

# AVALIAÇÃO DA BLINDAGEM DE UMA FLORESTA À RADIAÇÃO GAMA NATURAL EMITIDA PELO SOLO

J. M. Travassos e I. Figueiredo

*Observatório Nacional, Departamento de Geofísica - CNPq  
Rua General José Cristino 77, 20921, Rio de Janeiro, RJ, Brasil*

O efeito de blindagem de uma floresta foi determinado utilizando-se como fontes de radiação gama o semi-espaço e um bastão semi-infinito. Escolheu-se uma floresta pluvial tropical de terra firme próxima a Manaus, cuja biomassa total é de  $10 \text{ g/cm}^2$ . O efeito de blindagem foi estimado numericamente, supondo-se uma estrutura em camadas para a fitomassa aérea. O efeito da anisotropia dos troncos, foi estimado utilizando-se uma aproximação óptica. Mostrou-se que a aproximação em camadas pode causar discrepâncias na estimativa do efeito de blindagem que chegam a 20%.

## THE SCREENING EFFECT OF A FOREST COVER ON THE NATURAL GAMMA RADIATION FOR SOURCES ON THE SOIL

- The screening effect of a forest cover was estimated for gamma sources distributed in the half-space or in a rod. We chose a tropical rain forest on "terra firme" near Manaus with a total biomass of  $10 \text{ g/cm}^2$ . The screening effect of the forest is numerically estimated assuming a layered structure for the photomass above the ground. The anisotropy of the trunks of the trees was estimated using an optical approximation. It has been show that the layered approximation can lead to discrepancies reaching 20% on the estimated screening effect.

## 1. INTRODUÇÃO

A aerogamaespectrometria tem sido largamente utilizada na prospecção de urânio e petróleo, no mapeamento geológico e no monitoramento de radiação nas imediações de usinas nucleares (Duval, 1980). Medidas aéreas da radiação gama provenientes de formações naturais, têm sido utilizadas na prospecção de urânio (Darnley, 1972), em mapeamento geológico (Foote, 1968) e na determinação do equivalente em água na neve (Grasty, 1973). Alguns resultados foram obtidos em prospecção petrolífera (Kogan et al., 1971), embora o uso da aerogamaespectrometria para este fim, seja controverso (Duval, 1980).

Na fase de interpretação dos dados, reveste-se de especial importância o estudo das distorções sofridas pela radiação primária, que ocorrem no trajeto fonte-detector. Em particular, entre os absorvedores naturais, uma floresta constitui-se em uma

blindagem efetiva à radiação proveniente dos radioelementos presentes no solo.

O efeito de blindagem de uma floresta à radiação gama emitida pelo solo, tem recebido pouca atenção pelos geofísicos. Autores soviéticos (Israel et al., 1962; Kogan et al., 1971), atacaram o problema numericamente, tomando como modelo florestas temperadas. O efeito de atenuação em florestas tropicais pluviais, foi considerado por autores brasileiros (Travassos, 1981; Pereira & Nordemann, 1983). Todos os trabalhos mencionados, incluindo o presente trabalho, tem como característica comum serem fundamentalmente trabalhos de modelamento numérico. Em outras palavras, partindo-se de dados conhecidos de uma floresta, aplica-se um modelo numérico para descrever a absorção da radiação gama.

O efeito de blindagem devido a uma floresta pode ser determinado, em primeira aproximação, utilizando-se como modelo uma camada

uniforme. Um modelo mais realista deveria considerar a anisotropia do meio absorvedor vegetal (Israel et al., 1962; Kogan et al., 1971).

No presente estudo a absorção da radiação gama, é modelada numericamente utilizando-se dados publicados na literatura, para uma floresta pluvial tropical de terra firme alta, próxima a Manaus, cujo ecossistema pode ser considerado como dominante na Amazônia. A intensidade primária é utilizada como parâmetro descritor do campo gama, por ser proporcional à taxa de contagem, o parâmetro usual nos casos práticos de prospecção aérea. Os autores supõem que as correções usuais para o espalhamento Compton na camada superficial da atmosfera já tenham sido aplicadas à taxa de contagem observada. A anisotropia do meio absorvedor floresta é avaliada neste trabalho, utilizando-se uma aproximação óptica (Israel et al., 1962). Há na literatura cálculos independentes, utilizando-se uma simulação de Monte Carlo, para avaliar a influência da anisotropia (Travassos, 1981).

