

PROPOSTA DIDÁTICA PARA O ENSINO DE RADIOATIVIDADE: CÉSIO-137 - O CASO DE GOIÂNIA

TEACHING PROPOSAL FOR TEACHING RADIOACTIVITY: CESIUM-137 - THE CASE OF GOIANIA

Karenina Teixeira de Menezes  

Universidade Federal de Pelotas (UFPel)

✉ kareninateixeira24@gmail.com

Alice Gaier Viario  

Universidade Federal de Pelotas (UFPel)

✉ alicegaier@gmail.com

Alessandro Cury Soares  

Universidade Federal de Pelotas (UFPel)

✉ alessandrors80@gmail.com

Bruno dos Santos Pastoriza  

Universidade Federal de Pelotas (UFPel)

✉ bspastoriza@gmail.com

RESUMO: O presente trabalho consiste em uma proposta que possibilite a percepção da ciência como interseção de diversos saberes, localizando o campo científico no mundo através dos olhares da cultura, da arte e da política. Cinema e arte estão interligados diretamente, sendo o cinema uma arte voltada ao público, consideravelmente acessível, mais próxima do cotidiano das pessoas e dos estudantes. Com este trabalho foi possível desenvolver uma sequência de trechos do filme Césio 137 - O Pesadelo de Goiânia para abordar diversos enfoques do tema radioatividade no ambiente escolar.

PALAVRAS-CHAVE: Radioatividade. Arte. Química. Cinema.

ABSTRACT: This work consists of a proposal that makes it possible to perceive science as the intersection of several types of knowledge, locating the scientific field in the world through the eyes of culture, art, and politics. Cinema and art are directly interlinked, with cinema being an art form aimed at the public, considerably accessible, closer to people and students' everyday lives. With this work, it was possible to develop a sequence of excerpts from the movie Caesium 137 - The Nightmare of Goiania to address various approaches to radioactivity in the school environment.

KEY WORDS: Radioactivity. Art. Chemistry. Cinema.

Introdução

A radioatividade é um tema relevante dentro do campo da química, e os processos que a atravessam constituem um assunto social que tem ganhado cada vez mais notoriedade devido à crescente demanda por outras fontes de energia, pesquisas na medicina nuclear, indústria alimentícia, arqueologia, geologia, eletrônica, e assim por diante. Além disso, o estudo da radioatividade aborda questões relevantes e atuais, como a geração de energia, equipamentos hospitalares, meio ambiente, dentre outras. No entanto, nem sempre a forma como esse tema é tratado no cotidiano é adequada, e muitas vezes é abordado de maneira incorreta, gerando visões alternativas acerca da ciência (Silva et al., 2017).

Segundo Silva et al. (2013; 2017), Nunes e Mesquita (2022) e Dias et al. (2023), o estudo da radioatividade, bem como sua abordagem no Ensino de Química, demanda conceitos prévios de grande abstração, como estrutura atômica, partículas subatômicas (prótons, nêutrons etc.), energia, elemento químico e núclídeos, dentre outros. Portanto, este enfoque pode e deve ser aplicado no Ensino Médio, com atenção especial às concepções alternativas dos estudantes.

Abordar esse assunto na escola pode ser complexo, e uma forma viável de colocá-lo em prática é valer-se da arte e da química juntas (Telles, 2013; Soares & Loguercio, 2017), através do cinema, mais especificamente de análises fílmicas (Napolitano, 2009). Adicionalmente, recomenda-se utilizar as ferramentas de áreas “menos duras” para perceber o construto científico de uma maneira mais diversa e auxiliar o professor e o aluno a se localizarem como pertencentes a uma rede de saberes estabelecidos atravessando as Ciências das mais variadas maneiras (Ferrari et al., 2021; Silva et al., 2022).

O acidente radiológico que ocorreu no Brasil em 1987, com o vazamento de césio-137 do Instituto Goiano de Radioterapia, foi considerado um dos piores desastres nucleares do mundo, segundo a Agência Internacional de Energia Atômica (Okuno, 2013; Barreto & Fonseca, 2023). Não há dúvidas de que este foi um evento de grande escala, tanto no Brasil quanto internacionalmente, e que apresenta relevância na abordagem do tema radioatividade. Um longa-metragem denominado “Césio 137 - O Pesadelo de Goiânia” foi produzido no ano de 1991. 30 anos depois, o filme recebeu restauração digital e encontra-se disponível na plataforma YouTube (Iglufilmes, 2021). A partir dessa produção é possível extrair detalhes dos acontecimentos, bem como uma dramatização dos fatos que auxilia no processo de discussão no espaço escolar.

Portanto, o ocorrido com o césio-137 em Goiânia constitui o foco deste trabalho para abordar o tema da radioatividade com estudantes de Ensino Médio, visando trazer discussões de cunho científico para identificar e dirimir possíveis concepções alternativas, com apoio da obra cinematográfica que retrata o acontecimento. Foi efetuada uma análise do filme “Césio 137 - O Pesadelo de Goiânia”, com o destaque de trechos importantes ao Ensino de Química. Nas próximas seções serão apresentados os procedimentos metodológicos da análise fílmica, bem como abordagens do Ensino de Radioatividade. Posteriormente, a sequência de trechos selecionados e sua discussão serão apontadas.

Análise Fílmica

Este trabalho é baseado em uma pesquisa qualitativa segundo Mattar e Ramos (2021) e consiste na abordagem e análise fílmica em sala de aula proposta por Napolitano (2009). O autor defende alguns procedimentos para o planejamento do trabalho com produções midiáticas e cinematográficas com fins educacionais, sendo o primeiro assistir ao filme que se deseja apresentar.

Ao assistir ao filme com antecedência, o professor mobiliza o olhar crítico e apurado que tem para, dentre outras possibilidades, selecionar os trechos que serão analisados, anotando, por exemplo, cenas e imagens representativas do filme e do cinema como arte (Napolitano, 2009, p. 23). Mais importante que assistir previamente é selecionar, a partir de trechos do filme, conceitos e valores a serem discutidos com os estudantes. Ainda, Napolitano (2009) destaca que é importante pensar o sentido simbólico da produção cinematográfica, verificando também o possível grau de compreensão que os estudantes terão do que vai ser apresentado. Para isso, ele destaca dois métodos para o uso do cinema em sala de aula:

- a) O filme pode ser um “texto” gerador de debates articulados a temas previamente selecionados pelo professor;
- b) O filme pode ser visto como um documento em si. Neste caso, é analisado e discutido como produto cultural e estético que veicula valores, conceitos, atitudes e

representações sobre a sociedade, a ciência, a política e a história (Napolitano, 2009, p. 20).

