

## **OTIMIZAÇÃO DOS PARÂMETROS ANALÍTICOS PARA DETERMINAÇÃO DE ATIVIDADE ALFA E BETA TOTAL EM ÁGUA PARA CONSUMO HUMANO POR ESPECTROMETRIA DE CINTILAÇÃO EM MEIO LÍQUIDO**

### **Luciene Vertello de Resende <sup>(1)</sup>**

Doutora em ciências na área de Química Analítica pela UFMG (2015), Mestre em Ciência e Tecnologia das Radiações, Minerais e Materiais pelo CDTN/CNEN (2011), graduada em Química pela UFMG (2009) e MBA em Gestão Estratégica Empresarial - FSV (2021). Atualmente é Analista de Controle de Qualidade de Águas e Efluentes da COPASA/MG. Possui experiência em procedimentos de preparo de amostras; desenvolvimento e validação de métodos; determinação elementar por FAAS, UV/VIS, ICP OES/MS e TXRF.

### **Mateus Felipe Pereira Fonseca**

Graduando em Química pela UFMG. Técnico em Química pelo CEFET-MG (2019). Atualmente é Técnico de Laboratório na COPASA/MG. Possui experiência em tratamento de águas residuais por adsorção e osmose inversa; determinação elementar por ICP OES.

### **Sabrina Verônica Pompilho**

Bacharel em Química Tecnológica pela UFMG (2022). Atualmente é Técnica Especializada de Laboratório na COPASA/MG. Possui experiência em determinação elementar por AA e ICP OES/MS.

**Endereço <sup>(1)</sup>:** Rodovia BR 356, Km 4, s/n - Olhos D'Água – Belo Horizonte – MG – CEP: 30320-765 – Brasil – Tel: +55 (31) 3250-2314 – email: luciene.resende@copasa.com.br

## **RESUMO**

A portaria de potabilidade do ministério da saúde GM/MS N°888/2021 dispõe sobre os padrões de potabilidade da água para consumo humano e estabelece como níveis de triagem, do ponto de vista radiológico, valores de concentração de atividade que não excedam  $0,5 \text{ BqL}^{-1}$  para atividade alfa total e  $1,0 \text{ BqL}^{-1}$  para beta total. A contagem de cintilação líquida (*LSC*) se destaca entre os métodos capazes de identificar e quantificar as atividades alfa e beta total por apresentar procedimentos metodológicos mais simples e eficientes quando comparada com as demais técnicas de detecção de radiação ionizante. Neste trabalho, os estudos preliminares utilizando o cintilador Quantulus GCT 6220, resultaram na escolha do PSA 153 que apresentou a melhor configuração de discriminação  $\alpha/\beta$ , com eficiência de 98,9% para contagem  $\alpha$  e 92,5% para  $\beta$ , nas janelas de contagem de 0-1000 keV e 0-2000 keV para  $\alpha$  e  $\beta$ , respectivamente. Os limites de detecção ( $0,065 \pm 0,002$ )  $\text{Bq L}^{-1}$  e ( $0,132 \pm 0,002$ )  $\text{BqL}^{-1}$  para atividades  $\alpha$  e  $\beta$ , respectivamente, após 270 min de contagem, indicam a viabilidade da técnica para atendimento aos valores de referência da portaria.

**PALAVRAS-CHAVE:** cintilação líquida, atividade alfa, atividade beta.

## **1. INTRODUÇÃO**

A gestão de recursos hídricos é uma temática importante tanto no âmbito nacional quanto no internacional, uma vez que a água é considerada um bem indispensável para o sustento da humanidade. Por se tratar de um direito humano básico e essencial, a garantia da qualidade da água consumida pela população é de grande relevância a fim de se assegurar uma política de saúde eficaz (HO et al. 2020).

