

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS  
*CAMPUS* LAGOA DO SINO  
CENTRO DE CIÊNCIAS DA NATUREZA

ANNA CAROLINA FELIPPE ELIAS

AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE LÂMPADAS UV (254 NM E 185+254 NM) NA  
DEGRADAÇÃO DO ROXARSONE

Buri

2025

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS  
*CAMPUS LAGOA DO SINO*  
CENTRO DE CIÊNCIAS DA NATUREZA

ANNA CAROLINA FELIPPE ELIAS

AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE LÂMPADAS UV (254 NM E 185+254 NM) NA  
DEGRADAÇÃO DO ROXARSONE

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado como exigência parcial para a  
obtenção do grau de Bacharel em  
Engenharia Agrônoma na Universidade  
Federal de São Carlos.

Orientador: Prof. Dr. Fernando Campanhã  
Vicentini

Buri  
2025

Elias, Anna Carolina Felipe

Avaliação da eficiência de lâmpadas UV (254 nm e 185+254 nm) na degradação do roxarsone / Anna Carolina Felipe Elias -- 2025.

31f.

TCC (Graduação) - Universidade Federal de São Carlos, campus Lagoa do Sino, Buri

Orientador (a): Fernando Campanhã Vicentini

Banca Examinadora: Flávio Gabriel Bianchini, Gabriel Luiz Cruz de Souza

Bibliografia

1. Degradação por fotólise. 2. Processos oxidativos. 3. Eficiência de lâmpadas UV. I. Elias, Anna Carolina Felipe. II. Título.

Ficha catalográfica desenvolvida pela Secretaria Geral de Informática (SIn)

DADOS FORNECIDOS PELO AUTOR

Bibliotecário responsável: Lissandra Pinhatelli de Britto - CRB/8 7539


ANNA CAROLINA FELIPPE ELIAS

AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE LÂMPADAS UV (254 NM E 185+254 NM) NA  
DEGRADAÇÃO DO ROXARSONE

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como  
requisito parcial à obtenção do título de Bacharel  
em Engenharia Agrônômica pela Universidade  
Federal de São Carlos.


Aprovada em: 12 / 12 / 2025.

**BANCA EXAMINADORA**

Documento assinado digitalmente  
 **FERNANDO CAMPANHA VICENTINI**  
Data: 15/12/2025 11:07:22-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>


---

Prof. Dr. Fernando Campanhã Vicentini (Orientador)  
Universidade Federal de São Carlos (UFSCar)

Documento assinado digitalmente  
 **FLAVIO GABRIEL BIANCHINI**  
Data: 18/12/2025 15:24:27-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Prof. Dr. Flávio Gabriel Bianchini  
Universidade Federal de São Carlos (UFSCar)

Documento assinado digitalmente  
 **GABRIEL LUIZ CRUZ DE SOUZA**  
Data: 15/12/2025 12:17:11-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Prof. Dr. Gabriel Luiz Cruz de Souza  
Universidade Federal de São Carlos (UFSCar)

## RESUMO

O roxarsone (ROX) é um composto organoarsênico utilizado como aditivo alimentar de aves e suínos para promover o crescimento e controlar parasitas intestinais. Menos de 10% é retido pelos animais, a maior parte é excretada e alcança o ambiente pela aplicação de esterco em áreas agrícolas. O ROX pode ser convertido em espécies inorgânicas tóxicas de arsênio ( $\text{As}^{3+}$  e  $\text{As}^{5+}$ ), representando risco ao solo, à água e à saúde humana. Seu uso foi proibido em diversos países, incluindo o Brasil, desde 2002. A fotólise destaca-se como um dos principais mecanismos naturais de degradação do ROX em ambientes aquáticos. O presente trabalho teve como objetivo comparar a degradação do roxarsone por fotólise utilizando duas fontes de radiação ultravioleta: 254 nm e 185 + 254 nm. Para isso, soluções aquosas de ROX ( $0,01 \text{ g L}^{-1}$ ) foram irradiadas em fotorreator, e amostras foram avaliadas a cada 30 minutos durante 300 minutos no total. As análises foram realizadas por espectrofotometria UV-Vis, com tratamento dos dados por meio de curvas de concentração ao longo do tempo, eficiência percentual de degradação e cinética de primeira ordem. Os resultados mostraram que o ROX sofreu degradação sob ambas as fontes de radiação. Na fotólise com radiação de 254 nm, observou-se um declínio gradual de concentração, evidenciado nos espectros UV-Vis e confirmado pela cinética de primeira ordem. Já a fonte de 185 + 254 nm apresentou desempenho significativamente superior: a taxa de degradação foi aproximadamente quatro vezes maior que na condição de 254 nm isolada. A comparação direta entre os métodos demonstrou que a presença de radiação em 185 nm intensifica substancialmente a degradação do ROX. A taxa de degradação confirmada ao final do experimento foi de 15,7% para 185 + 254 nm, contra 4% para 254 nm, evidenciando o aumento na eficiência de degradação de ROX em solução aquosa.

Palavras-chave: Organoarsênico; Aditivo alimentar; Esterco; ROX; Fotólise.

## ABSTRACT

Roxarsone (ROX) is an organoarsenic compound used as a feed additive for poultry and swine to promote growth and control intestinal parasites. Less than 10% is retained by the animals; most of it is excreted and reaches the environment through the application of manure to agricultural areas. ROX can be converted into toxic inorganic arsenic species ( $\text{As}^{3+}$  and  $\text{As}^{5+}$ ), posing risks to soil, water, and human health. Its use has been banned in several countries, including Brazil, since 2002. Photolysis stands out as one of the main natural mechanisms for ROX degradation in aquatic environments. The present study aimed to compare the degradation of roxarsone by photolysis using two ultraviolet radiation sources: 254 nm and 185 + 254 nm. For this purpose, aqueous ROX solutions ( $0.01 \text{ g L}^{-1}$ ) were irradiated in a photoreactor, and samples were analyzed every 30 minutes over a total period of 300 minutes. Analyses were performed by UV–Vis spectrophotometry, with data treatment through concentration–time curves, percentage degradation efficiency, and first-order kinetics. The results showed that ROX underwent degradation under both radiation sources. With 254 nm, a gradual decrease in concentration was observed, evidenced in the UV–Vis spectra and confirmed by first-order kinetics. In contrast, 185 + 254 nm showed significantly superior performance, with a degradation rate approximately four times higher than that obtained with the 254 nm alone. Direct comparison between the methods demonstrated that the presence of 185 nm radiation substantially enhances ROX degradation. The degradation efficiency at the end of the experiment was 15.7% for 185 + 254 nm and 4% for 254 nm, evidencing the increased efficiency of ROX degradation in aqueous solution.

Keywords: Organoarsenic; Food additive; Manure; ROX; Photolysis.

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	8
<b>2 REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	9
2.1 ROXARSONE .....	9
2.2 SUINOCULTURA E AVICULTURA .....	10
2.3 PROCESSOS OXIDATIVOS AVANÇADOS .....	11
2.4 FOTÓLISE.....	12
<b>3 OBJETIVO</b> .....	13
<b>4 MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	14
4.1 REAGENTES E EQUIPAMENTOS.....	14
4.2 FOTÓLISE.....	14
4.3 CURVA DE CALIBRAÇÃO.....	16
4.4 TRATAMENTO DE DADOS .....	16
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	17
5.1 FOTÓLISE DE ROX EMPREGANDO RADIAÇÃO DE 254 nm.....	17
5.2 FOTÓLISE DE ROX EMPREGANDO RADIAÇÃO DE 185 + 254 nm .....	20
5.3 COMPARAÇÃO FOTÓLISE ROX: RADIAÇÃO DE 254 nm VS RADIAÇÃO DE 185 + 254 nm.....	22
5.4 CURVA DE CALIBRAÇÃO.....	26
<b>6 CONCLUSÃO</b> .....	27
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	29

## 1 INTRODUÇÃO

O roxarsone (4-hydroxy-3-nitrobenzenearsonic acid, ROX) é um aditivo amplamente utilizado em rações para aves e suínos, empregado para estimular o crescimento e controlar parasitas intestinais, como os coccídeos. Menos de 10% dessa substância é retida ou metabolizada pelos animais; a maior parte é eliminada diretamente nas fezes (Mangalgi et al., 2015). O composto acaba sendo introduzido no ambiente principalmente quando o esterco é aplicado em áreas agrícolas (Yuan et al., 2022). Embora o ROX em si apresente baixa toxicidade, sua transformação nessas condições pode liberar formas tóxicas de arsênio, a saber, arsenito ( $As^{3+}$ ) e arseniato ( $As^{5+}$ ), aumentando significativamente o risco ambiental associado ao seu uso (Yuan et al., 2022).

