

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA**

ALAN BRAGANÇA ZORDAN

**ESTUDO SOBRE OS EFEITOS BIOLÓGICOS DA RADIAÇÃO GAMA DA
PRAIA DE MEAÍPE DA CIDADE DE GUARAPARI-ES**

VITÓRIA 2023

ALAN BRAGANÇA ZORDAN

**ESTUDO SOBRE OS EFEITOS BIOLÓGICOS DA RADIAÇÃO GAMA DA
PRAIA DE MEAÍPE NA CIDADE DE GUARAPARI-ES**

Tese de doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Física do Centro de Ciências Exatas da Universidade Federal do Espírito Santo (PPGFIS/UFES), como requisito parcial para obtenção do Grau de Doutor em Física, área de concentração em Física Aplicada.

Orientador: Prof. Dr. Marcos Tadeu D'Azeredo Orlando

Coorientador: Prof. Dr. Jairo Pinto de Oliveira

VITÓRIA

2023

ESTUDO SOBRE OS EFEITOS BIOLÓGICOS DA RADIAÇÃO GAMA DA PRAIA DE MEAÍPE NA CIDADE DE GUARAPARI-ES

ALAN BRAGANÇA ZORDAN

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof. Dr. Marcos Tadeu D'Azeredo Orlando
(Orientador – PPGFIS/UFES)

Prof. Dr. Jairo Pinto de Oliveira
(Coorientador- PPBioquímica/UFES)

Prof. Dr. Alex Arbey Lopera Sepúlveda
(Examinador Externo UNAL - Colômbia)

Prof. Dr. Luiz Otávio Buffon
(Examinador Externo – MNPEF - IFES)

Prof. Dr. Marco Cunegundes Guimarães.
(Examinador Externo – PPG Biotecnologia UFES)

Prof. Dr. Adilson Ribeiro Prado
(Examinador Externo –IFES campus Serra)

Prof. Dr. Fernando Néspoli Nassar Pansini
(Examinador Interno – PPGFIS/UFES)

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Física do Centro de Ciências Exatas da Universidade Federal do Espírito Santo (PPGFIS/UFES), como requisito parcial para obtenção do Grau de Doutor em Física, área de concentração em Física Aplicada.

Vitória (ES), 13 de julho de 2023.



Physicochemical characterization of monazite sand and its associated bacterial species from the beaches of southeastern Brazil

Marcos Tadeu D'Azeredo Orlando¹ · Elson Silva Galvão¹ · José Luis Passamai Jr¹ · Alan Bragança Zordan¹ · Cintia Garrido Pinheiro Orlando¹ · Jairo Pinto Oliveira¹ · Sonia Alves Gouvea¹ · Flavia Noronha Dutra Ribeiro² · Tatyane Paz Dominguez dos Santos Alves² · Jacyra Soares²

Received: 10 May 2021 / Accepted: 9 September 2021 / Published online: 22 September 2021
© The Author(s), under exclusive licence to Springer-Verlag GmbH Germany, part of Springer Nature 2021

Abstract

Beaches with monazitic sands show high natural radiation, and the knowledge of this radiation is fundamental to simulate the effects of natural terrestrial radiation on biological systems. Monazite-rich sand from a beach in the southeastern Brazil were collected and analyzed by X-ray fluorescence, X-ray diffraction, and magnetic susceptibility. The natural terrestrial radiation of the beach sand showed a positive correlation with the Th and Y elements, which are closely associated with Ce, Nd, Ca, and P, suggesting that this grouping is mainly associated with local natural radiation. Based on the sand characterization, a physical simulator of natural gamma radiation was built with parameters similar to those of the monazite beach sand, considering areas with high natural radiation levels. The simulation revealed that the natural radiation of the monazite sands has a significant effect on reducing the growth of the bacteria strains of *E. coli* and *S. aureus* present in the beach sand, with a reduction of 23.8% and 18.4%, respectively.

Keywords Monazite sands · Cheralite · Natural gamma radiation · XRD patterns · Microbiological effects

Introduction

The effects of natural ionizing radiation on human health have been debated for years (Aliyu and Ramli, 2015; Cardarelli and Ulsh, 2018; Calabrese et al., 2019). Recently, to assess the exposure of the population to the natural terrestrial radiation found in soil, water and vegetation, several studies have been carried out aiming the evaluation of radiological risk parameters. Among them are the studies conducted by Ravisankar et al. (2015) in India, Khandaker et al. (2018) in Malaysia, and Liu and Lin (2018) in China, but there is still no consensus on the relationship between dose and effect, particularly related to the low dose rate of ionizing radiation in areas of high natural background radiation with doses below

100 mSv y⁻¹. Despite the studies about the natural terrestrial radiation and human exposure, there is still poor knowledge about the effects of natural radiation from coastal environments on microbiological systems.

Relevant areas of high natural background radiation are beach sands or sediments containing some minerals such as monazite that contribute to increasing levels of natural radioactivity (Tari et al., 2013; Shuaibu et al., 2017). Monazite deposits contain only trace amounts of thorium and uranium but still at levels higher than found in sedimentary soil deposits, and the most typical radionuclides are found as ²³⁴U, ²³⁸U, ²³²Th, and ²³⁰Th (García-Tenorio et al., 2018). Monazite sand beaches have one of the highest natural incidences of gamma radiation in the coastal area of Brazil (Veiga et al., 2006), with radiation values equivalent to those measured in Kerala, India (Chandrajith and Dissanayake, 2009). Here, the monazite-rich sand of a beach in southeastern Brazil, Meaibe beach (Guarapari, ES, Brazil), with gamma radiation related to thorium (²³²Th) decay, is investigated.

A fundamental characteristic observed at monazite sand of Meaibe beach is the temporal and spatial variation of its radiation intensity, preventing an easy characterization of the local environmental radiation. By temporal and spatial variation of

Responsible Editor: Diane Purchase

Elson Silva Galvão
elsongalvao@gmail.com

¹ Departamento de Física, Universidade Federal do Espírito Santo, Avenida Fernando Ferrari, 514, 29075-910, Vitória, ES, Brazil

² Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brazil

Dedico esse trabalho aos meus pais Marilsa e Reginaldo, aos irmãos Ligiani e Huderlan, e aos parentes e amigos

.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Prof. Dr. Marcos Tadeu D'Azeredo Orlando, pelo auxílio, sugestões, orientações, ensinamentos, paciência e confiança neste trabalho. Foi um grande prazer fazer parte desse empolgante projeto de pesquisa sobre as areias monazíticas. Obrigado pelo carinho e apoio que sempre teve.

Agradeço ao Prof. Dr. Jairo Pinto de Oliveira, pelo auxílio, sugestões, orientações e confiança durante as etapas de realização deste trabalho. E também, por permitir usar os materiais, equipamentos e espaço físico do Laboratório de Nano Materiais Funcionais. Obrigado por aceitar essa parceria e me orientado em tantos experimentos em todas as etapas do trabalho. Graças ao senhor, fui muito além do que imaginava. Obrigado pelo carinho e simpatia que sempre teve.

Agradeço ao Prof. Dr. Marco Cesar Cunegundes, por também me permitir utilizar o Laboratório de Nanomateriais Funcionais para a realização desse trabalho. Obrigado pelo carinho de deixar algo na mesa da cozinha para comermos com o café. Ao Prof. Dr. Ricardo Pinto do Laboratório de Biologia Molecular e Virulência Bacteriana (LabCAS), por me fornecer as bactérias (*E. coli* e *S. aureus*) utilizadas e insetos (*G. mellonella*) testados nesse trabalho. Ao Prof. Dr. Breno Valentim do Laboratório de Ultraestrutura Celular Carlos Alberto Redins (LUCCAR), pela simpatia e amizade, e permitir a utilização do espaço, alguns materiais e equipamentos do laboratório para a realização de parte da primeira etapa deste trabalho. A Tadeu Ériton Caliman Zanardo pela disposição em ajudar (destaque na etapa da microscopia eletrônica de varredura em bactérias e microalgas). E Mileni Rodrigues pela grande ajuda (destaque nas conversas sobre a possibilidade de testes em células de câncer de mama humano).

Agradeço a amizade e apoio dos colegas do Laboratório de Nanomateriais Funcionais: Wanderson Juvêncio Keijok (me ajudou incontáveis vezes em todas as etapas deste trabalho), Rafaela Salvadora (destaque na etapa com bactérias), Ana Barizão (destaque na etapa do experimento com microalgas), Thais Andrade (destaque no primeiro teste com fungos), Laryssa Pinheiro, Ariany Soares, Rafaela Spessemille, Sérgio, Beto, Clarice, Natane, Flávio (LUCCAR), Tadeu (LUCCAR), Prof. Dr. Elias Terra (destaque no primeiro teste com sementes de alface) e Prof. Dr. Joselito Nardy (conversas agradáveis, diversos feedbacks e cafezinhos).

Agradeço ao Prof. Dr. Sérgio Túlio por me permitir utilizar um dos laboratórios do CPID no IEMA para a realização do trabalho com microalgas, e ao pós-doutorando Igor Sampaio pela parceria no trabalho colaborativo com microalgas e pela amizade.

Um agradecimento especial à minha família: minha mãe Marilsa Bragança Zordan, meu pai Reginaldo Zordan, minha irmã Ligiani Bragança Zordan e meu irmão Huderlan Bragança Zordan, que sempre me apoiaram em tudo que fiz até hoje na vida pessoal, profissional e acadêmica. Por sempre demonstrar terem orgulho de mim. Por sempre estarem dispostos a me ajudar qualquer que fosse a situação caso eu precisasse.

Agradeço aos amigos que me acompanham desde a graduação, me motivando e inspirando muito: Lucas Carvalho Trindade, Flávio Silva Lopes, Cássio Cecato Favarato, Kim Okada, Victor Gava Laquini, Vinícius Souza, Igor Bellucio, Josué Lima Lopes, João Paulo França Gomes, Davi Bermudes e Messias Bicalho Cevolani.

Agradeço a Andreângelo Patuzzo, Marcus Vinícius Bragança de Araújo, Weverton Bragança, Fernando Cazeli Bragança, Ellediana Andrade, Adriane Kalil Silva (por ter me apoiado por tanto tempo e de tantas maneiras durante a metade desse trabalho), Marcia Simões (pelo carinho e acreditar que eu conseguiria), Marcelo Ramos (obrigado amigo, você ajudou muito a me concentrar na etapa da escrita da tese), Anna Beatriz Paiva (obrigado coração pelo carinho, paciência e motivação na etapa final que estive comigo), por fazerem parte da minha vida, por terem feito tanta diferença, sempre me apoiando e incentivando muito.

Agradeço aos amigos do Wol: Márcio, Kersius, Luiz, Thomaz e Eduardo, por sempre terem me incentivado neste trabalho, além de terem proporcionado boas conversas descontraídas, tornando esse trabalho mais leve em momentos difíceis.

Agradeço aos amigos de infância: Fabrício Veloso, Yann Haias, Carlos Yuryh Hoffmann, Jonathan de Ângelo Silva e Victor Vieira de Figueredo, por terem feito parte dos melhores momentos da minha vida e contribuído muito para ser quem sou. E muito obrigado a Teyly e Carlos que foram meus segundos pais durante a adolescência.

Agradeço à CAPES pelo apoio financeiro.

Agradeço a Deus por me permitir existir, com saúde, sabedoria, força de vontade, colocando em minha vida pessoas e oportunidades que me fizeram crescer e sentir feliz. Por dar sentido a minha vida e permitir que esse trabalho seja concluído com êxito. Obrigado Deus!

RESUMO

Os depósitos de areias monazíticas ao longo de certas praias do Brasil apresentam níveis de radiação externa média de até $20 \mu\text{Gy h}^{-1}$. No entanto, há uma lacuna considerável na literatura no que diz respeito aos efeitos destes baixos níveis de radiação natural em sistemas biológicos. Amostras de areia rica em monazita da praia de Meaípe no sudeste do Brasil foram coletadas e analisadas por fluorescência de raios X, difração de raios X e suscetibilidade magnética. A radiação natural terrestre da areia da praia apresentou correlação positiva com os elementos Th e Y, que estão intimamente associados com Ce, Nd, Ca e P, sugerindo que este agrupamento está associado principalmente à radiação natural local. As maiores doses de radiação gama estão associadas à fração granulométrica entre 100 e 200 μm , sendo que, os isótopos radioativos estão presentes na fração amarela da areia, o que corresponde aproximadamente 14% em massa de cada amostra das areias coletadas. Foi observado que as amostras coletadas durante 12 meses não têm uma composição homogênea, pois sofrem alterações oriundas de variações espaciais, provavelmente associadas aos fluxos hidrogeológicos da praia.

Um simulador físico de radiação natural com parâmetros físico-químicos similares às condições reais da praia com a areia monazítica foi construído, para avaliar os efeitos biológicos da radiação gama em *E. coli*, *S. aureus* e *Chlorella sp.*, como modelos de estudo.

E. coli exposta à radiação gama do simulador durante 1 dia apresentou redução de 23,8% no crescimento. *S. aureus* exposta à radiação gama do simulador durante 1 dia apresentou redução de 18,4% no crescimento. As imagens de microscopia eletrônica mostraram alterações morfológicas em ambos os microrganismos.

Chlorella sp. exposta à radiação gama do simulador durante 10 dias apresentou redução significativa de 30,16% no crescimento, aumento de 10,85% no tempo de geração, redução de 7,61% no teor de proteínas totais, aumento de 15,61% no teor de lipídios totais, aumento de 6,74% na atividade antioxidante total e aumento de 34,64% na autofluorescência. A caracterização por analisador orgânico CHNS não apresentou diferenças significativas nos teores de carbono,

hidrogênio, nitrogênio e enxofre. O percentual de massa obtida pelos espectros de EDS também não mostrou alterações nos níveis intracelulares de cálcio, sódio e magnésio.

Palavras-chaves: Areia monazítica, Praia da Praia Preta, Guarapari, radiação natural, radiação gama, efeitos biológicos.

ABSTRACT

Monazite sand deposits along certain beaches in Brazil have average external radiation levels of up to 20 $\mu\text{Gy h}^{-1}$. However, there is a considerable gap in the literature regarding the effects of these low levels of natural radiation on biological systems. Samples of monazite-rich sand from Meaípe beach in southeastern Brazil were collected and analyzed by X-ray fluorescence, X-ray diffraction, and magnetic susceptibility. The natural terrestrial radiation from the beach sand showed positive correlation with the elements Th and Y, which are closely associated with Ce, Nd, Ca and P, suggesting that this grouping is mainly associated with the local natural radiation. The highest doses of gamma radiation are associated with the particle size fraction between 100 and 200 μm , and, the radioactive isotopes are present in the yellow fraction of the sand, which corresponds to approximately 14% by mass of each sample of the collected sands. It was observed that the samples collected during 12 months do not have a homogeneous composition, as they suffer changes in their composition coming from spatial variations, probably associated with the hydrogeological flows of the beach.

A physical simulator of natural radiation with physicochemical parameters similar to the real beach conditions with monazite sand was built, to evaluate the biological effects of gamma radiation on *E. coli*, *S. aureus* and *Chlorella sp.*, as study models.

E. coli exposed to gamma radiation from the simulator for 1 day showed a 23.8% reduction in growth. *S. aureus* exposed to gamma radiation from the simulator for 1 day showed a reduction of 18.4% in growth. Electronic microscopy images showed morphological alterations in both microorganisms.

Chlorella sp. exposed to gamma radiation from the simulator for 10 days showed a significant reduction of 30.16% in growth, increase of 10.85% in generation time, reduction of 7.61% in total protein content, increase of 15.61% in total lipid content, 6.74% increase in total antioxidant activity and 34.64% increase in autofluorescence. Characterization by CHNS organic analyzer did not show significant differences in carbon, hydrogen, nitrogen and sulfur contents. The percentage of mass obtained by EDS spectra also showed no changes in intracellular levels of calcium, sodium and magnesium.

Keywords: monazite sand, Praia da Praia Preta, Guarapari, natural radiation, gamma radiation, biological effects.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Um dos trechos de areia monazítica da cidade. Fonte: Produção do próprio autor.	26
Figura 2 - Ilustração simplificada do espectro eletromagnético. Contém radiações eletromagnéticas ionizantes (como a radiação gama e raios X) e não ionizantes (como o infravermelho, micro-ondas e ondas de rádio) que podem ter origem devido a rearranjos dos elétrons nas camadas eletrônicas ou rearranjo nuclear do átomo (adaptado de Toda Matéria, 2023).	31
Figura 3 - Núcleos estáveis são mostrados em sombreamento escuro e núcleos radioativos conhecidos estão em sombreamento claro (adaptado de Krane, 1988).	32
Figura 4 - Ilustração do núcleo atômico segundo o modelo coletivo. Em (a), o próton se move em uma órbita do tamanho do raio nuclear e sua distribuição de carga média se assemelha a um anel, sendo que, a distribuição total de carga contém um excesso no plano perpendicular ao eixo Z. Em (b), o núcleo apresenta um buraco devido a ausência de próton, dando lugar a um anel no plano perpendicular ao eixo Z devido à falta de carga. Essas deformações refletem em instabilidade nuclear, podendo haver emissão de radiação devido a ajustes interno no núcleo (adaptado de Eisberg, 1994).	34
Figura 5 - Decaimento radioativo (adaptado de Andrade & Bauermann, 2010).	35
Figura 6 - Ilustração da capacidade de penetração das radiações α , β e gama. A radiação α pode ser bloqueada por uma folha de papel; a radiação beta pode atravessar uma folha de papel, mas pode ser bloqueada por uma chapa de alumínio; e radiação gama pode atravessar uma folha de papel e chapa de alumínio, mas pode ser bloqueada por uma chapa de chumbo. Fonte: Produção do próprio autor.....	38
Figura 7 - Representação do campo elétrico e magnético gerados pelo dipolo elétrico oscilante (a) e magnético oscilante (b). Os campos de radiação E e B são mostrados em um instante de tempo t, incluindo seus comportamentos sob a reflexão espacial $r \rightarrow -r$. A fonte de carga e corrente de frequência ω se encontra no eixo y negativo (adaptado de Krane, 1988).	40
Figura 8 - Série natural de decaimento radioativo do ^{232}Th e ^{238}U . O tempo de meia-vida aparece entre um isótopo e outro. (NNDC, 2023; adaptado de UNSCEAR,1988).	44

Figura 9 – Ilustração mostrando o desvio das radiações alfa, beta e gama ao atravessar um campo elétrico gerado por duas placas paralelas de cargas elétricas opostas. Fonte: Produção do próprio autor.....	45
Figura 10 - Relação entre os três maiores tipos de interação com a radiação gama e o alvo. Efeitos observados para um determinado alvo com átomos de número atômico Z para alguns valores de energia da radiação gama incidente (adaptado de Knoll, 2000).	46
Figura 11 - Ilustração do efeito fotoelétrico (adaptado de Andrade & Bauermann, 2010).	47
Figura 12 - Ilustração do espalhamento Compton (adaptado de Andrade & Bauermann, 2010).	48
Figura 13 - (a) Célula procarionte (à esquerda) e microscopia eletrônica da célula procarionte (à direita). (b) Célula eucarionte (à esquerda) e microscopia eletrônica da célula eucarionte (à direita) (adaptado de Madigan et al., 2016).....	53
Figura 14 - Esquema que relaciona a radiosensibilidade e fase do ciclo celular (adaptado de Andrade & Bauermann, 2010).	54
Figura 15 - Ilustração de danos a molécula de DNA, principais tipos de reparo e efeitos em células de mamíferos que podem ser causados por ação da radiação ionizante (adaptado de Arena, 2014).....	57
Figura 16 - Curva de sobrevivência no modelo linear quadrático. (adaptado de AIFA, 2005).	62
Figura 17 - Ilustração da curva de sobrevivência considerando os fenômenos HRS e IRR no modelo linear quadrático (adaptado de Andrade & Bauermann, 2010).....	63
Figura 18 - Região de Meaípe (marcador vermelho) e pontos de coleta de amostras de areia (marcadores em amarelo) ao longo da praia. Fonte: Produção do próprio autor.	65
Figura 19 - Configuração do NRPS. Fonte: Produção do próprio autor.	71
Figura 20 - Configuração em forma de esquema das amostras no simulador NRPS dentro da incubadora Shaker. Fonte: Produção do próprio autor.....	73
Figura 21 - Configuração das amostras no simulador NRPS dentro da incubadora Shaker. Fonte: Produção do próprio autor.	74
Figura 22 - Curva padrão para converter os valores de densidade óptica em biomassa seca. Fonte: Produção do próprio autor.	75
Figura 23 - Perfis de dose de radiação em função da distância do ponto inicial de amostragem, localizado no ponto mais a leste da praia de Meaípe, conforme	

marcado na Figura 18 deste trabalho. O gráfico mostra as medições que foram feitas a cada 10 m usando um tempo de integração de 10 s em cada ponto. Fonte: Produção do próprio autor.....	77
Figura 24 - Frequência média da distribuição do tamanho das partículas das amostras da areia monazítica. As barras verticais vermelhas indicam a taxa de dose associada à fração de massa da areia, e as barras verticais pretas indicam a fração de massa. As linhas verticais pretas são os desvios padrões. As linhas horizontais vermelhas tracejadas e pontilhadas indicam, respectivamente, a média ponderada para a dose efetiva externa e seu desvio padrão. Fonte: Produção do próprio autor.	78
Figura 25 - Fotografias, tiradas em datas diferentes, da praia de areia monazítica. A areia monazítica pode ser vista como manchas escuras destacadas por linhas tracejadas em vermelho. Fonte: Produção do próprio autor.	81
Figura 26 - Análise de componentes principais da composição elementar das amostras da FA medidas por EDXRF. Fonte: Produção do próprio autor.	82
Figura 27 - Refinamento de Rietveld da FARMNR. Espectro recebido na radiação do molibdênio. Legenda: 1- queralita (Ce, Nd, Ca, Th)PO ₄ ; 2- Zr(SiO ₄); 3- Ce(PO ₄); 4- BaSiP ₂ O ₈ ; 5- Ba ₃ Y ₂ O ₅ (CO ₃); e 6- Ba ₈ Zr ₆ YO ₁₆ . Fonte: Produção do próprio autor..	85
Figura 28 - (a) Crescimento microbiano de E. coli e S. aureus após 24 horas de exposição à radiação gama da areia monazítica. Os valores representam o limite superior da absorvância de cada amostra. Microscopia eletrônica digitalizada mostrando células bacterianas de: (b) Amostra Controle de S. aureus; (c) Amostra Tratado de S. aureus após exposição à radiação; (d) Amostra Controle de E. coli; e (e) Amostra Tratado de E. coli após exposição à radiação. Fonte: Produção do próprio autor.	87
Figura 29 - (a) Crescimento diário; (b) linha de tendência exponencial e tempo de geração de Chlorella sp. (L06) do Controle e Tratado sob exposição à radiação gama da areia monazítica após 240 horas (10 dias) de cultivo. Fonte: Produção do próprio autor.	89
Figura 30 - Micrografias das microalgas utilizando MEV no controle (A) e Tratado com radiação (B). EDS Controle (C) e Tratado com radiação (D). Fonte: Produção do próprio autor.	91
Figura 31 - Área, perímetro e diâmetro de Feret de 100 células do Controle e Tratado utilizando o programa Image J. Não houve diferença significativa em nenhum desses três parâmetros. Fonte: Produção do próprio autor.....	91

Figura 32 - Análise elementar por CHNS (a) e EDS (b) de <i>Chlorella</i> sp. (L06) após 240 horas (10 dias) de exposição à radiação gama da areia monazítica. Fonte: Produção do próprio autor.	92
Figura 33 - Teor de Proteínas (a), Lipídios (b), Carboidratos (c) e Atividade Antioxidante Total (d) de <i>Chlorella</i> sp. (L06) após 240 horas (10 dias) de cultivo do Controle e Tratado sob exposição à radiação gama da areia monazítica. Fonte: Produção do próprio autor.	93
Figura 34 - Espectro de fluorescência com emissão em 680 nm para <i>Chlorella</i> sp. cultivada em ambiente livre de radiação (Controle) e na presença de radiação natural do simulador físico de radiação (Tratado) (a). Gráfico de barras com médias e desvio-padrão das diferenças do cultivo do Controle e Tratado (b). Fonte: Produção do próprio autor.	98
Figura 35 - Alguns equipamentos utilizados na investigação dos efeitos da radiação gama da areia monazítica de Meaípe em bactérias e microalgas: (a) espectrofluorímetro da Ocean Optics UBS 200; (b) ultrassom; (c) ponto crítico (Autosandri-815, Tousimis); (d) microscopia eletrônica de varredura modelo JEM6610 LV (Jeol) com filamento de tungstênio; (e) analisador elementar CHNS Flash Smart; (f) espectrofotômetro DR 5000; (g) metalizador (Desk V, Denton Vácuo); (h) EDS detector XFlash® Detector 6/10. Fonte: Produção do próprio autor.	127
Figura 36 - Equipamento de difração de raios X (DRX) com configuração Bragg-Brentano (Ultima IV, Rigaku). Fonte: Produção do próprio autor.	128

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Estatísticas médias das 24 amostras da FA obtidas usando EDXRF (% em peso). SD representa o desvio padrão. Fonte: Produção do próprio autor.	79
Tabela 2 - EDXRF médio (% em peso) das 24 amostras da FAR. SD representa o desvio padrão. Fonte: Produção do próprio autor.	84
Tabela 3 - Fases cristalográficas presentes nas amostras da FARMNR. SD representa o desvio padrão. Fonte: Produção do próprio autor.	86
Tabela 4 - Dados da curva de crescimento, linha de tendência exponencial e tempo de geração. Fonte: Produção do próprio autor.	125
Tabela 5 - Dados de EDS. Fonte: Produção do próprio autor.	125
Tabela 6 - Dados da análise elementar por CNHS. Fonte: Produção do próprio autor.	125
Tabela 7 - Dados do teor de proteínas. Fonte: Produção do próprio autor.	126
Tabela 8 - Dados do teor de lipídios. Fonte: Produção do próprio autor.	126
Tabela 9 - Dados do teor de carboidratos. Fonte: Produção do próprio autor.	126
Tabela 10 - Dados da atividade antioxidante. Fonte: Produção do próprio autor.	126

LISTA DE SIGLAS

ACP	Análise de Componentes Principais
BEIR	Biological Effects of Ionizing Radiation
CNEN	Comissão Nacional de Energia Nuclear
DRX	Difração de Raios X
EDXRF	Energy Dispersive X-Ray Fluorescence
FA	Fração Amarela
FAR	Fração Amarela Refinada
FARMNR	Fração Amarela Refinada com Maior Nível de Radiação
GPX	Glutathione Peroxidase
ICRP	International Commission on Radiological Protection
ICRU	International Commission on Radiation Units and Measurements
LACAR	Lab. de Caracterização Física, Química e Microbiológica
LET	Linear Energy Transfer
LREE	Light Rare Earth Element
NRC	National Research Council
NRPS	Natural Radiation Physical Simulator
SI	Sistema Internacional de Unidades
SOD	Superóxido Dismutase
TEDE	Total Effective Dose Equivalent
ROS	Reactive Oxygen Species

SUMÁRIO

1		
2	1. INTRODUÇÃO	24
3	1.1 AREIAS MONAZÍTICAS E RADIOATIVIDADE	24
4	1.2 DECAIMENTO RADIOATIVO	29
5	1.2.1 RADIAÇÃO NUCLEAR	29
6	1.2.2 PROPRIEDADES NUCLEARES	32
7	1.2.3 ATIVIDADE E TEMPO DE MEIA-VIDA	34
8	1.2.4 DECAIMENTO ALFA	35
9	1.2.5 DECAIMENTO BETA	37
10	1.2.6 DECAIMENTO GAMA	37
11	1.2.7 RADIAÇÃO ELETROMAGNÉTICA CLÁSSICA NO DECAIMENTO GAMA	38
12	1.2.8 TRANTAMENTO QUÂNTICO PARA A RADIAÇÃO ELETROMAGNÉTICA NO	
13	DECAIMENTO GAMA	41
14	1.2.9 DECAIMENTO RADIOATIVO DO TÓRIO E URÂNIO	43
15	1.3 EFEITO BIOLÓGICO DA RADIAÇÃO	44
16	1.3.1 INTERAÇÃO DA RADIAÇÃO COM A MATÉRIA	44
17	1.3.2 GRANDEZAS E UNIDADES	49
18	1.3.3 INTERAÇÃO DA RADIAÇÃO COM A CÉLULA	52
19	1.3.4 MORTE, SOBREVIVÊNCIA E ADAPTAÇÃO CELULAR	55
20	1.3.5 RADICAIS LIVRES DE OXIGÊNIO DEVIDO A RADIAÇÃO IONIZANTE	58
21	1.3.6 MODELOS DE SOBREVIVÊNCIA CELULAR	61
22	1.3.7 HIPÓTESE DE HORMESE	62
23	2. OBJETIVO	64
24	3. MATERIAIS E MÉTODOS	65
25	3.1 SIMULADOR FÍSICO DE RADIAÇÃO NATURAL	65
26	3.1.1 FRACIONAMENTO GRANULOMÉTRICO	66
27	3.1.2 SEPARAÇÃO MAGNÉTICA	66
28	3.1.3 SUSCEPTIBILIDADE MAGNÉTICA AC	67
29	3.1.4 ANÁLISE ELEMENTAR POR EDXRF	68
30	3.1.5 ANÁLISE POR DIFRAÇÃO DE RAIOS X	68
31	3.1.6 SIMULADOR FÍSICO DE RADIAÇÃO NATURAL	69
32	3.2 EFEITOS BIOLÓGICOS DA RADIAÇÃO GAMA EM BACTÉRIAS	70
33	3.3 EFEITOS BIOLÓGICOS DA RADIAÇÃO GAMA EM MICROALGAS	73
34	4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	77
35	4.1 SIMULADOR FÍSICO DE RADIAÇÃO NATURAL	77
36	4.1.1 ANÁLISE DO PERFIL RADIOMÉTRICO	77
37	4.1.2 CARACTERIZAÇÃO POR FRACIONAMENTO GRANULOMÉTRICO	77

38	4.1.3 ANÁLISE ELEMENTAR POR EDXRF.....	79
39	4.1.4 ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS	81
40	4.1.5 SUSCETIBILIDADE MAGNÉTICA DE MASSA AC	83
41	4.1.6 DIFRAÇÃO DE RAIOS-X	85
42	4.2 EFEITOS BIOLÓGICOS DA RADIAÇÃO GAMA EM BACTÉRIAS.....	87
43	4.2.1 CRESCIMENTO CELULAR E MICROSCOPIA ELETRÔNICA	87
44	4.3 EFEITOS BIOLÓGICOS DA RADIAÇÃO GAMA EM MICROALGAS	88
45	4.3.1 CURVA DE CRESCIMENTO E TEMPO DE GERAÇÃO.....	88
46	4.3.2 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA E ESPECTRO DE	
47	ENERGIA DISPERSIVA DE RAIOS-X	90
48	4.3.3 ANÁLISE ELEMENTAR CHNS E ENERGIA DISPERSIVA DE RAIOS-X.....	91
49	4.3.4 PROTEÍNAS TOTAIS.....	92
50	4.3.5 LIPÍDIOS TOTAIS.....	94
51	4.3.6 CARBOIDRATOS TOTAIS	96
52	4.3.7 ATIVIDADE ANTIOXIDANTE TOTAL.....	97
53	4.3.8 AUTOFLUORESCENCIA	97
54	5. CONCLUSÕES	99
55	6. REFERÊNCIAS.....	102
56	7. APÊNDICE	125
57		
58		
59		
60		
61		
62		
63		
64		
65		
66		
67		
68		
69		
70		
71		
72		
73		
74		

1. INTRODUÇÃO

1.1 AREIAS MONAZÍTICAS E RADIOATIVIDADE

Todos os seres vivos do planeta estão habituados a receber certa quantidade de radiação natural através da ação externa da radiação ou pela absorção de átomos radioativos presentes em diversos lugares, tais como, no ar, terra, água e alimentos. A radiação natural (que ocorre espontaneamente) é a principal fonte de radiação na qual os seres vivos estão expostos (*Okuno, 2018*). Com os avanços tecnológicos, os seres vivos estão sendo cada vez mais expostos a radiações artificiais geradas por ações humanas para geração de energia, exames diagnósticos, tratamentos de doenças e armas nucleares (*Okuno, 2018*).

Em um ambiente típico, a contribuição para a exposição à radiação em massa é de cerca 55,8% devido ao ^{226}Ra , 14% devido ao ^{232}Th , 13,8% devido ao ^{40}K , e 15% de origem cósmica. Consideráveis concentrações de minerais contendo esses isótopos radioativos foram relatadas em cidades do Brasil, Índia, China, Irã, Bangladesh, Grécia, Madagascar e Nigéria (*Isinkaye & Shitta, 2009*). Um ser vivo pode sofrer exposição à radiação externamente, através da atmosfera, solos, materiais de construção civil e raios cósmicos, mas também, internamente através da ingestão de isótopos radioativos como o ^{222}Rn e ^{220}Rn (*Medhat, 2009*).

Cerca de 99,27% do urânio natural encontrado na crosta terrestre na forma de minerais e em quantidades traço em diversos materiais é o isótopo ^{238}U . Enquanto o tório encontrado em diversos solos e rochas é o isótopo ^{232}Th , principalmente do Granito e Gnaisse (*Steinhäusler, 1994*).

A monazita é o mineral que possui maior ocorrência de elementos radioativos da série do ^{232}Th (*UNSCEAR, 1993*). O Brasil possui um dos principais depósitos de monazita do mundo (*Riedel & Eisenmenger, 1999*). Podendo ser encontrada em areias de praia e algumas rochas, o mineral monazita é um fosfato de terras raras e insolúvel, que possui átomos radioativos de tório (^{232}Th) e urânio (^{238}U), presentes em areias de algumas praias, como na cidade de Guarapari, no estado do Espírito Santo, sudeste do Brasil. Esses isótopos contribuem com radiações de diferentes doses conforme os fatores ambientais (*Orlando et al., 2021*).

Assim, dentre as fontes de radiação natural que os seres vivos são expostos, temos a areia monazítica. Essa areia, que possui aparência escura,

contém naturalmente considerável quantidade de minerais pesados. Esses minerais são a ilmenita, de cor preta, constituída de titânio, ferro e outros metais; granada, de cor vermelha, composta por alumínio, ferro, cobre, manganês, e outros metais; zirconita, de cor cinza; e monazita, de cor amarela escura. O nome “Monazita” vem do grego Monazein, que significa “estar solitário”, indicando a raridade dessa areia (*Fabris et al., 2005*).

Montanhas como a Serra do Mar se encontram na costa do oceano atlântico no Brasil e são fontes de areia monazítica. Essa areia é transportada pela água para rios e o oceano, ocorrendo sua degradação em substâncias de diferentes pesos específicos (*Mello, 1971*). São encontradas somente em alguns lugares do mundo, sendo que no Brasil, são geralmente acompanhadas da presença de rochas Gnaisses de origem vulcânica (*Bueno, 2011*).

Na cidade de Guarapari, no estado do Espírito Santo, a areia monazítica está presente na Praia da Areia Preta e Meáípe (Figura 1). A cidade chega a atingir mais de 500 mil turistas no verão. Possui cerca de 46 praias, sendo que, as praias que possuem areias monazíticas recebem um certo destaque (*Orlando et al., 2018*). Em 2021, o IBGE relatou que Guarapari possui uma população de 128.504 pessoas e área territorial de 589,825 km². A praia de Meáípe (20°44'17" S, 40°32'20" W), foco deste trabalho, atrai turistas de todo o mundo por causa de sua beleza natural e culinária típica. A praia tem cerca de 4 km de extensão e fama de que suas areias escuras têm propriedades terapêuticas.

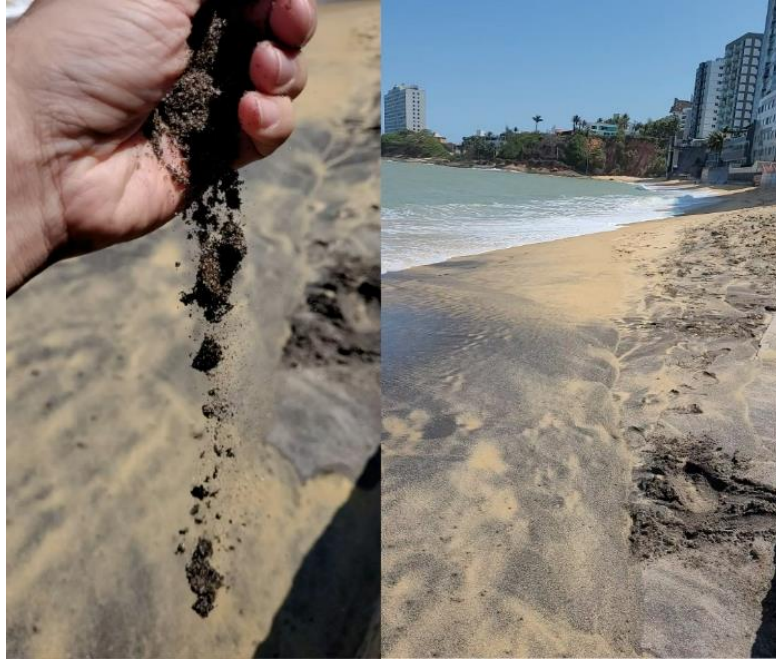


Figura 1 - Um dos trechos de areia monazítica da cidade. Fonte: Produção do próprio autor.