Podemos abordar um filme ao explorar temas “transversais” relacionados à cidadania, meio ambiente, sexualidade, diversidade e cultura. Isso permitiria que o professor trabalhasse o filme de maneira mais eficaz, promovendo debates e discussões que levassem os alunos a pensarem sobre o que estão assistindo. A intenção seria ver o filme não apenas como uma obra fictícia, mas como uma ferramenta educativa capaz de provocar questionamentos e aprendizagens previamente planejadas pelo professor. Dessa forma, ele poderia introduzir conteúdos ou temas que estimulassem essa reflexão nos estudantes.

Nesse contexto, o filme é tratado como um documento, com o objetivo de enriquecer o repertório cultural dos alunos, além da análise crítica da obra. O professor, ao adotar esse método, deve considerar quais perguntas pretende fazer utilizando o filme, quais questões deseja discutir com os alunos e como essa atividade se conecta com o conteúdo da disciplina.

Outros autores também defendem a análise fílmica em sala de aula, como apontam Gordo e dos Santos (2020), fazendo desta uma metodologia importante para aliar arte à educação, proporcionando espaços de desenvolvimento do pensamento crítico. Com isso, é importante atentar para o “depois” da exibição do filme durante o planejamento da atividade, ou seja, precisamos delinear os objetivos com a atividade de busca no filme para valer-se ao máximo da ação.

Fica evidente, segundo Cunha e Giordan (2009), a potência do cinema, uma vez que há em produções cinematográficas episódios sobre química com potencial de discussão: “os filmes podem refletir, realçar ou intensificar alguns aspectos da opinião pública sobre determinado assunto ou tema” (Cunha & Giordan, 2009, p. 10). É possível trazer filmes, seriados, documentários etc. para evidenciar opiniões e conhecimentos dos estudantes para trabalhá-los na escola. De acordo com Machado e Silveira (2020), o cinema tem um grande alcance, principalmente entre o público jovem, e a imagem da ciência abordada pode influenciar a construção e concepção do conhecimento científico dos alunos, demonstrando a importância de aproximar essas discussões do espaço escolar.

Desenvolver a criticidade dos estudantes também é um ponto importante, bem como discutir a construção da ciência e do pensamento científico, haja vista que o tema da radioatividade aparece em diversas produções cinematográficas do gênero ficção científica, podendo produzir ideias que se afastam do conhecimento científico (Campos et al., 2019). Para Machado e Silveira (2020), uma estratégia é utilizar a mediação crítica com estudantes ao trazer ideias e símbolos dos filmes para a química:

Vale ressaltar que, por meio da mediação crítica realizada pelo professor, os estudantes podem compreender a ciência como um construto humano, refletindo sobre o contexto histórico, bem como sobre as concepções de ciência e tecnologia veiculadas no cinema (Machado & Silveira, 2020, p. 3).

Portanto, o filme “Césio 137 - O Pesadelo de Goiânia” foi escolhido para tratar do tema radioatividade, e alguns trechos foram selecionados (Iglufilmes, 2021). Serão discutidas suas interfaces com os acidentes radiológicos, sua prevenção e remediação, algumas imagens da ciência e dos cientistas, bem como os efeitos físicos e biológicos da radiação com potencial para desenvolvimento em sala de aula.

O filme foi assistido por completo em três ocasiões distintas, para potencializar a investigação e seleção de pontos para discussão: na primeira vez, apenas com o intuito de obter uma noção sobre como a radioatividade era abordada; na segunda e terceira, foram feitas anotações em

cada minuto, destacando-se os pontos mais importantes, como a falta de informação da população sobre o césio-137 e outros elementos radioativos.

Césio-137: O Pesadelo de Goiânia

Assistimos pausada e detalhadamente ao longa-metragem que aborda e dramatiza o acidente com o césio-137 na cidade de Goiânia, a fim de identificar trechos com potencialidade de discussão em sala de aula. Diversos materiais jornalísticos e cinematográficos foram produzidos na época e repercutem até os dias de hoje, como apresenta Vieira (2013), com abordagens sociais pela visão das vítimas do acidente, para trabalhar o científico, o social e o artístico.

O filme “Césio 137 - O Pesadelo de Goiânia” é uma montagem cinematográfica produzida a partir de entrevistas com as vítimas sobreviventes do ocorrido (Iglufilmes, 2021). Esta produção retrata o vazamento de césio-137 de um equipamento radiológico, considerado um acidente de categoria 5, dentre as 7 possíveis, a partir da Escala Internacional de Eventos Nucleares, segundo dados de Barreto e Fonseca (2023). Relativamente às vítimas, em torno de 250 pessoas foram diretamente irradiadas pelo césio e quatro vieram a óbito.

Em seu início, o filme mostra o abandono do objeto onde a peça contendo o isótopo radioativo do césio estava e a negligência dos responsáveis por deixar um material potencialmente perigoso ao alcance de qualquer um. Dois catadores de sucata, Wagner e Roberto, encontram a peça de um equipamento radiológico, revestida de chumbo, e resgatam para vendê-la devido ao seu alto valor comercial. Ao longo da história, Devair, o dono do ferro-velho que recebeu a peça, resolve desmontá-la e carregar o conteúdo de seu interior para diversos locais, sem perceber que é ela a causadora de todo o desconforto dele e das pessoas ao seu redor.

Ao abrir a peça, um pó é encontrado, e algumas propriedades despertam o interesse dele. Alguns eventos começam a acontecer, e a saúde do próprio Devair e das pessoas ao seu redor começa a ser afetada. Mesmo sem considerar a possibilidade de ser a peça a responsável por tudo isso, quando surge a suspeita sobre a causa (radiação), eles não têm uma compreensão exata do que seria radiação, tratando-a como uma doença contagiosa. Apesar dessa hipótese, o dono do ferro-velho ainda insiste que a peça não é a culpada por nada desses acontecimentos. Deslumbrado com o brilho do césio-137, mesmo sem saber do que se tratava, ele seguiu manuseando o tal pó e deixando que outras pessoas também tivessem acesso a ele.

Diante disso, destacamos alguns pontos que consideramos relevantes para a discussão, como, por exemplo, o fato de as “bolinhas” de césio brilharem excessivamente. Apesar de desconfiada da peça, a esposa de Devair esquece tudo isso só por causa do brilho, e inclusive eles tomam banho à luz da peça, que emite uma forte luz azul no escuro. Em outros momentos, o dono do ferro-velho entrega algumas dessas “bolinhas” para familiares e amigos, alegando que o brilho delas é “a coisa mais linda do mundo” (Iglufilmes, 2021), e ninguém sequer desconfia do que se trata, apenas ficam encantados com a cor.

