



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

Lucas Morato Silveira

**DETERMINAÇÃO DOSIMÉTRICA DOS TRABALHADORES EXPOSTOS À
RADIAÇÃO IONIZANTE NATURAL PRESENTES EM MINAS DE URÂNIO:
ABORDAGEM DE SIMULAÇÃO MONTE CARLO**

Orientador: Prof Dr. William de Souza Santos (UFU)

Monte Carmelo - MG

Setembro de 2023

Lucas Morato Silveira

**DETERMINAÇÃO DOSIMÉTRICA DOS TRABALHADORES EXPOSTOS À
RADIAÇÃO IONIZANTE NATURAL PRESENTES EM MINAS DE URÂNIO:
ABORDAGEM DE SIMULAÇÃO MONTE CARLO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Geologia do Instituto de Geografia da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Bacharel em Geologia.

Orientador: Prof Dr. William de Souza Santos (UFU)

Monte Carmelo - MG

Setembro de 2023

Lucas Morato Silveira

DETERMINAÇÃO DOSIMÉTRICA DOS TRABALHADORES EXPOSTOS À
RADIAÇÃO IONIZANTE NATURAL PRESENTES EM MINAS DE URÂNIO:
ABORDAGEM DE SIMULAÇÃO MONTE CARLO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Geologia do Instituto de Geografia da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Bacharel em Geologia.

Monte Carmelo, 18/08/2023

Banca Examinadora

William de Souza Santos (Orientador)
Universidade Federal de Uberlândia

Profª. Dra. Ana Paula Perini
Universidade Federal de Uberlândia

Prof. Dr. Felix Nannini
Universidade Federal de Uberlândia

AGRADECIMENTOS

Se encerra um importante período em minha vida, um período confuso e carregado de emoções divergentes, sendo aluno da primeira turma do curso de geologia, muitas lutas, experiências, conquistas e perdas fizeram parte desse caminho. Planejado para formar no começo de 2020, com a chegada da pandemia não imaginava que mudaria tanta coisa em minha vida e que essas transformações me levaria a um caminho que somou mais 3 anos para a entrega do trabalho de conclusão. Hoje, na entrega do presente trabalho me sinto aliviado e feliz em saber que finalmente chegou o momento de fechar esse ciclo.

Agradeço aos meus pais por todos os ensinamentos de vida e por terem possibilitado viver essa e tantas outras experiências, que hoje fazem parte da minha história.

Um carinho especial para minha namorada Pamylla Lima, que entrou na minha vida em 2019 e esteve ao meu lado durante todo esse tempo, vivendo emoções boas e ruins, sem dúvida foi a pessoa essencial para a conclusão desse ciclo.

Aos amigos da República QG, uma república excêntrica carregada de histórias e lembranças, que certamente marcou a vida de todos os membros que compartilharam esse caminho.

Meu amigo Marquinho, grande marquinho, esteve presente desde 2015, é o tipo pessoa difícil de encontrar, com uma dedicação invejável, coração imenso e uma humildade que presenciei eu poucas pessoas durante toda minha vida.

Por fim, agradeço a todo o corpo docente e contribuintes da Universidade Federal de Uberlândia, e um agradecimento especial para os professores: Felix Nannini, Liliane Ibrahim e William Santos, fizeram um diferença enorme para a minha formação e tiveram uma contribuição gigante para o desenvolvimento do curso.

Muito obrigado a todos vocês, foi uma prazer compartilhar essa história.

RESUMO

Neste trabalho, foi avaliada a exposição de trabalhadores suscetíveis a materiais radioativos de ocorrência natural (NORMs) presentes nas estruturas de uma mina de urânio. Os cenários de exposição computacional foram modelados utilizando o código de transporte da radiação MCNPX2.7.0 e os trabalhadores foram representados por simuladores antropomórficos adultos de referências da Comissão Internacional em Proteção Radiológica (ICRP). O ambiente representado para o estudo foi referente a mina de Cigar Lake Canada. O simulador antropomórfico feminino foi mais exposto do que o masculino devido a sua maior proximidade dos órgãos radiosensíveis com a fonte principal (o solo). O fator de conversão para dose efetiva, derivado da média das doses equivalentes dos dois simuladores, foi de 1,2 Sv/Gy, que é superior em 70% do valor recomendado pelo Comitê Científico das Nações Unidas sobre os Efeitos da Radiação Atômica (UNSCEAR).

Palavras-chaves: Minas de urânio, radiação, dosimetria, método Monte Carlo, simuladores antropomórficos computacionais.

ABSTRACT

In this study, the exposure of workers susceptible to naturally occurring radioactive materials (NORMs) present in the structures of a uranium mine was assessed. Computational exposure scenarios were modeled using the radiation transport code MCNPX2.7.0, and workers were represented by adult anthropomorphic reference phantoms from the International Commission on Radiological Protection (ICRP). The environment represented for the study was related to the Cigar Lake mine in Canada. The female anthropomorphic phantom was more exposed than the male due to its closer proximity to radiosensitive organs with the main source (the soil). The conversion factor for effective dose, derived from the average of equivalent doses from both phantoms, was 1.2 Sv/Gy, which is 70% higher than the value recommended by the United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR).

Keywords: Uranium mines, radiation, dosimetry, Monte Carlo method, Computacional anthropomorphic phantomns.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Distribuição global dos principais depósitos economicamente ativos em 2019. Totalizando 95% entre países apresentados, os 5% restantes estão distribuídos por outras 21 países, considerados irrelevantes para o contexto econômico	9
Figura 2. Localização geográfica da Bacia Athabasca e Cigar Lake	13
Figura 3. Localização e litologias superficiais da Bacia Athabasca.....	14
Figura 4. Estratigrafia genérica do Grupo Wollaston.....	16
Figura 5. Simuladores antropomórficos de referência da publicação da ICRP 110 com base em voxel adulto masculino (à direita) e feminino (à esquerda)	20
Figura 6. Vista das principais camadas da mina de urânio e do simulador antropomórfico computacional do interior do salão	21
Figura 7. Geiger-Müller localizado no interior do salão a 1 m acima do piso do salão	23
Figura 8. FCs para dose equivalente dos simuladores antropomórfico computacionais masculino e feminino	26
Figura 9. Resultados de dose efetiva obtidos no presente trabalho utilizando os simuladores antropomórficos masculino (AM) e feminino (AF) versus dose efetiva fornecida por PEREIRA et al. 2019 calculados para os simuladores antropomórficos MASH3 e FASH3.....	31

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1. Características da matriz de voxel dos simuladores antropomórfico masculino e feminino de referência da publicação ICRP 110 (ICRP,2009).....	20
Tabela 2. Coeficientes de conversão para dose equivalente normalizados pela dose absorvida no volume de um contador <i>Geiger-Müller</i> (em Sv/Gy) calculados para os profissionais no interior da mina de urânio. Entre parênteses estão os erros relativos percentuais.....	27
Tabela 3. FCs[HT] dos simuladores antropomórficos masculino (MASH3) e feminino (FASH3), referentes ao OR-01 (Granito Ornamental 01 classificado por Pereira et al. 2019).....	30
Tabela 4. Comparação dos FCs para dose efetiva obtido por este estudo e dados da literatura.....	32

SUMÁRIO

1. Introdução	7
1.2 Objetivos.....	10
1.3 Localização	11
2. Revisão Bibliográfica	12
2.1 Localização	12
2.2 Contexto Geológico Regional	13
2.2.1 Embasamento pré Athabasca	14
2.2.2 Formação e subdivisão da Bacia de Athabasca	16
3. Materiais e Métodos	19
3.1 Código de transporte de radiação MCNPX2.7.0	19
3.2 Simuladores antropomórficos computacionais, adulto masculino e feminino, de referência da ICRP 110.....	19
3.3 Modelagem dos depósitos de urânio	21
3.4 Modelagem da fonte de radiação.....	23
3.5 Cálculos dosimétricos.....	24
4. Resultados	25
5. Discussão	29
6. Conclusão	33

1. INTRODUÇÃO

Conhecidos como materiais radioativos de ocorrência natural (NORMs), são elementos que constituem parte da Terra e encontram-se presentes na crosta terrestre sendo produtos de decaimento radioativo das séries do urânio (^{238}U), tório (^{232}Th) e do radionuclídeo potássio (^{40}K) (OJOVAN & LEE 2014). Os NORMs estão presentes na água, rochas, solos e ar, referindo ao próprio nome, são elementos que emitem radiação de forma natural sem necessitar de um estímulo, dos quais são responsáveis por 86% da dose efetiva de radiação recebida por humanos (FILGUEIRAS et al., 2020; UNSCEAR, 2000). A presença desses radionuclídeos no meio ambiente está frequentemente relacionada às condições geológicas da região (BEZUIDENHOUT, 2015). Rochas como granito, xisto, determinadas rochas hidrotermais e sedimentares contêm concentrações mais altas de radionuclídeos de ocorrência natural (UNSCEAR, 2000). Alguns minerais podem influenciar a concentração de NORMs nessas rochas como: uranita, carnotita, autunita para urânio, monazita, torianita para tório e silvina, carnalita para potássio (GERALDES, 2010). Atividades humanas como a mineração têm o potencial de elevar os níveis de radioatividade na crosta terrestre, ao introduzir minérios subterrâneos com radionuclídeos naturais à superfície da Terra. Esses radionuclídeos são posteriormente liberados quimicamente no meio ambiente por meio de diversos processos de extração e beneficiamento do minério (IAEA, 2011).