No século passado, as areias monazíticas da cidade de Guarapari foram alvos de explorações internacionais devido ao seu potencial econômico, por exemplo, para iluminação a gás devido ao tório radioativo presente na areia e, em seguida, explorações comandadas pela MIBRA (*Monazita e Ilmenita do Brasil*), cujos relatos destacam o contrabando e transporte da areia monazítica para a França, com a justificativa de que a areia seria utilizada como lastro de navios (*Bourguignon, 2015; Bueno, 2011*).

Com a aceleração do uso da energia elétrica, passaram a utilizar as areias monazíticas na geração de energia nuclear, e que devido ao tório presente na areia, que decai em um isótopo do urânio, foi visado também seu uso em bombas nucleares no período da Guerra Fria, com participação dos EUA (*Bourguignon, 2015*). É relatado que parte da exploração foi de maneira ilícita e isenta de fiscalização política através de subornos, causando redução significativa da areia monazítica na cidade de Guarapari (*Bueno, 2011*).

Atualmente, Guarapari é conhecida como Cidade Saúde, devido a vários relatos de que a areia monazítica de Guarapari possui propriedades medicinais, e com isso, contribuindo muito para o turismo na cidade, e conseqüentemente, aumentando a taxa de crescimento de sua economia (*Bueno, 2011*).

Essa fama da areia monazítica possuir propriedades medicinais possui controvérsias, pois a comunidade científica em sua maioria considera que qualquer dose de radiação faz mal à saúde. Logo, apesar da radiação emitida pela areia monazítica ser de baixa dose, a verdade sobre as propriedades medicinais da areia monazítica precisa de mais consenso na comunidade científica, pois os efeitos da radiação podem ser diversos dependendo da doença e de cada organismo, o que levou ao interesse de pesquisas sobre a composição da areia monazítica e suas propriedades terapêuticas (Orlando, 2017; Orlando, 2016; Mello, 1971).

Os efeitos da radiação ionizante natural na saúde humana são debatidos há anos (Aliyu & Ramli, 2015; Cardarelli & Ulsh, 2018; Calabrese et al., 2019). Recentemente, para avaliar a exposição da população à radiação natural terrestre encontrada no solo, água e vegetação, diversos estudos têm sido realizados visando a avaliação de parâmetros de risco radiológico. Entre eles estão os estudos de Orlando et al. (2021) no Brasil, Coutinho et al. (2020) no Brasil, Ravisankar et al. (2015) na Índia, Khandaker et al. (2018) na Malásia, e Liu & Lin (2018) na China, mas ainda não há consenso sobre a relação entre dose e efeito, particularmente relacionado à baixa taxa de dose de radiação ionizante em áreas de alta radiação natural de fundo com doses abaixo de 100 mSv y⁻¹. Apesar dos estudos sobre a radiação natural terrestre e a exposição humana, ainda há pouco conhecimento sobre os efeitos biológicos da radiação natural do ambiente costeiro.

Áreas relevantes de alta radiação natural de fundo são as areias de praia ou sedimentos contendo alguns minerais, como monazita, que contribuem para aumentar os níveis de radioatividade natural (Tari et al., 2013; Shuaibu et al., 2017). Os depósitos de monazita contêm apenas vestígios de tório e urânio, mas ainda em níveis mais altos do que os encontrados em depósitos de solo sedimentar, e os radionuclídeos mais típicos são encontrados também como ²³⁴U, ²³⁸U, ²³²Th e ²³⁰Th (García-Tenorio et al., 2018). As praias de areia monazítica apresentam uma das maiores incidências naturais de radiação gama na zona costeira do Brasil (Veiga et al., 2006), com valores de radiação equivalentes aos medidos em Kerala, na Índia (Chandrajith & Dissanayake, 2009). Aqui, a areia rica em monazita de uma praia no sudeste do Brasil, a praia de Meáipe (Guarapari, ES, Brasil), com radiação gama relacionada ao decaimento de tório (²³²Th), é investigada.

Uma característica fundamental observada na areia monazítica da praia de Meaípe é a variação temporal e espacial de sua intensidade de radiação, impedindo uma fácil caracterização da radiação ambiental local. Pela variação temporal e espacial da radiação gama, entende-se que a radiação gama muda no tempo e no espaço. Desta forma, as medições feitas em um determinado momento (ou em um determinado local) não permanecem constantes no tempo (ou espaço). Nesse tipo de ambiente, não basta ter poucas medidas para caracterizar o ambiente em termos de intensidade de radiação. É necessário fazer várias medições em diferentes momentos e em diferentes locais ao longo da extensão da praia (Coutinho et al., 2020)

A maioria dos estudos anteriores baseia-se no princípio de que a intensidade da radiação nas areias da praia de Meaípe não muda com o tempo e espaço. Esses estudos descrevem as características físicas e químicas gerais das areias monazíticas locais, usando amostras de areia coletadas em um único local da praia, em um determinado momento (Fujinami et al., 2000; Vasconcelos et al., 2013). Os trabalhos são baseados em estatísticas de amostras coletadas em um curto período, não oferecendo o intervalo de tempo necessário para considerar a influência da dinâmica da praia e do fluxo hidrodinâmico na composição da areia monazítica da praia.

Uma caracterização precisa das areias monazíticas é de primordial importância para qualquer estudo. No que diz respeito às praias de areia monazítica, esta caracterização é importante, pois as evidências sugerem, até o momento, uma provável relação biopositiva entre a radiação natural da areia e os efeitos biológicos (Orlando et al., 2014). Recentemente, Coutinho et al. (2020) apresentaram resultados mostrando que doses de radiação entre 0,7 e 27 $\mu\text{Sv h}^{-1}$ geradas pelas areias monazíticas da praia de Meaípe não causam alterações antropométricas ou na pressão arterial de ratas *Wistar*.

Estudos mostrando os efeitos da radiação natural da areia em microrganismos são escassos, e os principais trabalhos se concentram principalmente nos efeitos das marés e chuvas sobre os microrganismos (Gast et al., 2011; Whitman et al., 2014). Microrganismos autóctones e alóctones que estão naturalmente presentes em ambientes de areia de praia, ficam aderidos aos grãos de areia ou presentes na água aprisionada nas partículas de areia. Embora os microrganismos autóctones desempenhem um papel importante no meio ambiente,

os microrganismos alóctones podem ser patogênicos, multiplicando-se ocasionalmente na areia e sendo liberados na água e infectando humanos (*Sabino et al., 2014; Efstratiou, 2019*).

A irradiação ultravioleta solar com comprimentos de onda menores que 300 nm (UV-B) contribui para o controle ambiental dessas espécies (*Wang et al., 2012; Whitman et al., 2014*). No entanto, as construções ao longo da orla de Meaípe têm causado sombreamento e conseqüente redução da irradiação solar direta sobre as areias, processo que pode aumentar a proliferação de microrganismos patogênicos. Sobre o efeito da radiação gama na inibição do crescimento de microrganismos, *Madureira et al. (2017)* encontraram uma diminuição significativa no crescimento de *Pseudomonas fluorescens* e *Bacillus subtilis* ($p < 0,05$), presentes em águas residuais de cortiço quando submetidas a doses de radiação gama de 100 kGy. Ainda, segundo *Madureira et al. (2017)*, esses microrganismos são extremamente persistentes em ambientes que incluem solo e habitats aquáticos, mesmo sob condições extremas. No entanto, os efeitos de baixas taxas de dose de radiação sobre os sistemas microbiológicos, como as doses de radiação gama emitidas pelas praias de areia monazítica, ainda são pouco conhecidos.

1.2 DECAIMENTO RADIOATIVO

1.2.1 RADIAÇÃO NUCLEAR

A ciência tem bastante interesse na interação entre radiação e tecido vivo, e suas conseqüências. Depois da Segunda Guerra Mundial aumentaram drasticamente o estudo das radiações ionizantes. E devido ao crescente uso das radiações ionizantes por suas diversas aplicações, como no uso hospitalar e militar, cresceu também a preocupação das conseqüências de tal uso em tecidos vivos. Gerando assim, a necessidade de institutos que avaliem e garantam o desenvolvimento com segurança de pesquisas radiológicas e nucleares. Com isso, pesquisas sobre a transferência de energia da radiação incidente em células se tornaram importantes, devido ao aumento de chance de provocar instabilidade celular, proliferação acelerada ou morte (*Andrade & Bauermann, 2010*).

É importante ressaltar que a exposição a certos tipos de radiação, especialmente a radiação ionizante em altas doses, pode ser prejudicial à saúde.

Portanto, é necessário tomar medidas de segurança e seguir regulamentações específicas ao lidar com fontes de radiação.

Acidentes nucleares em Chernobil na Ucrânia (1986) e Fukushima no Japão (2011), e bombas nucleares em Hiroshima e Nagasaki no Japão (1945), forneceram evidências para o uso da radiação em diagnóstico e tratamento de diversas doenças, e aumento da segurança e eficiência no uso da energia nuclear, tanto na geração de energia elétrica, quanto no uso em armas nucleares. Diante disso, é relevante entender melhor como funcionam as radiações e quais podem causar danos à saúde (*UNSCEAR, 2017*).

Sendo assim, a produção de radiações por um átomo pode ocorrer devido a ajustes no núcleo, ajustes na eletrosfera do átomo ou pela interação com agentes externos. Temos como exemplo, os raios X característicos devido a ajustes na eletrosfera, os raios gama devido a ajustes nucleares e os raios X de freamento (*bremsstrahlung*) produzidos da interação de partículas carregadas com o núcleo do átomo (*Andrade & Bauermann, 2010*).

O espectro eletromagnético (Figura 2) é uma distribuição organizada de comprimentos de onda e frequências, consistindo na interação de campos elétricos e magnéticos perpendiculares no espaço, garantindo sua propagação no vácuo e em determinados meios materiais. A radiação eletromagnética é um pacote de energia sem massa de repouso, possui momento e comportamento dual como onda ou partícula (fótons) (*Eisberg, 1994*).

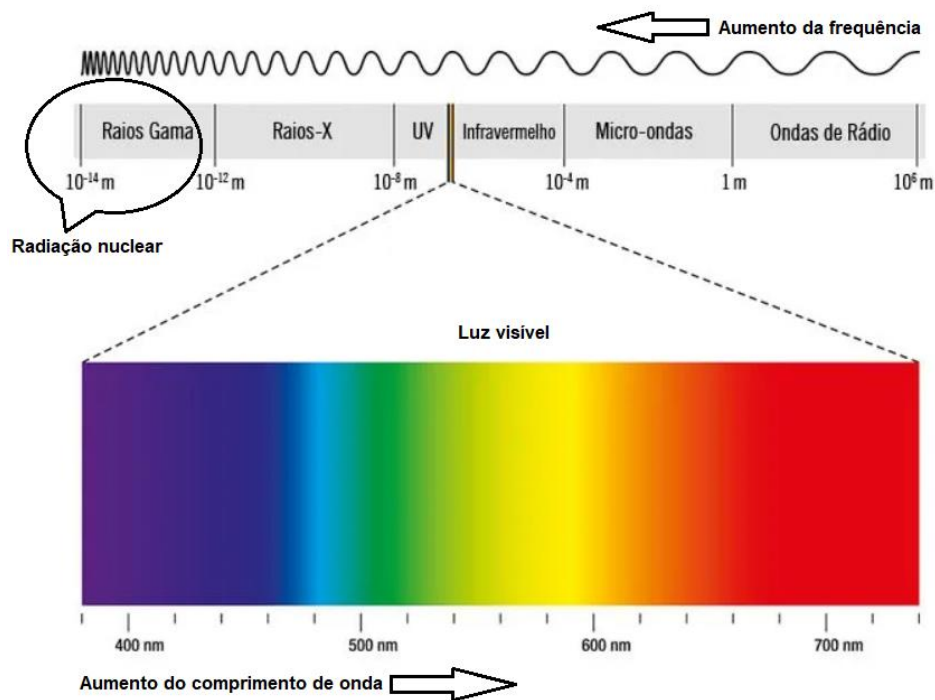


Figura 2 - Ilustração simplificada do espectro eletromagnético. Contém radiações eletromagnéticas ionizantes (como a radiação gama e raios X) e não ionizantes (como o infravermelho, micro-ondas e ondas de rádio) que podem ter origem devido a rearranjos dos elétrons nas camadas eletrônicas ou rearranjo nuclear do átomo (*adaptado de Toda Matéria, 2023*).

A radiação nuclear pode ser definida como as partículas α e β (ondas de matéria) ou radiação gama (fóton - radiação eletromagnética) irradiadas pelo núcleo de um átomo por processos de reorganização interna em busca da estabilidade, resultando em radiações mais energéticas devido as intensas forças nucleares comparadas as radiações emitidas devido à excitação dos elétrons nas camadas eletrônicas (*Eisberg, 1994*).

A instabilidade nuclear tende a ser mais intensa quanto maior o número atômico do átomo. Principalmente porque a diferença do número de prótons e nêutrons cresce com o número atômico, gerando naturalmente uma instabilidade nuclear em muitos átomos (Figura 3).

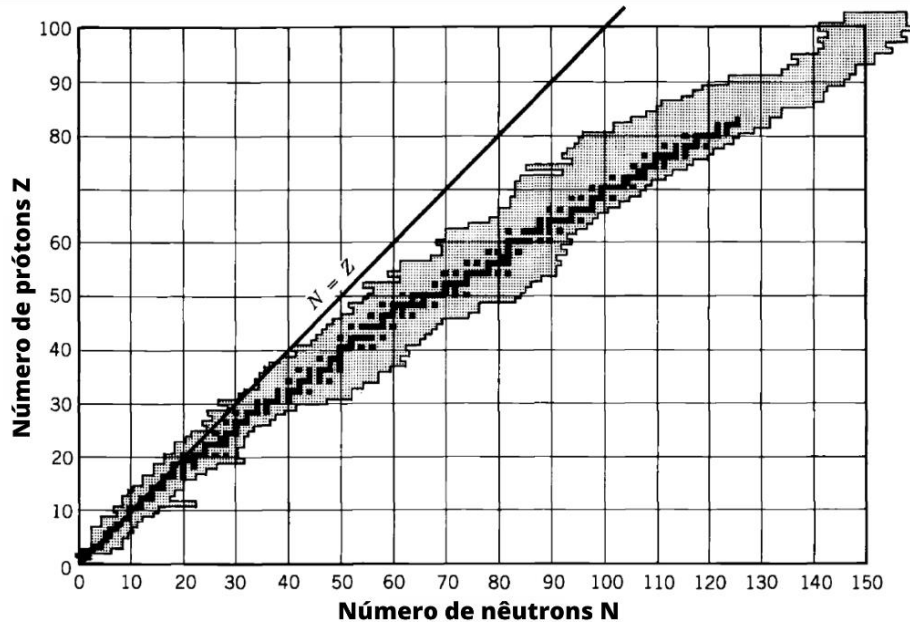


Figura 3 - Núcleos estáveis são mostrados em sombreamento escuro e núcleos radioativos conhecidos estão em sombreamento claro (*adaptado de Krane, 1988*).

Os núcleos instáveis de átomos de um material não realizam decaimentos simultaneamente, pois o processo ocorre de maneira aleatória, necessitando de uma análise estatística quântica para ser melhor compreendido

1.2.2 PROPRIEDADES NUCLEARES

As propriedades nucleares são referentes às características dos núcleos dos átomos, compostos de prótons e nêutrons. Essas propriedades contribuem para compreensão de sua estrutura, estabilidade e dos processos nucleares, como o decaimento radioativo e as reações nucleares. As principais propriedades nucleares são (*Eisberg, 1994*):

- Número atômico (Z): Número de prótons no núcleo do átomo. Identifica o elemento químico.
- Número de massa (A): Soma do número de prótons (Z) e nêutrons (N) no núcleo.
- Isótopos: Átomos de um mesmo elemento químico. Possuem o mesmo número atômico (Z) e diferente número de massa (A). Os isótopos possuem tempo de meia-vida diferentes.
- Estabilidade nuclear: Os núcleos podem ser estáveis ou instáveis. Estáveis quando têm uma combinação adequada de prótons e nêutrons, se

estabelecendo uma ligação nuclear forte que os mantém unidos. Instáveis são radioativos e possuem excesso de energia, se transformando em núcleos mais estáveis através de decaimento radioativo.

- Forças nucleares: Forças atrativas ou repulsivas que atuam entre prótons e nêutrons no núcleo do átomo. A força forte é atrativa, responsável por manter prótons e nêutrons unidos, superando a repulsão eletrostática entre os prótons. A força fraca está relacionada ao decaimento beta. Com isso, essas forças nucleares são responsáveis pela estabilidade nuclear e energia liberada nas reações nucleares.
- Energia de ligação nuclear: Energia necessária para separar prótons e nêutrons de um núcleo. Mede a estabilidade do núcleo, pois quanto maior seu valor, mais estável o núcleo, e mais difícil de desintegrá-lo.
- Meia-vida: Tempo necessário para que ocorra decaimento radioativo de metade dos núcleos de uma amostra. Está relacionada com a taxa de decaimento radioativo e varia consideravelmente entre diferentes isótopos. O conhecimento do tempo de meia-vida é utilizado na datação de fósseis e rochas, aplicações médicas e industriais.

Alguns modelos nucleares foram desenvolvidos na tentativa de explicar o núcleo de um átomo. Os modelos começaram básicos e foram evoluindo na busca de satisfazer os fenômenos observáveis:

- O modelo da gota líquida tem como hipótese que os núcleos têm densidades de massa similares e energias de ligação proporcionais às suas massas (como a gota de um líquido carregado eletricamente). A teoria usada é a clássica (termos de assimetria e emparelhamento introduzidos sem justificativas). As propriedades preditas são massa e energias de ligação média precisas (determinadas através da fórmula de massa semiempírica) (*Krane, 1988*).
- O modelo do gás de Fermi tem como hipótese que os núcleos se movem independentemente no potencial nuclear efetivo. A teoria usada é a estatística quântica relativa ao gás de Fermi para núcleons. As propriedades preditas são a profundidade do potencial nuclear efetivo e o termo de assimetria (*Krane, 1988*).

- O modelo de Camadas tem como hipótese que os núcleons se movem independentemente no potencial nuclear efetivo com um forte acoplamento spin-órbita invertido. A teoria usada é a resolução da equação de Schroedinger correspondente ao potencial nuclear efetivo. As propriedades preditas são números mágicos, spins nucleares, paridades nucleares, termo de emparelhamento (*Krane, 1988*).
- O Modelo Coletivo tem como hipótese que o potencial nuclear efetivo experimenta deformações. A teoria usada é a resolução da equação de Schroedinger para um potencial efetivo não esférico. As propriedades preditas são os momentos dipolares magnéticos e quadripolares elétricos (*Krane, 1988*).

A Figura 4 ilustra dois tipos de deformações que ocorrem no núcleo do átomo responsáveis pelo decaimento radioativo. Essas deformações são porque não há uma combinação adequada de prótons e nêutrons, gerando uma instabilidade nuclear e excesso de energia a ser liberado por decaimento radioativo.

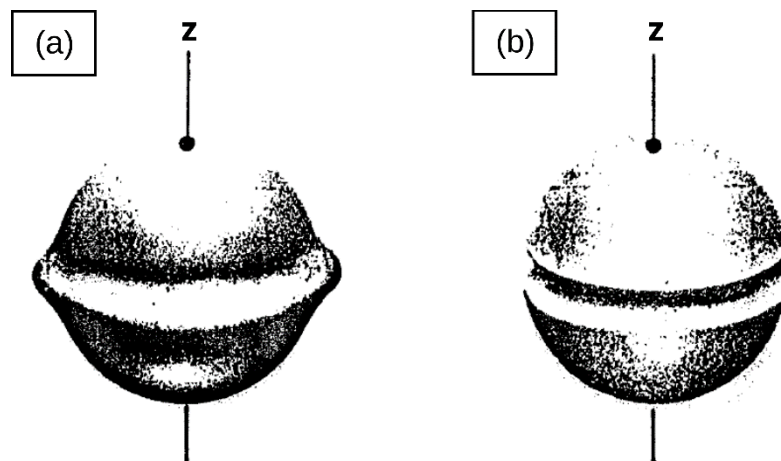


Figura 4 - Ilustração do núcleo atômico segundo o modelo coletivo. Em (a), o próton se move em uma órbita do tamanho do raio nuclear e sua distribuição de carga média se assemelha a um anel, sendo que, a distribuição total de carga contém um excesso no plano perpendicular ao eixo Z. Em (b), o núcleo apresenta um buraco devido a ausência de próton, dando lugar a um anel no plano perpendicular ao eixo Z devido à falta de carga. Essas deformações refletem em instabilidade nuclear, podendo haver emissão de radiação devido a ajustes interno no núcleo (*adaptado de Eisberg, 1994*).

1.2.3 ATIVIDADE E TEMPO DE MEIA-VIDA

O número de transformações por unidade de tempo é proporcional ao número de átomos do material, significando que a probabilidade de decaimento por átomo por

segundo deva ocorrer de maneira constante e independente do tempo de existência do material. Esta constante é definida como a constante de decaimento λ . Assim, podemos escrever a atividade $A(t)$ de uma amostra como sendo a taxa de transformações que ocorrem nos átomos instáveis por unidade de tempo e dependente do número de átomos $N(t)$ existentes na amostra em determinado instante t (Figura 5),

$$A(t) = \frac{dN(t)}{dt} = -\lambda \cdot N(t)$$

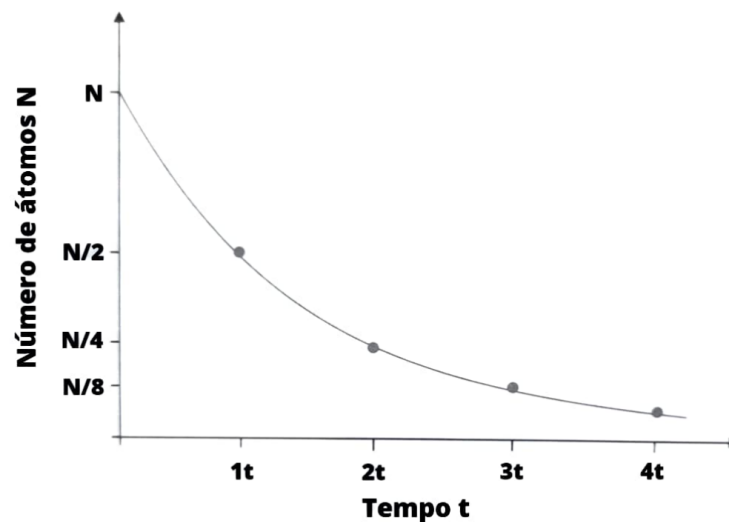


Figura 5 - Decaimento radioativo (*adaptado de Andrade & Bauermann, 2010*).

O becquerel (Bq) é uma unidade usada para medir a atividade de uma amostra em desintegração por segundo, em que, $1 \text{ Bq} = 1 \text{ desintegração/s}$.

O tempo de meia-vida ($T_{1/2}$) da amostra é o tempo necessário para que metade dos núcleos radioativos de uma amostra decaiam. Em anos, o tempo de meia-vida pode ser escrito como,

$$T_{1/2} = 0,693\lambda$$

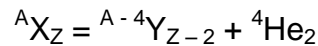
Sendo λ a constante de decaimento (*Kaplan, 1978*).

1.2.4 DECAIMENTO ALFA

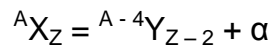
O decaimento radioativo é um processo pelo qual um núcleo atômico instável se transforma em outro núcleo mais estável, emitindo radiação nuclear no processo. Esses núcleos instáveis são conhecidos como isótopos radioativos com excesso de energia nuclear. A radiação emitida do decaimento pode ser na forma de decaimento α (emissão da partícula α ou onda de matéria denominada radiação α), decaimento β (emissão da partícula β ou onda de matéria denominada radiação β) ou decaimento

gama (emissão da partícula fóton ou onda eletromagnética gama denominada radiação gama, a mais energética do espectro eletromagnético).

No decaimento α , o núcleo do átomo “pai” (${}^A X_Z$) emite uma partícula α (núcleo de ${}^4\text{He}_2$) se transformando no átomo “filho” (${}^{A-4} Y_{Z-2}$). Com isso, após a emissão da partícula α , o pai tem seu número atômico e de massa reduzidos em duas e quatro unidades, respectivamente, conforme a equação (Eisberg, 1994),



De outra forma,



Se o núcleo que agora se tornou filho estiver em um estado excitado, ele passa, posteriormente, ao estado fundamental através da emissão de uma radiação gama. Com isso, o decaimento α pode vir acompanhado de um decaimento gama. As partículas α podem ser bloqueadas por folha de papel de determinada espessura (Figura 6).

Como exemplo, pelo princípio da conservação da energia, a energia liberada no decaimento α pode ser calculada pela seguinte expressão,

$$E = [m_X - m_Y - m_\alpha] c^2$$

Sendo que m_X , m_Y e m_α são as massas dos núcleos “pai”, “filho” e partícula α , respectivamente. Com isso, quando o núcleo de urânio ${}^{232}\text{U}_{92}$ ($m_U = 232,1095 \text{ u}$) decai em tório ${}^{228}\text{Th}_{90}$ ($m_{Th} = 228,0998 \text{ u}$) emitindo uma partícula α ($m_\alpha = 4,0026 \text{ u}$), temos,

$$E = [m_U - m_{Th} - m_\alpha] c^2$$

$$E = (232,1095 \text{ u} - 228,0998 \text{ u} - 4,0026 \text{ u}) c^2$$

$$E = (232,1095 - 228,0998 - 4,0026) \text{ u} c^2$$

Usando que, $\text{u}c^2 = 9,3148 \cdot 10^2 \text{ MeV}$, o resultado fica,

$$E = (232,1095 - 228,0998 - 4,0026) (9,3148 \cdot 10^2 \text{ MeV})$$

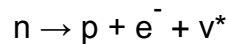
Assim,

$$E = 6,6135 \text{ MeV}$$

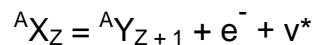
Esse resultado é a energia liberada (E). Se essa energia é positiva, o decaimento radioativo pode ocorrer espontaneamente, caso contrário, esse decaimento não acontece espontaneamente (Krane, 1988).

1.2.5 DECAIMENTO BETA

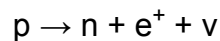
O decaimento β^- ocorre quando o número de nêutrons é relativamente grande comparado ao número de prótons e o núcleo do átomo é instável. Nessa situação, o número de nêutrons é reduzido pela transformação de um nêutron (n) em um próton (p), acompanhada da emissão de uma partícula β^- (elétron e^-) e um antineutrino ($\bar{\nu}$), conforme a equação (Eisberg, 1994),



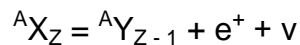
Assim, o núcleo filho (${}^A Y_{Z+1}$) mantém o número de massa do núcleo pai ${}^A X_Z$, porém, seu número atômico é aumentado em uma unidade, já que aumentou o número de prótons, conforme a equação,



Analogamente, o decaimento β^+ ocorre quando o número de prótons é relativamente grande comparado ao número de nêutrons e o núcleo do átomo é instável. Nessa situação, o número de prótons é reduzido pela transformação de um próton (p) em um nêutron (n), acompanhada da emissão de uma partícula β^+ (pósitron e^+ , antipartícula do elétron) e um neutrino (ν), conforme a equação,



Assim, o núcleo filho (${}^A Y_{Z-1}$) tem o mesmo número de massa que o núcleo pai (${}^A X_Z$), porém, seu número atômico é reduzido em uma unidade, já que diminuiu o número de prótons, conforme a equação,



Importante ressaltar que, se após o decaimento β^- ou β^+ o núcleo filho estiver no estado excitado, será acompanhado de um decaimento gama. Além disso, o elétron ou pósitron ejetado tem velocidade cerca de 95% a velocidade da luz. As partículas β^- e β^+ podem atravessar folha de papel, mas podem ser bloqueadas por uma chapa de alumínio de determinada espessura (Figura 6) (Krane, 1988).

1.2.6 DECAIMENTO GAMA

O decaimento gama é a emissão de uma radiação eletromagnética (fóton) de mais elevada energia e frequência do espectro eletromagnético, gerada pela desexcitação de um núcleo atômico que esteja em estado excitado. Podendo acontecer, por exemplo, seguido de um decaimento α ou β , em que o núcleo filho

gerado se encontra em um estado excitado, emitindo assim (após cerca de 10^{-12} segundos) radiação gama, mudando o núcleo “filho” de estado excitado para estado fundamental. A radiação gama possui massa de repouso e carga elétrica nulas, não alterando o número atômico e de massa nesse decaimento. Têm energias tipicamente na faixa de 0,1 a 10 MeV, associadas a diferença de energia entre dois estados nucleares, correspondendo a comprimentos de onda entre 10^4 e 100 fm, muito mais curtos do que os outros tipos de radiação eletromagnética, como a luz visível com comprimentos de onda cerca de dezesseis vezes maior que os raios gama, e isso reflete em facilidade de atravessar muito materiais. A radiação gama pode atravessar folha de papel e chapa de alumínio, mas pode ser bloqueada por uma chapa de chumbo de determinada espessura (Figura 6) (Krane, 1988).

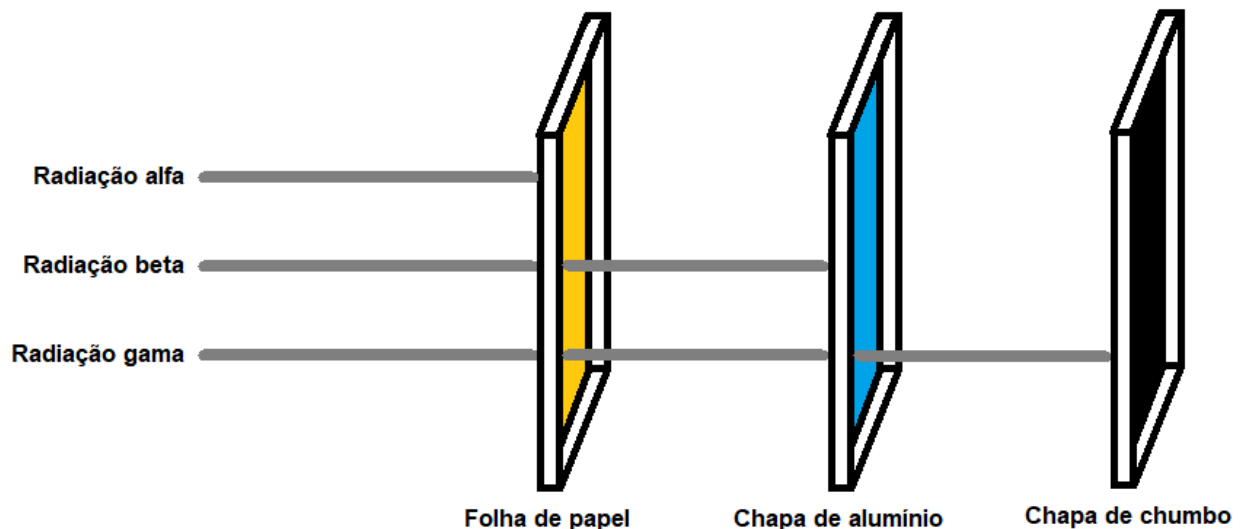


Figura 6 - Ilustração da capacidade de penetração das radiações α , β e gama. A radiação α pode ser bloqueada por uma folha de papel; a radiação beta pode atravessar uma folha de papel, mas pode ser bloqueada por uma chapa de alumínio; e radiação gama pode atravessar uma folha de papel e chapa de alumínio, mas pode ser bloqueada por uma chapa de chumbo. Fonte: Produção do próprio autor.

1.2.7 RADIAÇÃO ELETROMAGNÉTICA CLÁSSICA NO DECAIMENTO GAMA

De acordo com *Orlando et al. (2021)* e *Coutinho et al. (2020)*, ocorre decaimento gama na areia monazítica da praia de Meaípe. Nesse decaimento, ocorre a emissão de radiação gama. Diante desse fato, será realizado a seguir uma discussão matemática mais detalhada sobre a radiação gama (radiação eletromagnética).

Dependendo do tipo de condição física a ser descrita, a radiação eletromagnética pode ser tratada como um fenômeno ondulatório clássico ou quântico. Analisando radiações emitidas por átomos individuais e núcleos, tratar como um fenômeno quântico é mais apropriado. Mas, revendo antes o tratamento clássico, podemos compreender melhor os cálculos quânticos para radiação eletromagnética.

Distribuições estáticas (estacionárias) de cargas e correntes fornecem campos elétricos e magnéticos, respectivamente. Esses campos podem ser analisados utilizando os momentos multipolares de uma distribuição de carga dipolar, quadripolar, e assim sucessivamente. Esses momentos multipolares geram campos característicos que podem ser investigados.

Se as distribuições de carga e corrente não forem estáticas (não estacionárias), variando de forma sinusoidal com frequência angular ω , é gerado um campo de radiação. Esse campo, muito distante comparado ao tamanho da fonte, também pode ser investigado, tal como no campo estático, em termos dos momentos multipolares.

Usando que a radiação emitida por um núcleo de um isótopo radioativo se comporte semelhante à radiação emitida por um dipolo, vamos deduzir a potência irradiada por um dipolo elétrico ou magnético.

Um dipolo elétrico estático pode ser descrito como cargas iguais e opostas $+q$ e $-q$ separadas por uma distância fixa z (Figura 7a). Com isso, o momento de dipolo elétrico é dado por,

$$d = q.z$$

Campos de radiação de dipolo elétrico podem ser gerados mudando os momentos de dipolo através da oscilação das cargas ao longo do eixo z , de forma que,

$$d(t) = q.z.\cos(\omega.t)$$

Um dipolo magnético estático pode ser descrito como uma espira circular de área A e corrente i (Figura 7b). Com isso, o momento de dipolo magnético é dado por,

$$\mu = i.A$$

Campos de radiação de dipolo magnético podem ser gerados mudando os momentos de dipolo magnético através da variação da corrente, de forma que,

$$\mu(t) = i.A.\cos(\omega.t)$$

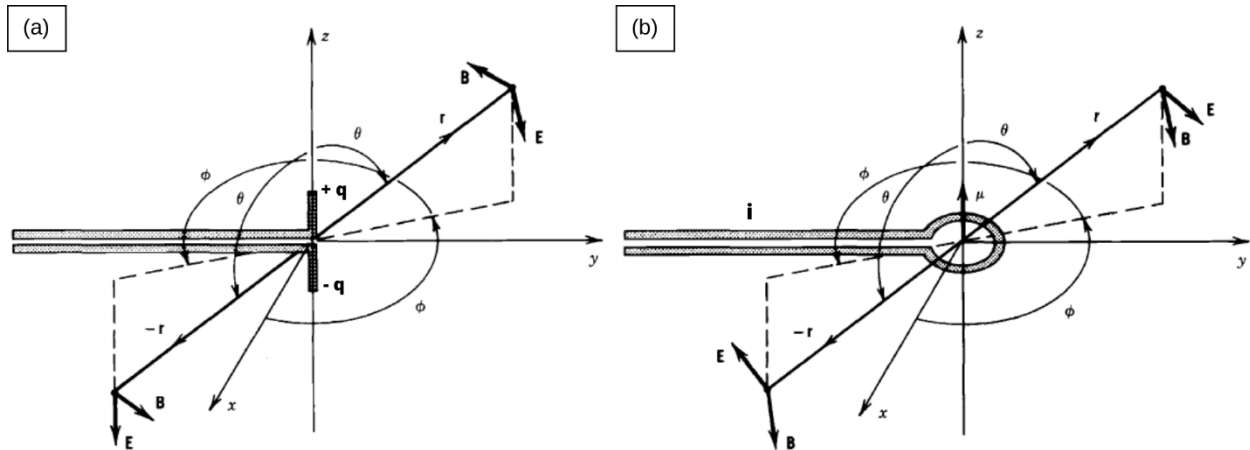


Figura 7 - Representação do campo elétrico e magnético gerados pelo dipolo elétrico oscilante (a) e magnético oscilante (b). Os campos de radiação E e B são mostrados em um instante de tempo t , incluindo seus comportamentos sob a reflexão espacial $r \rightarrow -r$. A fonte de carga e corrente de frequência ω se encontra no eixo y negativo (adaptado de Krane, 1988).

Os campos de dipolo elétrico e magnético têm paridade oposta na transformação $r \rightarrow -r$. Assim, $E(r) = -E(-r)$ e $B(r) = B(-r)$. Com isso, possuem as mesmas distribuições angulares, porém, a paridade dos campos de radiação do dipolo elétrico tem paridade ímpar, enquanto a paridade dos campos de radiação do dipolo magnético tem paridade par.

A potência média irradiada pelo campo de radiação de um dipolo elétrico pode ser escrita como (Krane, 1988),

$$P = \frac{1}{12 \pi \epsilon_0} \frac{\omega^4}{c^3} d^2$$

A potência média irradiada pelo campo de radiação de um dipolo magnético pode ser escrita como (Krane, 1988),

$$P = \frac{1}{12 \pi \epsilon_0} \frac{\omega^4}{c^5} \mu^2$$

Sendo que, d e μ são as amplitudes dos momentos dipolares dependentes do tempo.