Somente quando recebe um bilhete de alguém que trabalha no aterro sanitário, alertando sobre a possibilidade de o material conter urânio radioativo (que, segundo mostra o filme, “estoura os ossos”), é que ele realmente se preocupa e começa a contar quem morrerá além dele. A falta de informação contribuiu para a irresponsabilidade daqueles que deixaram o material abandonado, assim como das pessoas que tiveram contato com a substância e expuseram outras, sem a menor ideia dos danos que isso poderia causar a todos.

Outro ponto importante é que, mesmo sem saber do que se tratava o pó e seu brilho, a mãe da menina Leide (sobrinha de Devair) não pede para ela lavar as mãos antes do jantar, logo após a menina brincar com as tais “bolinhas”. É fato que desde o começo, quando falam sobre a peça e os sintomas das pessoas, os profissionais do hospital visitado pela esposa de Devair não se preocupam em investigar do que se trata.

No Quadro 1 estão sistematizados em ordem temporal crescente os trechos do filme, alguns dos quais serão discutidos com maior profundidade a seguir.

Quadro 1: Trechos selecionados do filme para discussão em sala de aula.

Minutagem	O que ocorre no filme
04:47	Encontrado material abandonado com metais comercializáveis
09:22	Abertura do halter de chumbo no qual se encontrava o material radioativo, catador tenta colocar fogo no césio
11:30	Um dos catadores passa mal nas horas seguintes à manipulação do césio
17:26	Descobrimto e abertura da peça por Devair, além de ter mexido nela sem saber do que se tratava
18:02	Aberta e emitindo luz, a peça fica posicionada na frente do pássaro da mulher de Devair
20:20	Quem achou a peça começa a sentir muita sede e calor
21:34	Quem achou a peça começa a vomitar
22:29	O pássaro morre, e Devair carrega a peça para todo lado
28:07	Aparecem queimaduras (pequenas bolhas) que coçam nas mãos e braços de quem achou a peça
36:11	Primeira pessoa a desconfiar da peça (enfermeira) e a falar sobre raios X
39:06	Casal toma banho à luz da peça contendo césio-137
44:55	“Bolinhas” brilhando excessivamente
01:01:40	A menina Leide brinca com as “bolinhas” e logo após vai jantar sem ter lavado as mãos
01:06:43	“Tá queimando”
01:14:03	Menciona-se pela primeira vez a radioatividade: “Isso é uma doença?”
01:15:56	Radioatividade associada ao urânio
01:24:33	Um médico vai ao ferro-velho e avisa que “a doença” de Devair tem a ver com a peça, e quando Devair tenta se aproximar dele, ele corre desesperado
01:25:00	A imprensa local realiza uma reportagem em frente à sede da Vigilância Sanitária

Fonte: Autores.

Por se tratar de um acidente ocorrido no Brasil, baseado na inocência e curiosidade de algumas pessoas, aliado à falta de responsabilidade no descarte correto de materiais radioativos, o episódio com o césio-137 tem um grande potencial para contextualizar o Ensino de Química (Ferrari, 2021).

Radioatividade e Potencialidades Didáticas

Nesta seção serão abordados aspectos conceituais da radioatividade, bem como aplicações realizadas no Ensino de Química e alguns estudos presentes na literatura acerca do tema. Para realizar uma intervenção didática em sala de aula, entendemos como importante pontuar os conteúdos programáticos que podem estar presentes na discussão, uma vez que Napolitano (2009) afirma que no processo de planejamento da análise fílmica é importante pontuar os conceitos e valores que serão trabalhados.

Segundo Okuno (2013) e Barreto e Fonseca (2023), o caso do césio-137 na cidade de Goiânia foi um evento de grande escala, e a investigação da fonte radioativa, a medição da radiação total liberada e o cuidado com os irradiados e contaminados foram bastante desafiadores; logo, são importantes pontos para discutir com os estudantes em sala de aula. Para entender por que os catadores encontraram o núcleo de césio, cabe discutir os usos da radiação. A energia obtida através do decaimento ou das transmutações artificiais de átomos radioativos possui diversas aplicações na sociedade, desde datação de rochas até irradiação de alimentos, tornando o uso de elementos radioativos significativo (Carvalho & Oliveira, 2017; Silva et al. 2019; Freitas & Vaz, 2021; Santana et al., 2021).

Entendendo a importância da radioatividade na sociedade, é fundamental trabalhar este tema com cuidado, para evitar não somente concepções alternativas, mas também uma visão negativa dos processos radioativos devido aos perigos associados ao uso dos radionuclídeos. Silva et al. (2017), Araújo et al. (2018), Gomes et al. (2021) e López e Marco (2022) ressaltam que uma das concepções alternativas comuns aos estudantes é que a radioatividade só tem elementos prejudiciais aos seres vivos, inclusive em processos de irradiação de alimentos, confundindo processos de contaminação e exposição. Ainda, Silva et al. (2019) apontam que o entendimento dos estudantes acerca dos impactos sociais dos usos da radiação é mínimo.

Por conseguinte, é importante pontuar em uma intervenção em sala de aula as vantagens e aplicações das reações nucleares e emissão de partículas, ressaltando os cuidados e processos preventivos envolvidos, como no trabalho de Freitas e Vaz (2021), que levou estudantes ao Centro Regional de Ciências Nucleares do Centro-Oeste, onde estão armazenados rejeitos radioativos do acidente em Goiânia. Um dos primeiros momentos da visita foi acerca do uso da radiação para geração de energia elétrica: “Essa etapa iniciou-se com um vídeo que abordou os benefícios energéticos no uso das fontes radioativas em term nucleares. O Brasil foi posicionado como a 6ª reserva mundial de urânio” (Freitas & Vaz, 2021, p. 59).

Especificamente no ramo da saúde, a energia nuclear é utilizada principalmente em diagnósticos, mas também no tratamento de doenças (Carvalho & Oliveira, 2017). No caso específico do acidente em Goiânia, o césio-137 era utilizado em um equipamento de radioterapia (Goiás, 2024). De acordo com Carvalho e Oliveira (2017): “A radioterapia é empregada no tratamento de câncer usando-se fontes externas ao corpo (teleterapia), fontes inseridas diretamente no local que se quer irradiar (braquiterapia) ou radiofármacos (doses internas)” (p. 40). É interessante perceber, a partir de Gomes et al. (2017), que a medicina nuclear é entendida pelos estudantes como relacionada aos acidentes a partir da radiação, apontando o uso de Textos de Divulgação Científica (TDC) para melhor trabalhar esses conceitos em sala de aula.

Um dos princípios da medicina nuclear é o uso da radiação emitida pelo decaimento dos radionuclídeos. A partir de Nunes e Mesquita (2022) e Dias et al. (2023), foi possível perceber que nos trabalhos presentes na literatura, quando são retratadas as reações de fissão nuclear, em específico a emissão de partículas, prevalece a abordagem histórica, porém a parte conceitual também é importante e merece destaque. Diante disso, alguns pontos são relevantes para trabalhar este tema em sala de aula e serão aprofundados a seguir.

