

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

VITÓRIA BERTINATO LEOPOLDINO

**DETERMINAÇÃO DE PUTRESCINA E CADAVERINA EM CADÁVER
MUMIFICADO**

FRANCISCO BELTRÃO

2025

VITÓRIA BERTINATO LEOPOLDINO

**DETERMINAÇÃO DE PUTRESCINA E CADAVERINA EM CADÁVER
MUMIFICADO**

Determination of cadaverine and putrescine in a mummified corpse

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
apresentado como requisito para obtenção do título
de Bacharel em Engenharia Química da
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
(UTFPR).

Orientadora: Prof^a Dra Thalita Grando Rauen.

Coorientadora: Prof^a Dra Fernanda de Souza Batista.

FRANCISCO BELTRÃO

2025



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/)

Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es) e que licenciem as novas criações sob termos idênticos.

Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

VITÓRIA BERTINATO LEOPOLDINO

**DETERMINAÇÃO DE PUTRESCINA E CADAVERINA EM CADÁVER
MUMIFICADO**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
apresentado como requisito para obtenção do título
de Bacharel em Engenharia Química da
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
(UTFPR).

Data de aprovação: 22/maio/2025

Thalita Grando Rauen
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná Campus Francisco Beltrão

Fernanda de Souza Batista
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná Campus Francisco Beltrão

Tânia Maria Cassol
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná Campus Francisco Beltrão

FRANCISCO BELTRÃO

2025

Aos meus pais, que abriram portas com as próprias mãos, para que eu pudesse passar com os pés leves, e à minha irmã, Lara, que, sem precisar dizer uma palavra, sempre fala tudo o que preciso ouvir.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, a Nossa Senhora e a todos aqueles que me guiam, por me manterem no caminho certo por todos esses anos. Sua luz e proteção sempre estiveram ao meu lado, iluminando meus caminhos e minhas ações com amor e fé.

À minha orientadora, professora Thalita, pela confiança na minha proposta, por sua paciência e atenção ao me orientar e auxiliar ao longo deste trabalho. E à minha coorientadora, professora Fernanda, pelo apoio e colaboração essenciais.

À Academia de Ciências Forenses e à Polícia Científica do Paraná, pela confiança depositada em minha pesquisa.

Aos meus pais, Lucio e Daiane, por muito além de todo suporte financeiro. Obrigada por todo cuidado, amor e dedicação que sempre tiveram comigo. Sem vocês, nada disso seria possível. Obrigada por tudo!

Aos meus avós maternos, Agenor e Vladis, por todos os anos em que cuidaram (e ainda cuidam) de mim; e aos meus avós paternos, José e Lucia, que, mesmo à distância, sempre se fizeram presentes. Vocês sempre foram uma fonte de força.

Aos meus padrinhos e tios, agradeço do fundo do coração por serem os melhores para mim. Aos meus primos, agradeço pela constante presença e pelo apoio incondicional. Cada um de vocês tem um papel significativo na minha vida. Com carinho, deixo um abraço apertado a Lucas e Luiza, por todo afeto partilhado ao longo dessa caminhada.

A todos os meus amigos, o meu mais sincero muito obrigada. Agradeço pela amizade constante e pelos momentos especiais que vivemos juntos, que sempre tornaram minha vida mais leve e alegre. Obrigada por sempre estarem presentes com apoio, carinho e palavras de conforto. E, com o coração aquecido, menciono Cassio e Fernanda: irmãos que a vida me deu.

À minha irmã, Lara, minha maior fonte de inspiração e carinho, agradeço por ser minha melhor companhia e por sempre estar ao meu lado. Você sempre será a razão de tudo o que conquistei. Meu amor por você é maior que tudo.

Àqueles que partiram ao longo desses anos, deixo minha eterna gratidão, amor e saudade. E a todos que, de alguma forma, contribuíram com este trabalho: muito obrigada!

Porquanto és pó e ao pó tornarás.
(Gênesis 3:19, Bíblia Sagrada)

RESUMO

A decomposição de corpos humanos é um processo complexo, marcado por diversas transformações bioquímicas e microbiológicas. Entre essas transformações, destaca-se a produção de compostos nitrogenados, os quais têm grande relevância para investigações na área forense. Entre os compostos produzidos durante esse processo, destacam-se as aminas biogênicas, como a cadaverina e a putrescina, que resultam da degradação de aminoácidos por ação bacteriana. Estas substâncias são indicadores químicos do estágio de decomposição e apresentam potencial aplicação na estimativa do intervalo pós-morte (IPM). Este estudo teve como objetivo analisar a presença e a concentração dessas aminas em um tecido humano mumificado de forma natural, utilizando a técnica de cromatografia líquida de alta eficiência (HPLC) com derivatização por cloreto de dansila. As amostras analisadas foram cedidas de um cadáver mumificado não reclamado, encontrado na cidade de Barracão, Paraná, em março de 2025, com a devida autorização da Polícia Científica e do Comitê de Ética e Pesquisa (CEP). A análise revelou concentrações de 6,93 mg/kg de cadaverina e 6,46 mg/kg de putrescina, valores considerados elevados para um corpo em estado de mumificação. Esses dados indicam que o processo putrefativo pode ter ocorrido de forma significativa antes da completa desidratação, sugerindo uma transição entre os estágios de decomposição ativa e preservação. Os resultados obtidos reforçam a utilidade forense das aminas biogênicas na caracterização do estágio de decomposição, mesmo em corpos preservados.

Palavras-chave: decomposição cadavérica; aminas biogênicas; cadaverina; putrescina; análise forense.

ABSTRACT

The decomposition of human bodies is a complex process marked by various biochemical and microbiological transformations. Among these transformations, the production of nitrogenous compounds stands out due to their significant relevance in forensic investigations. Notably, biogenic amines such as cadaverine and putrescine are produced during this process as a result of amino acid degradation by bacterial action. These substances serve as chemical indicators of the decomposition stage and have potential applications in estimating the postmortem interval (PMI). This study aimed to analyze the presence and concentration of these amines in naturally mummified human tissue, using high-performance liquid chromatography (HPLC) with dansyl chloride derivatization. The analyzed samples were obtained from an unclaimed mummified corpse found in the city of Barracão, Paraná, in March 2025, with proper authorization from the Forensic Police and the Research Ethics Committee (CEP). The analysis revealed concentrations of 6.93 mg/kg of cadaverine and 6.46 mg/kg of putrescine, which are considered high for a mummified body. These findings suggest that putrefaction may have occurred significantly before complete dehydration, indicating a transition between active decomposition and preservation stages. The results support the forensic utility of biogenic amines in characterizing the decomposition stage, even in preserved bodies.

Keywords: human decomposition; biogenic amines; cadaverine; putrescine; forensic analysis.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Representação de mão humana em diferentes estágios de decomposição.....	16
Figura 2 - <i>Rigor mortis</i> no braço direito	18
Figura 3 - Autólise presente em animal	18
Figura 4 - Coloração esverdeada no abdômen.....	19
Figura 5 - Início de putrefação em animal.....	20
Figura 6 - Decomposição ativa em animal.....	20
Figura 7 – Corpo humano em estágio avançado de putrefação	21
Figura 8 - Animal em estágio de decomposição avançada.....	21
Figura 9 - Corpo humano em esqueletização.....	22
Figura 10 - Corpo de animal em estágio de esqueletização.....	22
Figura 11 - Corpo humano em mumificação natural.....	23
Figura 12 - Cadaverina e Putrescina.....	26
Figura 13 - Amostras utilizadas para a análise.....	28
Figura 14 - HPLC Agilent 1260 Infinity II.....	30
Gráfico 1: Análises da Cadaverina.....	33
Gráfico 2: Análises da Putrescina.....	34

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dados da Cadaverina	33
Tabela 2 – Dados da Putrescina	35

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 – Equação da Curva de Calibração da Cadaverina	37
Equação 2 – Equação da Curva de Calibração da Putrescina	39

LISTA DE ABREVIATURAS E

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ATP	Adenosina Trifosfato
CAAE	Certificado de Apresentação de Apreciação Ética
CEP	Comitê de Ética em Pesquisa
GC-MS	Cromatografia Gasosa acoplada à Espectrometria de Massas
HPLC	Cromatografia Líquida de Alta Eficiência
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
IPM	Intervalo Pós-Morte
QC	Controle de Qualidade (<i>Quality Control</i>)
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná
UV	Ultravioleta

LISTA DE SÍMBOLOS

Ca	Cálcio
$C_4H_{12}N_2$	Fórmula molecular da Putrescina
$C_5H_{14}N_2$	Fórmula molecular da Cadaverina
Mg	Magnésio
R^2	Coefficiente de determinação da curva analítica
R	Coefficiente de correlação
STD	Erro Padrão Residual (Standard Deviation)
T	Temperatura
V	Volume

SUMÁRIO

1	Introdução.....	14
2.1	Objetivo Geral.....	15
2.2	Objetivos Específicos.....	15
3.1	Processos e Fases da Decomposição Cadavérica	17
3.2	Aminas biogênicas.....	24
3.3	Cadaverina e Putrescina: Formação, Estrutura e Funções Biológicas 25	
3.4	Importância Forense	27
4.1	Materiais, Reagentes e Equipamentos.....	29
4.2	Amostras Biológicas	30
4.3	Preparo das Amostras.....	31
4.4	Procedimentos Analíticos com HPLC	33
5.1	Quantificação de Aminas Biogênicas na Amostra de Tecido Mumificado	35
5.2	Resultados	35
5.2.1	Cadaverina	35
5.2.2	Putrescina.....	37
5.3	Comparação com a Literatura	39
5.4	Implicações Forenses.....	40
6	Referências	43

INTRODUÇÃO

A decomposição cadavérica é um fenômeno natural que envolve uma complexa interação entre fatores físicos, químicos e biológicos. Desde os primeiros momentos após a morte, o corpo humano passa por uma série de alterações estruturais e bioquímicas que culminam na degradação total dos tecidos, incluindo as mudanças *post mortem*, descritas por Johnson *et al.* (2023). Embora esse processo seja inevitável, suas manifestações são influenciadas por uma ampla variedade de fatores, como temperatura, umidade, presença de oxigênio, acesso de insetos, tipo de solo e características individuais do corpo, como idade, peso e estado de saúde no momento da morte. Em virtude dessa multiplicidade de influências, a decomposição apresenta uma ampla variabilidade em seus estágios e na produção de subprodutos químicos, que são de grande importância científica e forense (Campos *et al.*, 2013; França, 2018).

