PALANRAS CHARES/HEY WORDS AUTORIZAJA POMAUTORIZE) or MEDIMENTO DE DETECIO (RADIAÇÃO GAMA)   PRODIMENTO DE DETECIO (RADIAÇÃO GAMA) Marcal de INFORMACIÓN CONTRUCTOR RESPONSUEL ALTINOR DANIEL J. R. Nordemann Deribulgão/Obtribution RESPONSUEL ALTINOR DANIEL J. R. Nordemann   DANIEL J. R. Nordemann CDU/UGC DATA/DATE JULIO, 1382   DANIEL J. R. Nordemann CDU/UGC   SEDECTROMETRIA GAMA DE GEOMETRIA 4m INFINITA Daniel Jean Roger Nordemann DATA/DATE JULIO, 1382   NUMBER NORTEN ALTINA ALTINA ALTERNAL DANIEL J. R. Nordemann   SEDECTROMETRIA GAMA DE GEOMETRIA 4m INFINITA Daniel Jean Roger Nordemann DGA NOCEMARS   NO DE PAG. VERSIÓN NO DE PAG. VERSIÓN   NO DE PAG. VERSIÓN NO DE PAG. VERSIÓN   NO DE PAG. VERSIÓN DATA/DATE JULIO, 1382   NO DE PAG. VERSIÓN NO DE PAG. VERSIÓN   NO		AUTORIZAÇÃO PARA PUBLICAÇÃO AUTHORIZATION FOR PUBLICATION
AUTOR RESPONSAVEL Datiel J.R. Nordemann Distribução/Distributov Datiel J.R. Nordemann Distribução/Distributov Datiel J.R. Nordemann Distribução Distribução Estenna / Extenna / Extenna RESTRITA / RESTRICTED Distribução Data Por / Reviseo V Endelse   550.3:539.16 Coulude Data / Date Situation no Publication no DISTRIA (AMA DE GEOMETRIA 4m INFINITA Datiel Jean Roger Nordemann Distribução Data Por Reviseo V Publication no Publication no P	PALAVRAS CHAVES/KEY WORDS ESPECTROMETRIA GAMA GEOMETRIA 4™ INFINITA RENDIMENTO DE DETEÇÃO (RADIAÇÃO G	AMA)
CDU/UDC 550.3:539.16 PUBLICATION NO INFE-4233-PRE/1108 PUBLICATION NO INFE-4233-PRE/1108 DGA PCOUETO MATERX NO OF PAGES 24 18 VERSION NO OF PAGES 24 18 VERSION NO OF PAGES 24 18 VERSION NO OF MAPS NO OF MAP	AUTOR RESPONSAVEL RESPONSIBLE AUTHOR Wordemann Daniel J.R. Nordemann	NO/DISTRIBUTION NTERNAL EXTERNAL RESTRICTED REVISADA POR/REVISED BY Enio B. Pereira
PUBLICATION NO INFE-4233-PRE/1108 BESPECTROMETRIA GAMA DE GEOMETRIA 4m INFINITA Daniel Jean Roger Nordemann Bevido à fraca absorção da radiação gama pela matéria, as me didas de espectrometria gama podem ser aplicadão a amostras de grande volu me. Un caso de especial interesse é o da espectrometria gama efetuada com geometria 4m sobre uma amostra que cerca o detetor, a qual pode ser conside rada de extensão infinita. O método é quantitativo mediante a determinação de rendimentos especificos para este tipo de medida.	550.3:539.16	Julho, 1987,
Daniel Jean Roger Nordemann RESUMO-NOTAS/ABSTRACT-NOTES Devido à fraca absorção da radiação gama pela matéria, as me didas de espectrometria gama podem ser aplicadas a amostras de grande volu me. Um caso de especial interesse é o da espectrometria gama efetuada com geometria 4m sobre uma amostra que cerca o detetor, a qual pode ser conside rada de extensão infinita. O método é quantitativo mediante a determinação de rendimentos específicos para este tipo de medida.	PUB PUB INPE-4 ESPECTROMETRIA GAMA DE GEOMETRIA	LICAÇÃO Nº ORIGEM   LICATION NO DGA   233-PRE/1108 PROJETO   4π INFINITA Nº DE PAG.   VERSÃO ULTIMA PAG.   24 18   VERSÃO Nº DE MAPAS
RESUMO-NOTAS / ABSTRACT-NOTES Devido à fraca absorção da radiação gama pela matéria, as me didas de espectrometria gama podem ser aplicadas a amostras de grande volu me. Um caso de especial interesse é o da espectrometria gama efetuada com geometria 4π sobre uma amostra que cerca o detetor, a qual pode ser conside rada de extensão infinita. O método é quantitativo mediante a determinação de rendimentos específicos para este tipo de medida.	Daniel Jean Roger Nordemann	VERSION NO OF MAPS
	RESUMO-NOTA Devido à fraca absorç didas de espectrometria gama podem me. Um caso de especial interesse e geometria 4π sobre uma amostra que rada de extensão infinita. O método de rendimentos específicos para est	ABSTRACT-NOTES