Podemos estender os resultados da radiação de dipolos para a radiação de multipolos utilizando os polinômios de Legendre. Considerando 2^L a ordem multipolar, onde $L = 1$ (dipolo), $L = 2$ (quadrupolo), $L = 3$ (octopolo), e assim sucessivamente, e utilizando E para o multipolo elétrico e M para o multipolo

magnético. Podemos escrever que a distribuição angular da radiação multipolar de ordem 2^L , em um ângulo θ em relação ao eixo z , em um pequeno elemento de área, variando com $\sin^2\theta$, depende do polinômio de Legendre $P_{2L}(\cos\theta)$ (Krane, 1988). Assim, para um dipolo, temos,

$$P_2 = \frac{1}{2}(3 \cos^2 \theta - 1)$$

E para um quadrupolo, temos,

$$P_4 = \frac{1}{8}(35 \cos^4 \theta - 30 \cos^2 \theta + 3)$$

Além disso, a paridade do campo de radiação de multipolos elétricos e magnéticos de mesma ordem tem paridade oposta,

$$\pi(EL) = (-1)^L$$

$$\pi(ML) = (-1)^{L+1}$$

Generalizando a potência irradiada utilizando $\sigma = E$ ou $\sigma = M$ para representar, respectivamente, a radiação elétrica ou magnética, temos (Krane, 1988),

$$P(\sigma L) = \frac{2(L+1)c}{\epsilon_0 L [(2L+1)!!]^2} \left(\frac{\omega}{c}\right)^{2L+2} [m(\sigma L)]^2$$

Sendo que $m(\sigma L)$ é a amplitude dependente do tempo do momento de multipolo elétrico ou magnético da radiação, também chamada de momento de multipolo generalizado.

1.2.8 TRATAMENTO QUÂNTICO PARA A RADIAÇÃO ELETROMAGNÉTICA NO DECAIMENTO GAMA

Podemos aplicar o tratamento quântico quantizando as fontes do campo de radiação e os momentos multipolares obtidos no tratamento clássico. Para isso, usamos os operadores multipolares adequados que podem alterar o núcleo do estado inicial ψ_i para o final ψ_f . Com isso, a probabilidade de decaimento radioativo é dada pelo elemento de matriz do operador multipolar (Krane, 1988),

$$m_{fi}(\sigma L) = \int \psi_f^* m(\sigma L) \psi_i dv$$

Aqui, estamos considerando que a integral é realizada sobre toda a região ocupada pelo núcleo do átomo e o operador $m(\sigma L)$ muda o estado ψ_i para ψ_f ao mesmo tempo em que cria um fóton de energia com específica ordem multipolar e paridade.

Seja $\hbar\omega$ a energia do fóton irradiado por unidade de tempo, a probabilidade por unidade de tempo de emissão de radiação (constante de decaimento) é dado por,

$$\lambda(\sigma L) = \frac{P(\sigma L)}{\hbar\omega} = \frac{2(L+1)}{\epsilon_0 \hbar L [2L+1]!!^2} \left(\frac{\omega}{c}\right)^{2L+1} [m_{fi}(\sigma L)]^2$$

Fazendo algumas estimativas, a probabilidade de emissão de raios gama por emissão de radiação de natureza elétrica referente à transição de estado de um único próton (considerando o modelo de camadas), pode ser calculada usando o operador multipolar adicionado do termo angular ${}^L Y_{LM}(\theta, \phi)$, que se reduz a (e.z) para radiação quando $L = 1$ (dipolo), e para $[e(3z^2 - r^2)]$ para radiação quando $L = 2$ (quadrupolo). Considerando que a parte radial de ψ é constante até $r = R$ e zero para $r > R$, temos a seguinte expressão para a parte radial da probabilidade de transição (*Krane, 1988*),

$$\frac{\int_0^R r^2 r^L dr}{\int_0^R r^2 dr} = \frac{3}{L+3} R^L$$

Incluindo este termo radial e o termo angular, a probabilidade de transição EL é descrita pela seguinte expressão (*Krane, 1988*),

$$\lambda(EL) \cong \frac{8\pi(L+1)}{L[(2L+1)!!]^2} \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 \hbar c} \left(\frac{E}{\hbar c}\right)^{2L+1} \left(\frac{3}{L+3}\right)^2 cR^{2L}$$

Sendo $R = R_0 A^{1/3}$, λ em s^{-1} e E em MeV. Com isso, podemos fazer algumas estimativas para a probabilidade de transição de algumas ordens multipolares (por exemplo, para $L = 1, 2, 3$ e 4) e compará-las entre si,

$$\lambda(E1) = 1,0 \cdot 10^{14} A^{2/3} E^3$$

$$\lambda(E2) = 7,3 \cdot 10^7 A^{4/3} E^5$$

$$\lambda(E3) = 34 \cdot A^2 E^7$$

$$\lambda(E4) = 1,1 \cdot 10^{-5} A^{8/3} E^9$$

Para transições magnéticas, considerando as mesmas condições da parte radial e angular de ψ para transição elétrica, encontramos que sua parte radial vale $3R^{L-1}/(L+2)$. Adicionando o termo de momento magnético nuclear do próton, o resultado para a probabilidade de transição ML é descrita pela seguinte expressão (*Krane, 1988*),

$$\lambda(\text{ML}) \cong \frac{8\pi(L+1)}{L[2L+1]!!^2} \left(\mu_p - \frac{1}{L+1}\right)^2 \left(\frac{\hbar}{m_p c}\right)^2 \left(\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 \hbar c}\right) \left(\frac{E}{\hbar c}\right)^{2L+1} \left(\frac{3}{L+2}\right)^2 cR^{2L-2}$$

Sendo $R = R_0 A^{1/3}$, λ em s^{-1} e E em MeV, novamente. Fazendo uma aproximação $\left(\mu_p - 1/(L+1)\right)^2 = 10$, podemos fazer algumas estimativas para a probabilidade de transição de algumas ordens multipolares (por exemplo, para $L = 1, 2, 3$ e 4) e compará-las entre si,

$$\lambda(\text{M1}) = 5,6 \cdot 10^{13} E^3$$

$$\lambda(\text{M2}) = 3,5 \cdot 10^7 A^{2/3} E^5$$

$$\lambda(\text{M3}) = 16 \cdot A^{4/3} E^7$$

$$\lambda(\text{M4}) = 4,5 \cdot 10^{-6} A^2 E^9$$

Com base nessas estimativas, vemos que os multipolos mais baixos são dominantes, e à medida que aumentamos a ordem multipolar, a probabilidade de emissão de fótons (radiação gama) reduz cerca de 10^{-5} , portanto, as emissões mais comuns têm natureza dipolar. Além disso, a emissão de radiação de natureza elétrica é mais provável do que a radiação de natureza magnética, cerca 10^2 vezes maior para núcleos médios e pesados (*Krane, 1988*).

1.2.9 DECAIMENTO RADIOATIVO DO TÓRIO E URÂNIO

A radioatividade natural é a principal radiação que atinge os seres vivos (*UNSCEAR, 2000*). Uma das fontes de radioatividade natural são as areias monazíticas da praia de Meaípe. Os elementos radioativos dessa areia pertencem às chamadas séries naturais de ^{232}Th e ^{238}U (Figura 8), cujos isótopos decaem de maneira probabilística até atingirem a estabilidade se transformando em chumbo (*Evans, 1972*).

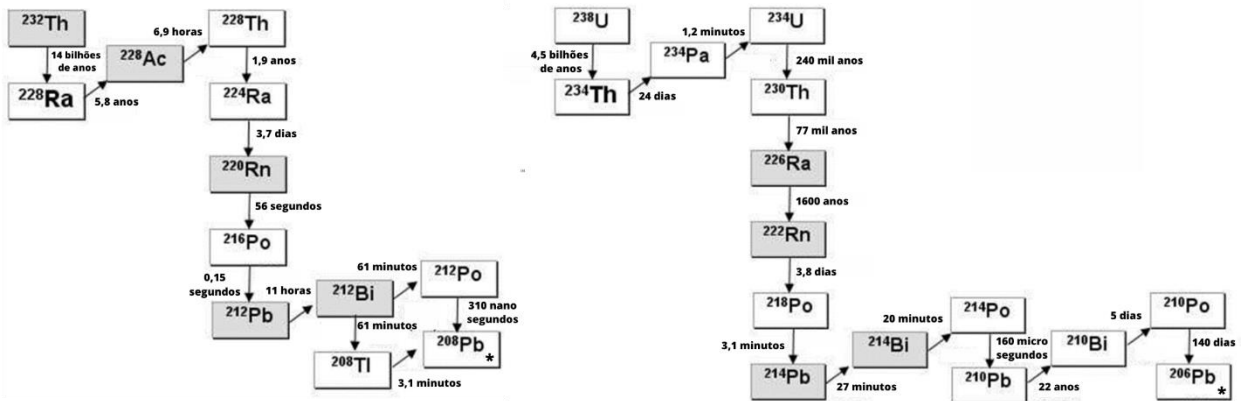


Figura 8 - Série natural de decaimento radioativo do ^{232}Th e ^{238}U . O tempo de meia-vida aparece entre um isótopo e outro. (NNDC, 2023; adaptado de UNSCEAR, 1988).

1.3 EFEITO BIOLÓGICO DA RADIAÇÃO

1.3.1 INTERAÇÃO DA RADIAÇÃO COM A MATÉRIA

Considerando um ambiente radioativo acima do comum, é importante ter informações da composição dos elementos distribuídos nesse ambiente e quais os tipos de radiação presentes, permitindo avaliar as consequências nos seres vivos expostos a essa radiação nesse ambiente. A radiação interagindo com a matéria possui muitos fatores, portanto, quanto mais informações das variáveis envolvidas no ambiente, melhor a avaliação sobre potenciais danos. Em sistemas biológicos, por exemplo, da mesma espécie, os efeitos da radiação dependem de fatores como a capacidade adaptativa e resposta biológica. Comunidades, espécies ou seres vivos diferentes podem apresentar respostas diferentes quando expostos à radiação (Andrade & Bauermann, 2010). Com isso, quanto mais variáveis envolvidas, maior também será a dificuldade para se prever com precisão o efeito biológico. Fatores externos, internos, tipo de radiação e condições meteorológicas são decisivos para analisar os efeitos da radiação ionizante. Assim, conhecer os tipos de radiação e suas principais formas de interação com sistemas biológicos é de grande importância para estudar os efeitos biológicos da radiação (Radiation, 2018; White & Mallya, 2012; Wolbarst et al., 2010).

Define-se interação quando acontece uma mudança de momento ou energia da radiação incidente. A interação da radiação com a matéria pode causar no átomo ou moléculas uma excitação (com o átomo emitindo um fóton ao desexcitar), ionização (com o átomo emitindo um elétron e se transformando em radical livre) e ativação

nuclear (com o núcleo do átomo se transformando em um núcleo residual emitindo radiação nuclear) (Eisberg, 1994).

A seção de choque é a probabilidade de ocorrer um tipo de evento como esse. As partículas do alvo possuem uma área de contato que irão interagir com a radiação incidente. Com isso, uma área maior aumenta a probabilidade de a radiação incidente interagir com o alvo.

Seja um material com N átomos por volume, área superficial plana A e espessura dx , tendo $(n.A.dx)$ núcleos nesse material. Considerando a seção de choque σ de cada núcleo, a seção de choque total é dada por (Andrade & Bauermann, 2010),

$$\sigma_T = \sigma.(N.A.dx)$$

As radiações ionizantes se apresentam em forma de partículas carregadas (como as radiações α e β), partículas não carregadas (nêutrons) ou na forma de ondas eletromagnéticas (como a radiação gama e raios X) (Isaksson & Raaf, 2017). J. J. Thomson descreveu que o fóton (radiação eletromagnética) ao interagir com o átomo faz com que um elétron oscile de maneira acelerada, reemitindo uma radiação. Arthur H. Compton (1923) deu confirmação da natureza corpuscular da radiação eletromagnética quando fez com que um feixe de raios X incidisse sobre um alvo de grafite. Compton mediu a intensidade dos raios X espalhados em função do comprimento de onda para vários ângulos de espalhamento (Eisberg, 1994, Kaplan, 1978).

A Figura 9 ilustra como podem ser distinguidas as radiações α (carga elétrica positiva), β (carga elétrica negativa) e gama (carga elétrica nula). Essas três radiações são nucleares e ionizantes, podendo causar algum tipo de dano em seres vivos.

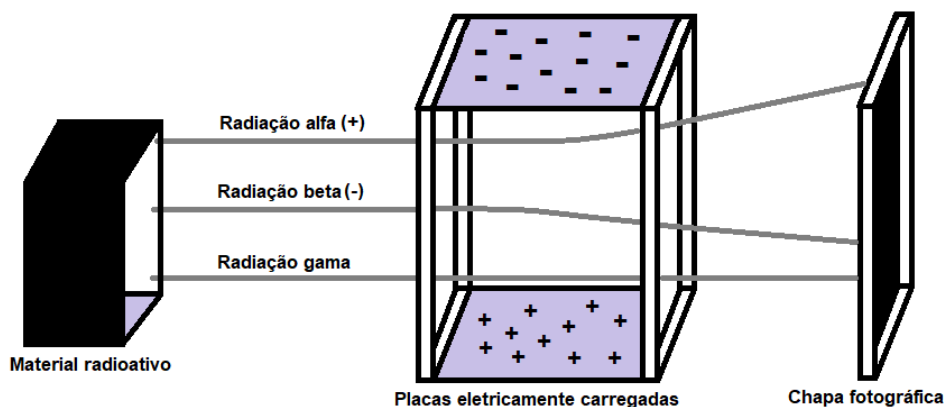


Figura 9 – Ilustração mostrando o desvio das radiações alfa, beta e gama ao atravessar um campo elétrico gerado por duas placas paralelas de cargas elétricas opostas. Fonte: Produção do próprio autor.

A radiação em forma de partículas carregadas (como a radiação α e β), ao atingir o alvo, pode perder energia na interação com os elétrons e/ou núcleos dos átomos do alvo. As interações acontecem entre o campo de radiação e o campo dos átomos, podendo causar ionização ou excitação eletrônica. No caso de excitação, após a desexcitação, ocorre um espalhamento da partícula carregada incidente e emissão de onda eletromagnética devido à desaceleração da partícula carregada, que dependendo da camada do elétron desexcitado, pode produzir raios X (radiação de frenamento ou bremsstrahlung) (Isaksson & Raaf, 2017).

A radiação ionizante em forma de ondas eletromagnéticas (como a radiação gama e raios X), dependendo da energia da radiação incidente ao interagir com o alvo, pode acontecer o efeito fotoelétrico, espalhamento Rayleigh (coerente), espalhamento Compton (incoerente) ou a produção de pares elétron-pósitron. Por esse motivo, esse tipo de radiação possui muitas aplicações em diagnósticos e terapias em mamíferos (Attix, 2007; Isaksson & Raaf, 2017).

No caso da radiação ionizante em forma de radiação gama, a relação entre a energia da radiação incidente e o número atômico dos átomos de um alvo pode ser vista na Figura 10.

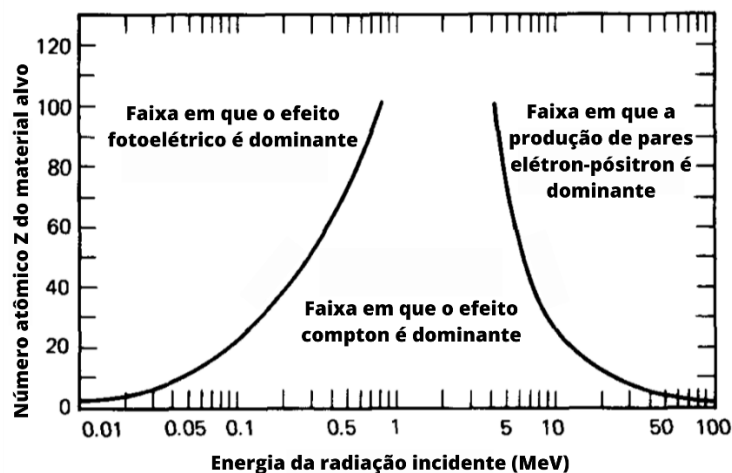


Figura 10 - Relação entre os três maiores tipos de interação com a radiação gama e o alvo. Efeitos observados para um determinado alvo com átomos de número atômico Z para alguns valores de energia da radiação gama incidente (adaptado de Knoll, 2000).

O efeito fotoelétrico é um fenômeno que ocorre quando um fóton de radiação gama incidente com energia $\hbar\omega$ é absorvido por um elétron da camada interna do átomo do alvo, sendo \hbar a constante de Planck dividida por 2π e ω a frequência da

radiação incidente multiplicada por 2π . O resultado dessa interação é a saída do elétron do átomo, com esse elétron passando a ter energia $\hbar\omega - E_k$ (a radiação gama incidente perde sua identidade dando origem a um fotoelétron), onde E_k é a energia de ligação do elétron na camada K, junto de um fóton de raios X característico no momento em que o vazio que ficou por causa da ausência do elétron da camada K é preenchido por um elétron da camada mais externa. Com esse processo se repetindo, ocorre uma sequência de preenchimentos de vacâncias nos orbitais, gerando um espectro típico dos raios X (*Attix, 2007; Cesareo, 1988; Isaksson & Raaf, 2017*). A seção de choque total não-relativística para o efeito fotoelétrico dos elétrons da camada K pode ser escrita como,

$$\sigma_k = 4\sqrt{2} \left(\frac{8\pi r_e^2}{3} \right) \alpha^4 Z^5 \left(\frac{m_e}{\hbar\omega} \right)^{7/2}$$

sendo r_e o raio do elétron determinado classicamente ($\approx 2,8 \cdot 10^{-15}$ m), Z o número atômico dos átomos do alvo, m_e é a massa de repouso do elétron ($\approx 9,1 \cdot 10^{-31}$ kg), c a velocidade da luz no vácuo ($\approx 3,0 \cdot 10^8$ m/s) e $\hbar\omega$ é a energia da radiação gama incidente.

A dependência com Z^5 mostra que a chance de ocorrer o efeito fotoelétrico é muito maior para os elementos mais pesados da tabela periódica (*Cesareo, 1988*). A Figura 11 ilustra o efeito fotoelétrico.

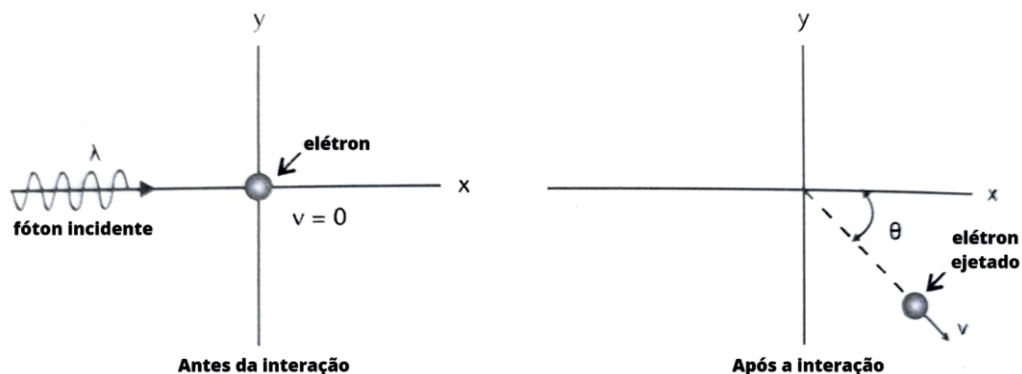


Figura 11 - Ilustração do efeito fotoelétrico (*adaptado de Andrade & Bauermann, 2010*).

O espalhamento Rayleigh (coerente) é um espalhamento elástico do fóton incidente, em que ocorre mudança de direção, sem mudar sua energia. O fóton ao interagir como o átomo faz com que um elétron oscile de maneira acelerada, reemitindo uma radiação. Para fótons com baixa energia, o comprimento de onda incidente é da

ordem do tamanho do átomo, fazendo com que o átomo inteiro participe do espalhamento, geralmente ocorrendo um espalhamento a baixos ângulos.

O espalhamento Compton (incoerente) é um espalhamento inelástico, em que uma parcela da energia do fóton incidente é transferida para um átomo do alvo, resultando na retirada do elétron do átomo (Attix, 2007; Isaksson & Raaf, 2017). Considera a natureza corpuscular da radiação incidente (dualidade onda-partícula) (Gauthier, 2015). O fóton com energia $\hbar\omega$ interage de forma não-elástica com um elétron de camada mais externa do átomo (energia de ligação E_b menor do que a do fóton). Um elétron é ejetado com um ângulo (ϕ) em relação a direção do fóton incidente, espalhando um fóton com energia menor ($\hbar\omega'$) em um ângulo (θ) em relação a direção do fóton incidente (Attix, 2007; Isaksson & Raaf, 2017; Knoll, 2000), tal como é descrito de maneira simplificada pela equação,

$$\hbar\omega' = \frac{\hbar\omega}{1 + \frac{\hbar\omega}{m_e c^2} (1 - \cos\theta)}$$

O efeito Compton está entre o efeito fotoelétrico e a produção de pares. A Figura 12 ilustra o espalhamento Compton.

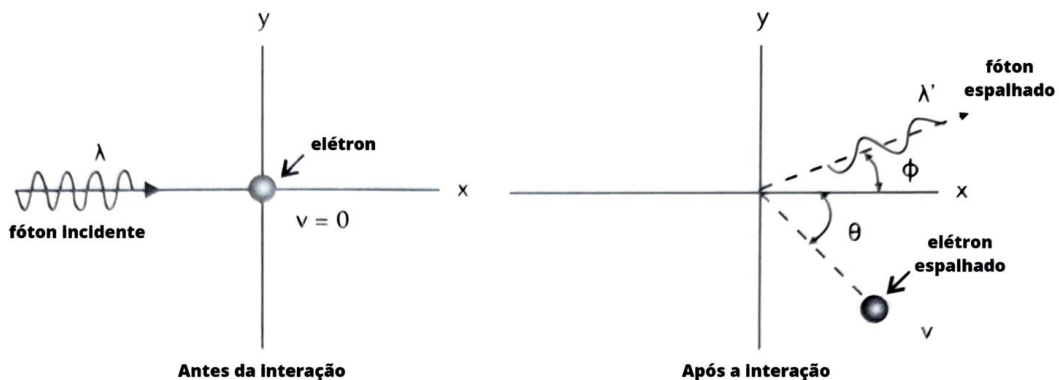


Figura 12 - Ilustração do espalhamento Compton (adaptado de Andrade & Bauermann, 2010).

A formação de pares elétron-pósitron pode ocorrer a partir da energia do fóton incidente em regiões próximas ao núcleo do átomo com conservação de energia e momento. A energia mínima para a formação do par elétron-pósitron é 1,022 MeV, sendo que 0,511 MeV é a massa de repouso do elétron ou pósitron. Na formação de pares elétron-positron, a seção de choque pode ser escrita como (Isaksson & Raaf, 2017),

$$\sigma = Z^2 r_0^2 \alpha h(\hbar\omega, Z)$$

sendo $h(\hbar\omega, Z)$ uma função que dependente da energia do fóton e do número atômico Z do alvo. Para um alvo constituído por uma mistura de átomos, utiliza-se Z efetivo (Z_{ef}) (Tauhata, 2003).

A produção de pares elétron-pósitron acontece quando fótons de energia superior a cerca de 1 MeV interagem com o campo nuclear de núcleos com Z elevado. A radiação incidente desaparece gerando o par elétron-pósitron (Kaplan, 1978).

Supondo que uma radiação incidente com N_0 partículas interaja com os átomos de um alvo. Uma parcela do feixe (dN) é absorvida (atenuando) e/ou espalhando a cada intervalo de comprimento dx ao longo do caminho. A atenuação pode ser escrita como,

$$N = N_0 \cdot e^{-\mu x}$$

sendo μ o coeficiente de atenuação linear.

Para uma determinada radiação que atravessa a espessura (dx) de um material absorvedor, a atenuação obedece à equação de Beer-Lambert (Swinehart, 1962),

$$I = I_0 e^{-\mu x}$$

Sendo I_0 a intensidade da radiação incidente, I a intensidade da radiação transmitida e μ o coeficiente de atenuação linear. Sendo que μ contém a contribuição do efeito fotoelétrico, efeito Compton e produção de pares elétron-pósitron.

A perda de energia da radiação incidente ao interagir com os átomos do alvo pode ser descrita por unidade de distância percorrida no material. Possui dependência da carga elétrica, massa e energia da radiação incidente, e das propriedades do alvo (tal como o número atômico dos átomos). Assim, a capacidade do alvo parar a radiação incidente é definido como (Andrade & Bauermann, 2010),

$$S = -\frac{dE}{dx}$$

A capacidade de parada aumenta a medida que a radiação incidente perde energia ao atravessar os átomos e proporcional a densidade do alvo. Assim, é definida como Transferência Linear de Energia (*Linear Energy Transfer* – LET) a medida da perda de energia da radiação incidente (CNEN, 2005; Porter, 1989).

1.3.2 GRANDEZAS E UNIDADES

Comissões internacionais foram criadas para padronizar grandezas e unidades dosimétricas. A Comissão Internacional de Unidades e Medidas de Radiação (*International Commission on Radiation Units and Measurements* - ICRU) define as

grandezas físicas dosimétricas. A Comissão Internacional de Proteção Radiológica (*International Commission on Radiological Protection - ICRP*) desenvolve a proteção dos efeitos biológicos da radiação. A Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) tem a função de orientar e normatizar o uso da energia nuclear no Brasil. Diferentes tipos de radiação apresentam diferentes formas de interação e consequências biológicas. Com isso, foi necessário definir quais grandezas e unidades dosimétricas estão envolvidas no estudo da radiação (*Heilbron, 2019*).

O modelo epidemiológico BEIR VII (*Biological Effects of Ionizing Radiation VII*) é a sétima edição de uma série de relatórios do NRC (*National Research Council*). Trata das consequências em humanos da exposição a radiação de corpo inteiro sob baixas doses (abaixo de 100 mSv) de baixo LET (raios X, radiação gama e radiação β). Contém as mais recentes estimativas de riscos para câncer induzido por radiação por causa de baixas doses de radiação ionizante. O BEIR VII limita como baixas doses quando a Dose Equivalente Total Efetiva (Total Effective Dose Equivalent - TEDE) estiver entre 1 mSv e 100 mSv para radiações de baixo LET. Esse modelo dá sustentação a um modelo de risco biológico de câncer linear sem limiar em doses baixas. Por outro lado, o BEIR VII contribuiu no desenvolvimento de métodos capazes de estimar riscos de incidir um câncer ou causar morte, levando em conta parâmetros como a dose, a idade e o sexo quando a pessoa está sendo exposta a radiação de baixa dose e baixo LET (*NRC, 2006*).

A radiação ionizante é uma radiação eletromagnética ou corpuscular que na interação com algum meio material tem a propriedade de transferir total ou parte de sua energia para esse meio, ionizando seus átomos. Para medir a dose de radiação se utiliza o gray (Gy), sendo $1 \text{ Gy} = 1 \text{ J Kg}^{-1}$, que veio para substituir a antiga unidade rad que hoje é menos utilizada, sendo $1 \text{ Gy} = 100 \text{ rad}$ (*Andrade & Bauermann, 2010; Attix, 2007; CNEN, 2005*).

A Dose Absorvida (D) é a relação entre a fração da energia da radiação absorvida e a massa de volume do material que a absorve (*ICRP, 2007*). No Sistema Internacional de Unidades (SI), sua unidade é o Gray (Gy). Sua representação está apresentada na equação,

$$D = \frac{d\bar{E}}{dm}$$

Sendo que, $d\bar{E}$ é a fração de energia média depositada no elemento de massa dm .

A Dose Equivalente (H) é a equivalência entre as doses de radiações de diferentes LET's para produzir efeitos biológicos semelhantes (*ICRP, 2007*). A unidade de dose equivalente no SI é o sievert (Sv). Sua representação está apresentada na equação,

$$H = Q.D$$

sendo Q o fator de qualidade da radiação (unidade adimensional).

Devido aos diferentes efeitos biológicos entre as radiações de alto LET (radiação α e nêutrons, têm ação direta) e baixo LET (raios X, radiação gama e radiação β , têm ação indireta), foi definido o conceito de fator de qualidade (Q) (*Zapp 2002; Cucinotta & Atwell, 2002*). Para as radiações de baixo LET, o fator de qualidade vale 1. Para as radiações de alto LET, o fator de qualidade vale 20. Significa que a radiação de alta transferência linear de energia (alto LET) tem condições de gerar danos 20 vezes maiores do que a radiação de baixo LET em um mesmo tecido biológico (*Andrade & Bauermann, 2010*). Por outro lado, a radiação de baixa transferência linear de energia (baixo LET) tem maior capacidade de penetração, pois tem baixa transferência de energia para o alvo a medida que o atravessa.

A Dose Efetiva (E) é o resultado do somatório dos produtos do fator de peso (P) do tecido pela dose equivalente (H) (*ICRP, 2007*). A unidade de dose efetiva no SI também é o sievert (Sv).

$$E = \sum P.H$$

A Dose Coletiva Efetiva é a dose total da radiação recebida por um grupo de indivíduos, sendo o produto do número de indivíduos expostos a uma fonte de radiação ionizante pela média da dose efetiva recebida pelos indivíduos. A unidade de dose efetiva no SI também é o sievert (Sv).

A Dose Equivalente Efetiva Total (Total Effective Dose Equivalent - TEDE) é a dose combinada de toda transferência de energia à um material biológico (*HOMANN, 2019*).

A exposição muda linearmente com a intensidade da fonte radioativa, dependente da quantidade de carga (dQ) ionizada por massa de ar (dm) em um volume (dV). A exposição (X) pode ser escrita como,

$$X = - \frac{dQ}{dm}$$

cuja unidade é $C\ Kg^{-1}$ também usada como Roentgen (R). A exposição leva em consideração o resultado do fluxo de fótons em um volume de ar. Considera que não há atenuação dos fótons no caminho entre a fonte e dV.

1.3.3 INTERAÇÃO DA RADIAÇÃO COM A CÉLULA

A célula é a menor unidade com capacidade autônoma de sobrevivência. É composta de compostos orgânicos e inorgânicos, tais como, proteínas, carboidratos, lipídios, ácidos nucleicos, água e sais minerais.

Existem basicamente dois tipos de células: células procariontes e eucariontes. As bactérias são formadas de células procariontes. Enquanto fungos, plantas, algas e animais, por exemplo, são formados de uma ou mais células eucariontes.

As células eucariontes são caracterizadas por possuírem alto grau de organização e compartimentação, com a presença de várias organelas, possuindo um núcleo que contém as informações genéticas. Já as células procariontes são mais simples e não possuem núcleo. Todas as células são envolvidas por uma membrana plasmática, e as organelas no interior das células eucariontes, também possuem membrana. Essa membrana tem espessura de aproximadamente 10 nm, composta por uma bicamada lipídica seletiva, acrescentada de proteínas que interagem com compostos ao redor. A Figura 13 apresenta um esquema básico de uma célula procarionte e eucarionte (*Junqueira, 2005*).

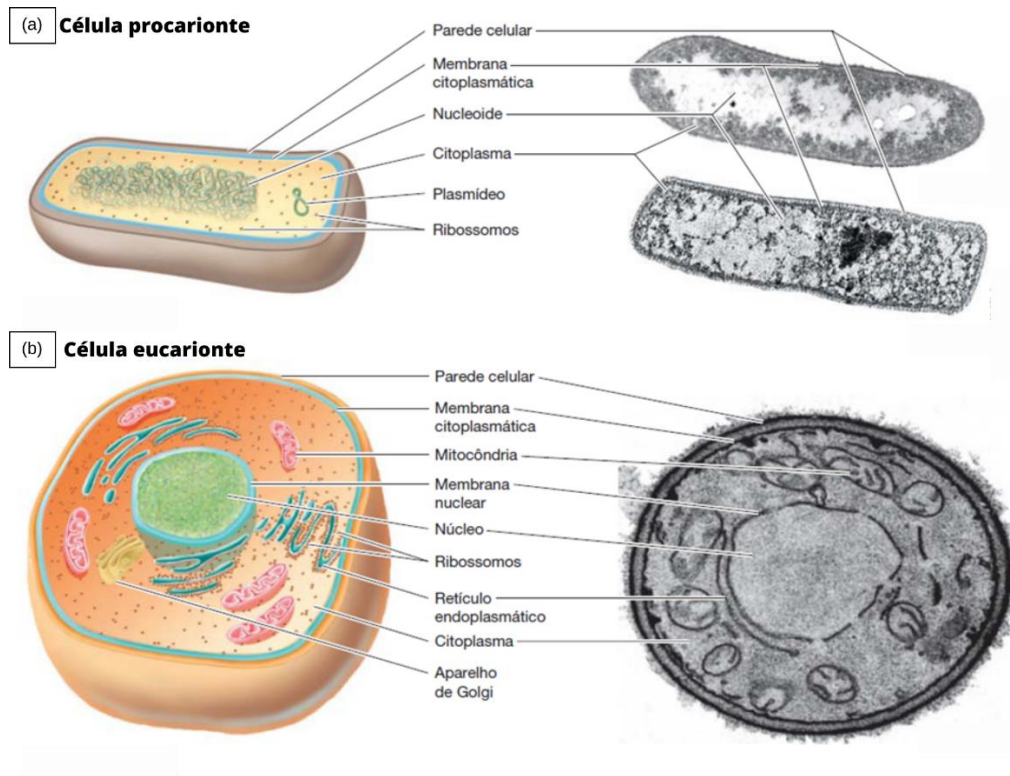


Figura 13 - (a) Célula procariote (à esquerda) e microscopia eletrônica da célula procariote (à direita). (b) Célula eucariote (à esquerda) e microscopia eletrônica da célula eucariote (à direita) (*adaptado de Madigan et al., 2016*).

A interação da radiação com as células pode promover alterações biológicas. Uma importante característica é que a resposta biológica depende da fase do ciclo celular da célula alvo (*Hall, 2006*).

Os organismos pluricelulares crescem em função do aumento do número de células de forma exponencial e não pelo aumento do volume das células, para estabelecer um equilíbrio dinâmico em que a regeneração da célula se dá de várias maneiras (*Lehnert, 2008*).

O ciclo celular ocorre basicamente em duas etapas: Mitose (M) (divisão celular) e Síntese (S) (síntese de DNA). Além disso, ocorrem duas fases intermediárias G1 e G2. Em mamíferos, ocorre a fase S (6 a 8 horas), fase G2 (2 a 4 horas), fase M (menor que 1 hora), e por último, a fase G1 (1 a 8 horas). O ciclo celular dura cerca de 10 a 20 horas (AIEA, 2005). As fases do ciclo celular estão esquematizadas na Figura 14.

A célula possui radiosensibilidade diferente dependendo da fase do ciclo celular. A maior radiosensibilidade se encontra nas fases M e G2, enquanto a fase S é a mais radorresistente. Quanto maior o LET da radiação, menor a diferença de radiosensibilidade entre as fases do ciclo celular. (*Hall, 2006*).

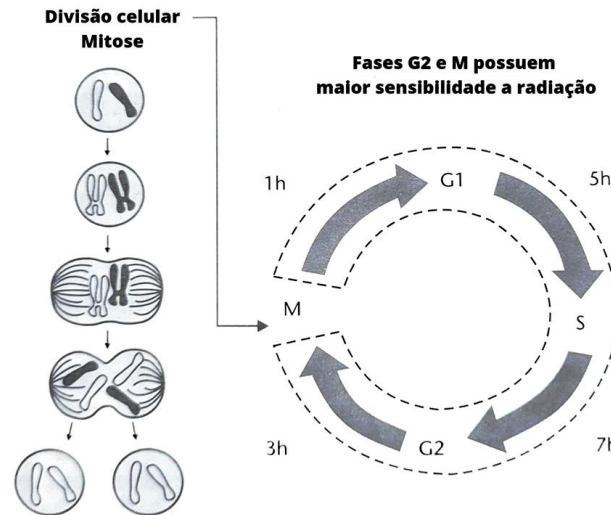


Figura 14 - Esquema que relaciona a radiosensibilidade e fase do ciclo celular (adaptado de Andrade & Bauermann, 2010).

As células animais podem ser classificadas em células em proliferação contínua; células que normalmente não se dividem, mas podem fazê-lo por um estímulo externo; e células diferenciadas terminalmente. As células embrionárias e as células epiteliais do intestino delgado são exemplos de células sensíveis à radiação, assim como as células do sistema linfático e da medula óssea. Em células que não se proliferam, a morte ocorre quando a célula perde sua função específica. Em células que se proliferam, a morte ocorre quando perdem a capacidade de se reproduzir (Andrade & Bauermann, 2010).

A exposição à radiação ionizante tem como principal consequência o dano às moléculas de DNA (alvo crítico). Sendo assim, o citoplasma é onde ocorrem efeitos somáticos e no DNA ocorrem os efeitos genéticos. A radiação ionizante pode interagir com o alvo crítico no interior da célula por ação direta ou indireta, ionizando (ou excitando átomos). Esse processo pode causar alterações biológicas e morte celular (Andrade & Bauermann, 2010).

A ação direta da radiação incidente é causada por radiação de alto LET, como radiação α emitida por isótopos radioativos, em que elétrons secundários resultantes da interação da radiação incidente interagem diretamente com o DNA. A ação indireta da radiação incidente é causada por radiação de baixo LET, como as radiações β e gama, em que a interação acontece com o meio ao redor do alvo crítico, gerando radicais livres e espécies reativas de oxigênio que atacam o DNA (Hall & Giaccia, 2012). Na ação indireta, os elétrons secundários interagem, por exemplo, com moléculas de água

gerando radicais hidroxila (OH^\cdot), podendo atingir em seguida as moléculas de DNA que possuem moléculas de água aderidas à sua estrutura (*Isaksson & Raaf, 2017*).

Uma estrutura muito importante na ocorrência de dano por radiação é a membrana celular. A estrutura básica da membrana celular é a mesma das membranas que envolvem as organelas no interior das células eucariontes. Possui permeabilidade seletiva, influenciando no transporte de substância entre o interior e exterior da célula, de acordo com fatores como o tamanho da molécula, lipossolubilidade, carga elétrica e transportadores disponíveis.