Ele representa um exemplo clássico de como um aditivo que, em um primeiro momento, parecia trazer benefícios para a produtividade agropecuária acabou sendo reavaliado, com base em evidências científicas, pelos seus impactos ambientais e riscos à saúde humana. No Brasil, sabe-se que aditivos arsenicais foram proibidos já em 2002, o que impede oficialmente seu uso nas rações animais (MAPA, 2024). Esse histórico ressalta a importância de sempre reavaliar insumos agropecuários com base em dados científicos, levando em conta não apenas a eficiência produtiva, mas também os potenciais impactos ambientais e sobre a saúde. Diante desse cenário, torna-se essencial compreender o comportamento ambiental desses compostos, bem como os mecanismos naturais envolvidos em suas transformações e remoções. Entre esses mecanismos estão os processos de degradação que atuam na redução da persistência dos contaminantes, especialmente aqueles de origem química, como os aditivos arsenicais.

Nesse contexto, destaca-se a fotodegradação, que é o processo de transformação ou decomposição de substâncias químicas pela ação da luz, tendo a fotólise como um de seus principais mecanismos. Nesse processo, a energia proveniente da radiação eletromagnética, especialmente nas faixas do ultravioleta e da luz visível, é absorvida pelas moléculas dos compostos, promovendo alterações em sua estrutura química. A fotodegradação por fotólise desempenha, assim, papel fundamental na remoção natural de contaminantes no meio ambiente, sobretudo em águas superficiais e na atmosfera (Guo et al., 2023).

Experimentos indicam que a taxa de fotodegradação do roxarsone depende de diversos fatores, como intensidade e comprimento de onda da radiação eletromagnética, pH do meio, presença de oxigênio dissolvido, matéria orgânica e íons metálicos. Em geral, ambientes com pH neutro a alcalino e elevada incidência de luz UV favorecem a quebra da molécula. A presença de substâncias oxidantes, como radicais hidroxila, também acelera significativamente o processo (Liu et al., 2022). Estudos espectroscópicos mostraram que a fotólise promove a

redução do grupo nitro e a clivagem da ligação carbono–arsênio, liberando arsênio inorgânico para o meio. Esse arsênio pode, então, ser mobilizado no solo e alcançar corpos d’água superficiais e subterrâneos, aumentando o risco de contaminação ambiental e exposição humana (Liu et al., 2022). Além disso, pesquisas em sistemas reais de solo e água evidenciaram que o esterco de aves contendo roxarsone, quando aplicado como fertilizante agrícola, pode sofrer fotodegradação após a exposição ao sol, contribuindo para a acumulação de arsênio em áreas agrícolas. Tal arsenificação do solo pode resultar na absorção do elemento por plantas, entrando na cadeia alimentar (D Foust et al., 2018).

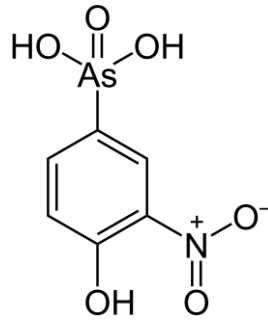
Assim, a fotodegradação, especialmente por meio da fotólise, desempenha papel central nesse processo, uma vez que favorece a liberação de arsênio no solo e na água, podendo promover a contaminação de ecossistemas e da cadeia alimentar. Compreender de forma completa os processos de transformação e transporte do ROX no ambiente é fundamental para avaliar seu risco ambiental e desenvolver estratégias eficazes de mitigação. Sendo assim, este trabalho teve como objetivo comparar a degradação do roxarsone através da fotólise utilizando duas fontes de radiação diferentes, com o intuito de avaliar a eficiência e performance das diferentes lâmpadas.

## **2 REVISÃO DE LITERATURA**

### **2.1 ROXARSONE**

O roxarsone é um composto organoarsênico aromático, pertencente à classe dos ácidos arsonatos. Sua fórmula molecular é  $C_6H_6AsNO_6$ , com massa molar aproximada de  $263 \text{ g mol}^{-1}$ , com solubilidade em água menor do que  $0,1 \text{ g/100 mL}$  a  $23 \text{ }^\circ\text{C}$ . Trata-se de uma substância sintética, sólida, de coloração amarelada. Sua estrutura é composta por um anel benzênico, responsável pela estabilidade da molécula; um grupo nitro ( $-\text{NO}_2$ ) ligado ao anel, que atua como substituinte fortemente eletronegativo; um grupo hidroxila ( $-\text{OH}$ ), que aumenta a polaridade e a capacidade de interação por ligações de hidrogênio e um grupo funcional arsonato ( $-\text{AsO}(\text{OH})_2$ ), em que se encontra o arsênio no estado de oxidação +5, ligado diretamente ao anel aromático (Figura 1) (Pubchem, 2024). A presença do arsênio confere ao roxarsone propriedades tóxicas e biologicamente ativas, mesmo estando inicialmente em uma forma orgânica menos tóxica que o arsênio inorgânico (Silbergeld et al., 2008).

Figura 1 - Estrutura molecular do Roxarsone



Fonte: Merck (*s.d*).

Do ponto de vista químico, o roxarsone apresenta caráter ácido fraco, devido ao grupo arsonato; estabilidade relativa em meio seco, mas susceptível a reações de redução, oxidação e biodegradação; capacidade de sofrer transformações químicas no ambiente, sendo convertido em espécies de arsênio inorgânico, como arsenito ( $\text{As}^{3+}$ ) e arseniato ( $\text{As}^{5+}$ ), que são altamente tóxicas. Essas transformações ocorrem principalmente por ação de microrganismos do solo, radiação solar e variações de pH (EPA, 2012).

Foi utilizado por décadas como aditivo zootécnico na alimentação de aves e suínos. Suas principais funções eram a atuação como promotor de crescimento, ação antimicrobiana e antiparasitária e melhoria da pigmentação da carne (United States Food And Drug Administration, 2012). Esses efeitos estão relacionados à ação biológica do arsênio presente na molécula, que interfere no metabolismo de microrganismos presentes no trato digestivo dos animais (Silbergeld et al., 2008).

## 2.2 SUINOCULTURA E AVICULTURA

O uso do roxarsone na agropecuária remonta à década de 1940, quando começaram a ser empregados compostos arsenicais pentavalentes como aditivos nas rações. O aditivo era utilizado para acelerar o crescimento dos animais, melhorar a eficiência da conversão alimentar, realçar a coloração da carne e controlar parasitas intestinais, especialmente coccídios (Ferreira et al., 2024). Essa ação biológica está relacionada à interferência do arsênio no metabolismo de microrganismos patogênicos, reduzindo sua proliferação no trato digestivo dos animais (Silbergeld et al., 2008).

Em meados dos anos 1990, estimava-se que o ROX era usado em grande parte da produção de frangos de corte nos Estados Unidos. Nas décadas seguintes, multiplicaram-se os estudos que mostraram que, embora o composto fosse originalmente considerado relativamente benigno, ele poderia ser degradado, durante o metabolismo animal, armazenamento ou

compostagem do esterco, em formas inorgânicas de arsênio (como  $\text{As}^{3+}$  e  $\text{As}^{5+}$ ), altamente tóxicas. Preocupações ambientais e sanitárias levaram à proibição do uso de ROX e outros organoarsênicos na alimentação animal em diversos países. A União Europeia proibiu seu uso já em 1999 (European Commission, 2003). Nos Estados Unidos, a venda do produto foi voluntariamente suspensa em 2011 por sua fabricante (United States Food And Drug Administration, 2022).

O composto chegou a ser conhecido globalmente como o aditivo organoarsênico mais utilizado na alimentação de aves e suínos desde meados do século XX. No entanto, no Brasil houve regulamentação proibindo o uso de aditivos arsenicais na alimentação de animais. Segundo documento da época, o órgão regulador responsável proibiu, desde 2002, o uso de medicamentos contendo arsênio como aditivos em rações para animais (MAPA, 2024).

### 2.3 PROCESSOS OXIDATIVOS AVANÇADOS

Os Processos Oxidativos Avançados (POAs) são tecnologias de tratamento utilizadas principalmente para a degradação de poluentes orgânicos persistentes em água, efluentes e, em alguns casos, no ar e no solo. Esses processos se baseiam na geração de espécies altamente reativas, especialmente o radical hidroxila ( $-\text{OH}$ ), que possui alto potencial de oxidação e é capaz de mineralizar compostos tóxicos complexos em substâncias mais simples, como  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  e íons inorgânicos (Rueda-Márquez et al., 2020; Mishra et al., 2017).

Seu princípio fundamental é a produção *in situ* de radicais livres, principalmente o radical hidroxila, com potencial de oxidação em torno de 2,8 V, superior ao da maioria dos oxidantes convencionais. Esses radicais reagem de forma rápida e pouco seletiva com a matéria orgânica, promovendo a quebra de ligações químicas estáveis e a degradação de contaminantes recalcitrantes que não são eficientemente removidos por tratamentos convencionais (Rueda-Márquez et al., 2020; Mishra et al., 2017).