Nas últimas décadas, os avanços na tanatologia, área da ciência forense que estuda os fenômenos relacionados à morte, incluindo os processos físicos, químicos e biológicos que ocorrem no organismo após o óbito, e na química forense têm possibilitado o aprofundamento das investigações sobre os compostos formados durante a degradação do corpo humano. Dentre os produtos químicos liberados no processo de putrefação, destacam-se as aminas biogênicas, em especial a cadaverina e a putrescina. Essas substâncias são produzidas principalmente por bactérias anaeróbias da flora intestinal, que degradam aminoácidos específicos liberados após a autólise celular. A cadaverina resulta da descarboxilação da lisina, enquanto a putrescina é derivada da ornitina (Silva *et al.*, 2017; Braga, 2023). Ambas apresentam odor forte e característico, sendo, por esse motivo, importantes marcadores químicos da putrefação. Além de contribuírem para a caracterização sensorial da decomposição, essas aminas têm despertado crescente interesse da comunidade científica por sua aplicabilidade na estimativa do intervalo pós-morte (IPM) e na compreensão dos estágios de degradação dos tecidos (Fernandes *et al.*, 2017; Zhang *et al.*, 2020).

A análise dessas substâncias em amostras biológicas provenientes de cadáveres oferece uma oportunidade única de correlacionar a presença e a concentração de determinados compostos com o tempo de morte e as condições ambientais às quais o corpo foi submetido. Em especial, situações atípicas de

decomposição, como a mumificação natural, representam um campo promissor de investigação. A mumificação, fenômeno em que há desidratação acelerada e conservação parcial ou total dos tecidos, pode ocorrer em ambientes quentes, secos ou ventilados, impedindo a atuação intensa de micro-organismos (Ferreira *et al.*, 2017). No entanto, mesmo nesses casos, a atividade microbiana inicial pode ter ocorrido, ainda que por um curto período, possibilitando a formação de compostos típicos da putrefação, como as aminas voláteis (Carter *et al.*, 2008).

Neste contexto, a aplicação de técnicas analíticas avançadas, como a cromatografia líquida de alta eficiência (HPLC), tem se mostrado eficiente para detectar e quantificar aminas biogênicas em amostras de tecidos humanos (Cheng *et al.*, 2023). A derivatização das aminas com reagentes específicos, como o cloreto de dansila, permite sua visualização por meio de detecção UV, conferindo sensibilidade e seletividade às análises (Learey *et al.*, 2018; Snyder *et al.*, 2010). Dessa forma, é possível obter dados precisos sobre a presença dessas substâncias mesmo em condições de preservação dos tecidos, como ocorre nos casos de mumificação.

Este trabalho propõe-se a contribuir para o campo da química forense por meio da investigação da presença de aminas biogênicas em amostras de tecido humano mumificado de forma natural, oriundo de um cadáver encontrado na cidade de Barracão (PR). Ao quantificar cadaverina e putrescina, busca-se compreender até que ponto compostos típicos da decomposição podem ser detectados em estados de preservação parcial, além de explorar o potencial desses marcadores químicos na estimativa do estágio de decomposição e das condições ambientais as quais o corpo foi encontrado.

OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Quantificar os compostos cadaverina e putrescina por meio de cromatografia líquida em tecidos humanos mumificados, visando sua aplicação forense.

2.2 Objetivos Específicos

- Investigar os processos químicos que ocorrem após a morte em tecidos orgânicos humanos;
- Identificar os compostos químicos cadaverina e putrescina produzidos durante as fases de decomposição ou preservação de cadáveres;
- Avaliar as variáveis que influenciam a decomposição ou a preservação de material biológico;
- Descrever os padrões químicos que podem ser observados nos tecidos humanos em diferentes condições pós-morte;
- Fornecer uma estimativa do estágio de decomposição.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A decomposição é um processo biológico e químico que se inicia logo após a morte e envolve uma série de transformações físicas, químicas e microbiológicas nos tecidos corporais. Esse processo é normalmente dividido em estágios, de acordo com a Figura 1, sendo eles: fresco, enfisematoso (ou putrefativo), coliquativo, esqueletização e, em certas condições, mumificação ou formação de adipocera (Campos *et al.*, 2013).

Figura 1 – Representação de mão humana em diferentes estágios de decomposição



Fonte: Mundo Tentacular (2023)

Durante essas fases, ocorrem reações de degradação de proteínas, lipídios e carboidratos, muitas vezes conduzidas pela ação de microrganismos presentes no próprio corpo ou no ambiente. Entre os compostos produzidos, destacam-se as aminas biogênicas, como a cadaverina e a putrescina, formadas principalmente pela degradação de aminoácidos (Vass, 2001). Esses compostos são relevantes na área forense, pois servem como indicadores químicos da progressão da decomposição.

A velocidade com que esses processos ocorrem depende de diversos fatores, como temperatura, umidade, acesso de insetos, tipo de solo e localização do cadáver (Campos *et al.*, 2013).

3.1 Processos e Fases da Decomposição Cadavérica

A decomposição cadavérica é um processo complexo e dinâmico, iniciado imediatamente após a morte. Esse processo depende de fatores como temperatura, umidade, acesso ao oxigênio, presença de insetos e localização do corpo. Segundo Pinheiro (2006), “a decomposição do corpo humano é influenciada por uma série de fatores ambientais e individuais que determinam a velocidade e as características do processo putrefativo”.

A fase inicial da decomposição é conhecida como fase fresca, que ocorre entre as primeiras 24 a 72 horas após a morte, caracterizada pela autólise, de acordo com as Figuras 3 e 4. Durante essa etapa, as células do corpo humano, privadas de oxigênio, passam a se degradar por ação de enzimas intracelulares, especialmente lisossômicas. Esse processo leva à desorganização dos tecidos, sem envolvimento de agentes externos como bactérias. As alterações visíveis incluem a rigidez cadavérica (*rigor mortis*), manchas hipostáticas (*livor mortis*) e o resfriamento do corpo (*algor mortis*), os quais são importantes indicadores no contexto forense (França, 2018; Gonçalves, 2019; Heard, 2018).

A fase de autólise começa imediatamente após a morte e é marcada pela autodigestão celular. Este processo é desencadeado pela liberação de enzimas lisossômicas que quebram os componentes celulares. Durante a autólise, há a liberação de aminoácidos, açúcares simples e outros produtos de degradação celular. Este estágio é crucial para iniciar a decomposição, pois prepara o tecido para a ação dos microrganismos que seguem na fase de putrefação (Di Paolo *et al.*, 2023).

A desidratação cadavérica ocorre pela perda passiva de fluidos corporais e é influenciada pela temperatura, umidade, circulação de ar e condições anteriores do cadáver. Pode provocar sinais como mancha escura na esclerótica, opacificação da córnea, película viscosa no olho, enrijecimento e escurecimento das mucosas e perda de peso (Souza *et al.*, 2018; Croce e Croce Jr., 2012).

O resfriamento pós-morte (*algor mortis*) resulta da interrupção do metabolismo, fazendo com que a temperatura corporal caia cerca de 1 °C por hora até se igualar à do ambiente. Esse equilíbrio ocorre em cerca de 24 a 26 horas nos adultos e 20 horas nas crianças, variando conforme fatores como peso, gordura corporal e condições externas (França, 2018; Croce e Croce Jr., 2012).

A rigidez cadavérica (*rigor mortis*) é uma contração muscular que surge entre 1 a 3 horas após a morte, devido à ausência de ATP, conforme a Figura 2. Ela se instala e desaparece de forma sequencial, da face aos membros inferiores, completando-se em até 15 horas e desaparecendo em até 24 horas, embora possa durar mais em alguns casos (Meléndez, 2018; Souza *et al.*, 2018; Leite e Prado, 2019). O processo é acelerado se houver acidose no momento da morte, por conta da queda do pH muscular (Presnell e Denton, 2015).

Figura 2: Rigor mortis no braço direito.



Fonte: PRESNELL e DENTON (2015)

Figura 3: Autólise presente em animal



Fonte: Mundo Tentacular (2023)

Figura 4: Coloração esverdeada no abdômen.