De acordo com Fernandes et al. (2021), a energia nuclear é obtida através de processos de transformação de núcleos atômicos, que podem se dar através de processos naturais de decaimento dos núcleos ou do processo denominado “transmutação artificial”. De acordo com Okuno e Yoshimura (2010), radiação é energia em trânsito, e esta pode ser corpuscular ou eletromagnética, dependendo da sua natureza. Neste caso, cabe destacar o trabalho de Louis de Broglie ao indicar a natureza dual da matéria, como partículas ou ondas eletromagnéticas (de Broglie, 1924), influenciando os estudos acerca da radioatividade. O estudo da estrutura da matéria é fundamental para o entendimento da radioatividade, porém são nos estudos acerca das partículas α que Rutherford (1911) propôs um modelo para explicar a estrutura do átomo.

Segundo Cassini (2012), também nos estudos da radiação, porém na desintegração β , os estudos acerca do núcleo atômico são aprofundados.

A partir de Okuno e Yoshimura (2010), a emissão de radiação provém de núcleos instáveis, portanto o estudo das partículas e forças que atuam no núcleo atômico é um tópico fundamental no entendimento da radioatividade. Tendo em vista o desenvolvimento da mecânica quântica, as interações no núcleo do átomo têm uma natureza bastante complexa, e a força eletromagnética de repulsão entre os prótons e a existência do núcleo conduziu a diversos estudos (Avancini & Marinelli, 2009; Cassini, 2012). Então, por volta de 1930, o físico Hideki Yukawa sugeriu a existência de uma partícula, a qual chamou de “méson”, responsável por realizar a mediação entre as partículas do núcleo, a força nuclear ou força forte (Avancini & Marinelli, 2009).

Chamamos o processo de perda de energia e partículas por um átomo radioativo de decaimento, pois a energia do nuclídeo inicial é maior do que a resultante após a reação nuclear. É possível que uma reação de fissão nuclear, na qual um núcleo se divide em outros núcleos e/ou partículas, ocorra espontaneamente, ou seja, induzida pelo bombardeio de partículas, visto que reações nucleares de fissão também podem ser induzidas por bombardeamento de prótons, por exemplo. No decaimento dos núcleos radioativos ocorre a emissão de partículas do tipo α , β^- e β^+ , além da radiação γ , dentre outras (Okuno, 2013; Tauhata et al., 2014). A partir das características do átomo é possível prever seu decaimento e os principais tipos de emissão de radiação. De acordo com os estudos de Dias et al. (2023), não foram evidenciados na literatura trabalhos que tratassem especificamente da emissão de partículas no Ensino de Radioatividade, enquanto Nunes e Mesquita (2022) apontam que as radiações, em especial as partículas alfa, aparecem somente sob o contexto histórico de suas evidências. Portanto, explorar a abordagem destas no Ensino de Química e Radioatividade constitui um potencial.

Segundo Rutherford (1911), as partículas α são definidas por possuírem dois nêutrons e dois prótons ${}^4_2\alpha$. Elas são emitidas diretamente pelo núcleo instável. As partículas β^- têm a mesma natureza dos elétrons, porém são emitidas pelo núcleo no processo de conversão de um nêutron em um próton. Já as partículas β^+ , também chamadas de pósitrons (e^+), são consideradas uma antipartícula do elétron, geradas pelo núcleo no processo de transmutação de um próton em um nêutron. Há também a captura de elétrons pelo núcleo, com o mesmo efeito que a emissão β^+ , porém não há a emissão de partículas elementares, mas sim de raios-X, devido ao decaimento dos elétrons mais externos para ocupar o lugar vazio dos elétrons mais internos capturados (Avancini & Marinelli, 2009; Okuno & Yoshimura, 2010; Cassini, 2012; Tauhata et al., 2014). No Quadro 2 estão representados estes quatro tipos de decaimento. Os processos de decaimento beta positivo e beta negativo envolvem a emissão de um neutrino e um antineutrino do elétron (ν), respectivamente, segundo descrito por W. Pauli e observado por C. Cowan e F. Reines (Cassini, 2012).

Quadro 2: Representação dos processos de decaimento dos átomos.

<p>Partículas α</p> ${}^x_yA \rightarrow {}^{x-4}_{y-2}B + {}^4_2\alpha$	<p>Partículas β^-</p> ${}^1_0n \rightarrow {}^1_1p + {}^{-1}\beta + {}^0_0\nu$
<p>Partículas β^+</p> ${}^1_1p \rightarrow {}^1_0n + {}^+1\beta + {}^0_0\nu$	<p>Captura de elétron</p> ${}^1_1p + {}^{-1}e \rightarrow {}^1_0n + {}^0_0\nu$

Fonte: Autores.

Em alguns processos de decaimento ocorre a liberação da radiação γ , que consiste em ondas eletromagnéticas da mesma natureza da luz visível, porém de maior energia, acima dos raios X. É

mais penetrante que as radiações α e β , por não possuir carga nem massa considerável, mas com isso tem menor poder ionizante.

De forma geral, um núcleo com excesso de nêutrons em relação aos prótons emitirá radiação β^- , com a transmutação de um nêutron em um próton. Já um núcleo com excesso de prótons fará o caminho inverso, com a emissão β^+ , onde um próton se transforma em um nêutron. Ainda, um núcleo com excesso de prótons pode capturar um elétron das camadas mais internas para fazer a transmutação $p \rightarrow n$. Um núcleo com excesso de prótons e nêutrons poderá emitir partículas ${}^4_2\alpha$.

De acordo com Yoshimura (2009), Okuno (2013) e Tauhata et al. (2014), a radiação pode ser dividida em direta ou indiretamente ionizante, onde as partículas carregadas são consideradas diretamente ionizantes, enquanto a radiação eletromagnética, que não possui carga elétrica, é tida como indiretamente ionizante. Justamente por não possuir carga, a radiação γ é mais penetrante que α e β , não apresentando radiação de freamento, sendo menor sua interação com o campo eletrônico dos átomos que atravessa (Tauhata et al., 2014). Isso explica o fato de os radionuclídeos nos equipamentos radiológicos estarem envoltos por uma cápsula de material denso, normalmente chumbo ou concreto.

Os efeitos causados pelo choque entre partículas neutras e carregadas ou da interação dos fótons da radiação eletromagnética são diferentes devido à natureza do material e da radiação. São três os principais modos de interação da radiação com a matéria que merecem destaque: efeito fotoelétrico, efeito Compton e produção de par elétron-pósitron. Esta pode ser uma discussão pertinente ao Ensino Superior, mais do que ao Ensino Básico, ou então para cursos técnicos que abordam este assunto.

