

# BIOACÚMULO E ELIMINAÇÃO DE $^{137}\text{Cs}$ PELA ALGA *Gracilaria* Greville E ELABORAÇÃO DE MODELO COMPARTIMENTAL

Sandra R. M. Marchese\*, Ieda I. L. Cunha\*\* e Carlos H. Mesquita\*\*

\*Centro Tecnológico da Marinha em São Paulo- CTMSP  
Av. Prof. Lineu Prestes, 2242 - USP - SP - SP  
05508-900

\*\*Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - IPEN-CNEN/SP  
Travessa R. 400 - C.P. 11049 - Pinheiros - SP  
05508-900

## RESUMO

O  $^{137}\text{Cs}$  é um radionuclídeo crítico do ponto de vista radioecológico por apresentar meia-vida física longa (30 anos), um alto rendimento de fissão e ser um análogo químico do sódio e potássio, elemento fundamental para os seres vivos, presente em grandes concentrações em todas as células.

Dentre as algas de importância econômica que ocorrem no litoral do Brasil, destaca-se o gênero *Gracilaria*, considerado o recurso brasileiro mais importante para a produção de ágar.

Considerando-se a importância radioecológica do  $^{137}\text{Cs}$  e por serem as algas um bioindicador para esse radionuclídeo, este trabalho teve como objetivo estudar o acúmulo e eliminação do  $^{137}\text{Cs}$  pela alga *Gracilaria* sp, a partir da água do mar contaminada, e estabelecer um modelo de transferência do  $^{137}\text{Cs}$  neste sistema. Os dados obtidos nos experimentos foram aplicados no programa AnaComp, que permite a análise compartimental, quantificando a transferência do  $^{137}\text{Cs}$  da água do mar para a alga e vice-versa, em função do tempo.

## I. INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, o homem tem produzido artificialmente vários radionuclídeos e dentre esses o  $^{137}\text{Cs}$  é um dos produtos de fissão de grande importância radioecológica, por possuir meia-vida física de 30 anos, alto rendimento de fissão e ter comportamento químico semelhante ao sódio e potássio - importantes constituintes biológicos.

Os radionuclídeos artificiais quando introduzidos no meio marinho sofrem a ação da dispersão, principalmente da diluição. Posteriormente, ocorre uma concentração nos organismos e sedimentos, dependendo das características ambientais e das suas propriedades físico-químicas.

É estimado que do  $^{137}\text{Cs}$  existente na água do mar, 23% está como partícula em suspensão, 7% em estado coloidal e cerca de 70% em estado iônico [1].

O ambiente marinho é considerado um vazadouro natural, sendo que muitos elementos provenientes da atividade humana têm se aproximado ou até mesmo excedido os níveis naturais. As concentrações de algumas substâncias, como o chumbo, alguns radionuclídeos e dióxido de carbono, podem ser detectados até mesmo em mar aberto [2].

A razão entre a concentração do radionuclídeo no organismo e a concentração do mesmo na água é conhecida como Fator de Concentração (FC). Uma vez acumulado pela biota sua eliminação irá depender do seu decaimento físico e da troca com os átomos estáveis do meio marinho. O tempo que o organismo elimina, por processos biológicos, a metade da concentração inicial do radionuclídeo é denominado meia-vida biológica. No caso do  $^{137}\text{Cs}$  (por sua meia-vida física relativamente longa) o processo de eliminação pelo organismo é de suma importância.

O conhecimento do comportamento bem como a distribuição dos radionuclídeos nos diferentes compartimentos do ecossistema marinho é importante para estimar a radioatividade transferida entre os níveis tróficos.

A análise compartimental é um dos meios para quantificar a distribuição de um radionuclídeo em diferentes compartimentos, por exemplo, de um ecossistema marinho - água para organismos, dos organismos para a água, em função do tempo [3].