Os POAs podem ser classificados de acordo com a forma de geração dos radicais: a) POAs químicos, que realizam reações químicas entre oxidantes fortes (ex.: ozônio e peróxido de hidrogênio); b) POAs fotoquímicos, que dependem da radiação UV ou visível (ex.: fotocatalise heterogênea  $\text{TiO}_2/\text{UV}$ ); c) POAs eletroquímicos, que se baseiam na geração de espécies reativas por corrente elétrica (ex.: oxidação anódica) (Zambrano-Arana et al., 2024).

Dentre as vantagens de sua aplicação, estão: alta eficiência na degradação de poluentes tóxicos; capacidade de tratar compostos recalcitrantes; possibilidade de mineralização completa da matéria orgânica; redução da toxicidade e da carga orgânica do efluente e integração com tratamentos biológicos. Contudo, apesar de apresentarem elevada eficiência de degradação e

potencial para mineralização completa dos poluentes, os POAs também apresentam limitações relacionadas ao custo operacional, consumo de reagentes e controle das condições de operação (Zambrano-Arana et al., 2024).

## 2.4 FOTÓLISE

A fotólise é um processo químico no qual uma substância sofre decomposição ou transformação por ação da radiação eletromagnética, especialmente a luz ultravioleta (UV) ou visível. Trata-se de um tipo de reação fotoquímica, em que a energia dos fótons é absorvida por uma molécula, promovendo seus elétrons a um estado excitado. Esse estado instável favorece a ruptura de ligações químicas, originando novos compostos ou espécies reativas, como radicais livres. Esse processo ocorre sem a adição de agentes catalisadores e é caracterizado como um processo homogêneo (Cao et al., 2023; Costa et al., 2013; Michael et al., 2012). Um exemplo clássico é a fotólise da água, que ocorre durante a fotossíntese (Figura 2).

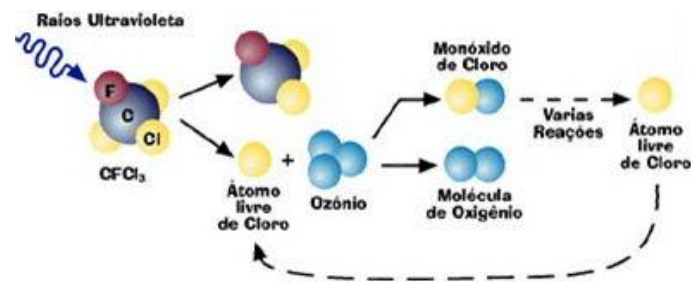
Figura 2 – Esquema da reação de fotólise da água na fotossíntese



Fonte: Ribas (2016).

O processo de fotólise pode ocorrer de forma direta ou indireta. Na fotólise direta, as moléculas do contaminante absorvem diretamente a energia da radiação incidente, sem a participação de espécies intermediárias, como é o caso da fotossíntese. Em contrapartida, na fotólise indireta, a radiação interage primeiramente com uma substância intermediária, a qual, ao ser excitada, passa a promover as reações de transformação ou degradação do contaminante, podendo atuar como sensibilizadora ou gerar radicais livres altamente reativos (Khan et al., 2024; Keen et al., 2013; Michael et al., 2012). Nesse caso, um exemplo é a degradação do ozônio na atmosfera pelos gases CFC/HCFC (Figura 3).

Figura 3 – Esquema da reação de degradação do ozônio na atmosfera pelos gases CFC/HFC



Fonte: Castilho (s.d).

Um experimento anterior realizado por Chen et al. (2021) comparou a degradação de ROX sem a adição de oxidantes (apenas com irradiação UV) e o efeito individual de três tipos de oxidantes,  $H_2O_2$ , PDS e PMS. Nesse estudo, foi utilizando um fotorreator cilíndrico de vidro borossilicato com uma lâmpada UV de 10 W (254 nm) como fonte de luz. Os resultados demonstraram que o uso exclusivo de irradiação UV apresentou um efeito sutil na degradação do ROX (< 9% em 20 min).

Outro estudo, realizado por Adak et al. (2015), investigou a degradação do roxarsone através de tratamentos com irradiação UV a 253,7 nm, utilizando um sistema de reator em batelada com recirculação, contendo 8 lâmpadas emitindo luz monocromática. Os espectros UV-Vis de ROX foram obtidos na faixa de 190–900 nm. A concentração adotada para as soluções de ROX analisadas foi de  $1,0 \text{ mg L}^{-1}$ , em solução tampão fosfato 10 mM.

Em outro artigo, publicado por Meng et al. (2021), os autores investigaram o mecanismo de fotodegradação do roxarsone e seus fatores influentes. As condições gerais de fotodegradação foram estabelecidas em intensidade luminosa de  $800 \pm 30 \mu\text{W}/\text{cm}^2$  (medida a 254 nm) e concentração de ROX de  $10,0 \pm 0,2 \mu\text{M}$ . Cerca de 30% do roxarsone foi degradado após 40 horas de exposição à radiação.

### 3 OBJETIVO

Comparar a degradação do roxarsone através da fotólise utilizando duas fontes de radiação diferentes, sendo uma lâmpada simples de 254 nm e uma lâmpada combinada de 185 + 254 nm.

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1 REAGENTES E EQUIPAMENTOS

Os reagentes e equipamentos utilizados nesse trabalho de conclusão de curso foram:

- Agitador magnético IKA® C-MAG HS 4;
- Cubeta de quartzo 0,7 mL;
- Cubeta de quartzo 3,5 mL;
- Espectrofotômetro Shimadzu® - UV 1900i (190-1100 nm) e software Lab Solutions UV-Vis;
- Fotoreator/Caixa Escura;
- Lâmpada ultravioleta (UV) - da Helios Quartz® (254 nm e 2% 185 nm) - com potência de 21 W;
- Lâmpada ultravioleta (UV) - da Osram® (254 nm) - com potência de 15 W;
- Roxarsone - da Vetranal/Merck KGaA/Sigma-Aldrich®.

### 4.2 FOTÓLISE

O procedimento experimental foi realizado da mesma forma com a lâmpada simples de 254 nm e com a lâmpada combinada de 185 + 254 nm. Foram pesados 0,00100 g de roxarsone em balança analítica com auxílio de uma espátula de metal e um pedaço de papel manteiga de aproximadamente 3x3 cm posicionado dentro de uma pequena bandeja plástica (Figura 4).

Figura 4 - Pesagem do roxarsone para preparo das soluções padrão

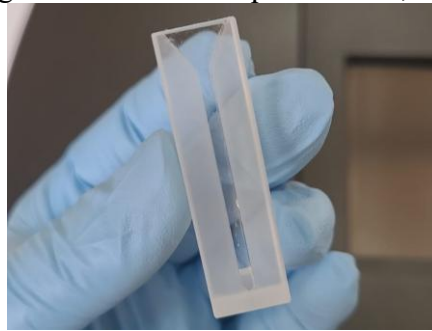


Fonte: Elias (2025).

Após a pesagem, o material foi transferido para um béquer de 50 mL contendo aproximadamente 25 mL de água destilada para dissolução. Após dissolvido, o conteúdo foi transferido para um balão volumétrico de 100 mL e o volume foi completado com água destilada, ajustando o menisco e homogeneizando a solução.

Em seguida, a solução foi completamente adicionada em um béquer de 250 mL. Com o auxílio de uma micropipeta, foi retirada uma alíquota de 0,7 mL que foi inserida na cubeta de quartzo para realização da varredura no  $T_0$  (Figura 5).

Figura 5 - Cubeta de quartzo de 0,7 mL



Fonte: Elias (2025).

Imediatamente após a retirada da alíquota, a solução do béquer foi colocada sob agitação dentro do fotorreator/caixa escura, a lâmpada foi ligada e a contagem do tempo foi iniciada (Figura 6). Esse procedimento foi repetido a cada 30 minutos durante 300 minutos, tomando o cuidado de sempre desligar a lâmpada antes de abrir o fotorreator/caixa escura e de interromper a agitação antes de retirar a alíquota da solução de ROX. A cubeta foi lavada com água destilada por, pelo menos, 3 vezes antes de realizar as leituras de cada tempo conseguinte. A leitura de todas as soluções foi feita em triplicata.

Figura 6 - Solução de roxarsone sob agitação dentro do fotorreator/caixa escura com a lâmpada ainda desligada



Fonte: Elias (2025).