O efeito fotoelétrico, descrito por Einstein em 1905, ocorre quando a energia do fóton incidente é absorvida totalmente por um único elétron do átomo em que colidiu. Uma frequência mínima incidente, equivalente à energia de ligação do elétron, é absorvida, e um fotoelétron é emitido com energia cinética igual à diferença entre as energias da radiação incidente e de ligação do elétron. Também há o efeito ou espalhamento Compton, que ocorre quando o fóton é desviado por uma partícula carregada, geralmente um elétron, resultando em uma diminuição da energia (aumento do comprimento de onda) do fóton espalhado, tipicamente na faixa de raios X ou de raios gama. A energia cinética total é parte do elétron do choque e o restante do fóton incidente. É possível que a interação elétron-núcleo seja muito alta e a energia do fóton seja baixa, então o elétron não é arrancado, mas o fóton segue sofrendo espalhamento, chamado de “efeito Rayleigh” (Okuno, 2013; Tauhata et al., 2014).

Se a colisão ocorre próximo à região nuclear, toda a energia do fóton pode ser absorvida, gerando um par elétron-pósitron, que é ejetado do núcleo com a energia cinética do momento da colisão. O pósitron, em sua trajetória, se combina com um elétron próximo, arrancando-o. Portanto, são liberados dois fótons: aquele gerado no momento da colisão e outro originado da colisão com o pósitron.

Percebemos, então, que após a incidência de radiação ionizante na matéria, sejam átomos em compostos ou moléculas, a estrutura química é afetada, produzindo componentes com propriedades diferentes que podem ser mensuradas ou, até mesmo, observadas. Para sistemas moleculares, a radiação ionizante pode formar pares de cátions e ânions, mas principalmente radicais livres comuns à matéria orgânica, que desencadeiam diversas reações químicas devido à sua alta reatividade (Okuno, 2013).

Como pontuado acima, a radioatividade é alternativamente entendida como algo ruim pelos estudantes, então uma possibilidade na discussão das interações da radiação em sala de aula é mencionar que estamos expostos à radiação diariamente. Okuno (2013) afirma que existem radioisótopos na constituição do corpo humano, além da exposição à radiação cósmica, que está presente no Universo e interage com a atmosfera terrestre, ambos constituindo a chamada

“radiação de fundo”. Logo, nem se quiséssemos seria possível evitar os efeitos da radiação no corpo humano e demais seres vivos, porém há diferença entre a radiação de fundo e a exposição crônica ou aguda.

Quando falamos da incidência em seres vivos, é central destacar que a periculosidade da contaminação depende da dose, haja vista que temos radiação atuando sobre nós o tempo inteiro. Quando a irradiação sobre um indivíduo acontece em eventos isolados, é denominada “incidência aguda”. Segundo os estudos de Okuno (2013), elencamos uma sequência de ações da radiação ionizante no corpo humano:

- estágio físico, em que ocorre a ionização de um átomo em cerca de 10-15 s;
- estágio físico-químico, quando ocorrem as quebras das ligações químicas das moléculas que sofreram ionização, com duração de uns 10-6 s;
- estágio químico, quando os fragmentos da molécula se ligam a outras moléculas, com duração de poucos segundos;
- estágio biológico, que pode durar dias, semanas ou até várias dezenas de anos, quando surgem efeitos bioquímicos e fisiológicos, com alterações morfológicas e funcionais dos órgãos (OKUNO, 2013 p. 191).

Em casos de acidentes com radiação ou situações de emergência, a melhor forma de tratar contaminados e irradiados é conhecendo a dose total absorvida (Sasaki, 2023). Em geral, os detectores são constituídos por um material ou algum elemento que absorve radiação e por um sistema que transforma essa informação em um tipo de medição. As diferentes combinações de material e sistema geram os diferentes tipos de dosímetros.

Os filmes dosimétricos foram a primeira forma de detectar radiação, utilizados por Henri Becquerel em seus estudos sobre raios X e posteriormente sobre radioatividade, os quais são utilizados até hoje para exposição laboral à radiação. Também muito úteis são os dosímetros termoluminescentes, em que o material consiste em um sal, como o fluoreto de cálcio ou cloreto de sódio, e o sistema de detecção se dá pela liberação da radiação a partir da emissão de fótons pelo material quando aquecido. A energia liberada na forma de fótons é convertida, gerando a quantidade de radiação incidente. Porém, a técnica apresenta algumas falhas, como o efeito de desbotamento, em que, após um certo tempo, parte da dissociação sofrida pelo sal é revertida caso o tempo até que a amostra seja aquecida seja longo. Além disso, uma vez medida, a dose de radiação não pode ser reconstituída, sendo considerada uma técnica destrutiva.

Já os contadores são utilizados para medir a velocidade das reações de decaimento. Cada sinal emitido indica uma desintegração nuclear lida pelo equipamento. Bastante conhecidos são os contadores Geiger, que detectam radiação pela ionização de um gás a baixas pressões, que, uma vez ionizado, permite um fluxo elétrico convertido em um estalo audível ou então mensurado diretamente em termos de dose absorvida. Também existem os contadores de cintilação, que identificam radiação a partir da emissão de luz de substâncias fosforescentes quando expostas à radiação, e o mecanismo também ocorre pela conversão do sinal luminoso em sinal elétrico, podendo assim medir a radiação pela intensidade de sinal lido pelo equipamento. Os contadores podem medir quantitativamente a radiação em dose absorvida, porém seu uso se dá quando as reações de decaimento estão acontecendo, não sendo possível realizar detecção reconstitutiva.

Análise e Discussão

Inicialmente, em torno do momento 04:47 do filme, já entendemos como a população de Goiânia teve acesso ao isótopo radioativo do césio, através de um equipamento abandonado de uma

clínica de análises desativada. O que chamou a atenção dos recicladores era uma peça com tamanho considerável e que, devido ao seu peso, deveria se tratar de algum metal mais valioso para ser vendido nos chamados “ferros-velhos”. Destacamos a possibilidade de debater a comercialização de metais em sucatas e itens recicláveis (Santos, 2017), como fica evidente na fala dos catadores que encontram a peça de chumbo que contém em seu núcleo o isótopo radioativo de cério:

“O trem é pesado!”

“Um chumbaço, meu.”

“O chumbaço tá aí, mais de 150 kg.”

“Quanto mais pesado, melhor pra nós.” (Iglufilmes, 2021).

