




**MICROBIOLOGIA FORENSE: A RELEVÂNCIA DAS ANÁLISES
MICROBIOLÓGICAS NAS INVESTIGAÇÕES CRIMINAIS**

**FORENSIC MICROBIOLOGY: THE RELEVANCE OF MICROBIOLOGICAL
ANALYSES IN CRIMINAL INVESTIGATIONS**

**MICROBIOLOGÍA FORENSE: LA RELEVANCIA DE LOS ANÁLISIS
MICROBIOLÓGICOS EN LAS INVESTIGACIONES CRIMINALES**

 <https://doi.org/10.56238/levv16n54-127>

Data de submissão: 24/10/2025

Data de publicação: 24/11/2025

Lene Melo da Silva

Graduanda em Biomedicina

Instituição: Centro Universitário: FAMETRO

E-mail: Lenemelodasilva15@gmail.com

Gabriel de Oliveira Rezende

Mestre em Biotecnologia e Recursos Naturais

Instituição: Centro Universitário: FAMETRO

E-mail: Gabriel.rezende@fametro.edu.br

RESUMO

A microbiologia forense representa um campo emergente das ciências forenses, utilizando microrganismos como ferramenta para a elucidação de crimes. Apesar de seu potencial, sua aplicação ainda é limitada, levantando a problemática sobre a real relevância e a efetividade de sua contribuição para a resolução de casos. O objetivo deste estudo foi analisar a relevância das análises microbiológicas em investigações criminais, destacando suas aplicações, contribuições e desafios. Trata-se de uma revisão de literatura descritiva e qualitativa, realizada por meio de levantamento bibliográfico em bases de dados como PubMed, Scopus e SciELO, com artigos publicados entre 2000 e 2025. Como resultados, a literatura demonstrou que a sucessão microbiana pós-morte funciona como um "relógio microbiano" para estimar o intervalo pós-morte (IPM) e que o microbioma humano atua como uma assinatura individual, associando suspeitos a locais e vítimas. Técnicas moleculares como PCR e NGS foram identificadas como essenciais para caracterizar perfis microbianos em cenários de homicídio, crimes sexuais e bioterrorismo. Foram apontados desafios críticos, incluindo a falta de protocolos padronizados, o risco de contaminação, a necessidade de bancos de dados robustos e a complexidade na interpretação dos dados para sua validação jurídica. Portanto, as análises microbiológicas são ferramentas de alta relevância, fornecendo dados robustos para estimar o intervalo pós-morte, identificar locais de crime e associar suspeitos, complementando as perícias tradicionais.

Palavras-chave: Decomposição Cadavérica. Intervalo Pós-morte. Microbioma Humano. Biologia Molecular. Bioinformática.

ABSTRACT

Forensic microbiology represents an emerging field in the forensic sciences, using microorganisms as a tool for crime elucidation. Despite its potential, its application is still limited, raising the issue of its actual relevance and the effectiveness of its contribution to case resolution. The objective of this study was to analyze the relevance of microbiological analyses in criminal investigations, highlighting their applications, contributions, and challenges. This is a descriptive and qualitative literature review, conducted through a bibliographic survey in databases such as PubMed, Scopus, and SciELO, with articles published between 2000 and 2025. As for the results, the literature demonstrated that post-mortem microbial succession functions as a "microbial clock" to estimate the post-mortem interval (PMI) and that the human microbiome acts as an individual signature, associating suspects with locations and victims. Molecular techniques such as PCR and NGS were identified as essential for characterizing microbial profiles in scenarios of homicide, sexual crimes, and bioterrorism. Critical challenges were identified, including the lack of standardized protocols, the risk of contamination, the need for robust databases, and the complexity of data interpretation for its legal validation. Therefore, microbiological analyses are highly relevant tools, providing robust data to estimate the post-mortem interval, identify crime scenes, and associate suspects, complementing traditional forensic analyses.

Keywords: Cadaveric Decomposition. Post-mortem Interval. Human Microbiome. Molecular Biology. Bioinformatics.

RESUMEN

La microbiología forense representa un campo emergente de la ciencia forense, que utiliza microorganismos como herramienta para la resolución de crímenes. A pesar de su potencial, su aplicación aún es limitada, lo que plantea interrogantes sobre la relevancia y eficacia reales de su contribución a la resolución de casos. El objetivo de este estudio fue analizar la relevancia de los análisis microbiológicos en las investigaciones criminales, destacando sus aplicaciones, contribuciones y desafíos. Se trata de una revisión bibliográfica descriptiva y cualitativa, realizada mediante un estudio bibliográfico en bases de datos como PubMed, Scopus y SciELO, con artículos publicados entre 2000 y 2025. Como resultado, la literatura demostró que la sucesión microbiana post mortem funciona como un "reloj microbiano" para estimar el intervalo post mortem (IPM) y que el microbioma humano actúa como una firma individual, asociando a los sospechosos con ubicaciones y víctimas. Técnicas moleculares como la PCR y la NGS se han identificado como esenciales para la caracterización de perfiles microbianos en escenarios de homicidio, delitos sexuales y bioterrorismo. Se han identificado desafíos críticos, como la falta de protocolos estandarizados, el riesgo de contaminación, la necesidad de bases de datos robustas y la complejidad de la interpretación de los datos para su validación legal. Por lo tanto, los análisis microbiológicos son herramientas de gran relevancia, que proporcionan datos robustos para estimar el intervalo post mortem, identificar escenas del crimen y asociar sospechosos, complementando así los exámenes forenses tradicionales.

Palabras clave: Descomposición Cadáver. Intervalo Post Mortem. Microbioma Humano. Biología Molecular. Bioinformática.

1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento das análises microbiológicas está diretamente relacionado à consolidação da microbiologia como ciência. Os primeiros registros de observação de microrganismos ocorreram no século XVII, quando Antonie van Leeuwenhoek, por meio de microscópios artesanais, descreveu a presença de “animálculos”, atualmente reconhecidos como bactérias e protozoários (RESENDE et al., 2021). Esse marco inicial permitiu a compreensão da existência de formas de vida invisíveis a olho nu, estabelecendo as bases para os estudos posteriores.

No século XIX, os trabalhos de Louis Pasteur e Robert Koch foram determinantes para o avanço da microbiologia aplicada. Pasteur demonstrou a relação entre microrganismos, fermentação e deterioração, além de refutar a teoria da geração espontânea, enquanto Koch estabeleceu os postulados que relacionavam agentes microbianos a doenças infecciosas (TORTORA; FUNKE; CASE, 2017). Esses estudos impulsionaram o desenvolvimento de métodos clássicos de análise microbiológica, como o cultivo em meios de cultura, a técnica de coloração de Gram e os testes de pureza microbiológica.

No início do século XX, as análises microbiológicas passaram a ser aplicadas sistematicamente em áreas como saúde pública, alimentos e indústria farmacêutica. Instituições internacionais, como a American Public Health Association (APHA), começaram a padronizar metodologias de análise, especialmente para a avaliação da qualidade da água e dos alimentos (SILVA et al., 1997). A padronização foi essencial para garantir a reprodutibilidade e a confiabilidade dos resultados em diferentes contextos.

Com o advento da biologia molecular, nas décadas de 1970 e 1980, houve um salto qualitativo nas análises microbiológicas. Métodos como a reação em cadeia da polimerase (PCR) e técnicas de hibridização de ácidos nucleicos permitiram maior sensibilidade e rapidez na detecção de microrganismos (MULLIS; FALOONA, 1987). Nos últimos anos, tecnologias avançadas, como a espectrometria de massas por dessorção/ionização a laser assistida por matriz (MALDI-TOF) e o sequenciamento de nova geração (NGS), ampliaram a capacidade de identificação microbiana, inclusive sem a necessidade de cultivo (TURNBAUGH et al., 2007).

Atualmente, as análises microbiológicas representam uma ferramenta indispensável em diferentes campos, incluindo a medicina, a vigilância epidemiológica, a indústria de alimentos, o monitoramento ambiental e, mais recentemente, as ciências forenses, onde a caracterização de perfis microbianos tem se mostrado relevante em investigações criminais (PEREIRA et al., 2023). Essa área estuda microrganismos presentes em amostras biológicas, ambientais ou de objetos de cena de crime, buscando identificar padrões microbianos que possam fornecer informações relevantes à investigação.

As análises microbiológicas vêm ganhando destaque não apenas em casos de bioterrorismo e crimes envolvendo agentes biológicos, mas também em situações mais comuns, como a determinação

do tempo de morte, a identificação de locais de sepultamento clandestino, a análise de fluidos corporais e a associação de suspeitos a cenas de crime. Nesse sentido, a aplicação da microbiologia forense representa uma importante ferramenta complementar aos métodos tradicionais, como a análise genética e a toxicologia, ampliando a capacidade de reconstruir eventos criminais.

Apesar de seu potencial, a microbiologia forense ainda é uma área pouco explorada e de aplicação limitada em muitos países, incluindo o Brasil, devido a fatores como a carência de protocolos padronizados, a escassez de laboratórios especializados e a necessidade de validação científica de determinados métodos. Surge, assim, a seguinte questão: qual é a real relevância das análises microbiológicas nas investigações criminais e de que forma sua aplicação pode contribuir de maneira efetiva para a resolução de casos forenses?