Este trabalho sera apresentado no 29 Encontro Regional de Geofísica (SBGf), novembro de 1987.

# ABSTRACT

Owing to the weak absorption of gamma radiation by matter, gamma-ray spectrometry may be applied to samples of great volume. A very interesting case is that of the gamma-ray spectrometry applied with  $4\pi$  geometry around the detector on a sample assumed to be of infinite extension. The determination of suitable efficiencies allows this method to be quantitative.

.:.

# LISTA DE FIGURAS

- 1 Sondas de espectrometria gama submarina (segundo Chesselet, 196<u>6</u> -1969).
- 2 Curva experimental das variações do rendimento R(E) de deteção fo toelétrica num meio emissor, absorvedor, homogênio e infinito, em função da energia E, para um detetor NaI(TL) de 1 3/4"x2" (segundo Chesselet, 1966-1969).
- 3 Curva experimental das variações do rendimento R(E) de deteção fo toelétrica num meio emissor, absorvedor, homogênio e infinito, em função da energia E, para um detetor NaI(TL) de 4"x3" (segundo Chesselet, 1966-1969).

÷

# LISTA DE TABELAS

- 1 Exemplos de geometrias de deteção usadas em função das partículas ou radiações detetadas, dos detetores e das amostras (ângulo sólido da deteção: omega).
- 2 Valores de rendimentos de deteção (expressos em cps/Bq/kg,contagens por segundo por bequerel por quilograma) para um detetor NaI(T $\ell$ ) de 3"x3" com geometria de deteção 4 $\pi$  infinita e para um meio de densi dade 1, calculados no presente trabalho a partir das determinações de Chesselet (1966-1969).

.

## INTRODUÇÃO

As medidas nucleares são feitas em geral sobre amostras pequenas colocadas dentro ou perto do detetor apropriado. Vale salie<u>n</u> tar a existência de diversas geometrias de deteção que dependem das pa<u>r</u> tículas ou radiações medidas, do detetor do tipo e do volume de amostra analisada. A Tabela 1 mostra alguns exemplos de geometrias de deteção juntas com o detetor empregado e com o tipo de amostra.

A finalidade deste trabalho é apresentar as condições de medida da espectrometria gama aplicada a amostras de grande volume com geometria  $4\pi$ . As condições são tais que a amostra pode ser vista como ocupando o espaço em volta do detetor, tendo dimensões suficientemente grandes para ser consideradas como infinitas (para os efeitos consider<u>a</u> dos). Os valores dos rendimentos de deteção serão determinados exper<u>i</u> mentalmente ou calculados a partir de resultados experimentais para co<u>n</u> dições diferentes, porém semelhantes ãs consideradas aqui. Diferentes tamanhos de detetores também serão contemplados. O caso particular da geometria  $2\pi$  serã também descrito.

#### 1. ESPECTROMETRIA GAMA DE GEOMETRIA INFINITA

Dois casos podem servir de exemplo para apresentar a es pectrometria gama de geometria infinita: a espectrometria gama de campo ou aérea (geometria  $2\pi$  infinita) e a espectrometria gama do oceano in situ (geometria  $4\pi$  infinita).