Fonte: PRESNELL e DENTON (2015)

Após a autólise, inicia-se a putrefação, que costuma ocorrer entre 3 e 7 dias após a morte, fase caracterizada pela atividade de bactérias anaeróbias, principalmente as da flora intestinal. Esses micro-organismos degradam proteínas e

outros componentes celulares, liberando gases como: metano, amônia, gás carbônico, hidrogênio, sulfeto, cadaverina e putrescina, além de ácidos orgânicos e álcoois. Os gases provocam a distensão das cavidades corporais, especialmente o abdômen, levando ao rompimento da pele e formação de bolhas. A pele pode adquirir coloração esverdeada devido à presença de sulfemoglobina. Insetos necrófagos, conforme a Figura 5, como moscas e besouros, são atraídos pelo odor fétido e iniciam o consumo dos tecidos, acelerando ainda mais o processo (Campos *et al.*, 2013; Garcia, 2015; Santos *et al.*, 2022).

Figura 5: Início da putrefação em animal.



Fonte: Mundo Tentacular (2023)

Com o avanço da putrefação, o corpo entra em uma fase de intensa liquefação dos tecidos, chamada de decomposição ativa ou coliquativa, que inicia-se geralmente entre o 5º e o 10º dia após a morte e pode se estender por até duas semanas. Os fluidos produzidos são ricos em nutrientes, promovendo a proliferação de micro-organismos e atraindo grande quantidade de larvas, de acordo com a Figura 6. A pele pode se desprender com facilidade e os órgãos internos tornam-se irreconhecíveis. Esse estágio é fortemente influenciado pelas condições ambientais, podendo ser acelerado por altas temperaturas ou retardado em ambientes frios e secos (Vass, 2001).

Figura 6: Decomposição ativa em animal.



Fonte: Mundo Tentacular (2023)

Posteriormente, o corpo entra na fase de decomposição avançada, também chamada de fermentação butírica, que ocorre entre 2 e 4 semanas após a morte. Nessa etapa, a maioria dos tecidos moles já foi degradada. A atividade bacteriana diminui e organismos como fungos e actinobactérias tornam-se predominantes (Cobaugh *et al.*, 2015). Cartilagens, tendões e ligamentos resistem à decomposição por mais tempo, de acordo com as Figura 7 e 8. O odor característico começa a reduzir, e o corpo perde suas formas originais (Souza *et al.*, 2016).

Figura 7: Corpo humano em estágio avançado de putrefação.



Fonte: Presnell e Denton (2015)

Figura 8: Animal em estágio de decomposição avançada.



Fonte: Mundo Tentacular (2023)

Bactérias anaeróbias específicas produzem ácidos orgânicos, como o ácido butírico. Este ácido é responsável por um odor rançoso característico. A fermentação butírica ocorre geralmente em condições em que há menos oxigênio disponível, e a presença de ácido butírico é um indicativo do avanço na decomposição (Garcia & Ruiz, 2022).

A fase final é a esqueletização, pode iniciar-se após a 3ª ou 4ª semana, mas o tempo para esqueletização total pode variar de 1 mês a mais de 1 ano, em que os tecidos moles desaparecem completamente, restando apenas ossos e, ocasionalmente, cartilagens, conforme as Figuras 9 e 10. O tempo necessário para essa etapa varia de acordo com as condições ambientais. Ambientes quentes e úmidos tendem a acelerar o processo, enquanto locais secos e frios podem retardá-lo. A presença de animais necrófagos e a exposição ao ar livre também influenciam significativamente a velocidade da esqueletização (França, 2018).

Figura 9: Corpo humano em esqueletização.



Fonte: Presnell e Denton (2015)

Figura 10: Corpo de animal em estágio de esqueletização.



Fonte: Mundo Tentacular (2023)

Em certos casos, a decomposição pode seguir um caminho atípico, resultando na mumificação natural. Esse fenômeno ocorre quando o corpo é submetido a ambientes extremamente secos, quentes ou frios, que dificultam a proliferação de microrganismos e inibem os processos putrefativos. Pode ocorrer a partir de poucos dias até semanas após a morte. Os fluidos corporais evaporam rapidamente e os tecidos se desidratam, tal como a Figura 11, preservando pele, músculos e outros tecidos. A mumificação natural pode ocorrer em desertos, cavernas, criptas e até mesmo em ambientes urbanos com circulação de ar e baixa umidade, e fornece informações valiosas para investigações forenses e arqueológicas (Ferreira *et al.*, 2017).

Figura 11: Corpo humano em mumificação natural.



Fonte: Malthus (2023)

3.2 Aminas biogênicas

As aminas biogênicas são compostos orgânicos nitrogenados de baixa massa molecular, geralmente formados por meio da descarboxilação enzimática de aminoácidos naturais, em um processo amplamente influenciado por condições microbianas e ambientais. Esses compostos estão presentes em organismos vivos e desempenham funções fisiológicas importantes, como neurotransmissores e reguladores do sistema nervoso. No entanto, após a morte, as aminas biogênicas passam a ser formadas em grande quantidade como subprodutos da degradação de proteínas e outros componentes celulares, tornando-se marcadores relevantes no estudo da decomposição cadavérica (Silva *et al.*, 2017).

Em cadáveres, as aminas biogênicas são produzidas predominantemente por bactérias da flora intestinal, que atuam na decomposição anaeróbia dos tecidos. Entre os principais aminoácidos precursores estão a lisina, a histidina, a ornitina, a tirosina e o triptofano. A partir deles, formam-se substâncias como histamina, tiramina, feniletilamina, espermidina, espermina, cadaverina, putrescina e outras. A formação dessas aminas depende de diversos fatores, como temperatura, pH, umidade, oxigenação e tipo de micro-organismos presentes, sendo por isso também utilizadas como indicadoras do tempo de morte e do estágio de decomposição (Freitas *et al.*, 2020).

Do ponto de vista analítico, a detecção e quantificação das aminas biogênicas têm sido objeto de crescente interesse na ciência forense. Técnicas como a cromatografia líquida de alta eficiência (HPLC) e cromatografia gasosa acoplada à espectrometria de massas (GC-MS) são comumente utilizadas para identificação dessas substâncias em amostras biológicas. Essas análises fornecem dados objetivos que contribuem para a estimativa do intervalo *post-mortem*, além de auxiliarem na compreensão das condições em que ocorreu a decomposição (Martins *et al.*, 2018; Robinson *et al.*, 2022).

Dentre as diversas aminas formadas ao longo do processo de decomposição cadavérica, estudado na tafonomia forense, área da ciência forense que estuda os processos de decomposição e alterações sofridas por um corpo após a morte, conforme Gill-King (1997), a cadaverina e a putrescina merecem destaque por sua abundância e pela forte associação ao odor característico da putrefação. Ambas são produzidas por meio da descarboxilação bacteriana de aminoácidos específicos: a cadaverina a partir da lisina, e a putrescina a partir da ornitina. Segundo Braga (2023), “as aminas biogênicas, como a cadaverina e a putrescina, têm sido amplamente estudadas devido à sua relevância como biomarcadores na análise forense da decomposição cadavérica”.

3.3 Cadaverina e Putrescina: Formação, Estrutura e Funções Biológicas

A cadaverina, conhecida quimicamente como 1,5-pentanodiamina, possui fórmula molecular $C_5H_{14}N_2$ e é classificada como uma diamina alifática. Essa molécula apresenta uma cadeia linear composta por cinco átomos de carbono com dois grupos amina ($-NH_2$) nas extremidades. Sua formação ocorre a partir da descarboxilação da lisina, um aminoácido essencial, catalisada pela enzima lisina descarboxilase, conforme a Figura 12. Essa reação é amplamente realizada por micro-organismos intestinais, especialmente em ambientes anaeróbios como o cólon (Miller; Bass, 2015).

Em organismos vivos, a cadaverina é sintetizada em pequenas quantidades e pode atuar na regulação da diferenciação celular, crescimento tecidual e manutenção da integridade da mucosa intestinal. Também pode estabilizar membranas celulares e interagir com estruturas fosfolipídicas (Leite *et al.*, 2018). Contudo, a produção exagerada dessa amina em situações patológicas, como

infecções e disbiose intestinal, pode desencadear processos inflamatórios e toxicidade celular (Fang *et al.*, 2010; Medeiros *et al.*, 2020).

Após a morte, a integridade das células é rompida durante a autólise, liberando aminoácidos intracelulares como a lisina. Em seguida, com a perda de defesa imunológica e a proliferação de bactérias anaeróbias, há intensa formação de cadaverina nos tecidos. Ela torna-se então um dos principais compostos voláteis malcheirosos liberados durante a putrefação, sendo facilmente detectada em cadáveres em decomposição (Zhang *et al.*, 2020; Costa *et al.*, 2018).

Além de contribuir significativamente para o odor característico da decomposição, a cadaverina participa da desnaturação de proteínas, interferência no pH local e facilita a proliferação de bactérias necrófagas. Também atua como sinal químico para insetos decompositores como moscas e besouros (Pavan *et al.*, 2017).