2 OBJETIVOS

2.1 GERAL

- ✓ Analisar a relevância das análises microbiológicas nas investigações criminais, destacando suas aplicações, contribuições e desafios no campo da ciência forense

2.2 ESPECÍFICOS

- ✓ Descrever os principais fundamentos da microbiologia forense e suas áreas de aplicação;
- ✓ Identificar as técnicas microbiológicas utilizadas em investigações criminais e suas potencialidades;
- ✓ Explorar a utilização de técnicas modernas de biologia molecular (ex.: PCR, sequenciamento de nova geração) aplicadas à microbiologia forense.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 TIPO DE ESTUDO

O estudo trata-se de uma revisão da literatura, de caráter descritivo e qualitativo. Esse tipo de estudo consiste em reunir, analisar e discutir publicações científicas já existentes sobre o tema, permitindo uma visão ampla e crítica acerca do estado atual da microbiologia forense.

3.2 BASE DE DADOS CONSULTADAS

As fontes de consulta para a elaboração deste estudo incluíram bases de dados nacionais e internacionais de relevância científica. Entre as principais fontes utilizadas estão o PubMed/MEDLINE, especializado em ciências biomédicas e da saúde; a Scopus, base multidisciplinar que reúne periódicos de alto impacto; e a ScienceDirect, com publicações voltadas para microbiologia, biotecnologia e ciências forenses. Além disso, foram consultados artigos da SciELO (Scientific Electronic Library

Online), importante para o acesso à produção científica da América Latina, e o Google Acadêmico, utilizado de forma complementar para a identificação de trabalhos acadêmicos, livros e literatura cinzenta.

3.3 CRITÉRIOS DE INCLUSÃO

Foram considerados para inclusão neste estudo artigos científicos, livros e revisões publicados entre os anos de 2000 e 2025, com foco em microbiologia forense e suas aplicações em investigações criminais. Foram selecionados trabalhos publicados em português e inglês, que apresentassem informações detalhadas sobre técnicas microbiológicas, análise de microrganismos em cenas de crime, contribuição para a elucidação de casos forenses ou discussão sobre o desenvolvimento da área. Também foram incluídos estudos que abordassem a utilização de ferramentas moleculares, análise do microbioma humano ou ambiental e estudos de caso relevantes para a compreensão das aplicações práticas da microbiologia forense.

3.4 COLETA DE DADOS

A pesquisa será desenvolvida no período de fevereiro a novembro de 2025, mediante a levantamento de obras literárias previamente publicadas, com enfoque na análise crítica das concepções e ideologias apresentadas pelos autores, visando identificar contribuições teóricas relevantes para o tema investigado.

3.5 ANÁLISE DE DADOS

Os dados coletados serão organizados por temas centrais, como técnicas microbiológicas, aplicações em investigações criminais e estudos de caso. Em seguida, será realizada uma análise qualitativa, identificando padrões, convergências, divergências e lacunas na literatura, permitindo uma síntese crítica das contribuições da microbiologia forense.

4 REVISÃO DA LITERATURA

4.1 ASPECTOS MICROBIOLÓGICOS RELEVANTES

4.1.1 Principais grupos de microrganismos em contexto forense

No campo da microbiologia forense, diversos grupos de microrganismos têm se mostrado relevantes para a elucidação de investigações criminais e médico-legais. Entre eles, as bactérias são os organismos mais estudados, principalmente devido à sua atuação no processo de decomposição cadavérica. A sucessão microbiana que ocorre após a morte fornece informações importantes sobre o intervalo pós-morte (IPM), uma vez que diferentes espécies bacterianas proliferam em estágios específicos da putrefação. Além disso, a microbiota associada a fluidos biológicos, como sangue, saliva

e sêmen, pode ser utilizada para identificar a origem de vestígios e, em alguns casos, auxiliar na individualização de suspeitos (PEREIRA et al., 2023). Os fungos também desempenham papel relevante na investigação forense, especialmente em ambientes úmidos e em tecidos em decomposição. O crescimento fúngico pode indicar o tempo decorrido após a morte e as condições ambientais às quais o corpo foi exposto. Ademais, determinadas espécies produzem micotoxinas que, em situações específicas, podem estar relacionadas a casos de envenenamento, ampliando sua importância no contexto criminal (BARBOSA, 2012).

Os protozoários possuem menor aplicabilidade forense direta, mas podem estar associados a casos de morte decorrentes de infecções parasitárias, como as causadas por *Entamoeba histolytica*. Em determinadas situações, a presença de protozoários em vestígios biológicos pode fornecer informações acerca das condições higiênico-sanitárias ou ambientais relacionadas ao caso (PEREIRA et al., 2023).

Da mesma forma, os vírus apresentam importância em contextos específicos, como na determinação de causas de morte relacionadas a infecções virais ou em situações de transmissão intencional de patógenos. A detecção viral em fluidos corporais também pode contribuir para a reconstituição do histórico clínico da vítima (WEÇOSKI et al., 2023).

A análise do microbioma humano merece destaque no âmbito forense. Cada indivíduo possui um perfil microbiano característico, que pode ser identificado em diferentes superfícies do corpo e em objetos tocados. Essa “impressão digital microbiana” vem sendo explorada em investigações criminais para associar suspeitos a cenas de crime, diferenciar cadáveres em decomposição e refinar estimativas de intervalo pós-morte (PEREIRA et al., 2023).

Embora as bactérias e fungos constituam os grupos de microrganismos mais aplicados no contexto forense, protozoários e vírus também apresentam potencial relevante em investigações específicas. A tendência atual é a integração de diferentes comunidades microbianas por meio de técnicas de metagenômica e análise molecular, consolidando a microbiologia como uma ferramenta cada vez mais promissora nas ciências forenses.

4.1.2 O papel dos microrganismos na decomposição e no intervalo pós-morte

A decomposição cadavérica é um processo complexo que envolve transformações físico-químicas e biológicas do corpo após a morte, sendo amplamente influenciada pela ação de microrganismos. Logo após o óbito, a interrupção das funções vitais cria um ambiente propício para o crescimento microbiano. Os microrganismos que antes compunham a microbiota natural do corpo, principalmente do trato gastrointestinal, iniciam um processo de proliferação e disseminação para outros tecidos, marcando as fases iniciais da putrefação (DOGRA, 2020).

As bactérias anaeróbias intestinais, como espécies de *Clostridium* e *Bacteroides*, desempenham papel central na degradação de proteínas, lipídios e carboidratos, produzindo gases como metano,

hidrogênio sulfídrico e amônia, responsáveis pela distensão abdominal e odores característicos da decomposição. Paralelamente, a ação de fungos e leveduras em ambientes úmidos pode acelerar a degradação tecidual e contribuir para a sucessão microbiana (GOEBEL et al., 2013).

O estudo da sucessão microbiana pós-morte tem se consolidado como ferramenta promissora para a estimativa do intervalo pós-morte (IPM). Diferentes comunidades microbianas se estabelecem em momentos distintos da decomposição, permitindo correlacionar o perfil taxonômico encontrado com o tempo decorrido após o óbito. Assim, o chamado *microbial clock* (relógio microbiano) busca relacionar alterações na composição do microbioma cadavérico com estimativas temporais mais precisas (PEREIRA et al., 2023).

Além disso, fatores ambientais, como temperatura, umidade, oxigenação e exposição ao solo ou à água, influenciam diretamente a dinâmica microbiana. Em climas tropicais, por exemplo, a velocidade da atividade bacteriana tende a ser maior, reduzindo o tempo entre as fases da decomposição. Dessa forma, a compreensão das interações entre microrganismos e variáveis ambientais é fundamental para interpretações forenses mais confiáveis (WEÇOSKI et al., 2023).

Os microrganismos não apenas desempenham papel essencial no processo natural de decomposição, mas também representam marcadores biológicos valiosos para a estimativa do IPM. A integração de análises microbiológicas com técnicas tradicionais da tanatologia forense tem ampliado a precisão das investigações criminais, reforçando a relevância da microbiologia forense no campo científico e jurídico.

4.1.3 O microbioma humano como assinatura individual

O conceito de microbioma humano refere-se ao conjunto de microrganismos, incluindo bactérias, fungos e vírus, que habitam diferentes regiões do corpo, como pele, trato gastrointestinal, cavidade oral e geniturinário. Estudos recentes têm demonstrado que a composição microbiana de cada indivíduo é relativamente estável ao longo do tempo e suficientemente distinta para ser considerada uma assinatura biológica única (PEREIRA et al., 2023).

No contexto forense, o microbioma tem sido explorado como uma espécie de “impressão digital microbiana”, capaz de diferenciar indivíduos e de estabelecer vínculos entre pessoas, objetos e locais. Por exemplo, a microbiota cutânea transferida para superfícies tocadas pode permanecer detectável por horas ou até dias, fornecendo pistas importantes em investigações criminais. Da mesma forma, o microbioma bucal presente em marcas de mordida ou saliva pode auxiliar na identificação de suspeitos ou vítimas (RIBEIRO, 2020).

Outra aplicação promissora diz respeito ao estudo do microbioma cadavérico, que não apenas contribui para a estimativa do intervalo pós-morte, mas também pode ser usado para distinguir cadáveres em decomposição em ambientes coletivos, como desastres em massa. A singularidade do microbioma

humano, aliada a técnicas de metagenômica e bioinformática, amplia o potencial de individualização, funcionando como complemento a métodos tradicionais de identificação, como DNA nuclear e impressões digitais (WEÇOSKI et al., 2023).