#### 4.3 CURVA DE CALIBRAÇÃO

Para obtenção da curva de calibração, foi preparada uma solução estoque de  $0,02 \text{ g L}^{-1}$  de roxarsone. A partir da diluição dessa solução, foram preparadas outras 10 soluções com concentrações de  $0,0002$ ;  $0,0004$ ;  $0,0006$ ;  $0,0008$ ;  $0,001$ ;  $0,002$ ;  $0,004$ ;  $0,006$ ;  $0,008$  e  $0,01 \text{ g L}^{-1}$ . Para cada uma das 10 soluções, foi retirada uma alíquota de  $0,7 \text{ mL}$  que foi transferida para a cubeta e feita a leitura no espectrofotômetro. A ordem das leituras foi realizada da solução de menor concentração para a de maior concentração.

#### 4.4 TRATAMENTO DE DADOS

Inicialmente, a absorbância foi convertida em concentração com o intuito de padronizar os resultados. Para determinar e comparar percentualmente a eficiência das degradações, foi utilizada a Equação 1:

$$\eta = ((C_0 - C_t)/C_0) * 100 \quad 1$$

Em que:

$\eta$  = Eficiência percentual da degradação;

$C_0$  = Concentração Inicial;

$C_t$  = Concentração no tempo t.

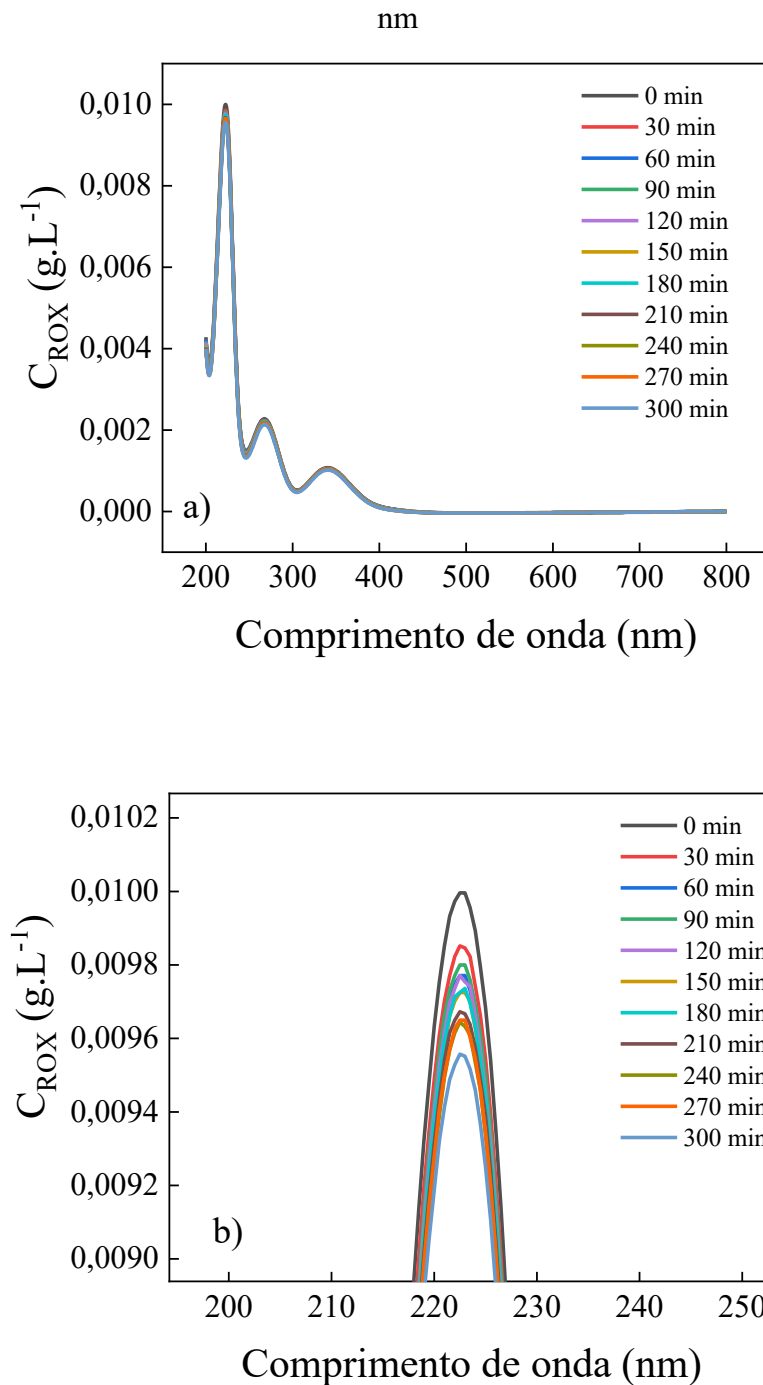
A avaliação dos parâmetros cinéticos foi realizada por meio do gráfico de  $\ln(C_0/C_t)$  (eixo Y) em função do tempo, em minutos (eixo X), onde  $C_0$  representa a concentração inicial e  $C_t$  a concentração no instante  $t$ . Nesse tipo de representação gráfica, o coeficiente angular da reta corresponde ao valor da constante cinética (ou constante de descoloração)  $k$ . Em reações com cinética de primeira ordem, a concentração (eixo Y) diminui linearmente ao longo do tempo (eixo X) (Tran et al., 2023).

## **5 RESULTADOS E DISCUSSÕES**

### **5.1 FOTÓLISE DE ROX EMPREGANDO RADIAÇÃO DE 254 nm**

O espectro de UV-Vis do roxarsone obtido (Figura 7) demonstrou que o ROX sofreu degradação com máximo de absorção em 222,5 nm, quando exposto à radiação de 254 nm, indicando que a taxa de degradação poderia ser potencializada com o uso da radiação 184 + 254 nm.

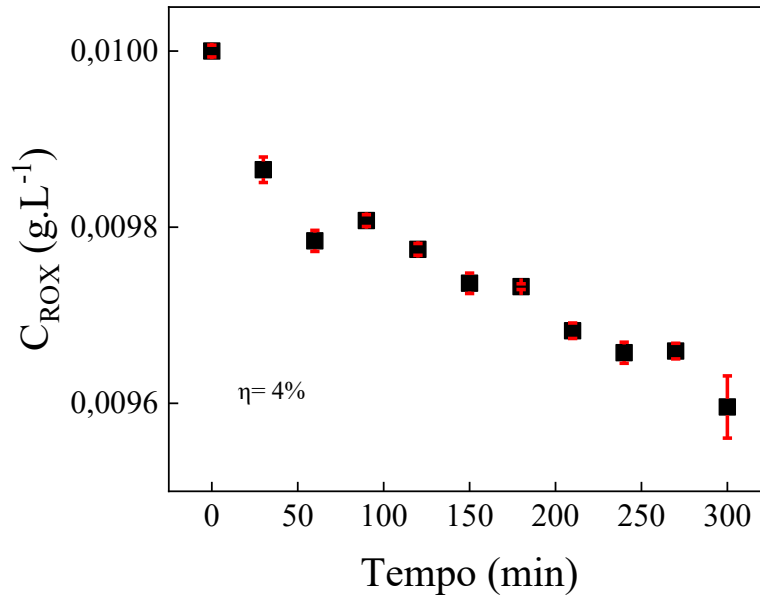
Figura 7 – a) Espectros UV-Vis de roxarsone sob a fonte de radiação de 254 nm em água destilada. Resultados obtidos em intervalos de 30 minutos; b) Ampliação do pico em 222,5 nm



Fonte: Elias (2025).

Também foi possível observar a degradação através da relação entre a concentração do roxarsone (0,01g L<sup>-1</sup>) versus o tempo de experimento, bem como através da taxa percentual de degradação, em %, em solução aquosa (Figura 8).

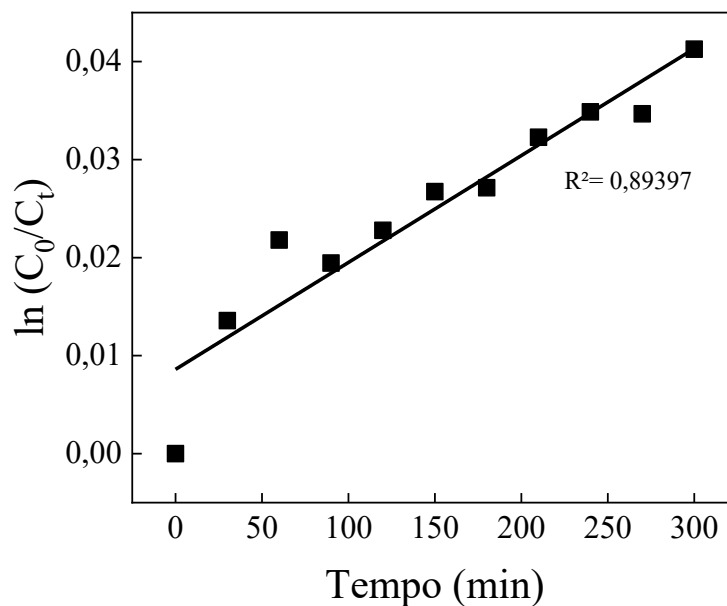
Figura 8 - Variação das concentrações de roxarsone em relação ao tempo de exposição à radiação UV de 254 nm e taxa de degradação do composto (valor inserido)



Fonte: Elias (2025).