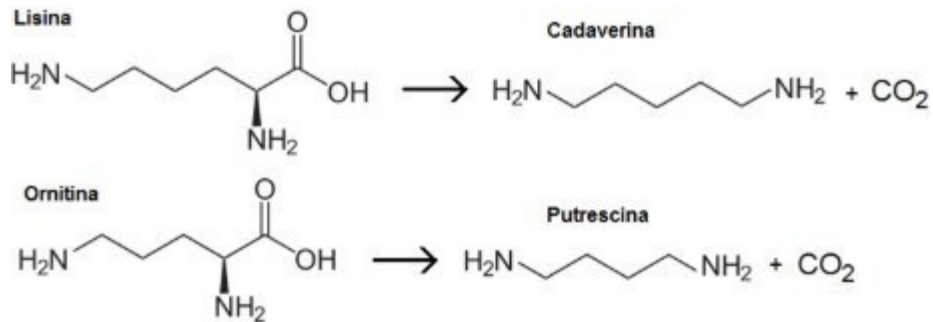
A putrescina, ou 1,4-butanodiamina, é outra diamina altamente relevante tanto no metabolismo humano quanto nos processos cadavéricos. Sua fórmula molecular é $C_4H_{12}N_2$ e sua estrutura conta com quatro átomos de carbono entre dois grupos amina terminais. Ela é formada pela descarboxilação da ornitina, de acordo com a Figura 12, aminoácido não essencial que deriva da arginina no ciclo da ureia, catalisada pela enzima ornitina descarboxilase (Williams; Gordon, 2012).

Durante a vida, a putrescina desempenha papel fundamental na biossíntese de outras poliaminas, como a espermidina e a espermina, que participam de diversos processos celulares, incluindo a replicação do DNA, a diferenciação celular, a modulação da apoptose e a regulação de canais iônicos. A apoptose é um mecanismo de morte celular programada, essencial para o desenvolvimento e manutenção dos tecidos, atuando na remoção de células danificadas ou desnecessárias de forma controlada e sem provocar inflamação. Em níveis fisiológicos, a putrescina é indispensável ao equilíbrio celular; no entanto, quando produzida em excesso, pode favorecer processos inflamatórios, carcinogênese e alterações no metabolismo celular (Nishimura *et al.*, 2006; Butler, 2020; Pereira *et al.*, 2018).

No contexto da morte, a putrescina é produzida em grandes quantidades durante a putrefação, à medida que ocorre a degradação proteica e liberação de ornitina nos tecidos. A atividade microbiana acelera esse processo, especialmente em regiões ricas em microbiota, como o trato gastrointestinal. Essa amina é um dos primeiros compostos nitrogenados a serem liberados após a morte, sendo marcadora importante da atividade bacteriana cadavérica (Klein *et al.*, 2021).

A putrescina, assim como a cadaverina, apresenta odor forte e desagradável, contribuindo para o perfil químico do cheiro de decomposição. Ela também altera o ambiente químico local, afetando o pH e favorecendo o crescimento microbiano. Sua presença pode ser detectada em tecidos e líquidos corporais de cadáveres, e a quantidade de sua concentração indica o estágio de decomposição (Oliveira *et al.*, 2019).

Figura 12: Cadaverina e Putrescina.



Fonte: Química Nova Interativa (2025)

3.4 Importância Forense

A identificação e quantificação de compostos voláteis produzidos durante a decomposição têm se tornado uma ferramenta valiosa nas ciências forenses. Entre esses compostos, a cadaverina e a putrescina se destacam por sua presença consistente em diferentes fases da putrefação e por seu papel na caracterização do estado cadavérico. Sua importância forense está relacionada a diversos aspectos: desde a estimativa do intervalo pós-morte (IPM), passando pela atração de insetos necrófagos, até a análise de ambientes contaminados por decomposição humana (Vass *et al.*, 2002; Ashbaugh, 2021).

Essas duas aminas biogênicas, produzidas pela degradação bacteriana dos aminoácidos lisina e ornitina, são compostos altamente voláteis e facilmente detectáveis por técnicas analíticas como cromatografia gasosa acoplada à espectrometria de massas (GC-MS) e a cromatografia líquida de alta eficiência (HPLC). A produção dessas substâncias inicia-se precocemente, ainda nas fases iniciais da putrefação, e tende a se intensificar com a progressão do processo cadavérico, tornando-as marcadores úteis (Fernandes *et al.*, 2017).

Na prática forense, a presença de cadaverina e putrescina em amostras de solo, tecidos, insetos ou mesmo no ar ao redor de cadáveres pode servir como indicador químico da decomposição. Estudos têm mostrado que seus níveis seguem

padrões relativamente previsíveis (Zhang *et al.*, 2020). Além disso, como são compostos resistentes a variações ambientais moderadas, eles continuam detectáveis mesmo após a redução dos tecidos moles, estendendo sua utilidade a corpos em estados mais avançados de decomposição.

Outro ponto relevante é a ação dessas aminas como atrativos químicos para insetos necrófagos, como dípteros das famílias Calliphoridae e Sarcophagidae. A detecção precoce dessas substâncias em cadáveres recém-expostos ao ambiente pode explicar o rápido aparecimento de larvas. Esse fenômeno contribui diretamente com a entomologia forense, área da ciência que estuda os insetos associados a restos humanos para fins legais, especialmente na estimativa do intervalo pós-morte (IPM), uma vez que o ciclo de vida desses insetos fornece informações valiosas sobre o tempo decorrido desde o óbito (Pavan *et al.*, 2017).

A análise da cadaverina e da putrescina também tem sido aplicada na detecção de cadáveres ocultos ou enterrados, uma vez que esses compostos podem migrar pelo solo e atingir a superfície, onde são captados por cães farejadores ou sensores químicos. Além disso, têm sido investigados em contextos de desastres de massa, onde o reconhecimento de restos humanos é dificultado pela mistura de materiais orgânicos (De Gans *et al.*, 2013).

Por fim, há interesse crescente na padronização de perfis químicos de decomposição, nos quais a cadaverina e a putrescina figuram como marcadores centrais. Esses perfis podem ser utilizados não apenas em medicina legal, mas também na ecotoxicologia, arqueologia e no desenvolvimento de tecnologias para detecção de cadáveres em ambientes urbanos e rurais (Fernandes *et al.*, 2017).

3.5 HPLC

A técnica de HPLC é amplamente utilizada para análise qualitativa e quantitativa de compostos orgânicos (Barros, 2021), como as aminas biogênicas, devido à sua alta sensibilidade e capacidade de separar compostos com diferentes características químicas, como polaridade e tamanho molecular. A cromatografia líquida é baseada em princípios de separação de substâncias, onde os compostos presentes na amostra interagem com uma fase estacionária (coluna) e uma fase móvel (solventes), o que permite que eles se separem com base em suas propriedades físicas e químicas (Snyder *et al.*, 2010).

4 METODOLOGIA

A metodologia adotada neste estudo para análise das aminas biogênicas foi inspirada no protocolo descrito por Learey *et al.* (2018) e consiste em uma sequência de etapas que envolvem a extração, derivatização e detecção das aminas utilizando cromatografia líquida de alta eficiência (HPLC) com detecção UV.

A coleta foi autorizada pela Polícia Científica e pelo Comitê de Ética em Pesquisa (CEP), sob o parecer nº 7.379.467, CAAE 84254924.9.0000.0177, em 13 de fevereiro de 2025. Cabe ressaltar que, por se tratar de uma pesquisa envolvendo material biológico humano, a legislação brasileira exige que sejam utilizados exclusivamente cadáveres não reclamados, conforme a Lei nº 8.501, de 30 de novembro de 1992, em conformidade também com os princípios de proteção de dados pessoais (Doneda, 2020). Dessa forma, o projeto foi aprovado com a restrição de uso de amostras provenientes apenas de cadáveres não identificados ou não reclamados. A única amostra disponível que atendia a esses critérios legais e éticos foi proveniente de um corpo em estado de mumificação natural, encontrado no interior do estado do Paraná.

4.1 Materiais, Reagentes e Equipamentos

O equipamento principal utilizado foi o cromatógrafo líquido de alta eficiência (HPLC) acoplado a um detector UV, da marca Agilent Infinity 1260 III, que permite a quantificação das aminas biogênicas após sua derivatização com cloreto de dansila, um reagente que introduz um grupo cromóforo na estrutura química das aminas. Este grupo cromóforo confere propriedades de absorção de luz UV, possibilitando a detecção das aminas, que, de outra forma, seriam invisíveis ao detector. A derivatização é uma técnica essencial, pois as aminas biogênicas como putrescina, cadaverina e histamina não apresentam absorção significativa de luz UV sem a modificação química que ocorre durante esse processo (Learey *et al.*, 2018; Stuart, 2021). A fase móvel utilizada foi composta por água ultrapura contendo 1% de ácido acético (fase A) e acetonitrila com 1% de ácido acético (fase B), empregadas em gradiente para garantir a adequada separação dos analitos. A vazão de alimentação foi mantida em 0,8 mL/min e o tempo total de detecção de cada amostra foi de 15 minutos por corrida.

Para a cadaverina, foi elaborada uma curva analítica a partir de diluições do padrão, cuja concentração inicial era 0,450072 mg/mL e pureza de 98,7%. As soluções-padrão foram preparadas com diferentes volumes de alíquotas (0,0025 a 0,2 mL) do padrão, diluídas em água ultrapura até o volume final de 10 mL, resultando em concentrações que variaram de 0,000112518 a 0,00900144 mg/mL. Para a putrescina, a curva foi construída a partir de um padrão com concentração inicial de 0,404 mg/mL e pureza de 100%, cujas diluições também foram feitas em água ultrapura, gerando concentrações entre 0,000101 e 0,00808 mg/mL.