A utilização do microbioma como assinatura individual enfrenta desafios relacionados à padronização de métodos de coleta, à influência de fatores ambientais e às variações regionais e dietéticas que modulam a composição microbiana. Apesar dessas limitações, a crescente robustez das técnicas de sequenciamento de nova geração (NGS) e das análises estatísticas têm consolidado o microbioma humano como uma ferramenta inovadora e complementar na ciência forense. O microbioma humano, entendido como assinatura individual, representa um campo emergente que alia avanços em microbiologia, genética e bioinformática, abrindo novas possibilidades para a identificação e associação de indivíduos em investigações criminais.

4.2 TÉCNICAS E MÉTODOS DE ANÁLISE MICROBIOLÓGICA

A investigação microbiológica no campo forense utiliza um conjunto de métodos clássicos e modernos que permitem identificar, caracterizar e interpretar a presença de microrganismos em diferentes tipos de vestígios biológicos. Entre as técnicas tradicionais a cultura microbiológica, a microscopia, as técnicas de biologia molecular: PCR, sequenciamento de nova geração (NGS) e metagenômica e a Bioinformática; se destacam como ferramentas fundamentais, frequentemente utilizadas em associação com metodologias moleculares contemporâneas.

4.2.1 Cultura microbiológica e microscopia

A cultura microbiológica constitui uma das abordagens mais antigas e amplamente utilizadas na microbiologia. Consiste no isolamento e crescimento de microrganismos em meios de cultura específicos, permitindo a observação de características fenotípicas como morfologia de colônia, produção de pigmentos, motilidade e padrões metabólicos. Em contexto forense, a cultura é relevante para a detecção de bactérias e fungos associados a processos de decomposição, envenenamentos microbianos e infecções letais. Além disso, possibilita a realização de testes de sensibilidade a antimicrobianos e análises bioquímicas complementares, que auxiliam na identificação de espécies (PEREIRA et al., 2023).

Já a microscopia desempenha papel crucial na observação direta de microrganismos e estruturas celulares. A microscopia óptica, por meio de colorações diferenciais como a de Gram ou a de Ziehl-Neelsen, permite a identificação preliminar de grupos bacterianos. A microscopia de fluorescência, utilizando sondas específicas, aumenta a sensibilidade na detecção de microrganismos em vestígios biológicos. Em análises mais avançadas, a microscopia eletrônica de varredura (MEV) e de transmissão (MET) possibilita a visualização de detalhes ultraestruturais, úteis na caracterização de biofilmes e na

investigação de microrganismos presentes em amostras ambientais associadas a cenas de crime (WEÇOSKI et al., 2023).

No âmbito forense, a integração da cultura microbiológica e da microscopia com técnicas moleculares, como a PCR (Reação em Cadeia da Polimerase) e o sequenciamento de nova geração (NGS), tem permitido resultados mais precisos e abrangentes. Os métodos clássicos fornecem informações fenotípicas e morfológicas e as técnicas moleculares oferecem maior sensibilidade, especificidade e acesso à diversidade microbiana não cultivável, consolidando uma abordagem complementar e multidisciplinar. Dessa forma, a cultura microbiológica e a microscopia permanecem métodos de grande relevância na microbiologia forense, funcionando não apenas como ferramentas básicas de identificação, mas também como ponto de partida para análises mais complexas que visam elucidar casos criminais e médico-legais.

4.2.2 Técnicas de biologia molecular: PCR, sequenciamento de nova geração (NGS), metagenômica

O avanço das técnicas de biologia molecular revolucionou a microbiologia forense, permitindo uma análise mais sensível, específica e abrangente da diversidade microbiana presente em amostras biológicas e ambientais. Métodos como a Reação em Cadeia da Polimerase (PCR), o sequenciamento de nova geração (NGS) e as abordagens metagenômicas têm sido amplamente utilizados para a identificação de microrganismos, estudo da sucessão microbiana pós-morte e caracterização do microbioma humano como ferramenta de investigação criminal.

A PCR (Polymerase Chain Reaction) é uma técnica baseada na amplificação seletiva de segmentos de DNA microbiano, permitindo a detecção de organismos mesmo em baixas concentrações. Na esfera forense, a PCR é aplicada para identificar bactérias, fungos e vírus em vestígios biológicos, além de auxiliar em casos de infecções associadas a mortes suspeitas. Variantes como a PCR em tempo real (qPCR) possibilitam a quantificação de microrganismos, oferecendo dados mais precisos sobre a abundância relativa de determinadas espécies em diferentes fases da decomposição (DE JESUS et al., 2024).

O sequenciamento de nova geração (NGS – Next Generation Sequencing) ampliou significativamente a capacidade de análise do material genético microbiano. Essa técnica permite sequenciar milhões de fragmentos de DNA de forma simultânea, proporcionando um panorama detalhado da comunidade microbiana presente em uma amostra. No contexto forense, o NGS tem sido aplicado na caracterização do microbioma cadavérico, contribuindo para a estimativa do intervalo pós-morte (IPM) por meio da identificação da sucessão microbiana em diferentes tecidos e ambientes (PEREIRA et al., 2023).

A metagenômica, por sua vez, consiste na análise direta do material genético total presente em uma amostra, sem a necessidade de cultivo prévio dos microrganismos. Essa abordagem é especialmente relevante no contexto forense, já que grande parte da diversidade microbiana é composta por organismos não cultiváveis em condições laboratoriais. A metagenômica possibilita a identificação taxonômica e funcional das comunidades microbianas, permitindo a detecção de genes associados a processos metabólicos específicos, como a degradação tecidual pós-morte, além de fornecer informações sobre as condições ambientais às quais o corpo esteve exposto (PEREIRA et al., 2023).

Em conjunto, essas técnicas oferecem uma perspectiva integrada e altamente informativa, superando as limitações dos métodos clássicos baseados em cultivo e microscopia. A aplicação da PCR, do NGS e da metagenômica na microbiologia forense tem fortalecido o uso do microbioma como marcador temporal e como assinatura individual, consolidando o papel da biologia molecular como eixo central das investigações criminais modernas.

4.2.3 Bioinformática aplicada

O desenvolvimento das técnicas de biologia molecular, como a PCR, o sequenciamento de nova geração (NGS) e a metagenômica, ampliou consideravelmente a quantidade e a complexidade dos dados produzidos em investigações microbiológicas. Nesse contexto, a bioinformática surge como ferramenta essencial para o tratamento, a interpretação e a integração desses dados, permitindo transformar informações genômicas brutas em conhecimento aplicável no campo forense.

A bioinformática aplicada à microbiologia forense envolve principalmente a análise de sequências genéticas obtidas a partir de comunidades microbianas presentes em amostras cadavéricas, ambientais ou associadas a vestígios biológicos. Por meio de softwares e bancos de dados especializados, é possível realizar a identificação taxonômica de microrganismos, caracterizar funções metabólicas, detectar genes de interesse (como os relacionados à decomposição ou à resistência antimicrobiana) e estabelecer perfis comparativos entre diferentes amostras (PEREIRA et al., 2023).

No estudo do intervalo pós-morte (IPM), a bioinformática é aplicada para analisar a sucessão microbiana com base em grandes volumes de dados de sequenciamento. Modelos estatísticos e algoritmos de aprendizado de máquina têm sido empregados para correlacionar padrões de mudança na comunidade microbiana com estimativas temporais, constituindo o chamado *microbial clock* (relógio microbiano) (PEREIRA et al., 2023).

Outra contribuição relevante da bioinformática é na análise do microbioma humano como assinatura individual. Ferramentas computacionais permitem comparar perfis microbianos de diferentes indivíduos, distinguindo-os a partir de sua composição específica de bactérias, fungos e vírus. Essa abordagem pode ser aplicada na associação de suspeitos a cenas de crime, na identificação de cadáveres em decomposição e até na diferenciação de amostras ambientais contaminadas (RIBEIRO, 2020).

As técnicas de metagenômica funcional e de análise de redes microbianas têm sido utilizadas para compreender interações entre microrganismos em ambientes forenses, identificando padrões ecológicos que auxiliam na reconstituição de circunstâncias relacionadas à morte ou à disposição do corpo.

A bioinformática consolidou-se como um eixo indispensável na microbiologia forense, atuando como elo entre os métodos experimentais de geração de dados moleculares e sua interpretação científica. A integração entre biologia molecular e bioinformática fortalece a capacidade de obtenção de informações robustas, reprodutíveis e aplicáveis a contextos investigativos e médico-legais.

4.3 APLICAÇÕES PRÁTICAS EM INVESTIGAÇÕES CRIMINAIS

A microbiologia forense tem se consolidado como uma ferramenta científica de grande relevância nas investigações criminais contemporâneas, especialmente em casos de homicídios e ocultação de cadáveres. Por meio da análise de comunidades microbianas associadas a corpos em decomposição e aos ambientes em que estes são encontrados, é possível obter informações precisas sobre o intervalo pós-morte, a localização do corpo e até mesmo reconstruir aspectos da cena do crime (PEREIRA et al., 2023).