A espectrometria gama de campo (Nordemann, 1966; Ferrei ra, 1973) ou aérea é um método bastante divulgado e usado tanto para pesquisas radiogeológicas quanto para a procura de jazidas de minérios radioativos (I.A.E.A., 1979). Devido ao custo relativamente baixo e à facilidade de uso, o cristal cintilador de iodeto de sódio ativado com tálio NaI(TI) é amplamente usado para estas medidas. Um rendimento de deteção elevado e a possibilidade de construir detetores de grande vol<u>u</u> me representam vantagens suplementares a favor do uso deste tipo de d<u>e</u> tetor.

Um exemplo menos conhecido de espectrometria gama com geometria infinita é o da espectrometria gama do oceano in situ (Chesselet 1966-1969). Trata-se de um método de medida de produtos de fissão oriundo das explosões nucleares atmosféricas e presentes na cama da misturada do oceano acima da termoclina. O detetor pode ser um cris tal de NaI(Tl) de 4"x3" ou um de 1 3/4"x2" (Chesselet, 1966-1969). O de tetor completo com a fotomultiplicadora e com o pré-amplificador é colo cado num involucro de aço a prova d'água e mergulhado até profundidades de 120m aproximadamente (Figura 1). Um cabo multicondutor leva ao dete tor as várias tensões necessárias e transmite ao navio os sinais prove nientes da deteção dos emissores gama presentes no oceano, os quais cir cundam o detetor. A camada de água acima do detetor representa uma blin dagem natural contra a radiação ambiente de origem cosmica. O tratamen to dos sinais recolhidos é feito a bordo do navio usando a instrumenta ção convencional para este tipo de medidas (analisador de pulsos).

## 2. DETERMINAÇÃO DOS RENDIMENTOS DE DETEÇÃO

Quando um detetor de radiação gama é colocado dentro de um meio uniformemente emissor gama, absorvedor para esta mesma radiação e infinito em todas as direções, ele detetará uma parte da radiação que o atingir e atravessar. Dentro de limites razoaveis (taxas de contagem não muito elevadas), as taxas de contagem oriundas da deteção da radia ção gama de um emissor dado serão proporcionais à atividade específica (por unidade de volume ou de massa) da matéria que constitui o meio. Pa ra tornar quantitativo o método da espectrometria gama de geometria 4π infinita, ha necessidade de conhecer os rendimentos de deteção para a radiação gama proveniente dos emissores de maior interesse. Evidentemen te, estes rendimentos serão função dos seguintes fatores: matéria com a qual o detetor é feito, forma e volume do detetor, matéria do meio am biente (efeito de absorção da radiação) e energia da radiação. Quando se trata da deteção de um certo radionuclideo, o rendimento sendo ex presso em taxa de contagem por unidade de atividade e por unidade de quantidade da matéria do meio; ha também necessidade de levar em conta os fatores ("branching ratios") que caracterizam as atividades gama dos descendentes em relação aos decaimentos dos nuclideos pais.

Os rendimentos podem ser determinados de maneira experi mental ou de maneira teórica. As experiências podem usar fontes radioa tiva distribuídas num volume de matéria sólida ou líquida, com ativida des específicas conhecidas. Elas podem usar fontes radioativas sólidas puntiformes que levam à integração de um número suficientemente grande de pontos de medida. As determinações teóricas são baseadas no uso de tabelas de seção de choque para as interações da radiação gama na maté ria do detetor e do meio. Havendo no decorrer de qualquer uma destas de terminações numerosos motivos de imprecisão, vale salientar a necessida de de usar todos os recursos disponíveis para checar cuidadosamente os resultados, eliminar as discrepâncias e tentar manter as incertezas a níveis razoáveis e compatíveis com as exigências relativas ãs medidas.

# 3. NOÇÕES TEÓRICAS SOBRE OS RENDIMENTOS DE DETEÇÃO

# 3.1 - DEFINIÇÃO DOS RENDIMENTOS DE DETEÇÃO PARA FONTES PUNTIFORMES E PARA FONTES UNIFORMEMENTE DISTRIBUÍDAS EM VOLUME

No caso de uma fonte puntiforme de radiação gama, o rendi mento de deteção deve caracterizar a aptidão do detetor para detetar, is to é, para identificar e quantificar sinais (pulsos) característicos das emissões da fonte. Por estas razões, o rendimento é definido como a razão entre os pulsos contados dentro de um pico característico e as emissões gama da energia considerada. Neste sentido, o rendimento assim definido é um número puro, inferior a 1. Ele pode ser expresso em pul sos detetados por unidade de tempo e por unidade de atividade gama, es ta última sendo expressa com a mesma unidade de tempo.