4.2 Amostras Biológicas

As amostras biológicas utilizadas neste estudo foram retiradas de um corpo não reclamado, em decomposição, encontrado em estado de mumificação natural, localizado na cidade de Barracão, no Paraná, Brasil, em 2025. O corpo foi encontrado em uma área de mata densa, onde o processo de decomposição natural foi acelerado por fatores ambientais, como calor e umidade, que contribuíram para a preservação dos tecidos moles pela perda de umidade e, ao mesmo tempo, a preservação parcial da pele e dos músculos (Rollo *et al.*, 2013). Devido à mumificação, os órgãos internos estavam completamente preservados em um estado seco e endurecido, sem sinais de tecido mole remanescente.

Durante os meses que antecederam a descoberta do cadáver, especificamente em janeiro, fevereiro e março de 2025, a região apresentou temperaturas médias de aproximadamente 24 °C, 23 °C e 22 °C, respectivamente, resultando em uma média trimestral de 23 °C (INMET, 2025). Além disso, a umidade relativa do ar na região, característica do clima subtropical úmido (Cfa), costuma manter-se elevada ao longo do ano, favorecendo processos de desidratação seletiva em ambientes com ventilação e baixa precipitação pontual.

As amostras foram retiradas especificamente de uma porção de pele e músculo do tórax, uma área que apresentava maior preservação em relação a outras regiões do corpo. O tecido restante, especialmente os órgãos internos, não possuía quantidade suficiente de material biológico que pudesse ser utilizado para a análise, devido à perda de proteínas essenciais para a detecção das aminas biogênicas. A pele e o músculo do tórax, embora em estado de mumificação natural, ainda

continham vestígios suficientes de proteínas que permitiram a extração das aminas biogênicas necessárias para a análise.

A amostra biológica foi acondicionada em um frasco plástico previamente autoclavado, fornecido pela Polícia Científica no momento da coleta. O frasco foi completamente vedado para evitar qualquer tipo de contaminação ou vazamento durante o transporte. Em seguida, o material foi inserido em uma caixa térmica simples, também vedada, contendo blocos de gelo para garantir a manutenção de temperaturas mais baixas e preservar a integridade físico-química da amostra. Todo o conjunto foi então lacrado dentro de uma caixa de envio padrão dos Correios, encaminhado via SEDEX para o laboratório Atual Labs, localizado em Bragança Paulista – SP. A entrega ocorreu no prazo de três dias, sem quaisquer sinais de violação ou degradação do conteúdo no momento do recebimento, tal como observa-se na Figura 13.

Figura 13: Amostras utilizadas para a análise.



Fonte: Autoria Própria (2025)

4.3 Preparo das Amostras

O preparo das amostras para análise envolveu as etapas detalhadas a seguir:

- **Pesagem e Extração:** Foi realizada a pesagem de aproximadamente 8,3538 g da matriz biológica (pele e músculo do tórax), que foi então tratada com uma solução extratora composta por ácido perclórico 0,6 mol/L, preparado a partir de ácido perclórico PA diluído em água ultrapura. A solução extratora utilizada foi o ácido perclórico, que

promove a eficiente extração das aminas biogênicas da matriz biológica. A proporção entre a massa da amostra e o volume da solução extratora foi de 1:2, utilizando-se 16,7 mL da solução para os 8,3538 g da amostra. A extração ocorreu durante 30 minutos, a temperatura controlada de 25 °C, assegurando a adequação do processo para posterior análise.

- **Banho Ultrassônico:** A solução extratora foi submetida a um banho ultrassônico de bancada operando a 40 kHz, mantido a uma temperatura controlada de 25 °C por 30 minutos, com o objetivo de acelerar a extração dos analitos. O uso do banho ultrassônico aumenta a eficiência da extração, garantindo que as aminas biogênicas sejam liberadas de maneira eficiente da matriz biológica (López et al., 2015).
- **Centrifugação e Separação:** Após o banho ultrassônico, a solução foi centrifugada a 4.000 rpm por 10 minutos utilizando uma centrífuga de bancada para volumes de 50 mL, a fim de separar o sobrenadante dos resíduos sólidos. O sobrenadante, que contém as aminas biogênicas extraídas, foi cuidadosamente retirado para a etapa de derivatização. Essa centrifugação é crucial para garantir que a amostra a ser injetada no HPLC esteja limpa e livre de contaminantes sólidos (Araujo et al., 2014).
- **Derivatização com Cloreto de Dansila:** O sobrenadante foi tratado com 1 mL da amostra e 200 µL de cloreto de dansila (10 mg/mL em acetona), reagindo com as aminas biogênicas para formar derivados que podem ser detectados pela técnica de absorção em UV.
- **Filtração e Injeção no HPLC:** Após a derivatização, a solução foi filtrada utilizando filtro de seringa com porosidade de 0,22 µm em material PTFE, para remover quaisquer impurezas não dissolvidas antes da injeção no sistema HPLC. A filtração garante que apenas a amostra derivatizada e limpa seja analisada. A amostra preparada foi então injetada no cromatógrafo com volume de injeção de 20 µL, utilizando uma coluna C18 (250 mm × 4,6 mm, 5 µm), com a temperatura da coluna mantida em 25 °C, e detecção por UV a 254 nm.

4.4 Procedimentos Analíticos com HPLC

A análise das aminas biogênicas foi realizada utilizando cromatografia líquida de alta eficiência (HPLC) acoplado a um detector UV, HPLC Agilent Infinity 1260 III, segundo a Figura 14.

Figura 14: HPLC Agilent 1260 Infinity II



Fonte: Autorial Própria (2025)

Conforme as condições descritas por Learey et al. (2018), o equipamento foi operado em fase reversa, utilizando uma coluna de sílica do tipo C18, que permite a separação eficiente dos analitos com base em suas propriedades de polaridade. O processo de detecção foi realizado por espectrofotometria no ultravioleta (UV), com comprimento de onda ajustado para 254 nm, valor no qual os derivados dansilados das aminas biogênicas apresentam máxima absorção. O tempo de corrida foi configurado para 15 minutos por amostra, permitindo adequada separação e detecção dos compostos analisados.

Antes da análise das amostras, foi realizada a calibração do equipamento por meio da construção de curvas analíticas específicas para cada analito. Para a cadaverina, utilizou-se um padrão primário com pureza de 98,7% e concentração estoque de 0,450072 mg/mL. Foram preparadas cinco soluções-padrão em concentrações de 0,000112518, 0,000450072, 0,000900144, 0,00450072 e 0,00900144 mg/mL, obtidas por diluição volumétrica em balões de 10 mL com água ultrapura. Para a putrescina, foi utilizado padrão primário com 100% de pureza e concentração estoque de 0,404 mg/mL, com diluições que resultaram nas concentrações de 0,000101, 0,000404, 0,000808, 0,00404 e 0,00808 mg/mL. As curvas foram processadas antes de cada conjunto de análises, juntamente com amostras branco e controles de qualidade (QC), visando garantir a precisão, a exatidão e a reprodutibilidade do método cromatográfico (Snyder *et al.*, 2010; Cafaro *et al.*, 2024; Harris, 2020).

4.5 Utilização de Inteligência Artificial

Para auxiliar na elaboração deste Trabalho de Conclusão de Curso, foi utilizada a ferramenta de Inteligência Artificial DeepSeek, com foco na melhoria da redação científica. A ferramenta foi empregada exclusivamente para sugerir aprimoramentos nas construções frasais, substituição de palavras por sinônimos mais apropriados ao contexto técnico e acadêmico, além de ajustes na coesão e clareza dos parágrafos. O DeepSeek foi utilizado como suporte linguístico, sem interferência na análise dos resultados ou no conteúdo técnico do trabalho. Todas as sugestões fornecidas pela ferramenta foram criteriosamente avaliadas, sendo incorporadas apenas quando compatíveis com os objetivos do texto e com a linguagem científica exigida. O uso da IA contribuiu para tornar a redação mais clara, fluida e adequada às normas formais da escrita acadêmica.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Quantificação de Aminas Biogênicas na Amostra de Tecido Mumificado

Os resultados da quantificação estão expressos em miligramas por quilograma (mg/kg) de tecido. A amostra apresentou 6,93 mg/kg de cadaverina e 6,46 mg/kg de putrescina.

Esses valores são especialmente significativos quando se considera que o corpo encontrava-se em um estágio avançado de decomposição, com tecidos secos e preservação natural, o que pode influenciar diretamente a liberação e degradação das aminas biogênicas (Vass *et al.*, 2002).

5.2 Resultados

5.2.1 Cadaverina

A curva analítica construída para a cadaverina demonstrou excelente desempenho estatístico e analítico, com um coeficiente de determinação (R^2) igual a 0,99887. Esse valor próximo da unidade indica que mais de 99,88% da variação observada na resposta do detector pode ser explicada pelas concentrações utilizadas, evidenciando a alta confiabilidade do método. A equação da reta permite determinar a concentração do analito a partir da resposta do detector, que, neste caso, corresponde à área do pico registrada no cromatograma. Essa área reflete a quantidade de luz absorvida pelos derivados dansilados da cadaverina, detectada por espectrofotometria no comprimento de onda de 254 nm, sendo diretamente proporcional à concentração do composto analisado. O valor elevado de R^2 indica uma linearidade quase perfeita entre a concentração e a resposta obtida, o que confere robustez ao modelo analítico.

