

Programa de Monitoramento Ambiental: Metodologias e Avaliações de Kerma no Ar no Centro Regional de Ciências Nucleares do Centro-Oeste

Environmental Monitoring Program: Methodologies and Air Kerma Assessments at the Regional Center for Nuclear Sciences of the Midwest

Santos, L. V.^{1,2} ; Rodrigues, D. A.^{1,2} ; Barbosa, R. C.¹ 

¹Centro Regional de Ciências Nucleares do Centro-Oeste, Abadia de Goiás, Brasil

²Universidade Federal de Goiás, Goiânia, Brasil

Resumo

Este trabalho apresenta uma análise do Programa de Monitoramento Ambiental (PMA) do CRCN-CO, com foco nas medições de Kerma no ar. O PMA é fundamental para garantir a contenção dos rejeitos radioativos do acidente de Goiânia, bem como para assegurar a conformidade com as normas da CNEN e padrões internacionais. Além disso, assegura a conformidade com as diretrizes estabelecidas pela Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) e com os padrões internacionais de segurança radiológica.

Palavras-chave: dosimetria; radioproteção; kerma no ar; césio-137; radiação.

Abstract

This work presents an analysis of the Environmental Monitoring Program (PMA) of CRCN-CO, with a focus on air kerma measurements. The PMA is essential to ensure the containment of radioactive waste resulting from the Goiânia accident, as well as to guarantee compliance with the regulations of the National Nuclear Energy Commission (CNEN) and international standards. Additionally, it ensures adherence to the safety guidelines established by CNEN and international radiological protection standards.

Keywords: Dosimetry; Radiation protection; Air kerma; Cesium-137; Radiation.

1. Introdução

O Programa de Monitoramento Ambiental (PMA) foi elaborado em conformidade com as diretrizes da NCR (Nuclear Regulatory Commission, 1975), da AIEA (1962) e da ICRP (1984), sendo implantado em 1997 com a finalidade de assegurar a conformidade radiológica do Depósito Definitivo de Rejeitos Radioativos de Abadia de Goiás, conforme as normas da Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) e diretrizes internacionais, incluindo o monitoramento pré-operacional. Ele garante a vigilância contínua da região afetada pelo acidente com ¹³⁷Cs em Goiânia, mantendo os rejeitos contidos com segurança ao longo do período de controle institucional.

O monitoramento envolve diferentes matrizes ambientais — como água, solo, sedimentos, vegetação e ar — por meio de análises radiológicas sistemáticas, incluindo espectrometria gama e dosimetria termoluminescente. Esses dados são comparados a referências pré-operacionais e limites normativos, possibilitando a identificação de anomalias e o acompanhamento da evolução dos níveis de radiação.

Inicialmente operado pelo Instituto de Radioproteção e Dosimetria (IRD), o PMA passou a ser executado pelo Centro Regional de Ciências Nucleares do Centro-Oeste (CRCN-CO), através do

Laboratório de Radioecologia, responsável pelas coletas, análises e intercomparações que garantem a confiabilidade dos resultados. O programa está planejado para durar até 50 anos, conforme recomendações da CNEN e da Agência Internacional de Energia Atômica (AIEA), e é ajustado conforme a transição entre as fases de operação do depósito.

O Controle Institucional (CI) do Depósito Definitivo de Rejeitos Radioativos de Abadia de Goiás, estabelecido sob as diretrizes da CNEN, integra o PMA como um de seus principais instrumentos de segurança. Compreendendo ações como inspeções periódicas, manutenção de registros e vigilância contínua da área, o CI visa assegurar o confinamento dos rejeitos e proteger a população contra exposições radiológicas. A execução sistemática do PMA, comparando continuamente os dados atuais com os da fase pré-operacional, permite a detecção precoce de alterações ambientais, garantindo a rápida implementação de medidas corretivas quando necessário e promovendo a preservação da segurança radiológica ao longo do tempo.