O modelo do qual se parte é sempre uma hipótese. As equações matemáticas e os modelos são utilizados para descrever os resultados experimentais e obter constantes de velocidade de transferência (k) que

indicam as taxas de absorção e eliminação. Se houver concordância entre os parâmetros determinados experimentalmente e o modelo escolhido, pode-se considerar a hipótese de partida válida.

O presente trabalho tem como objetivo estudar a transferência de  $^{137}\text{Cs}$  da água do mar para a alga *Gracilaria* Greville, quantificando as taxas de acúmulo e eliminação do radionuclídeo.

Dentre as algas marinhas de importância econômica que ocorrem no litoral do Brasil, destaca-se o gênero *Gracilaria*, considerado o recurso brasileiro mais importante para a produção de ágar, sendo atualmente o único gênero utilizado para obtenção ficolóide no país [4].

O ágar é um complexo polissacarídeo, extraído de agarócitos de algas Rhodophyceae. É um substituto da gelatina para fazer emulsões, géis em cosméticos, produção de encapsulados medicinais, base de molde para impressão dental, cultura de bactérias, laxativos, etc.

Os resultados obtidos nestes experimentos foram aplicados no programa AnaComp - Análise Compartmental [5], que forneceu as constantes de transferência (k) do radionuclídeo de um compartimento à outro, e validou o modelo de transferência do radionuclídeo proposto.

## II. PARTE EXPERIMENTAL

**Cultivo.** A alga utilizada nesses experimentos foi coletada na Praia Dura - costão direito - Ubatuba - São Paulo, por E. M. Plastino, é um material isolado unialgal, pertencente ao Banco de Germoplasma de Gracilareacea do Laboratório de Ficologia (LAM) e Herbário do Departamento de Botânica da USP.

Optou-se pela utilização de uma alga isolada para não haver contaminantes (epífitas) que poderiam interferir nos resultados.

A alga foi cultivada no LAM até atingir uma massa adequada para a realização dos experimentos. Uma vez por semana a água e o meio de cultura "Von Stoch", preparado segundo Edwards [6], eram renovados. Após este período, a alga foi transferida ao laboratório do IPEN, onde permaneceu por mais uma semana em aclimatização antes do início do experimento.

**Experimentos de acúmulo e eliminação de  $^{137}\text{Cs}$  pela *Gracilaria* Greville a partir da água contaminada.** O experimento foi realizado em uma caixa de cimento-amianto com dimensões de 64x64x20cm, pintada com tinta epóxi.

Dentro da caixa foram colocados dois béqueres com capacidade de 4L, com tampa de acrílico transparente tendo um orifício para entrada de um tubo de plástico para aeração. Nestes béqueres foram adicionados 2L de água do mar (coletada no CEBIMar-USP, em São Sebastião com salinidade verificada em torno de  $32\text{ gL}^{-1}$ ), esterilizada (filtrada e aquecida por 30 minutos em estufa

a  $120^\circ\text{C}$ ) e enriquecida com o mesmo meio de cultura utilizado no LAM.

A alga foi dividida em 8 amostras com massa de aproximadamente 0,15g, separadas em béqueres de 100 mL. Assim, em cada béquer de 4L ficaram 4 béqueres de 100 mL com quatro amostras de alga (Figura 1).