A sensibilidade do método é representada pelo coeficiente angular da curva, o qual expressa o quanto a resposta do detector varia em função da concentração. Nesse caso, valores elevados desse coeficiente confirmam que mesmo pequenas variações na concentração da cadaverina foram detectadas com clareza, o que reforça a adequação do método para análises forenses, nas quais os níveis de aminas biogênicas podem ser baixos, especialmente em tecidos já preservados. Além disso, o intercepto da curva obtida é bastante próximo de zero, indicando que não houve

interferência significativa na resposta do detector na ausência do analito, o que melhora ainda mais a precisão e a robustez do modelo.

A análise estatística adicional da curva revelou parâmetros altamente satisfatórios: o coeficiente de correlação (R) foi de 0,99943, indicando correlação quase perfeita entre as variáveis. O erro padrão residual (STD Residual) foi de 1,49012, valor baixo que reforça a precisão da reta de regressão ajustada aos pontos experimentais. Esses dados estatísticos demonstram que o modelo linear adotado apresenta excelente qualidade e pode ser utilizado com segurança para a quantificação da cadaverina em amostras biológicas.

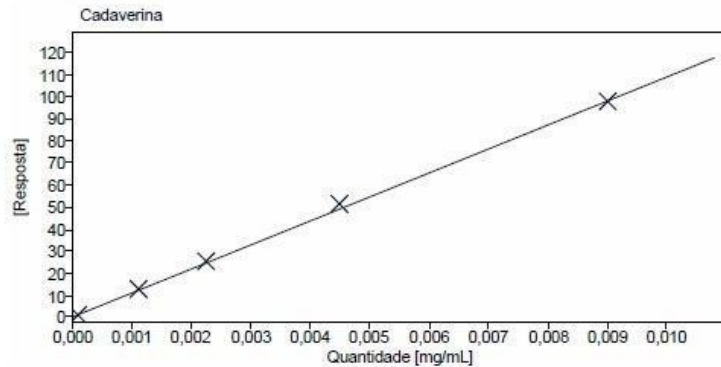
Para a construção da curva, foram utilizadas cinco soluções-padrão obtidas a partir de diferentes volumes (alíquotas) da solução estoque de cadaverina, com concentração inicial de 0,450072 mg/mL e pureza de 98,7%. As alíquotas utilizadas foram de 0,0025; 0,025; 0,05; 0,1 e 0,2 mL, todas diluídas em balões volumétricos de 10 mL com água ultrapura. As concentrações finais resultantes foram, respectivamente, de 0,000112518; 0,00112518; 0,00225036; 0,004501 e 0,00900144 mg/mL. Esses pontos foram escolhidos de forma a cobrir uma faixa de concentração adequada à detecção esperada nas amostras biológicas, garantindo abrangência e uniformidade da resposta cromatográfica.

As análises dessas soluções foram realizadas após derivatização com cloreto de dansila, processo necessário para que as aminas biogênicas adquirissem propriedades cromofóricas detectáveis por espectrofotometria na faixa do ultravioleta. Cada ponto da curva foi analisado em duplicata, assegurando controle da reprodutibilidade do sistema. Os dados obtidos confirmaram não apenas a linearidade do método, mas também a estabilidade e a fidelidade do sinal, elementos indispensáveis em análises quantitativas voltadas à aplicação forense.

Os parâmetros descritos demonstram que o método adotado é altamente sensível, preciso e confiável, estando de acordo com os requisitos de validação cromatográfica para fins forenses. Dessa forma, a curva de calibração obtida é adequada para determinar com segurança a concentração de cadaverina nas amostras de tecido analisadas. A seguir, são apresentados o gráfico da curva analítica (Gráfico 1) e a Tabela 1, que contém os dados referentes aos pontos de calibração utilizados na quantificação.

Gráfico 1: Curva de Calibração da Cadaverina

Composto: Cadaverina
Sinal: DAD1A
RT Esperado: 11,992
Coef. de Corr.: 0,999436
STD Residual: 1,49012
RSD% do RF:
R²: 0,99887
R: 0,99944
Fórmula: $y = ax + b$
a: 10874,15806
b: 0,72900



Fonte: Autoria Própria (2025)

Tabela 1: Dados da Cadaverina.

Ponto da Curva	Aliquota (ml)	Volume Final (ml)	Conc. (mg/ml)
<u>1</u>	<u>0,0025</u>	<u>10</u>	<u>0,000112518</u>
<u>2</u>	<u>0,025</u>	<u>10</u>	<u>0,0011258</u>
<u>3</u>	<u>0,05</u>	<u>10</u>	<u>0,00225036</u>
<u>4</u>	<u>0,1</u>	<u>10</u>	<u>0,004501</u>
<u>5</u>	<u>0,2</u>	<u>10</u>	<u>0,00900144</u>

Fonte: Autoria Própria (2025)

A equação da curva de calibração da Cadaverina apresentou a seguinte forma, de acordo com a Equação 1:

	$y = 10874,15806x + 0,7200$	(1)
--	-----------------------------	------------

5.2.2 Putrescina

A curva de calibração da putrescina também apresentou desempenho satisfatório, evidenciando alta linearidade entre as concentrações preparadas e a resposta do detector. Neste caso, a resposta analítica corresponde à área do pico cromatográfico obtida após derivatização com cloreto de dansila e detecção por UV. A relação direta entre concentração e sinal permitiu o uso da equação da reta como

modelo matemático para a quantificação do analito, com precisão adequada para a aplicação forense proposta neste trabalho.

O coeficiente de determinação da curva foi de 0,99851, o que indica que aproximadamente 99,85% da variação da resposta do detector pode ser explicada pela concentração da putrescina nas soluções-padrão. O coeficiente de correlação (R) foi de 0,99926, reforçando a forte associação linear entre as variáveis, e o valor do erro padrão residual foi de 1,71704, o que demonstra baixa dispersão dos pontos em relação à reta ajustada. Esses parâmetros estatísticos confirmam que o método apresenta boa fidelidade e é adequado para análises quantitativas em concentrações reduzidas.

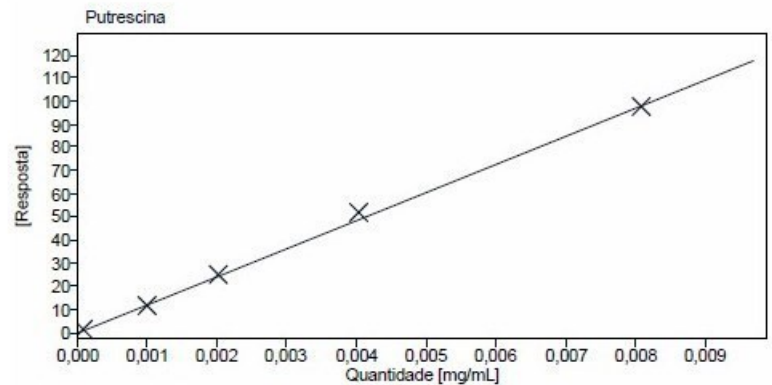
A sensibilidade do sistema também foi satisfatória, evidenciada pelo coeficiente angular da reta, que foi de 12156,48859. Esse valor indica que o método é capaz de gerar respostas analíticas expressivas mesmo para variações mínimas na concentração do analito. Já o intercepto da equação foi de 0,18085, valor considerado baixo e que sugere mínima interferência ou ruído de fundo em concentrações próximas de zero. Tais características tornam a curva adequada para a quantificação da putrescina em amostras de origem biológica.

Foram preparadas cinco diluições, utilizando alíquotas de 0,0025; 0,025; 0,05; 0,1 e 0,2 mL, completadas até o volume final de 10 mL com água ultrapura. As concentrações finais das soluções preparadas foram, respectivamente, de 0,000101; 0,00101; 0,00202; 0,00404 e 0,00808 mg/mL. Esses pontos compuseram a curva de calibração da putrescina.

Com base nesses dados, conclui-se que o modelo linear ajustado foi eficiente para a faixa de concentração estudada, apresentando boa sensibilidade, reprodutibilidade e precisão. A seguir, são apresentados o gráfico da curva de calibração da putrescina (Gráfico 2) e a Tabela 2, que resume os valores utilizados para construção da curva padrão.

Gráfico 2: Análises da Putrescina.

Composto: Putrescina
Sinal: DAD1A
RT Esperado: 10,187
Coef. de Corr.: 0,999256
STD Residual: 1,71704
RSD% do RF:
R²: 0,99851
R: 0,99926
Fórmula: $y = ax + b$
a: 12156,48859
b: 0,18085



Fonte: Autoria Própria (2025)

Tabela 2: Dados da Putrescina.