Após levarem a peça para casa e avaliarem que teria valor de venda, em torno do minuto 9 eles abrem o compartimento onde estava armazenado o cério e derramam seu interior no chão, revelando “bolinhas” azul-escuro. Assim, Roberto, um dos catadores, resolve “testar” este material e pede que o colega Wagner busque um palito de fósforo, para verificar se há reatividade com o fogo. Sem saber a origem do material, o homem aproxima-se dele para colocar o palito de fósforo aceso, sem prever que este poderia incendiar ou mesmo explodir com o fogo. Para além da radioatividade, que ainda nem era imaginável no momento, este já era um comportamento perigoso (Figura 1).

Figura 1: Roberto e Wagner tentam queimar as “bolinhas” de cério com um fósforo (dramatização).



Fonte: Iglufilmes (2021).

Um questionamento possível é o motivo pelo qual o meio em que o cério-137 é aplicado não é inflamável, ou seja, não pega fogo. As reações nucleares, tanto fissão quanto fusão, que geram os decaimentos (partículas α , β e radiação γ), liberam nesse processo muita energia proveniente da instabilidade do núcleo. Se analisamos os tipos de interação da radiação com a matéria (efeitos fotoelétrico e Compton e formação de par elétron-pósitron), a energia pode ser liberada inclusive na forma de calor. A propósito, no acidente com a usina termonuclear em Chernobyl, em um primeiro momento, pensou-se tratar de um incêndio (Silva et al., 2021). Nos reatores das usinas nucleares, segundo Fernandes et al. (2021), um sistema de resfriamento é necessário devido à quantidade de calor produzido. Portanto, o sistema que contém os radionuclídeos em grande quantidade e em que há risco de fogo deve apresentar os cuidados necessários.

Além da energia em forma de calor, um dos efeitos da radiação na interação com a matéria é a emissão de luz sem que uma fonte externa seja necessária, ou seja, há a liberação de fótons (Okuno, 2013; Tauhata et al., 2014). Como apresentado anteriormente, a radiação γ interage com os átomos ao seu redor emitindo energia luminosa, sendo o caso do cério-137, fato que é

retratado fortemente ao longo do filme. O radioisótopo estava dentro de uma cápsula, e na janela de irídio (Chaves, 2017), que foi rompida, é possível perceber a passagem da radiação através da luz azulada emitida. Um ponto excessivo da dramatização foi retratar essa luminosidade de forma muito intensa, assemelhando-se à luz de uma lanterna, como é possível ver a partir do minuto 17:26, quando Devair percebe o fenômeno. Já no minuto 18:02, Devair coloca a peça, até então com um brilho inexplicável por ele, ao lado de seu pássaro, dado que não sabia que o brilho provinha da emissão de radiação e que esta poderia ser perigosa aos seres vivos.

A partir de Okuno (2013), apontamos algumas consequências da interação da radiação com a matéria orgânica e biológica, e no caso do pássaro de Devair, é possível que dois mecanismos tenham ocorrido: a interação direta da radiação com células e moléculas importantes, como o DNA, ou com a formação de radicais livres da quebra da molécula de água, causando danos às células e aos tecidos. Nesse sentido, sobre a interação da radiação ionizante com o corpo dos seres vivos, em especial destacamos o trecho 22:29, quando, após a exposição à peça contendo césio-137, o pássaro de Devair morre. Neste momento, os personagens poderiam ter buscado relacionar o ocorrido com o pássaro à peça, que era a única novidade na casa, pelo menos conforme relatado. Então, destacamos a importância de uma educação cidadã, onde os estudantes possam imaginar acerca de sua realidade, levando o pensamento científico para seu meio, podendo, por exemplo, fazer questionamentos em casos parecidos com o relatado no filme analisado.

A questão da luminosidade do césio-137 fica evidente no trecho que inicia nos 44 minutos e 55 segundos, quando Devair espalha o césio no chão e apaga a luz para ver o brilho, ressaltando-se o excesso de intensidade da luz retratada na dramatização. Essa imagem aparece na Figura 2.

Figura 2: Representação do brilho do césio-137 no filme: à esquerda, o césio espalhado no chão; à direita, seu brilho após Devair apagar a luz.



Fonte: Iglufilmes (2021).

Essa imagem reforça algumas concepções alternativas acerca do conhecimento científico, exagerando o brilho da luz emitida e, ainda, tratando o césio como “pequenas bolinhas” ao invés de um pó granuloso, como o cloreto de césio-137 se apresenta. (Vieira, 2010; Okuno, 2013). O nome “césio” origina-se da palavra latina *caesius*, que significa “céu azul”. Uma análise espectral evidenciou linhas azuis brilhantes no seu espectro (Vieira, 2010, p. 18). Aqui podem ser abordadas em sala de aula questões referentes à interação da radiação com a matéria, como os efeitos descritos na seção anterior, que geram a emissão de fótons, que vemos a partir do brilho natural dos radioisótopos, explicando a origem do brilho e pontuando que no filme isso foi retratado de forma dramatizada.

Na sequência, no trecho 01:01:40, o filme retrata Leide, sobrinha de Devair, que, encantada com o brilho do césio, visto como algo mágico, deseja brincar com o material imediatamente. Porém, quando seu pai lhe apresentou o item, já era hora de jantar, e a menina, após manipular as “bolinhas” brilhantes, comeu sem lavar as mãos. Cabe destacar que Leide pode ou não se tornar uma fonte radioativa após a ingestão, dependendo da quantidade ingerida. A atividade de um radioisótopo, medida pelos decaimentos por unidade de tempo por grama, pode ser tão baixa

que a radiação interaja apenas com os órgãos internos de Leide, sem causar danos a outros corpos ao seu redor. Sobre a diferença entre irradiação e contaminação, neste caso Leide foi contaminada, pois ingeriu o material radioativo, e além de sofrer os efeitos da radiação dentro do seu corpo, também a emitia por estar com a fonte em seu organismo (Okuno, 2013; Oliveira et al., 2022; Sasaki, 2023). Caso ela somente tivesse sido irradiada, sofreria os efeitos negativos da radiação no corpo enquanto tivesse contato próximo com a fonte de césio, mas com a ingestão os efeitos tornam-se prolongados e, portanto, mais severos. Collins, Jardim e Collins (1998) apresentam algumas das interações do césio-137 com o organismo humano, e um dos pontos críticos é a interação da radiação liberada pelo radioisótopo com o DNA presente nas células.

Infelizmente, Leide teve consequências muito graves da exposição à radiação e faleceu mesmo após ser levada para um hospital de grande porte, provavelmente devido ao prolongamento até que sua situação fosse resolvida. Em 1988, ano seguinte ao acidente, o governo de Goiás instituiu a Fundação Leide das Neves Ferreira, que levou o nome da vítima mais jovem desse acidente, a sobrinha de Devair, para acompanhamento das pessoas expostas à radiação (Oliveira et al., 2022).