4.3.1 Casos de homicídios e ocultação de cadáveres

Uma das principais aplicações da microbiologia forense em casos de homicídio consiste na estimativa do intervalo pós-morte. Após o óbito, ocorrem transformações bioquímicas e microbiológicas previsíveis, resultantes da decomposição dos tecidos e da proliferação de microrganismos. Estudos recentes demonstram que a análise da sucessão microbiana, identificada por meio de técnicas de sequenciamento genético e metagenômica, permite determinar, com elevada precisão, o tempo decorrido desde a morte (DE JESUS et al., 2024).

A identificação de padrões específicos de bactérias associadas às diferentes fases de decomposição corporal fornece uma alternativa mais objetiva em relação aos métodos clássicos, como a análise de rigidez cadavérica e temperatura corporal, especialmente em situações em que o corpo se encontra em avançado estado de putrefação.

Nos casos de ocultação de cadáveres, a microbiologia forense tem se mostrado eficaz na detecção de alterações químicas e biológicas no solo. A decomposição dos tecidos humanos libera compostos orgânicos e nutrientes que modificam a composição microbiana do ambiente, criando uma assinatura microbiológica específica (DE SOUZA BATISTA, 2024).

Essas modificações podem ser detectadas por meio de análises metagenômicas, que identificam o aumento de determinadas bactérias e fungos relacionados à decomposição. Assim, é possível inferir a presença de restos mortais em áreas de difícil acesso ou onde não há evidências visuais aparentes,

contribuindo para a localização de corpos ocultos de forma deliberada (DE SOUZA BATISTA, 2024).

A investigação microbiológica também pode auxiliar na determinação da causa da morte, principalmente quando há suspeita de infecções, intoxicações ou uso de agentes biológicos. Técnicas de biologia molecular, como a Reação em Cadeia da Polimerase (PCR) e o sequenciamento de nova geração, Next Generation Sequencing (NGS), permitem identificar microrganismos patogênicos presentes em amostras biológicas, revelando quadros de sepse ou envenenamento bacteriano (DE JESUS et al., 2024).

Além disso, a detecção de microrganismos exógenos em ferimentos ou fluidos corporais pode indicar manipulação do corpo após a morte, fornecendo elementos importantes para a reconstituição do crime.

A individualidade do microbioma humano, o conjunto de microrganismos que habitam o corpo de cada pessoa, tem sido explorada como um novo tipo de marcador biológico forense. Pesquisas indicam que o perfil microbiano de uma pessoa é relativamente estável e pode ser transferido para superfícies, roupas e objetos durante o contato físico (CARDOSO, 2015).

Dessa forma, a comparação entre as amostras microbianas coletadas de vítimas e suspeitos pode fornecer indícios de interação física, mesmo na ausência de vestígios clássicos, como DNA humano ou impressões digitais (PEREIRA et al., 2023). Essa abordagem é especialmente útil em casos de estrangulamento, transporte de cadáveres e violência física direta.

A análise conjunta de dados microbiológicos, entomológicos e químicos tem se mostrado fundamental para a reconstrução da dinâmica de homicídios. A comparação entre o microbioma do cadáver e do ambiente pode indicar se o corpo foi movido após a morte ou se ocorreu decomposição em múltiplos locais (DE SOUZA BATISTA, 2024). Assim, é possível identificar locais secundários de crime e ações de ocultação deliberada, auxiliando de forma decisiva na elucidação de casos complexos.

As aplicações práticas da microbiologia forense em investigações criminais representam um avanço expressivo no campo da ciência aplicada à justiça. As técnicas modernas, como PCR, NGS, metagenômica e bioinformática, proporcionam dados robustos e confiáveis, reduzindo a subjetividade das análises tradicionais e contribuindo para a resolução de crimes de difícil esclarecimento, como homicídios com ocultação de cadáver. O desenvolvimento contínuo dessas metodologias tende a ampliar a integração entre a biotecnologia e a investigação criminal, reforçando o caráter científico e interdisciplinar da perícia forense contemporânea.

4.3.2 Crimes sexuais

Os crimes de natureza sexual representam um dos maiores desafios da perícia criminal contemporânea, exigindo métodos científicos precisos para comprovar a ocorrência do delito,

identificar os autores e garantir a integridade das provas. Nesse contexto, a microbiologia forense, aliada às técnicas de biologia molecular e genética, tem se destacado como uma ferramenta complementar e eficaz nas investigações. O estudo dos microrganismos, fluidos biológicos e perfis genéticos possibilita a produção de evidências objetivas, mesmo em situações em que o material genético humano se encontra degradado ou escasso (DE JESUS et al., 2024).

A detecção e a análise de fluidos corporais como sêmen, saliva, suor e secreções vaginais, constituem etapas fundamentais na investigação de crimes sexuais. Tradicionalmente, esses vestígios eram identificados por testes químicos e imunológicos, porém, as técnicas modernas de biologia molecular permitem a confirmação e individualização de amostras com maior sensibilidade e especificidade (SILVA et al., 2015)

A aplicação da PCR (Reação em Cadeia da Polimerase) e do sequenciamento genético possibilita a detecção de DNA humano mesmo em quantidades mínimas ou em amostras degradadas. Além disso, o uso de marcadores genéticos específicos, como os STRs (Short Tandem Repeats) e SNPs (Single Nucleotide Polymorphisms), tem permitido a construção de perfis genéticos comparativos entre a vítima e o suspeito, conferindo alta confiabilidade às análises (BAZOLA, 2020).

Estudos recentes demonstram que a microbiota vaginal pode funcionar como uma espécie de “impressão microbiana”, capaz de fornecer informações relevantes em casos de agressão sexual. O perfil microbiano de cada indivíduo apresenta características únicas, influenciadas por fatores genéticos, hormonais e ambientais (SILVA et al., 2015).

Assim, a análise comparativa da microbiota presente em amostras coletadas de vítimas e suspeitos pode indicar contato sexual recente e associação física, mesmo quando o DNA humano está degradado. As técnicas de metagenômica e sequenciamento de nova geração (NGS) têm permitido identificar assinaturas microbianas específicas associadas a cada pessoa, o que amplia o escopo das evidências biológicas (DE JESUS et al., 2024).

A presença de microrganismos causadores de infecções sexualmente transmissíveis (ISTs) também pode constituir um indício importante nas investigações. A identificação de patógenos como *Neisseria gonorrhoeae*, *Chlamydia trachomatis* e *Trichomonas vaginalis* por técnicas moleculares pode comprovar a ocorrência de contato sexual e, em alguns casos, associar diretamente o agressor à vítima (ZULIANI, et al., 2024).

Além disso, a detecção de genótipos idênticos de agentes infecciosos em ambos os indivíduos pode reforçar o vínculo epidemiológico entre eles, contribuindo para o estabelecimento da materialidade do crime.

Em crimes sexuais, é comum que as amostras contenham misturas complexas de DNA provenientes da vítima e do agressor. O avanço das técnicas de biologia forense tem permitido a

separação e interpretação de perfis genéticos mistos com maior precisão, por meio de softwares de bioinformática probabilística e métodos de amplificação ultrasensíveis (AGUIAR et al., 2023).

Essas tecnologias viabilizam a obtenção de resultados conclusivos mesmo quando as quantidades de DNA masculino são extremamente reduzidas, como em casos de toque digital ou transferência secundária de material genético. A integração de dados genéticos, microbiológicos e toxicológicos permite uma reconstrução mais detalhada da dinâmica do crime. A correlação entre o tipo de vestígio biológico encontrado, o local da ocorrência e os resultados laboratoriais auxilia na verificação de versões apresentadas por suspeitos e vítimas (BRAZOLA, 2020).

Dessa forma, a microbiologia e a biotecnologia forense atuam como instrumentos de objetivação da prova, reduzindo margens de erro e fortalecendo a produção de evidências científicas confiáveis. As aplicações práticas da microbiologia e da biologia molecular nas investigações de crimes sexuais representam um avanço notável na perícia criminal moderna. A possibilidade de identificar microrganismos, fluidos biológicos e DNA em níveis extremamente baixos amplia significativamente as chances de elucidação de casos complexos. Além disso, o desenvolvimento de perfis microbianos individuais e a análise de ISTs associadas reforçam o caráter interdisciplinar e inovador da ciência forense. Tais métodos, quando aliados ao rigor técnico e ético, contribuem de forma decisiva para a efetivação da justiça penal e para a proteção dos direitos das vítimas.

4.3.3 Bioterrorismo e uso de agentes biológicos

O bioterrorismo consiste no uso deliberado de microrganismos patogênicos ou toxinas biológicas com o objetivo de causar doenças, morte ou pânico social. A crescente facilidade de acesso a tecnologias de manipulação genética e a globalização dos fluxos de pessoas e materiais aumentaram significativamente o risco de eventos bioterroristas no século XXI (DE ALBUQUERQUE NAVARRO, 2014). Nesse contexto, a microbiologia forense desempenha papel central na identificação, rastreamento e caracterização dos agentes biológicos utilizados, fornecendo subsídios científicos essenciais para as investigações criminais e para a segurança nacional.

A etapa inicial em casos de bioterrorismo envolve a identificação do agente biológico responsável pelo ataque. Para isso, empregam-se técnicas avançadas de biologia molecular, como a Reação em Cadeia da Polimerase (PCR), o sequenciamento genético de nova geração (NGS) e a espectrometria de massa (SANTANA FILHO, 2024).