Ainda, na Figura 9 é apresentada a relação entre  $\ln(C_0/C_t)$  em função do tempo, onde  $C_0$  e  $C_t$  são as concentrações de roxarsone no tempo zero e no tempo  $t$ , respectivamente. Dessa forma foi obtida a constante cinética da reação de primeira ordem, em  $\text{min}^{-1}$ , relacionada à degradação do ROX durante o experimento de fotólise. O  $R^2$  indica o ajuste dos dados.

Figura 9 - Cinética de primeira ordem para os experimentos de degradação do roxarsone (0,01 g L<sup>-1</sup>) por fotólise sob fonte de radiação de 254 nm



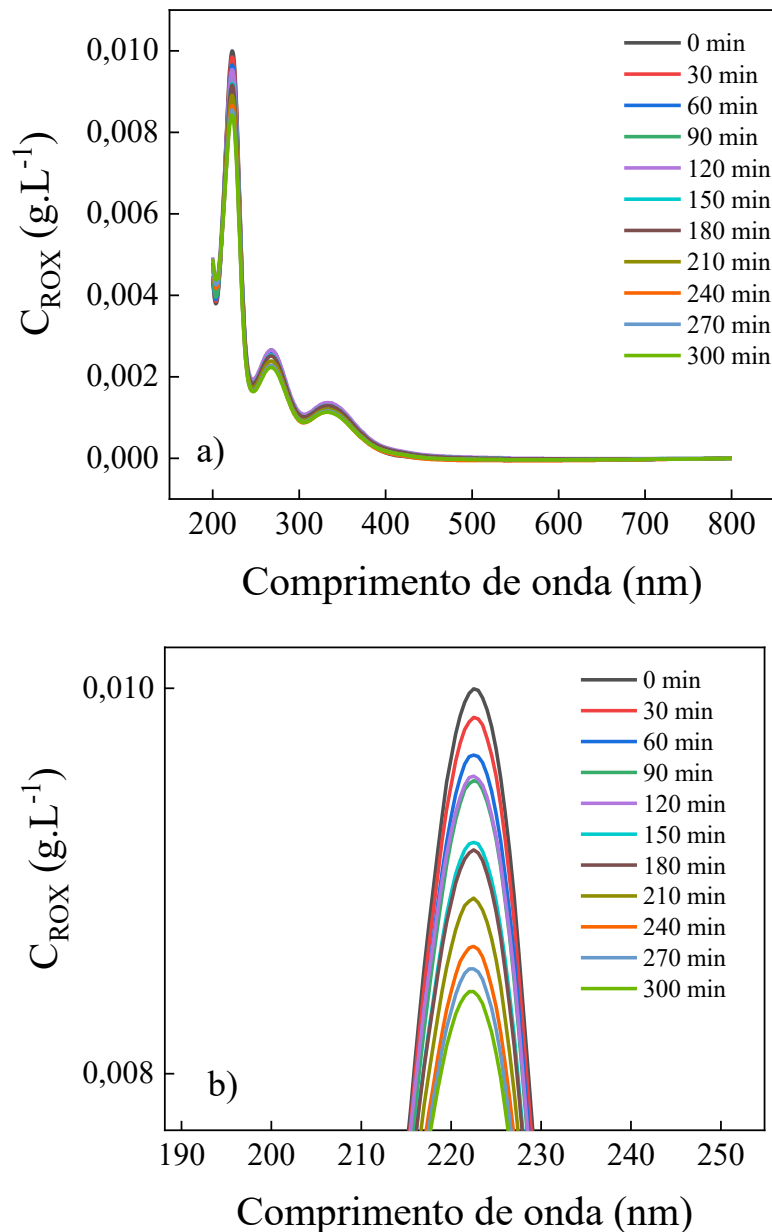
Fonte: Elias (2025).

A constante cinética obtida em solução aquosa foi de  $1,09 \times 10^{-4} \text{ min}^{-1}$  e a taxa de degradação do ROX de 4% após 300 minutos de experimento.

## 5.2 FOTÓLISE DE ROX EMPREGANDO RADIAÇÃO DE 185 + 254 nm

O espectro de UV-Vis do roxarsone obtido (Figura 10) mostrou que o ROX sofreu degradação (máximo de absorção em nm) quando exposto à radiação de 185 + 254 nm, conforme previsto anteriormente.

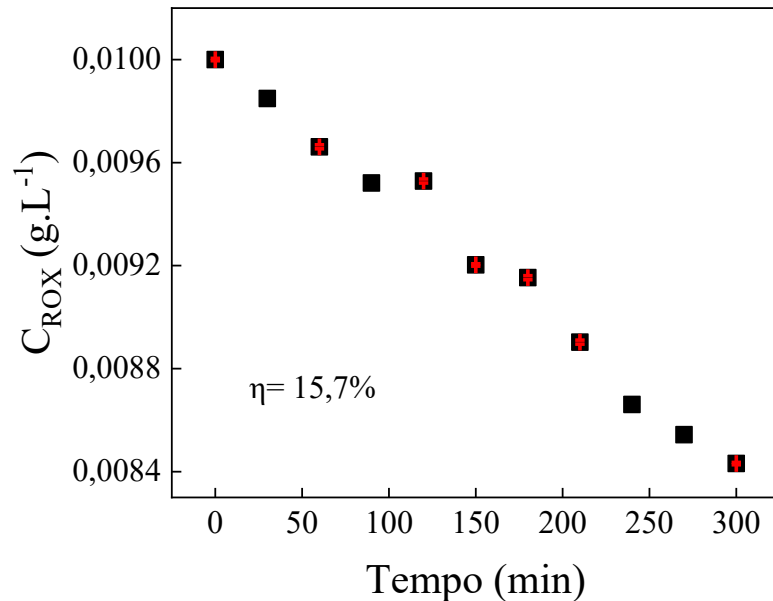
Figura 10 – a) Espectros UV-Vis de roxarsone sob a fonte de radiação de 254 + 185 nm em água destilada. Resultados obtidos em intervalos de 30 minutos; b) Ampliação do pico em 222,5 nm



Fonte: Elias (2025).

A relação entre a concentração do roxarsone ( $0,01\text{g L}^{-1}$ ) versus o tempo e a taxa percentual de degradação (em %) demonstraram a degradação do ROX em solução aquosa ao longo do experimento (Figura 11).

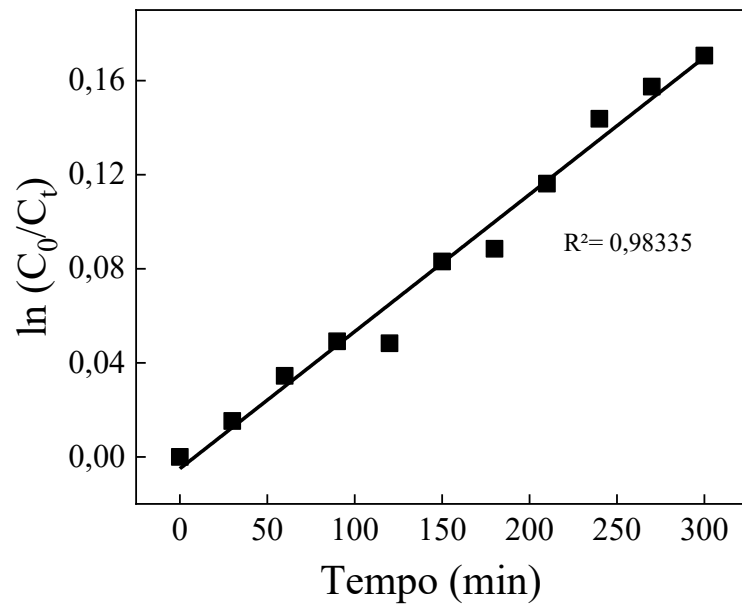
Figura 11 - Variação das concentrações de roxarsone em relação ao tempo de exposição à radiação UV de 185 + 254 nm e taxa de degradação do composto (valor inserido)



Fonte: Elias (2025).

Além disso, a Figura 12 mostra a variação de  $\ln(C_0/C_t)$  ao longo do tempo, sendo  $C_0$  e  $C_t$  as concentrações de ROX no instante inicial e no tempo  $t$ , respectivamente. A partir dessa relação, novamente foi determinada a constante cinética de uma reação de primeira ordem, expressa em  $\text{min}^{-1}$ , correspondente ao processo de degradação do ROX durante o ensaio de fotólise. O valor de  $R^2$  representa a qualidade do ajuste dos dados ao modelo.