Esta definição pressupõe a caracterização das condições de integração das contagens: região do espectro, faixa de energia fun ção da resolução, método empregado (contagem total, método da secante, etc.). Este rendimento é evidentemente função da natureza do detetor. do seu volume e formato, da distância entre a fonte e o detetor, do meio absorvedor situado entre a fonte e o detetor. Porém, vale salien tar que todos os detetores identicos, nas mesmas condições geométricas (distância e posição da fonte) e físicas (absorção da radiação entre a fonte e o detetor), têm o mesmo rendimento. Se existe necessidade de avaliar a atividade da fonte em termos de decaimentos, e não apenas em termos de "desexcitações" gama, deverão ser considerados os "branching ratios" específicos dos emissores e das suas respectivas desexcitações gama, como ja foi mencionado.

Quando se considera a deteção de raios gama provenientes de uma fonte volumosa, de possível extensão infinita, o rendimento ac<u>i</u> ma definido seria muito pequeno ou valeria zero, uma vez que as emissões da fonte são numerosas ou infinitas. Para as fontes volumosas ou infin<u>i</u> tas em volume, introduz-se a seguinte definição: o rendimento é a rel<u>a</u> ção entre a frequência dos sinais característicos detetados e a ativida de (gama, neste caso) específica (por unidade de volume) do emissor res ponsável. Este rendimento não é mais um número puro, é homogêneo a um volume, e poderia ser expresso em unidade de volume, uma vez que esta noção de volume tem um significado físico, como será visto mais adiante. Até o presente, várias unidades "funcionais" foram empregadas para ex pressar este rendimento: pulsos por hora por picocurie por litro (cph/ pCi/l) ou pulsos por segundo por bequerel por quilograma. Nos casos es pecíficos, haverá também necessidade de considerar os "branching ratios".

No intuito de simplificar as fórmulas a serem empregadas, os rendimentos poderão ser considerados como as taxas de contagem devi das a uma fonte puntiforme unitária ou a uma atividade específica (por unidade de volume) unitária, dependendo dos casos.

#### 3.2 - FÓRMULA BÁSICA DA DETEÇÃO

Considera-se um detetor cilíndrico (área de base S, espe<u>s</u> sura E) com uma fonte puntiforme de raios gama no eixo cilindro a uma certa distância Y. Em termos simplificados, o rendimento de deteção R é o seguinte:

$$R = \frac{S}{4\pi Y^{2}} \exp(-\mu'Y) (1 - \exp(-\mu E)) , \qquad (1)$$

onde  $\mu$  é um coeficiente de absorção para a radiação considerada, para o material do detetor e para o efeito considerado; e  $\mu'$  é o coeficiente de absorção total para a radiação considerada na matéria que circunda o detetor.

O termo S/4 $\pi$  Y<sup>2</sup> representa a fração de ângulo sólido de<u>n</u> tro do qual o detetor é visto a partir da fonte puntiforme em relação ao espaço total 4 $\pi$  Este termo representa então a fração dos raios <u>ga</u> ma emitido a distância Y da face de entrada do detetor, os quais cons<u>e</u> guiriam atingi-lo se não houvesse absorção na matéria emissora. O termo exp(- $\mu$ 'Y) representa a fração das emissões gama que atingem o detetor após atravessar a espessura Y de matéria absorvedora de coeficiente de absorção  $\mu$ '. O termo (1-exp(- $\mu$ E)) representa a fração da radiação gama que é absorvida dentro de detetor, a qual da lugar ao efeito fotoelétri co ou à absorção total.

As considerações mencionadas acima serão usadas mais adian te, porque elas representam uma aproximação razoável dos diversos feno menos em jogo. Porém vale salientar que um desenvolvimento mais comple to e mais rigoroso haveria de levar em conta fatos como as variações de Y em função das diversas trajetórias possíveis para os raios gama. Da mesma maneira, deve-se constatar que, para cada trajetória a espessura de detetor atravessada não é constante. As seções de choque para as di versas interações mereceriam também maior consideração. O termo da inte ração da radiação gama com a matéria do detetor deveria levar em conta a absorção da radiação, bem como a fração da radiação absorvida que dã lugar ao efeito fotoelétrico ou ã absorção total, o que conduz a dete ção do raio gama no pico de absorção total, habitualmente denominado pi co fotoelétrico.