Na sequência, no momento 01:14:03 do filme, a radioatividade é tratada como uma doença contagiosa pelos personagens da dramatização. Porém, para que a radioatividade seja encarada como contagiosa, uma pessoa (ou algum animal ou objeto) precisa ser contaminada de forma tópica, podendo assim depositar material radioativo em outra caso não tenha passado por limpeza ou desinfecção. Como pontuado por López e Marco (2022) e Silva et al. (2017), pode existir entre os estudantes que assistirão ao filme uma concepção parecida de que tudo relacionado à radioatividade é sinônimo de perigo. Os efeitos da irradiação e da contaminação no corpo humano, como discutem Okuno (2013) e Oliveira et. al (2022), têm diferentes graus de impacto. Como fica evidente no filme, algumas vítimas tiveram sintomas leves, como desconforto, coceira, vômitos, enquanto outras tiveram sintomas mais graves, como queimaduras na pele e ferimentos em órgãos e tecidos que levaram à morte (Iglufilmes, 2021). Este ponto é corroborado por Nunes e Mesquita (2022) como relevante para ser trabalhado com estudantes do Ensino Médio, por levantar questões sociais e ambientais importantes na formação cidadã.

Ainda sobre esta discussão, cabe trazer tanto o trecho 01:14:03 quanto 01:15:56, quando os personagens discutem sobre os impactos da radioatividade, inclusive questionando se se trata de uma doença. Na conversa, no segundo trecho um deles comenta que “pode ser urânio radioativo, que estoura os ossos” (Iglufilmes, 2021). Além dos efeitos biológicos da radiação, já comentados, cabe trazer a menção ao “urânio radioativo”. A entonação indica que nem todo urânio é radioativo, e este é um ponto importante de ser trabalhado, pois quando mencionamos o césio-137, e não somente césio, isto indica que é o isótopo de massa 137 do césio, que apresenta radioatividade, e o mesmo ocorre com o urânio, que possui diferentes isótopos, porém todos são radioativos, mesmo que alguns com baixa atividade. Além disso, cabe utilizar este ponto para apresentar que o césio-137 é produto do decaimento do urânio-235, ou seja, além da emissão das partículas também pode haver a fissão nuclear, em que o núcleo instável se divide em outros menores (Okuno, 2013).

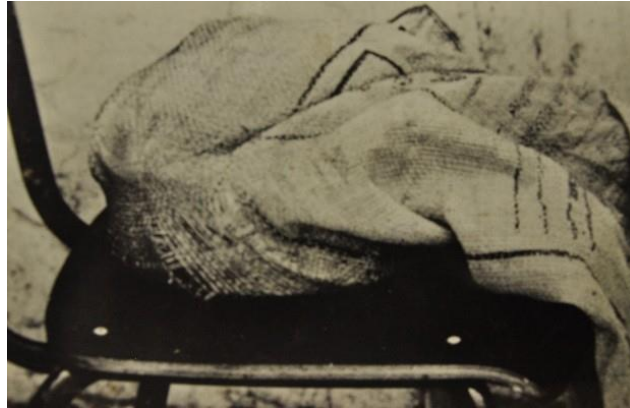
Acerca do tratamento e atenção aos radioacidentados, cabe trazer aqui um trecho da Secretaria de Saúde de Goiás:

O tratamento oferecido aos radioacidentados à época do acidente, em 1987, baseou-se em normas internacionais de descontaminação, isolamento e terapêutica. Assim, após a triagem e o encaminhamento do paciente, iniciava-se o tratamento médico (Goiás, 2024).

No trecho 01:25:00, a imprensa da cidade está realizando uma matéria em frente à sede da Vigilância Sanitária de Goiânia, relatando o ocorrido e pressionando os órgãos competentes por

respostas. Freitas e Vaz (2021) apresentam o caso em seu trabalho e reiteram que as informações, por si só, não trazem conhecimento; é necessário discussão, mas também aprofundar os conceitos científicos. Destacamos que o objetivo deste trabalho é justamente discutir o caso do vazamento de césio-137 na cidade de Goiânia, inclusive apontando consequências e impactos da falta de informação, da demora para notificação dos órgãos competentes e da morosidade destes na tomada de decisões para lidar com o fato. Na Figura 3 é possível ver um saco contendo a cápsula quando o material foi levado para a Vigilância Sanitária da cidade de Goiânia, evidenciando que nem os respectivos profissionais entendiam a gravidade da situação.

Figura 3: Saco contendo cápsula de césio-137 levada à Vigilância Sanitária.



Fonte: Goiás (2024).

É apontado por Carvalho (2012), Chaves (2017) e Oliveira (2022) que a forma como o caso foi tratado pela mídia acabou levando muitas pessoas a verem com preconceito os afetados pela radiação, inclusive propagando desinformação. Carvalho (2012) denota o relato de uma moradora da cidade onde os rejeitos de césio-137 foram inicialmente levados: "O povo quis ir embora. Ninguém queria ficar morando aqui. Diziam que todos iam adoecer. Todo mundo tinha medo" (Carvalho, 2012, n.p.). Levar esta discussão para a sala de aula contribui na formação crítica e cidadã dos estudantes, para que tenham contato com as tecnologias presentes na sociedade, seus usos e impactos.

Neste sentido, por fim, é importante ressaltar que o uso da radioatividade é bastante difundido na sociedade, resultando em diversos benefícios. Portanto, é necessário cuidar para que, a partir dos acidentes que ocorrem, o uso da radiação não seja visto como um perigo. Por isso, um problema baseado na investigação dos benefícios e usos da radioatividade pode auxiliar na compreensão dos estudantes (Carvalho & Oliveira, 2017; Gonzatto, 2020; Freitas & Vaz, 2021; Santana et al., 2021). Uma forma de avaliar o processo de análise fílmica com os estudantes pode se dar a partir de um estudo de caso, investigando as utilidades da radiação a partir da questão-problema: Se a radioatividade é perigosa, por que utilizamos tantos recursos dela? Tendo em vista os apontamentos realizados a partir da análise da dramatização sobre o acidente com césio-137 na cidade de Goiânia, em que os estudantes costumam visualizar os pontos negativos da radioatividade, então uma pesquisa acerca da importância de seus usos na sociedade pode contribuir no processo de ensino e aprendizagem.

A investigação pode se dar a partir de pesquisas em livros e artigos científicos, entrevistas com estudantes, professores e membros da comunidade ao redor dos alunos em questão, ou com a escrita de uma redação ou matéria de jornal, contrastando com os pontos analisados no filme acerca do tratamento da mídia sobre o ocorrido, dentre outras possibilidades. Levantamos algumas perguntas orientadoras: Quais os principais usos da radiação na sociedade hoje? Como as inovações recentes no campo da radiologia estão afetando a precisão dos diagnósticos

médicos? O uso de elementos radioativos em equipamentos de radiologia é essencial para essas inovações? Existem alternativas ao uso de elementos radioativos em equipamentos de radiologia que merecem ser consideradas?