Figura 12 - Cinética de primeira ordem para os experimentos de degradação do roxarsone ( $0,01 \text{ g L}^{-1}$ ) por fotólise sob fonte de radiação de  $185 + 254 \text{ nm}$



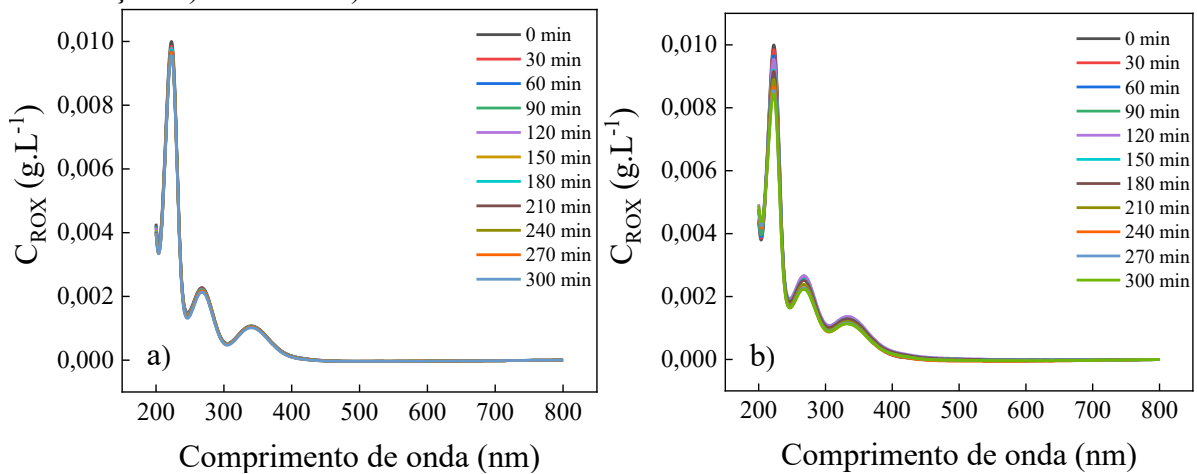
Fonte: Elias (2025).

A constante cinética determinada em solução aquosa foi de  $5,83 \times 10^{-4} \text{ min}^{-1}$ , enquanto a degradação do ROX alcançou aproximadamente 15,7 % ao final de 300 minutos de ensaio.

### 5.3 COMPARAÇÃO FOTÓLISE ROX: RADIAÇÃO 254 nm VS 185 + 254 nm

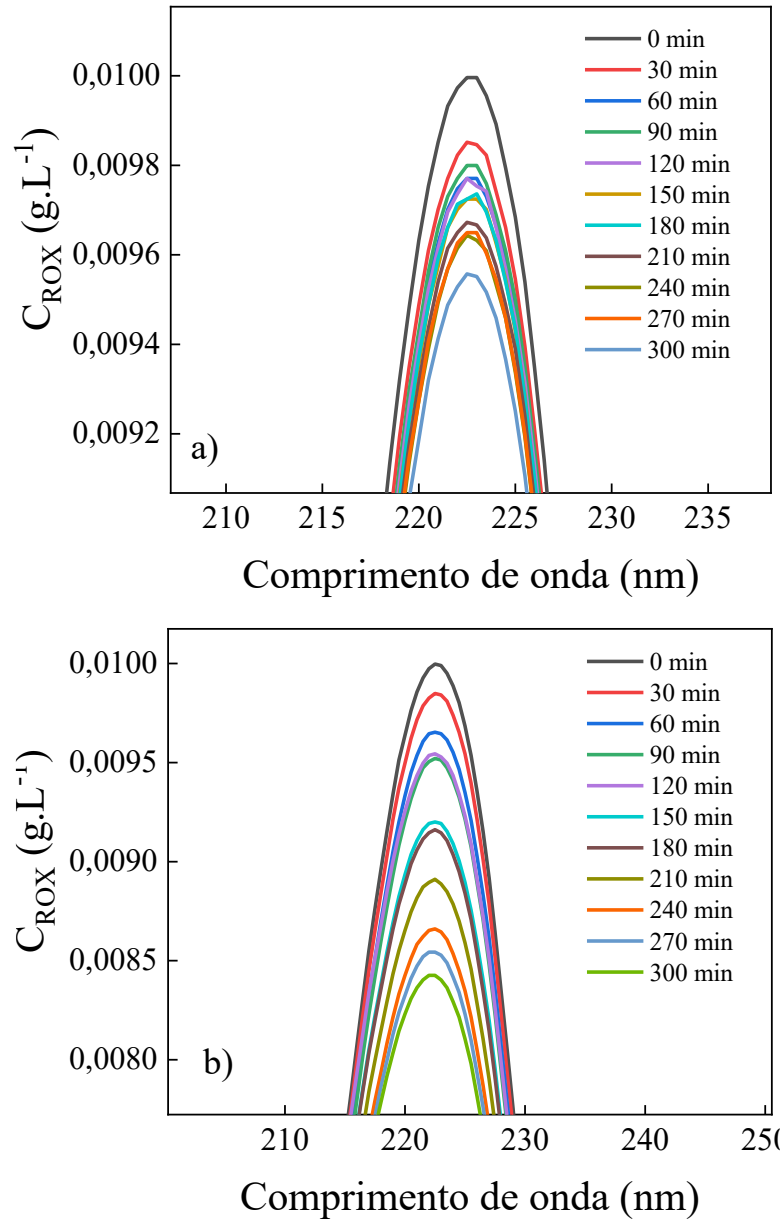
Ao comparar os espectros de UV-Vis do roxarsone obtidos (Figuras 13 e 14), foi observado que o ROX sofreu maior degradação quando exposto à radiação de  $185 + 254 \text{ nm}$ .

Figura 13 - Espectros UV-Vis de roxarsone em água destilada sob diferentes fontes de radiação: a) 254 nm e b)  $185 + 254 \text{ nm}$ . Resultados obtidos em intervalos de 30 minutos



Fonte: Elias (2025).

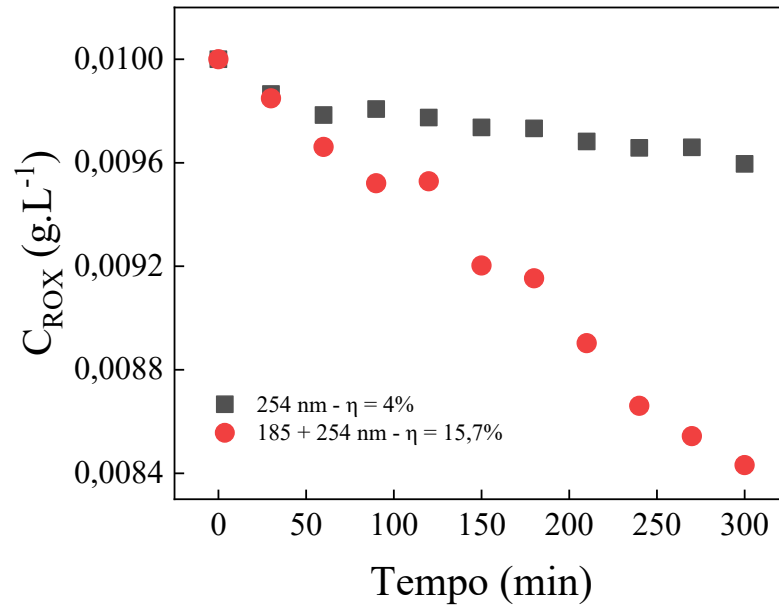
Figura 14 – Ampliação dos picos dos Espectros UV-Vis de roxarsone em água destilada sob diferentes fontes de radiação: a) 254 nm e b) 185 + 254 nm. Resultados obtidos em intervalos de 30 minutos



Fonte: Elias (2025).

Foi possível identificar por meio da relação entre a concentração do roxarsone (0,01g L<sup>-1</sup>) versus o tempo, e a taxa percentual de degradação que o ROX foi mais bem degradado, apresentando uma taxa de degradação de 3,93 vezes maior quando a fotólise foi realizada com a radiação de 185 + 254 nm em comparação à radiação de 254 nm (Figura 15).