Um dos principais órgãos que faz recomendações em proteção radiológica é a Comissão Internacional em Proteção Radiológica (ICRP). Os limites de doses recomendados pela ICRP foram praticamente adotados em todo o mundo, mas que ao longo dos anos vêm mudando à medida que mais informações e estudos sobre os efeitos da radiação no corpo humano se tornaram disponíveis. No entanto, apenas nos últimos 40 anos que ocorreu uma grande mudança nos limites recomendados para trabalhadores em 1990 (ICRP, 1990). As recomendações mais recentes da ICRP sobre padrões e limites de dose foram publicadas em 2007, sendo a versão ICRP 103 aberta para os usuários (ICRP, 2007). Essas recomendações atualizam as recomendações anteriores publicadas em 1990 (ICRP, 1990).

No contexto do transporte de radiação, atualmente, o método Monte Carlo é uma ferramenta matemática e computacional bastante utilizada para cálculos dosimétricos, que na prática é difícil ou até mesmo impossível de obter. Neste contexto, este método pode ser visto como uma técnica estatística utilizada para simular fenômenos físicos complexos, incluindo o transporte de partículas e a interação com a matéria no contexto da radiação. Ele foi originalmente proposto por Stanislaw Ulam e John von Neumann na década de 1940 como uma abordagem para resolver problemas matemáticos utilizando a geração de números arbitrários. No entanto, sua aplicação na área da radiação começou a ser desenvolvida nas décadas seguintes (ECKHARDT, 1987).

Dentre vários códigos de transporte de radiação, o MCNP (*Monte Carlo N-Particle*) é um dos mais utilizados na modelagem e transporte de radiação para determinar grandezas dosimétricas de indivíduos expostos nos mais variados ambientes (GOORLEY et al., 2016).

O ranking de distribuição global dos recursos de urânio disponível pelo mundo recebe como métrica a concentração e refinamento do elemento para a forma em que pode ser comercializado, representado por U₃O₈ possuindo aproximadamente 85% de U economicamente conhecido de *yellow cake*. A classificação dos maiores produtores de U pelo mundo é alterada periodicamente. Atualmente, de acordo com a IAEA (International Atomic Energy Agency) tem-se na Figura 1 a seguinte divisão da distribuição dos depósitos de urânio economicamente ativos no mundo (IAEA, 2020).

Figura 1: Distribuição global dos principais depósitos economicamente ativos em 2019. Totalizando 95% entre países apresentados, os 5% restantes estão distribuídos por outras 21 países, considerados irrelevantes para o contexto econômico.



Fonte: Uranium Resources IAEA 2020.

No mundo existem 14 tipos de depósitos de urânio, mas apenas 6 são economicamente significantes: Primários (U introduzido por processos magmáticos) IOCG e Depósitos intrusivos, Secundários (U dissolvido por fluidos e depositados em fase de redução) Depósitos de discordância litológica, Depósitos em arenitos, calcetres mineralizados e conglomerados mineralizados (OECD/NEA-IAEA, 2014). Os depósitos de Urânio comportam um conjunto de elementos que possuem um teor significativo de níquel (Ni) e arsênio (As), apresentando quantidades menores de cobalto (Co) e concentrações variáveis de cobre (Cu), vanádio (V), chumbo (Pb), zinco (Zn), molibdênio (Mo), bismuto (Bi), céσιο (Ce) e terras raras. Sendo os principais minerais de urânio: Uraninita, Brannerita, Carnotita, Uranofano e Autunita.

Esse estudo busca contribuir com informações e dados sobre os reais impactos causados pela radiação que uma mina de urânio pode provocar nos trabalhadores, uma vez que as condições de exploração e armazenamento ainda geram dúvida sobre a real exposição e malefícios que pode ocasionar aos funcionários da mina, cidades e vilarejos próximos. Dentre os efeitos das contaminações, encontra-se, em primeiro lugar, o desenvolvimento de câncer de pulmão, sobretudo, para minas subterrâneas, que é carente de ventilação (KELLY-REIF et al., 2020).

Neste trabalho foi avaliado o depósito de Cigar Lake (depósito de descontinuidade) no Canadá. Esse depósito foi descoberto em 1981, resultado de levantamentos geofísicos aéreos e físicos, sucedido por uma série de sondagens, em 1982 a 1986 ocorreu a delimitação do depósito após várias campanhas de sondagens no local. Campanhas adicionais foram realizadas entre 2007 a 2012, com objetivo de estudos geotécnicos, geofísicos e delineamento do corpo de minério. Em maio de 2015 iniciam-se as operações comerciais (CAMECO 2016).

1.2 OBJETIVO

Com o objetivo de contribuir com o meio acadêmico e social, o presente estudo buscou apresentar dados e informações sobre o real impacto que a radiação, comumente presente neste tipo de ambiente, pode causar na saúde dos trabalhadores. Para alcançar os objetivos, foi utilizado o código de transporte de radiação MCNPX2.7.0, para modelar a mina de urânio. No interior da mina, foram posicionados os simuladores

antropomórficos computacionais para representarem os trabalhadores. Para calcular com precisão as doses de radiação em diferentes órgãos e tecidos destes indivíduos, foram utilizados simuladores antropomórficos computacionais adultos, masculino e feminino, de referência da Comissão Internacional em Proteção Radiológica (ICRP), que possuem dezenas de órgãos com importâncias dosimétricas.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Localização

A localização da Mina de Cigar Lake está disposta a 660 km ao norte da cidade de Saskatoon, possuindo as seguintes coordenadas: latitude 58° 04' 14" norte e longitude 104° 32' 18" oeste. A propriedade pode ser acessada durante todo ano em diferentes climas tanto em vias terrestres quanto aéreas. Encontra-se 490 m acima do nível do mar e a área da mina possui uma cobertura vegetal variando de 30 a 50 m. O ambiente e topografia são típicos das florestas de taigas presentes em grande parte da Bacia de Athabasca, ao norte de Saskatchewan na Figura 2:

Figura 2: Localização geográfica da Bacia de Athabasca e Cigar Lake.



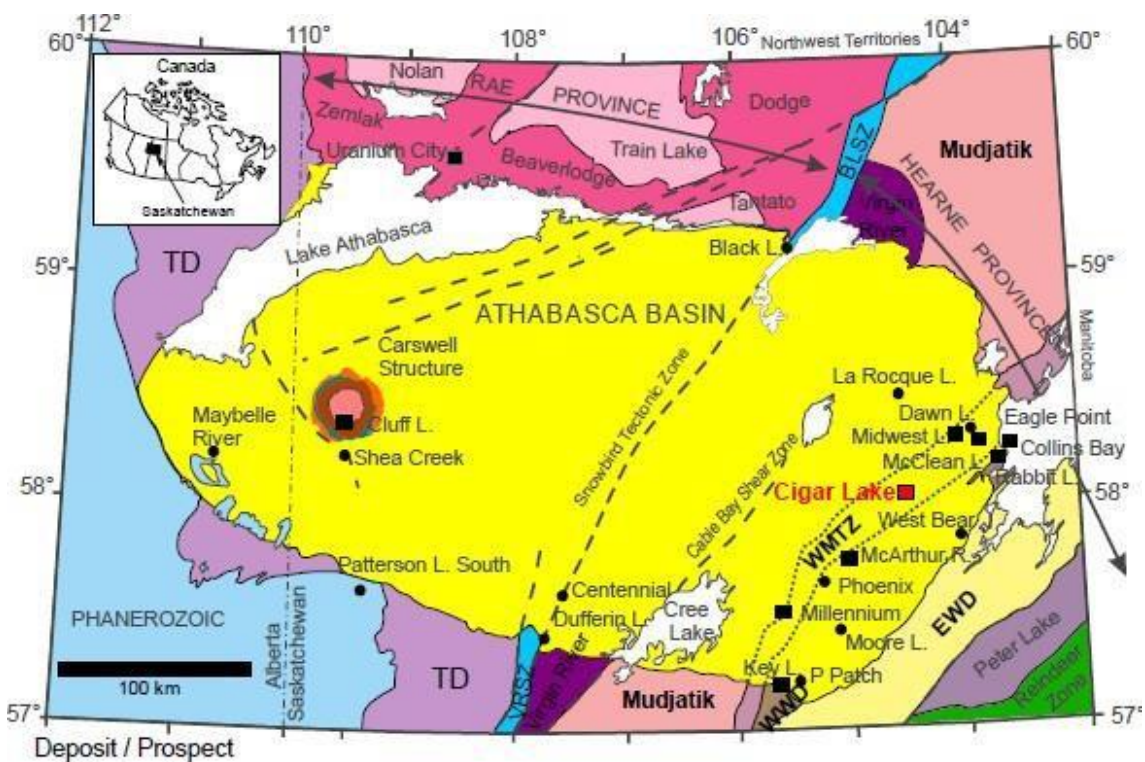
Fonte: CAMECO (2016).