Essas metodologias permitem a detecção rápida e precisa de microrganismos patogênicos, como *Bacillus anthracis* (antraz), *Yersinia pestis* (peste negra), *Francisella tularensis* (tularemia) e vírus como o *Variola major* (varíola), mesmo em pequenas quantidades de amostra ou em material degradado (DA SILVA LEITE, 2013). A caracterização genética detalhada desses agentes também

possibilita a diferenciação entre cepas naturais e manipuladas, um aspecto crucial para determinar se o evento teve origem accidental ou intencional.

Um dos maiores desafios da investigação em bioterrorismo é a atribuição da origem do agente biológico, ou seja, determinar a fonte, o local e o responsável pelo seu desenvolvimento. A genotipagem comparativa e as análises de assinaturas genômicas específicas permitem rastrear a origem laboratorial do microrganismo (NEPOMUCENO, 2022).

Por exemplo, no caso do ataque com esporos de antraz nos Estados Unidos em 2001, as análises de DNA forense e de metadados genéticos possibilitaram vincular o material biológico a um único laboratório militar, sendo essa uma das primeiras aplicações práticas da microbiologia forense em um caso de bioterrorismo (WEÇOSKI, et al., 2023). Essas abordagens utilizam técnicas como a análise de polimorfismos de nucleotídeo único (SNPs) e o sequenciamento completo de genomas bacterianos, permitindo o rastreamento preciso de mutações e modificações genéticas que revelam o histórico do agente.

Além de amostras clínicas, a investigação de bioterrorismo envolve a coleta e análise de amostras ambientais, como solo, ar, água e superfícies. Técnicas de imunoensaio, cromatografia líquida e espectrometria de massas são amplamente utilizadas para detectar toxinas como a ricina, a toxina botulínica e o saxitoxina (NEPOMUCENO, 2022). Essas análises possibilitam a quantificação e identificação de agentes químicos e biológicos, auxiliando na delimitação da área afetada e na adoção de medidas de contenção e descontaminação. A integração entre laboratórios forenses e de biossegurança é fundamental para garantir a validade das provas e a segurança dos peritos envolvidos.

O avanço da bioinformática forense tem permitido o armazenamento e a comparação de grandes bases de dados genômicos, possibilitando a rápida identificação de agentes biológicos emergentes e a correlação entre surtos distintos (DE SOUZA BATISTA, 2024). A utilização de algoritmos de filogenia molecular e inteligência artificial permite reconstruir as rotas de disseminação de patógenos, distinguindo eventos naturais de liberações intencionais. Essa capacidade é essencial não apenas para a resposta imediata ao evento bioterrorista, mas também para a prevenção de ataques futuros, por meio de sistemas de monitoramento genético de microrganismos de alto risco.

As investigações de bioterrorismo exigem cooperação entre agências nacionais e internacionais, como a Interpol, a Organização Mundial da Saúde (OMS) e o Centro de Controle e Prevenção de Doenças (CDC). Além da identificação técnica, é necessária uma abordagem ética e jurídica rigorosa, pois a manipulação de agentes biológicos envolve questões de biossegurança e de direitos humanos (VELOSO, 2019). A microbiologia forense, nesse contexto, atua como um elo entre a ciência e o direito, garantindo que as evidências coletadas sejam cientificamente válidas, juridicamente aceitas e socialmente responsáveis.

As aplicações práticas da microbiologia forense em casos de bioterrorismo e uso de agentes biológicos representam um marco na integração entre ciência, tecnologia e segurança pública. A combinação de métodos moleculares, genômicos e bioinformáticos permite identificar e rastrear agentes patogênicos com alta precisão, contribuindo para a elucidação de crimes de natureza biológica e para a prevenção de novas ameaças. Dessa forma, a atuação da microbiologia forense consolida-se como um instrumento estratégico para a defesa da saúde pública e a manutenção da ordem internacional.

4.3.4 Contaminação intencional de água e alimentos

A contaminação intencional de água e alimentos constitui uma forma de crime biológico e químico que visa causar danos à saúde pública, desordem social ou prejuízos econômicos. Esses atos podem ser motivados por terrorismo, sabotagem industrial ou vingança pessoal, configurando uma ameaça grave à segurança alimentar e à saúde coletiva (SILVA, 2023). Nesse contexto, a microbiologia forense e a biotecnologia aplicada desempenham papel fundamental na detecção, identificação e rastreabilidade dos agentes contaminantes, fornecendo provas científicas indispensáveis às investigações criminais.

A primeira etapa de uma investigação forense envolvendo contaminação intencional é a identificação precisa do agente contaminante, que pode incluir microrganismos patogênicos, toxinas naturais, compostos químicos ou metais pesados. Técnicas de biologia molecular, como a Reação em Cadeia da Polimerase (PCR) e o sequenciamento genético (NGS), permitem identificar microrganismos como *Salmonella spp.*, *Escherichia coli*, *Listeria monocytogenes* e *Clostridium botulinum* com alta sensibilidade e rapidez (MEDEIROS et al, 2025).

Além disso, métodos físico-químicos como cromatografia gasosa, espectrometria de massas e absorção atômica são empregados para detectar compostos tóxicos e substâncias químicas adicionadas deliberadamente à água ou alimentos (SILVA, 2023). A integração dessas análises microbiológicas e químicas permite confirmar tanto a materialidade da contaminação quanto sua origem intencional.

A microbiologia forense ambiental possibilita identificar a fonte de contaminação e o ponto de introdução do agente nos sistemas de abastecimento ou nas cadeias produtivas de alimentos. Técnicas de genotipagem e metagenômica comparativa permitem rastrear a linhagem microbiana responsável, distinguindo entre contaminações acidentais e deliberadas (OLIVEIRA, et al., 2024). Por exemplo, em casos de surtos alimentares de origem criminoso, a análise do DNA de cepas bacterianas encontradas nas vítimas e nas amostras de alimentos pode comprovar a identidade genética entre os isolados, revelando a fonte do ataque. Essa abordagem é amplamente utilizada em investigações envolvendo *Salmonella typhimurium*, microrganismo já utilizado em um famoso caso de bioterrorismo alimentar ocorrido no estado do Oregon (EUA), em 1984 (GOUVÊA, 2022).

Em casos de contaminação deliberada, a detecção de toxinas biológicas, como ricina, toxina botulínica, saxitoxina e micotoxinas, é fundamental para caracterizar a natureza e a gravidade do crime. A aplicação de imunoenaios enzimáticos (ELISA), cromatografia líquida de alta eficiência (HPLC) e espectrometria de massas permite quantificar essas substâncias e correlacioná-las com os sintomas observados nas vítimas (SARAIVA, 2025). A biotecnologia forense também contribui para a diferenciação entre toxinas produzidas naturalmente e aquelas sintetizadas ou manipuladas em laboratório, o que é essencial para determinar se houve intenção criminosa ou falha operacional em sistemas de controle sanitário.

A aplicação de técnicas forenses não se limita à resposta pós-crime. Sistemas modernos de biossensoriamento e nanotecnologia forense vêm sendo empregados no monitoramento preventivo de redes de abastecimento e cadeias produtivas, permitindo a detecção imediata de anomalias microbiológicas ou químicas (BITTAR, 2017). Esses dispositivos são capazes de identificar assinaturas moleculares específicas de patógenos e substâncias tóxicas em tempo real, auxiliando tanto na prevenção de ataques quanto na coleta rápida de evidências em caso de incidentes confirmados.

As investigações envolvendo contaminação intencional de alimentos e água exigem uma abordagem multidisciplinar, integrando microbiologistas, toxicologistas, químicos, peritos criminais e autoridades sanitárias. A coleta, preservação e transporte das amostras devem seguir protocolos de cadeia de custódia, garantindo a validade jurídica das provas (SANTIAGO, 2025). Além do caráter técnico, esses casos envolvem questões éticas e de biossegurança, uma vez que o manuseio de agentes patogênicos e substâncias tóxicas requer laboratórios de alto nível de contenção (NB- 3 ou NB-4), conforme diretrizes da Organização Mundial da Saúde (OMS).

A aplicação da microbiologia e da biotecnologia forense em casos de contaminação intencional de água e alimentos tem contribuído significativamente para a identificação de agentes biológicos e químicos, a determinação da origem da contaminação e a comprovação da autoria criminosa. As técnicas moleculares, químicas e bioinformáticas, quando associadas a protocolos de biossegurança e cadeia de custódia, tornam-se ferramentas indispensáveis para a segurança alimentar, a saúde pública e a justiça criminal. O avanço dessas metodologias reforça o papel da ciência forense como um instrumento essencial na defesa da sociedade diante de ameaças biológicas intencionais.

4.4 ASPECTOS LEGAIS E ÉTICOS

A introdução das provas microbiológicas nas investigações criminais tem ampliado significativamente o alcance da ciência forense e a precisão na determinação da autoria e materialidade dos delitos. Contudo, a utilização desses meios de prova suscita importantes questões legais e éticas. A análise desses aspectos é essencial para garantir que o uso de métodos microbiológicos ocorra em

conformidade com os princípios constitucionais do devido processo legal, ampla defesa e dignidade da pessoa humana.