No Brasil, a água considerada potável e que não oferece risco à saúde deve estar em conformidade com o padrão estabelecido na portaria de potabilidade do ministério da saúde GM/MS N°888/2021. Dentre os diversos parâmetros que devem ser usados na avaliação da potabilidade da água, do ponto de vista radiológico, está o monitoramento da atividade alfa total e beta total, cujos níveis de triagem não devem exceder  $0,5 \text{ BqL}^{-1}$  e  $1,0 \text{ BqL}^{-1}$ , respectivamente (BRASIL, 2021).

A presença de radionuclídeos na água pode estar associada a geologia e geoquímica do território, sendo que o seu transporte vai depender da sua solubilidade neste meio. O  $^{40}\text{K}$ , por ser de ocorrência natural, é um dos radionuclídeos com maior possibilidade de ser encontrado em água para consumo humano (MINGOTE e COSTA, 2016). Outras contribuições podem ser observadas devido a contaminações provenientes de atividade mineradora e de centros nucleares.

Nos últimos anos, os estudos radiológicos em regiões de radioatividade natural elevada têm sido intensificados, buscando verificar quais seriam os possíveis efeitos biológicos no homem decorrente de exposições prolongadas a baixas doses de radiações ionizantes, neste caso, devidas basicamente aos isótopos naturais das séries do Urânio-238 e do Tório-232 (OLIVEIRA, 1998).

O processo de identificação de espécies radioativas específicas e determinação da sua concentração requerem análises sofisticadas e dispendiosas, o que normalmente não é justificado, uma vez que as concentrações de radionuclídeos são comumente muito baixas. Uma abordagem mais prática é utilizar um procedimento de rastreio, em que primeiro é determinada a radioatividade total, presente na forma de radiação alfa e beta, sem considerar a identidade de radionuclídeos específicos (OLIVEIRA, 1998; POMPILHO, 2022).

A contagem de cintilação líquida (*Liquid Scintillation Counting - LSC*) se destaca entre os métodos capazes de identificar e quantificar as atividades alfa e beta total por apresentar procedimentos metodológicos mais simples e eficientes quando comparada com as demais técnicas de detecção de radiação ionizante (JOBBA'GY et al., 2010). Na contagem por cintilação líquida, a energia do radionuclídeo é convertida em luz usando um coquetel de cintilação. A principal característica da técnica é o fato de o fenômeno de cintilação ocorrer em meio líquido, o que lhe confere maior eficiência de detecção quando comparada com um cintilador externo à amostra.

Os fótons emitidos pelas moléculas do cintilador podem ser convertidos prontamente em um feixe de elétrons com o uso de um fotomultiplicador (TFM) que, em seguida, são medidos como um pulso elétrico que é salvo no analisador multicanal (MCA). Dentro do MCA, os pulsos detectados são classificados por energia, medida em keV, gerando um espectro de energia ajustável em uma escala linear ou logarítmica. Apesar de a energia de  $\alpha$ -nuclídeos ser muito maior (tipicamente 2-8 MeV) que a energia dos  $\beta$ -nuclídeos (tipicamente 0-2 MeV), o espectro resultante pode apresentar sobreposição. Essa sobreposição é devido à baixa conversão de energia dos  $\alpha$ -nuclídeos (apenas ~10% da energia é convertida em luz) combinada com a perda devido à colisão das partículas  $\alpha$  com outros elementos. Isto resulta na detecção da maioria dos  $\alpha$ -nuclídeos na faixa de energia de 100-800 keV (dependendo do *quench*), o que pode gerar sobreposição com muitos  $\beta$ -nuclídeos (PERKINELMER, 2019).

Devido à sobreposição espectral de  $\alpha$  e  $\beta$ -nuclídeos, a discriminação dos eventos é fundamental para que as medidas de radiação  $\alpha/\beta$  total sejam feitas de forma precisas e acuradas. Assim, a discriminação é feita com base no comprimento dos pulsos dos nuclídeos. No equipamento Liquid Scintillation Analyzer Quantulus™ GCT 6220, a discriminação é feita por meio da ferramenta *Pulse Shape Analysis* (PSA). A discriminação de pulso depende do *quench* da amostra e do tipo de vial utilizado para as contagens.