2.2 Contexto Geológico Regional

O depósito Cigar Lake está localizado na parte oeste da bacia de Athabasca, sendo um depósito de descontinuidade e classificado como um depósito World Class, possui 613.400 T de urânio apresentando um teor médio de aproximadamente 16% U₃O₈ (CAMECO, 2016), permitindo ser classificado como o segundo maior depósito de alto teor de urânio do mundo. O depósito é caracterizado como uma estrutura alongada na direção leste-oeste com uma extensão de aproximadamente 2 km, com altura variando de 10-20 m e largura de 10 a 100 m (CAMECO, 2016). Na figura 3 pode-se observar que o depósito encontra-se contido na discordância entre: escudo pré-cambriano ao norte de Saskatchewan e Grupo Athabasca (BRUENTON 1993). O

escudo é composto por rochas arquenas (ortognaisses) e paleoproterozóico (metassedimentos e rochas plutônicas do Domínio Wollaston, nas quais foram afetadas em escalas variáveis pela orogênese hudoniana (1800-1850 Ma), vários outros eventos tectono-metamórficos permitiram a constante evolução até o neo-helikiano (1500-1350 Ma), período em que a bacia de Athabasca foi formada contendo principalmente litoclásticos e ortoconglomerados (MARTZ et al., 2017).

Figura 3: Localização e litologias superficiais da Bacia Athabasca.



Fonte: MARTZ et al., (2017)

2.2.1 Embasamento pré Athabasca

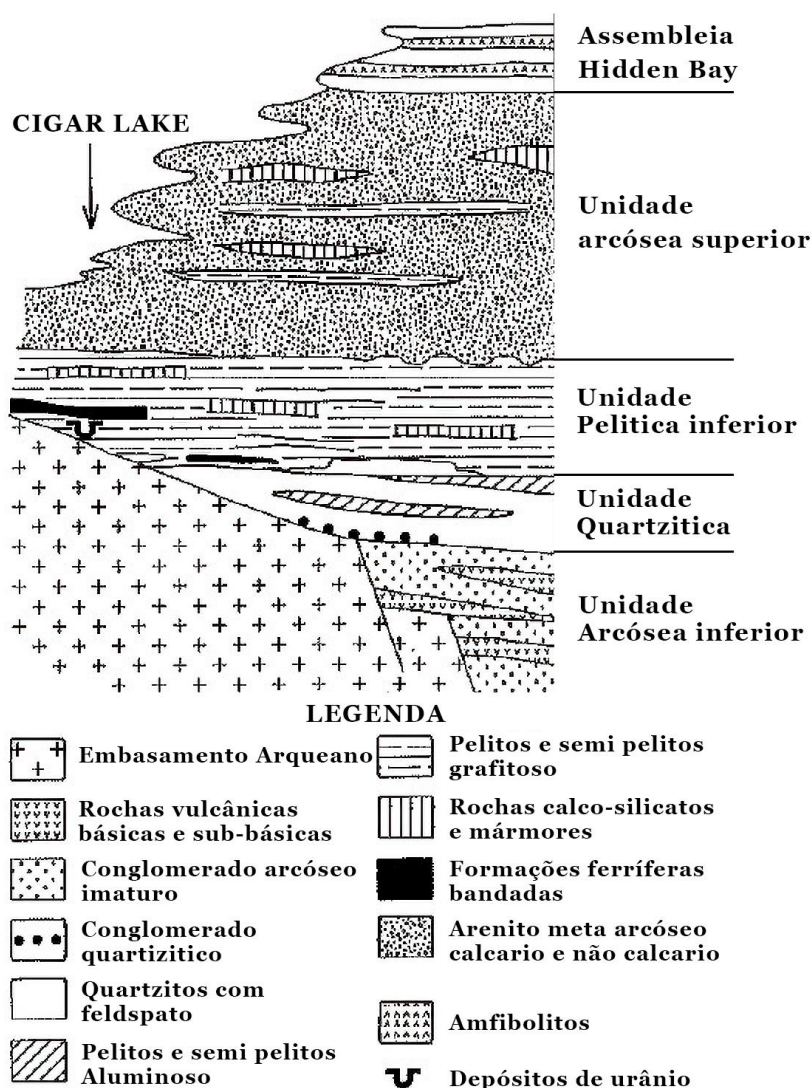
Foram definidos em 1977 por Lewry e Sibbald 3 grandes unidades litoestruturais formadas antes da Bacia Athabasca, são elas: Cráton Ocidental, Zona do Lago Reindeer e Zona do Lago Cree. A Zona do Lago Cree pode ser dividido em outros três subdomínios litoestruturais: Domínios Virgin River, Mudjatik e Wollaston (LEWRY E SIBBALD 1977). A maioria dos depósitos descobertos nessa região encontra-se localizada acima da transição entre os Domínios Mudjatik e Wollaston, formados há 1800 Ma durante a colisão continente-continente da orogenia Trans-Hudson (ANNESLEY et al., 2005).

O Domínio Mudjatik foi entendido como um cinturão de tendência para nordeste

limitado por cisalhamento, composto por ortognaisses félsicos classificados como rochas arqueanos, sendo rochas rupracrustais contendo anfibolitos, metapelitos e pequenas faixas de BIFs (formações ferríferas bandadas) descontínuas. (SIBBALD 1983, modificado por (ANNESLEY et al., 2005).

O Domínio Wollaston primeiramente interpretado sendo uma sucessão supracrustal de 2,5 a 4 km de espessura (RAY 1977). Hoje é considerado como um cinturão de dobramentos de empurrão de inclinação para nordeste, de forma generalizada definido como metassedimentos do paleoproterozóico sobrepostos a ortognaisses arqueanos (ANNESLEY et al., 2005, modificado por MARTZ et al., 2017). O grupo de Wollaston pode ser dividido entre 3 ou 4 unidades litoestratigráficas (ANNESLEY et al., 2005; YEO e DELANEY 2007; JEANNERET et al. 2016; MARTZ et al., 2017) essa divergência entre o número real das unidades se deve ao motivo de alguns autores considerem a unidade basal, composta de quartzitos, e outros autores não concordam, uma vez tal unidade possui pequena espessura e não há evidências na porção oeste. Sendo assim, podemos dividir em 3 unidades principais (Figura 4), nas quais podem ser interceptadas por uma sequência antecedente em alguns locais, respectivamente sendo composta por: metassedimentos quartzíticos a arcóseos, conglomerado de composição predominante de quartzo e muscovita biotita xisto. Conseguimos classificar em 3 unidades principais, respectivamente: a primeira unidade é composta predominantemente por pelitos ao longo de sua extensão há camadas quartzíticas, cálcio-silicatos e mármore (RAY 1977), a segunda unidade é compreendida por uma sequência ampla e espessa de meta arcóseo calcário e meta arcóseo não calcário, podendo estar intercalado com metassedimentos de calco silicatos, carbonáticos e pelitos (HOEVE and SIBBALD 1978). Esse horizonte de transição entre a primeira unidade e a segunda é considerado a região com maior favorabilidade para a formação de depósitos de urânio (SIBBALD 1983). Por fim, a última unidade, nomeada de Hidden Bay, por estar presente somente na porção do Wollaston Lake, sendo uma unidade representada por anfibolitos e quartzitos há presença de lentes de calcário e pelito grafitoso (SIBBALD 1983).

Figura 4: Estratigrafia genérica do Grupo Wollaston.



Fonte: LEWRY and SIBBALD (1980) modificado por BRUNETON (1993), modificado pelo autor.

2.2.2 Formação e subdivisão da Bacia de Athabasca

A bacia de Athabasca foi formada por volta de 1710-1700 (MERCADIER et al. 2013, JEANERET et al. 2017), constituída por um conjunto de sub bacias com orientação NE-SW, a bacia é composta por espessas camadas clásticas Paleoproterozóicas consequência de uma súbita exumação do Cinturão Orogênico Trans-Hudson (RAMAEKERS 1990). A bacia pode ser subdividida em três sub-bacias, entre as três temos a principal para depósitos de urânio a sub-bacia Cree, localizada na porção leste da

bacia de Athabasca (ALEXANDRE 2020). Em todas sub-bacias há sequências de quartzito arenito, maduro, fluvial a marinho depositados próximos da costa e plataforma

rasa (RAMAEKERS 1976, 1990, JEFFERSON et al. 2007^a). Hoje temos a espessura das camadas sedimentares na bacia de Athabasca por volta de 1 a 2 km (ALEXANDRE 2020), porém há estudos que mostram que tais camadas já atingiram aproximadamente 3 km de espessura (CHI et al. 2018).