4.4.1 Admissibilidade da prova microbiológica no processo penal

No âmbito jurídico brasileiro, a admissibilidade de provas científicas está condicionada à sua idoneidade técnica e à observância dos procedimentos legais de obtenção. A Constituição Federal de 1988 assegura, em seu artigo 5º, inciso LVI, que “são inadmissíveis, no processo, as provas obtidas por meios ilícitos”. Dessa forma, a validade da prova microbiológica depende de sua coleta, preservação e análise segundo os princípios da legalidade e da cadeia de custódia (DO BRASIL, 2010).

O Código de Processo Penal (CPP), em seu artigo 158-A, regulamenta a cadeia de custódia como o conjunto de procedimentos utilizados para manter e documentar a história cronológica da evidência, desde sua coleta até o descarte (DAS NEVES et al., 2020). No caso de amostras microbiológicas, esse controle é ainda mais rigoroso, devido à natureza perecível e potencialmente contaminável das evidências biológicas. Qualquer falha nesse processo pode comprometer a autenticidade e a confiabilidade da prova, tornando-a inapta para fins processuais (PEREIRA et al, 2023).

A cadeia de custódia é o principal mecanismo de garantia da validade processual da prova microbiológica. O correto acondicionamento, rotulagem e registro das amostras são fundamentais para preservar a trilha de responsabilidade sobre o material coletado. De acordo com o Manual de Boas Práticas em Perícias Forenses do Ministério da Justiça, cada transferência da amostra deve ser registrada com data, hora, identificação do responsável e finalidade (COSTA, et al., 2024). Nas análises microbiológicas, o risco de contaminação cruzada ou degradação do DNA microbiano requer protocolos específicos de biossegurança e rastreabilidade (WEÇOSKI et al, 2023). A quebra da cadeia de custódia pode levar à inadmissibilidade da prova, uma vez que compromete o nexo causal entre o material analisado e o fato investigado.

O uso de técnicas microbiológicas em processos penais demanda responsabilidade ética dos profissionais envolvidos. A manipulação de amostras biológicas implica riscos de exposição a agentes patogênicos, exigindo o cumprimento das normas de biossegurança previstas na Resolução CFM nº 466/2012 e nas diretrizes da Organização Mundial da Saúde (OMS) (WITIUK et al., 2018). Além disso, a análise microbiológica pode envolver dados genéticos individuais ou populacionais, suscitando debates sobre privacidade e consentimento informado. A Constituição Federal e a Lei Geral de Proteção de Dados (Lei nº 13.709/2018) estabelecem a proteção de informações sensíveis, incluindo dados biomédicos e genéticos. Assim, qualquer utilização desses dados em perícias forenses deve respeitar o direito à intimidade e o sigilo das informações (PELOSO PIURCOSKY et al, 2019).

A ética também se manifesta na imparcialidade do perito, que deve atuar com base em critérios científicos e não em interesses institucionais ou pessoais. O Código de Ética Profissional do Perito

Criminal prevê a obrigação de relatar com precisão os resultados obtidos, abstendo-se de omitir ou manipular dados que possam alterar a interpretação dos fatos (SILVA, 2024). Embora as provas microbiológicas possuam elevado valor técnico, sua interpretação deve ser feita com cautela. O princípio da proporcionalidade exige que a produção e utilização da prova científica sejam adequadas, necessárias e proporcionais à finalidade do processo (CAPEZ, 2023).

A introdução de métodos de biologia molecular avançada, como sequenciamento genético e metagenômica, deve sempre considerar o equilíbrio entre a eficácia investigativa e a proteção dos direitos fundamentais do acusado e das vítimas. Provas obtidas por métodos não validados, sem controle de qualidade laboratorial ou sem respaldo metodológico reconhecido pela comunidade científica, podem ser desconsideradas pelo juízo, conforme precedentes jurisprudenciais (PELOSO PIURCOSKY et al, 2019).

A admissão da prova microbiológica no processo penal brasileiro ainda enfrenta lacunas normativas e desafios técnicos, como a padronização de métodos analíticos e a formação especializada dos peritos. É necessária a atualização da legislação processual penal para abranger as novas formas de prova científica derivadas da biotecnologia e microbiologia forense. Por outro lado, a consolidação de laboratórios forenses acreditados e o uso de protocolos internacionais fortalecem a confiabilidade e legitimidade da prova microbiológica perante o Poder Judiciário. Assim, o futuro dessa modalidade probatória dependerá da harmonização entre rigor técnico, transparência ética e segurança jurídica. À medida que a biotecnologia forense se desenvolve, torna-se imperativo que o sistema jurídico acompanhe essas inovações, garantindo que a ciência seja um instrumento de verdade e não de arbitrariedade.

4.4.2 Questões éticas do uso de microbiomas como evidências

O avanço das ciências forenses e da biotecnologia tem introduzido novas formas de identificação e investigação criminal, dentre as quais se destaca o uso do microbioma humano, o conjunto de microrganismos que habitam o corpo humano e formam uma assinatura biológica única. A análise de microbiomas tem se mostrado uma ferramenta promissora na identificação de indivíduos, determinação de locais de crime e reconstrução de eventos, especialmente quando o DNA humano tradicional está degradado ou ausente (PEREIRA et al, 2023).

O microbioma humano possui características altamente individuais, que podem permitir a identificação de uma pessoa com base em vestígios biológicos deixados em objetos, roupas ou superfícies (WEÇOSKI et al., 2023). Essa singularidade microbiológica amplia as possibilidades de investigação criminal, mas também redefine os limites da privacidade biológica. Diferentemente do DNA genético, o microbioma reflete fatores ambientais, alimentares e comportamentais, podendo revelar informações sensíveis sobre a saúde, estilo de vida ou condições clínicas do indivíduo. Assim,

seu uso em perícias deve ser regulado para evitar violações de direitos fundamentais e uso indevido de informações biomédicas (PELOSO PIURCOSKY et al, 2019).

A admissibilidade da prova microbiômica no processo penal depende da comprovação de sua confiabilidade científica e da observância do devido processo legal. Segundo o artigo 158-A do Código de Processo Penal (DAS NEVES et al., 2020), a prova deve ser obtida com observância da cadeia de custódia, o que inclui a coleta, preservação, transporte e análise das amostras biológicas. Contudo, como a microbiologia forense do microbioma é uma área emergente, ainda há escassez de protocolos padronizados e lacunas metodológicas que dificultam sua validação como prova técnica (WEÇOSKI et al, 2023). Do ponto de vista jurídico, a utilização de dados microbiômicos precisa respeitar os critérios estabelecidos pela jurisprudência para provas científicas: validade metodológica, aceitação pela comunidade científica e rastreabilidade dos procedimentos. A ausência desses critérios pode tornar a evidência inadmissível em juízo, conforme os princípios de proporcionalidade e razoabilidade (CAPEZ, 2023).

Os dados provenientes do microbioma podem conter informações médicas e genéticas indiretas, o que os torna dados sensíveis, protegidos pela Lei nº 13.709/2018, Lei Geral de Proteção de Dados (LGPD). Essa legislação estabelece que o tratamento de dados biomédicos exige consentimento informado e deve respeitar a finalidade específica de uso (PELOSO PIURCOSKY et al, 2019).

Em investigações criminais, o uso do microbioma sem autorização do indivíduo pode gerar conflito entre o interesse público e o direito à privacidade. A coleta de amostras microbiológicas deve, portanto, ser realizada sob ordem judicial fundamentada, assegurando o princípio da legalidade e da proporcionalidade (ROSA, 2015). Do ponto de vista ético, é essencial que o perito e o investigador compreendam que o microbioma não é apenas uma ferramenta de identificação, mas também uma fonte de dados íntimos sobre o corpo humano.

As questões éticas associadas ao uso de microbiomas como evidência estão centradas na finalidade do uso dos dados, no sigilo das informações e no risco de interpretações equivocadas. Como o microbioma é altamente variável, influenciado por fatores como dieta, medicamentos e ambiente, análises imprecisas podem levar a erros de interpretação e falsas associações criminais (PELOSO PIURCOSKY et al, 2019).

A responsabilidade ética do perito envolve não apenas a precisão técnica, mas também a transparência sobre os limites científicos do método. A manipulação de dados microbiômicos deve ser realizada em laboratórios credenciados e sob supervisão de comitês de ética, conforme as normas da Resolução CFM nº 466/2012, que rege pesquisas e análises envolvendo material biológico humano (WITIUK et al., 2018). Além disso, surge o debate sobre propriedade intelectual e compartilhamento de dados. Amostras microbiológicas podem ser reutilizadas em pesquisas sem consentimento explícito,

configurando uma violação do princípio da autonomia do sujeito e do uso ético da informação científica (AGUIAR et al., 2023).

A ausência de marcos legais específicos sobre o uso do microbioma em contextos forenses cria um vácuo jurídico que pode comprometer tanto a proteção de direitos individuais quanto a eficácia das investigações. É urgente a criação de normas de padronização e diretrizes éticas para a coleta, análise e armazenamento de dados microbiômicos em processos criminais (MOCELLIN, 2022). A regulamentação deve estabelecer critérios de admissibilidade, procedimentos de anonimização de dados e parâmetros de consentimento informado, garantindo que o uso do microbioma respeite os princípios da bioética, autonomia, beneficência, não maleficência e justiça. Somente com esse equilíbrio entre ciência e direito será possível legitimar o uso do microbioma como evidência sem violar a dignidade humana.