O nível ótimo de discriminação  $\alpha/\beta$  é determinado pela contagem de padrões alfa e padrões beta puros em diversas configurações de PSA. A melhor discriminação é escolhida de modo a minimizar a interferência total ( $\tau$ ), isto é, a soma das interferências relativas  $\tau_\alpha$  (fração de contagens observadas na janela beta quando um emissor alfa é medido) e  $\tau_\beta$  (fração de contagens observadas na janela alfa quando um emissor beta é medido). As principais interferências na contagem em cintilador líquido são: radiação de *background*, *quench*, luminescência, eletricidade estática e efeito parede, além da presença de múltiplos radionuclídeos (PASSO, COOK, 1994).

Assim, para aplicação da técnica em amostras de água para consumo humano, a primeira etapa deste trabalho consistiu em otimizar as condições de contagem em que se tem a melhor eficiência de discriminação  $\alpha/\beta$  por meio da determinação do PSA. Também foi feita a determinação do limite de detecção, calculado segundo a equação de Currie (ZAPATA GARCIA, 2011), e da incerteza associada à medição.

## 2. OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é a determinação da configuração ótima de PSA e do limite de detecção e sua incerteza associada, visando a implantação da metodologia para determinação de atividades alfa e beta totais em amostras de água para consumo humano por espectrometria de cintilação em meio líquido para atendimento à portaria de potabilidade GM/MS N°888/2021.

### 3. METODOLOGIA

#### 3.1 Equipamentos

Para o preparo dos padrões de calibração, foram utilizados balança analítica (Shimadzu AUW220D), balões volumétricos calibrados, micropipeta eletrônica e pipeta de Pasteur de vidro. As atividades alfa e beta totais foram medidas usando o cintilador Quantulus GCT 6220 (Wallac, Turku, Finland). Os espectros foram avaliados utilizando o software Spectra Works2 v1.1. Foram utilizados vials de 20 mL de polietileno (Perkin Elmer, Waltham, Massachusetts, USA) e o líquido de cintilação Ultima Gold LLT (Perkin Elmer).

#### 3.2 Reagentes e Soluções

Foram utilizados água ultrapura obtida do sistema de purificação de água Millipore e reagentes de grau analítico. Padrão de  $^{241}\text{Am}$  de atividade 3,855 kBq em 5,06148 g (Eckert & Ziegler, Valência, Califórnia, USA),  $^{90}\text{Sr}$  de atividade 3,800 kBq em 5,00912 g (Eckert & Ziegler, Valência, Califórnia, USA), conjunto de padrões isentos de *quenching* (PerkinElmer, Boston, MA, USA), consistindo em um branco (*background*),  $^{14}\text{C}$  de atividade 128400 dpm e  $^3\text{H}$  de atividade de 271400 dpm. Para a diluição dos padrões foi utilizado HCl 37 % m/m (LS Chemicals).

#### 3.3 Preparo dos padrões de $^{241}\text{Am}$ e $^{90}\text{Sr}$

O conteúdo de cada ampola de padrão foi quantitativamente transferido, com o auxílio da pipeta de Pasteur, para balões volumétricos de 250 mL distintos, parcialmente preenchidos com solução de HCl  $1,0 \text{ molL}^{-1}$  e previamente pesados, a fim de se determinar a massa exata adicionada a cada um. Na sequência, os balões foram preenchidos com a solução de HCl  $1,0 \text{ molL}^{-1}$ .

Para o preparo dos padrões com atividade aproximada de 10 Bq, foram retiradas as alíquotas de 651  $\mu\text{L}$  e 662  $\mu\text{L}$  das soluções intermediárias de  $^{241}\text{Am}$  e  $^{90}\text{Sr}$ , respectivamente, e estas foram transferidas para vials de polietileno distintos, aos quais foram adicionados 7,35 mL de HCl  $0,1 \text{ molL}^{-1}$  e 12 mL de coquetel de cintilação a fim de manter a proporção amostra/coquetel de 8:12. Os vials foram agitados por cerca de 60 segundos e acondicionados ao abrigo da luz e à temperatura ambiente por cerca de 24 horas, visando a redução da foto e quimioluminescência. O branco foi preparado pela mistura de 8 mL de HCl  $0,1 \text{ molL}^{-1}$  e 12 mL de coquetel de cintilação.