A mitocôndria é uma das organelas da célula responsável pela geração de energia na produção de moléculas de ATP na cadeia respiratória e se encontra envolvida por duas membranas. A respiração celular pode ser aeróbica quando dependente de oxigênio e, na sua falta ou restrição, pode ser anaeróbica quando não depende da mitocôndria. A respiração aeróbica é um processo eficiente, mas pode formar uma pequena quantidade de superóxidos (radicais livres tóxicos) quando sofre a ação da radiação ionizante, aumentando a atividade do sistema antioxidante e podendo causar dano à mitocôndria (*Lehnert, 2008*).

O DNA da célula, considerado o alvo mais crítico, também é envolvido por uma membrana semelhante à membrana plasmática (*Lehnert, 2008*). Portanto, a radiação nuclear α , β e gama, ao atingir um sistema biológico, terá como obstáculo a membrana plasmática antes de conseguir atingir o DNA. Entretanto, um dano causado a membrana plasmática devido à ação da radiação nuclear, pode gerar efeitos catastróficos para o organismo.

Todas as células armazenam suas informações hereditárias na molécula de DNA, atuando na síntese de RNA para a formação de proteínas que exercem diversas funções na célula. O DNA sofre dano induzido por radiação devido à absorção de energia da radiação ionizante, podendo causar, por exemplo, quebras simples e duplas na dupla hélice, danos na base, e cruzamento proteico (*Sapora et al., 1991; Lehnert, 2008*).

1.3.4 MORTE, SOBREVIVÊNCIA E ADAPTAÇÃO CELULAR.

Células de mamíferos podem morrer de várias maneiras, como, por exemplo, a morte programada, denominada apoptose (*Alberts et al., 2002*). Segue os principais tipos de morte celular (*Lehnert, 2008*):

- A apoptose é a morte celular programada, importante na homeostase, fase

embrionária e sistema imune de organismos pluricelulares, tendo como principais mediadores o gene transcritor da proteína p53, que em caso de inativação, o organismo pode ter doenças autoimunes, degenerativas e carcinogênese, reduzindo a possibilidade de reparos mal sucedidos e propagação de erros de transcrição;

- A senescência ocorre quando células que proliferam rapidamente, eventualmente, desaceleram, interrompendo a proliferação celular;
- A necrose é a destruição celular traumática liberando substâncias para o meio extracelular, com graves alterações na morfologia da célula, deformando membranas e destruindo organelas, provocando infecções e inflamações em organismos multicelulares;
- A catástrofe mitótica ocorre quando uma célula com DNA danificado realiza mitose prematuramente gerando aberrações cromossômicas (*Kerr et al., 1972; Jarvis et al., 1994*). A Figura 15 ilustra o DNA e os danos induzidos por radiação ionizante mais comuns.

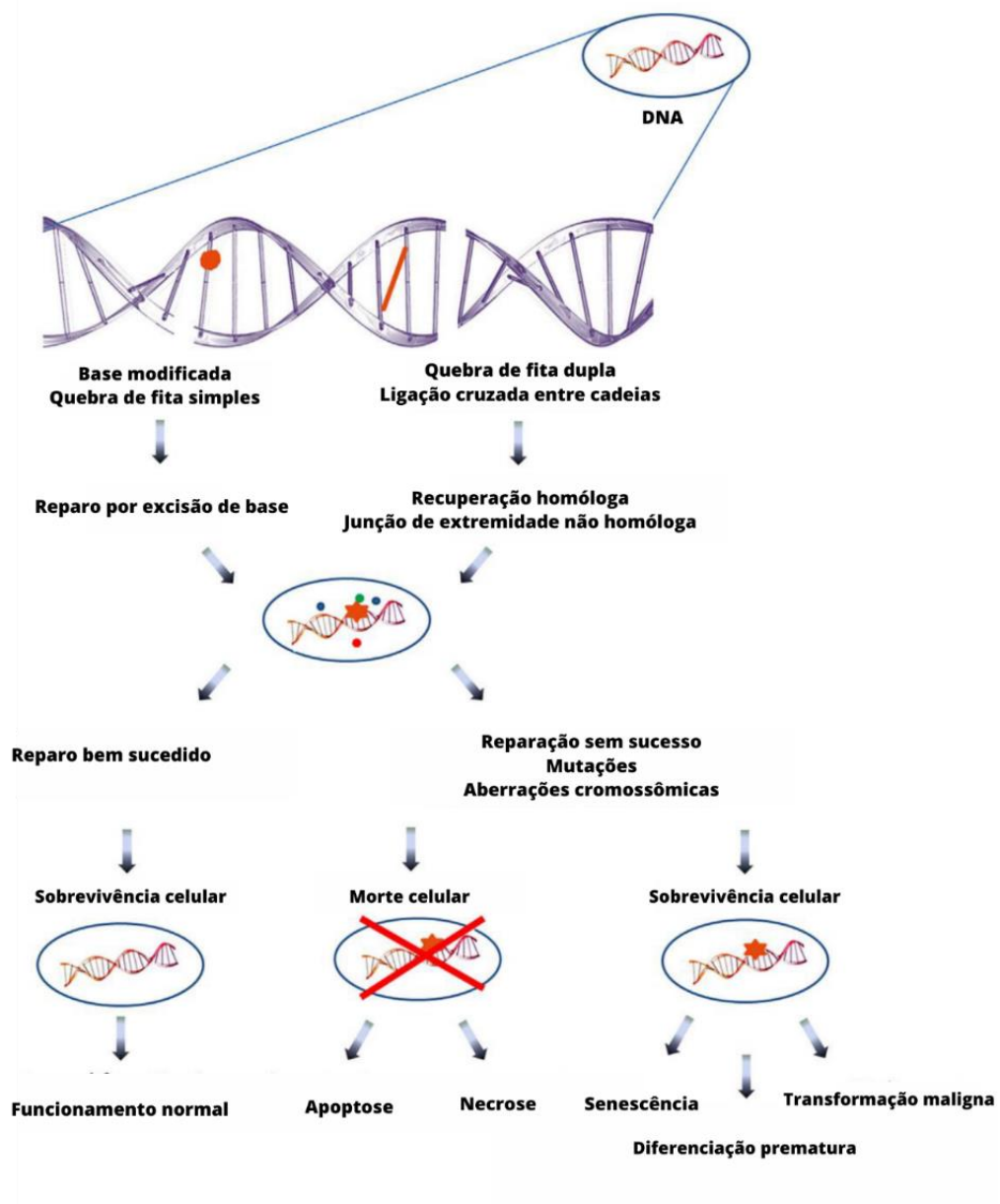


Figura 15 - Ilustração de danos a molécula de DNA, principais tipos de reparo e efeitos em células de mamíferos que podem ser causados por ação da radiação ionizante (adaptado de Arena, 2014).

Dependendo do dano na molécula de DNA, será ativado um tipo de reparo. Com isso, os casos de quebra de fita simples na molécula de DNA e base modificada podem ser eliminadas pelo reparo por excisão de base, podendo gerar um reparo bem-sucedido. Por outro lado, os casos de quebra de fita dupla na molécula de DNA, o reparo é por recombinação homóloga ou por junção de extremidade não homóloga. Se a reparação for sem sucesso, a célula pode morrer se entrar em apoptose ou necrose, ou pode sobreviver se entrar em senescência, diferenciação prematura ou carcinogênese (adaptado de Arena, 2014).

A carcinogênese é consequência da proliferação de uma célula que transcreve e propaga erros do DNA que não foram detectados ou corrigidos pelas checagens do ciclo celular (*Junqueira, 2005*). Pode ter como causa a exposição à radiação ionizante (*Bertram, 2000*).

Os genes de estabilidade do DNA fazem parte da sinalização celular regulando a resposta a substâncias que estimulam a proliferação celular e proteção contra agentes que podem causar danos. A inatividade ou mutação desses genes leva a perda de sensibilidade a danos genéticos levando à propagação de erros na proliferação celular (*Hall, 2006*).

1.3.5 RADICAIS LIVRES DE OXIGÊNIO DEVIDO A RADIAÇÃO IONIZANTE

A interação de uma radiação ionizante com moléculas de água pode levar a ionização ou excitação, podendo ser decomposta em hidrogênio e radicais livres (radiólise da água) (*Pompella, 1997; Anderson, 1996; Halliwell, 1994*).

Moléculas independentes tanto orgânicas quanto inorgânicas e átomos com elétrons desemparelhados podem ser classificados como radicais livres e costumam ser instáveis, reativos e de tempo de meia-vida curto (*Halliwell, 2009*). Esses radicais podem ser gerados pelo alvo celular quando exposto à radiação ionizante (como a radiação nuclear). Radicais livres tais como o oxigênio singlete (O_2^+), superóxido (O_2^-); hidroxila (OH^-); e óxido nítrico (NO^-), pode ser originado no citoplasma, membrana plasmática ou mitocôndrias, e em seguida, se ligarem a proteínas, carboidratos, lipídios e ácidos nucleicos (DNA), prejudicando seu funcionamento (*Yu & Anderson, 1997*). Estudos utilizando *E. coli* mostraram que cerca de 65% da morte celular é devido ao radical hidroxila (*Johansen, 1965*).

O radical superóxido (O_2^-) possui capacidade baixa de oxidação; o radical hidroxila (OH^-) possui baixa mobilidade e elevada reatividade. Por outro lado, o peróxido de hidrogênio (H_2O_2), mesmo não sendo um radical livre, atravessa membranas entrando em contato com a molécula de DNA (*Yu & Anderson, 1997*). Alguns radicais são gerados por meio da atividade de enzimas catalisadoras durante a transferência de elétrons no metabolismo celular, e também, através da exposição do organismo a fatores externos como a radiação ionizante (como a radiação nuclear de isótopos radioativos). Quando não se tem a quantidade

equilibrada de moléculas antioxidantes e oxidantes, ocorre estresse oxidativo (Sies, 1993).

Moléculas reativas do metabolismo que tem em sua composição oxigênio, geralmente, são resultados do processo de geração de energia. Comparando o ciclo aeróbico e anaeróbico, o ciclo aeróbico gera trinta e seis moléculas de ATP, enquanto o ciclo anaeróbico gera duas moléculas de ATP. Com isso, aumenta as chances de o ciclo aeróbico produzir substâncias tóxicas de oxigênio reativas, principalmente se tiver sofrido danos devido à exposição à radiação ionizante. A radiação gama é uma fonte externa capaz de provocar a geração de radicais livres (Lehninger, 2006).

O aumento da atividade enzimática antioxidante frequentemente acompanha o aumento do estresse oxidativo que traz danos ou morte celular (Anderson, 1996). Com isso, a medida da atividade antioxidante ou dos radicais livres oxidantes é uma maneira de determinar indiretamente efeitos biológicos da radiação ionizante. Antioxidante pode ser considerado qualquer composto que em pequenas concentrações em relação ao substrato oxidável, retarda ou impede a oxidação do substrato (Stahl & Sies, 1997). Além de impedir a formação de radicais livres, os antioxidantes podem impedir que os radicais livres ataquem organelas, membranas plasmáticas, proteínas, carboidratos, lipídios e moléculas de DNA, convertendo esses radicais em oxigênio através da oxidação e em água pela redução. As principais enzimas antioxidantes são: superóxido dismutase (SOD), catalase (CAT) e glutatona peroxidase (GPX).

A radiação ionizante pode afetar o ambiente citoplasmático, cujo estado redox pode durar segundos ou dias (Lehnert, 2008). O superóxido (O_2^-) é gerado do oxigênio (O_2) através da adição de um elétron, e possui baixa capacidade de atravessar a membrana plasmática. Com a adição de mais um elétron, pode se transformar em peróxido de hidrogênio (H_2O_2), que mesmo não sendo um radical livre, possui a capacidade de penetrar a membrana plasmática. Com a adição de mais um elétron, pode se transformar em outros dois radicais (OH^- e OH^+) quando já estiver no núcleo da célula próximo ao DNA, podendo causar o dano indireto (Lehnert, 2008).

Outro radical livre com baixa reatividade semelhante ao superóxido (O_2^-) é o óxido nítrico (NO^-), que pode reagir com facilidade com diferentes radicais livres,

impedindo a peroxidação lipídica na membrana plasmática, podendo apresentar tanto atividade oxidante quanto antioxidante. Alguns trabalhos constataram que doses baixas de radiação de baixo LET podem gerar óxido nítrico (NO^\cdot) que atravessa a membrana plasmática gerando ionizações no percurso (*Beckman & Koppenol, 1996; Mikkelsen & Wardman, 2003*).

Geração de radicais livres de oxigênio e nitrogênio foram investigados após células tumorais serem expostas a altas doses de radiação ionizante de baixo LET, mostrando um aumento na produção de espécies reativas de oxigênio proporcional a dose, produção de superóxidos e indícios de que a mitocôndria é a maior fonte de radicais livres (*Leach et al., 2001; Morales et al., 1998; Oberley et al., 1976; Petkau et al., 1976*). A detecção de radicais livres derivados de oxigênio pode ser investigada através da sequência de eventos causados pelo dano induzido por radiação.

As membranas plasmáticas têm bastante vulnerabilidade a danos por estresse oxidativo induzidos por radiação ionizante. Os lipídios da membrana plasmática sofrem peroxidação lipídica na presença de oxigênios reativos (*Lehnert, 2008*). Por exemplo, os lipídios polinsaturados têm carbonos adjacentes com ligações duplas, suscetíveis a ação do radical hidroxila, superóxido e íons de hidrogênio, podendo gerar peróxidos lipídicos (*Stark, 1991; Albanese & Dainiak, 2003*).

O processo se inicia pelo radical hidroxila (OH^\cdot), retirando um átomo de hidrogênio de um lipídio insaturado, gerando um radical lipídico, que se liga a uma molécula de oxigênio próxima formando o radical lipoperóxido, retirando o átomo de hidrogênio dos lipídios adjacentes, gerando o hidroperóxido lipídico, e esse ciclo de estresse oxidativo se repete. Esse estresse oxidativo induzido por radiação ionizante causa mudanças estruturais na membrana plasmática das células, aumentando a polarização e constante dielétrica na região hidrofóbica da bicamada lipídica, aumentando sua rigidez e permeabilidade a passagem de íons e moléculas (*Stanimirovic et al., 1995; Stark, 1991; Chatterjee & Agarwal, 1988*). Há um trabalho com linfócitos que detectou aumento do número de poros na membrana celular detectáveis por microscopia eletrônica logo após a exposição a alta dose de radiação de baixo LET (*Chandra & Stefani, 1981*).

1.3.6 MODELOS DE SOBREVIVÊNCIA CELULAR

Curvas de sobrevivência são utilizadas para investigar a sobrevivência de sistemas biológicos expostos à radiação ionizante, tais como bactérias e microalgas. A resposta biológica apresenta diferenças em função do LET, gerando curvas com formatos diferentes para radiações de baixo e alto LET (*O'Rourke et al., 2009*).

Os modelos de sobrevivência celular que investigam as consequências da exposição à radiação ionizante, se baseiam principalmente na perda da capacidade de proliferação celular (*Arslan et al., 1986*). Os modelos mais conhecidos são a teoria do alvo, o modelo linear-quadrático, o modelo de dano letal, o modelo potencialmente letal e o modelo de saturação de reparos (*Lehnert, 2008*).

A teoria do alvo considera que a célula possui inicialmente N alvos críticos que causam morte celular. Seja (dN) o número de alvos a serem desativados pela dose (dD), podemos escrever que,

$$dN = -\frac{N \cdot dD}{D_0}$$

Sendo que D_0 é a dose para que as células irradiadas sofram 37% de redução celular. Segundo esse modelo, a probabilidade para a radiação ionizante desativar uma célula pode ser representada pela equação,

$$P(D) = e^{-\frac{D}{D_0}}$$

O modelo linear quadrático considera uma componente linear e outra quadrática na equação de sobrevivência celular (*O'Rourke et al., 2009*),

$$P(D) = e^{-(a \cdot D) - (b \cdot D^2) - \left(\frac{D}{D_0}\right)}$$

Sendo que, a e b são constantes. A Figura 16 ilustra a curva de sobrevivência do modelo linear quadrático.

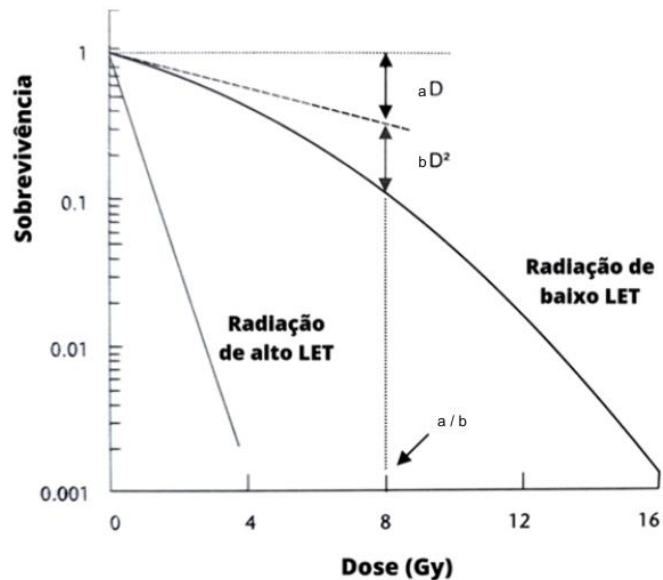


Figura 16 - Curva de sobrevivência no modelo linear quadrático. (adaptado de AIFA, 2005).

O modelo de dano letal e potencialmente letal considera que a radiação ionizante pode provocar uma lesão reparável (potencialmente letal) ou não reparável (letal). O dano letal corresponde a contribuição linear e o dano potencialmente letal corresponde a contribuição quadrática do modelo linear-quadrático (Curtis, 1986).

O modelo de saturação de reparo considera que a sobrevivência depende apenas de reparos celulares bem e mal sucedidos, considerando também que, o dano induzido por radiação pode sofrer saturação, aumentando a capacidade de reparo celular (Goodhead, 1985).

1.3.7 HIPÓTESE DE HORMESE

Muitos trabalhos relacionam a dose da radiação ionizante com o efeito causado em sistemas biológicos considerando que as células que sofrem o dano são somente as que estejam no caminho da radiação. Considera também que o dano é proporcional à dose e ao número de células atingidas, e que todas as células são igualmente sensíveis à radiação (Lehnert, 2008). Porém, existem contradições, pois outros trabalhos concluíram que ocorre uma hipersensibilidade a radiação nas células quando expostas à radiação de baixa dose, aumento de resistência à radiação e/ou uma resposta adaptativa (Marples & Joiner, 1993; Marples & Collis, 2008; Shmakova et al., 2002). A Figura 17 ilustra como fica a

curva de sobrevivência considerando a hipersensibilidade, aumento de resistência e o modelo linear quadrático.

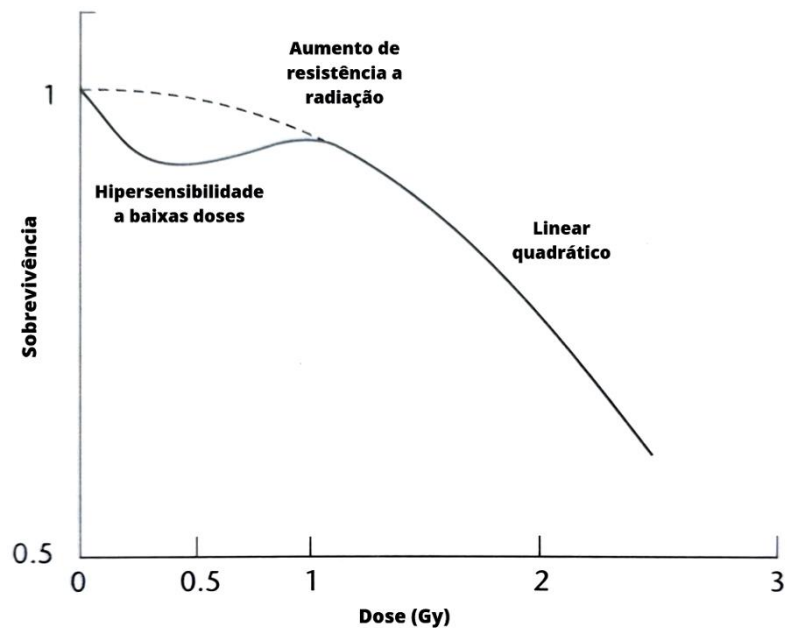


Figura 17 - Ilustração da curva de sobrevivência considerando os fenômenos HRS e IRR no modelo linear quadrático (*adaptado de Andrade & Bauermann, 2010*).

Há trabalhos que mostraram que a hipersensibilidade depende da fase do ciclo celular, com maior presença na fase G2 (*Short et al., 2003; Marples et al., 2004*). Enquanto a resposta adaptativa é independente do LET (*Marples & Skov, 1996*).

A hipótese de Hormese de radiação defende a ideia de que pequenas doses de radiação fazem bem à saúde do organismo (*Higson, 2005*). Alguns trabalhos sugerem que a hipótese de Hormese se aplica aos sistemas biológicos que vivem próximo à areia monazítica da praia de Meáipe (Guarapa-ES) que sofrem exposição à sua radiação gama de baixa dose e baixo LET (*Orlando et al. 2021; Coutinho et al. 2020*). Porém, quase não há na literatura trabalhos que investiguem o conceito de Hormese relacionados à exposição a radiações de baixa dose e baixo LET em bactérias e microalgas. Em células de mamíferos, especialmente em humanos, algumas pesquisas sugerem que a exposição a baixas doses de radiação melhora a imunidade e reparo de moléculas de DNA (*Calabrese & Baldwin, 2003*). Ainda assim, o consenso que prevalece na comunidade científica estabelece que qualquer dose de radiação causa danos à saúde.

2. OBJETIVO

O objetivo dessa pesquisa foi investigar os efeitos biológicos da radiação gama emitida pela areia monazítica da praia de Meaípe da cidade de Guarapari, no estado do Espírito Santo, sudeste do Brasil. A intenção foi descobrir se a radiação gama de baixa dose e baixo LET emitida pela areia é prejudicial à saúde dos seres vivos que visitam e habitam às proximidades dessa praia.

2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- 2.1.1 O presente trabalho visa à caracterização físico-química da areia monazítica da praia e investigação de seus efeitos no crescimento de organismos (alguns patogênicos) presentes na areia da praia.
- 2.1.2 Objetiva-se aqui apresentar e discutir as medidas de radiação gama terrestre natural emitida pela areia por faixa de tamanho de partícula, as análises elementares e cristalográficas das partículas, bem como as medidas de suscetibilidade magnética das amostras em um período de 12 meses. Neste trabalho, a radiação gama é associada ao decaimento do tório nas areias da praia de Meaípe.
- 2.1.3 Verificar a composição dos elementos físico-químicos das areias monazíticas uma vez que essa composição pode variar de lugar para lugar, gerando diferentes doses equivalentes de radiação gama.
- 2.1.4 Procura-se aqui obter o conhecimento preciso da composição dos elementos da areia monazítica, permitindo com isso construir simuladores físicos que possam ser utilizados em experimentos biológicos em laboratório simulando o ambiente de uma praia com areia monazítica.
- 2.1.5 Realizar um estudo investigativo utilizando um simulador físico do ambiente de radiação natural da areia monazítica em bactérias *E. coli*, *S. Aureus*.
- 2.1.6 Realizar um estudo utilizando um simulador físico do ambiente de radiação natural da areia monazítica em algas do tipo *Chlorella sp.*, para avaliar o papel dessa radiação natural.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 SIMULADOR FÍSICO DE RADIAÇÃO NATURAL

Na Praia de Meaípe ($20^{\circ} 44' 17''$ S, $40^{\circ} 32' 20''$ W) na cidade de Guarapari, no estado do Espírito Santo, vinte e quatro amostras de areia monazítica foram coletadas nos pontos da praia onde a radiação gama foi mais intensa, no dia específico da amostragem, conforme mostrado na Figura 18 (marcadores em amarelo).



Figura 18 - Região de Meaípe (marcador vermelho) e pontos de coleta de amostras de areia (marcadores em amarelo) ao longo da praia. Fonte: Produção do próprio autor.

As medições de radiação foram realizadas a uma altura de 10 cm da superfície da areia, utilizando um detector Gamma Scouter acoplado a um rastreador GPS Etrex 10 (Garmin), conforme descrito por *Coutinho et al. (2020)*. O medidor de radiação Gama Scout converte impulsos por tempo em uma taxa de dose baseada no ^{137}Cs . O contador portátil com calibração padrão, usado neste estudo para interpretar a taxa de dose equivalente (em $\mu\text{Sv h}^{-1}$), utiliza uma razão de 1,8 cps por $\mu\text{Sv h}^{-1}$. O dispositivo testado teve um intervalo de confiança de 5% comparado a um ajuste mestre de um medidor de referência de um emissor de ^{137}Cs e limite inferior de detecção de $1,5 \mu\text{Sv h}^{-1}$.

Os estudos iniciaram em abril de 2018 e seguiram até março de 2019, com intervalo de medição de 15 dias, com pelo menos uma série de medições duas vezes por mês. Todas as amostras foram caracterizadas por análise elementar, cristalografia e suscetibilidade magnética.

Foi realizada uma avaliação do perfil radiométrico da praia durante 1 ano, duas vezes por mês, totalizando 24 coletas. Esta avaliação permitiu inferir o valor médio da radiação gama que está sujeito qualquer sistema biológico presente na areia.

3.1.1 FRACIONAMENTO GRANULOMÉTRICO

Todas as amostras foram coletadas e depositadas em frascos plásticos de 1,0 L e armazenadas em dessecador com sílica gel por 1 mês. Partículas maiores que $500 \mu\text{m}$ de origem orgânica (por exemplo, folha de detritos, pedaços de madeira, etc.) foram removidas usando uma peneira de malha de $500 \mu\text{m}$. Uma segunda fase de secagem da areia foi realizada por mais 1 mês em dessecador com sílica em gel, em seguida foi submetida a um processo de peneiramento fracionado, utilizando peneiras de $500, 425, 355, 300, 200$ e $100 \mu\text{m}$. Cada fração teve sua massa e radiação gama medidas por faixa de tamanho e os resultados foram correlacionados com a massa total.

3.1.2 SEPARAÇÃO MAGNÉTICA

Para uma posterior caracterização, um procedimento de separação da fração magnética da areia foi realizado em todas as 24 amostras com tamanhos de partículas entre 100 e $200 \mu\text{m}$. Segundo *Coutinho et al. (2020)*, a caracterização

granulométrica da areia monazítica mostra que a maior parte da atividade de radiação está associada a partículas menores que 200 μm . As amostras foram submetidas a um processo de separação magnética a seco utilizando um dispositivo semelhante ao descrito nos trabalhos de *Jin-Fang et al. (2017)* e *Lv et al. (2017)*. Aqui, foi aplicado um campo magnético fixo de 0,1 T e um sistema de vibração mecânico com frequência de 60 Hz, amplitude de 2 mm e tempo total de reciclagem de 30 min. Com este processo, a fração magnética com grande proporção de ferro (Fe), aqui chamada de Fração Preta (FP), foi separada dos demais componentes (de baixa suscetibilidade magnética), e esta segunda fração é aqui chamada de Fração Amarela (FA). A fração FP é predominantemente composta por ilmenita (FeTiO_3) e hematita (Fe_2O_3) e possui um valor de suscetibilidade magnética medido 40 vezes maior que os valores medidos na fração FA.

Um segundo processo de separação magnética foi realizado para remover os resíduos de ilmenita remanescentes das amostras da FA. Nesta segunda etapa, foi aplicado um campo de 0,2 T, com frequência de vibração de 60 Hz, amplitude de 2 mm, por um tempo de 30 min. Esta terceira fração de amostra é referida aqui como a Fração Amarela Refinada (FAR). A dose de radiação efetiva externa foi medida usando um detector de radiação Gamma Scout definido apenas para detecção de radiação gama.

3.1.3 SUSCEPTIBILIDADE MAGNÉTICA AC

As frações FP e FA foram avaliadas pela técnica de suscetibilidade magnética AC para certificar a qualidade da separação dos componentes com alta suscetibilidade magnética (ferromagnético, ferrimagnético e antiferromagnético) dos componentes com baixa suscetibilidade magnética (paramagnético e diamagnético). Com base nessas medições, uma segunda separação magnética foi necessária para remover todos os componentes ferromagnéticos residuais das amostras da FA, resultando em uma amostra de FAR livre de ilmenita e hematita. As medições foram realizadas usando um Susceptômetro Magnético AC equipado com Lock-in (Stanford Instruments, SR850) e um Nano-Voltímetro de bancada, HP, 3440 (*Orlando et al., 2019*). A frequência utilizada foi de 448 Hz e a intensidade do campo magnético (H) foi de $0,6 \text{ A m}^{-1}$. Medições de suscetibilidade magnética AC da massa das amostras foram realizadas em temperatura ambiente e calibradas

usando um composto paramagnético padrão $GdCl_3$ (Sigma-Aldrich) com 99,9% de pureza.

3.1.4 ANÁLISE ELEMENTAR POR EDXRF

A análise elementar foi realizada em um Espectrômetro Energy Dispersive X-ray Fluorescence (EDXRF), modelo EDX-720 (Shimadzu, Japão). As amostras da FA e FAR foram medidas usando um tubo de raios X de ródio de 15 a 50 kV, energia de 150 eV e 1000 mA (auto), com um tempo de integração de 500 s por canal (*Galvão et al., 2019*). O EDXRF está equipado com um detector de Si (Li). Carbono, nitrogênio e oxigênio não foram considerados no balanço de massa devido ao foco deste trabalho nos elementos de terras raras da praia de areia monazítica.

3.1.5 ANÁLISE POR DIFRAÇÃO DE RAIOS X

As frações FP e FA com granulometria entre 100 e 200 μm , provenientes da primeira separação magnética, foram moídas em moinho de bolas por 2 h, apresentando diâmetro médio final inferior a 57 μm , e este material foi submetido a difração de raios X. As medidas de difração foram realizadas em equipamento de difração de raios X (DRX) com configuração Bragg-Brentano, $0,5^\circ$ de slots de divergência e espalhamento de 0,15 mm em passos de $0,02^\circ$ (2θ). A radiação utilizada foi Molibdênio com filtro de Zircônio, e a calibração foi realizada com padrão de Si.

Uma análise preliminar dos padrões de raios X de todas as amostras foi realizada usando o software Fityk, versão 0.9.8.57 (*Wojdyr, 2010*). Esta primeira identificação das fases cristalográficas nas amostras FP e FA foi realizada usando o método Hanawalt (*Hanawalt et al., 1938; Hanawalt, 1976; Hanawalt, 1983*) usando o Open Crystallography Database (*Gražulis et al., 2012*), a base de dados ICSD (*ICSD, 2021*) e a base de dados PDF-2 (*ICCD, 2007*).

Para determinar a composição cristalográfica mais precisa do componente radioativo presente na areia, a amostra com maior atividade radioativa foi separada entre todas as amostras da FAR. Esta amostra é rotulada neste estudo como a Fração Amarela Refinada com Maior Nível de Radiação (FARMNR). Este procedimento visa investigar a composição da fase cristalina através do refinamento de Rietveld. O padrão de difração da FARMNR foi medido na mesma

máquina de DXR, mas a medição foi refinada usando o método de Rietveld. Materiais de referência padrão de Al_2O_3 e CeO_2 foram analisados nas mesmas condições experimentais para obter os parâmetros do instrumento. O programa GSAS (*Larson & Von Dreele, 2004*) com a interface EXPGUI (*Toby, 2001*) foi utilizado para o refinamento de Rietveld.

3.1.6 SIMULADOR FÍSICO DE RADIAÇÃO NATURAL

Um simulador físico de radiação natural (*Natural Radiation Physical Simulator - NRPS*), semelhante ao descrito por *Coutinho et al. (2020)*, foi construído para reproduzir a distribuição granulométrica média das 24 amostras de areia monazítica obtidas na praia de Meaípe.

Um espectrômetro gama com um detector HPGe-ORTEC GEM15200 associado a uma fonte de alta tensão ORTEC EG&G659, um amplificador ORTEC EG&G672, um analisador multicanal ORTEC Spectrum Master EG&G919 e um sistema de aquisição de dados maestro foram utilizados para avaliar a radiação da areia utilizada no NRPS. A calibração da atividade foi realizada usando um material de referência IAEA U-238, RGTh-232 e RGK-1. As taxas de dose de absorção de radiação gama no ar (em unidades de nGy h^{-1}) foram calculadas de acordo com a expressão (*UNSCEAR, 1996*),

$$D = [(0,462 A_U) + (0,604 A_{Th}) + (0,0417 A_K)]$$

onde A_U , A_{Th} , e A_K são as atividades de ^{238}U , ^{232}Th e ^{40}K (em Bq kg^{-1}), respectivamente. A atividade de um determinado radionuclídeo é obtida a partir de um pico de absorção total correspondente a uma determinada transição gama, por exemplo, obtida pelo software MAESTRO (*ORTEC, 2020*).

A estimativa de dose efetiva considerando a exposição à radioatividade desses materiais é dada pela expressão

$$E = D \cdot 0,7 \text{ Sv Gy}^{-1}$$

onde 0,7 é o fator de conversão de Gy para Sv para dose absorvida no ar.

O NRPS consiste basicamente em uma estufa microbiológica com duas bandejas dentro. Em cada bandeja há um recipiente retangular (bandeja) com dimensões $290 \times 220 \times 60$ mm ($L \times L \times A$) feito de aço inoxidável com 2 mm de espessura. As bandejas foram separadas 20 cm verticalmente. O fundo e a lateral da bandeja 02 (na bandeja 02) foram cobertos por uma placa de chumbo de

4,0 mm de espessura. Além do revestimento interno de chumbo da bandeja 02, as bandejas 01 e 02 foram separadas por uma placa de chumbo horizontal de 4 mm (Figura 19), blindando a emissão de radiação para a direção normal inferior à superfície da areia, de forma que a radiação emitida pela areia monazítica na bandeja 02, não atinja a bandeja 01 embaixo.

A areia misturada dentro da bandeja 02, lavada com hipoclorito de sódio, foi seca em dessecador por 96 h até a superfície da areia. A Bandeja 02 teve 25% de seu volume interno preenchido com uma mistura de areia simulando a composição média observada na superfície da areia de Meaípe. De acordo com um trabalho anterior de *Coutinho et al. (2020)*, o nível de radiação na praia de Meaípe variou de 0,7 a 27 $\mu\text{Sv h}^{-1}$. Para este estudo, o nível de radiação detectado nos pontos quentes, durante um experimento de 12 meses, variou de 8,5 a 20 $\mu\text{Sv h}^{-1}$, mas o valor médio integrado considerando o comprimento total da praia foi de $3,9 \pm 0,2 \mu\text{Sv h}^{-1}$. Portanto, na bandeja 02, foi colocada a areia apresentando esta intensidade de radiação.

O simulador NRPS foi construído para investigar os efeitos biológicos da radiação natural terrestre das areias monazíticas da praia de Meaípe nos modelos biológicos *E. coli*, *S. Aureus* e *Chlorella sp.*.

3.2 EFEITOS BIOLÓGICOS DA RADIAÇÃO GAMA EM BACTÉRIAS

Bactérias foram colocadas em placas de Petri, triplicas do Controle e Tratado. As placas Controle foram colocadas diretamente no aço inoxidável da bandeja 01 e as placas Tratado foram colocadas em cima da mistura de areia monazítica contida na bandeja 02 (Figura 19). Bandeja 01 e 02 foram colocadas em uma estufa microbiológica com temperatura controlada.

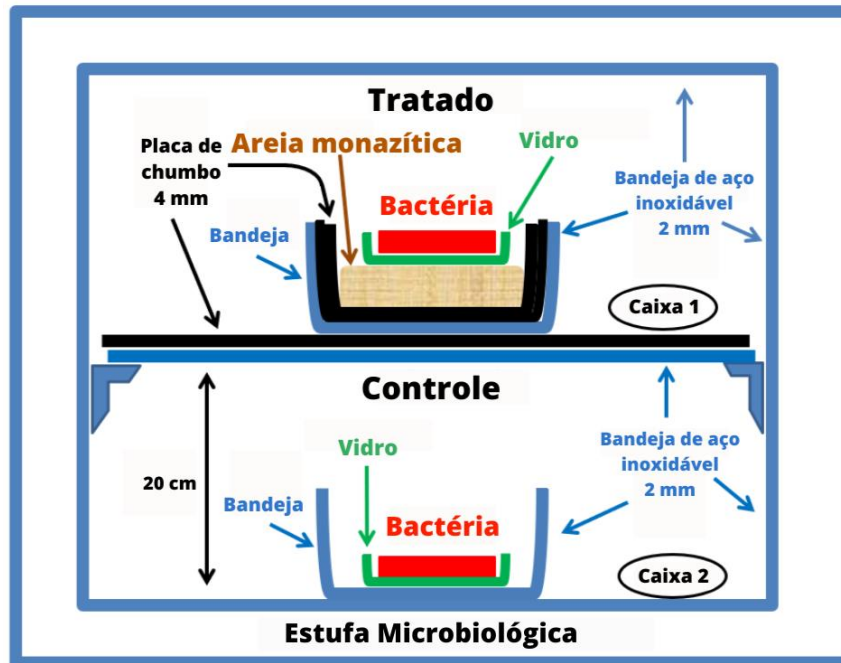


Figura 19 - Configuração do NRPS. Fonte: Produção do próprio autor.

O NRPS foi instalado em um laboratório na cidade de Vitória (Espírito Santo, Brasil), a 70 km de Meaípe. O experimento controle foi realizado em uma posição onde a radiação emitida pela areia era blindada. A radiação no fundo da estufa microbiológica foi de $0,25 \pm 0,05 \mu\text{Sv h}^{-1}$, apresentando o mesmo valor encontrado no laboratório antes da chegada da areia monazítica. Portanto, esse valor pode ser considerado como a radiação de fundo do laboratório. De qualquer forma, os dois experimentos foram submetidos à mesma intensidade de radiação de fundo.