O uso do microbioma como evidência forense representa uma inovação significativa na ciência criminal, mas impõe desafios éticos e legais ainda em desenvolvimento. A singularidade e sensibilidade das informações microbiômicas exigem rigor técnico, transparência metodológica e respeito aos direitos fundamentais. Para que o microbioma se torne uma ferramenta legítima e confiável no sistema de justiça, é imprescindível o estabelecimento de regulações específicas, baseadas nos princípios do devido processo legal e da bioética. Assim, a intersecção entre ciência e direito poderá promover investigações mais precisas, sem comprometer a ética e a proteção da privacidade humana.

4.4.3 Biossegurança e cadeia de custódia

A aplicação da ciência forense em contextos criminais exige o cumprimento rigoroso de protocolos de biossegurança e cadeia de custódia, assegurando a integridade das evidências biológicas e a proteção dos profissionais envolvidos. Esses procedimentos não são apenas exigências técnicas, mas também representam obrigações legais e éticas que garantem a validade jurídica das provas e a preservação dos direitos humanos. A interdependência entre biossegurança e cadeia de custódia constitui um pilar essencial da credibilidade pericial e da justiça processual (PEREIRA et al., 2023).

A biossegurança compreende o conjunto de medidas e procedimentos voltados à prevenção de riscos biológicos, químicos e físicos decorrentes do manuseio de amostras potencialmente perigosas (DOS SANTOS, 2019). No contexto forense, sua aplicação é indispensável, especialmente em análises microbiológicas, toxicológicas e genéticas, que envolvem agentes patogênicos ou material humano. De acordo com a Resolução nº 466/2012 do Conselho Federal de Medicina (CFM), os profissionais que manipulam amostras biológicas devem garantir a proteção da saúde própria e de terceiros, respeitando princípios éticos como beneficência, não maleficência e justiça (WITIUK et al., 2018).

A negligência nas práticas de biossegurança não apenas compromete a integridade das amostras, mas também pode configurar violação ética e responsabilidade civil. Além disso, a Lei nº

11.105/2005, que institui a Política Nacional de Biossegurança, define normas para o uso seguro de organismos e agentes biológicos, determinando que toda manipulação deve ocorrer em instalações com nível de contenção compatível (OLIVEIRA, 2016). Assim, a biossegurança assume caráter normativo e ético, assegurando tanto a validade científica da prova quanto a dignidade humana.

A cadeia de custódia é o procedimento destinado a documentar o percurso cronológico da evidência, desde sua coleta até o descarte, garantindo sua autenticidade e confiabilidade (DAS NEVES et al., 2020). No âmbito legal, o artigo 158-A do Código de Processo Penal (CPP) define que a ruptura dessa cadeia pode invalidar a prova, tornando-a inadmissível em juízo.

A manipulação inadequada, perda de rastreabilidade ou contaminação de amostras biológicas representa violação direta dos princípios da legalidade e do devido processo legal (CAPEZ, 2023). Dessa forma, o cumprimento rigoroso da cadeia de custódia é um dever jurídico, bem como um imperativo ético para os peritos e investigadores. A cadeia de custódia não se limita a aspectos logísticos, mas abrange responsabilidade moral sobre a veracidade das informações. Cada agente envolvido, do coletor ao analista, deve atuar com transparência, imparcialidade e precisão documental, evitando qualquer indício de manipulação indevida ou fraude processual (SANTIAGO, 2025).

A biossegurança e a cadeia de custódia são dimensões complementares da perícia criminal. Enquanto a primeira assegura a proteção humana e ambiental, a segunda garante a proteção jurídica e processual das evidências. A falha em qualquer uma dessas etapas pode comprometer todo o processo investigativo. Por exemplo, uma amostra biológica coletada sem o uso de equipamentos de proteção individual (EPIs) adequados ou armazenada fora de condições de contenção e esterilidade pode ser contaminada, perdendo validade probatória (WEÇOSKI et al, 2023). Essa contaminação não apenas compromete a investigação, mas pode expor profissionais e a população a riscos biológicos, configurando negligência ética e infração legal. Além disso, a biossegurança contribui diretamente para a confiabilidade da cadeia de custódia, uma vez que a preservação física e biológica das amostras é condição essencial para garantir sua integridade e autenticidade perante o sistema de justiça (COSTA et al., 2024).

A atuação do perito criminal deve observar os princípios éticos da honestidade, imparcialidade, responsabilidade e respeito à dignidade humana. O Código de Ética Profissional do Perito Criminal estabelece que o perito tem o dever de zelar pela veracidade e fidedignidade das provas, sendo vedado qualquer ato que possa comprometer a neutralidade dos resultados (SILVA, 2024). O sigilo das informações biológicas é uma obrigação ética. Os dados obtidos em análises microbiológicas, genéticas ou toxicológicas podem revelar informações sensíveis sobre as vítimas ou suspeitos, devendo ser tratados com confidencialidade, em conformidade com a Lei Geral de Proteção de Dados Pessoais (Lei nº 13.709/2018) (PELOSO PIURCOSKY et al, 2019). A ética na biossegurança também se manifesta no uso responsável dos recursos científicos. O perito deve evitar desperdício de reagentes biológicos,

exposição desnecessária a riscos e manipulação de agentes patogênicos sem finalidade legítima. Esses princípios derivam tanto da bioética quanto do direito ambiental, reforçando a interligação entre ciência, ética e justiça.

Embora os marcos legais existentes forneçam diretrizes gerais, ainda há lacunas na padronização nacional de protocolos de biossegurança e cadeia de custódia em laboratórios forenses. O fortalecimento de políticas públicas que garantam treinamento contínuo, infraestrutura adequada e auditorias periódicas é essencial para consolidar práticas éticas e seguras (MOCELLIN, 2022). No campo ético, o desafio está em equilibrar a necessidade de investigação científica com a preservação dos direitos fundamentais. O avanço tecnológico não pode justificar a flexibilização de princípios éticos ou legais, sendo necessário que a ciência forense opere sob o paradigma da responsabilidade social e da transparência pública.

A biossegurança e a cadeia de custódia são dimensões inseparáveis da prática pericial moderna, sustentadas por princípios éticos e legais que garantem tanto a proteção da vida e da saúde, quanto a legitimidade das provas no processo penal. O cumprimento rigoroso dessas normas assegura que a ciência forense atue como instrumento de justiça, e não de violação de direitos. Portanto, o fortalecimento da formação ética dos peritos, o investimento em infraestrutura laboratorial e a atualização normativa são medidas indispensáveis para consolidar uma perícia técnica, responsável e juridicamente válida no contexto da biossegurança forense.

5 CONCLUSÃO

A análise microbiológica tem se consolidado como uma ferramenta de grande relevância nas investigações criminais, contribuindo significativamente para a elucidação de casos complexos e para o aprimoramento das práticas periciais. A incorporação de métodos microbiológicos como a cultura de microrganismos, técnicas de biologia molecular (PCR, sequenciamento e metagenômica) e o uso de bioinformática, permite uma identificação precisa de agentes biológicos e uma melhor compreensão das interações entre o ambiente, o corpo humano e os eventos criminosos.

Essas análises oferecem dados científicos robustos e de alta confiabilidade, capazes de complementar outras provas periciais e fortalecer a reconstrução dos fatos. Em casos de homicídios, ocultação de cadáveres, crimes sexuais ou bioterrorismo, a microbiologia forense tem se mostrado essencial para determinar o tempo de morte, o local de ocorrência, a causa da contaminação e até mesmo o vínculo entre suspeitos e vítimas. Assim, sua aplicação amplia a precisão investigativa e fortalece a busca pela verdade material no processo penal.

Além do aspecto técnico, o desenvolvimento dessa área também exige o cumprimento rigoroso de princípios éticos, biossegurança e cadeia de custódia, garantindo a integridade das amostras e a legitimidade das provas apresentadas. A interdisciplinaridade entre microbiologia, direito e ética é,

portanto, indispensável para assegurar que os resultados obtidos em laboratório tenham validade científica e jurídica.

Conclui-se que as análises microbiológicas representam um avanço expressivo na ciência forense contemporânea, tornando-se um instrumento essencial na promoção da justiça criminal. O investimento em tecnologia, capacitação profissional e protocolos de padronização deve ser contínuo, de modo que a microbiologia forense possa atuar de forma cada vez mais precisa, ética e segura, contribuindo efetivamente para a resolução de crimes e a preservação dos direitos humanos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por ser minha força em todos os momentos, por me guiar nos dias difíceis e iluminar meu caminho com fé, esperança, sabedoria e serenidade. Sem Ele, nada disso seria possível. Aos meus pais Cilene Serrao (mãe) e Josenias Santana (pai), vocês foram minha base e meu exemplo de esforço e coragem. Obrigado por todo amor, apoio e pelos ensinamentos que carrego comigo para a vida. Cada conquista minha também é de vocês, que sempre acreditaram em mim e me deram motivos para continuar.

À minha esposa Elaine Cristina Pereira, minha companheira de todos os dias, que esteve ao meu lado com paciência, carinho e incentivo. Obrigado por todo amor, compreensão, companheirismo, e incentivo de todos os dias. Obrigada por acreditar em mim mesmo quando o cansaço e as dúvidas pareciam maiores e por ser o meu maior apoio em cada etapa dessa jornada.