Seguindo a divisão de RAMAEKERS et al. (2007) é possível fazer a divisão da bacia de Athabasca em 4 sequências principais separadas por discordâncias. Respectivamente, primeira sequência correspondente a Formação Fair Point verificada na margem oeste, possuindo mais de 380 m de espessura. Dividido em dois Membros Lobstick composto por paraconglomerado intercalado com quartzo-arenito grosso com lentes de filito avermelhado, Beartooth como segundo membro, constituído por sublitarenito de matriz argilosa.

Segunda sequência representada pelas Formações Read, Smart e Manitou Falls (sendo a Formação mais importante e representativa da Bacia de Athabasca). A Formação Read com aproximadamente 15 m assemelha-se muito com o Membro Lobstick da Formação Fair Point possuindo as mesmas características, adicionando apenas o aparecimento de conglomerados com seixos de quartzo. Já a Formação Smart possui aproximadamente 150 m, formada predominantemente de arenito avermelhado com lentes de filito. E a Formação Manitou Falls com espessura de quase 1 km, por sua vez pode ser dividida em 5 membros: Bird (conglomerado com seixos de quartzo, apresentando lamina de filito e siltito), Raible (representado por quartzo-arenito a sublitarenito possuindo porções com baixo grau de maturidade podendo evidenciar intraclastos argilosos), Warnes (retratado por quartzo-arenito rico em intraclastos de argila), Collins (descrito como camadas de quartzo-arenitos intercalado com camadas de filito, aparecendo conglomerados pontualmente) e Dunlop (também composto por quartzo-arenito mas com concentrações de intraclastos de argila e lentes de filitos maiores quando comparados aos membros anteriores).

Terceira sequência constituída pelas Formações Lazenby Lake e Wolverine Point. A Formação Lazenby Lake possui aproximadamente 460 m de espessura e é composta predominantemente por arenitos imaturos e conglomerados possuindo lâminas de silte localmente. Já a Formação Wolverine Point possui cerca de 200 m podendo ser dividido em 2 membros, respectivamente: Brule, representado por quartzo arenito grosso com lentes de tufas intercaladas, com porções de paraconglomerado e Membro Claussen, possuindo quartzo arenito grosso com camadas finas de filito espalhadas.

Quarta sequência, representada pelas Formações Locker Lake, Otherside, Douglass e Carswell. A Formação Locker Lake possui cerca de 300 m de espessura, composta de quartzito arenito semi maduro a imaturo de granulação grossa com camadas finas de conglomerados. Otherside com 200 m de espessura representado por quartzito arenito semi maduro a imaturo de granulação grossa com camadas de filito de cor cinza escuro. Douglass possui 300 m e é composto por camadas carbonáticas finas de cor cinza escuro com camadas finas de quartzito arenito fino a muito fino. Por último a Formação Carswell, possuindo aproximadamente 500 m de espessura e subdivida em unidades carbonáticas superiores e inferiores.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Código de transporte de radiação MCNPX2.7.0

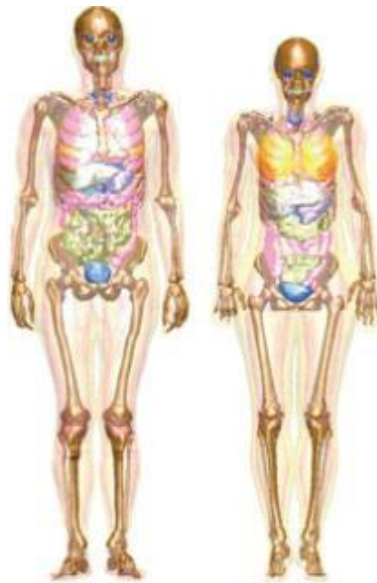
Neste estudo foi utilizado o código de Monte Carlo, MCNPX2.7.0 (PELOWITZ, 2011) para simular o transporte de partículas e radiação através de um meio. Esse código computacional é amplamente utilizado na indústria nuclear, medicina nuclear, segurança radiológica, pesquisa e ensino. Por meio desse código é possível simular a interação de partículas com diferentes tipos de materiais e geometrias e permite a modelagem detalhada de diferentes sistemas.

3.2 Simuladores antropomórficos computacionais, adulto masculino e feminino, de referência da ICRP 110.

Neste estudo, os trabalhadores da mina de urânio foram representados pelos os simuladores antropomórficos de voxel adulto masculino e feminino de referência da publicação ICRP 110 (ICRP, 2009) (Figura 5). Algumas das informações antropométricas mais importantes desses simuladores estão apresentadas na Tabela 1.

Os simuladores foram posicionados no interior da mina de urânio subterrânea. O volume interno da mina foi totalmente preenchido com ar atmosférico com densidade de $1,2 \text{ kg/m}^3$ e os simuladores antropomórficos foram centralizados e posicionados em pé sobre o chão.

Figura 5: Simuladores antropomórficos adultos de referência da publicação da ICRP 110 com base em voxel: masculino (à direita) e feminino (à esquerda).



Fonte: ICRP 110 (2009).

Tabela 1: Características da matriz de voxel dos simuladores antropomórficos, masculino e feminino, de referência da publicação ICRP 110 (ICRP, 2009).

Propriedade	Masculino	Feminino
Altura (m)	1,76	1,63
Massa (kg)	73,0	60,0
Dimensão de voxel em Z (mm)	8,0	4,84
Dimensão de voxel em X e Y (mm)	2,137	1,775
Volume de voxel (mm ³)	36,54	15,25
Número de voxels ao longo do eixo X	254	299
Número de voxels ao longo do eixo Y	127	137
Número de voxels ao longo do eixo Z	222	348
Número de voxels de tecido	1.950.255	3.887.730
Número de voxels vazios	5.211.021	10.367.394
Número total de voxels	7.161.276	14.255.124

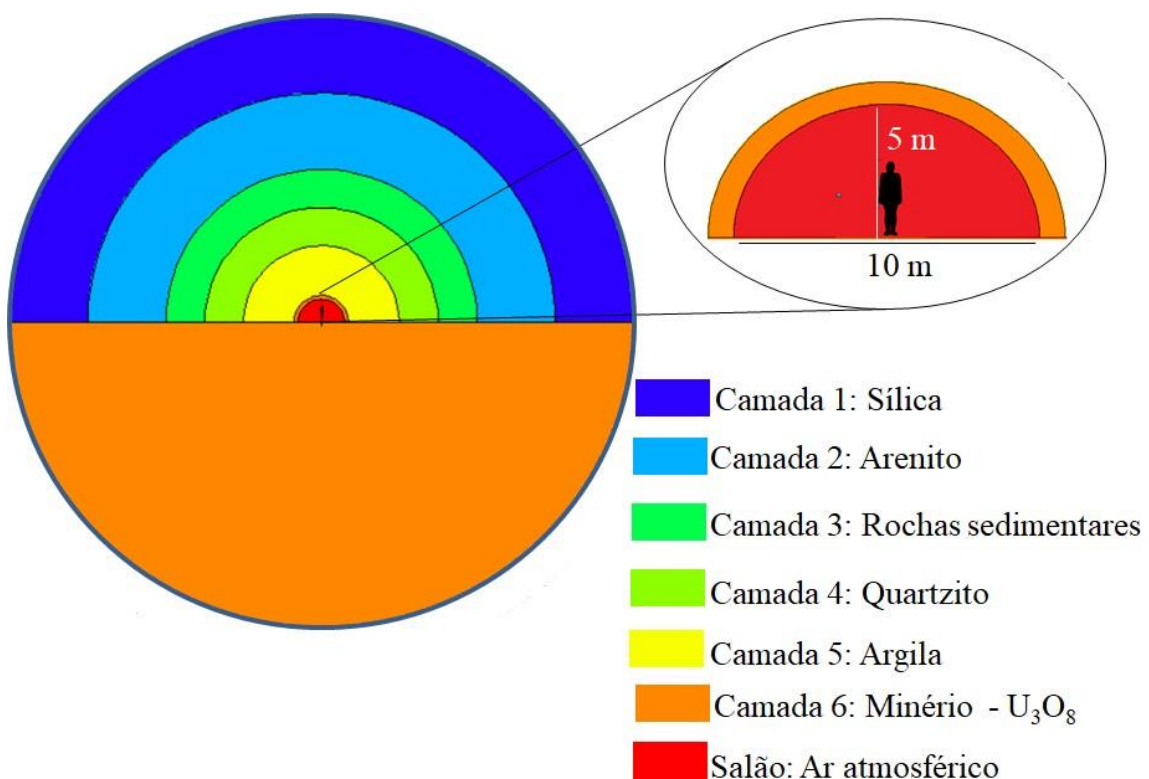
Fonte: ICRP 110 (2009).

3.3 Modelagem dos depósitos de urânio

A abordagem geral foi construir um modelo de um cenário realista de exposição ocupacional de trabalhadores no interior de uma mina de urânio expostos a radioatividade de ocorrência natural (NORM), no qual os indivíduos estão em pé sobre o piso da mina e monitorados por um contador Geiger-Müller. Para simplificar o cenário de exposição, mas sem prejuízos nos resultados, a mina foi considerada como um cilindro de 15 m de comprimento e um raio de 10 m.