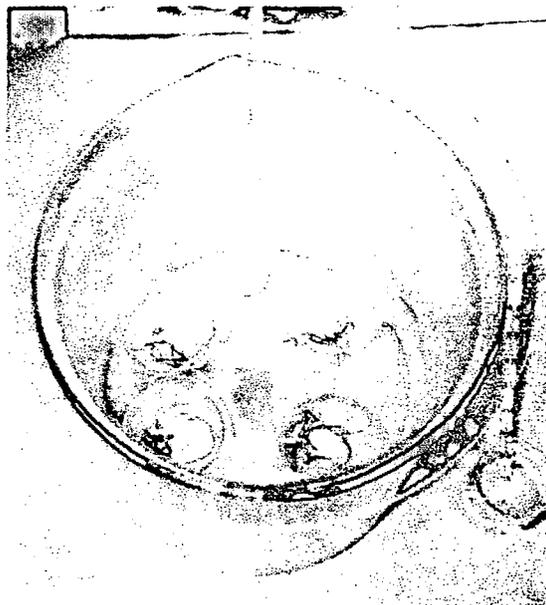


Figura 1 - Divisão da alga em amostras

Antes de introduzir a alga nos respectivos béqueres, foi adicionado o traçador de  $^{137}\text{Cs}$  com atividade de  $1 \times 10^3\text{ Bq/L}$ , esperando-se 48 h para uma possível adsorção de  $^{137}\text{Cs}$  no béquer. A água foi submetida, então, à aeração (e circulação), através do tubo plástico que foi acoplado a um compressor de ar.

O local do experimento foi iluminado por lâmpada fluorescente "Super Luz do Dia", GE- 40W com fotoperíodo de 8 horas, isto é 8 horas/16 horas (claro/escuro). A iluminância foi medida por meio de um luxímetro estabelecendo-se em torno de 3800 lux. A temperatura durante o experimento variou de  $16\text{-}20^\circ\text{C}$ , sendo monitorada por um termômetro colocado dentro de um béquer com água destilada ao lado dos béqueres experimentais.

Em outro béquer de 4 L foram colocados 0,6g de alga em 2L de água do mar esterilizada, enriquecida com meio de cultura e livre de traçador, para controle.

As amostras de alga e água foram periodicamente monitoradas, após o início do experimento, medindo-se a atividade de  $^{137}\text{Cs}$  como descrito a seguir:

- cada amostra de alga foi retirada do béquer por meio de uma pinça e um pincel macio, enxaguada com água do mar esterilizada, colocada em uma placa de petri com papel absorvente, transferida para um pote plástico com 50 mL de água do mar esterilizada, pesada, e a atividade de  $^{137}\text{Cs}$  medida em um detector de Germânio -

Ge por 2 minutos. Posteriormente, a alga foi devolvida ao béquer experimental. Neste mesmo tempo foram retiradas 2 alíquotas de 50 mL da água do béquer teste, contando-se-as também por 2 minutos. O processo de contagem da alga e da água do mar foi efetuado até atingir-se o equilíbrio de acumulação.

Estas contagens foram utilizadas para determinar o parâmetro FC da alga a partir da água contaminada.

Quando a concentração de  $^{137}\text{Cs}$  na alga atingiu um equilíbrio aparente, a alga foi colocada em béquer com água do mar esterilizada e enriquecida com meio de cultura, livre de traçador. Procedeu-se à contagem da alga, de modo similar ao empregado para determinar o parâmetro FC. Com estas contagens foram determinadas a meia-vida biológica e a porcentagem de eliminação do  $^{137}\text{Cs}$  na alga, em função do tempo.

**Cálculo do Fator de Concentração**. A partir das contagens de  $^{137}\text{Cs}$  detectadas para a alga em função do tempo, foi calculado o valor de FC usando a seguinte equação:

$$FC_{\text{alga}} = \frac{AAL(\text{cps} / \text{g})}{AAG(\text{cps} / \text{mL})} \quad (1)$$

FC - Fator de Concentração

AAL - atividade na alga

AAG - atividade na água

#### Modelo de acúmulo e eliminação de $^{137}\text{Cs}$ pela alga

A análise compartimental do  $^{137}\text{Cs}$  foi elaborada com os dados dos experimentos de FC, utilizando-se o programa AnaComp, visando obter um modelo de distribuição para o  $^{137}\text{Cs}$  e os coeficientes de transferência (k) deste radionuclídeo entre os compartimentos estudados.