O NRPS foi colocado na estufa microbiológica com amostras previamente cultivadas de *Escherichia coli* (*E. coli*) ATCC 8739 (gram-negativa) e *Staphylococcus aureus* (*S. aureus*) ATCC 25923 (gram-positiva) para avaliar o crescimento microbiano. Essas espécies são abundantes na microbiota humana e são frequentemente usadas como modelo de estudo (Pollard, 1961; Muela et al., 2000; Chen et al., 2010; Atsumi et al., 2014; Tessaro et al., 2015) e como bioindicadores em ambientes costeiros (Whitman e Nevers, 2003; Ishii et al., 2007; Stewart et al., 2008; Goodwin & Pobuda, 2009; Skalbeck et al., 2010; Plano et al., 2011; Mohammed et al., 2012; Brandão, 2019; Testolina et al., 2019).

As amostras de microrganismos (*E. coli* e *S. aureus*) equivalentes a 10^8 células (escala padrão 0,5 Mc Farland) foram previamente cultivadas em caldo

Mueller-Hilton (ágar $17,0 \text{ g L}^{-1}$, sólidos de infusão de carne bovina, $2,0 \text{ g L}^{-1}$, hidrolisado de caseína $17,5 \text{ g L}^{-1}$ e amido $1,5 \text{ g L}^{-1}$). O meio de cultura foi preparado a 21 g L^{-1} , Tampão PBS a $0,1 \text{ M}$ com $\text{pH} = 7,2$ e temperatura de $37 \text{ }^\circ\text{C}$. Aqui, foi considerado que o estoque inicial de bactérias era equivalente a 10^8 células. Alguma variação pode ocorrer por causa do erro absoluto do instrumento de medição (micropipeta), cerca de $0,2\%$ do total inicial de células de microrganismos.

O crescimento microbiano foi avaliado após 24 horas pelo método de densidade óptica. O modo de absorvância (OD 600 nm) foi usado para determinar a extensão da dispersão da luz. Os microrganismos em solução dispersam a luz, de modo que quanto mais bactérias estiverem presentes na solução, maior será a luz que espalham. Portanto, uma população replicante de bactérias aumenta a dispersão de luz e os valores de absorvância medidos (*Stevenson et al., 2016a, b; Haase et al., 2017; Krishnamurthi et al., 2021*). Este método é um dos métodos quantitativos mais adequados para este tipo de estudo (*Begot et al., 1996; López et al., 2004; Ziuzina, et al., 2015; Stevenson et al., 2016a, b; Soghomonyan et al., 2016; Avila et al., 2021*) e tem sido usado para avaliar o efeito de mudanças morfológicas e estruturais em microrganismos (*Golding et al., 2016; Gopinath et al., 2017; Ávila et al., 2021*).

A análise foi realizada usando um espectrofotômetro Usbio 2000 (Ocean Optics) no comprimento de onda de 600 nm. O controle negativo foi realizado com células bacterianas fixadas em glutaraldeído a $2,5\%$ para evitar a contribuição de células mortas na densidade óptica. Para avaliar o efeito da radiação gama na morfologia externa dos microrganismos, as amostras foram submetidas a microscopia eletrônica de varredura. As amostras foram fixadas em solução de Karnovisk, pós-fixadas com tetróxido de ósmio a 1% e desidratadas em gradiente crescente de etanol. A secagem foi realizada em ponto crítico (Autosandri-815, Tousimis) e banho de ouro (10 nm) realizado em um metalizador (Desk V, Denton Vácuo). As amostras foram visualizadas em microscopia eletrônica de varredura modelo JEM6610 LV (Jeol) com filamento de tungstênio, operando a 20 kV .

3.3 EFEITOS BIOLÓGICOS DA RADIAÇÃO GAMA EM MICROALGAS

Para mais uma avaliação do efeito da radioatividade da areia da praia de Meaípe, foram utilizadas amostras da microalga *Chlorella sp.* como modelo de estudo. A microalga *Chlorella sp.* (L06) foi fornecida pelo Laboratório de Caracterização Física, Química e Microbiológica (LACAR - Espírito Santo, Brasil) e isolada como descrito por (Pereira *et al.*, 2020). Os experimentos de crescimento com exposição à areia monazítica foram realizados utilizando frascos de agitação do tipo Erlenmeyer com volume de 500 mL e contendo 225 mL de meio BG-11 e 25 mL de inóculo de *Chlorella sp.* (L06).

A composição do meio BG-11 em g L^{-1} é: NaNO_3 (1,5), K_2HPO_4 (0,04), $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ (0,075), $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (0,036), ácido cítrico (0,006), citrato férrico amoniacal (0,006), Na_2CO_3 (0,01). A essa composição foi adicionada solução traço (mg L^{-1}) de composição: H_3BO_3 (2,86), $\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ (1,81), $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ (0,222), $\text{Na}_2\text{MoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (0,39), $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ (0,079), $\text{Co}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (0,049).

Para expor as amostras a radiação da areia da Praia de Meaípe foi utilizado o simulador de radiação (NRPS). Como controle, foi utilizado o mesmo dispositivo, mas contendo areia de praia não monazítica e com taxa de dose de $0,0 \pm 0,2 \mu\text{Sv h}^{-1}$. Detalhes podem ser observados na Figura 20 e Figura 21.

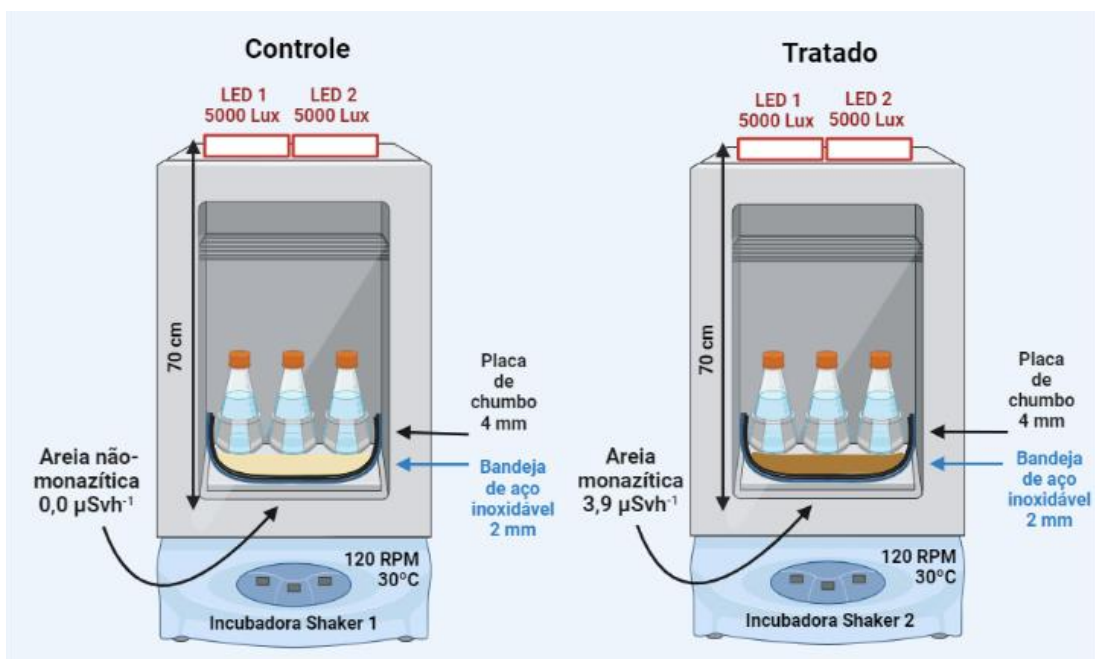


Figura 20 - Configuração em forma de esquema das amostras no simulador NRPS dentro da incubadora Shaker. Fonte: Produção do próprio autor.

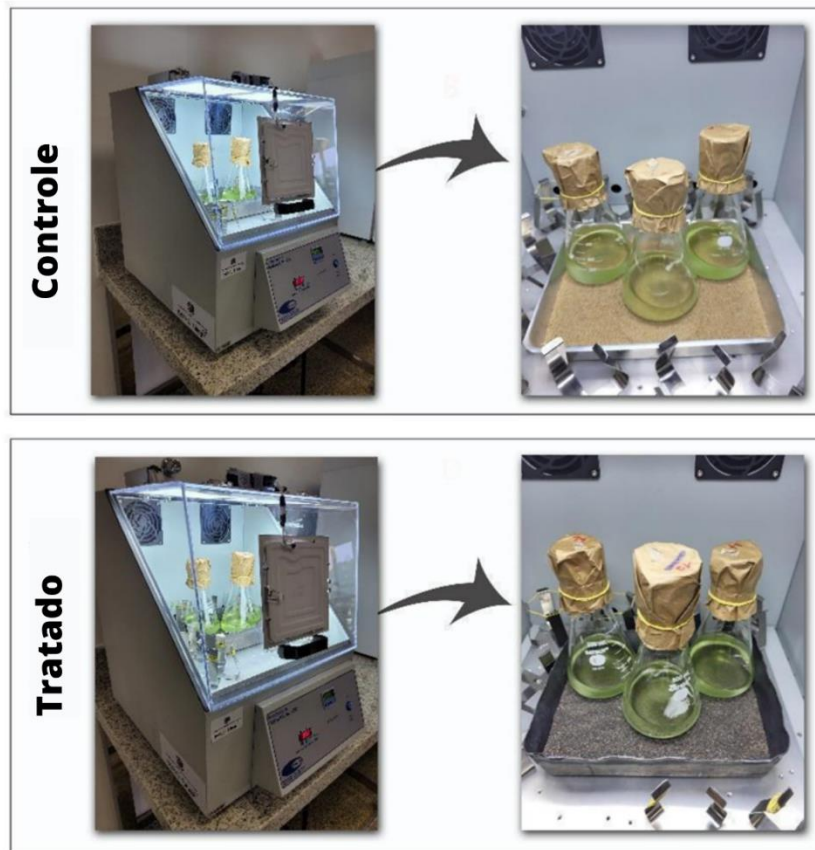


Figura 21 - Configuração das amostras no simulador NRPS dentro da incubadora Shaker. Fonte: Produção do próprio autor.

Cada Erlenmeyer foi disposto na superfície do simulador e o conjunto acondicionado em uma incubadora Shaker SL-222 (Solab, Brasil) a 30 °C sob fotoperíodo (LED 5000 lux) de 12 horas luz/escuro por meio de 3 LED's 18 W 6500 K (Blumenau Iluminação, Brasil) durante 240 horas (10 dias), sob agitação orbital de 120 RPM. A dose acumulada de radiação para o tratamento foi calculada de acordo com a Norma-CNEN (*Norma-CNEN, NN, 3.01, Res. 164/14, 2014*) e correspondeu a 0,94 mSv.

O crescimento da biomassa foi monitorado diariamente aliquotando 2 mL de cultura de cada Erlenmeyer e analisando por densidade óptica a 680 nm em um espectrofotômetro DR 5000 (Hach Company, Loveland, United States). Os valores de densidade óptica foram convertidos em biomassa seca através de uma curva padrão previamente construída (*Li, 2021; Andersen, 2005*), conforme pode ser visualizada na Figura 22.

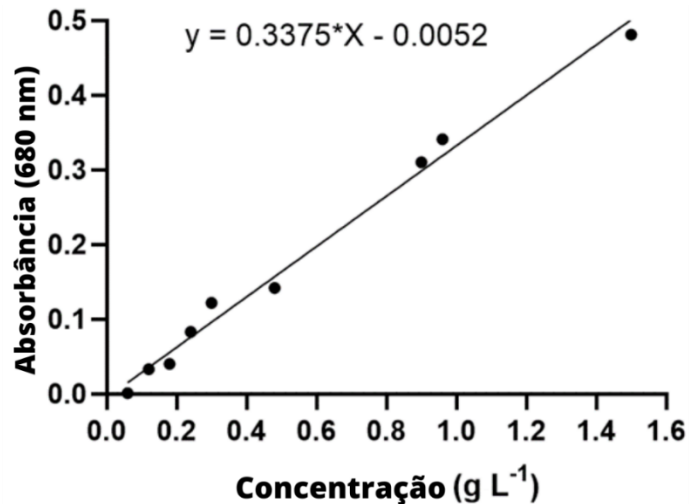


Figura 22 - Curva padrão para converter os valores de densidade óptica em biomassa seca. Fonte: Produção do próprio autor.

Ao final de 240 horas (10 dias) de cultivo, o conteúdo de cada Erlenmeyer foi centrifugado a 8000 x g por 10 minutos em uma centrífuga Z 36 HK (Hermle, Gosheim, Germany), uma alíquota de biomassa foi separada para fixação e o restante seco à 30 °C em estufa, e posteriormente, acondicionada à 4 °C para demais análises físico-químicas.

As amostras de microalgas foram fixadas em solução de glutaraldeído 2,5% e formaldeído 2% tamponado com cacodilato 0,1 mol L⁻¹ por 24 horas. Após a fixação, as amostras foram dispostas em solução de ferrocianeto de potássio 1,25% e tetróxido de ósmio 1,0% por uma hora à temperatura ambiente. Após a pós-fixação, as amostras foram desidratadas em gradiente crescente de etanol (0, 30, 50, 70, 90 e 100%) por 30 minutos em cada banho e dispostas para secagem em ponto crítico. A metalização foi realizada com alvo de ouro a 20 nm e imagens foram adquiridas utilizando um Microscópio Eletrônico de Varredura JSM6610LV (Jeol, Tokyo, Japan). Espectros de EDS foram coletados a partir do detector XFlash® Detector 6/10 (Bruker, Billerica, United States).

A composição elementar foi realizada com 3 mg da amostra seca em um Analisador Elementar CHNS Flash Smart (Thermo Scientific, Waltham, United States) em atmosfera inerte de hélio e utilizando como padrão de calibração BBOT fornecido pelo fabricante.

O teor de carboidratos totais foi realizado pelo método Fenol-Ácido Sulfúrico como descrito por Dubois (1956) e utilizando glicose para construção da curva de calibração.

O teor de lipídios totais foi realizado como descrito por (Bligh EG & Dyer WJ, 1959; Nelson & Freeman, 1959), com algumas modificações. Resumidamente, 50 mg de amostras da biomassa foram incubadas em uma solução de clorofórmio/metanol (2:1) durante 15 minutos a 60 °C e posteriormente filtrados em filtros Whatman 541. Em seguida, foi adicionada água destilada e as amostras agitadas por 5 minutos. Por fim, o material foi centrifugado 4000 x g por 10 minutos, a fase superior de água-metanol descartada e a inferior disposta em microplacas de vidro previamente pesadas. O material foi evaporado a 60 °C e o teor de lipídios calculado em relação à biomassa seca.

O teor de proteínas totais foi obtido através do cálculo utilizando o fator de conversão de 6,25 do teor de nitrogênio detectado na Análise Elementar CHNS (Niccolai, 2019; Schüller, 2020).

Por fim, a atividade antioxidante total foi determinada pelo método de captura do DPPH, sendo este um dos métodos mais utilizados para determinar a capacidade antioxidante. (Alves, 2010; Nakkala, 2015; Prabha, 2011). Este método é baseado na medição espectrofotométrica da diminuição da absorbância do radical DPPH após o início da reação.

As suspensões de microalgas foram colhidas, lavadas duas vezes e ressuspensas em água ultrapura (Mega Purity, 18.2 MΩcm) para obter uma concentração final de cerca de 10^6 células mL⁻¹. A autofluorescência foi medida utilizando um espectrofluorímetro da Ocean Optics (UBS 2000) com excitação em 488 nm e a emissão coletada em 680 nm. Todos os experimentos foram realizados em triplicata.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 SIMULADOR FÍSICO DE RADIAÇÃO NATURAL

4.1.1 ANÁLISE DO PERFIL RADIOMÉTRICO

A avaliação do perfil radiométrico da Praia de Meaípe durante 1 ano, com medições duas vezes por mês, que totalizou 24 coletas, permitiu inferir o valor médio da radiação gama que está sujeito qualquer sistema biológico presente na areia. A Figura 23 ilustra a variação do perfil radiométrico de algumas amostragens.

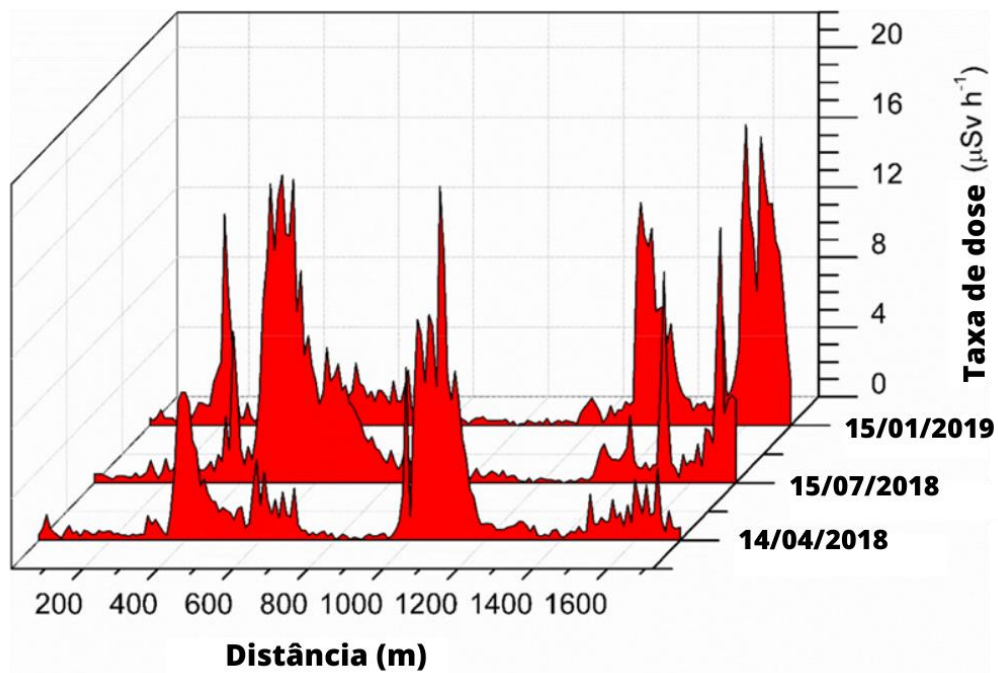


Figura 23 - Perfis de dose de radiação em função da distância do ponto inicial de amostragem, localizado no ponto mais a leste da praia de Meaípe, conforme marcado na Figura 18 deste trabalho. O gráfico mostra as medições que foram feitas a cada 10 m usando um tempo de integração de 10 s em cada ponto. Fonte: Produção do próprio autor.

A dose de radiação detectada nos pontos quentes, durante 12 meses de experimento, variou de $8,5 \mu\text{Sv h}^{-1}$ a $20 \mu\text{Sv h}^{-1}$, mas o valor médio integrado considerando a extensão total da praia foi de $4 \pm 1 \mu\text{Sv h}^{-1}$.

4.1.2 CARACTERIZAÇÃO POR FRACIONAMENTO GRANULOMÉTRICO

Quase metade da fração de massa das amostras de areia é composta por partículas com diâmetro entre 100 e 200 μm , e os níveis de radiação dessa fração são aproximadamente 60% maiores do que a radiação medida na fração com o segundo mais alto nível de radiação (200 a 300 μm), conforme mostrado na Figura 24.

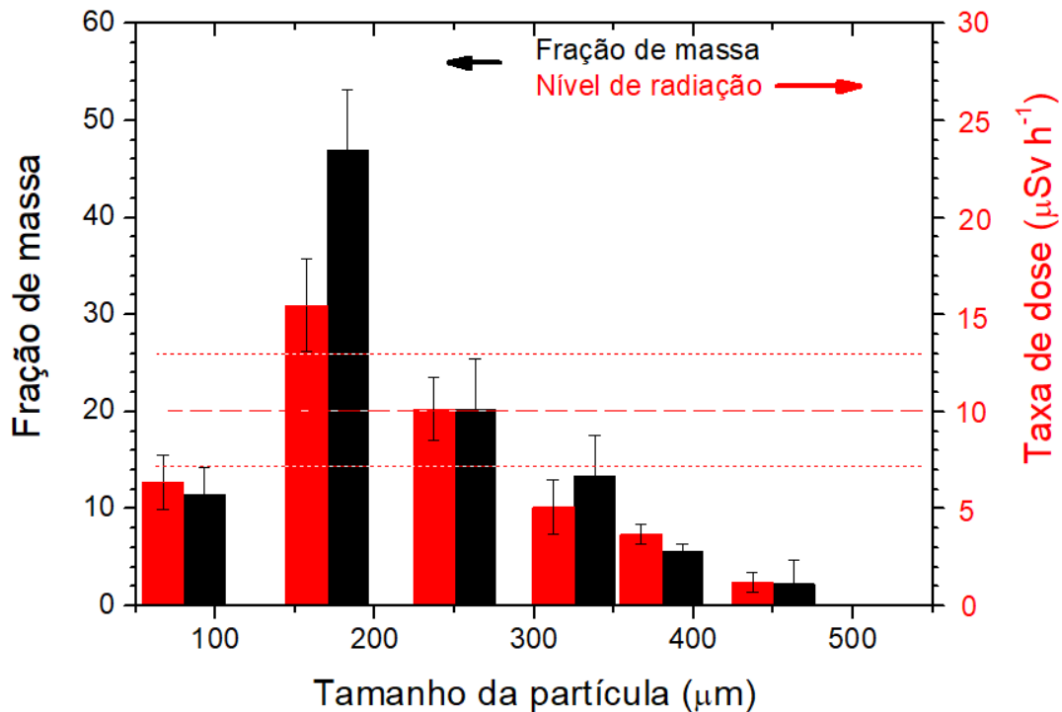


Figura 24 - Frequência média da distribuição do tamanho das partículas das amostras da areia monazítica. As barras verticais vermelhas indicam a taxa de dose associada à fração de massa da areia, e as barras verticais pretas indicam a fração de massa. As linhas verticais pretas são os desvios padrões. As linhas horizontais vermelhas tracejadas e pontilhadas indicam, respectivamente, a média ponderada para a dose efetiva externa e seu desvio padrão. Fonte: Produção do próprio autor.

Os níveis de radiação natural das amostras deste trabalho são mais altos do que a dose efetiva externa anual em $\mu\text{Sv h}^{-1}$ relatados por outros estudos sobre radiação natural de areias de praia e sedimentos marinhos, como os relatados na Baía de Bengala na Índia (*Ravisankar et al., 2015*), em duas praias da Ilha de Langkawi na Malásia (*Khandaker et al., 2018*) e no litoral da Província de Guangxi na China (*Liu e Lin, 2018*).

Os resultados da Figura 24 mostram uma média ponderada para a dose efetiva externa de $10 \pm 3 \mu\text{Sv h}^{-1}$, que corrobora com o valor $7 \pm 1 \mu\text{Sv h}^{-1}$ publicado por *Silveira et al. (2016)* para areias na mesma região do Brasil. É importante ressaltar que grãos de areia maiores tendem a ficar nas regiões mais profundas do solo, enquanto as partículas menores tendem a permanecer na região mais superficial do solo.

Portanto, os resultados sugerem uma maior disponibilidade de radiação natural na porção mais alta da praia de areia monazítica.

Uma vez que amostras de areia com maiores doses de radiação gama estão associadas à fração granulométrica entre 100 e 200 μm (Figura 24), esta fração amostral foi submetida à separação magnética, resultando em uma fração com 14% em massa de amostras de Fração Amarela (FA) e outra com 86% em massa de amostras de Fração Preta (FP).

4.1.3 ANÁLISE ELEMENTAR POR EDXRF

A análise elementar das amostras de FA (entre 100 e 200 μm e maiores teores de radiação) mostrou uma composição majoritária de Si (31%), seguido por Zr, Ba, P e Al variando de 8 a 16% (Tabela 1). Estas espécies representam mais de 80% em peso das amostras. Um terceiro grupo composto por Ce, Nd, Ti, Fe e Th representa aproximadamente 18% da massa total. Finalmente, Hf, Ca e Y representam aproximadamente 1% em peso, com traços de U ($p < 0,05\%$). A estatística descritiva é encontrada na Tabela 1.

Tabela 1 - Estatísticas médias das 24 amostras da FA obtidas usando EDXRF (% em peso). SD representa o desvio padrão. Fonte: Produção do próprio autor.

Elemento	Média \pm DP	Mínimo	Máximo
Silício (Si)	31 \pm 20	9.7	81.1
Zircônio (Zr)	16 \pm 8	1.6	32.2
Bário (Ba)	15 \pm 10	0.86	38.8
Fósforo (P)	10 \pm 6	0.89	19.9
Alumínio (Al)	8 \pm 2	7.5	14.5
Cério (Ce)	7 \pm 6	0.92	21.2
Neodímio (Nd)	5 \pm 5	1.1	17.6
Titânio (Ti)	4 \pm 3	0.32	10.3
Ferro (Fe)	1.3 \pm 0.6	0.86	2.9
Tório (Th)	1.5 \pm 0.8	0.12	3.1
Háfio (Hf)	0.5 \pm 0.2	0.18	1.0
Cálcio (Ca)	0.4 \pm 0.1	0.32	0.88
Ítrio (Y)	0.3 \pm 0.1	0.03	0.59
Urânio (U)	0.04 \pm 0.01	0.02	0.06

Níveis mais altos de Si sugerem areias do grupo da sílica (SiO_2) como a espécie dominante não separada da fração magnética, enquanto níveis mais altos de

Zr e Ba sugerem uma presença significativa de zircão ($ZrSiO_4$) ou baddeleyita (ZrO_2) e barita ($BaSO_4$), ou alguns outros minerais do grupo pirocloro rico em Ba, como sugerido por *Antoniassi et al. (2020)*. Ferro e titânio representam cerca de 6% da massa total e estão associados a resíduos de ilmenitas presentes na FA após a primeira separação magnética. O grupo LREE (*Light Rare Earth Element*) composto por Ce, Nd e Y representa 12% da FA da areia da praia de Meáipe, provavelmente associado ao grupo do mineral monazita. Tório (Th) representa em média 1,1% da composição da fração amarela da areia.

Os maiores valores do desvio padrão dos elementos das amostras (Tabela 1), especialmente dos componentes da monazita (como P, Ce, Nd, Th e Y) mostram que as amostras coletadas durante os 12 meses não têm uma composição homogênea, pois sofrem alterações espaciais, provavelmente associadas aos fluxos hidrogeológicos da praia. Fotografias tiradas em horários aleatórios mostram um movimento da faixa de areia monazítica (visível pela cor escura da ilmenita) ao longo de todo o litoral da praia (Figura 25). Portanto, a heterogeneidade espacial e temporal das areias da praia desqualifica estudos de suas características físico-químicas de amostras coletadas em um único local.



Figura 25 - Fotografias, tiradas em datas diferentes, da praia de areia monazítica. A areia monazítica pode ser vista como manchas escuras destacadas por linhas tracejadas em vermelho. Fonte: Produção do próprio autor.

4.1.4 ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS

Para entender as inter-relações entre os elementos químicos que compõem a praia de areia monazítica, uma Análise de Componentes Principais (ACP) foi realizada. A ACP (Figura 26) mostra o primeiro e segundo componente principal (componente principal 1 - CP1; componente principal 2 - CP2) que juntos explicam cerca de 70% da variância dos dados. O CP1 explica cerca de 41% da variância e mostra algumas variáveis com cargas positivas (Ce, Nd, Ca, P, Ba, Hf, Zr, U e radiação) e outras com cargas negativas (Si, Ti e Fe). É importante notar que os elementos com cargas positivas possuem distâncias euclidianas semelhantes, o que sugere que os agrupamentos Ce, Nd, Ca, Th, Y, Zr, Hf e Ba, apresentam forte correlação entre si. O CP2 explica mais de 29% da variância dos dados e mostra os elementos Ce, Nd, Ca, Th, Y e Si com cargas positivas, enquanto Ti, Fe, U, Zr, Hf e Ba têm cargas negativas. Em CP1, a associação entre o agrupamento (Ce, Nd, Th, Y, U,

P) e radiação ($\mu\text{Sv h}^{-1}$) indica que CP1 está fortemente associado a algum elemento leve de terras raras (Light Rare Earth Element - LREE) fosfato (LREE[PO₄]), como a monazita. Não obstante, o CP2 apresenta três agrupamentos distintos provavelmente formados por minerais como a monazita (Ce, Nd, Ca, Th e Y), zircônia (Zr, Hf e Ba) e ilmenita (Fe e Ti). De fato, as areias das praias são depósitos naturais de monazita (Ventura et al., 1996; Clavier et al., 2011). Monazita-(Ce) exibe características em que LREE pode ser substituído por actinídeos como Th e U. Além disso, tais substituições podem levar a uma fase intermediária de queralita, (Ce, Th, Ca)[PO₄] (Popa et al., 2008, 2016), o que justificaria o agrupamento associado ao CP1.

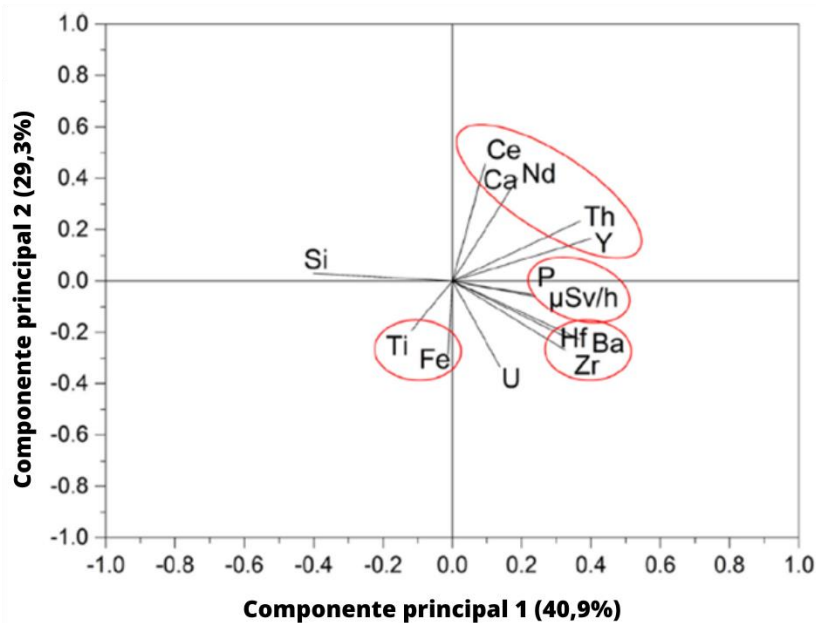


Figura 26 - Análise de componentes principais da composição elemental das amostras da FA medidas por EDXRF. Fonte: Produção do próprio autor.

A Figura 26 mostra um grupo distinto de LREE que consiste de Ce, Nd, Ca, Th e Y, além de Ca, sugerindo como fase dominante algum grupo monazita rico em Ca, como a queralita [Ca,Th(PO₄)₂] ou uma solução sólida de queralita-monazita-(Ce) associada [(Ca, Ce, Th)(P, Si)O₄] (Santos et al., 2018; Linthout, 2007). A ACP também revelou uma forte correlação entre Y e Th. De acordo com Tropper et al. (2011), ortofosfatos de ETR podem controlar a distribuição de Y e Th na cristalização de granitóides, o que justifica a forte correlação entre esses dois elementos.

Conforme mostrado na Tabela 1 (resultados de EDXRF), o silício é o principal elemento associado ao quartzo nas amostras. No entanto, a ACP mostra uma correlação inversa entre Si e P (Figura 26), resultado consistente com outros estudos

com areias monazíticas. Um resultado similar foi encontrado por *Ventura et al. (1996)* em um estudo sobre amostras de monazita-(Ce) por elétron retro-espalhado (*Back-Scattered Eletron - BSE*), em que os resultados mostraram substituições significativas de Si^{4+} por P^{5+} em determinados locais do grão de monazita, resultando haver uma correlação inversa entre SiO_2 e P_2O_5 .

A ACP também revelou uma forte correlação entre Zr, Ba e Hf. De acordo com *Dill et al. (2012)*, em sedimentos ribeirinhos, zircão e barita podem estar associados, o que justifica a forte correlação dessas espécies. Por fim, a ACP mostra a correlação entre Ti e Fe, sugerindo a ilmenita como o mineral predominante à base de Ti na areia da praia de Meaípe, explicando sua cor escura. Os depósitos de zircão são frequentemente associados a minerais contendo titânio, como ilmenita (FeTiO_3) e rutilo (TiO_2) (*Luz & Lins, 2008*). A Figura 26 também sugere que a ilmenita e U podem influenciar a ocorrência de queralita na areia da praia, onde quanto maior a concentração de ilmenita e U, menor a concentração do material rico em Ca do grupo monazita. Resultados semelhantes são relatados no trabalho de *Silveira et al. (2016)*, em que minerais magnéticos como ilmenita estão associados a baixos teores de minerais de LREE nos sedimentos de praias do sudeste do Brasil. Além disso, *Tari et al. (2013)* usando análise de clusters hierárquica relatou séries de radionuclídeos de U e Th separados como diferentes clusters, provavelmente explicado por sua existência como diferentes tipos de rochas.

4.1.5 SUSCETIBILIDADE MAGNÉTICA DE MASSA AC

As amostras foram peneiradas e submetidas a separação magnética. Como resultado obtivemos uma fração rica em Ilmenita (Fração Preta) e outra pobre em ilmenita (Fração Amarela). A suscetibilidade magnética massiva AC média das amostras da Fração Preta (FP) foi $X_{\text{massa}}^{\text{ac}} = (1,3 \pm 0,9) \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$. As amostras da Fração Amarela (FA) mostraram um valor médio de $X_{\text{massa}}^{\text{ac}} = (2,5 \pm 0,7) \cdot 10^{-7} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$, mostrando que são compostos paramagnéticos fracos com a presença de resíduos de ilmenita.

Utilizando a susceptibilidade magnética massiva AC foi possível, através de separação magnética, verificar a qualidade do conteúdo de material não magnético presente nas amostras. Denominamos essa amostra refinada como Fração Amarela Refinada (FAR). As amostras FAR apresentaram um menor valor médio de

susceptibilidade magnética, com massa $X_{\text{massa}}^{\text{ac}} = (1,2 \pm 0,3) \cdot 10^{-7} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ indicando que esta amostra teve todo seu conteúdo de ilmenita removido. A medida da susceptibilidade magnética de massa AC foi uma importante ferramenta para qualificar a amostra da Fração Amarela Refinada com Maior Nível de Radiação (FARMNR) ($X_{\text{massa}}^{\text{ac}} = (1,1 \pm 0,1) \cdot 10^{-7} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$) como isenta da fase cristalográfica ilmenita, que foi confirmado no refinamento de Rietveld do padrão de raios X. Esta isenção foi fundamental para fornecer um ajuste de boa qualidade nos padrões de difração das amostras FARMNR via método de Rietveld, uma vez que o componente ilmenita tem forte espalhamento de raios X, causando perda de nitidez dos demais componentes cristalográficos presentes na amostra. Amostras de FA tiveram essa perda de nitidez, proporcionando um refinamento de Rietveld de qualidade inferior em comparação com as amostras FARMNR.

A análise elementar das amostras da FAR da segunda separação magnética mostrou que a fração não magnética contém predominantemente espécies relacionadas a zirconita e monazita, contendo maiores concentrações de Zr e Si, e enriquecimento das concentrações de P, Ce, Nd, Th e Y (Tabela 2), provavelmente associado ao grupo monazita.

Tabela 2 - EDXRF médio (% em peso) das 24 amostras da FAR. SD representa o desvio padrão. Fonte: Produção do próprio autor.

Elemento	Média ± DP
Zircônio (Zr)	22 ± 9
Fósforo (P)	18 ± 9
Bário (Ba)	18 ± 10
Cério (Ce)	16 ± 13
Neodímio (Nd)	12 ± 8
Silício (Si)	9 ± 6
Tório (Th)	3 ± 2
Háfnio (Hf)	0.8 ± 0.3
Cálcio (Ca)	0.6 ± 0.3
Ítrio (Y)	0.6 ± 0.3

4.1.6 DIFRAÇÃO DE RAIOS-X

A análise de Rietveld da amostra FARMNR com tamanho de grão entre 100 e 200 μm apresentaram fases cristalográficas bem definidas (Figura 27). Um melhor refinamento de Rietveld foi obtido para a amostra FARMNR $\text{Chi}^2 = 5,9$, $\text{RF}^2 = 0,1885$.