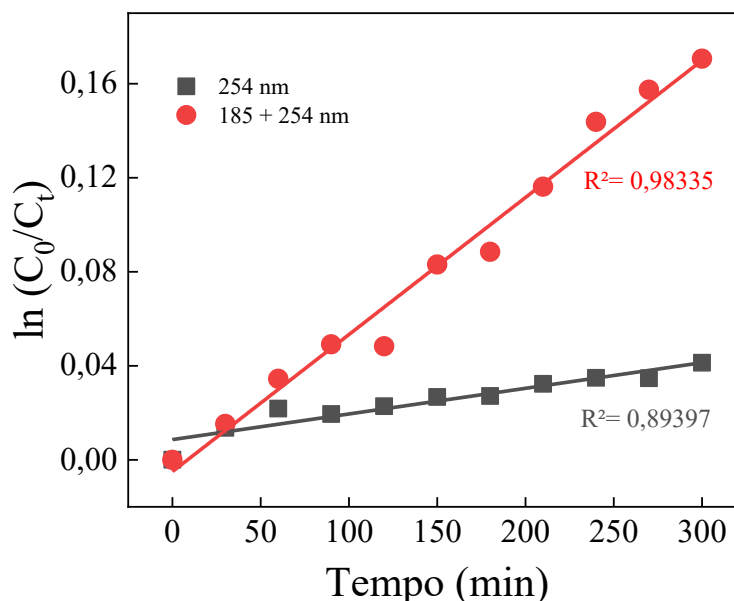
Figura 15 - Variação das concentrações de roxarsone em relação ao tempo de exposição à radiação UV e taxa de degradação do composto (valores inseridos) para os experimentos de fotólise



Fonte: Elias (2025).

A taxa de degradação do roxarsone com radiação de 185 + 254 nm foi muito superior à taxa com radiação de 254 nm, representando um aumento de 3,93 vezes. Logo, a lâmpada combinada se demonstrou mais eficiente que a lâmpada simples. Por fim, a comparação das constantes cinéticas dos experimentos de fotólise empregando as duas fontes de radiação, corroboraram com os resultados obtidos anteriormente, sendo que a constante cinética obtida para a lâmpada combinada foi 5,35 vezes maior do que a obtida para a lâmpada individual (Figura 15), com um melhor ajuste dos dados (vide  $R^2$ ).

Figura 15 - Cinética de primeira ordem para os experimentos de degradação do roxarsone ( $0,01 \text{ g L}^{-1}$ ) por fotólise em fonte de radiação de 254 nm e 185 + 254 nm



Fonte: Elias (2025).

Estudos de Chen et al. (2021) demonstraram que o emprego da radiação UV de forma isolada provoca apenas uma degradação pequena de ROX, inferior a 9% após 20 minutos, mesmo existindo evidências apontadas por Adak et al. (2015) de que a molécula é capaz de absorver luz na faixa de 200 a 400 nm e, conseqüentemente, sofrer fotólise. Ainda, segundo Adak et al. (2015), para irradiação UV a 253,7 nm, é possível obter uma degradação de 0,33 a 2,5% de compostos organoarsênicos.

A influência da intensidade luminosa na fotólise do roxarsone foi avaliada por Meng et al. (2021) em quatro faixas (300, 500, 800 e 1200  $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ ), apontando que o aumento da intensidade resultou em uma elevação progressiva da taxa de degradação, com um ganho de aproximadamente 25% na eficiência quando elevada de 300 para 800  $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ , degradando aproximadamente 38% do ROX após 40h de irradiação. Esses resultados evidenciam que a intensidade da luz desempenha um papel decisivo no processo de fotodegradação de ROX. Apesar dos autores observarem uma degradação superior à encontrada nesse trabalho, é importante destacar que isso só foi possível após um longo período de exposição à fonte de radiação.

No caso da lâmpada combinada empregada neste trabalho, foi obtido uma eficiência de 15,7% após somente 3h de experimentos, comparadas às 40h (para uma eficiência de 25%) em relação aos estudos de Meng e colaboradores, o que indica o grande potencial da lâmpada combinada na degradação deste aditivo alimentar.

#### 5.4 CURVA DE CALIBRAÇÃO

Finalmente, uma curva de calibração foi construída a partir da solução estoque de 0,02 g L<sup>-1</sup> de roxarsone. A Tabela 1 indica as concentrações e suas respectivas absorbâncias, considerando o máximo de absorção em 222,5 nm.

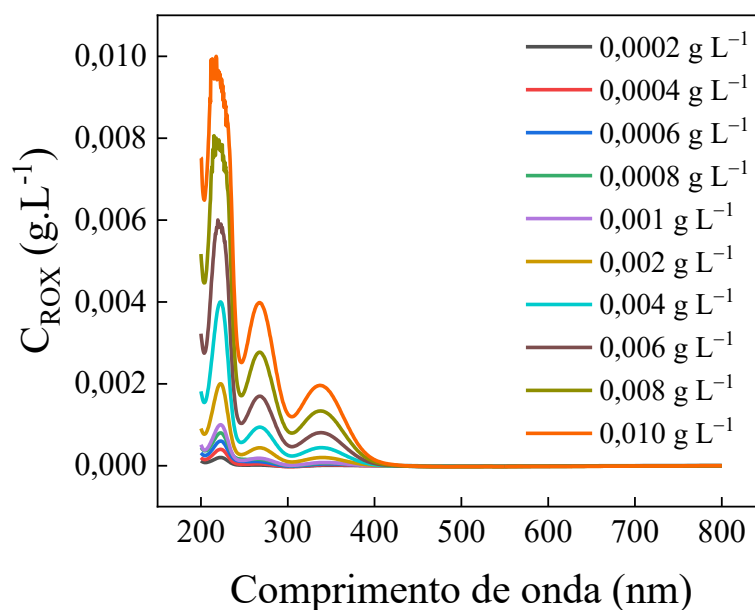
Tabela 1 - Concentrações preparadas da solução de roxarsone e as absorbâncias correspondentes obtidas para a construção da curva de calibração

Ponto	Concentração ROX (g L <sup>-1</sup> )	Absorbância
C <sub>1</sub>	0,0002	0,208
C <sub>2</sub>	0,0004	0,250
C <sub>3</sub>	0,0006	0,356
C <sub>4</sub>	0,0008	0,493
C <sub>5</sub>	0,001	0,708
C <sub>6</sub>	0,002	1,523
C <sub>7</sub>	0,004	2,566
C <sub>8</sub>	0,006	3,326
C <sub>9</sub>	0,008	3,874
C <sub>10</sub>	0,010	3,986

Fonte: Elias (2025).

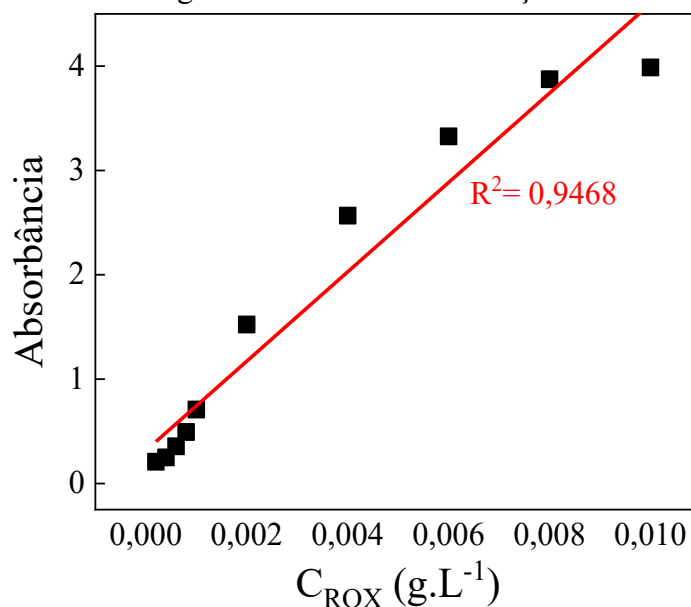
Observou-se que o aumento da concentração de roxarsone promoveu um crescimento linear da intensidade dos picos de absorbância em 222,5 nm (Figura 16). A partir da correlação entre os valores de absorbância e as respectivas concentrações, foi construída a curva analítica de calibração, que apresentou coeficiente de correlação ( $R^2$ ) de 0,9468 (Figura 17). A equação de regressão linear obtida foi:  $ABS = 0,3158 + 428,23 \times [Roxarsone] (g L^{-1})$ .

Figura 16 – Espectros de solução aquosa de roxarsone nas concentrações: 0,0002; 0,0004; 0,0006; 0,0008; 0,001; 0,001; 0,004; 0,006; 0,008 e 0,01 g L<sup>-1</sup>



Fonte: Elias (2025).

Figura 17 – Curva de calibração



Fonte: Elias (2025).