Aos meus irmãos (Janilson Melo), (Fábio Junior Melo) e irmãs (Josiane Melo), (Dilene Melo), (Tatiane Melo), pelo companheirismo e por sempre acreditarem e torcerem por mim e me motivarem com palavras de força e amizade. A presença e o apoio de vocês tornaram essa jornada mais leve e feliz.

Aos meus aos meus sobrinhos, Jheniffer Monteiro, Emilly Monteiro, e Endrick Monteiro, que com o sorriso e o amor puro de cada um, lembraram-me sempre da importância das pequenas felicidades.

Ao meu orientador Me Gabriel Rezende, pela paciência, atenção e por todo o conhecimento compartilhado. Sua orientação foi essencial para que eu chegasse até aqui com confiança e aprendizado.

A todos que, de alguma forma, fizeram parte dessa caminhada com palavras, gestos, orações ou simples demonstrações de carinho o meu mais sincero e profundo agradecimento.

REFERÊNCIAS

- AGUIAR, Laisse da Costa et al. A identificação do perfil genético para fins criminais: uma análise sob a perspectiva dos direitos fundamentais. 2023.
- BARBOSA, M. A.; FERREIRA, M. J. L.; SANTOS, E. R. R.; SANTOS, E. C.; GOMES, B. S. Aplicações de fungos em estudos forenses no processo de degradação cadavérica. **Saúde & Amb. Rev.**, Duque de Caxias, v.7, n.1, p.10-18, jan-jun 2012.
- BAZOLA, Lara Martins. A utilização do exame de DNA como material probatório na investigação criminal e elucidação dos crimes: uma análise no ordenamento jurídico pátrio. 2020.
- BITTAR, Dayana Borges. Desenvolvimento e otimização de métodos analíticos com nanopartículas para a avaliação de adulteração ou contaminação de alimentos. 2017.
- CALAFATE, L. Os Vírus são singulares e desafiam os paradigmas da Ciência. **Revista Multidisciplinar**, [S. l.], v. 4, n. 2, p. 117-133. DOI:<https://doi.org/10.23882/rmd.22094>, 2022
- CAPEZ, Rodrigo. Tomada de decisão sobre os fatos no processo penal: contexto da descoberta e seus fatores influenciadores. 2023. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.
- CARDOSO, Vanesa Marques. O microbioma humano. 2015. Dissertação de Mestrado. Universidade Fernando Pessoa (Portugal).
- COSTA, Gilcelene et al. Implementação do Sistema de Gestão da Qualidade em Laboratório de Genética Forense na Amazônia: experiências e desafios. **Revista Brasileira de Criminalística**, v. 13, n. 1, p. 195-206, 2024.
- DA SILVA LEITE, Viviane et al. Uso das técnicas de biologia molecular na genética forense. **Derecho y Cambio Social**, v. 10, n. 34, p. 21, 2013.
- DAS NEVES, Lícia Jocilene; RESENDE, Raissa Cupertino. O Código De Processo Penal Brasileiro E O Sistema Acusatório Implementado Pela Lei N. 13.964/2019. **Dom Helder Revista de Direito**, v. 3, n. 6, 2020.
- DE ALBUQUERQUE NAVARRO, Marli Brito Moreira. Bioterrorismo, riscos biológicos e as medidas. **Physis Revista de Saúde Coletiva**, v. 24, n. 4, p. 1181-1205, 2014.
- DE JESUS, Beatriz Tasso Fabri; DE PITA PEREIRA, Daniela. Microbiologia aplicada à medicina forense. **Repositório Institucional do UNILUS**, v. 3, n. 1, 2024.
- DE SOUZA BATISTA, Felipe et al. O papel do biomédico na perícia criminal através da análise forense de amostras biológicas. **Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação**, v. 10, n. 10, p. 1628-1644, 2024.
- DO BRASIL, Constituição Federal. Constituição da república federativa do Brasil de 1988. Recuperado de <http://www.ritmodeestudos.com.br>, 2010.
- DOGRA, Shaillay Kumar; DORÉ, Joel; DAMAK, Sami. Resiliência da microbiota intestinal: definição, relação com a saúde e estratégias de intervenção. **Frontiers in microbiology**, v. 11, p. 572921, 2020.

- DOS SANTOS, Hellen Paula Alcântara et al. A importância da biossegurança no laboratório clínico de biomedicina. **Revista Saúde em Foco**, v. 11, n. 1, p. 210-225, 2019.
- GOEBEL, Cristine Souza; OLIVEIRA, Flávio de Mattos; SEVERO, Luiz Carlos; PICANÇO, Juliane Bentes; ALHO, Clarice Sampaio. Análise micológica durante a decomposição cadavérica. **Revista de Ciências Médicas e Biológicas**, Porto Alegre, v. 12, n. 1, p. 28-32, 2013
- GOUVÊA, Fabiana de Melo. A vida à serviço da morte: armas biológicas, bioterrorismo e guerra biológica. 2002.
- MEDEIROS, Isabella Pontes de et al. Tempo de viabilidade da saliva em meio externo para fins de extração e quantificação de DNA. 2025.
- MOCELLIN, Eniara Pimenta. Procedimentos de biossegurança em laboratório de DNA forense. 2002. Tese de Doutorado. [sn].
- MULLIS, K.; FALOONA, F. Specific synthesis of DNA in vitro via a polymerase- catalyzed chain reaction. **Methods in Enzymology**, v. 155, p. 335-350, 1987.
- NEPOMUCENO, Felipe Figueiredo. Bioterrorismo: análise das condições do CBMDF como primeira resposta a ataque biológicos à sede do poder político nacional. 2022.
- OLIVEIRA, Gustavo Paschoal Teixeira de Castro. Política Nacional de Biossegurança: contribuições bioéticas para com a comercialização e consumo de organismos geneticamente modificados ante o princípio da precaução. 2016.
- OLIVEIRA, Manuela et al. Tecnologias de sequenciamento em microbiologia forense: tendências e avanços atuais. **Ciências Forenses**, v. 4, n. 4, p. 523-545, 2024.
- PELOSO PIURCOSKY, Fabrício et al. A lei geral de proteção de dados pessoais em empresas brasileiras: uma análise de múltiplos casos. **Suma de negócios**, v. 10, n. 23, p. 89-99, 2019.
- PEREIRA, B. Z.; VIEIRA, C. P. Microbiologia forense como ferramenta na elucidação de crimes e na determinação do intervalo post mortem. 2023. 65p. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Biomedicina) - Centro Universitário São Camilo. São Paulo, 2023.
- RESENDE, Alessandra Lucia Pereira et al. Criação de uma biblioteca de micro- organismos para atender as aulas práticas dos cursos da área da saúde da Faculdade de Minas de Belo Horizonte. 2021.
- RIBEIRO, Telma Sofia Moreira. O papel do microbioma humano na saúde e na doença. Dissertação de Mestrado. Universidade Fernando Pessoa (Portugal), 2020
- ROSA, Bárbara Santa. Problemas éticos do uso da genômica individual na investigação criminal. 2015.
- SANTANA FILHO, Djalma Moreira. Sequenciamento de próxima geração: novas tecnologias para acessar às comunidades microbianas. **Revista Macambira**, v. 8, n. 1, p. 1-27, 2024.
- SANTIAGO, Matheus Cavalcante. Genética forense: A importância das etapas da cadeia de custódia e das estratégias de processamento das amostras para o êxito das análises moleculares. **Revista Brasileira de Criminalística**, v. 14, n. 2, p. 76-85, 2025.

SARAIWA, Carolina Julia Costa. Metodologias analíticas para determinação de ricinina em amostras biológicas no diagnóstico das intoxicações por *Ricinus communis*. 2025.

SILVA, Déborah Soares Bispo Santos et al. Padrão de metilação de DNA para fins forenses: análise de células de sangue, sêmen e saliva; e estudo de sensibilidade e especificidade. 2015.

SILVA, Jader Oliveira da et al. Defesa alimentar e saúde operacional: proteção contra a contaminação intencional de alimentos nas forças armadas. **Coleção Meira Mattos**, v. 17, n. 59, p. 303-330, 2023.

SILVA, Marjore Moreira Barbosa. A importância da prova pericial no processo penal e a imparcialidade do perito na investigação criminal. **RECIMA21-Revista Científica Multidisciplinar-ISSN 2675-6218**, v. 5, n. 12, p. e5125985-e5125985, 2024.

SILVA, N. da, JUNQUEIRA, V. C. A., SILVEIRA, N. F de A. Manual de Métodos de Análise Microbiológica de Alimentos e Água. Livraria Varela, São Paulo, 1997

TORTORA, G. J.; FUNKE, B. R.; CASE, C. L. Microbiologia. 12. ed. Porto Alegre: Artmed, 2017.

TURNBAUGH, P. J. et al. The human microbiome project. *Nature*, v. 449, p. 804–810, 2007.

VELOSO, Sandra Ceciliano de Souza. Bioética e segurança biológica. 2019.

WEÇOSKI, Déborah Aline Diniz; DALZOTO, Patricia. Microbiologia forense: uma revisão. **Revista Brasileira de Criminalística**, Brasília, v. 12, n. 2, p. 112-121, 2023

WITIUK, Ilda Lopes et al. Ética em pesquisa envolvendo seres humanos. PUCPress, 2018.

ZULIANI, Fábio César et al. Abordagem integrada de microbiologia e infecções sexualmente transmissíveis contando com o protagonismo de estudantes do ensino médio. 2024.