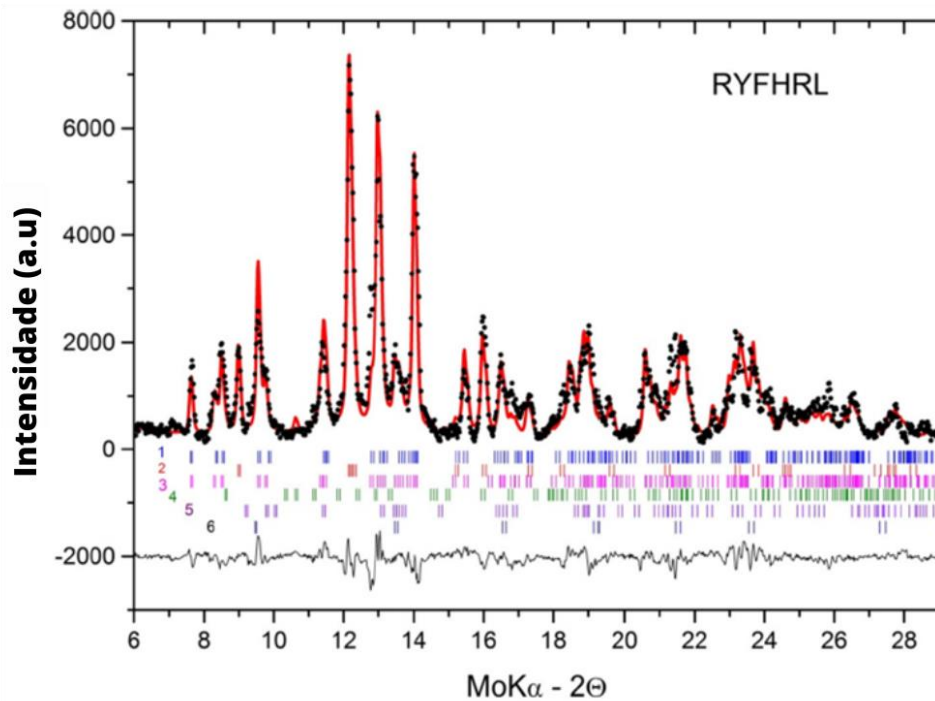


Figura 27 - Refinamento de Rietveld da FARMNR. Espectro recebido na radiação do molibdênio. Legenda: 1- queralita $(\text{Ce, Nd, Ca, Th})\text{PO}_4$; 2- $\text{Zr}(\text{SiO}_4)$; 3- $\text{Ce}(\text{PO}_4)$; 4- BaSiP_2O_8 ; 5- $\text{Ba}_3\text{Y}_2\text{O}_5(\text{CO}_3)$; e 6- $\text{Ba}_8\text{Zr}_6\text{YO}_{16}$. Fonte: Produção do próprio autor.

Os resultados da suscetibilidade magnética de massa AC nas amostras da FA indicaram a presença de resíduos com forte sinal magnético, como ilmenita. Este resultado foi crítico na decisão pela segunda separação magnética (amostras FAR) uma vez que a ilmenita é uma fase cristalina que apresenta forte espalhamento de raios X. A presença dessa fase cristalina reduz a relação sinal-ruído, reduzindo a sensibilidade das medidas de difração de raios X associadas com as demais fases, o que compromete a qualidade do refinamento de múltiplas fases pelo método de Rietveld dos padrões de difração das amostras. Tal procedimento de remover a ilmenita melhorou consideravelmente a qualidade do padrão de difração e a identificação de fases cristalinas, como a queralita modificada proposta neste trabalho. Além disso, os resultados sugerem a queralita modificada $(\text{Ce, Nd, Ca, Th})\text{PO}_4$ como a principal fonte de radiação gama natural emitida pela areia da praia.

Entre as fases cristalográficas que se ajustaram aos padrões de difração, foi encontrada a queralita modificada, com a presença de Nd, Ce, Th, Y, Ca, P e O em sua composição (Tabela 3). Isso corrobora com o conjunto identificado na ACP (Figura 26), que identificou uma forte correlação positiva entre os elementos Ce, Nd, Th, Y, U, P e radiação gama, sugerindo queralita “modificada” $(\text{Ce, Nd, Ca,Th})\text{PO}_4$ como a principal fonte de radiação natural na areia da praia de Meaípe.

Tabela 3 - Fases cristalográficas presentes nas amostras da FARMNR. SD representa o desvio padrão. Fonte: Produção do próprio autor.

Número da fase	Fase Cristalográfica	Fração do Volume \pm DP
1	$(\text{Ce, Nd, Ca, Th,Y})\text{PO}_4$	30 ± 3
2	Zr(SiO ₄)_ICSD_9582	27 ± 2
3	Ce(PO ₄)_ICSD_79746	37 ± 4
4	BaSiP ₂ O ₈ _ICSD_256231	3 ± 2
5	Ba ₃ Y ₂ O ₅ (CO ₃)_ICSD_267190	0.8 ± 0.6
6	Ba ₈ Zr ₆ YO ₁₆ _ICSD_187800	2.2 ± 0.3

No refinamento de Rietveld, a posição do átomo de lantânio (La) da queralita, proposta na obra de *Finney & Rao (1967)*, é substituído por neodímio (Nd). Além disso, Y foi introduzido na posição ($x = 0,021980$, $y = 0,15960$, $z = 0,39910$) na célula cristalina unitária, onde os átomos originais de Ce, Nd, Th e Ca estão localizados. Todos os fatores de ocupação dos átomos (Ce, Nd, Th, Ca e Y) neste sítio foram refinados.

A presença de silicato de zircônio (ZrSiO₄ - ICSD 9582), descrito por *Finger (1974)*, foi confirmada durante ajustes com parâmetros de rede $a = b = 0,6620273$ nm e $c = 0,6006375$ nm. A monazita-Ce [Ce(PO₄) - ICSD 79746] conforme proposto por *Ni et al. (1995)* foi identificado e quantificado. No entanto, esta fase também foi encontrada na porção magnética da FP da areia. Os outros compostos ricos em Ba (carbonato, fosfato e óxido): BaSiP₂O₈ - ICSD 256231 (*Han et al., 2018*), Ba₃Y₂O₅(CO₃) - ICSD 267190 (*Deakin et al., 2018*) e Ba₈Zr₆YO₁₆ – ICSD 187800 (*Han et al., 2013*) parecem ser minerais acessórios ligados aos minerais queralita e monazita-(Ce).

4.2 EFEITOS BIOLÓGICOS DA RADIAÇÃO GAMA EM BACTÉRIAS

4.2.1 CRESCIMENTO CELULAR E MICROSCOPIA ELETRÔNICA

Os resultados simulados no NRPS mostraram uma redução no crescimento microbiano após 24 horas de exposição a uma taxa de dose de $3,9 \pm 0,2 \mu\text{Sv h}^{-1}$ ($p < 0,001$), com redução de 23,8% para *E. coli*, e 18,4% para *S. aureus* ($p < 0,01$).

Imagens de microscopia eletrônica mostraram alterações morfológicas em ambos os tipos de microrganismos, em comparação com o experimento controle, incluindo destruição parcial dos microrganismos em fragmentos celulares, ruptura da parede celular com lise de membranas e exposição do conteúdo citoplasmático (Figura 28).

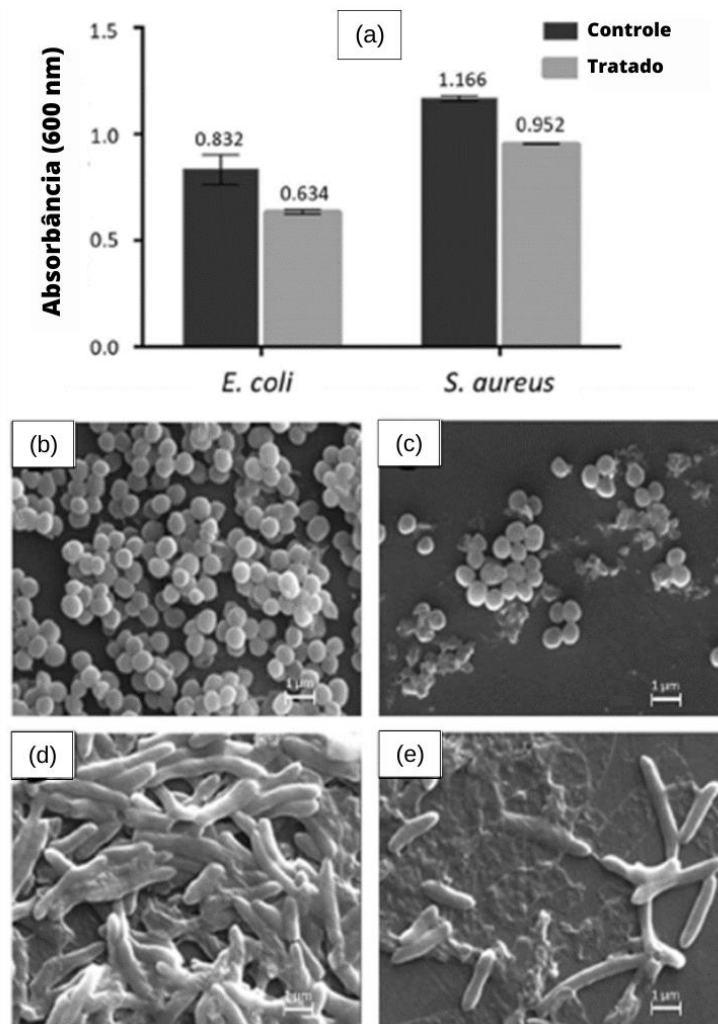


Figura 28 - (a) Crescimento microbiano de *E. coli* e *S. aureus* após 24 horas de exposição à radiação gama da areia monazítica. Os valores representam o limite superior da absorbância de cada amostra. Microscopia eletrônica digitalizada mostrando células bacterianas de: (b) Amostra Controle de *S. aureus*; (c) Amostra Tratado de *S. aureus* após exposição à radiação; (d) Amostra Controle de *E. coli*; e (e) Amostra Tratado de *E. coli* após exposição à radiação. Fonte: Produção do próprio autor.

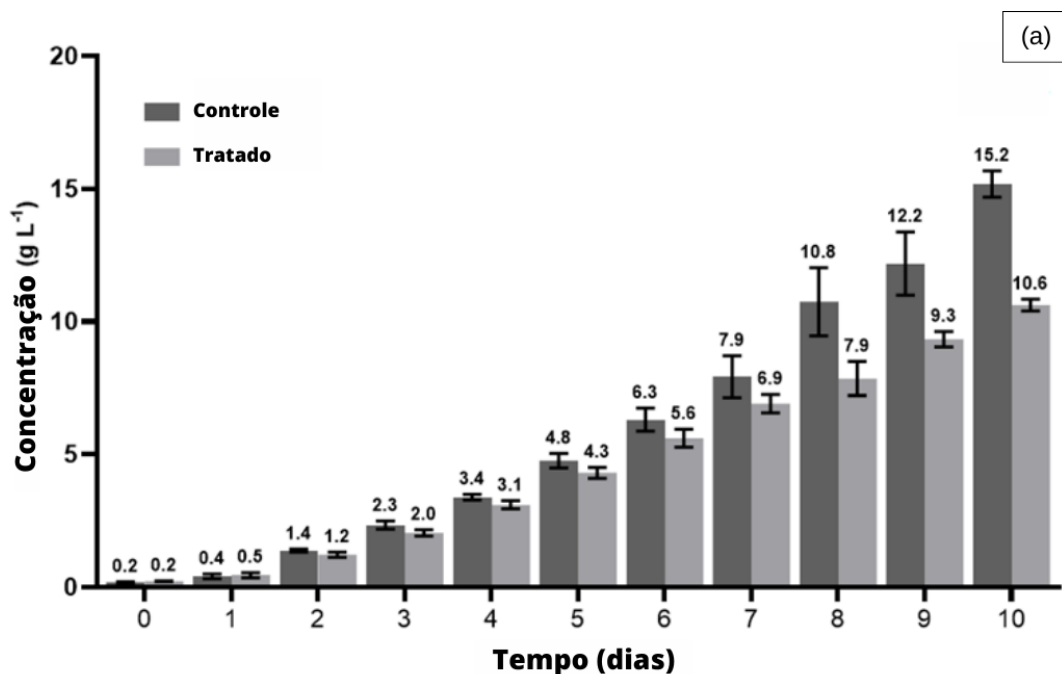
Essas mudanças indicam possíveis mecanismos responsáveis pelo controle de microrganismos nas praias de areia monazítica como Meaípe. *Soghomonyan et al. (2017)* demonstraram que as taxas específicas de crescimento de *P. aeruginosa* e *E. coli* foram reduzidos usando uma taxa de dose de $3,8 \mu\text{Sv h}^{-1}$ de radiação gama de fonte radioativa de ^{137}Cs . Em outro estudo, *Bolsunovsky et al. (2016)* demonstraram crescimento microbiano reduzido de *E. coli* e *S. Typhimurium* submetendo tais microrganismos a taxas dose de $67,8 \mu\text{Sv h}^{-1}$, $3,2 \mu\text{Sv h}^{-1}$, e $0,6 \mu\text{Sv h}^{-1}$.

Diante dos resultados, pode-se inferir que a natureza da radiação da praia de Meaípe pode atuar na redução e controle do crescimento de espécies de microrganismos patogênicos como *E. coli* e *S. aureus*, que causam doenças infecciosas e são resistentes a vários antibióticos (*Efstratiou, 2019*).

4.3 EFEITOS BIOLÓGICOS DA RADIAÇÃO GAMA EM MICROALGAS

4.3.1 CURVA DE CRESCIMENTO E TEMPO DE GERAÇÃO

As amostras apresentaram uma fase de aclimação (fase LAG) de cerca de 1 dia (Figura 29b), indicando que a radiação não provocou alteração da fase LAG. A fase LAG tanto do Controle quanto do Tratado foram pouco atenuados devido aos inóculos terem sido obtidos de uma cultura em fase exponencial de crescimento e em condições de cultivo idênticas. Isto possibilitou a baixa taxa de crescimento neste período e a intensa atividade metabólica para adaptação ao novo ambiente.



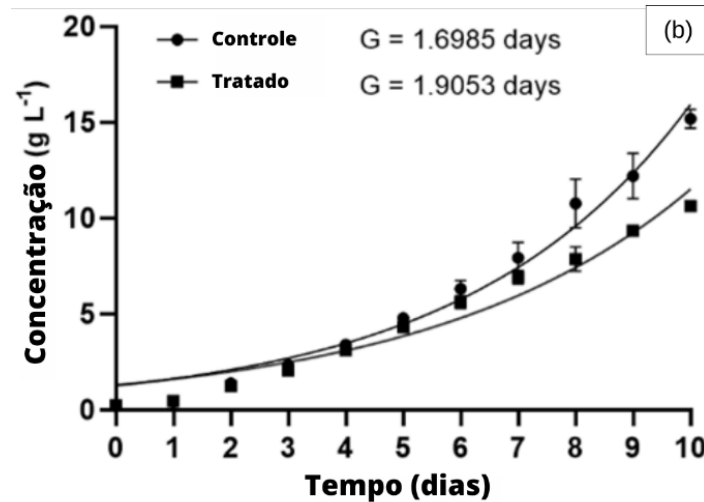


Figura 29 - (a) Crescimento diário; (b) linha de tendência exponencial e tempo de geração de *Chlorella sp.* (L06) do Controle e Tratado sob exposição à radiação gama da areia monazítica após 240 horas (10 dias) de cultivo. Fonte: Produção do próprio autor.

Por outro lado, a cinética de crescimento revelou significativa mudança na concentração de microalgas ao final de 10 dias, o cálculo do teste de hipóteses de regressão linear demonstrou diferença entre as curvas de crescimento ($P < 0,0001$), resultando em $15,22 \text{ g L}^{-1}$ para o Controle e $10,63 \text{ g L}^{-1}$ para o Tratado com radiação da areia monazítica, correspondendo a uma redução de 30,16% no crescimento da cultura sob o efeito da radiação (Figura 29). Por conseguinte, foi observado um tempo de geração (tempo de duplicação das células - G) igual a 1,6985 para a amostra Controle e 1,9053 para o Tratado com radiação, que corresponde a um aumento de 10,85% no tempo de geração quando as microalgas são expostas à radiação da areia.

Esses achados demonstram claramente um efeito depressor no crescimento de *Chlorella sp.* (L06) na presença da areia monazítica, indo ao encontro de outros relatos da literatura referente a essa fonte de radiação gama frente a outros microrganismos eucarióticos e procarióticos (Orlando, 2021). Orlando et al. (2021), relatou reduções no crescimento microbiano em 23,8% para *E. coli* e 18,4% para *S. aureus* em 1 dia de exposição à radiação da areia monazítica com a mesma taxa de dose de $3,9 \pm 0,2 \mu\text{Sv h}^{-1}$ ($p < 0,001$).

Por outro lado, alguns estudos sugerem que a radiação gama de baixa dose não tem um efeito significativo na capacidade fotossintética de microalgas, apesar de ser relatado aumento de processos não fotoquímicos como forma de dissipar o excesso de

energia da radiação gama (Gomes, 2017). Adicionalmente, a exposição da radiação gama está relacionada a perturbações no metabolismo da mitocôndria, devido a formação de espécies reativas de oxigênio (*Reactive Oxygen Species* - ROS), causando alteração no potencial de membrana mitocondrial, na respiração celular e na formação de moléculas de ATP (Andrade & Bauermann, 2010). Esses processos podem promover menor desempenho energético, bem como a disseminação de ROS que poderiam explicar a menor velocidade de crescimento da *Chlorella sp.* (L06) exposta à radiação da areia monazítica.

4.3.2 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA E ESPECTRO DE ENERGIA DISPERSIVA DE RAIOS-X

Os resultados das imagens obtidas pelo MEV (Figura 30) não revelaram assimetria superficial, nem dismorfia nas células de *Chlorella sp.* (L06) crescidas em exposição à areia monazítica. Não corroborando com relatos de que, sob condições de estresse, tais como a radiação gama, alguns microrganismos apresentam alteração em sua morfologia e na formação de colônias de células (Pradhan, 2020).

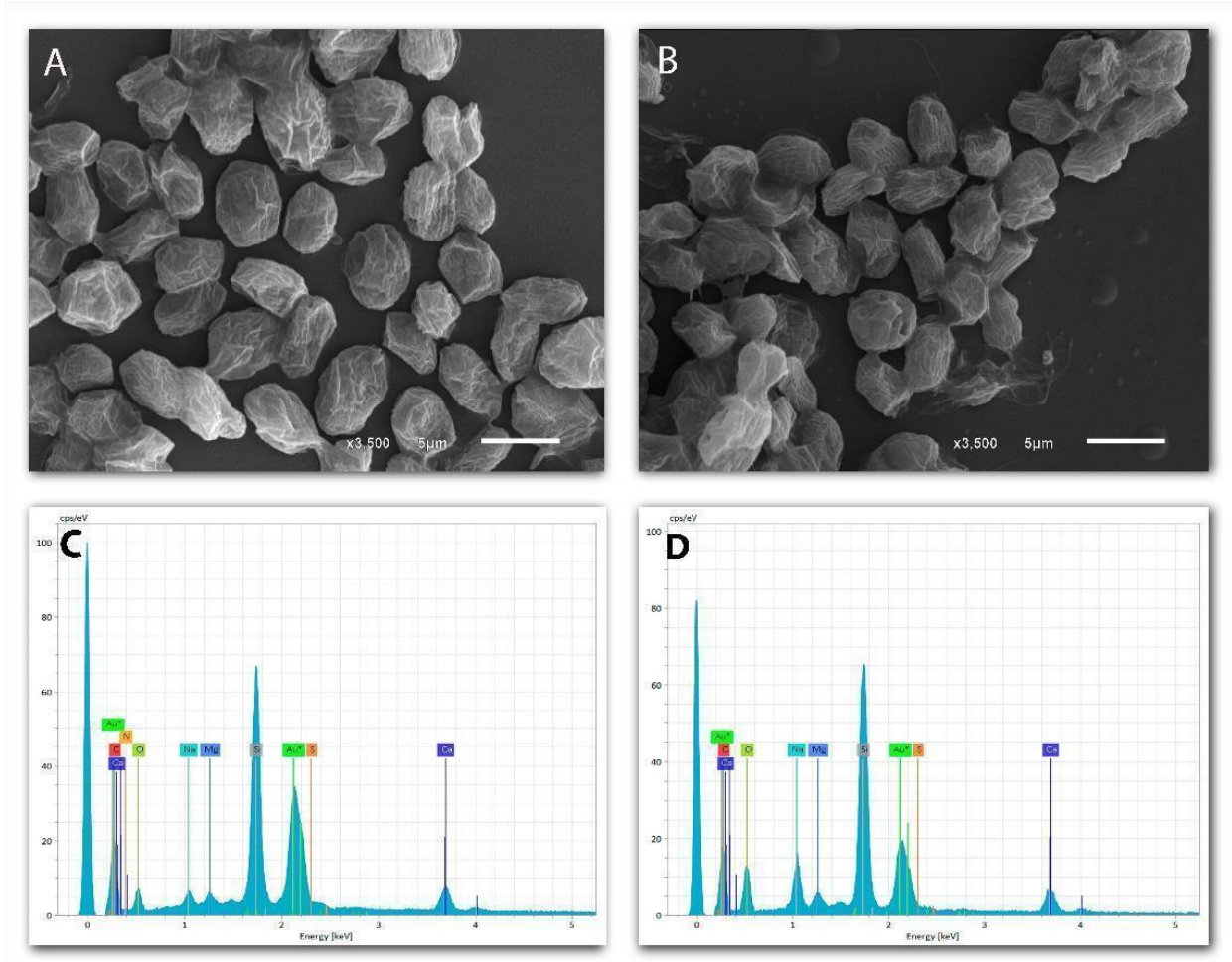


Figura 30 - Micrografias das microalgas utilizando MEV no controle (A) e Tratado com radiação (B). EDS Controle (C) e Tratado com radiação (D). Fonte: Produção do próprio autor.

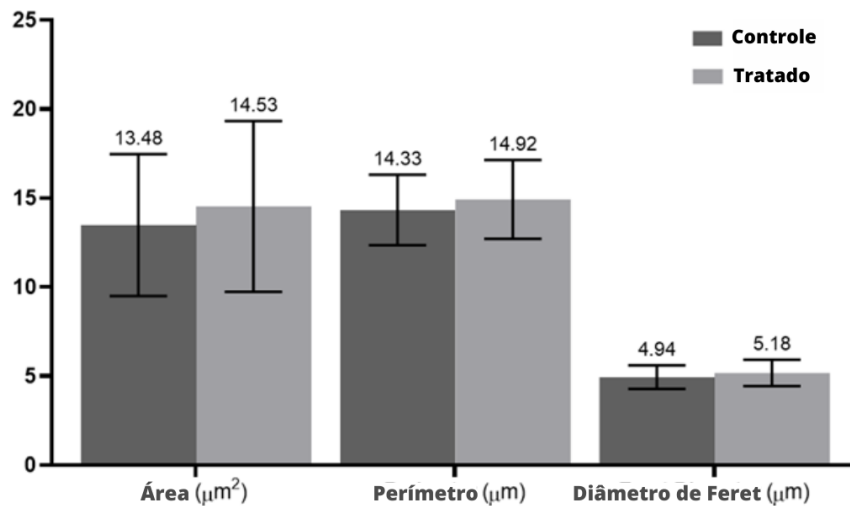


Figura 31 - Área, perímetro e diâmetro de Feret de 100 células do Controle e Tratado utilizando o programa Image J. Não houve diferença significativa em nenhum desses três parâmetros. Fonte: Produção do próprio autor.

4.3.3 ANÁLISE ELEMENTAR CHNS E ENERGIA DISPERSIVA DE RAIOS-X

As análises elementares por CHNS (Figura 32a) não apresentaram diferenças significativas nos teores de carbono, hidrogênio, nitrogênio e enxofre. Uma análise realizada pelo percentual de massa obtida pelos espectros de EDS (Figura 32b) também não mostraram alterações nos níveis intracelulares de cálcio, sódio e magnésio. Estes dados sugerem que mesmo com a alteração na taxa de geração destes microrganismos, os mecanismos de transporte e a integridade das membranas possivelmente foram preservados.

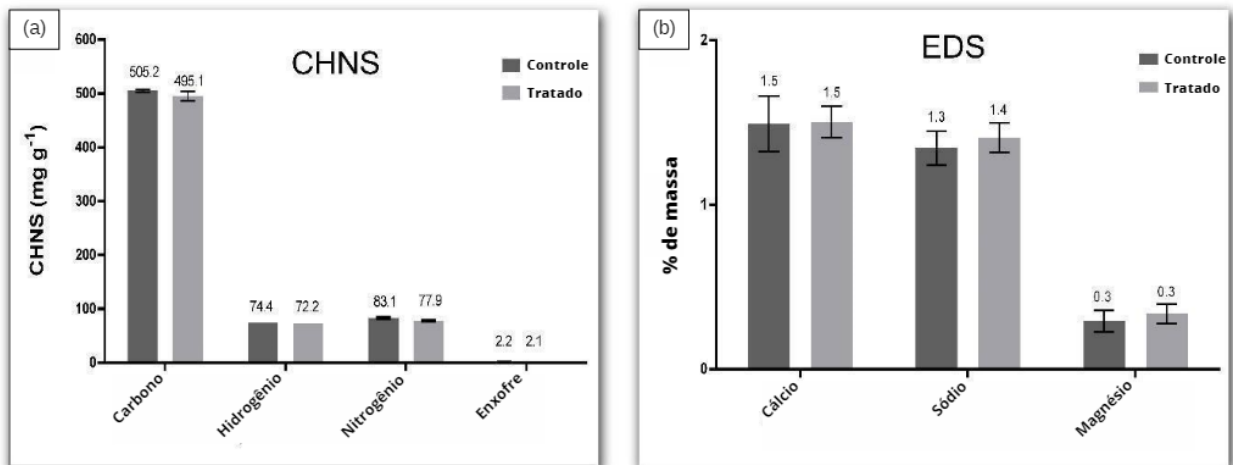


Figura 32 - Análise elementar por CHNS (a) e EDS (b) de *Chlorella sp.* (L06) após 240 horas (10 dias) de exposição à radiação gama da areia monazítica. Fonte: Produção do próprio autor.

4.3.4 PROTEÍNAS TOTAIS

Não está bem claro o efeito da radiação gama sob a síntese proteica. Acredita-se que uma maior expressão proteica possa contribuir para mitigar o estresse oxidativo em cianobactérias (Razi & Hasnain, 2006), sendo também reportado que uma maior concentração de proteína solúvel possa contribuir para reparar o DNA danificado pela radiação gama (Golz & Bradshaw, 2019). Por outro lado, William et al. (1972) hipotetizou que o aumento do teor proteico em microalgas expostas à radiação gama possa ser uma consequência do aumento da síntese de DNA e RNA.

A análise do teor de proteínas (Figura 33a) revelou uma redução de cerca de 7,61% ($p < 0,05$) nas amostras crescidas sob exposição à radiação da areia monazítica, o que somado ao menor crescimento da microalga (Figura 29a), evidenciam um claro dano ao aparato de síntese dessa macromolécula, bem como de energia. Acredita-se que esse decréscimo no teor proteico possa ter relação com o

estresse oxidativo provocado pela radiação ionizante, ao dano de RNA e subsequente falha na síntese proteica (El-Beltagi et al., 2011).

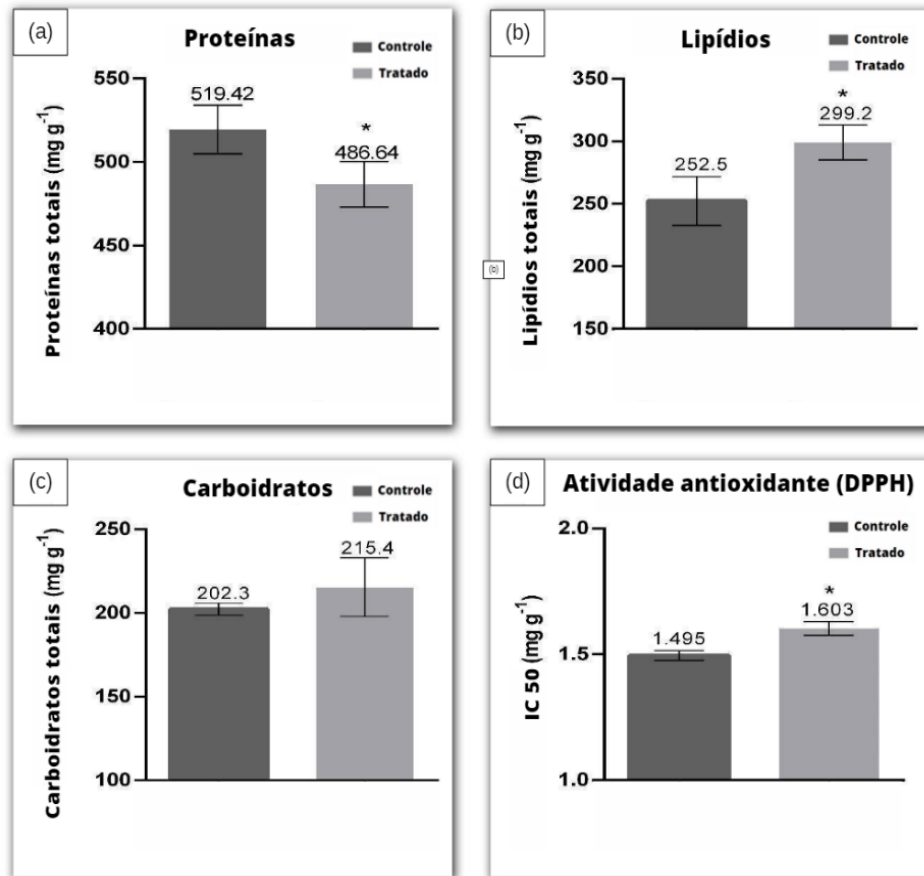


Figura 33 - Teor de Proteínas (a), Lipídios (b), Carbohidratos (c) e Atividade Antioxidante Total (d) de *Chlorella sp.* (L06) após 240 horas (10 dias) de cultivo do Controle e Tratado sob exposição à radiação gama da areia monazítica. Fonte: Produção do próprio autor.

A comparação de estudos do efeito da radiação ionizante de baixa dose em microalgas não é uma tarefa simples, haja vista a lacuna de trabalhos nessa área, bem como de variáveis como espécie da microalga, dose da radiação e tempo de à exposição radiação. Trabalhos com outras espécies de microalgas reportaram resultados bem diversos quanto ao teor proteico, havendo a descrição tanto do aumento (Chen, 2011) bem como da redução (Husseini et al., 2020) desse macroconstituente. Nesse sentido, Husseini et al. (2020) reportou cerca de 60% de redução do teor proteico da microalga submetida à radiação gama de alta intensidade (300 Gy). Especula-se que a redução da taxa de síntese proteica pode ser atribuída a

limitação de nitrogênio provocada pelo declínio da quantidade de energia e ATP disponíveis para a microalga exposta à radiação ionizante (*Poong et al., 2018*).

Outrossim, é reportado que estressores abióticos, como a radiação gama, possam induzir a acumulação do aminoácido prolina e diminuir a síntese proteica (*Irigoyen et al., 1992*), bem como pela rápida proteólise, menor conteúdo de aminoácido e acelerado desdobramento de enzimas envolvidas na síntese de proteínas (*Husseini et al., 2020*). O estresse oxidativo em proteínas pode alterar sua configuração, especialmente através da oxidação dos resíduos livres de tiol da cisteína para produzir radicais thiyl (*Kranner, 2005*), provocando ligações cruzadas a nível intermolecular ou intramolecular (*Singh, 2018*).

Por outro lado, em termos de transcrição gênica, sob o efeito da radiação ionizante, é relatada super expressão de enzimas envolvidas na síntese de doadores glicosilados de ADP (ADP-glicose) como mecanismo de sobrevivência (*Park and Choi, 2018*); ATP-sintase relacionada ao crescimento celular e proteínas de repetição do pentatricopeptídeo que se ligam a sequências específicas de RNA envolvidas em múltiplos aspectos de seu metabolismo, crescimento e manutenção do transporte fotossintético de elétrons sob condições de estresse (*Wu et al., 2016*). Já outro trabalho que avaliou o efeito da radiação gama sob a microalga *Zygnema* sp., reportou que a maioria das proteínas que tiveram sua síntese inibida pela radiação gama estava relacionada ao aparato fotossintético da microalga (*Choi et al., 2015*).

Resumindo, o teor de proteínas e crescimento de microalgas indicam possível redução no aparato de síntese proteica ou aos seus constituintes informacionais de RNA como consequência do estresse oxidativo promovido pela radiação de baixa dosagem da areia monazítica.

4.3.5 LIPÍDIOS TOTAIS

Foi verificado significativo aumento de 15,61% ($p < 0,05$) no teor de lipídios totais nas amostras tratadas com radiação da areia monazítica (Figura 33b). Apesar da literatura ser inconsistente quanto à relação entre produção de lipídios e o estresse oxidativo (*He & Ding, 2020*), a forma precisa com que se dá esse mecanismo de defesa ainda não está completamente elucidada. Nesse sentido, alguns trabalhos reportaram a indução do estresse oxidativo como responsável pelo aumento da síntese de lipídios por microrganismos (*Kang, 2014; Shanab, 2021*).

Sabe-se que o acúmulo de ROS é capaz de alterar o fluxo metabólico de carbono da glicólise para a via oxidativa das pentoses fosfato e conseqüentemente resultando no acúmulo excessivo de equivalentes intracelulares de redução – NADPH (Shi *et al.*, 2017). A fim de proteger a microalga do excesso dessas moléculas, lipídios, em vez de proteínas ou carboidratos, são acumulados em grandes quantidades devido à demanda de NADPH (Shi *et al.*, 2020). Esse acúmulo de lipídios promovidos por ROS pode se dar através do aumento na transcrição de certos genes ou atividade de enzimas envolvidas em sua biossíntese, mediando o acúmulo de moléculas essenciais para o metabolismo de lipídios e o estresse do retículo endoplasmático (Qiao *et al.*, 2021). Nesse sentido, é reportada a regulação de proteínas chave pós-translacional envolvidas na síntese de lipídios através da exposição a agentes oxidantes (Rosenwasser *et al.*, 2014).

Ademais, há correlação inversamente proporcional entre o teor de lipídios e à resistência à radiação gama, sendo sugerido que parte dessa resistência tenha relação aos fosfolipídios de membrana de microrganismos (Aziz, 1997). Além disso, sabe-se que a presença de ligações duplas em ácidos graxos insaturados os torna particularmente susceptíveis a ROS, originando como produto outras espécies reativas como o malondialdeído, e também, a uma cascata de eventos que potencialmente incrementam o estresse oxidativo (He & Ding, 2020; Guo, 2012). Por outro lado, a natureza química dos ácidos graxos insaturados os torna eficientes agentes antioxidantes, reagindo e consumindo ROS, bem como produzindo moléculas sinalizadoras que modulam os níveis de ROS (He & Ding, 2020).

Dessa forma, o aumento do teor de lipídios (Figura 33b) está relacionado a resposta ao estresse oxidativo provocado pela radiação gama de baixa dose da areia monazítica, aspecto esse corroborado por outros trabalhos que identificaram o aumento do teor de lipídios em microalgas submetidas a diferentes fontes de radiação ionizante (Moisescu, 2019; Tale, 2017), outros agentes produtores de ROS (Tale, 2017) e formas de indução ao estresse oxidativo (Arora *et al.*, 2017; BenMoussa-Dahmen *et al.*, 2016).

Curiosamente, essa resposta metabólica frente à radiação ionizante já foi explorada no campo patentário, sendo reivindicada a obtenção de mutantes dimórficos de *Scenedesmus* e *Chlamydomonas reinhardtii* pelo uso de radiação ionizante (0,1 a 10 kGy) a fim de aumentar a expressão de lipídios e conseqüentemente sua aplicação na produção de biodiesel (Choi, J.-I., 2014).

Gomes et al. (2017), para compreender melhor os efeitos da radiação gama na microalga *Chlamydomonas reinhardtii* com foco na atividade do aparelho fotossintético e na formação de ROS, expuseram as células à radiação gama (0,49 a 1699 mGy h⁻¹) num período de 6 horas para obter parâmetros de fluorescência pela clorofila e quantificar os ROS. Os resultados mostraram modificações na transferência de energia do fotossistema associadas às vias de transporte de elétrons e dissipação de energia, sendo mais evidente nas taxas de dose mais elevadas, tanto em condições claras quanto escuras. Concluíram que a diminuição observada na eficiência fotossintética parece estar ligada à formação de ROS e que podem potencialmente levar ao estresse oxidativo e dano celular nos cloroplastos.

4.3.6 CARBOIDRATOS TOTAIS

Verificou-se aumento não significativo de 6,08% ($p < 0,05$) no teor de carboidratos totais nas amostras tratadas com radiação da areia monazítica (Figura 33c). Toghiani et al. (2020) encontraram um aumento gradativo de até 26% no teor de glicose de *Chlorella vulgaris* sob exposição à radiação gama de 600 Gy em 48 horas (2 dias).

O aumento no teor de carboidratos totais, podem ser devido as microalgas serem capazes de produzir exopolissacarídeos como resposta ao estresse oxidativo. Alguns estudos sugerem que polissacarídeos extracelulares ou exopolissacarídeos, podem estimular sistemas de reparo do DNA e possuem propriedades imunoreguladoras (Falquet, 1997).

A síntese de revestimentos externos à celulares de natureza polissacarídica (exopolissacarídeos) é geralmente considerada diretamente relacionada a resposta a restrições ambientais que afetam o microrganismo. Portanto, a principal função atribuída aos revestimentos formados de exopolissacarídeos é servir como uma fronteira entre a célula e o ambiente extracelular, atuando como protetor. Além disso, esses exopolissacarídeos podem fornecer a capacidade de formar biofilmes, desempenhando um papel importante na proteção das células ao estresse em habitats extremos (como exposição à radiação gama) (De Philippis & Vincenzini, 1998).

4.3.7 ATIVIDADE ANTIOXIDANTE TOTAL

Foi observado um aumento de 6,74% ($p < 0,05$) na atividade antioxidante total nas culturas submetidas à radiação gama da areia monazítica (Figura 33d). Sabe-se que muitos compostos vegetais são eficazes agentes radioprotetores (Smith, 2017), podendo atuar basicamente de duas formas: como antioxidante e como scavenger de radicais livres (Arivalagan, 2015).