Figura 1. Cronologia das fases operacionais do depósito e do desenvolvimento do PMA.

O Programa de Monitoramento Ambiental (PMA) é executado pelo Laboratório de Radioecologia (LRE) do CRCN-CO, com o apoio técnico de instituições como o IRD e o Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN). O LRE é responsável por toda a cadeia de coleta, preparação e análise das amostras ambientais, enquanto o CDTN realiza a leitura dos dosímetros termoluminescentes (TLDs) utilizados na medição do Kerma no ar. A estrutura logística do programa envolve pontos fixos de amostragem distribuídos estratégicamente na área do depósito e entorno, além da adoção de protocolos rigorosos para garantir a rastreabilidade e o controle de qualidade em todas as etapas do processo.

As campanhas de monitoramento são realizadas trimestralmente, abrangendo a coleta de diferentes matrizes ambientais, como solo, sedimentos, vegetação e água, além da substituição dos TLDs. A avaliação dos dados considera limites regulatórios estabelecidos pela CNEN e pela ICRP, além da análise de tendências ao longo do tempo e possíveis correlações com fatores ambientais. Essa abordagem sistemática garante a confiabilidade dos dados e permite a detecção precoce de anomalias, assegurando a proteção radiológica da população e do meio ambiente no entorno do repositório.

2. Materiais e Métodos

O PMA do CRCN-CO adota procedimentos padronizados para a coleta, preparo e análise de amostras ambientais, com o objetivo de garantir a rastreabilidade dos dados e a conformidade com normas nacionais e internacionais. O monitoramento abrange diferentes matrizes ambientais — como solo, sedimento, água superficial e subterrânea, vegetação e ar — permitindo uma avaliação ampla e contínua das condições ambientais nas proximidades do repositório. As coletas são realizadas em pontos previamente estabelecidos, considerando tanto áreas próximas ao repositório quanto pontos de referência mais distantes, o que possibilita comparações consistentes ao longo do tempo.

Cada matriz analisada possui um protocolo específico. No caso do solo e do sedimento, são coletados aproximadamente 3 kg em cada ponto, com posterior secagem a 100 °C por 24 horas, peneiragem e armazenamento em frascos adequados, resultando em amostras secas entre 1,2 e 1,5 kg. A vegetação, composta principalmente por gramíneas, é coletada em áreas delimitadas, sendo inicialmente pesada (cerca de 8 kg) e posteriormente submetida a secagem e calcinação, o que gera cerca de 400 g de cinzas para análise. Já as amostras de água superficial e subterrânea são coletadas em

volumes de 5 litros, filtradas com membranas de 0,45 µm e acidificadas com ácido nítrico, garantindo a estabilidade dos radionuclídeos dissolvidos.

Para o monitoramento da radiação no ar, são utilizados dosímetros TLDs compostos por cristais de LiF:Mg,Ti. Esses dispositivos são instalados a uma altura de um metro do solo, protegidos dentro de tubos de PVC, e permanecem expostos por ciclos de aproximadamente três meses. Após esse período, os TLDs são recolhidos e analisados em laboratório para determinar a taxa de kerma no ar. A padronização dos métodos de coleta e análise garante resultados confiáveis e comparáveis ao longo do tempo, contribuindo para a avaliação contínua da segurança ambiental nas áreas monitoradas.

As análises laboratoriais realizadas no âmbito do PMA utilizam técnicas analíticas avançadas para garantir resultados precisos e confiáveis. A espectrometria gama é a principal técnica empregada para a detecção de radionuclídeos como o césio-137, utilizando detectores de germânio hiperpuro (HPGe) com alta eficiência. A medição é realizada com tempos prolongados de contagem (15 horas), e a geometria de leitura é adaptada ao tipo de amostra, com frascos específicos para materiais líquidos e sólidos, o que assegura a sensibilidade e a reprodutibilidade das análises.