O corpo do minério, onde ocorre a mineralização, está localizado numa profundidade de aproximadamente 450 m, possuindo cinco camadas acima. Na Figura 6 estão apresentadas as principais composições das camadas de terra que formam os depósitos de urânio (PAGEL et al. 2011).

Figura 6. Vista das principais camadas da mina de urânio e do simulador antropomórfico computacional no interior do salão.



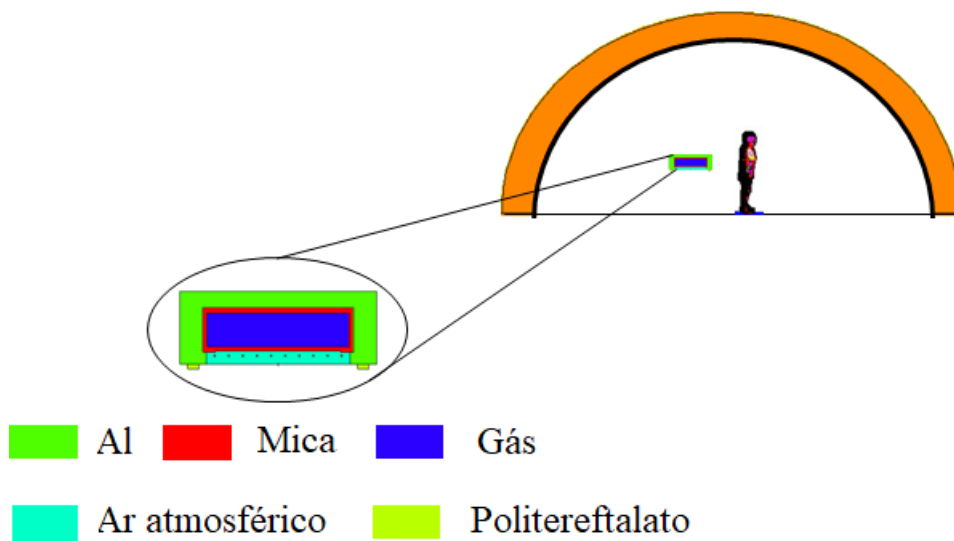
Fonte: Desenvolvido pelo autor.

Principais informações de dimensões e composições químicas da mina de urânio.

- 1- Cobertura quaternária, alcançando uma profundidade de aproximadamente 30 m, composta principalmente de sílica com densidade mássica de 2,65 g/cm³.
- 2- Arenitos, com profundidade bem heterogênea por todo o depósito, variando entre 35 a 400 m e, composto predominantemente por sílica e composto de 65,58% de Oxigênio; 32,8% de Silício; 0,78% de Alumínio; 0,53% de Ferro; 0,08% de potássio; 0,33% de outros elementos. Possui uma densidade mássica de 2,65 g/cm³.
- 3- Camada de rochas sedimentares cinzentas. Possui dimensões variáveis, tem profundidade entre 100 e 450 m e é composta predominantemente por sílica, hematita, feldspato e argilas, cujas as composições são: 65,34 % de Oxigênio; 32,1% de Silício; 0,75% de Alumínio; 0,72% de Ferro; 0,14% de potássio; 0,17% de Magnésio; 0,13% de Titânio; 0,07% de potássio, 0,78% de outros elementos.
- 4- Camada de quartzito, espessura de aproximadamente 30 m entorno do corpo de minério, composto por sílica: composição: 65,10 % de Oxigênio; 31,6% de Silício; 0,75% de Alumínio; 0,72% de Ferro; 0,14% de Potássio; 0,17% de Magnésio; 0,13% de Titânio; 0,10% de Tório; 0,08% de Urânio; 0,16% de Chumbo 0,07% de Potássio; 0,98% de outros elementos.
- 5- Camada de argila extremamente alterada. Essa camada ocorre concomitante com o corpo de minério e tem uma espessura de aproximadamente de 50 m entorno do corpo de minério: composição: 65,22 % de Oxigênio; 29,2% de Silício; 1,15% de Alumínio; 1,02% de Ferro; 0,74% de Potássio; 0,37% de Magnésio; 0,33% de Titânio; 0,28% de Tório; 0,56% de Urânio; 0,19% de Chumbo 0,12% de Potássio; 0,08% de Ouro; 0,74% de outros elementos. Possui uma densidade de 4,5 g/cm³.
- 6- Camada de minério, localizada numa profundidade de aproximadamente 450 m e, possui uma concentração de 16 a 30% de U₃O₈ e uma densidade mássica de 6,5 g/cm³.

As doses absorvidas pelos órgãos e tecidos dos simuladores antropomórficos, masculino e feminino, foram calculadas usando o tally F6 (MeV/g/partícula originária da fonte) do código MCNPX2.7.0. Estes resultados foram normalizados pela dose absorvida no ar obtida num contador Geiger-Müller localizado a 1 m acima do piso da mina. As informações dos principais materiais e do modelo geométrico do contador podem ser vistas na Figura 7.

Figura 7. Geiger-Müller localizado no interior do salão a 1 m acima do piso do salão.



Fonte: Desenvolvido pelo autor.

3.4 Modelagem da fonte de radiação

A fonte NORM, composta da série ^{238}U , da série ^{232}Th e o ^{40}K , foi considerada como uma fonte cilíndrica de comprimento 15 m e de raio de 10 m. A fonte foi definida para emitir isotopicamente e espontaneamente a radiação natural presente na camada de terra (Camada 6) que contém o minério de urânio e os trabalhadores. Do ponto de vista da modelagem computacional, o uso de raio maior que 10 m resulta no aumento de erros relativos proporcionalmente maiores nos resultados. Para reduzir os erros das simulações para “valores razoáveis”, em todos os cenários de exposição, foram utilizadas um bilhão de histórias de partículas.

3.5 Cálculos dosimétricos

As doses equivalentes (Equação 1) de um conjunto de órgãos e tecidos foram determinadas separadamente para ambos os sexos dos simuladores antropomórficos computacionais:

$$H_T = \sum_R W_R \times D_{T,R} \quad (\text{Equação 1})$$

onde $D_{T,R}$ é a dose absorvida no órgão ou tecido de interesse e w_R é fator de ponderação da radiação fornecido na publicação ICRP 103 (ICRP, 2007), que é igual a 1 para fóton e elétron.

Uma vez determinadas as doses equivalentes médias por sexo, elas são multiplicadas pelos os fatores de ponderação de cada tecido e somadas para determinar a dose efetiva (Equação 2), como recomenda a publicação da ICRP 110 (ICRP, 2009):

$$E = \sum_T W_T \times \left(\frac{H_T^M + H_T^F}{2} \right) \quad (\text{Equação 2})$$

onde H_T^M e H_T^F são, respectivamente, a dose equivalente ao órgão T do simulador antropomórfico masculino e feminino e w_T é o fator de ponderação do órgão ou tecido.