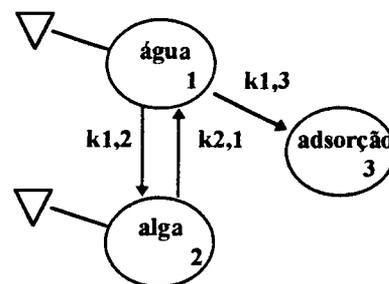
Um modelo com três compartimentos foi proposto e suficiente para explicar a distribuição do  $^{137}\text{Cs}$  nos respectivos compartimentos, conforme indicado na Figura 2.

O compartimento 1 representa a água, o 2 a alga e o 3 a adsorção do  $^{137}\text{Cs}$  no béquer. Os círculos representam os compartimentos e os triângulos os dados ou amostragens.

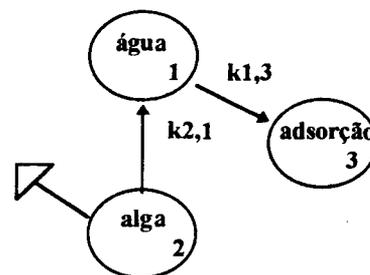
As constantes de transferência são indicadas por  $k_{ij}$ , e os índices referem-se a transferência do radionuclídeo do compartimento i para o compartimento j.

O programa AnaComp foi inicialmente alimentado com os dados obtidos nos experimentos de acúmulo do  $^{137}\text{Cs}$ . A amostragem 1, refere-se às contagens da alga (cps/g) e a amostragem 2, refere-se às contagens da água (cps/mL), ambas em função do tempo. A seguir, o programa AnaComp foi novamente alimentado com os dados obtidos no experimento de eliminação, onde a amostragem 1, refere-se à porcentagem de  $^{137}\text{Cs}$  eliminado pela alga, em função do tempo.

Para este modelo definiram-se os seguintes parâmetros Sigma ( $S_{ij}$ ): (1,2), (2,1) e (1,3), todos iguais a 1.



A)



B)

Figura 2 - Modelos de distribuição propostos para o acúmulo (A) e para eliminação (B) de  $^{137}\text{Cs}$  pela alga.

Os parâmetros  $S_{ij}$  representam a contribuição relativa de cada compartimento na medida experimental. Como a eficiência de contagem da radioatividade é praticamente a mesma para a alga e a água, adotou-se o valor unitário para os parâmetros  $S_{ij}$ .

Os valores dos coeficientes de transferência entre os compartimentos ( $k_{ij}$ ) foram inicialmente estimados em faixas e após cada tentativa de ajuste foram aprimorados.

### III. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos nos experimentos de acúmulo do  $^{137}\text{Cs}$  pela alga, estão apresentados na Tabela 1, onde estão dispostos os valores médios dos fatores de concentração do  $^{137}\text{Cs}$ , pela alga. Verifica-se, que com 336 horas (14º dia) de experimento, a alga atingiu um equilíbrio aparente e neste momento iniciou-se o experimento de eliminação. A Tabela 2 indica a porcentagem da atividade que a alga eliminou no decorrer do tempo. Observa-se que, por volta de 528 horas (22º dia), a alga já havia eliminado a metade do  $^{137}\text{Cs}$  acumulado.

Como foi observado por WILLIAMS & SWANSON (1958) e WILLIAMS (1960) *apud* POLIKARPOV (1966)[7 e 8], existe uma taxa metabólica

de céσιο-potássio em células vivas, que cessa somente com a morte. As células vivas acumulam potássio e eliminam sódio, mas o potássio pode ser substituído pelo céσιο.