Além disso, a dosimetria termoluminescente é usada para avaliar a dose absorvida pela população a partir da radiação gama presente no ambiente. Os TLDs, após serem expostos no campo por cerca de três meses, são tratados termicamente e analisados em equipamentos semiautomáticos, o que elimina interferências e aumenta a confiabilidade dos dados. Já as análises químicas e radioquímicas são aplicadas às amostras de água filtrada e acidificada, permitindo a quantificação precisa dos radionuclídeos dissolvidos e a avaliação do comportamento dos contaminantes nas águas subterrâneas e superficiais.

A localização dos pontos de coleta segue um planejamento estratégico, com nove locais fixos destinados à coleta de solo, água e vegetação, distribuídos em áreas de maior vulnerabilidade à dispersão de contaminantes, como zonas próximas a corpos d'água e áreas de proteção ambiental. Essa distribuição é fundamental para captar variações espaciais na concentração de radionuclídeos e possíveis rotas de migração dos rejeitos no ambiente.

Complementando esse sistema, dez pontos são utilizados exclusivamente para o posicionamento dos TLDs, fixados a cerca de um metro do solo para representar a exposição humana típica. Também são considerados diferentes níveis do lençol freático por meio da coleta de água subterrânea em poços de monitoramento com diversas profundidades. Essa abordagem abrangente garante uma vigilância contínua e eficiente da qualidade ambiental ao redor do repositório, contribuindo para a gestão da segurança radiológica da área.

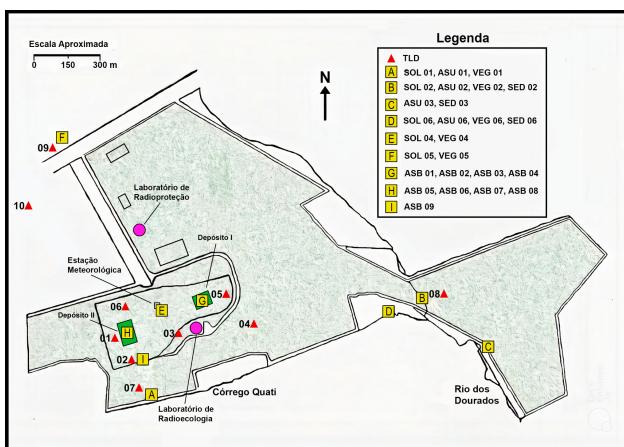


Figura 2. Distribuição dos pontos de coleta de amostras e posicionamento dos TLDs na área do CRCN-CO.

O controle de qualidade das análises realizadas pelo CRCN-CO é garantido por meio de Testes de Proficiência (TP) e Programas de Intercomparação (IC). Nos TP, o laboratório analisa amostras-padrão com concentrações conhecidas apenas pela entidade organizadora, como o ERA e o IRD. A comparação entre os resultados obtidos e os valores de referência permite avaliar a precisão e confiabilidade dos métodos analíticos utilizados, assegurando a conformidade com padrões internacionais.

3. Resultados

Desde sua implementação, o PMA do CRCN-CO realiza a coleta e análise sistemática das taxas de radiação ambiental. Esse acompanhamento contínuo das taxas de Kerma no ar ao longo dos anos tem possibilitado a identificação de pequenas variações e tendências, além de permitir a identificação de tendências gerais e a comparação entre os períodos operacionais e pós-operacionais do Depósito Definitivo de Rejeitos.

Os dados históricos de kerma no ar, obtidos por meio de dosímetros TLDs distribuídos em 10 pontos fixos no entorno do repositório, evidenciam que as taxas permaneceram estáveis ao longo do período analisado. Conforme ilustrado na Figura 3, que abrange o intervalo de 1997 a 2021, os valores registrados mantiveram-se consistentemente dentro dos limites de referência estabelecidos pela CNEN, sem apresentar variações significativas ou picos de exposição.