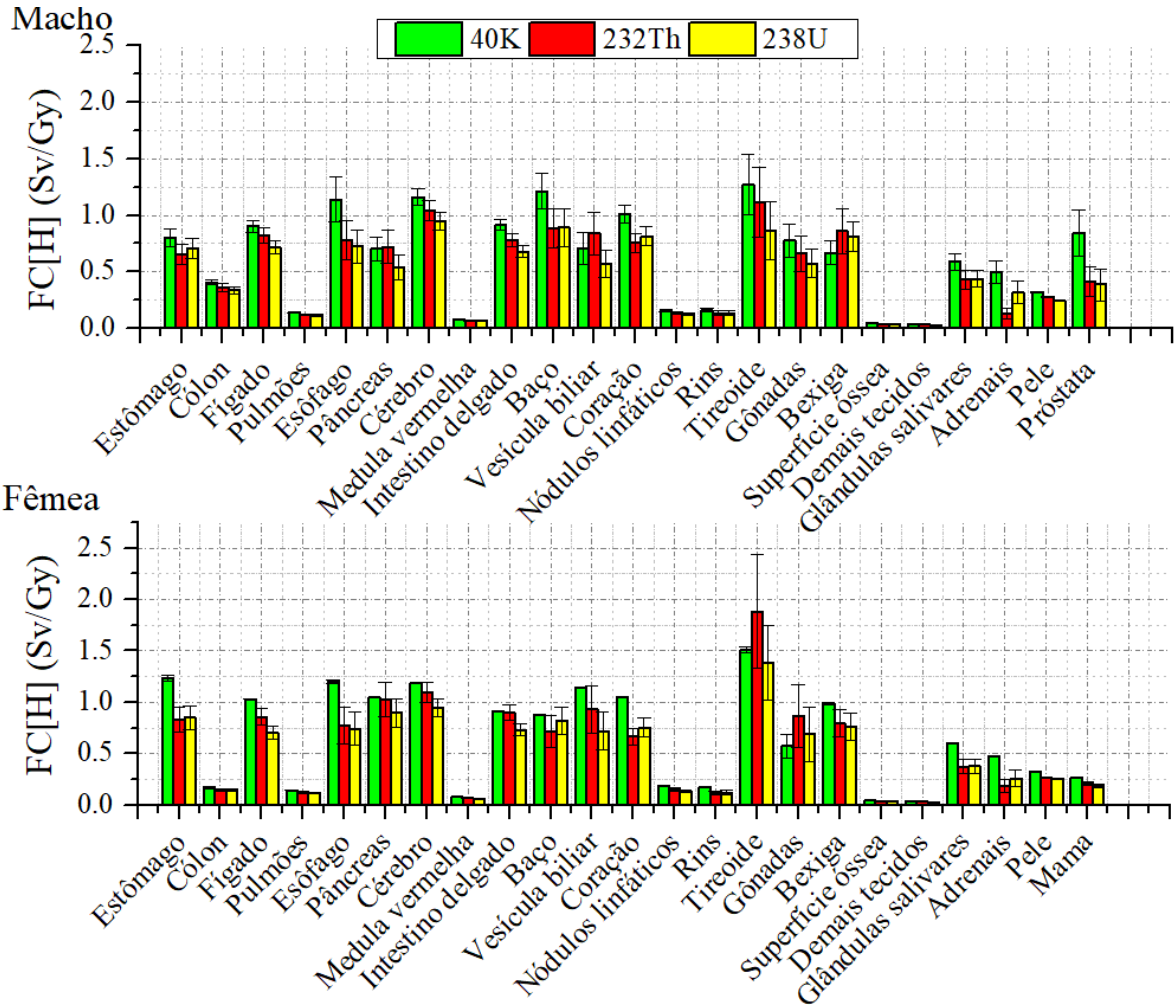
Neste estudo, os resultados dosimétricos foram apresentados em termos de Fatores de Conversão (FC) para dose equivalente e efetiva. Os FCs para dose equivalente foram derivados para cada configuração, tomando as razões entre as doses equivalentes nos órgãos pela a dose absorvida no volume de gás do detector. Uma vez conhecidos os valores de dose equivalente de cada órgão, para ambos os simuladores, foi possível determinar também a dose efetiva e, posteriormente, os respectivos fatores de conversão.

4. RESULTADOS

Neste estudo foi utilizado o código de transporte de radiação Monte Carlo de propósito geral MCNPX2.7.0 para derivar um conjunto de dados dosimétricos apropriados de fatores de conversão para dose equivalente e efetiva de trabalhadores envolvidos na atividade prospecção de urânio de uma mina subterrânea.

Na Figura 8 pode ser vista uma comparação dos FCs, em função do tipo de radionuclídeo, para os simuladores antropomórficos computacionais, masculino e feminino. Como pode ser observado, o ^{40}K , foi o radionuclídeo que mais contribuiu para o aumento da exposição dos indivíduos. Os resultados totais dos FCs para dose equivalente e efetiva, resultante da contribuição dos três radionuclídeos, estão apresentados na Tabela 2.

Figura 8: FCs para dose equivalente dos simuladores antropomórficos computacionais, masculino e feminino.



Como pode ser verificado na Figura 8 o simulador antropomórfico feminino foi o mais exposto quando comparado com o simulador masculino. Tal diferença pode estar relacionada à estatura do corpo feminino ser um menor que o masculino, ficando mais próximos a fonte de radiação principal (solo).

Tabela 2. Coeficientes de conversão para dose equivalente, normalizados pela dose absorvida no volume de um contador *Geiger-Müller* (em Sv/Gy) calculados para os profissionais no interior da mina de urânio. Entre parênteses estão os erros relativos percentuais.

Órgãos	Masculino	Feminino
Estômago	2,16 (0.3)	2,91 (0.4)
Colón	1,11 (0.1)	0,46 (0.1)
Fígado	2,44 (0.2)	2,58 (0.2)
Pulmão	0,38 (0.1)	0,39 (0.1)
Esôfago	2,64 (0.5)	2,71 (0.5)
Pâncreas	1,96 (0.4)	2,97 (0.4)
Cérebro	3,15 (0.2)	3,23 (0.3)
Medula Óssea	0,21 (0.1)	0,21 (0.1)
Intestino Delgado	2,37 (0.2)	2,54 (0.2)
Baço	2,98 (0.5)	2,42 (0.4)
Vesícula biliar	2,12 (0.4)	2,80 (0.7)
Coração	2,58 (0.2)	2,48 (0.3)
Nódulas linfáticos	0,42 (0.1)	0,47 (0.1)
Rins	0,43 (0.1)	0,42 (0.1)
Tireoide	3,24 (0.8)	4,78 (1.2)
Gônadas	2,01 (0.4)	2,13 (0.7)
Bexiga	2,34 (0.4)	2,54 (0.4)
Superfície óssea	0,12 (0.1)	0,12 (0.1)
Uretra	1,02 (0.2)	1,30 (0.3)
Demas tecidos	0,10 (0.2)	0,10 (0.2)
Corda espinhal	3,02 (0.4)	2,37 (0.4)
Glândulas salivares	1,45 (0.2)	1,36 (0.2)
Adrenais	0,95 (0.3)	0,92 (0.3)
Pele	0,84 (0.1)	0,85 (0.1)
Próstata	1,64 (0.5)	--
Mama	--	0,66 (0.1)
Dose efetiva	1.2 (0.3)	

Como pode ser observado, os resultados obtidos foram significativamente superiores aos dados publicados na literatura, como os apresentados por PEREIRA et al. 2019 e SANTOS et al., 2010. No conjunto global dos resultados, os valores dos FCs[H], apresentados na tabela 2, são superiores para o simulador antropomórfico feminino, e que o ^{40}K foi considerado o mais crítico para os dois gêneros.

5. DISCUSSÃO

Foi demonstrado na Tabela 2 e Figura 8 que os órgãos com maiores FCs[HT] e FC[E] foram: tireoide, cérebro e esôfago. Já os tecidos com menores valores encontrados ($< 0,5$) são, respectivamente: pulmão, medula óssea vermelha, linfonodos, rins, superfícies ósseas e demais tecidos. Entre todos os órgãos avaliados, o cólon do simulador masculino foi o que apresentou maior diferença, sendo cerca de 140% superior comparado com o do feminino. Já o pâncreas e a tireoide do simulador feminino foram 34 e 32% superior aos dados do masculino.

Na literatura é possível encontrar estudos similares que podem ser utilizados para fins comparativos entre a dose total e dose efetiva média, utilizando a os mesmos radionuclídeos (^{40}K , ^{232}Th e ^{238}U), com diferentes modelos antropomórficos e ambientes. Na Tabela 3 foi convertido os valores obtidos por PEREIRA et al. (2019) e selecionados os mesmos órgãos presente no trabalho atual, para fins comparativos.

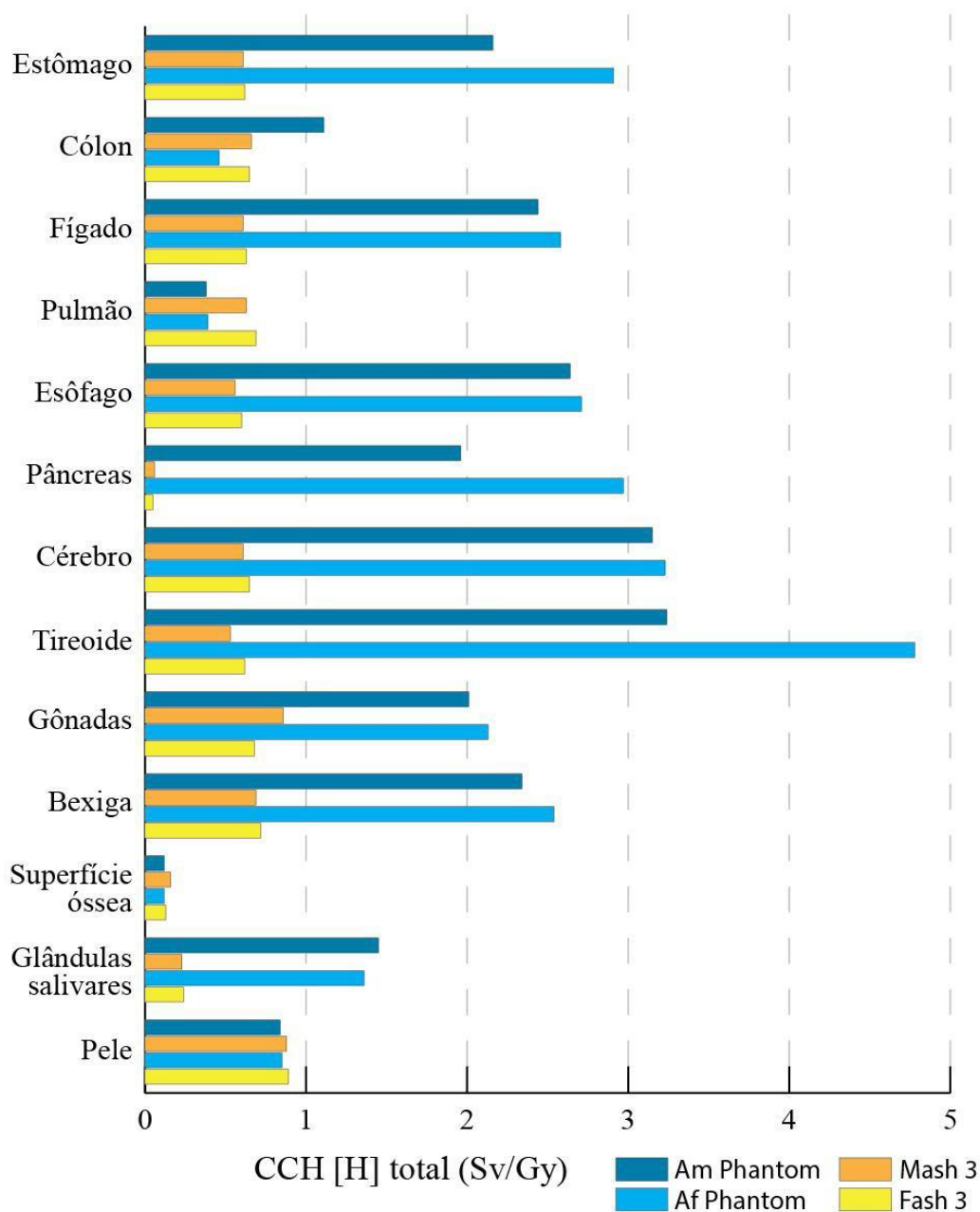
Tabela 3: FCs[HT] dos simuladores antropomórficos masculino (MASH3) e feminino (FASH3), referentes ao OR-01 (Granito Ornamental 01 classificado por Pereira et al. 2019).