Considerações Finais

Acreditamos que a conjunção entre ciência e arte é uma potencial ferramenta, ampliando as possibilidades do professor e problematizando os conteúdos ministrados em sala de aula, sendo um recurso didático social e um robusto instrumento de percepção de si e do outro. Para isso, as atividades precisam ser pensadas e planejadas à luz desses conceitos, bem como com a nitidez do que se deseja discutir e apresentar.

Ainda são muitas as concepções alternativas de estudantes, e até mesmo da sociedade e da indústria cinematográfica, acerca da radioatividade, portanto trabalhá-la no contexto escolar pode contribuir na construção crítica dos alunos acerca do conhecimento científico, bem como na proximidade com o cinema e a arte. Demonstramos uma possível seleção de trechos do filme “Césio 137 - O Pesadelo de Goiânia”, considerando diversos fatores importantes sobre o tema, bem como algumas discussões viáveis. Temos certeza de que o tema não se esgota em apenas uma atividade; pelo contrário, é potência para futuras discussões, bem como a abrangência de outros episódios históricos e/ou fictícios acerca da radioatividade na sociedade.

Referências

- Avancini, Sidney S., & Marinelli, José R. (2009). *Tópicos de física nuclear e partículas elementares*. Florianópolis: UFSC.
- Barreto, Paulo. M. C., & Fonseca, Evaldo. S. (2023). The Cs-137 radiological accident in Goiânia, Brazil: Conditions and results of the airborne radiometric survey. *Brazilian Journal of Radiation Sciences*, 11(2), 1-13.
- Campos, Renato M., Martinhon, Priscila T., Sousa, Célia, Souza, Elizabeth T., & Rocha, Ângela S. (2019). Uso de filmes no ensino de radioatividade: uma estratégia motivadora para aulas do nível médio. *Scientia Naturalis*, 1(3).
- Cassini, Alejandro (2012). La invención del neutrino: un análisis epistemológico. *Scientiae Studia*, 10, 11-39.
- Cunha, Márcia. B. & Giordan, Marcelo (2009). A imagem da ciência no cinema. *Química Nova na Escola*, 31(1), 9-17.
- De Broglie, Louis (1924). A tentative theory of light quanta. *Philosophical Magazine*, Series 6, 47(278), 446-458.
- Ferrari, Ana C. (2021). *Radioatividade e a história da ciência: uma análise da série Chernobyl*.
- Goiás. Césio 137 Goiânia. Secretaria de Saúde do Governo do Estado de Goiás. *Goiânia*. Disponível em: <https://www.saude.go.gov.br/cesio137goiania>. Acesso em: 24/08/2024.
- Iglufilmes. (2021). *Césio 137 - O Pesadelo de Goiânia*. YouTube. Disponível em: https://www.youtube.com/watch?v=H_Mlihf1ZLA&t=2699s
- López, Ana I. M., & Marco, Paula T. (2022). Misconceptions, knowledge, and attitudes towards the phenomenon of radioactivity. *Science & Education*, 31(2), 405-426.
- Mattar, João. & Ramos, Daniela K. (2021). *Metodologia da pesquisa em educação: abordagens qualitativas, quantitativas e mistas*. Grupo Almedina.

- Machado, Camila J., & Silveira, Rosemari M. C. F. (2020). Interfaces entre cinema, ciência e ensino: uma revisão sistemática de literatura. *Pro-posições*, 31.
- Napolitano, Marcos (2009). *Cinema: experiência cultural e escolar*. In: São Paulo (Estado) Secretaria da Educação (org.). Caderno de cinema do professor: 2. São Paulo: FDE, 10-31.
- Okuno, Emico (2013). Efeitos biológicos das radiações ionizantes: acidente radiológico de Goiânia. *Estudos avançados*, 27(77), 185-200.
- Okuno, Emico, & Yoshimura, Elisabeth. (2010). *Física das Radiações*, 1 ed., São Paulo: Oficina de Textos.
- Oliveira, Lorrayne G., Pereira, Samara S. S., Uchoa, Elza Maria G. S., Silva, Daniela M., Costa, Emília O. A., Gigonzac, Thaís C. V., Silva, Cláudio C., & Cruz, Aparecido D. (2022). Como a genética contribuiu para compreender os efeitos biológicos da exposição humana à radiação ionizante de Césio-137? *Genética na Escola*, 17(2), 158-167.
- Rutherford, Ernest (1911). The scattering of α and β particles by matter and the structure of the atom. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 21(125), 669-688.
- Santos, Juliana A. (2017). Lixo, Reciclagem e Reutilização: introdução a conteúdos de química e a educação ambiental no ensino fundamental. *Vozes do Vale*, 11(6), 1-20.
- Silva, Ademir J. J., Pacheco, Erlan A., Adorni, Dulcinéia S., Alexandrino, Daniela M. & Passos, Christian R. (2017). Concepções alternativas de alunos do ensino médio sobre radioatividade. *Enseñanza de las ciencias*, extra, 3985-3990.
- Silva, Flávia. C. V., Campos, Angela F., & Almeida, Maria A. V. (2013). Alguns aspectos do ensino e aprendizagem de radioatividade em periódicos nacionais e internacionais. *Amazônia: Revista de Educação em Ciências e Matemáticas*, 10(190), 46-61.
- Silva, Waldemar V. M., Silva, Eliriane C., Maia, Poliana F., & Gonçalves, Érica C. (2022). Análise de aspectos de natureza da ciência na minissérie Chernobyl e considerações sobre o uso da minissérie no ensino de ciências. *Revista Brasileira de História da Ciência*, 15(2), 541-569.
- Soares, Alessandro C., Loguercio, Rochele Q. (2017). *A Ciência no Universo da Folia*. 1. ed. Curitiba: Appris, v. 1. 141p.
- Telles, Jardel (2013) Cultura, história e literatura como dispositivos de aprendizagem em química escolar.
- Vieira, Suzane A. (2010). *O Drama Azul: narrativas sobre o sofrimento das vítimas do evento radiológico do césio 137*. 2010. 189 f. Dissertação (Doutorado) - Curso de Antropologia Social, Universidade Federal de Campinas, Instituto de Filosofia e Ciências Humanas, Campinas.
- Vieira, Suzane de A. (2013). Césio-137, um drama recontado. *Estudos avançados*, 27, 217-236.
- Yoshimura, E. M. (2009). Física das Radiações: interação da radiação com a matéria. *Revista Brasileira de Física Médica*, 3(1), 57-67.