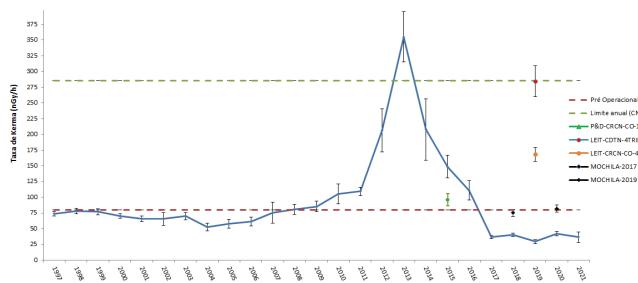


Figura 3. Evolução das taxas de Kerma no ar no período de 1997 a 2021.

A Figura 3 ilustra a evolução das medições ao longo do tempo. Durante o período pré-operacional, as taxas de Kerma no ar mantiveram-se

relativamente estáveis, apresentando apenas pequenas flutuações dentro dos limites considerados normais. Entre os anos de 2012 e 2015, contudo, observa-se um aumento significativo nas medições, seguido de um padrão de estabilização nos anos subsequentes. As variações pontuais registradas ao longo do tempo podem ser atribuídas a fatores ambientais, instrumentais e metodológicos.

As pequenas variações observadas nas medições podem ser explicadas por diversos fatores ambientais, instrumentais e metodológicos. Entre as possíveis causas estão as diferenças sazonais e as condições climáticas, que podem influenciar a dispersão de radionuclídeos no ambiente. Além disso, interferências nos processos de coleta e análise, como alterações na instrumentação ou na calibração dos equipamentos, também podem contribuir para essas variações. Por fim, as diferenças nos métodos de leitura adotados pelo CDTN e pelo CRCN-CO podem levar a discrepâncias entre os valores registrados por cada instituição.

4. Discussão

Entre os anos de 2012 e 2015, observou-se um aumento expressivo nas taxas de kerma no ar registradas pelos TLDs, conforme ilustrado na figura 3. Esse intervalo se destaca na série histórica por apresentar uma variação significativa nos valores medidos, em contraste com a estabilidade observada nos períodos anteriores e posteriores.

Durante esse período, de 2011 a 2016, foram utilizados dois tipos de detectores: inicialmente os TLD-100 Harshaw ($\text{LiF}:\text{Mg,Ti}$) e, posteriormente, os dosímetros de óxido de alumínio (Al_2O_3), conhecidos como ALOX, fabricados pelo CDTN. A leitura dos TLD-100 era realizada com o leitor Harshaw modelo 4500, enquanto os dosímetros ALOX eram analisados utilizando o leitor RADOS RE2000. Essa mudança de material e de equipamento pode ter impactado diretamente os valores registrados, uma vez que os dosímetros de óxido de alumínio apresentam maior sensibilidade termoluminescente, o que pode ter ocasionado uma superestimação das leituras.

Apesar da elevação nas taxas de kerma no ar observada entre 2012 e 2015, às análises complementares de outras matrizes ambientais — como solo, água e vegetação — não indicaram alterações nos níveis de radionuclídeos. Além disso, a dose efetiva estimada para a população permaneceu constante nesse período, reforçando a hipótese de que a variação observada está relacionada a fatores instrumentais e metodológicos, e não a um aumento real da radiação ambiental.

É importante mencionar que, a partir de 2017, os dosímetros de óxido de alumínio continuaram sendo utilizados até aproximadamente 2021, ainda com o leitor RADOS RE2000. Após esse período, foi implementada uma nova mudança, com a adoção dos dosímetros TLD MTS-N “RadPro” ($\text{LiF}:\text{Mg,Ti}$), mantendo-se o mesmo equipamento de leitura (RADOS RE2000).

Embora a principal hipótese para a anomalia nas medições entre 2012 e 2015 esteja relacionada à transição dos tipos de TLDs e leitores utilizados, a origem exata da discrepância ainda não está totalmente esclarecida. Estudos adicionais, incluindo calibrações cruzadas, testes de reprodutibilidade e revisões nas metodologias de correção aplicadas, são necessários para validar os dados históricos e garantir a robustez dos resultados do programa de monitoramento.