#### 3.4 Calibração

Antes da contagem de qualquer amostra, o sistema deve ser normalizado e calibrado usando o protocolo *Self Normalization and Calibration* (SNC), o qual foi conduzido com a utilização de soluções padrões de  $^{14}\text{C}$ ,  $^3\text{H}$  e branco (*background*), segundo as especificações do fabricante.

#### 3.5 Determinação do PSA

O PSA foi determinado pelo cálculo da interferência (*spillover*) alfa e beta em diferentes valores de PSA (1-255) utilizando a ferramenta *PSA Histogram*. Os padrões de  $^{90}\text{Sr}$  e  $^{241}\text{Am}$  com atividade de 10 Bq foram contados por 30 minutos na janela alfa (0 – 1000 keV) e na beta (0 – 2000 keV). Duas possibilidades de discriminante foram determinadas: único e dual.

#### 3.6 Análises dos Padrões

Para avaliar a eficiência da contagem  $\alpha/\beta$  no PSA previamente determinado, os padrões de  $^{241}\text{Am}$  e  $^{90}\text{Sr}$  de 10 Bq foram submetidos a 30 e 60 min de contagem utilizando o PSA único e o dual. Para todos os ensaios, a mistura amostra/coquetel foi reservada em ambiente escuro e à temperatura ambiente por cerca de 24 h e ambientada no equipamento por cerca de 30 min antes das análises.

O limite de detecção (equação 1) foi calculado de acordo com a equação de Currie (ZAPATA GARCIA, 2011) com um nível de confiança de 95%. Para tal, foi realizada a contagem, em janela aberta, do branco, por 270 minutos, no PSA 153.

$$L_d(\text{BqL}^{-1}) = \frac{2,71+3,29\sqrt{t.R}}{t.EFA.V.60} \quad \text{equação (1)}$$

Em que: R – Taxa de contagem do branco (cpm)  
T – Tempo de contagem total (min)  
V – Volume da amostra (L)  
EFA – Eficiência de contagem

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Calibração

Durante o protocolo de normalização e calibração, a voltagem aplicada aos tubos das duas fotomultiplicadoras (TFMs) é ajustada até que haja sincronização de resposta para o padrão de  $^{14}\text{C}$ . Em seguida, a voltagem de ambas TFMs é ajustada simultaneamente até que o ponto final do espectro de  $^{14}\text{C}$  esteja na posição apropriada do analisador multicanal. Esse processo é realizado com a finalidade de assegurar que o instrumento quantifique acuradamente a energia emitida por todas as partículas beta. Para  $^3\text{H}$ , na faixa de 0-18.6 keV, a eficiência mínima aceitável é de 58% e, 90% para  $^{14}\text{C}$  na faixa de 0-156 keV. Na Tabela 1, são apresentados os resultados obtidos das medidas de background, eficiência de contagem, sensibilidade (*FOM – Figure of Merit*) e reprodutibilidade de contagem de amostra (Chi Quadrado) e seus valores de referência (VR). Como pode ser observado, os resultados obtidos indicam o adequado funcionamento do equipamento.