Órgãos	Masculino	Feminino
Estômago	0,61	0,62
Colón	0,66	0,65
Fígado	0,61	0,63
Pulmão	0,63	0,69
Esôfago	0,56	0,6
Pâncreas	0,06	0,05
Cérebro	0,61	0,65
Tireoide	0,53	0,62
Gônadas	0,86	0,68
Bexiga	0,69	0,72
Superfície óssea	0,16	0,13
Glândulas Salivares	0,23	0,24
Pele	0,88	0,89

Fonte: PEREIRA et al. (2019) modificado pelo autor

Notamos uma diferença expressiva quando comparamos os valores obtidos no presente trabalho com os dados fornecidos por PEREIRA et al. (2019). Tal discrepância é evidenciada na maioria dos órgãos selecionados, possuindo valores mais próximos apenas no cólon, pulmão, superfície óssea e pele, evidenciado na Figura 09.

Figura 9: Resultados de dose efetiva obtidos no presente trabalho utilizando os simuladores antropomórficos masculino (AM) e feminino (AF) versus dose efetiva fornecida por PEREIRA et al. 2019 calculados para os simuladores antropomórficos MASH3 e FASH3.



Fonte: PEREIRA et al. (2019) compilado e modificado pelo autor.

Comparando os valores dos FCs, os resultados obtidos no presente estudo foram superiores para os seguintes órgãos: estômago, fígado, esôfago, pâncreas, cérebro, tireoide, gônadas, bexiga e glândulas salivares, principalmente para o simulador antropomórfico feminino (Af Phantom). Esta diferença pode estar relacionada com os modelos de simuladores utilizados e, principalmente, com o cenário computacional do

ambiente. Na literatura, encontram-se ambientes com pontos únicos ou pequenas áreas que emitem radiação, entretanto para a simulação de uma mina os simuladores antropomórficos encontram cercados por fontes emissoras.

O valor médio do FC para dose efetiva, calculado neste estudo, foi de 1,2 Sv/Gy. De acordo com as orientações estabelecidas pelo Comitê Científico das Nações Unidas sobre os Efeitos das Radiações Ionizantes (UNSCEAR, 2000), o fator recomendado para um indivíduo adulto é de 0,7 Sv/Gy. Comparativamente, o resultado deste estudo é cerca de 71% superior ao recomendado pela UNSCEAR. É importante ressaltar que essa recomendação é aplicável especificamente para geometrias de irradiação oriundas da radioatividade natural, tais como espaços confinados, fechados ou com poucas saídas.

A Tabela 4 apresenta uma comparação do FCs para dose efetiva fornecidos pela literatura e o obtido por este estudo. Como pode observar, o resultado deste estudo é quase o dobro da maioria dos resultados da literatura, que foram obtidos usando fontes planas de solos com NORMs.

Tabela 4: Comparação dos FCs para dose efetiva obtido por este estudo e dados da literatura

Referência	Dose efetiva média (Sv/Gy)
SAITO et al. (1998)	0,692
D. KRSTIC e D. NIKEZIC (2010)	0,491
PEREIRA et al. (2019)	0,607
Presente Trabalho	1,2 (0.3)

Fonte: SAITO et al. (1998), D. KRSTIC e D. NIKEZIC (2010) e PEREIRA et al. (2019).

Fica evidente a disparidade entre o FC para dose efetiva obtido nesse trabalho quando comparado com trabalhos anteriores. Os parâmetros que podem ter relação com a disparidade dos resultados, são: diferentes modelos antropomórficos, diferenças no modelo de cálculo da dose absorvida no ar, e concentração dos elementos radioativos. Mesmo com todas justificativas feitas, é significativa às diferenças entre os resultados. Os trabalhos citados na Tabela 4, também utilizaram NORMs como fonte, porém em ambientes menores e com menos pontos de emissão. O que ressalta na importância de desenvolver novos modelos envolvendo a retratação de ambientes reais com diferentes tipos de minas, concentrações e minerais.

6. CONCLUSÃO

Neste estudo foi determinado um conjunto de fatores de conversão (FC) para dose equivalente e efetiva utilizando o código MCNPX2.7.0 e os simuladores antropomórficos computacionais, masculino e feminino de referência da ICRP 110, para representarem trabalhadores mineiros de uma mina subterrânea de urânio Cigar Lake, localizada no Canadá. O FC para dose efetiva foi superior em 71% comparado com dados UNSCEAR e o dobro da dose efetiva relatada por vários estudos. Essas diferenças podem estar associadas aos distintos cenários desenvolvidos, cada um com suas respectivas características, diferentes modelos antropomórficos e diferentes geometrias de irradiação.

Os órgãos mais irradiados foram a tireoide, o cérebro e o esôfago e os menos irradiados foram o pulmão, medula óssea, linfonodos, rins, superfícies ósseas e demais tecidos. Além disso, os órgãos do simulador antropomórfico feminino foram os mais irradiados e, por isso, foi o que mais contribuiu para o aumento da dose efetiva. Este fato pode ser justificado pela sua baixa estatura, estando, assim, posicionado mais próximo à fonte principal de radiação (solo). No entanto, alguns órgãos, como o cólon, baço, coração, cordão espinhal e glândulas salivares, possuem valores maiores no modelo masculino, seria viável realizar estudos posteriores com a finalidade de verificar tal justificativa, utilizando modelos de mesma massa e estatura.

Com os resultados obtidos, acreditamos que este estudo contribuiu para ampliar às informações dosimétricas da literatura resultantes de materiais contaminados com NORMs e, desta forma, possibilitando uma avaliação mais precisa dos riscos radiológicos dos trabalhadores envolvidos em atividade de prospecção de urânio em mina de urânio subterrânea.

Referências

ALEXANDRE, P. Geochemistry of the athabasca basin, Saskatchewan, Canada, and the unconformity-related uranium deposits hosted by it. Vol. 58, p. 1-22, 2020.

ANNESLEY, I.R.; MADORE, C.; PORTELLA, P. Geology and thermotectonic evolution of the western margin of the Trans-Hudson Orogen: evidence from the eastern sub-Athabasca basement, Saskatchewan. *Can. J. Earth Sci.* 42, 573–597, 2005

BEZUIDENHOUT, J. In Situ gamma ray measurements of radionuclides at a disused phosphate mine on the west coast of south africa. *j. environ. radioact.* 1–8., 150. 2015

BRUNETON, P. Geological environment of the Cigar Lake uranium deposit. *Canadian Journal of Earth Sciences.* 30, pp 653-673, 1993.

CAMECO. Cigar Lake Operation Northern Saskatchewan, Canada. National Instrument 43-101. 2016

CHI, G.; LI, Z.; CHU, H.; BETHUNE, K.M.; QUIRT, D.H.; LEDRU, P.; NORMAND, C.; CARD, C.; BOSMAN, S.; DAVIS, W.J.; & POTTER, E.G. A shallow-burial mineralization model for the unconformity-related uranium deposits in the Athabasca Basin. *Economic Geology* 113, 1209–1217, 2018.

CNSC (Canadian Nuclear Safety Commission). Report. General Nuclear Safety and Control Regulations. SOR/2000-202. 2023.

ECKHARDT, R. Stan Ulam, John Von Neumann, and the Monte Carlo method. *Los Alamos Science Special Issue*, pp. 131-136, 1987.