Ponto da Curva	Aliquota (ml)	Volume Final (ml)	Conc. (mg/ml)
<u>1</u>	<u>0,0025</u>	<u>10</u>	<u>0,000101</u>
<u>2</u>	<u>0,025</u>	<u>10</u>	<u>0,00101</u>
<u>3</u>	<u>0,05</u>	<u>10</u>	<u>0,00202</u>
<u>4</u>	<u>0,1</u>	<u>10</u>	<u>0,004040</u>
<u>5</u>	<u>0,2</u>	<u>10</u>	<u>0,00808</u>

Fonte: Autoria Própria (2025)

Para a Putrescina, a equação da curva de calibração seguiu o formato da Equação 2:

$y = 12156,48859x + 0,18085$	(2)
------------------------------	------------

5.3 Comparação com a Literatura

De acordo com Vass *et al.* (2002), a produção de putrescina e cadaverina ocorre principalmente entre os estágios inflado e de decomposição ativa. Em corpos frescos ou mumificados, os níveis tendem a ser significativamente mais baixos. No entanto, estudos como o de Zhao *et al.* (2013) demonstram que mesmo em condições de seca ou baixa umidade, como em casos de mumificação natural, é possível detectar essas aminas em concentrações mensuráveis, dependendo da história do corpo e do ambiente.

Em cadáveres em estágio ativo, valores de até 15 mg/kg de putrescina e 20 mg/kg de cadaverina foram relatados (Zhao *et al.*, 2013). Percebe-se diferença nos valores encontrados na literatura em corpos em decomposição ativa, pois a amostra estudada estava em estágio de mumificação.

Já em tecidos desidratados, valores médios de 3–5 mg/kg foram identificados (Carter *et al.*, 2008), o que torna os resultados obtidos nesse trabalho (6,93 e 6,46 mg/kg) relativamente elevados, indicando provável atividade putrefativa significativa antes da completa desidratação do corpo.

Esses dados estão de acordo com o que foi descrito na literatura, como por exemplo em estudos de Zhao *et al.* (2013), que relatam a formação de amins mesmo em tecidos submetidos a processos de desidratação intensa, e Carter *et al.* (2008), que descrevem a presença residual desses compostos em tecidos secos.

Além disso, como demonstrado por Vass *et al.* (2002) e Zhang *et al.* (2020), os níveis de cadaverina e putrescina seguem padrões relativamente previsíveis durante os diferentes estágios de decomposição, o que pode auxiliar na caracterização química do estágio em que o corpo se encontra e fornecer pistas sobre as condições ambientais às quais ele foi exposto.

5.4 Implicações Forenses

Os resultados obtidos têm implicações importantes na área da tanatologia forense, inclusive em toxicologia forense (KAPLAN, 2019). Além da identificação das amins biogênicas, é possível realizar uma inferência qualitativa sobre o tempo decorrido desde a morte com base nas concentrações observadas. Estudos prévios indicam que a produção de cadaverina e putrescina ocorre principalmente entre o segundo e o décimo quinto dia após a morte, com pico durante a fase de decomposição ativa. No caso da amostra analisada, os níveis detectados de 6,93 mg/kg (cadaverina) e 6,46 mg/kg (putrescina) são compatíveis com o final da fase putrefativa e o início de um processo de preservação por desidratação. Essa transição indica que o corpo passou por um estágio inicial de decomposição microbiana antes da interrupção do processo pela mumificação. Embora a ausência de registros precisos de tempo pós-morte limite a exatidão da estimativa, os dados obtidos sugerem que a morte tenha ocorrido ao menos entre 5 e 15 dias antes do completo

ressecamento dos tecidos, considerando as condições ambientais e o padrão de formação das aminas descrito na literatura (Zhao et al., 2013; Carter et al., 2008).

A análise das variáveis ambientais é fundamental para compreender os fatores que influenciaram o processo de mumificação natural observado no corpo encontrado em Barracão, Paraná. De acordo com dados históricos do Climateempo e da base climática do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), a combinação entre temperaturas moderadamente altas e umidade relativa sustentada pode ter contribuído para a preservação dos tecidos, promovendo a inibição da atividade microbiana típica da putrefação, o que corrobora o estado mumificado da vítima. Assim, os dados ambientais reforçam a hipótese de que o microclima local, afetando também a ecologia da decomposição (Lopez et al., 2022), desempenhou um papel crucial na dinâmica da decomposição.

Outro ponto relevante é o uso dessas substâncias como indicadores químicos de presença cadavérica em investigações de campo. Trabalhos como os de De Gans *et al.* (2013) sugerem que cadaverina e putrescina podem ser detectadas em amostras de solo, ar e tecidos, inclusive em casos de cadáveres ocultos ou enterrados, o que abre novas possibilidades para a aplicação dessas análises em perícias criminais, operações de resgate e até em contextos de desastres em massa. Além disso, sua atuação como atrativos químicos para insetos necrófagos (PAVAN *et al.*, 2017) também amplia seu uso na entomologia forense, tornando-se um ponto de interseção entre diferentes áreas de investigação *post-mortem*.

6 CONCLUSÃO

O presente Trabalho de Conclusão de Curso teve como objetivo principal a identificação e quantificação das aminas biogênicas cadaverina e putrescina em tecido humano submetido a um processo de mumificação natural, por meio da técnica de cromatografia líquida de alta eficiência (HPLC) com derivatização por cloreto de dansila. As análises realizadas demonstraram que, mesmo em condições que promovem a conservação do tecido, é possível detectar compostos típicos da putrefação, com níveis de 6,93 mg/kg de cadaverina e 6,46 mg/kg de putrescina.

Os resultados obtidos indicam que o corpo analisado passou por um estágio de decomposição ativa antes da completa desidratação, evidenciando que os processos putrefativos ocorreram de maneira significativa antes do início da preservação tecidual. Este dado é de extrema relevância para a tanatologia forense, pois sugere que corpos mumificados podem manter assinaturas químicas da putrefação, as quais podem ser empregadas na estimativa do estágio de decomposição.

Com base nos dados obtidos e em comparação com a literatura especializada, estima-se que o óbito tenha ocorrido entre 5 e 15 dias antes da completa mumificação. Essa hipótese é sustentada pelos níveis relativamente elevados de aminas biogênicas, compatíveis com a fase final de decomposição ativa. Embora não seja possível determinar com precisão o intervalo pós-morte (IPM) apenas com os dados químicos, os resultados contribuem para restringir a janela temporal da morte, sobretudo em contextos nos quais métodos tradicionais, como a entomologia forense ou a análise visual de tecidos frescos, não são aplicáveis.

Dessa forma, conclui-se que a presença de aminas biogênicas em tecidos mumificados é não apenas detectável, mas também relevante para a prática forense. Os dados obtidos neste estudo demonstram que mesmo em condições de preservação natural é possível identificar compostos químicos indicativos de decomposição, os quais contribuem para a estimativa do intervalo pós-morte e para a reconstrução das circunstâncias da morte. A análise de cadaverina e putrescina, portanto, configura-se como uma ferramenta complementar valiosa em casos complexos, em que os sinais morfológicos tradicionais não estão mais presentes.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, T. C. et al. Compostos nitrogenados em processos de decomposição: uma revisão bioquímica. **Revista de Ciências da Vida**, 2022.
- ASHBAUGH, D. R. **Quantitative-Qualitative Friction Ridge Analysis: An Introduction to Basic and Advanced Ridgeology**. Boca Raton: CRC Press, 2021.
- BARROS, R. P. et al. Análise de aminas voláteis em cadáveres humanos por HPLC: uma abordagem forense. **Revista Química Nova**, v. 44, n. 3, p. 321-330, 2021.
- BÍBLIA. **A Bíblia Sagrada**. Tradução de João Ferreira de Almeida. Edição Revista e Corrigida. São Paulo: Sociedade Bíblica do Brasil, 1995.
- BRAGA, A. P. A. **Avaliação dos efeitos ecotoxicológicos das aminas biogênicas cadaverina e putrescina, por meio de ensaios com diferentes sistemas-teste**. 2023. Tese (Doutorado em Ciências Biológicas) – Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2023.
- BUTLER, J. M. **Advanced Topics in Forensic DNA Typing: Methodology**. San Diego: Academic Press, 2020.
- CAFARO, A. et al. Therapeutic drug monitoring of glycopeptide antimicrobials: an overview of liquid chromatography-tandem mass spectrometry methods. **Journal of Mass Spectrometry and Advances in the Clinical Lab**, v. 23, p. 45-56, 2024.
- CAMPOS, F. A. A. M. et al. Estudo da decomposição cadavérica: uma revisão dos principais métodos utilizados na estimativa do intervalo pós-morte. **Revista Brasileira de Criminalística**, v. 2, n. 4, p. 12-25, 2013.
- CARTER, D. O. et al. Forensic Entomology and the Estimation of Postmortem Interval in the United States. **Journal of Forensic Sciences**, v. 53, n. 6, p. 1306-1314, 2008.
- CHENG, Y.; SMITH, A.; TAYLOR, R. High performance liquid chromatography (HPLC) in forensic chemistry: Applications and advancements. **Forensic Chemistry**, v. 34, p. 100478, 2023.
- CLIMATEMPO. **Climatologia para Barracão - PR**. Disponível em: <https://www.climatempo.com.br/climatologia/4220/barracao-pr>. Acesso em: 5 maio 2025.
- COBAUGH, K. L. et al. Temporal and spatial decomposition of cadavers and carcasses: Vertebrate scavenging patterns and scavenger behavior. **PLoS ONE**, v. 10, n. 6, e0126115, 2015.
- COSTA, M. J. et al. Aplicações de compostos voláteis na localização de corpos em decomposição. **Revista de Investigação Científica Forense**, v. 5, n. 2, p. 78-92, 2018.