**Tabela 1 – Avaliação dos parâmetros de desempenho do Quantulus GCT 6220**

$^{14}\text{C}$ Eficiência (VR > 90%)	$^{14}\text{C}$ FOM (VR > 380)	$^{14}\text{C}$ Chi-Quadrado (VR: 7.63 – 36,19)	$^{14}\text{C}$ Background
92,27%	6009,74	22,89	1,42 CPM
$^3\text{H}$ Eficiência (VR > 58%)	$^3\text{H}$ FOM (VR > 180)	$^3\text{H}$ Chi-Quadrado (VR: 7.63 – 36,19)	$^3\text{H}$ Background
60,50%	1363,91	24,49	2,68 CPM

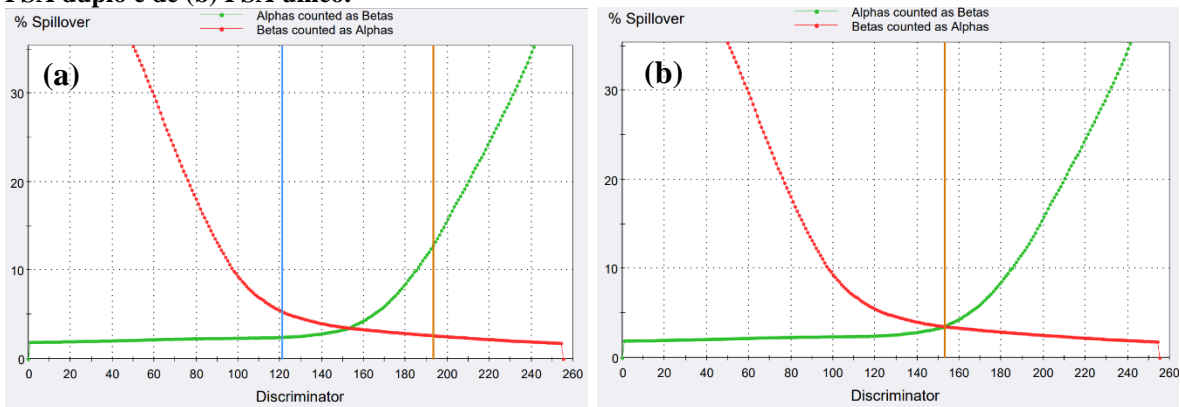
Fonte: elaboração própria.

### 4.2 Discriminação $\alpha/\beta$ – PSA

Para que seja possível fazer a determinação simultânea das emissões  $\alpha$  e  $\beta$ , deve-se estabelecer o valor ótimo do parâmetro da discriminação de pulsos a fim de distinguir corretamente os pulsos alfa e beta, mantendo-se as interferências  $\tau\alpha$  e  $\tau\beta$  nos valores mínimos possíveis. A janela de contagem para a medição de emissão  $\alpha$  e  $\beta$  compreende tipicamente a faixa de 50-600 keV e 10-600 keV, respectivamente (PERKINELMER, 2019), entretanto, esse valor pode mudar dependendo do *quenching* das amostras. Assim, neste estudo preliminar, selecionou-se as janelas de 0-1000 keV para  $\alpha$  e 0 – 2000 keV para  $\beta$  (escala linear), de modo a contemplar uma ampla faixa de emissores alfa e beta.

Nas Figuras 1a e 1b, são apresentados os gráficos de interferências  $\tau\alpha$  e  $\tau\beta$  em função do valor de PSA para os padrões de  $^{241}\text{Am}$  e  $^{90}\text{Sr}$  (10 Bq), os quais foram utilizados para avaliar as opções PSA dual (1a) e único (1b). A abordagem escolhida para seleção do PSA ótimo foi o uso de curvas cruzadas de  $\tau\alpha$  e  $\tau\beta$ , em que o ponto no qual ocorre a intersecção de ambas é onde as interferências se igualam. Nesses gráficos, é possível observar que, à medida que o PSA aumenta (*discriminator*), a porcentagem de eventos classificados erroneamente como emissões  $\beta$  diminuem, mas aumenta para os emissores  $\alpha$ . O modo dual de PSA (121/193) foi o definido pelo software devido a minimização da interferência total ( $\tau$ ): 5,479%. O modo PSA único (153), por sua vez, apresentou interferência total ( $\tau$ ) 7,046%. Nesta abordagem, O PSA dual (121/193) mostrou resultado mais satisfatório, um menor valor de interferência total, o que indica menor probabilidade de classificações errôneas de eventos alfa como beta e beta como alfa. Contudo, essa é uma análise inicial, e ainda se faz necessária a avaliação das eficiências de contagem obtidas para amostras em ambas as condições de PSA para a determinação de uma condição ideal.