**Tabela 1 - FC da alga *Gracilaria* sp em função do tempo (h), a partir da água contaminada**

FC	t (h)
0,2 ± 0,04	2
0,9 ± 0,04	5
1,7 ± 0,2	12
1,9 ± 0,1	24
2,6 ± 0,2	48
3,1 ± 0,1	96
5,9 ± 0,3	144
8,1 ± 1,2	192
13,1 ± 1,5	288
13,1 ± 0,8	336

**Tabela 2 - % de Retenção e Eliminação de <sup>137</sup>Cs pela alga *Gracilaria* sp em função do tempo (h)**

% Retenção	% Eliminação	t(h)
100	-	0
94,2 ± 4,7	5,78	96
75,4 ± 9,4	24,7	192
70,5 ± 5,3	29,5	288
63,9 ± 5,1	36,1	360
56,4 ± 3,8	43,6	456
50,9 ± 2,6	49,1	528
50,9 ± 1,3	49,1	624
44,9 ± 2,3	55,2	696
45,2 ± 3,5	54,8	864

Para a introdução dos dados no AnaComp, foi proposto inicialmente um modelo hipotético de dois compartimentos; como não ocorreu o ajuste dos dados, substituiu-se esse modelo por um tri-compartimental, observando-se, que parte do céσιο foi bioconcentrado pela alga e outra ficou aderida ao béquer experimental.

O programa AnaComp ajustou os dados experimentais, fornecendo o sistema de equações exponenciais (f1 - equações 1, 2 e 3) em que f1, f2 e f3 representam a função de distribuição do <sup>137</sup>Cs nos compartimentos água, alga e "adsorção", respectivamente:

$$f1 = 23443 e^{(-7,8 \times 10^{-5}t)} + 133 e^{(-3,7 \times 10^{-3}t)} \quad (2)$$

$$f2 = 130 e^{(-7,8 \times 10^{-5}t)} - 130 e^{(-3,7 \times 10^{-3}t)} \quad (3)$$

$$f3 = 23573 [1 - e^{(-7,8 \times 10^{-5}t)}] + 3 [1 - e^{(-3,7 \times 10^{-3}t)}] \quad (4)$$

Os parâmetros variáveis do modelo (k) foram determinados pelo método dos mínimos quadrados não-lineares, ajustados aos dados experimentais. As constantes de transferências (k<sub>ij</sub>) determinadas foram:

$$k(1,2) = (0,0000204 \pm 0,000996) h^{-1}$$

$$k(2,1) = (0,0039848 \pm 0,000003) h^{-1}$$

$$k(1,3) = (0,0000162 \pm 0,000008) h^{-1}$$

A Tabela 3 apresenta os valores de contagem obtidos nos experimentos de acúmulo de <sup>137</sup>Cs pela alga em função do tempo, e os calculados pelo programa AnaComp.

**Tabela 3 - Contagens do <sup>137</sup>Cs experimental e calculada pelo Programa AnaComp**

t(h)	água (cps em 2000mL) COMPARTIMENTO 1		alga (cps em 0,6g) COMPARTIMENTO 2	
	experi- mental	AnaComp	experi- mental	AnaComp
0	23560	23576	0	0
5	23560	23564	6,7	2,3
12	23400	23548	12,4	5,5
24	23300	23521	12,6	10,7
48	23300	23466	19,1	20,5
96	23400	23361	22,8	37,7
144	23260	23258	42,1	52,0
192	23380	23159	50,7	63,9
288	23300	22966	83,8	82,1
336	23300	22872	87,8	88,9

Na Tabela 4, tem-se os valores de contagem obtidos nos experimentos de eliminação de <sup>137</sup>Cs pela alga, em função do tempo e, os calculados pelo programa AnaComp.

**Tabela 4 - Contagens do <sup>137</sup>Cs experimental e calculada pelo programa AnaComp**

t(h)	% de <sup>137</sup> Cs na água		% <sup>137</sup> Cs na alga	
	experi- mental	AnaComp	experi- mental	AnaComp
0	-	0	100	100
96	-	12,3	94,0	87,7
192	-	22,6	75,0	77,4
288	-	31,2	70,0	68,8
360	-	36,8	63,0	63,2
456	-	43,1	56,0	56,9
528	-	47,2	50,0	52,8
624	-	51,9	50,0	48,1
696	-	54,9	44,0	45,1
864	-	60,5	45,0	39,5

#### IV. CONCLUSÃO

O  $^{137}\text{Cs}$  foi transferido da água do mar para a alga, com fator de concentração de  $13,1 \pm 0,8$  e atingindo um equilíbrio de acúmulo em 14 dias. A meia-vida biológica determinada para este radionuclídeo foi de 22 dias.