No presente trabalho, como no trabalho citado (Chesselet, 1966-1969) que será usado mais adiante, as taxas de contagem para cada pico são determinadas pela avaliação da área total do pico (para a dur<u>a</u> cão da medida) que se encontra acima da colina devida ao efeito Compton. O método empregado para esta avaliação é o método da secante, as vezes denominado método da tangente. Neste método a área da contribuição Compton é considerada como o do trapézio limitado na faixa de energia considerada pela reta que junta os dois "vales" que limitam o pico. Es te método é bastante simples, porém apresenta o inconveniente de incer tezas estatísticas elevadas para as atividades fracas.

#### 3.3 - REGRA DO VOLUME

Para valores  $\mu E$  não muito elevados (detetor não muito expresso), pode-se escrever:

$$R = \frac{\mu SE}{4\pi Y^{2}} \exp(-\mu'Y) = \frac{\mu V}{4\pi Y^{2}} \exp(-\mu'Y) , \qquad (2)$$

onde aparece a proporcionalidade do rendimento de deteção com o volume V = S E.

Enquanto um detetor "superficial" para medidas nucleares de amostras puntiformes ou superficiais, como um detetor alfa, por exem plo, tem o rendimento de deteção geométrico proporcional à sua área, um detetor gama tem o seu rendimento aproximadamente proporcional ao seu volume.

Vale salientar que não se trata de uma regra absoluta, mas sim do resultado de um conjunto de aproximações. Se for usada para ava liar o rendimento de deteção de um detetor a partir do rendimento conh<u>e</u> cido de um detetor de outro volume, esta regra acarretará um acréscimo não-desprezível das incertezas.

# 3.4 - DETEÇÃO EM VOLUME

A deteção da radiação gama emitida por emissores distri buidos dentro de objetos que não são puntiformes, mas ocupam volumes im portantes, pode ser tratada a partir da fórmula elementar (1) pela int<u>e</u> gração dos termos relativos aos elementos de volume e ãs possíveis tr<u>a</u> jetórias da radiação gama. O caso do meio uniformemente emissor, unifor memente absorvedor e de simetria esférica centrada no detetor é de alto interesse para várias aplicações. Este caso, estendido a um meio infini to, representa tipicamente o caso da espectrometria gama do oceano in situ, onde a geometria de deteção é chamada de  $4\pi$  infinita. Ele repr<u>e</u> senta também a espectrometria gama de campo ao nível do solo, com uma geometria  $2\pi$  infinita. No caso da simetria esférica centrada no detetor, o vol<u>u</u> me elementar considerado é uma camada esférica de raio x e de espessura dX. Obtém-se então:

$$R = \frac{S}{4\pi X^2} \exp(- '(X-A) (1 - \exp(-E)) 4\pi X^2 dX.$$
 (3)

A formula torna-se simples e pode ser integrada para o es paço considerado:

$$R = \int_{A}^{B} S \exp(-\mu'(X-A)) (1 - \exp(-\mu E)) dX, \qquad (4)$$

onde A é o limite inferior e corresponde ao raio da esfera do involucro do detetor, e B é limite superior e corresponde ao limite exterior do meio emissor e absorvedor que circunda o detetor. O valor de B pode ser infinito no cado de um meio infinito, sem problema de convergência para a integral. Vale salientar o formato do detetor quando se levam em con ta as várias hipóteses simplificadoras: ele é esférico, contido numa es fera de raio A, e visto de todas as direções como tendo uma espessura constante E para os raios que o atravessam. Este formato hipotético é considerado compatível com os formatos habituais para os detetores gama, por exemplo, os cilindros cujo diâmetro não difere muito da sua espessu ra.