## 6 CONCLUSÃO

Os resultados mostraram que o ROX sofreu degradação sob ambas as fontes de radiação. Na fotólise de 254 nm, observou-se um declínio gradual de concentração, evidenciado nos espectros UV-Vis e confirmado pela cinética de primeira ordem. Já a fotólise de 185 + 254

nm apresentou desempenho significativamente superior: a taxa de degradação foi quatro vezes maior que na condição de 254 nm isolada. As curvas cinéticas revelaram valores de constante de degradação mais elevados e ajuste satisfatório dos dados experimentais ( $R^2$ ) para ambos os sistemas, embora com clara predominância da lâmpada combinada. A comparação direta entre os métodos demonstrou que a presença de radiação em 185 nm intensifica substancialmente a degradação do ROX. A taxa de degradação confirmada ao final do experimento foi de 15,7% para a lâmpada combinada (185 + 254 nm), contra 4% para a lâmpada simples (254 nm). Conclui-se que a radiação de 185 + 254 nm é mais eficiente na degradação do roxarsone em solução aquosa.

## REFERÊNCIAS

- ADAK, A. *et al.* UV irradiation and UV-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> advanced oxidation of the roxarsone and nitarsone organoarsenicals. **Water Research**, v. 70, p. 74-85, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2014.11.025>. Acesso em: 7 dez. 2025
- CASTILHO, Rubens. Buraco na camada de ozônio: o que é, quais as causas e consequências. **Toda Matéria**, [s.d.]. Disponível em: <https://www.todamateria.com.br/buraco-na-camada-de-ozonio/>. Acesso em: 2 dez. 2025
- CAO, Y., *et al.* Homogeneous and heterogeneous photolysis of 57 nitrate in the atmosphere: state of the Science, current research need, and future prospects. **Frontiers of Environmental Science & Engineering**, v.17, n. 48, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11783-023-1648-6>. Acesso em: 2 dez. 2025
- CHEN, L. *et al.* Degradation of roxarsone in UV-based advanced oxidation processes: A comparative study. **Journal of Hazardous Materials**, v. 410, p. 124558. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124558>. Acesso em: 2 dez. 2025
- COSTA, M. P. D., *et al.* Combinação de processos oxidativos fotoirradiados por luz solar para tratamento de percolado de aterro sanitário: catálise heterogênea (TiO<sub>2</sub>) versus catálise homogênea (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>). **Revista Ambiente & Água**, v. 8, n. 1, p. 291-306, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.1063>. Acesso em: 2 dez. 2025
- D FOUST, Richard, *et al.* Changes in Arsenic, Copper, Iron, Manganese, and Zinc Levels Resulting from the Application of Poultry Litter to Agricultural Soils. **Toxics**. [s.l.], v. 6, maio 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/toxics6020028>. Acesso em: 2 dez. 2025
- ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). **Arsenic compounds and environmental contamination**. Washington, 2012. Disponível em: <https://www.epa.gov/sites/default/files/2016-09/documents/arsenic-compounds.pdf>. Acesso em: 2 dez. 2025
- EUROPEAN COMMISSION. Health & Consumer Protection Directorate-General. **Opinion of the scientific committee on animal nutrition on undesirable substances in feed**. 2003. Disponível em: [https://ec.europa.eu/food/fs/sc/scan/out126\\_en.pdf?utm\\_source](https://ec.europa.eu/food/fs/sc/scan/out126_en.pdf?utm_source). Acesso em: 8 dez. 2025
- FERREIRA, L. M. C. *et al.* Electrochemical determination of Roxarsone using preconcentration-based signal amplification on modified screen-printed electrode. **Food Chemistry**, v. 437, p. 137698, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.137698>. Acesso em: 8 dez. 2025
- GUO, Zhongyu, *et al.* Photodegradation of organic micropollutants in aquatic environment: Importance, factors and processes. **Water Research**, [s.l.], v. 23, mar. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.118236>. Acesso em: 2 dez. 2025
- KEEN, O. S., *et al.* Identifying the factors that influence the reactivity of effluente organic matter with hydroxyl radicals. **Water Research**, v.50, n.1, pg. 408-419, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2013.10.049>. Acesso em: 2 dez. 2025
- KHAN, S., *et al.* Photocatalytic dye degradation from textile wastewater: A review. **ACS Omega**, v. 9, n. 1, p. 21751-21767, 2024. Disponível em:

[https://pubs.acs.org/doi/epdf/10.1021/acsomega.4c00887?ref=article\\_openPDF](https://pubs.acs.org/doi/epdf/10.1021/acsomega.4c00887?ref=article_openPDF). Acesso em: 2 dez. 2025

LIU, Yaci *et al.* Environmental Behavior and Remediation Methods of Roxarsone. **Applied Sciences**, [s.l.], v. 12, jul. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/app12157591>. Acesso em: 2 dez. 2025

MANGALGIRI, Kiranmayi P., *et al.* Organoarsenicals in poultry litter: Detection, fate, and toxicity. **Environment International**, [s.l.] v. 75, p. 68-80, fev. 2015. Disponível em <https://doi.org/10.1016/j.envint.2014.10.022>. Acesso em: 2 dez. 2025

MERCK. **Roxarsone**. [s.d.]. Disponível em: <https://www.sigmaaldrich.com/BR/pt/product/usp/1606208>. Acesso em: 2 dez. 2025

MENG, J. *et al.* Photodegradation of roxarsone in the aquatic environment: influencing factors, mechanisms and artificial neural network modeling. **Research Square**, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-452155/v1>. Acesso em: 7 dez. 2025

MICHAEL, I., *et al.* Solar photocatalytic treatment of trimethoprim in four environmental matrices at a pilot scale: transformations products and ecotoxicity evaluation. **Science of The Total Environment**, v. 403, n., pg. 167-173, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.05.003>. Acesso em: 2 dez. 2025

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA E PECUÁRIA (MAPA). **Aditivos autorizados e proibidos**. [s.l.], 25 jul. 2024. Gov.br: Ministério da Agricultura e Pecuária. Disponível em: Proibições — Ministério da Agricultura e Pecuária. Acesso em: 2 dez. 2025

MISHRA, Nirmalendu Sekhar, *et al.* A Review on Advanced Oxidation Processes for Effective Water Treatment. **Current World Environment**, [s.l.], v. 12, dez. 2024. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.12944/CWE.12.3.02>. Acesso em: 2 dez. 2025

PUBCHEM. **Roxarsone (CID 5459949)**. National Center for Biotechnology Information, 2024. Disponível em: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov>. Acesso em: 29 nov. 2025.

RIBAS, S. **Fotossíntese**, [s.l.], 10 abr. 2016. Blogspot: Professora Solange Ribas. Disponível em: <https://profasolangeribas.blogspot.com/2016/04/fotossintese.html>. Acesso em: 2 dez. 2025

RUEDA-MÁRQUEZ, Juan Jose, *et al.* Toxicity Reduction of Industrial and Municipal Wastewater by Advanced Oxidation Processes (Photo-Fenton, UVC/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, Electro-Fenton and Galvanic Fenton): A Review. **Catalysts**, [s.l.], v. 10, jun. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/catal10060612>. Acesso em: 2 dez. 2025

SILBERGELD, E. K. *et al.* Industrial food animal production, antimicrobial resistance, and human health. **Environmental Health Perspectives**, [s.l.], v. 116, n. 7, p. 938–944, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1146/annurev.publhealth.29.020907.090904>. Acesso em: 2 dez. 2025

TRAN, H. D. *et al.* Kinetics of photocatalytic degradation of organic compounds: a mini-review and new approach. **Royal Society of Chemistry**, v. 13, p. 16915-16925, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1039/D3RA01970E>. Acesso em: 8 dez. 2025

UNITED STATES FOOD AND DRUG ADMINISTRATION (FDA). **Arsenic-based Animal Drugs and Poultry**. Washington, 2022. Disponível em: [https://www.fda.gov/animal-veterinary/product-safety-information/arsenic-based-animal-drugs-and-poultry?utm\\_source](https://www.fda.gov/animal-veterinary/product-safety-information/arsenic-based-animal-drugs-and-poultry?utm_source). Acesso em: 8 dez. 2025

UNITED STATES FOOD AND DRUG ADMINISTRATION (FDA). **Roxarsone and arsenic in chicken meat**. Washington, 2013. Disponível em: <https://www.fda.gov/animal-veterinary/product-safety-information/arsenic-based-animal-drugs-and-poultry>. Acesso em: 2 dez. 2025

YUAN, Y., *et al.* Photolysis of roxarsone in aqueous solutions containing goethite under simulated sunlight irradiation: kinetics, mechanism and degradation pathways. **ACS EST Water**, v. 2, p. 830-840, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/acsestwater.2c00030>. Acesso em: 7 dez. 2025

ZAMBRANO-ARAENA, J. *et al.* Advanced oxidation processes by UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> for the removal of anionic surfactants in a decentralized wastewater treatment plant in Ecuador. **Water Science & Technology**, v. 90, p. 2340-2351, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.2166/wst.2024.311>. Acesso em: 8 dez. 2025