FILGUEIRAS R.A.; SILVA A.X.; RIBEIRO F.C.A.; LAURIA D.C.; VIGLIO E.P. Baseline, mapping and dose estimation of natural radioactivity in soils of the Brazilian state of Alagoas *Radiation Physics and Chemistry*, 167 (2020), p. 108332.

GERALDES M.C. *Introdução à Geocronologia*. 146 p, 2010.

GOORLEY T.; JAMES M.; BOOTH T.; BROWN F.; BULL J.; COX L.J.; DURKEE J.; ELSON J.; FENSIN B M.; FORSTER R.A.; HENDRICKS J.; HUGHES H.G.; JOHNS R.; KIEDROWSKI B.; MARTZ R.; MASHNIK S.; MCKINNEY G.; PELOWITZ D.; PRAEL R.; SWEEZY J.; WATERS L.; WILCOX T.; ZUKAITIS T. *Annals of Nuclear Energy*. 1-12p. 2015.

HOEVE, J., SIBBALD T.I.I. On the origin of the Rabbit Lake and other unconformity-type uranium deposits in northern Saskatchewan. *Economic Geology*. 73, pp. 1450-1473. 1978.

IAEA (International Atomic Energy Agency). Radiation Protection and safety of radiation sources: International Basic Safety Standards, IAEA General Safety

Requirements. Part 3 No. GSR Part 3. 2011.

IAEA (International Atomic Energy Agency). Uranium resources, production and demand. Technical report. 16 p. 2020.

ICRP 60. International Commission on Radiological Protection: ICRP Publication 60, The 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. Annals of the ICRP, vol. 21(1-3), 1990.

ICRP 103. International Commission on Radiological Protection: ICRP Publication 103, The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. Annals of the ICRP, vol. 37(2-4), 2007.

ICRP 110. International Commission on Radiological Protection: ICRP Publication 110, Adult Reference Computational Phantoms. Annals of the ICRP, vol. 39(2), 2009.

JEANNERET, P.; GONCALVES, P.; DURAND, C.; TRAP, P.; MARQUER, D.; QUIRT, D.; LEDRU, P. Tectono- metamorphic evolution of the pre-Athabasca basement within the Wollaston–Mudjatik Transition Zone, Saskatchewan. *Can. J. Earth Sci.* 53, 231–259, 2016.

JEANNERET, P.; GONCALVES, P.; DURAND, C.; POUJOL, M.; TRAP, P.; MARQUER, D.; QUIRT, D. & LEDRU, P. Geochronological constraints on the trans-Hudsonian tectono-metamorphic evolution of the pre-Athabasca basement within the Wollaston-Mudjatik Transition Zone, Saskatchewan. *Precambrian Research* 301, 152–178, 2017.

JEFFERSON, C.W.; THOMAS, D.J.; GANDHI, S.S.; RAMAEKERS, P.; DELANEY, G.; BRISBIN, D.; CUTTS, C.; PORTELLA, P.; & OLSON, R.A. Unconformity-associated uranium deposits of the Athabasca Basin, Saskatchewan and Alberta. In *EXTECH IV: geology and uranium exploration technology of the Proterozoic Athabasca Basin* (C.W. Jefferson and G. Delaney, eds.). Geological Survey of Canada, Bulletin 588, 23–68, 2007.

KELLY-REIF, K.; SANDLER, D.P.; SHORE, D.; SCHEBAUER-BERIGAN, M.K.; TROESTER, M.A.; FRENCH, L.N.; RICHARDSON, D.B. Radon and cancer mortality among underground uranium miners in the Příbram region of the Czech Republic. *American journal of industrial medicine.* 10, pp 859-867, 2020.

KRSTIC, D.; NIKEZIC, D.; Calculation of the effective dose from natural radioactivity in soil using MCNP code. *Applied Radiation and Isotopes.* 68, pp 946–947, 2010

LEWRY, J.F.; SIBBALD, T.I.I. Variation in lithology and tectonometamorphic relationships in the Precambrian basement of northern Saskatchewan. *Canadian Journal of Earth Sciences.* 14, pp 1453-1467, 1977.

LEWRY, J.F.; SIBBALD, T.I.I. Thermotectonic evolution of the Churchill Province in

Northern Saskatchewan. *Tectonophysics*, Vol 68, p. 45-82, 1980.

MARTZ, P.; Cathelineau M.; Mercadier J.; Boiron MC.; Jaguin J.; Tarantola A.; Demacon M.; Gerbeaud O.; Quirt D.; Doney A.; Ledru P. C-O-H-N fluids circulations and graphite precipitation in reactivated Hudsonian shear zones during basement uplift of the Wollaston-Mudjatik Transition Zone: Example of the Cigar Lake U deposit, *LITHOS* 4436, p. 05-10, 2017.

MERCADIER, J.; ANNESLEY, I.R.; MCKECHNIE, C.L.; BOGDAN, T.S.; & CREIGHTON, S. Magmatic and metamorphic uraninite mineralization in the western margin of the Trans-Hudson Orogen (Saskatchewan, Canada): A uranium source for unconformity-related uranium deposits? *Economic Geology* 108, 1037–1065, 2013.

OECD/NEA-IAEA, Uranium 2013: resources, production and demand. A Joint Report by the OECD Nuclear Energy Agency and the IAEA. OECD, Paris. 2014.

OJOVAN, M.I.; LEE, W.E. Naturally occurring radionuclides. In an introduction to nuclear waste immobilisation, 2nd ed.; Elsevier Scientific Publishing Company: Amsterdam, The Netherlands. pp. 31–39. 2014.

PAGEL, M.; RUHLMANN, F.; BRUNETON, P. The Cigar Lake uranium deposit, Saskatchewan, Canada. *Canadian journal of Earth*. 30(4), pp 651-652, 2011.

RAY, G.E. The geology of the Highrock Lake - Key Lake vicinity, Saskatchewan. Saskatchewan Department of Mineral Resources, Report 197, 1977.

RAMAEKERS, P. Athabasca Formation, northeast edge (64L, 74I, 74P): Part I, reconnaissance geology. In Summary of investigations 1976. Saskatchewan Geological Survey (48–52), 1976.

RAMAEKERS, P. Geology of the Athabasca Group (Helikian) in Northern Saskatchewan. Saskatchewan Energy and Mines, Saskatchewan Geological Survey Report 195, 48 pp, 1990.

RAMAEKERS, P.; JEFFERSON, C.W.; YEO, G.M.; COLLIER, B.; LONG, D.G.F.; DREVER, G.; MCHARDY, S.; JIRICKA, D.; CUTTS, C.; WHEATLEY, K.; CATUNEANU, O.; BERNIER, S.; KUPSCH, B.; & POST, R.T. Revised geological map and stratigraphy of the Athabasca Group, Saskatchewan and Alberta. In EXTECH IV: Geology and uranium exploration technology of the Proterozoic Athabasca Basin (C.W. Jefferson & G. Delaney, eds.). Saskatchewan and Alberta. Geological Survey of Canada, Bulletin 588, 2007.

PELOWITZ, D. B. MCNPX User`s Manual, version 2.7.0. Report LA-CP-11-00438. Los Alamos National Laboratory, 2011.

PEREIRA M.A.M.; SILVEIRA L.M.; NANNINI F.; NEVES L.P.; PERINI A.P.; SANTOS C.J.; BELINATO W.; SANTOS W.S. Dosimetric evaluation of individuals to ²³⁸U series, ²³²Th series and ⁴⁰K radionuclides present in Brazilian ornamental rocks

using computational simulation. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 173, pp. 401-410, 2019.

SAITO, K.; PETOUSSI-HENSS, N.; ZANKL, M. Calculation of effective dose and its variation from environmental gamma ray sources. *Health Phys.* 74, 698–706, 1998.

SANTOS, E.F.S.; PAPA, A.R.R.; CONTI, C.C. Cálculo do kerma no ar de uma residência e em campo aberto a partir de dados de espectrometria gama aérea na província uranífera de Lagoa Real (Caetitê-BA). 2010. Tese de Doutorado. Observatório Nacional/MCT. Rio de Janeiro, RJ.

SIBBALD, T.I.I. Geology of the crystalline basement NEA/TAEA Athabasca test area. In *Uranium exploration in Athabasca Basin, Saskatchewan, Canada*. Edited by E.M. Cameron. Geological Survey of Canada. Paper 82-11, pp 1-4, 1983.

UNSCEAR. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiations. Sources, effect, and risks of ionization radiation. Report to the General Assembly, with Annexes, New York. 2000.

YEO, G.M.; DELANEY, G. The Wollaston Supergroup, stratigraphy and metallogeny of a Paleoproterozoic Wilson cycle in the Trans-Hudson Orogen, Saskatchewan. In *EXTECH IV: Geology and uranium exploration technology of the Proterozoic Athabasca Basin, Saskatchewan and Alberta.*, in: Jefferson, C.W., Delaney, G. (Eds.). Geological Survey of Canada, Bulletin. pp. 89– 117, 2007.