A integração é fácil:

 $R = S (1-exp(-\mu E)) exp(\mu'A) (exp(\mu'A)-exp(-\mu'B)) / \mu'.$  (5)

Estas ūltimas formulas permitem expressar algumas concl<u>u</u> sões ūteis: No caso do meio emissor e absorvedor infinito, o rendimen to torna-se:

$$R = S (1 - exp(-\mu E)) / \mu'.$$
 (6)

Para um detetor pequeno em relação às distâncias caract<u>e</u> rísticas da absorção  $1/\mu$  no detetor e  $1/\mu'$  na matéria,  $\mu E$  e  $\mu'A$  são qua<u>n</u> tidades pequenas e a Fórmula 6 transforma-se em:

$$R = S E \mu / \mu'.$$
(7)

Após certas opções simplificadoras, observa-se então que o rendimento de deteção para a radiação gama proveniente de um meio ab sorvedor, uniformemente emissor e infinito, é proporcional ao volume do detetor, ao seu coeficiente de absorção  $\mu$  (em primeira aproximação, o coeficiente para o efeito fotoelétrico é a energia considerada) e inver samente proporcional ao coeficiente de absorção da mesma radiação no meio emissor.

Não obstante as aproximações usadas na demonstração da re gra do volume no caso da geometria  $4\pi$  infinita, vale salientar uma ob servação de ordem física a respeito da deteção da radiação gama nestas condições: imagina-se um detetor convexo que ocupa um volume V delimita do por uma superficie fechada S dentro de uma matéria homogênea, unifor memente emissora e de extensão infinita. Se não houvesse o detetor no volume V, mas a mesma matéria emissora, cada elemento da superfície S seria atravessado nos dois sentidos (de dentro de V para fora e de fora de V para dentro) pelo mesmo fluxo de radiação, estatisticamente. Então, a superfície S por inteiro é atravessada pelo mesmo fluxo de radiação nos dois sentidos. Isto mostra que o detetor de volume V pode, nestas condições, ser atravessado apenas pela radiação emitida por um volume V da mesma materia emissora. Assim sendo, o rendimento, como foi definido, será igual ou inferior (por causa das absorções) ao seu próprio volume ٧.

# 4. RENDIMENTO DE DETEÇÃO PARA UM DETETOR 4"x3" COM GEOMETRIA $4\pi$ INFINI TA (ESPECTROMETRIA GAMA MARINHA IN SITU)

Para tornar quantitativo o método da espectrometria gama da água do mar empregado in situ, havia necessidade de determinar os ren dimentos de deteção para vários detetores e para várias energias, segun do Chesselet et al. (1961) e Chesselet (1966-1969). Após algumas tenta tivas feitas usando fontes puntiformes e a fórmula da integração, estes autores optaram pelas calibrações feitas dentro de cubas de grande volu me (da ordem de 100 litros) com emissores radioativos diluídos. Para ava liar a diferença entre as taxas de contagem obtidas para o volume fini to e as que seriam obtidas num meio infinito, eles usaram um calculo sim ples, baseado no emprego da mesma fórmula de integração.

As Figuras 2 e 3 apresentam a síntese dos resultados obt<u>i</u> dos pelos mesmos autores para detetores de 1 3/4"x2 e de 4"x3", respe<u>c</u> tivamente. Nestas figuras, os valores dos rendimentos de deteção são e<u>x</u> pressos em pulsos por hora por picocurie por litro.

# 5. RENDIMENTO DE DETEÇÃO PARA UM DETETOR 3"x3" E GEOMETRIA 4pi INFINITA

Os rendimentos de deteção para o detetor de 3"x3" foram calculados no presente trabalho a partir dos valores medidos anterior mente para o detetor 4"x3", no caso da espectrometria gama marinha in situ. Duas regiões de interesse foram escolhidas no espectro gama: a) a região de 660 keV, com as emissões do Cs137 e do Cs134, os produtos de fissão emissores gama e típicos das contaminações atmosféricas provenien tes de explosões nucleares ou de acidente de reator nuclear; b) a região de 1460 keV, característica da emissão gama do potássio 40 presente no potássio natural dos gêneros alimentícios. Os valores para o detetor 4"x3" e para a geometria 4π infinita nas condições da espectrometria marinha in situ são 40 e 30 cph/pCi/litro para estas duas faixas de ener gia, respectivamente. A conversão em cps/Bq/kg não apresenta dificulda de, uma vez que:

1 cph = 1/3600 cps e 1 pCi = 0,037 Bq.

Além disto, calcula-se que a relação entre os volumes dos cristais (volume do 3"x3" / volume do 4"x3") vale 0,5635 para a aplica ção da regra do volume.

