.; STREMMEL, N.; ESPARZA-MORA, M.A.; WHEATLEY, R.M.; MACLEAN, R.C.; RALSER, M. Interkingdom interactions between *Pseudomonas aeruginosa* and *Candida albicans* affect clinical outcomes and antimicrobial responses. *Current Opinion in Microbiology*, v. 75, e102368, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.mib.2023.102368>

KUMAR, D.; KUMAR, A. Molecular determinants involved in *Candida albicans* biofilm formation and regulation. *Molecular Biotechnology*, v. 66, n. 7, p. 1640–1659, 2024. <https://doi.org/10.1007/s12033-023-00796-x>

LAMB, C.L. Ética em IA e IA ética: prolegômenos e estudo de casos significativos. *Revista USP*, n. 141, p. 107-120, 2024. <https://doi.org/10.11606/issn.2316-9036.i141p107-120>





LAPPIN-SCOTT, H.; BURTON, S.; STOODLEY, P. aRevealing world of biofilms – the pioneering research of Bill Costeton. *Nature Reviews Microbiology*, v. 12, p. 781-787, 2014. <https://doi.org/10.1038/nrmicro3343>

LETIZIA, M.; DIGGLE, S.P.; WHITELEY, M. *Pseudomonas aeruginosa*: ecology, evolution, pathogenesis and antimicrobial susceptibility. *Nature Reviews Microbiology*, v. 23, p. 701–717, 2025. <https://doi.org/10.1038/s41579-025-01193-8>

MEDEIROS, L.P.; SCADORIEIRO, S.; KIMURA, A.H.; MARQUES, L.A.; GONÇALVES, G.D.; ARANOME, A.M.F.; NAKAZATO, G.; MOREY, A.T.; KOBAYASHI, R.K.T. Reconhecendo a Microbiologia no nosso dia a dia pelo método PBL por estudantes do ensino médio. *Luminária*, v. 19, n. 1, e1570, 2017. <https://doi.org/10.33871/23594373.2017.19.01.1570>

MUKHI, M.; VISHWANATHAN, A.S. Beneficial biofilms: A minireview of strategies to enhance biofilm formation for biotechnological applications. *Applied and Industrial Microbiology*, v. 88, n. 3, e01994-21, 2022. <https://doi.org/10.1128/AEM.01994-21>

NUNES, M.A.S.; MERCADO, L.P.L. Impacto da Inteligência Artificial na educação básica: equidade e desafios. *Revista Docência e Ciberultura*, v. 9, n. 1, p. 1-19, 2025. <https://doi.org/10.12957/redoc.2025.83188>

OLIVEIRA, R.B.; PINHEIRO, A.L.; SILVA, L.J.; SILVA, K.F.; SVIDZINSKI, L.; FERREIRA, J.; CARVALHO, E.P.; CAVALCANTE, A.M.L.; PEREIRA, D.M.; CARVALHO, M.C.R.; SANTOS, A.V.O.S.; HICKMANN, F.R. Inteligência Artificial na educação básica: entre a democratização do conhecimento e a ampliação das desigualdades educacionais. *Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação*, v. 12, n. 7, e29165, 2026. <https://doi.org/10.51891/rease.v12i7.29165>

PANG, L.M.; ZENG, G.; CHOW, E.W.L.; XU, X.; LI, N.; KOK, Y.J.; CHONG, S.C.; BI, X.; GAO, J.; SENEVIRATNE, C.J.; WANG, Y. Sdd3 regulates the biofilm formation of *Candida albicans* via the Rho1-PKC-MAPK pathway. *mBio*, v. 16, n. 2, e03283-24, 2025. <https://doi.org/10.1128/mbio.03283-24>

SANTOS, A.L.S.; GALDINO, A.C.M.; MELLO, T.P.; RAMOS, L.S.; BRANQUINHA, M.H.; BOLOGNESE, A.M.; COLUMBANO NETO, J.; ROUDBARY, M. What are the ad-





vantagens of living in a community? A microbial biofilm perspective! *Memórias do Instituto Oswaldo Cruz*, v. 113, n. 9, e180212, 2018. <https://doi.org/10.1590/0074-02760180212>

SANTOS, J.; GERALDO, A.R. O uso de atividades investigativas e Inteligência Artificial no ensino de modelos atômicos: uma abordagem ativa para a aprendizagem em química. *Physicae Organum*, v. 10, n. 2, e57834, 2025. <https://doi.org/10.26512/244-564X2025e57834>

SILVA, D.S.; KAMPFF, A.J.C. A inteligência artificial generativa como ferramenta educativa: perspectivas futuras e lições de um relato de experiência. *Tecnologias, Sociedade e Conhecimento*, v. 10, n. 2, p 102-123, 2023. <https://doi.org/10.20396/tsc.v10i2.18364>

SOUZA, P.F.; AZEVEDO, T.M.; SODRÉ, L.N. Microbiologia no ensino médio: a visão dos estudantes sobre o tema e as possíveis causas de dificuldades de aprendizagem. *Ensino de Ciências e Tecnologia em Revista*, v. 5, p. 48-61, 2015.

UGWU, C.N.; EZEIBE, E.N.; EMENCHETA, S.C.; NWAGWU, C.S.; OGBONNA, K.O.; EJIOFOR, C.V.; ONUGWU, A.L.; BEREBO, D.P.; ATTAMA, A.A. Biofilms: structure, resistance mechanism, emerging control strategies, and applications. *RSC Pharmaceutics*, v. 2, n. 6, p. 1376-1407, 2025. <https://doi.org/10.1039/d5pm00094g>

WANG, S.; ZHAO, Y.; BRESLAWEK, A.P.; LIANG, T.; DENG, Z.; KUPERMAN, L.L.; YU, Q. Strategy to combat biofilms: a focus on biofilm dispersal enzymes. *NPJ Biofilms Microbiomes*, v. 9, p. 63, 2023. <https://doi.org/10.1038/s41522-023-00427-y>

YIN, W.; WANG, Y.; LIU, L.; HE, J. Biofilms: The microbial “protective clothing” in extreme environments. *International Journal of Molecular Sciences*, v. 20, n. 14, e3423, 2019. <https://doi.org/10.3390/ijms20143423>

ZHAO, A.; SUN, J.; LIU, Y. Understanding bacterial biofilms: From definition to treatment strategies. *Frontiers in Cellular and Infection Microbiology*, v. 13, e1137947, 2023. <https://doi.org/10.3389/fcimb.2023.1137947>

Recebido em: 27/07/2026

Aprovado em: 14/08/2026

Publicado em: 01/09/2026