**Figura 1 – Interferência alfa ( $\tau\alpha$ ), beta ( $\tau\beta$ ) e total ( $\tau$ ) em função do valor de PSA para  $^{241}\text{Am}/^{90}\text{Sr}$  em  $\text{HCl } 0,1 \text{ molL}^{-1}$  e coquetel Última Gold LLT na razão 8:12 mL, vial de polietileno com a seleção de (a) PSA duplo e de (b) PSA único.**



Fonte: elaboração própria.

### 4.3 Análise dos Padrões

Na Tabela 2, são apresentados os resultados da eficiência de contagem  $\alpha/\beta$  para os padrões de  $^{241}\text{Am}/^{90}\text{Sr}$  de 10 Bq para análises realizadas utilizando a condição de PSA dual (121/193) e único (153) em dois tempos de contagem, 30 e 60 min. Como pode ser observado, o tempo não mostrou influência significativa no aumento da eficiência de contagem alfa/beta nos dois PSAs avaliados, nem na diminuição dos valores de *spillover*. Entretanto, ao se comparar as eficiências obtidas com os PSAs único e dual, verifica-se que o PSA 153 indicou melhor eficiência de contagem para alfa (98,9% em 30 min e 98,5% em 60) em comparação com o PSA 121/193 (89,5% em 30 min e 89,2% em 60 min). A eficiência de contagem para beta, apesar de aparentar uma tendência de queda, não sofreu uma variação tão significativa como a de alfa para nenhuma das condições analisadas. Essa queda da eficiência é esperada, tendo em vista que a utilização do PSA dual faz com que, ao longo da faixa de PSA 121-193, as emissões sejam categorizadas como eventos não classificados, com o intuito de diminuir o *spillover*, já que é nessa região que há a maior probabilidade de ocorrerem classificações equivocadas, o que pode ser observado ao se analisar as curvas apresentadas nas Figuras 1a e 1b.

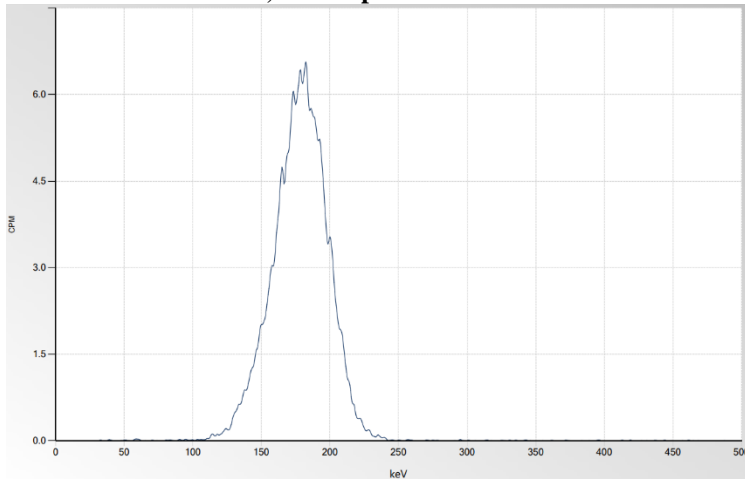
**Tabela 2 - Eficiências de contagem e valores de interferência encontrados na análise dos padrões em diferentes condições**

Ensaio	PSA	Tempo de contagem (min)	Spillover (%)			Eficiência (%)	
			$\tau\alpha$	$\tau\beta$	$\tau$	$\alpha$	$\beta$
1	153	30	3,23	2,07	5,30	98,9	92,5
2	153	60	3,18	2,09	5,27	98,5	92,1
3	121/193	30	2,36	1,54	3,91	89,5	91,1
4	121/193	60	2,25	1,39	3,63	89,2	89,2

Fonte: elaboração própria.