A Tabela 2 apresenta os valores calculados para o detetor 3"x3" numa geometria  $4\pi$  infinita para um meio homogêneo uniformemente emissor e absorvedor de densidade aproximadamente igual à densidade da água. Dentro das aproximações simplificadoras empregadas, as incertezas associadas a estes valores são da ordem de 30%. Para medidas que usariam estes rendimentos de deteção, haveria necessidade de acrescentar as in certezas associadas à estatística das contagens e às condições geométri cas ou físicas das medidas.

## 6. CONCLUSÃO

Neste trabalho foi mostrado como a espectrometria gama po de ser aplicada às amostras de grande volume com geometrias  $2\pi$  ou  $4\pi$ . O método se torna quantitativo mediante o emprego de rendimentos adequa dos. Estes rendimentos são função do tipo e do tamanho do detetor, da geometria da deteção, da natureza da amostra e da energia da radiação gama considerada. Eles podem ser determinados experimentalmente em con dições iguais ou semelhantes ãs das medidas a serem realizadas ou calcu ladas a partir de rendimentos jã publicados. Deve-se dar atenção espe cial à escolha do método para a determinação das áreas dos picos obser vados nos espectros líquidos e à subtração da contribuição do efeito Compton, sendo preferidos os métodos de regressão que permitem a determi nação simultânea das incertezas estatísticas e sistemáticas.

Nestas condições, a espectrometria gama de geometria  $4\pi$ infinita representa um método quantitativo de determinação das ativida des de emissores gama distribuídos em grandes volumes de matéria absor vedora. Trata-se de um método não-destrutivo; por este motivo, ele per

- 12 -

gêneros alimentícios (carne, leite, etc.).

# - 13 -

# TABELA 1

RADIAÇÃO	DETETOR	GEOMETRIA (OMEGA)	AMOSTRA	OBSERVAÇÃO
alfa	Si barreira de superficie	<2π	delgada	
alfa	contador de grade	2π	puntiforme	contida no detetor
beta	Geiger ou cintilador plāstico	<2π	pequena	fora do detetor
beta,X	contador a gãs	4 π	gasosa	dentro do contador
n gama	contador NaI(Tℓ) Ge(Li) GeHP	<4 π <2π	ambiente pequena ou volumosa	fora do detetor
gama	NaI(Tℓ) Ge(Li) GeHP com poço	4π	pequena	dentro do poço
gama	Na I(TŁ)	2π	terreno infinito	medida gama aérea ou de campo
gama	NaI(TŁ)	4 π	meio infinito	medida in situ ou in loco
gama	Ge(Li) GeHP	pequeno	fontes a grande distância	astronomia gama

TABELA 2

Energia (keV)	660	1460
Rendimento (cps/Bq/kg)	0,168	0,126
2		

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS

- CHESSELET, R., GRJEBINE, T., LAMBERT, G., NORDEMANN, D. Identification directe des nuclides radioactifs dans l'eau de mer par spectrographie gamma. In: COLLOQUES NATIONAUX DU CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE (C.N.R.S.), Villefranche-sur-mer, France, 4-8 avril 1961. Océanographie Géologique et Géophysique de la Méditerranée Occidentale. Paris. Éditions du Centre National de la Recherche Scientifique, 1962. p. 183-210.
- CHESSELET, R. Étude de la radioactivité artificielle du milieu marin par spectrometrie gamma. Thèse de Doctorat d'Université. Paris, Université de Paris, 1966. Publicado também Rapport CEA-R3698, em 1969.
- FERREIRA, C. Espectrometria gama de campo: determinação das condições de deteção, aplicação ao mapeamento de uma jazida de apatita. Tese de Mestrado em Geofísica, PPPG-UFBa. Salvador, UFBa, 1973. 75p..
- INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (I.A.E.A). Gamma-ray surveys in uranium exploration. Vienna, I.A.E.A., 1979.
- NORDEMANN, D.J.R. Emissions gamma de quelques météorites et roches terrestres. Evaluation de la radioactivité du sol lunaire. Thèse de Doctorat ès-Sciences, Paris, Université de Paris, 1966. Publicado também como Rapport CEA-R3017, em 1966.



Figura 1



Figura 2