Em linhas gerais, a elevada concentração de ROS pode danificar macromoléculas como DNA, lipídios e proteínas (Ruenwai, 2011), motivo pelo qual são sintetizadas grandes quantidades de moléculas antioxidantes pelas microalgas para sequestrar ROS em condições de estresse, como a luteína e astaxantina (Ledford & Niyogi, 2005; Sánchez, 2008, Lemoine & Schoefs, 2010).

Ademais, lista-se alguns outros agentes antioxidantes enzimáticos e não enzimáticos produzidos por microalgas, tais como: catalase, ascorbato peroxidase, superóxido dismutase, glutatona-s-transferase, metalotioneínas, carotenóides e glutatona (Apel & Hirt, 2004). Por esse motivo, em relação a outros organismos, é sugerida maior resistência das microalgas a radiações ionizantes, haja vista sua maior capacidade de se proteger contra ROS produzidos pela cascata de eventos iniciadas pela exposição à radiação, tais como: radicais superóxido, hidroxila, hidrogênio, peróxido de hidrogênio e oxigênio singleto (Gomes, 2017). Estudos com a microalga *H. pluvialis* indicaram que a resposta inicial ao estresse oxidativo se dá através da produção de enzimas antioxidantes, ao passo que a acumulação de astaxantina seja a resposta de longo tempo a essa condição (Wang, 2004).

Por fim, podemos associar o aumento da produção de lipídios e agentes antioxidantes através de alguns links metabólicos: ambos podem utilizar o mesmo substrato precursor para sua biossíntese (acetyl-CoA); a capacidade dos antioxidantes de sequestrar ROS advindos da peroxidação de lipídios; bem como do fato dos antioxidantes como os carotenóides serem tóxicos para as células, sendo por isso armazenados em gotículas lipídicas (Ma, 2019). Dessa forma, observa-se coerência com os resultados de aumento de lipídios (Figura 33b) e de atividade antioxidante (Figura 33d) frente à radiação gama da areia monazítica.

4.3.8 AUTOFLUORESCENCIA

A autofluorescência das microalgas está relacionada principalmente com a emissão de fluorescência da Clorofila A e é um parâmetro sensível para monitorar a

atividade destes microrganismos (Petersen & Kusk, 2000). Isto porque a emissão de fluorescência dos organismos fotossintéticos muda continuamente após sua adaptação ao meio ambiente. Foi observado um aumento significativo de 34,64% deste parâmetro quando as microalgas foram cultivadas na presença da radiação natural de areias monazíticas (Figura 34), sugerindo uma diminuição na fotossíntese, muito provavelmente devido ao dano oxidativo no nível fotossistema II. Foi relatado que em condições ideais, a maior parte da energia luminosa absorvida pela clorofila é dissipada via conversão química, com uma pequena proporção dedicada a emissão de fluorescência e calor. No entanto, devido ao estresse oxidativo, a capacidade fotossintética pode ser reduzida, dando origem a um aumento da emissão de fluorescência (Méndez, 2018).

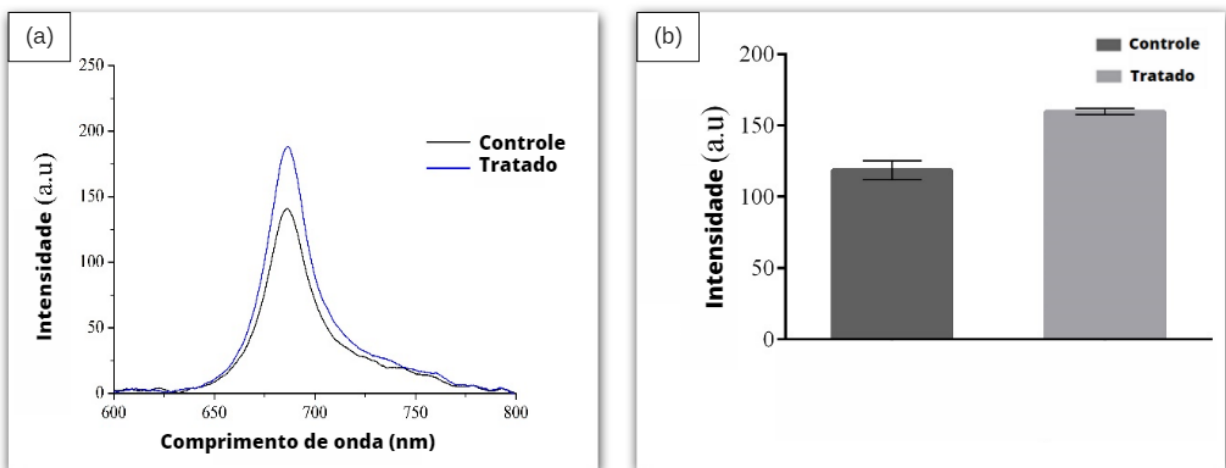


Figura 34 - Espectro de fluorescência com emissão em 680 nm para *Chlorella sp.* cultivada em ambiente livre de radiação (Controle) e na presença de radiação natural do simulador físico de radiação (Tratado) (a). Gráfico de barras com médias e desvio-padrão das diferenças do cultivo do Controle e Tratado (b). Fonte: Produção do próprio autor.

5. CONCLUSÕES

Este trabalho mostra que uma das características da areia monazítica das praias do Brasil é de que apresentam níveis mais elevados de radiação gama natural associada às partículas que variam entre 100 a 200 μm de diâmetro. Assim, a maior parcela da radiação gama natural está presente na porção que apresenta grãos menores. Esses grãos podem mais facilmente aderirem na superfície da pele, proporcionando contato direto e com maior intervalo de permanência no corpo dos banhistas.

As análises de EDXRF de diferentes amostras da areia monazítica coletadas ao longo dos 12 meses mostraram alto desvio padrão dos elementos componentes da areia, especialmente aqueles típicos elementos de areias monazíticas como Th, Y, Nd, Ce e P. Tal variação de dados indica que a composição da areia não pode ser considerada homogênea, apresentando variações espaciais e temporais que podem estar ligadas aos fluxos hidrogeológicos da praia. Esta afirmação pode ser corroborada pelas medidas dos níveis de radiação que variam espacialmente e temporalmente.

As análises de ACP mostraram uma forte correlação entre o fósforo do LREE e os níveis naturais de radiação gama das amostras de areia, apontando que os minerais do grupo monazita apresentam-se na forma de fosfatos, sendo indicada pelo DRX a queralita como forma cristalina que incorpora o Tório que é a principal fonte de radiação natural na região. A ACP também revelou uma forte correlação entre Ti e Fe, provavelmente associada à ilmenita atuando como mineral acessório à areia monazítica. O elemento Si apresenta uma correlação inversa com os fosfatos e a queralita. Isso implica que a alta concentração de compostos a base de silicatos indica níveis mais baixos de radiação nos grãos de minerais, ou seja, reduzida presença da queralita (LREE-P).

Utilizando a técnica de susceptibilidade magnética de massa AC, foi possível realizar uma avaliação das frações de material que continha Ti e Fe da fração que continha os fosfatos e a queralita de Tório. Com essa separação tornou-se mais fácil realizar uma análise cristalográfica do padrão de raios X das amostras sem a presença de ilmenita, permitindo refinamento de Rietveld de qualidade das múltiplas fases cristalográficas presentes na areia monazítica.

A composição das areias monazíticas pode variar de lugar para lugar, gerando diferentes doses de radiação. Portanto, a caracterização físico-química da areia é um

fator necessário para experimentos laboratoriais e futuras comparações da radiação natural encontrada em ambientes semelhantes a este.

A simulação biológica dos efeitos da radiação natural das areias monazíticas sobre os microrganismos mostrou uma redução no crescimento microbiano em um intervalo de tempo de 24 horas de exposição a uma dose de $3,9 \pm 0,2 \mu\text{Sv h}^{-1}$ ($p < 0,001$), com redução de 23,8% para *E. coli* e 18,4% para *S. aureus*. As imagens de microscopia eletrônica de varredura mostraram que os principais mecanismos de controle dessas espécies estavam associados à destruição parcial dos microrganismos em fragmentos celulares, rompimento da lise da parede celular das membranas e exposição do conteúdo citoplasmático em relação aos organismos controle. Portanto, pode-se inferir que a radiação natural das areias monazíticas pode atuar na redução e controle do crescimento das espécies de *E. coli* e *S. aureus* presentes nas areias monazíticas.

Os resultados revelaram que *Chlorella sp.* cultivada durante 240 horas (10 dias) sob exposição à radiação da areia monazítica tiveram uma redução significativa de 30,16% no crescimento, aumento de 10,85% no tempo de geração, redução de 7,61% no teor de proteínas totais, aumento de 15,61% no teor de lipídios totais, aumento de 6,74% na atividade antioxidante total e aumento de 34,64% na autofluorescência ($p < 0,05$). A caracterização por analisador orgânico CHNS não apresentou diferenças significativas nos teores de carbono, hidrogênio, nitrogênio e enxofre. O percentual de massa obtida pelos espectros de EDS também não mostrou alterações nos níveis intracelulares de cálcio, sódio e magnésio.

Nossos resultados sugerem que a radiação de baixa dose proveniente da areia monazítica da praia de Meaípe altera o metabolismo destes microrganismos e interferem negativamente na sua taxa de crescimento, podendo fornecer novas compreensões sobre os efeitos da radiação natural provenientes de praias de areias monazíticas em sistemas biológicos.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para avaliações futuras dos efeitos da radiação da areia da praia de Meaípe, é sugerida a utilização do simulador físico de radiação natural NRPS para investigar o crescimento e desenvolvimento de mais modelos biológicos. Uma das sugestões é avaliar o crescimento e desenvolvimento da cultura de leucócitos do sangue periférico e células tumorais de câncer de mama . Outra sugestão é avaliar

o crescimento e desenvolvimento de sementes de alface e cebola, através da atividade antioxidante, análise morfométrica e citogenética. Também pode ser interessante avaliar o crescimento e desenvolvimento de fungos através da atividade enzimática, antioxidante e medida do tamanho das colônias.

6. REFERÊNCIAS

- Albanese J & Dainiak N (2003) Modulation of intercellular communication mediated at the cell surface and on extracellular, plasma membrane-derived vesicles by ionizing radiation. *Exp. Hematol.*, v. 31, n. 6, p. 455-464. Disponível em: <[https://doi.org/10.1016/s0301-472x\(03\)00050-x](https://doi.org/10.1016/s0301-472x(03)00050-x)>.
- Alberts B, Johnson A, Lewis J, Raff M, Roberts K, Walter P (2002) *Molecular biology of the cell*. New York and London: Garland Science, 4th edition. Disponível em: <<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK21054/>>.
- Aliyu AS, Ramli AT (2015) The world's high background natural radiation areas (HBNRAs) revisited: a broad overview of the dosimetric, epidemiological and radiobiological issues. *Radiation Measurements*, v. 73, p. 51-59. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2015.01.007>>.
- Andersen, RA (2005) *Algal Culturing Techniques*, Elsevier. Disponível em: <<https://www.elsevier.com/books/algal-culturing-techniques/andersen/978-0-12-088426-1>>.
- Anderson D (1996) Antioxidant defences against reactive oxygen species causing genetic and other damage. *Mutat. Res.*, v. 350, n. 1, p. 103-108. Disponível em: <[https://doi.org/10.1016/0027-5107\(95\)00096-8](https://doi.org/10.1016/0027-5107(95)00096-8)>.
- Andrade ER & Bauermann LF (2010) *Introdução à Radiobiologia - Conexões Bioquímicas e Biomoleculares*, Santa Maria, Ed. UFSM, p. 13-29. Disponível em: <<https://editoraufsm.com.br/assuntos/ciencias-da-saude/introduc-o-a-rabiologia.html>>.
- Antoniassi JL, Uliana D, Contessotto R, Kahn H, Ulsen C (2020) Process mineralogy of rare earths from deeply weathered alkali-carbonatite deposits in Brazil. *J. Mater. Res. Technol.* v. 9 p. 8842–8853. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.05.128>>.
- Arena C, De Micco V, Macaeva E, Quintens R (2014) Space radiation effects on plant and mammalian cells, *Acta Astronautica*, v. 104, Issue 1, p. 419-431. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2014.05.005>>.
- Arora N, Patel A, Sharma M, Mehtani J, Pruthi PA, Pruthi V, Poluri KM (2017). Insights into the Enhanced Lipid Production Characteristics of a Fresh Water Microalga under High Salinity Conditions. *Ind. Eng. Chem. Res.* 56, 7413–7421. Disponível em: <<https://doi.org/10.1021/acs.iecr.7b00841>>.

- Arslan NC (1986) Low dose-rate effects of cesium-137 and iodine-125 on cell survival, cell progression, and chromosomal alterations. *Am J Clin Oncol*, v. 9, n. 6, p. 521-526. Disponível em: <<https://doi.org/10.1097/00000421-198612000-00011>>.
- Ashworth TR (2018) et al. Dose response of *Allium cepa* to gamma irradiation of low dose rates. *Radiation and Environmental Biophysics*, v. 57, n. 1, p. 23-32. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s00411-017-0721-2>>. Acesso em: 11 abr. 2023.
- Atsumi T, Fujimoto E, Furuta M, Kato M (2014) Effect of gamma-ray irradiation on *Escherichia coli* motility, *Open Life Sciences*, v. 9(10), p.909–914. Disponível em: <<https://doi.org/10.2478/s11535-014-0332-z>>.
- Attix FH (2007) Introduction to Radiological Physics and Radiation Dosimetry, p. 506-524. Disponível em: <<https://www.wiley.com/en-us/Introduction+to+Radiological+Physics+and+Radiation+Dosimetry-p-9783527617135>>.
- Avila SRR, Schuenck GPD, Silva LPCE (2021) High antibacterial in vitro performance of gold nanoparticles synthesized by epigallo-catechin 3-gallate, *Journal of Materials Research*, v. 36, p. 518-532. Disponível em: <<https://doi.org/10.1557/s43578-020-00012-5>>.
- Aziz, NH, El-Fouly MZ, Abu-Shady MR, Moussa LAA (1997) Effect of gamma radiation on the survival of fungal and actinomycetal florae contaminating medicinal plants, *Appl. Radiat. Isot.*, v. 48, p. 71-76. Disponível em: <[https://doi.org/10.1016/S0969-8043\(96\)00058-9](https://doi.org/10.1016/S0969-8043(96)00058-9)>.
- Bajaj YPS (1970) Effect of Gamma-irradiation on Growth, RNA, Protein, and Nitrogen Contents of Bean Callus Cultures, *Ann. Bot.*, v. 34, p. 1089-1096. Disponível em: <<https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.aob.a084440>>.
- Barsanti L & Gualtieri P (2014) *Algae: anatomy, biochemistry and biotechnology*, New York: CRC Press. Disponível em: <<https://doi.org/10.1201/b16544>>.
- Beckmam JS & Koppenol WH (1996) Nitric oxide, superoxide, and peroxyxynitrite: the good, the bad, and ugly, *Am J Physiol.*, v. 271, n. 5, pt 1, p. C1424-1437. Disponível em: <<https://doi.org/10.1152/AJPCELL.1996.271.5.C1424>>.
- Begot C, Desnier I, Daudin JD, Labadie JC, Lebert A (1996) Recommendations for calculating growth parameters by optical density measurements, *Journal of Microbiological Methods*, v. 25(3), p. 225-232. Disponível em: <[https://doi.org/10.1016/0167-7012\(95\)00090-9](https://doi.org/10.1016/0167-7012(95)00090-9)>.

- BenMoussa-Dahmen I, Chtourou H, Rezgui F, Sayadi S, Dhouib A (2016). Salinity stress increases lipid, secondary metabolites and enzyme activity in *Amphora subtropica* and *Dunaliella* sp. For biodiesel production. *Bioresour. Technol.* 218, 816–825. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.07.022>>.
- Bertram JS (2000) The molecular biology of cancer, *Mol Aspects Med*, v. 21, n. 6, p. 167-223. Disponível em: <[https://doi.org/10.1016/s0098-2997\(00\)00007-8](https://doi.org/10.1016/s0098-2997(00)00007-8)>.
- Bligh EG & Dyer WJ (1959) Canadian Journal of Biochemistry and Physiology Issued by The National Research Council of Canada: A Rapid Method of Total Lipid Extraction And Purification, *Can. J. Biochem. Physiol.*, v. 37, p. 911-917. Disponível em: <<https://cdnsiencepub.com/doi/pdf/10.1139/o59-099>>.
- Bolsunovsky A, Frolova T, Dementyev D, Sinitsyna O (2016) Low doses of gamma-radiation induce SOS response and increase mutation frequency in *Escherichia coli* and *Salmonella typhimurium* cells, *Ecotoxicology and Environmental Safety*, v. 134, p. 233-238. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2016.09.009>>.
- Bourguignon N & Lopes A (2019) A Guerra de Guarapari – Uma história sobre praias tropicais, bombas atômicas, riqueza e exploração no litoral brasileiro. *Gazeta Online*, 2015. Disponível em: <<https://especiais.gazetaonline.com.br/bomba/>>. Acesso em 22 fev 2023.
- Bueno B (2011) Guarapari: Muito mais que um sonho lindo, 1 Ed, Brasília: Thesaurus Editora, p. 224.
- Bragg L (1956) The diffraction of x-rays. *Br J Radiol*, v. 29, n. 339, p. 121-126. Disponível em: <<https://doi.org/10.1259/0007-1285-29-339-121>>.
- Brandão J (2019) Microorganisms in beach sand: what do we still not know?. Editor: Jerome Nriagu, *Encyclopedia of Environmental Health (Second Edition)*, Elsevier, p. 390-392, ISBN 9780444639523. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.11763-4>>.
- Brenner AV, Sugiyama H, Preston DL, Sakata R. (2020) Radiation risk of central nervous system tumors in the Life Span Study of atomic bomb survivors, 1958-2009. *Eur J Epidemiol*, 35, n. 6, p. 591-600. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s10654-019-00599-y>>.
- Broome EJ (2002) Dose responses for adaptation to low doses of (60)Co gamma rays and (3)H beta particles in normal human fibroblasts. *Radiat. Res.*, v. 158, n. 2, p. 181-186. Disponível em: <[https://doi.org/10.1667/0033-7587\(2002\)158\[0181:drfatl\]2.0.co;2](https://doi.org/10.1667/0033-7587(2002)158[0181:drfatl]2.0.co;2)>.

- Calabrese EJ, Dhawan G, Kapoor R, Kozumbo WJ (2019) Radiotherapy treatment of human inflammatory diseases and conditions: optimal dose, *Hum. Exp. Toxicol.*, v. 38, p. 888-898. Disponível em: <<https://doi.org/10.1177/0960327119846925>>.
- Calabrese EJ & Baldwin LA (2003a) Hormesis at the National Toxicology Program (NTP): Evidence of Hormetic Dose Responses in NTP Dose-Range Studies, *Nonlinearity Biol Toxicol Med*, v. 1, n. 4, p. 455-467. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/15401420390271056>>.
- Calabrese EJ & Baldwin (2003b) Toxicology rethinks its central belief. *Nature*, v. 421, n. 6924, p. 691-692. Disponível em: <<https://doi.org/10.1038/421691a>>.
- Cardarelli JJ & Ulsh BA (2018) It is time to move beyond the linear no-threshold theory for low-dose radiation protection, *Dose-Response*, v. 16(3). Disponível em: <<https://doi.org/10.1177/1559325818779651>>.
- Cesareo R (1988) Nuclear analytical techniques in medicine, New York, NY, USA, Ed. Elsevier. Disponível em: <<https://www.elsevier.com/books/nuclear-analytical-techniques-in-medicine/cesareo/978-0-444-42911-7>>.
- Chandrajith R, Dissanayake CB (2009) Phosphate mineral fertilizers, trace metals and human health. *Journal of the National Science Foundation of Sri Lanka*, v. 37(3), p. 153-165. Disponível em: <<https://doi.org/10.4038/jnsfsr.v37i3.1219>>.
- Chandra S & Stefani S (1981) Plasma membrane as a sensitive target in radiation-induced cell injury and death: an ultrastructural study. *Int. J. Radiat. Biol. Relat. Stud. Phys. Chem. Med.*, v. 40, n. 3, p. 305-311. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/09553008114551231>>.
- Chatterjee SN & Agarwal S (1988) Liposomes as membrane model for study of lipid peroxidation, *Free Radic Biol Med*, v. 4, n. 1, p. 51-72. Disponível em: <[https://doi.org/10.1016/0891-5849\(88\)90011-1](https://doi.org/10.1016/0891-5849(88)90011-1)>.
- Chen Y-C (2011) The hormesis of the green macroalga *Ulva fasciata* with low-dose 60cobalt gamma radiation, *J. Phycol.* 47, p. 939-943. Disponível em: <<https://doi.org/10.1111/j.1529-8817.2011.01018.x>>.
- Chen Y-C, Wu LC, Chen HY, Chung YC (2010) Inactivation of *Staphylococcus aureus* and *Escherichia coli* in water using photocatalysis with fixed TiO₂. *Water Air Soil Pollut*, v. 212, p. 231-238. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s11270-010-0335-y>>.
- Choi, J-I, Yoon M, Joe M, Park H, Lee SG, Han SJ, Lee PC (2014) Development of microalga *Scenedesmus dimorphus* mutant with higher lipid content by radiation

- breeding, *Bioprocess Biosyst. Eng.*, v. 47, p. 939-943. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s00449-014-1220-7>>.
- Choi J-I, Yoon M, Lim S, Kim GH, Park H (2015) Effect of gamma irradiation on physiological and proteomic changes of Arctic *Zygnema sp.* (Chlorophyta, Zygnematales). *Phycologia*, v. 54, p. 333-341. Disponível em: <<https://doi.org/10.2216/14-106.1>>.
- Clavier N, Podor R, Dacheux N (2011) Crystal chemistry of the monazite structure. *J. Eur. Ceram. Soc.*, v. 31(6), p. 941-976. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2010.12.019>>.
- CNEN (2014) Diretrizes Básicas de Proteção Radiológica, Norma CNEN-NN-3.01, Brasil. Disponível em: <<http://appasp.cnen.gov.br/seguranca/normas/normas.asp?grupo=3>>.
- CNEN (2005) Diretrizes básicas de radioproteção. Rio de Janeiro: Comissão Nacional de Energia Nuclear, Norma CNEN-NN-3.01, Brasil. Disponível em: <<http://appasp.cnen.gov.br/seguranca/normas/normas.asp?grupo=3>>.
- Coutinho JVS, Ferreira PS, Soares J, Passamai JL Jr, Orlando MTD, Gouvea SA (2020) Evaluation of induced biological effects in rats by continuous and natural gamma radiation using a physical simulator, *International Journal of Radiation Biology* v. 96(11), p. 1473-1485. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/09553002.2020.1812760>>.
- Curtis SB (1986) Lethal and potentially lethal lesions induced by radiation: a unified repair model. *Radiat. Res.*, v. 106, n. 2, p. 252-270. Disponível em: <<https://doi.org/10.2307/3576798>>.
- De Philippis R, Vincenzini M (1998) Exocellular polysaccharides from cyanobacteria and their possible applications, *FEMS Microbiology Reviews*, Vol. 22, p. 151-175. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1574-6976.1998.tb00365.x>>.
- Deakin J, Trussov I, Gibbs A, Kendrick E, Slater PR (2018) Carbonate: an alternative dopant to stabilize new perovskite phases; synthesis and structure of Ba₃Yb₂O₅CO₃ and related isostructural phases Ba₃Ln₂O₅CO₃ (Ln = Y, Dy, Ho, Er, Tm and Lu), *Dalt. Trans.*, v. 47, p. 12901-12906. Disponível em: <<https://doi.org/10.1039/C8DT02691B>>.
- Dill HG, Weber B, Klosa D (2012) Morphology and mineral chemistry of monazite-zircon-bearing stream sediments of continental placer deposits (SE Germany): ore guide

- and provenance marker, *J. Geochemical Explor.*, v. 112, p. 322-346. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2011.10.006>>.
- Dubois M, Gilles KA, Hamilton JK, Rebers PA, Smith F (1956) Colorimetric Method for Determination of Sugars and Related Substances. *Anal. Chem.* 28, 350–356. Disponível em: <<https://doi.org/10.1021/ac60111a017>>.
- Efstratiou, MA (2019) Microorganisms in beach sand: health implications. Editor: Jerome Nriagu, *Encyclopedia of Environmental Health*, 2th Ed., ed. Elsevier, p. 385-389, ISBN 9780444639523. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.10914-5>>.
- Eisberg RRR (1994). Física quântica: átomos, moléculas, sólidos, núcleos e partículas. Rio de Janeiro: Campus. Disponível em: <<https://www.grupogen.com.br/fisica-quantica>>.
- Evans, RD (1972) *The Atomic Nucleus*. New York: McGraw-Hill. Disponível em: <https://www.academia.edu/28858622/Evans_The_atomic_nucleus>.
- El-Beltagi HS, Ahmed OK, El-Desouky W (2011) Effect of low doses γ -irradiation on oxidative stress and secondary metabolites production of rosemary (*Rosmarinus officinalis* L.) callus culture, *Radiat. Phys. Chem.*, v. 80, p. 968-976. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2011.05.002>>.
- Fabris JD, Coelho FS, Couceiro PRC; Lopes AL (2005). Óxidos de ferro e monazita de areias de praias do Espírito Santo. *Revista Química Nova*, São Paulo, v. 28, n. 2, p. 233-237. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S0100-40422005000200013>>.
- Falquet J (1997) The nutritional aspects off *Spirulina*, *Ant. technology*.
- Fan X, Toivonen PMA, Rajkowski KT, Sokorai KJB (2003) Warm water treatment in combination with modified atmosphere packaging reduces undesirable effects of irradiation on the quality of freshcut iceberg lettuce, *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 51, p. 1231-1236.
- Finger LW (1974) Refinement of the crystal structure of zircon. *Carnegie Institution of Washington Year Book* 73, p. 544-547.
- Finney JJ, Rao NN (1967) The crystal structure of cheralite. *Am. Mineral* 52, p. 13-19. Disponível em: <<https://pubs.geoscienceworld.org/msa/ammin/article-abstract/52/1-2/13/542195/The-crystal-structure-of-cherallite>>.
- Fujinami N, Koga T, Morishima H (2000) External Exposure Rates from Terrestrial Radiation at Guarapari and Meaípe in Brazil. *Proceeding of "The 10h International*

- Congress of the International Radiation Protection Association”, Hiroshima, Japan. 19 May 2000. Disponível em: <<https://inis.iaea.org/search/searchsinglerecord.aspx?recordsFor=SingleRecord&RN=32021690>>.
- Galvão ES, Reis NC, Lima AT, Stuetz RM, Orlando MTD, Santos JM (2019) Use of inorganic and organic markers associated with their directionality for the apportionment of highly correlated sources of particulate matter. *Sci. Total Environ.* v. 651(1), p. 1332-1343. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.09.263>>.
- Gauthier R (2015) The Electron is a Charged Photon with the De Broglie Wavelength.
- García-Tenorio R, Manjón G, Vioque I, Jiménez-Ramos MC, Mantero J, Díaz-Francés I (2018) Grey monazite (rare earths) mining in centre of Spain: characterization and pre-operational radiological evaluation. *Chemosphere* v. 208, p. 691-697. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.06.032>>.
- Gast RJ, Gorrell L, Raubenheimer B, Elgar S (2011) Impact of erosion and accretion on the distribution of enterococci in beach sands, *Cont. Shelf Res*, v. 31, p. 1457-1461. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.csr.2011.06.011>>.
- Golding C, Lamboo L, Beniac D et al (2016) The scanning electron microscope in microbiology and diagnosis of infectious disease. *Sci Rep* v. 6, n. 26516. Disponível em: <<https://doi.org/10.1038/srep26516>>.
- Gomes T, Xie L, Brede D, Lind O-C, Solhaug KA, Salbu B, Tollefsen KE (2017) Sensitivity of the green algae *Chlamydomonas reinhardtii* to gamma radiation: Photosynthetic performance and ROS formation. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2016.12.001>>.
- Goodhead DT (1985) Saturable repair models of radiation action in mammalian cells. *Radiat Res., Suppl*, v. 8, n. S58-67. Disponível em: <<https://doi.org/10.2307/3583513>>.
- Goodwin KD & Pobuda M (2009) Performance of CHROMagar™ Staph aureus and CHROMagar™ MRSA for detection of *Staphylococcus aureus* in seawater and beach sand – comparison of culture, agglutination, and molecular analyses. *Water Research* v. 43(9), p. 4802-4811. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.watres.2009.06.025>>.
- Gopinath V, Priyadarshini S, Loke MF, Arunkumar J, Marsili E, MubarakAli D, Velusamy P, Vadivelu J (2017) Biogenic synthesis, characterization of antibacterial silver

- nanoparticles and its cell cytotoxicity. *Arabian Journal of Chemistry* v. 10(8), p. 1107-1117. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2015.11.011>>.
- Grant WF (1994) The present status of higher plant bioassays for the detection of environmental mutagens. *Mutation Research/Fundamental and Molecular Mechanisms of Mutagenesis*, v. 310, n. 2, p. 175-185. Disponível em: <[https://doi.org/10.1016/0027-5107\(94\)90112-0](https://doi.org/10.1016/0027-5107(94)90112-0)>.
- Gražulis S, Daškevič A, Merkys A, Chateigner D, Lutterotti L, Quirós M, Serebryanaya NR, Moeck P, Downs RT, Le Bail A (2012) Crystallography Open Database (COD): an open-access collection of crystal structures and platform for world-wide collaboration. *Nucleic Acids Res.*, v. 40, p. D420–D427. Disponível em: <<https://doi.org/10.1093/nar/gkr900>>.
- Haase H, Jordan L, Keitel L, Keil C, Mahltig B (2017) Comparison of methods for determining the effectiveness of antibacterial function-alized textiles. *PLoS ONE* 12(11):e0188304. Disponível em: <<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0188304>>.
- Hall EJ & Giaccia AJ (2016) *Radiobiology for the radiologist: Seventh edition*. 2012. 1-576 p. I. Introduction. *Journal of the International Commission on Radiation Units and Measurements*, v. 21, n. 1, p. 1-2. Disponível em: <<https://www.worldcat.org/pt/title/radiobiology-for-the-radiologist/oclc/781261683>>
- Hall EJ (2006) *Radiobiology for the radiologist*. Philadelphia: Lippincott Wilkins & Williams. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s00259-007-0383-8>>.
- Halliwell B (1994) Free radicals and antioxidants: a personal view, *Nutr Rev*, v. 52, n. 8 Pt 1, p. 253-265. Disponível em: <<https://doi.org/10.1111/j.1753-4887.1994.tb01453.x>>.
- Halliwell B (2009) The wanderings of a free radical. *Free Radic Biol Med*, v. 46, n. 5, p. 531-542. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.freeradbiomed.2008.11.008>>.
- Han D, Kishida K, Shinoda K, Inui H, Uda T (2013) A comprehensive understanding of structure and site occupancy of Y in Y-doped BaZrO₃. *J. Mater. Chem.*, v. 1, p. 3027-3033. Disponível em: <<https://doi.org/10.1039/C2TA00675H>>.
- Han G, Lei B-H, Yang Z, Wang Y, Pan S (2018) A fluoro-oxosilicophosphate with an unprecedented SiO₂F₄ species. *Angew. Chemie Int.*, v. 57(31), p. 9828-9832. Disponível em: <<https://doi.org/10.1002/anie.201805759>>.

- Hanawalt JD (1976) Phase identification by X-ray powder diffraction evaluation of various techniques. *Advances in X-ray Analysis* v. 20, p.63-73. Disponível em: <<https://doi.org/10.1154/S037603080001171X>>.
- Hanawalt, J.D (1983) History of the powder diffraction. In: *Crystallography in North America*, Eds, McLachlan Jr, D. and Glusker, J.P. Section Apparatus and Methods, Chapter 2, 215-219. American Crystallographic Association, New York.
- Hanawalt JD, Rinn WD, Frevel LK (1938) Chemical analysis by X-ray diffraction. *Industrial and Engineering Chemistry* 10:457–512. Disponível em: <<https://doi.org/10.1021/ac50125a001>>.
- He M & Ding NZ (2020). Plant Unsaturated Fatty Acids: Multiple Roles in Stress Response. *Front. Plant Sci.* 11, 1–15. Disponível em: <<https://doi.org/10.3389/fpls.2020.562785>>.
- Heilbron PFL (2019) Breve Histórico Sobre a Proteção Radiológica Paulo Heilbron. Encontro da Academia Brasileira de Medicina Setembro de 2017.
- Higson D (2006) BEIR VII-2. *J Radiol. Prot*, v. 25, n. 3, p. 324-325. Disponível em: <<https://doi.org/10.17226/11340>>.
- Homann SG (2019) HotSpot Health Physics Codes Version 3.0 User's Guide. Lawrence Livermore National Laboratory. CA, USA.
- Husseini ZN, Tafreshi SAH, Aghaie P, Toghyani MA (2020) CaCl₂ pretreatment improves gamma toxicity tolerance in microalga *Chlorella vulgaris*. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 192, 110261. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.110261>>.
- ICDD (2007) Kabekkodu, Soorya, PDF-2, Database. Disponível em: <<https://www.icdd.com>>.
- ICRP (2007) The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP publication 103. *Ann ICRP*, 37, n. 2-4, p. 1-332.
- ICRU (1996) Conversion coefficients for use in radiological protection against external radiation, Oxford, Pergamon. Disponível em: <<https://www.icrp.org/publication.asp?id=icrp%20publication%2074>>.
- ICSD (2021) ICSD web version 4.5.0 released. Disponível em: <<https://icsd.products.fiz-karlsruhe.de/nachricht/icsd-web-version-450-released>>.
- Irigoyen JJ, Einerich DW, Sanchez-Diaz M (1992) Water stress induced changes in concentrations of proline and total soluble sugars in nodulated alfalfa (*Medicago sativa*) plants. *Physiol. Plant.* 84, 55–60. Disponível em:

- <<https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.1992.tb08764.x>>.
- Isaksson M & Raaf C (2017) Environmental Radioactivity and Emergency Preparedness. Disponível em: <<https://doi.org/10.1201/9781315372877>>.
- Ishii S, Hansen DL, Hicks RE, Sadowsky MJ (2007) Beach sand and sediments are temporal sinks and sources of *Escherichia coli* in Lake Superior. Environ. Sci. Technol. 41(7):2203–2209. Disponível em: <<https://doi.org/10.1021/es0623156>>.
- Isinkaye M & Shitta MBO (2009) Natural Radionuclide Content and Radiological Assessment of Clay Soils Collected from Different Sites in Ekiti State, Southwestern Nigeria, Radiation Protection Dosimetry (2010), v. 139, No. 4, p. 590–596. Disponível em: <<https://doi.org/10.1093/rpd/ncp284>>.
- Jarvis WD & Turner AJ (1994) Induction of apoptotic DNA fragmentation and cell death in HL-60 human promyelocytic leukemia cells by pharmacological inhibitors of protein kinase C. Cancer Res, v. 54, n. 7, p. 707-714. Disponível em: <<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/7511048/>>.
- Jin-Fang Lv, Yong-Xing Zhenga, Xiong Tonga, Yong-Ming Zhenga, and Han-Ping Zhang (2017) Mineralogy, Physical Characterization and Magnetic Separation Performance of a Raw Ilmenite Concentrate for its Purification, Russian Journal of Non-Ferrous Metals 58(2): p. 01-108. Disponível em: <<https://doi.org/10.3103/S1067821217020067>>.
- Junqueira JC (2005) Biologia celular e molecular. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan.
- Kang NK, Lee B, Choi GG, Moon M, Park MS, Lim JK, Yang JW (2014) Enhancing lipid productivity of *Chlorella vulgaris* using oxidative stress by TiO₂ nanoparticles. Korean J. Chem. Eng. 31, 861–867. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s11814-013-0258-6>>.
- Kaplan I (1978) Física nuclear, Rio de Janeiro: Guanabara Dois. Disponível em: <<https://koha.inpa.gov.br/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=10068>>.
- Kerr JF (1972) Apoptosis: a basic biological phenomenon with wide-ranging implications in tissue kinetics. Br J Cancer, v. 26, n. 4, p. 239-257. Disponível em: <<https://doi.org/10.1038/bjc.1972.33>>.
- Khandaker MU, Asaduzzaman K, Sulaiman AFB, Bradley DA, Isinkaye MO (2018) Elevated concentrations of naturally occurring radionuclides in heavy mineral-rich beach sands of Langkawi Island. Malaysia. Mar. Pollut. Bull. 127:654–663. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.12.055>>.