5. Conclusões

Os resultados demonstraram estabilidade nos níveis de radiação ambiental ao longo da série histórica, com exceção de um desvio observado entre os anos de 2012 e 2015. Essa elevação atípica é, provavelmente, consequência da substituição temporária do tipo de dosímetro utilizado no monitoramento, o que evidencia a importância da padronização dos métodos de medição ao longo do tempo.

Diante dos resultados obtidos, conclui-se que os procedimentos atualmente adotados no PMA do CRCN-CO são eficazes, mas podem ser significativamente fortalecidos com as melhorias propostas neste trabalho. A formalização de um programa interno de intercomparação das medições de Kerma no ar. A adoção de metodologias complementares e a descentralização parcial das leituras promovem não apenas maior robustez técnica ao processo, mas também reduzem riscos logísticos e operacionais. Além disso, essas ações contribuem para ampliar a autonomia técnica do CRCN-CO na gestão de rejeitos radioativos, alinhando-se às melhores práticas nacionais e internacionais em segurança radiológica ambiental.

Ademais, essas estratégias consolidadas ao longo do PMA podem contribuir significativamente para o CENTENA, o novo depósito nacional de rejeitos radioativos, ao fornecer subsídios técnicos valiosos para a formulação de políticas públicas mais robustas. Dessa forma, o modelo adotado no repositório de Abadia de Goiás representa uma importante referência para o aprimoramento do controle ambiental radiológico em escala nacional, promovendo maior segurança, transparência e responsabilidade na gestão de rejeitos radioativos no Brasil.

Agradecimentos

Os autores expressam sua sincera gratidão à CNEN pelo suporte institucional e pelas diretrizes técnicas que nortearam a execução deste trabalho. Agradecemos especialmente ao CRCN-CO pelo apoio contínuo, pela disponibilização de infraestrutura laboratorial e pela colaboração ativa nas atividades de monitoramento e análise ambiental.

Reconhecemos também o CDTN pelas contribuições técnicas fundamentais, particularmente nas atividades de intercomparação de dosímetros e no suporte metrológico às medições realizadas. A parceria entre essas instituições foi essencial para o

desenvolvimento e aprimoramento do PMA abordado neste estudo.

Referências

1. RIBEIRO, Edison; TAUHATA, Luiz; SANTOS, Eliane Eugenia dos; CORRÊA, Rosangela da Silveira. Analytical results and effective dose estimation of the operational Environmental Monitoring Program for the radioactive waste repository in Abadia de Goiás from 1998 to 2008. *Journal of Environmental Radioactivity*, [s.l.], v. 102, p. 145-152, 2011. Acesso em: 19 mar. 2025.
2. COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. *Diretrizes básicas de proteção radiológica: norma CNEN NN 3.01 Resolução 164/14 Março / 2014*. Rio de Janeiro, Acesso em: 26 jun. 2025.
3. DISTRITO DE GOIÂNIA. *Plano de Monitoração Ambiental – Fase Operacional do Repositório de Rejeitos Radioativos de Abadia de Goiás*. Goiânia: CRCN-CO, 1997.
4. NUCLEN – Engenharia e Serviços S.A. *Repositório de Abadia de Goiás – Relatório Final de Análise de Segurança*. Vol. 2, 1997.
5. INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION (ICRP). *Principles of Monitoring for the Radiation Protection of the Population*. ICRP Publication 43. Oxford: Pergamon Press, 1984.

Contato:

Laísa Vieira dos Santos

Bolsista PROBIC no Centro Regional de Ciências Nucleares do Centro-Oeste (CRCN-CO) - Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) - Graduanda em Física Médica no Instituto de Física da Universidade Federal de Goiás (UFG).

Prédio de Radioproteção - BR 060, km 174,5 · Abadia de Goiás - GO - Brasil · CEP 75345-000 · Tel.: (62) 3604-6000

santos.laisa@cnen.gov.br