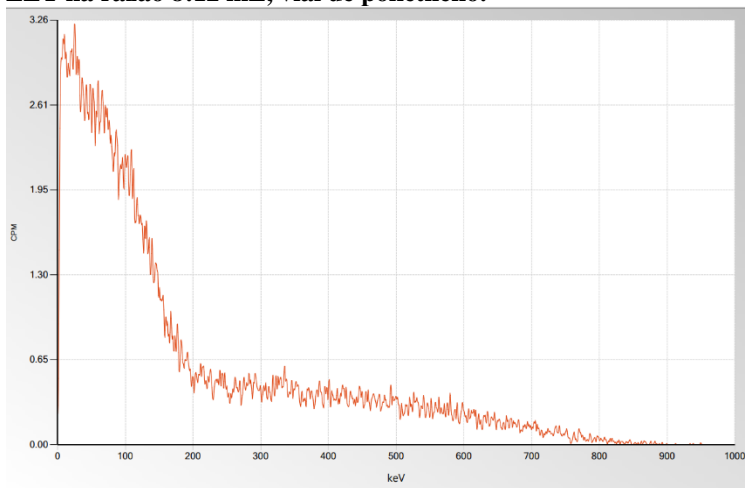
Os espectros alfa e beta total dos padrões de  $^{241}\text{Am}$  e  $^{90}\text{Sr}$  estão apresentados nas Figuras 2 e 3. É possível notar que, para o padrão puro de  $^{241}\text{Am}$  (Figura 2), a resposta de contagem está presente, quase na sua totalidade, na faixa de 50-300 keV de energia (escala linear). Enquanto que para o padrão puro de  $^{90}\text{Sr}$  em equilíbrio secular com o  $^{90}\text{Y}$ , a resposta é observada faixa de 0-800 keV (escala linear). Para medições de emissões beta, comumente, é selecionada a janela de contagem a partir de 20 keV de forma a excluir as emissões beta de menor energia, como as contribuições de  $^3\text{H}$ , por exemplo, além de se excluir os sinais provenientes de efeitos de quimio e fotoluminescência (EDLER, 2017; ISO 11704, 2018). Para ambas as medições, observa-se a possibilidade de redução da janela de contagem visando a exclusão de eventos indesejados, o que pode resultar em diminuição do *spillover*, uma vez que as classificações errôneas externas a essas janelas seriam eliminadas.

**Figura 2 – Espectro  $\alpha/\beta$  em PSA 153 para padrão de  $^{241}\text{Am}$  em  $\text{HCl}$   $0,1 \text{ molL}^{-1}$  e coquetel Ultima Gold LLT na razão 8:12 mL, vial de polietileno.**



Fonte: imagem fornecida pelo software Spectra Works2 v1.1.

**Figura 3 – Espectro  $\alpha/\beta$  em PSA 153 para padrão de  $^{90}\text{Sr}$  em  $\text{HCl}$   $0,1 \text{ molL}^{-1}$  e coquetel Ultima Gold LLT na razão 8:12 mL, vial de polietileno.**



Fonte: imagem fornecida pelo software Spectra Works2 v1.1.

#### 4.4 Determinação do limite de detecção

Os limites de detecção, calculados pela Equação 1, apresentaram resultados satisfatórios de  $0,065 \pm 0,002 \text{ BqL}^{-1}$  para determinação alfa e  $0,132 \pm 0,002 \text{ BqL}^{-1}$  para beta, considerando-se a análise de uma amostra de 100 mL e tempo de contagem de 270 min, PSA de 153. Estes valores são inferiores as concentrações máximas permitidas para atividade alfa e beta total em água para consumo humano, de acordo com a portaria de potabilidade GM/MS N°888/2021 (0,5 e  $1,0 \text{ BqL}^{-1}$  para alfa e beta, respectivamente), indicando a viabilidade da técnica para aplicação no monitoramento legal.