- Knoll GF (2000) Radiation Detection and Measurement, New York, John Wiley & Sons, 3^a Ed., cap. 2, p. 48-64. Disponível em: <<https://www.amazon.com.br/Radiation-Detection-Measurement-Glenn-Knoll/dp/0471073385>>.
- Krane KS (1988), Introductory Nuclear Physics, John Wiley & Sons.
- Kranner I (2005) A Modulating Role for Antioxidants in Desiccation Tolerance. *Integr. Comp. Biol.* 45, 734–740. Disponível em: <<https://doi.org/10.1093/icb/45.5.734>>.
- Krishnamurthi VR, Niyonshuti II, Chen J, Wang Y (2021) A new analysis method for evaluating bacterial growth with microplate readers. *PLoS ONE* 16(1):e0245205. Disponível em: <<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0245205>>.
- Larson, AC, von Dreele, RB, 2004. General Structure Analysis System (GSAS), Los Alamos National Laboratory Report LAUR 86-748.
- Leach JK & van Tuyle G (2001) Ionizing radiation-induced, mitochondria-dependent generation of reactive oxygen/nitro gen. *Cancer Res*, v. 61, n. 10, p. 3894-3901.
- Ledford HK & Niyogi KK (2005) Singlet oxygen and photo-oxidative stress management in plants and algae. *Plant, Cell Environ.* 28, 1037–1045. Disponível em: <<https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2005.01374.x>>.
- Lehnert S (2008) Biomolecular action of ionizing radiation: medical physics and biomedical engineering. Montreal: Taylor & Francis Group, LLC.
- Lehninger AL (2006) Princípios de bioquímica. 4. ed. São Paulo.
- Lemoine Y & Schoefs B (2010) Secondary ketocarotenoid astaxanthin biosynthesis in algae: a multifunctional response to stress. *Photosynth. Res.* 106, 155–177. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s11120-010-9583-3>>.
- Liang MH, Wang L, Wang Q, Zhu J, Jiang JG (2019) High-value bioproducts from microalgae: Strategies and progress. *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.* 59, 2423–2441. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/10408398.2018.1455030>>.
- Linthout K (2007) Tripartite division of the system 2REEPO₄- CaTh(PO₄)₂-2ThSiO₄, discreditation of brabantite, and recognition of cheralite as the name for members dominated by CaTh (PO₄)₂. *The Canadian Mineralogist* 45(3):503–508. Disponível em: <<https://doi.org/10.2113/gscanmin.45.3.503>>.
- Li X, Liu B, Lao Y, Wan P, Mao X, Chen F (2021) Efficient magnetic harvesting of microalgae enabled by surface-initiated formation of iron nanoparticles. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.127252>>.

- Liu X & Lin W (2018) Natural radioactivity in the beach sand and soil along the coastline of Guangxi Province, China. *Mar. Pollut. Bull.* 135:446–450. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.07.057>>.
- López S, Prieto M, Dijkstra J, Dhanoa MS, France J (2004) Statistical evaluation of mathematical models for microbial growth. *International Journal of Food Microbiology* 96(3):289–300. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2004.03.026>>.
- Luckey TD (1980) *Hormesis with Ionizing Radiation*, 1st ed., CRC Press. Disponível em: <<https://doi.org/10.1201/9780429276552>>.
- Luz, AB, Lins FAF (2008) *Rochas & Minerais Industriais: usos e especificações*. 2 Ed. Rio de Janeiro. CETEM-MCT, ISBN 978-85-61121-37-2.
- Lv JF, Zheng YX, Tong X, Zheng YM, Zhang HP (2017) Mineralogy, physical characterization and magnetic separation performance of a raw ilmenite concentrate for its purification. *Russ. J. Non-Ferrous Metals* 58(2), p. 101–108. Disponível em: <<https://doi.org/10.3103/S1067821217020067>>.
- Ma T, Shi B, Ye Z, Li X, Liu M, Chen Y, Xia J, Nielsen J, Deng Z, Liu T (2019) Lipid engineering combined with systematic metabolic engineering of *Saccharomyces cerevisiae* for high-yield production of lycopene. *Metab. Eng.* 52, 134–142. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ymben.2018.11.009>>.
- Madigan, MT, Martinko JM, Bender KS, Buckley DH, Stahl DA (2016) *Microbiologia de Brock*. Ed. 14, Porto Alegre, Artmed.
- Madureira J, Pimenta AI, Popescu L, Besleaga A, Dias MI, Santos PMP, Melo R, Ferreira ICFR, Cabo Verde S, Margaça FMA (2017) Effects of gamma radiation on cork wastewater: antioxidant activity and toxicity. *Chemosphere* 169:139–145. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.11.064>>.
- Marples B (2004) Low-dose hyper-radiosensitivity: a consequence of ineffective cell cycle arrest of radiation-damaged G2- phase cells. *Radiat. Res.*, v. 161, n. 3, p. 247-255.
- Marples B & Collis SJ (2008) Low-dose hyper-radiosensitivity: past, present, and future. *Int J Radiat Oncol Biol Phys*, v. 70, n. 5, p. 1310-1318.
- Marples B & Joiner MC (1993) The response of Chinese hamster V79 cells to low radiation doses: evidence of enhanced sensitivity of the whole cell population. *Radiat. Res.*, v. 133, n. 1, p. 41-51.

- Marples B & Skov KA (1996) Small doses of high-linear energy transfer radiation increase the radioresistance of Chinese hamster V79 cells to subsequent X irradiation. *Radiat. Res.*, v. 146, n. 4, p. 382-387.
- Medhat ME (2009) Assesment of Radiation Hazards Due to Natural Radioactivity in Some Building Materials Used in Egyptian. *Radiation Protection Dosimetry*, v. 133, p. 177-185. Disponível em: <<https://doi.org/10.1093/rpd/ncp032>>.
- Mello AS (1971) *Guarapari Maravilha da Natureza*. Rio de Janeiro: O Cruzeiro, p. 232.
- Méndez MS (2018) Efecto tóxico de microcontaminantes acuáticos emergentes sobre microalgas marinas mediante el análisis de biomarcadores de citotoxicidad. Tesis de doctorado, Universidade da Coruña. Disponível em: <<https://ruc.udc.es/dspace/handle/2183/20907>>.
- Mikkelsen RB & Wardman P (2003) Biological chemistry of reactive oxygen and nitrogen and radiation-induced signal transduction mechanisms. *Oncogene*, v. 22, n. 37, p. 5734-5754.
- Miranda H, Bobrowskil V, Tillmann M, Dodel L, Meneghello G, (2009) Qualidade fisiológica de sementes de arroz submetidas à radiação gama. *1320. Ciência Rural*, v.39, n.5.
- Mohammed RL, Echeverry A, Stinson CM, Green M, Bonilla TD, Hartz A, McCorquodale DS, Rogerson A, Esiobu N (2012) Survival trends of *Staphylococcus aureus*, *Pseudomonas aeruginosa*, and *Clostridium perfringens* in a sandy South Florida beach. *Marine Pollution Bulletin* 64(6):1201–1209. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2012.03.010>>.
- Moiescu C, Ardelean AV, Negut D, Ardelean I (2019) Effect of acute gamma irradiation on generation time, lipid, chlorophyll A and carotens, in *Chlorella sorokiniana* UTEX 2130 and *Synechocystis* PCC 6803. Disponível em: <<https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/20209904898>>.
- Morales A (1998) Oxidative damage of mitochondrial and nuclear DNA induced by ionizing radiation in human hepato blastoma cells. *Int J Radiat Oncol Biol Phys*, v. 42, n. 1, p. 191-203.
- Muela A, García-Bringas JM, Arana II, Barcina II (2000) The effect of simulated solar radiation on *Escherichia coli*: the relative roles of UV-B, UV-A, and photosynthetically active radiation. *Microb. Ecol.* 39(1):65–71. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s002489900181>>.

- Nelson GJ & Freeman NK (1959) Serum phospholipide analysis by chromatography and infrared spectrophotometry. *J. Biol. Chem.* Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/s0021-9258%2818%2970828-4>>.
- Ni Y, Hughes JM, Mariano AN (1995) Crystal chemistry of the monazite and xenotime structures. *Am. Mineral.* 80:21–26. Disponível em: <<https://doi.org/10.2138/am-1995-1-203>>.
- NNDC (2010) National Nuclear Data Center, Brookhaven National Laboratory, base em ENSDF, Nuclear Wallet Cards (1996-2003). Acesso em 15/02/2023. Disponível em: <<https://www.nndc.bnl.gov/nudat3/mird/>>.
- NRC (2006) Health Risks from Exposure to Low Levels of Ionizing Radiation: BEIR VII Phase 2. Washington, DC: The National Academies Press. 422 p. 978-0-309-09156-5.
- Oberley LW (1976) Superoxide Ion as the cause of the oxygen effect. *Radiat. Res.*, v. 68, n. 2, p. 320-328.
- Okuno E (2018) Radiação: efeitos, riscos e benefícios, São Paulo: Oficina de Textos, p. 61-65, ISBN 978-85-7975-299-5. Disponível em: <<https://www.livrariadafisica.com.br>>.
- Orlando MTD (2017) Praias de Meaípe e Areia Preta estimulam defesa contra câncer de mama. *Gazeta Online.* Disponível em: Disponível em: <<https://www.cbnvitoria.com.br/pesquisar?termo=Praias%20de%20Mea%C3%A9pe%20e%20Areia%20Preta%20estimulam%20defesa%20contra%20c%C3%A2ncer%20de%20mama>>. Acesso em: 22 fev 2023.
- Orlando MTD, Cavichini AS, Passos CAC, Orlando CGP, Passamai JL, Santos MA (2014) Correlation between breast cancer and radiation level of Guarapari City – ES – Brazil. *Blucher Physics Proceedings*, 1, 41-43. Disponível em: <<https://doi.org/10.5151/phypro-ecfa-020>>.
- Orlando MTD, Galvão ES, Passamai Jr JL, Zordan AB, Orlando CGP, Oliveira JP, Gouvea SA, Ribeiro FND, Alves TPDS, Soares J (2021) Physicochemical characterization of monazite sand and its associated bacterial species from the beaches of southeastern Brazil. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s11356-021-16523-5>>.
- Orlando MTD, Lazzerini FT, De Prá W (2016) Avaliação de parâmetros físicos da Praia Areia Preta - Guarapari - ES - Brasil. In: VII Encontro Científico de Física Aplicada, 2016, Espírito Santo. *Blucher Physics Proceedings.* Disponível em:

- <<https://www.proceedings.blucher.com.br/article-details/avaliacao-de-parametros-fsicos-da-praia-areia-preta-guarapari-es-brasil-25243>>. Acesso em 22 fev. 2023.
- Orlando MTD, Rangel CVGT, Galvão ES, Orlando, CGP, Bastos AC, Quaresma VS (2019) Characterization of sediments from the Fundão dam failure. *Blucher Material Science Proceedings*. Disponível em: <<https://www.proceedings.blucher.com.br/article-details/characterization-of-sediments-from-the-fundo-dam-failure-30668>>. Acesso em: 22 fev. 2023.
- O'Rourke SF & McAneney H (2009) Linear quadratic and tumour control probability modelling in external beam radiotherapy. *J Math Biol*, v. 58, n. 4-5, p. 799-817.
- ORTEC, (2020) MAESTRO Multichannel Analyzer Emulation Software. Disponível em: <<https://www.ortec-online.com/products/application-software/maestro-mca>>.
- Park EJ & Choi J-i (2018) Resistance and Proteomic Response of Microalgae to Ionizing Irradiation. *Biotechnol. Bioprocess Eng.* 23, 704–709. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s12257-018-0468-1>>.
- Petkau A (1976) Letter: protection of post-irradiated mice by superoxide dismutase. *Int J Radiat. Biol. Relat. Stud Phys Chem Med*, v. 29, n. 3, p. 297-299.
- Plano, LR, Garza AC, Shibata T, Elmir SM, Kish J, Sinigalliano CD, Gidley ML, Miller G, Withum K, Fleming LE, Solo-Gabriele HM (2011) Shedding of *Staphylococcus aureus* and methicillin-resistant *Staphylococcus aureus* from adult and pediatric bathers in marine waters. *BMC Microbiol.* 11(1), 5. Disponível em: <<https://doi.org/10.1186/1471-2180-11-5>>.
- Pollard E (1961) Effect of gamma-radiation on *Escherichia coli* grown in deuterium oxide medium. *Nature* 192:177–178. Disponível em: <<https://doi.org/10.1038/192177a0>>.
- Pompella A (1997) Biochemistry and histochemistry of oxidant stress and lipid peroxidation. *Int J Vitam Nutr Res*, v. 67, n. 5, p. 289-297.
- Poong SW, Lim PE, Phang SM, Wong CY, Pai TW, Chen CM, Yang CH, Liu CC (2018) Transcriptome sequencing of an Antarctic microalga, *Chlorella* sp. (Trebouxiophyceae, Chlorophyta) subjected to short-term ultraviolet radiation stress. *J. Appl. Phycol.* 30, 87–99. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s10811-017-1124-4>>.
- Popa K, Shvareva T, Mazeina L, Colineau E, Wastin F, Konings RJM, Navrotsky A (2008) Thermodynamic properties of CaTh(PO₄)₂ synthetic cheralite. *Am. Mineral.* 93:1356–1362. Disponível em: <<https://doi.org/10.2138/am.2008.2794>>.

- Popa K, Cologna M, Martel L, Staicu D, Cambriani A, Ernstberger M, Raison PE, Somers J (2016) CaTh(PO₄)₂ cheralite as a candidate ceramic nuclear waste form: spark plasma sintering and physico-chemical characterization. *Journal of the European Ceramic Society* 36(19), p. 4115–4121. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2016.07.016>>.
- Porter LE (1989) Bethe-Bloch stopping-power parameters for Mylar, Kapton, and Havar targets derived from measurements with proton, alpha -particle, and carbon-ion projectiles. *Phys Rev B Condens Matter*, 40, n. 12, p. 8530-8535.
- Pradhan B, Baral S, Patra S, Behera C, Nayak R, MubarakAli D, Jena M (2020) Delineation of gamma irradiation (⁶⁰Co) induced oxidative stress by decrypting antioxidants and biochemical responses of microalga, *Chlorella sp.* Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.bcab.2020.101595>>.
- Prefeitura Municipal de Guarapari. Turista (2018) – Conheça Guarapari. Disponível em: <<https://www.guarapari.es.gov.br/pagina/ler/105/turismo>>.
- Qiao T, Zhao Y, Zhong D-b, Yu X (2021) Hydrogen peroxide and salinity stress act synergistically to enhance lipids production in microalga by regulating reactive oxygen species and calcium. *Algal Res.* 53, 102017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.algal.2020.102017>>.
- Ravisankar R, Chandramohan J, Chandrasekaran A, Prince Prakash Jebakumar J, Vijayalakshmi I, Vijayagopal P, Venkatraman B (2015) Assessments of radioactivity concentration of natural radio-nuclides and radiological hazard indices in sediment samples from the East coast of Tamilnadu, India with statistical approach. *Mar. Pollut. Bull.* 97:419–430. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2015.05.058>>.
- Riedel W & Eisenmenger A (1999) Problems in monitoring for thorium intakes by workers. *Kerntechnik*, v. 64, n. 1-2, p. 72. Disponível em: <<https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.rpd.a082436>>.
- Rosenwasser S, Van Creveld SG, Schatz D, Malitsky S, Tzfadia O, Aharoni A, Levin Y, Gabashvili A, Feldmesser E, Vardi A (2014) Mapping the diatom redox-sensitive proteome provides insight into response to nitrogen stress in the marine environment. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 111, 2740–2745. Disponível em: <<https://doi.org/10.1073/pnas.1319773111>>.
- Ruenwai R, Neiss A, Laoteng K, Vongsangnak W, Dalfard AB, Cheevadhanarak S, Petranovic D, Nielsen J (2011) Heterologous production of polyunsaturated fatty

- acids in *Saccharomyces cerevisiae* causes a global transcriptional response resulting in reduced proteasomal activity and increased oxidative stress. *Biotechnol. J.* 6, 343–356. Disponível em: <<https://doi.org/10.1002/biot.201000316>>.
- Rufino MSM, Alves RE, Brito ES, Morais SM, Sampaio CG, Pérez-Jiménez J, Sauracalixto FD (2007) Determinação da Atividade Antioxidante total em frutas pela captura do radical livre DPPH. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/CNPAT/10225/1/Cot_128.pdf>.
- Sabino R, Rodrigues R, Costa I, Carneiro C, Cunha M, Duarte A, Faria N, Ferreira FC, Gargaté MJ, Júlio C, Martins ML, Nevers MB, Oleastro M, Solo-Gabriele H, Veríssimo C, Viegas C, Whitman RL, Brandão J (2014) Routine screening of harmful microorganisms in beach sands: implications to public health. *Sci. Total Environ.*, v. 472, p. 1062-1069. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.11.091>>.
- Sánchez JF, Fernández JM, Acién FG, Rueda A, Pérez-Parra J, Molina E (2008) Influence of culture conditions on the productivity and lutein content of the new strain *Scenedesmus almeriensis*. *Process Biochem.* 43, 398–405. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.procbio.2008.01.004>>.
- Santos JJA, Conceição H, Leandro MVS, Rosa MLS (2018) Formation of monazite-(Ce, La) by fluid-apatite interaction: the Floresta Azul Alkaline Complex, Bahia. Brazil. *Braz. J. Geol.* 48(4):721–733. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/2317-4889201820180069>>.
- Sapora O & Barone F (1991) Relationships between cell killing, mutation induction and DNA damage in X-irradiated V79 cells: the influence of oxygen and DMSO. *Int J Radiat Biol*, v. 60, n. 3, p. 467-482.
- Skalbeck JD, Kinzelman JL, Mayer GC (2010) Fecal indicator organism density in beach sands: impact of sediment grain size, uniformity, and hydrologic factors on surface water loading. *J. Great Lakes Res.* 36(4):707–714. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jglr.2010.08.004>>.
- Shanab SMM, Partila AM, Ali HEA, Abdullah MA (2021) Impact of gamma-irradiated silver nanoparticles biosynthesized from *Pseudomonas aeruginosa* on growth, lipid, and carbohydrates of *Chlorella vulgaris* and *Dictyochloropsis splendida*, *J. Radiat. Res. Appl. Sci.* 14, 70–81. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/16878507.2020.1856599>>.

- Shi K, Gao Z, Shi T-Q, Song P, Ren L-J, Huang H, Ji X-J (2017) Reactive Oxygen Species-Mediated Cellular Stress Response and Lipid Accumulation in Oleaginous Microorganisms: The State of the Art and Future Perspectives. *Front. Microbiol.* 8. Disponível em: <<https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.00793>>.
- Shi TQ, Wang LR, Zhang ZX, Sun XM, Huang H (2020) Stresses as First-Line Tools for Enhancing Lipid and Carotenoid Production in Microalgae. *Front. Bioeng. Biotechnol.* 8, 1–9. Disponível em: <<https://doi.org/10.3389/fbioe.2020.00610>>.
- Shmakova NL (2002) Cytogenetic effects of low doses of radiation in mammalian cells: analysis of the hypersensitivity phenomenon and induced resistance. *Radiats Biol Radioecol*, v. 42, n. 3, p. 245-250.
- Shuaibu HK, Khandaker MU, Alrefae T, Bradley DA (2017) Assessment of natural radioactivity and gamma-ray dose in monazite rich black Sand Beach of Penang Island. Malaysia. *Mar. Pollut. Bull.* 119:423– 428. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.03.026>>.
- Sies H (1993) Strategies of antioxidant defense. *Eur J Biochem*, v. 215, n. 2. p. 213-219.
- Silveira, MAG, Oliveira JM, Aguiar VAP, Medina NH (2016) Revisiting natural radiation in Itacaré and Guarapari beaches. *J. Nucl. Physics, Mater. Sci. Radiat. Appl.* 4, p. 1-11.
- Singh H (2018) Desiccation and radiation stress tolerance in cyanobacteria. *J. Basic Microbiol.* 58, p. 813–826. Disponível em: <<https://doi.org/10.1002/jobm.201800216>>.
- Soghomonyan D, Margaryan A, Trchounian K, Ohanyan K, Badalyan H, Trchounian A (2017) The effects of low doses of gamma-radiation on growth and membrane activity of *Pseudomonas aeruginosa* GRP3 and *Escherichia coli* M17. *Cell Biochem Biophys.* 76(1-2): 209–217. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s12013-017-0831-4>>.
- Soghomonyan D, Trchounian K, Trchounian A (2016) Millimeter waves or extremely high frequency electromagnetic fields in the environment: what are their effects on bacteria. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 100(11):4761–4771. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s00253-016-7538-0>>.
- Sparrow AH (1965) Relationship between chromosome volume and radiation sensitivity in plant cells, *Cellular Radiation Biology*, p. 199-218.

- Stahl W & Sies H (1997) Antioxidant defense: vitamins E and C and carotenoids. *Diabetes*, v. 46 Suppl 2, p. S14-18. Disponível em: <<https://doi.org/10.2337/diab.46.2.S14>>.
- Stanimirovic DB (1995) Free radical-induced endothelial membrane dysfunction at the site of blood-brain barrier: relationship between lipid peroxidation, Na,K-ATPase activity, and 51Cr release. *Neurochem Res*, v. 20, n. 12, p. 1417-1427.
- Stark G (1991) The effect of ionizing radiation on lipid membranes. *Biochim Biophys Acta*, v. 1071, n. 2, p. 103-122.
- Steinhäusler F, Hofmann W, Lettner H (1994) Thoron Exposure of Man: Negligible Issue?. *Radiation Protection Dosimetry*, v. 56, p. 127-131. Disponível em: <<https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.rpd.a082436>>.
- Stevenson K, McVey A, Clark I (2016) General calibration of microbial growth in microplate readers, *Sci Rep*, v. (6), n. 38828. Disponível em: <<https://doi.org/10.1038/srep38828>>.
- Stewart JR, Gast RJ, Fujioka RS, Solo-Gabriele HM, Meschke JS, Amaral-Zettler LA, del Castillo E, Polz MF, Collier TK, Strom MS, Sinigalliano CD, Moeller PDR, Holland AF (2008) The coastal environment and human health: microbial indicators, pathogens, sentinels and reservoirs. *Environ Health* 7(S3):S3. Disponível em: <<https://doi.org/10.1186/1476-069X7-S2-S3>>.
- Swinehart DF (1962) The Beer-Lambert Law, *University of Oregon, Eugene*, v. 39, n. 7, p. 333-335. Disponível em: <<https://doi.org/10.1021/ed039p333>>.
- Tafreshi SAH, Aghaie P, Toghyani MA, Arani ARM (2020) Improvement of ionizing gamma irradiation tolerance of *Chlorella vulgaris* by pretreatment with polyethylene glycol. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/09553002.2020.1741717>>.
- Tale MP, Singh RD, Kapadnis BP, Ghosh SB (2017) Effect of gamma irradiation on lipid accumulation and expression of regulatory genes involved in lipid biosynthesis in *Chlorella sp.* Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s10811-017-1229-9>>.
- Tari M, Moussavi Zarandi SA, Mohammadi K, Zare MR (2013) The measurement of gamma-emitting radionuclides in beach sand cores of coastal regions of Ramsar, Iran using HPGe detectors. *Mar. Pollut. Bull.* 74:425–434. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2013.06.030>>.
- Tessaro LW, Murugan NJ, Persinger MA (2015) Bacterial growth rates are influenced by cellular characteristics of individual species when immersed in electromagnetic fields.

- Microbiological Research 172: 26–33. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.micres.2014.12.008>>.
- Testolin RC, Lima AOS, Strutz JM, Corrêa R, Poyer-Radetski G, Cesconetto L, Felde A, Radetski CM (2019) Remediation efficiency of different methods for rapid-response of microbiological and/or organic matter contaminated beach sand: a laboratory study. Marine Pollution Bulletin 141:84–90. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.02.020>>.
- Toby BH (2001) EXPGUI, a graphical user interface for GSAS. Journal of Applied Crystallography, v. 34, p. 210-213. Disponível em: <<https://doi.org/10.1107/S0021889801002242>>.
- Toda Matéria (2023). Disponível em: <<https://www.todamateria.com.br/espectro-eletromagnetico/>>.
- Toghyani MA, Karimi F, Tafreshi SAH, Talei D (2020) Two distinct time dependent strategic mechanisms used by *Chlorella vulgaris* in response to gamma radiation. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s10811-020-02106-3>>.
- Tuttle SW (1992) Sensitivity to chemical oxidants and radiation in CHO cell lines deficient in oxidative pentose cycle activity. Int. J. Radiat. Oncol. Biol. Phys., v. 22, v. 4, p. 671-675.
- Tuttle SW (2000) Glucose-6-phosphate dehydrogenase and the oxidative pentose phosphate cycle protect cells against apoptosis induced by low doses of ionizing radiation. Radiat Res, v. 153, n. 6, p. 781-787.
- Tropper P, Manning CE, Harlov DE (2011) Solubility of CePO₄ monazite and YPO₄ xenotime in H₂O and H₂O-NaCl at 800°C and 1GPa: implications for REE and Y transport during high-grade metamorphism. Chem. Geol. 282:58–66. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2011.01.009>>.
- UNSCEAR (1988) Sources and effects of ionizing radiation. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, United Nations, New York, Annex A, p. 55-56. Disponível em: <<https://www.unscear.org/unscear/en/publications/1988.html>>.
- UNSCEAR (1993) Sources and effects of ionizing radiation. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, United Nations, New York, Annex A, p. 39. Disponível em: <<https://www.unscear.org/unscear/en/publications/1993.html>>.

- UNSCEAR (1996) Sources and effects of ionizing radiation. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, United Nations, New York. Disponível em: <<https://www.unscear.org/unscear/en/publications/1996.html>>.
- UNSCEAR (2000) Sources and effects of ionizing radiation. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, United Nations, New York. Disponível em: <https://www.unscear.org/unscear/en/publications/2000_1.html> e <https://www.unscear.org/unscear/en/publications/2000_2.html>.
- UNSCEAR (2017) Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation 2018 Report: Annex C- Biological Mechanisms Relevant for the Inference of Cancer Risks from Low-Dose and Low-dose-rate Radiation, United Nations Fund for Population Activities. Disponível em: <<https://www.unscear.org/unscear/en/publications/2017.html>>.
- Varnes ME (1988) Inhibition of pentose cycle of A549 cells by 6-aminonicotinamide: consequences for aerobic and hypoxic radiation response and for radiosensitizer action. NCI Monogr, v. 6, p. 199-203.
- Vasconcelos DC, Lima CPB, Oliveira AH, Santos TO, Rocha Z, Menezes MAB (2011) Determination of Natural Radioactivity in Beach Sand in the Extreme South of Bahia, Brazil, Using Gamma Spectrometry. Radiation Protection and Environment, v. 0972-0464, p. 178-184.
- Vasconcelos DC, Reis P, Pereira C, Oliveira A, Santos T, Rocha Z (2013) Modelling natural radioactivity in sand beaches of Guarapari, Espírito Santo State, Brazil. World Journal of Nuclear Science and Technology 3(2):65–71. Disponível em: <<https://doi.org/10.4236/wjnst.2013.32011>>.
- Veiga R, Sanches N, Anjos RM, Macario K, Bastos J, Iguatemy M, Aguiar JG, Santos AMA, Mosquera B, Carvalho C, Filho MB, Umisedo NK (2006) Measurement of natural radioactivity in Brazilian beach sands. Radiat. Meas. 41:189–196. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2005.05.001>>.
- Ventura G, Mottana A, Parodi G, Raudsepp M, Bellatreccia F, Caprilli E, Rossi P, Fiori S (1996) Monazite-huttonite solid-solutions from the Vico Volcanic Complex, Latium. Italy. Mineral. Mag. 60:751–758. Disponível em: <<https://doi.org/10.1180/minmag.1996.060.402.04>>.
- Yu TW & Anderson D (1997) Reactive oxygen species-induced DNA damage and its modification: a chemical investigation. Mutat. Res., v. 379, n. 2, p. 201-210.

- Yu X, Chen L, Zhang W (2015) Chemicals to enhance microalgal growth and accumulation of high-value bioproducts. *Front. Microbiol.* 6. Disponível em: <<https://doi.org/10.3389/fmicb.2015.00056>>.
- Wang, S-B, Chen, F, Sommerfeld M, Hu Q (2004) Proteomic analysis of molecular response to oxidative stress by the green alga *Haematococcus pluvialis* (Chlorophyceae). *Planta* 220, 17–29. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s00425-004-1323-5>>.
- Wang G, Deng S, Li C, Liu Y, Chen L, Hu C (2012) Damage to DNA caused by UV-B radiation in the desert cyanobacterium *Scytonema javanicum* and the effects of exogenous chemicals on the process. *Chemosphere* 88:413–417. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2012.02.056>>.
- Whitman RL & Nevers MB (2003) Foreshore sand as a source of *Escherichia coli* in nearshore water of a Lake Michigan beach. *Appl. Environ. Microbiol.* 69(9):5555–5562. Disponível em: <<https://doi.org/10.1128/AEM.69.9.5555-5562.2003>>.
- Whitman RL, Harwood VJ, Edge TA, Nevers MB, Byappanahalli M, Vijayavel K, Brandão J, Sadowsky MJ, Alm EW, Crowe A, Ferguson D, Ge Z, Halliday E, Kinzelman J, Kleinheinz G, Przybyla-Kelly K, Staley C, Staley Z, Solo-Gabriele HM (2014) Microbes in beach sands: integrating environment, ecology and public health. *Rev. Environ. Sci. Bio/Technology* 13:329–368. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s11157-014-9340-8>>.
- William FK (1972) Response of the alga *Chlorella sorokiniana* to ⁶⁰Co gamma radiation. *Nature* 236, 178–9. Disponível em: <<https://doi.org/10.1038/236178a0>>.
- Wojdyr M (2010) Fityk: a general-purpose peak fitting program. *J. Appl. Crystallogr.* 43 : 1126 – 1128. Disponível em: <<https://doi.org/10.1107/S0021889810030499>>.
- Wolbarst AB, White SC, Mallya SM (2012) Update on the biological effects of ionizing radiation, relative dose factors and radiation hygiene. *Aust Dent J*, 57 Suppl 1, p. 2-8.
- Wolbarst AB, Wiley AL, Nemhauser JB, Christensen DM (2010) Medical Response to a Major Radiologic Emergency: A Primer for Medical and Public Health Practitioners. *Radiology*, 254, n. 3, p. 660-677.
- Wu L, Wu J, Liu Y, Gong X, Xu J, Lin D, Dong Y (2016) The Rice Pentatricopeptide Repeat Gene TCD10 is Needed for Chloroplast Development under Cold Stress. *Rice* 9, 67. Disponível em: <<https://doi.org/10.1186/s12284-016-0134-1>>.

Zapp N, Cucinotta F, Atwell W (2002) A comparison of quality factors and weighting factors for characterizing astronaut radiation exposures. *Advances in Space Research*, 30, n. 4, p. 965-974.

Ziuzina D, Boehm D, Patil S, Cullen PJ, Bourke P (2015) Cold plasma inactivation of bacterial biofilms and reduction of quorum sensing regulated virulence factors. Disponível em: <<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0138209>>.

7. APÊNDICE

DADOS SUPLEMENTARES DOS RESULTADOS COM MICROALGAS

Tabela 4 - Dados da curva de crescimento, linha de tendência exponencial e tempo de geração. Fonte: Produção do próprio autor.

Tempo (dia)	Absorbância (680 nm)					
	Controle			Tratado		
0	0,06	0,05	0,06	0,072	0,068	0,072
1	0,1	0,16	0,14	0,144	0,182	0,116
2	0,47	0,47	0,44	0,441	0,398	0,379
3	0,83	0,79	0,73	0,723	0,684	0,643
4	1,18	1,12	1,12	1,099	0,998	1,028
5	1,71	1,55	1,55	1,525	1,389	1,435
6	2,28	2,1	1,99	2,021	1,827	1,822
7	2,91	2,72	2,38	2,459	2,235	2,288
8	3,93	3,82	3,13	2,881	2,453	2,607
9	4,47	4,17	3,69	3,159	3,237	3,038
10	5,31	5,04	5,04	3,61	3,638	3,496

Tabela 5 - Dados de EDS. Fonte: Produção do próprio autor.

Elemento	Peso (%)								
	C1			C2			C3		
Cálcio	1,19	0,77	1,58	1,54	1,56	0,84	0,96	1,65	1,58
Sódio	0,36	0,73	1,43	1,23	1,37	0,84	1,66	1,96	1,84
Magnésio	0,22	0,18	0,35	0,29	0,29	0,19	0,33	0,39	0,37
	T1			T2			T3		
Cálcio	1,38	1,44	1,15	1,56	1,62	1,17	2,03	1,52	2,35
Sódio	1,42	1,66	1,49	1,44	1,18	0,95	2,26	1,28	1,81
Magnésio	0,31	0,30	0,39	0,30	0,31	0,26	0,45	0,30	0,45

Tabela 6 - Dados da análise elementar por CNHS. Fonte: Produção do próprio autor.

Elemento	Peso (%)		
	Controle		
Nitrogênio	9,0345001220	8,4753952030	8,1458892820
Carbono	50,7066345200	50,3330345200	46,4769287100
Hidrogênio	7,4420599940	7,4386892320	6,6358332630
Enxofre	0,2077275813	0,2209753841	0,2231100202
	Tratado		
Nitrogênio	7,9400639530	7,6324381830	8,9567508700
Carbono	49,3324165300	48,7062568700	50,4833412200
Hidrogênio	7,2118196490	7,2257990840	7,4364514350
Enxofre	0,2925132811	0,2088226229	0,2099321932

Tabela 7 - Dados do teor de proteínas. Fonte: Produção do próprio autor.

Proteína (mg g ⁻¹)					
C1	C2	C3	T1	T2	T3
147,6	137,4	145,2	144,0	135,5	169,3

Tabela 8 - Dados do teor de lipídios. Fonte: Produção do próprio autor.

Lipídios (mg g ⁻¹)					
C1		C2		C3	
257,1960	246,6980	280,4140	258,8440	220,4400	251,2000
T1		T2		T3	
293,3030	283,1890	304,9040	315,4180	178,3470	47,2094

Tabela 9 - Dados do teor de carboidratos. Fonte: Produção do próprio autor.

Carboidratos totais (mg g ⁻¹)					
C1	C2	C3	T1	T2	T3
335,8449	199,7135	204,8596	227,778	291,3874	202,9497

Tabela 10 - Dados da atividade antioxidante. Fonte: Produção do próprio autor.

Absorbância (680 nm)					
C1	C2	C3	T1	T2	T3
0,328	0,320	0,326	0,347	0,355	0,343

IMAGEM DE EQUIPAMENTOS

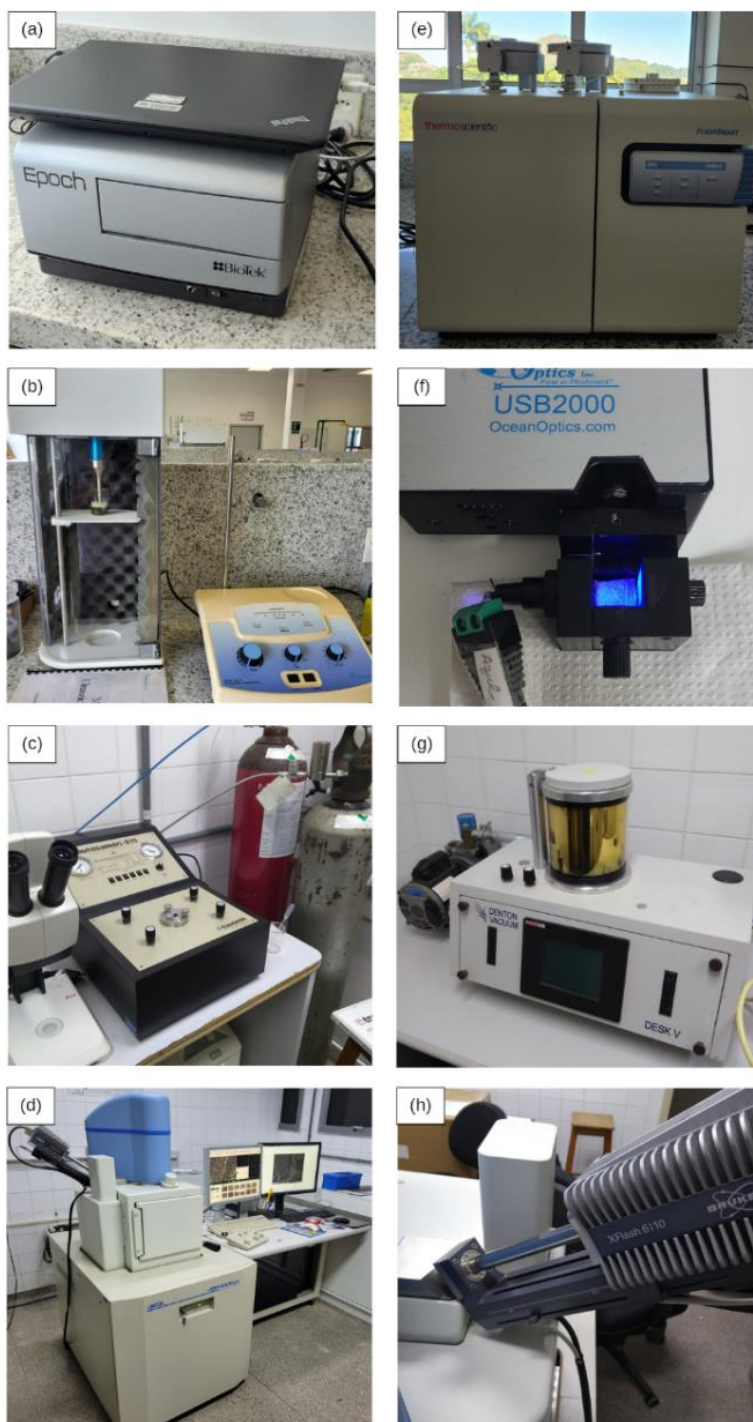


Figura 35 - Alguns equipamentos utilizados na investigação dos efeitos da radiação gama da areia monazítica de Meaípe em bactérias e microalgas: (a) espectrofluorímetro da Ocean Optics UBS 200; (b) ultrassom; (c) ponto crítico (Autosandri-815, Tousimis); (d) microscopia eletrônica de varredura modelo JEM6610 LV (Jeol) com filamento de tungstênio; (e) analisador elemental CHNS Flash Smart; (f) espectrofotômetro DR 5000; (g) metalizador (Desk V, Denton Vácuo); (h) EDS detector XFlash® Detector 6/10. Fonte: Produção do próprio autor.



Figura 36 - Equipamento de difração de raios X (DRX) com configuração Bragg-Brentano (Ultima IV, Rigaku). Fonte: Produção do próprio autor.