A alga *Gracilaria* Greville mostrou ser boa indicadora para a contaminação do meio marinho pelo  $^{137}\text{Cs}$ .

Houve concordância entre os resultados experimentais e os obtidos pelo Programa AnaComp, validando, portanto, o modelo de transferência para o  $^{137}\text{Cs}$  proposto.

A via de contaminação estudada neste trabalho - água, é importante para estimar a transferência deste radionuclídeo no ambiente marinho, bem como em produtos médicos, em cosméticos, ou outros, que usam a matéria prima desta alga.

#### AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CEBIMar-USP pelo fornecimento da água do mar e ao LAM-USP na pessoa da Dra. Estela M. Plastino pelo fornecimento e ajuda no cultivo da alga.

#### REFERÊNCIAS

- [1] BOLEA, M.T.E. **Impacto ambiental de centrales nucleares**. CIFCA, Madrid, 1978.
- [2] GESAMP/IMCO/FAO/UNESCO/WMO/WHO/IAEA/UN/UNEP Joint Group of Experts on the Scientific Aspects of Marine Pollution. *In*: MELO, S.L.R. **Testes de Toxicidade com sedimentos marinhos: adequação de metodologia para o anfípodo escavador *Tiburonella viscana***. São Carlos, 1993. (Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos).
- [3] MURHY, C.A. **Manual de Radiofarmacocinética**. *In*: ARAÚJO, E.B. **Conjuntos de reativos liofilizados de compostos diaminoditiólicos para marcação com tecnécio-99m. Estudo farmacocinético e elaboração de modelos compartimentalizados dos respectivos complexos**. São Paulo, IPEN/CNEN-USP, 1995. (Tese de Doutorado)
- [4] OLIVEIRA, F.C. **Algas marinhas: da exploração aleatória ao cultivo racional**. *In*: PLASTINO, E. M. **As espécies de *Gracilaria* (Rhodophyta, Gigartinales) da praia Dura, Ubatuba, SP - Aspectos biológicos e fenologia**. São Paulo, IB-USP, 1985 (Dissertação de Mestrado).9

[5] MESQUITA, C.H. **Modelo para determinação da absorção de substâncias radioativas - Aplicação em radiodosimetria e nutrição**. São Paulo, IPEN/CNEN-USP, 1991. (Tese de Doutorado)

[6] EDWARDS, P. **Illustrated guide to the seaweeds and sea grasses in the vicinity of Porto Aransas, Texas**. *In*: PLASTINO, E. M. **As espécies de *Gracilaria* (Rhodophyta, Gigartinales) da praia Dura, Ubatuba, SP - Aspectos biológicos e fenologia**. São Paulo, IB-USP, 1985 (Dissertação de Mestrado).

[7] WILLIAMS, L.G. & SWANSON, H.D. **Concentration of cesium-136 by algae**. *In*: POLIKARPOV, G.G. **Radioecology of Aquatic Organisms**. Reinhold Book Division - New York, 1966. p. 63

[8] WILLIAMS, L.G. **Uptake of caesium-136 by cells and detritus of *Euglena* and *Chlorella***. *In*: POLIKARPOV, G.G. **Radioecology of Aquatic Organisms**. Reinhold Book Division - New York, 1966. p. 63.

#### ABSTRACT

Cesium-137 may be accumulated by biota and transferred through marine chains so, it is important to quantify the accumulation and elimination of radioactivity at different trophic levels. A series of laboratory radiotracer experiments were performed to study the accumulation and elimination rates of cesium-137 in *Gracilaria* Greville seaweed. The concentration factor as well as the biological half time for cesium were determined. A compartmental model (AnaComp Program) was employed to estimate transfer rates between compartments.