CROCE, D.; CROCE JR., D. **Manual de Medicina Legal**. 8. ed. São Paulo: Saraiva, 2012.

DE GANS, E. et al. Volatile compound analysis for locating human remains in disaster zones. **Journal of Forensic and Legal Medicine**, v. 20, n. 7, p. 791-795, 2013.

DI PAOLO, M.; BERGERON, L.; CARTER, D. O. **Forensic Taphonomy: The decomposition of cadavers and their skeletons**. 2. ed. Boca Raton: CRC Press, 2023.

DONEDA, D. **Proteção de Dados Pessoais: A Função e os Limites do Consentimento**. 2. ed. Rio de Janeiro: Renovar, 2020.

FANG, L. et al. Role of cadaverine in cell toxicity and inflammation: pathways and mechanisms. **Journal of Biomedical Science**, v. 17, n. 1, p. 1-12, 2010.

FERNANDES, C. M. et al. Chemical profiling of volatile organic compounds during human decomposition. **Forensic Science International**, v. 275, p. 160-170, 2017.

FERREIRA, A. R. et al. Processos de conservação cadavérica: embalsamamento e mumificação natural. **Revista Brasileira de Ciências Policiais**, v. 8, n. 1, p. 45-60, 2017.

FREITAS, A. C. et al. Produção de aminas biogênicas durante a decomposição cadavérica: aspectos bioquímicos e aplicação forense. **Cadernos de Ciências Forenses**, v. 12, n. 2, p. 88-102, 2020.

FRANÇA, G. V. de. **Fundamentos de Medicina Legal**. 3. ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 2018.

GARCIA, J. P. **Manual de Tanatologia Forense**. São Paulo: Forense, 2015.

GARCIA, A. C. O.; RUIZ, D. C. Butyric fermentation: A key process in the decomposition of human remains. **Journal of Forensic Sciences**, v. 67, n. 4, p. 1450-1460, 2022.

GILL-KING, H. Forensic taphonomy of human remains: Introduction and overview. In: HAGLUND, W. D.; SORG, M. H. (Ed.). **Forensic Taphonomy: The Postmortem Fate of Human Remains**. Boca Raton: CRC Press, 1997. p. 3-12.

GONÇALVES, N. J. R. Livor mortis na prática médico-legal. **Perspectivas em Medicina Legal e Perícias Médicas**, São Paulo, n. 8, p. 33-42, fev. 2019.

HARRIS, D. C. **Quantitative Chemical Analysis**. 9. ed. New York: W. H. Freeman, 2020.

HEARD, B. J. **Handbook of Firearms and Ballistics: Examining and Interpreting Forensic Evidence**. 2. ed. Chichester: Wiley, 2018.

INMET. **Instituto Nacional de Meteorologia**. Dados meteorológicos históricos. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br>. Acesso em: 5 maio 2025.

JOHNSON, P. J.; SPEARS, I. R.; CINA, S. J. **Postmortem Changes in Human Bodies and Their Applications in Forensic Pathology**. San Diego: Academic Press, 2023.

KAPLAN, D. I. **Forensic Toxicology: Mechanisms and Pathology**. 3. ed. Boca Raton: CRC Press, 2019.

KLEIN, C. et al. Volatile amines as indicators of microbial degradation in post-mortem tissues. **Journal of Forensic and Legal Medicine**, v. 80, p. 102155, 2021.

LEAREY, J. J. et al. Detection of biogenic amines in pet food ingredients by RP-HPLC with automated dansyl chloride derivatization. **Journal of Separation Science**, v. 41, n. 12, p. 2589-2597, 2018.

LEI Nº 8.501, de 30 de novembro de 1992. **Dispõe sobre a utilização de cadáver não reclamado, para fins de estudo ou pesquisa científica**. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 1 dez. 1992. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L8501.htm. Acesso em: 5 de maio de 2025.

LEITE, G. A. A.; PRADO, F. R. Sinais abióticos: putrefação, autólise, maceração. In: **ETIC – Encontro de Iniciação Científica**, 2019. Anais... São Paulo: USP, 2019.

LOPEZ, G.; FERNANDEZ, L.; SANCHEZ, P. Ecological implications of cadaver decomposition in terrestrial ecosystems: Insights from chemical analysis. **Ecology Letters**, v. 25, n. 3, p. 456-468, 2022.

MEDEIROS, L. A. et al. Implicações toxicológicas das aminas biogênicas em ambientes de decomposição. **Revista Brasileira de Ciências Forenses**, v. 15, n. 1, p. 22-35, 2020.

MELÉNDEZ ESPINOZA, J. J. **Nivel de conocimiento sobre las medidas de bioseguridad en tanatología forense**. 2018. Monografía (Licenciado em Enfermería) – Universidad Nacional de Ucayali, Pucallpa, Perú, 2018.

MILLER, R. A.; BASS, W. M. Human Osteology and Biochemistry of Decomposition. **Forensic Science International**, v. 253, p. 136-145, 2015.

MUNDO TENTACULAR. **Os estágios da decomposição humana**. 2023. Disponível em: <https://mundotentacular.blogspot.com/2023/02/os-estagios-da-decomposicao-humana.html>. Acesso em: 5 maio 2025.

NISHIMURA, K. et al. Polyamines in normal and transformed cells. **Journal of Cellular Physiology**, v. 206, n. 2, p. 323-330, 2006.

OLIVEIRA, A. C. et al. Chemical composition of volatile organic compounds in decomposing cadavers: correlations with postmortem interval. **Revista Brasileira de Ciências Forenses**, v. 10, n. 2, p. 45-58, 2019.

PAVAN, M. E. et al. Cadaverine as a chemotactic cue for necrophagous insects. **Journal of Insect Behavior**, v. 30, n. 1, p. 71-80, 2017.

PEREIRA, M. L. et al. Biogenic amines in biological degradation: metabolism and forensic relevance. **Journal of Forensic Science**, v. 63, n. 4, p. 1124-1132, 2018.

- PRESNELL, S. E.; DENTON, J. S. Postmortem Changes. **Medscape**, 2015. Disponível em: <https://emedicine.medscape.com/article/1680032-overview>. Acesso em: 5 maio 2025.
- ROBINSON, J.; WILSON, B.; JOHNSON, M. Gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS) analysis of volatile organic compounds (VOCs) in forensic decomposition research. **Journal of Forensic Sciences**, v. 67, n. 1, p. 89-97, 2022.
- SANTOS, J. C.; SILVA, F. M.; MENDONÇA, M. C. Anaerobic decomposition of human remains: A review. **Forensic Science International**, v. 330, p. 111102, 2022.
- SILVA, J. A. **Direito Penal Brasileiro**. 13. ed. São Paulo: Atlas, 2019.
- SILVA, R. A. et al. Aminas biogênicas: biossíntese, toxicidade e importância na ciência forense. **Revista Brasileira de Toxicologia**, v. 30, n. 2, p. 45-56, 2017.
- SOUZA, J. C. de et al. Estimativa do intervalo post-mortem: métodos, dificuldades e possibilidades. **Revista Brasileira de Ciências da Vida**, v. 4, n. 2, p. 34-48, 2016.
- SOUZA, P. H. dos S. e et al. A tanatognose por observação dos fenômenos cadavéricos. **Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento**, v. 3, n. 5, p. 120-135, 2018.
- STUART, B. **Infrared Spectroscopy: Fundamentals and Applications**. Chichester: Wiley, 2021.
- VASS, A. A. Beyond the grave – understanding human decomposition. **Microbiology Today**, v. 28, p. 190-192, 2001.
- VASS, A. A. et al. Decomposition chemistry of human remains: A new methodology for determining the postmortem interval. **Journal of Forensic Sciences**, v. 47, n. 3, p. 542-553, 2002.
- WILLIAMS, K.; GORDON, L. Role of putrescine in cellular processes and in human disease. **Molecular Biology Reports**, v. 39, n. 5, p. 6207-6215, 2012.
- ZHAO, Y. et al. Postmortem Interval Estimation Using Biogenic Amines in Muscle Tissue: A Pilot Study. **Forensic Science International**, v. 229, n. 1-3, p. 1-6, 2013.
- ZHANG, J. et al. Detection of cadaverine in decomposed tissue: analytical techniques and implications. **Analytical Chemistry**, v. 92, n. 15, p. 10245-10252, 2020.

APÊNDICE A – PROMPTS UTILIZADOS NA FERRAMENTA DE IA

Abaixo estão alguns exemplos de comandos (prompts) inseridos na ferramenta de Inteligência Artificial DeepSeek, utilizados com o objetivo de aprimorar a linguagem científica e a qualidade textual deste trabalho:

- “Reescreva a seguinte frase de forma mais formal e acadêmica.”;
- “Sugira sinônimos mais técnicos e adequados ao contexto científico para as palavras a seguir.”;
- “Melhore a coesão e fluidez deste parágrafo, mantendo o sentido original.”;
- “Corrija a gramática e a pontuação deste trecho, respeitando a linguagem científica.”;
- “Organize as ideias deste parágrafo em uma estrutura mais clara e lógica.”;
- “Sugira uma versão mais concisa e objetiva para o trecho abaixo.”;
- “Verifique se há repetições excessivas neste trecho e proponha alternativas.”