### 5. CONCLUSÃO

Realizou-se a determinação do PSA ótimo no modo único (153) e no dual (121/193) e compararam-se as eficiências de contagem de uma amostra utilizando ambas as escolhas. Os resultados permitem afirmar que, neste estudo preliminar, a configuração de PSA único (153) se mostrou mais promissora. Mesmo que a interferência total (7,046%) para o PSA 153 tenha sido maior que para o PSA dual 121/193 (5,479%) a eficiência de contagem, para a radiação alfa, apresentou uma eficiência consideravelmente superior, o que justifica a sua escolha.

Para a configuração ótima escolhida, o limite de detecção da técnica para a análise de uma amostra de 100 mL durante 270 min de contagem foi  $0,065 \pm 0,002 \text{ BqL}^{-1}$  e  $0,132 \pm 0,002 \text{ BqL}^{-1}$  para atividade alfa e beta, respectivamente. Ambos os valores são consideravelmente menores que os valores máximos permitidos pela portaria de potabilidade GM/MS N°888/2021, o que corrobora a aplicabilidade da espectrometria de cintilação em meio líquido para análise de água para consumo humano.

Os estudos preliminares indicam a viabilidade da técnica para aplicação na rotina laboratorial para monitoramento e controle da água para consumo humano. As etapas futuras envolvem os estudos para: seleção de janela de contagem, efeito de quenching nas amostras, utilização de ferramentas para correção de quenching, preparo de amostras e tempo de contagem.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. BRASIL. Ministério da Saúde. Gabinete do Ministro. Portaria n° 888, de 04 de dezembro de 2021.
2. EDLER, R.H.W. *Measurement of  $^3\text{H}$ , gross  $\alpha/\beta$  and  $^{222}\text{Rn}$  in drinking water using the new Quantulus GCT 6220. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, p.695-699, ago. 2017.
3. HO, P.L., HUNG, L.D., MINH, V.T., et al. *Simultaneous Determination of Gross Alpha/Beta Activities in Groundwater for Ingestion Effective Dose and its Associated Public Health Risk Prevention. Scientific Reports*, 10:4299, mar. 2020.
4. ISO 11704. *Water quality – Gross alpha and gross beta activity – Test method using liquid scintillation counting*, 2018
5. JOBBÁGY, V., WÄTJEN, U., MERESOVA, J. *Current status of gross alpha/beta activity analysis in water samples: a short overview of methods. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 286, p.393-399, Budapest, 2010.
6. MINGOTE, R.M., COSTA, H.F. *Avaliação do método de espectrometria por cintilação em meio líquido para a medida das atividades alfa e beta total em água: aplicação a águas de abastecimento público no estado de Goiás, Brasil. Engenharia Sanitária e Ambiental*, v.21, n.3, p.569-578, jul./set. 2016.
7. OLIVEIRA, J. *Determinação dos níveis de Radioatividade Natural em Água Utilizadas para Abastecimento Público no Estado de São Paulo. São Paulo, 1998. Tese de doutorado – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – Universidade de São Paulo, 1998.*
8. PASSO, C.J.Jr., COOK, G.T. *LSC Handbook of Environmental Liquid Scintillation Spectrometry. Packard Instrument Company, Meriden, 1994.*
9. PERKINELMER. *Guide to the analysis of radioactivity in drinking water. 2019. Disponível em [https://resources.perkinelmer.com/lab-solutions/resources/docs/gde\\_014626\\_01\\_radioactivity\\_in\\_drinkingwater.pdf](https://resources.perkinelmer.com/lab-solutions/resources/docs/gde_014626_01_radioactivity_in_drinkingwater.pdf). Acesso em: 20/05/2023.*
10. POMPILHO, S.V. *Implantação de metodologia: Determinação de atividade alfa e beta total em água para consumo humano por cintilação líquida. Belo Horizonte, 2022. Trabalho de Conclusão de Curso – Departamento de Química – Universidade Federal de Minas Gerais, 2022.*
11. ZAPATA GARCIA, D. *Determinació d'índexs d'activitat alfa total i beta total per escintil·lació líquida. Barcelona, 2011. Tesi Doctoral – Facultat de Química – Universitat de Barcelona, 2011.*