## 2. DELIMITAÇÃO DO PROBLEMA

O presente trabalho estima a absorção da radiação gama, para um detector situado acima do absorvedor floresta, como é o caso da espectrometria aérea. Em outras palavras, este trabalho é um exercício numérico objetivando a avaliação dos limites da prática de aproximar-se uma cobertura vegetal por uma camada uniforme de matéria orgânica. Esta aproximação é empregada, de modo a corrigir as taxas de contagem, obtidas a bordo de aviões, do efeito da absorção dos fótons na floresta. Os limites dessa aproximação são avaliados, em comparação a uma aproximação de ordem superior, aqui chamada de óptica. Esta última aproximação já foi utilizada anteriormente para o caso de uma floresta temperada (Israel et al., 1962).

Este trabalho não utiliza dados de aerogamaespectrometria obtidos pelos autores. No entanto, todos os parâmetros aqui utilizados estão baseados em resultados publicados na literatura pertinente. A presente seção, por conseguinte, fornece as fontes dos dados utilizados, delimitando o modelo a ser simulado numericamente.

### 2.1. EMISSORES E ESPALHADORES NATURAIS

A maior contribuição à radiação gama natural terrestre provém dos produtos de decaimento de quatro emissores primitivos:  $^{40}\text{K}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{235}\text{U}$  e  $^{238}\text{U}$ . Entretanto, como a taxa de desintegração do  $^{235}\text{U}$  é apenas 4,6% da correspondente do  $^{238}\text{U}$ , a contribuição do  $^{235}\text{U}$  pode ser desprezada para efeitos práticos (Adams & Gasparini, 1970). Os radionuclídeos utilizados em prospecção geofísica são o  $^{208}\text{Tl}$ ,  $^{214}\text{Bi}$  e  $^{40}\text{K}$ . O  $^{208}\text{Tl}$ , um dos produtos de decaimento da série do tório, emite fóton de 2,62 MeV após seu decaimento para o  $^{208}\text{Pb}$ . O  $^{214}\text{Bi}$ , pertencente à série do urânio, emite um fóton de 1,76 MeV após seu decaimento para o  $^{214}\text{Po}$ . O  $^{40}\text{K}$  decai para o  $^{40}\text{Ar}$ , emitindo um fóton de 1,46 MeV. Estes três canais de energias são usualmente utilizados em levantamentos radiométricos.

O espalhamento Compton é o principal mecanismo de interação para fótons no intervalo de 0,2 a 5 MeV e valores de número atômico encontrados nas formações naturais. As formações naturais são essencialmente espalhadores Compton, sendo usual considerar-se somente a seção de choque Compton. Neste trabalho o coeficiente de atenuação de massa  $\mu$ , será expresso em  $\text{cm}^2/\text{g}$ . Os valores de  $\mu$  para vários materiais podem ser obtidos na literatura (e.g., Goldstein, 1959).

Fótons primários são aqueles que provêm diretamente da fonte, isto é, não sofreram interação, enquanto os fótons que sofrem algum tipo de interação são chamados de secundários. Após sofrer o seu primeiro espalhamento, o fóton, tipicamente, perde metade da sua energia. Um segundo espalhamento, fará com que, mesmo o fóton mais energético de 2,62 MeV, fique com uma energia abaixo da janela do potássio. Cálculos mostram que a contribuição dos fótons que sofreram dois ou mais espalhamentos, pode ser negligenciada (Bailey, 1986).

Na análise de dados radiométricos é necessário compensar a contribuição da radiação secundária resultante de um espalhamento Compton. Por exemplo, a radiação secundária do tório contribui para os canais do urânio e do potássio. Tal correção pode ser facilmente encontrada na literatura (e.g., Darnley, 1972). Uma vez feita a correção da radiação secundária, resta a contribuição da radiação

primária, a que permite a identificação dos radioisótopos.

Somente a radiação primária será analisada neste trabalho. As fontes serão supostas isotrópicas e caracterizadas por sua atividade, isto é, pelo número de fótons emitidos por elemento de volume e por unidade de tempo.

## 2.2. ESPECTROMETRIA GAMA AÉREA

O campo de visão de um detector, situado em uma altura de observação  $h$ , é suposto ser um círculo de raio  $R$ , cujo centro coincide com a projeção do detector. Tal círculo, chamado de círculo de investigação, tem significado somente para o caso de uma fonte plana, homogênea e infinita, i.e., o semi-espaço. No entanto, tal aproximação será utilizada neste trabalho envolvendo fontes não homogêneas, já que estas podem ser resolvidas a partir do conhecimento das contribuições relativas das regiões distintas distribuídas no semi-espaço.

Fontes localizadas fora do círculo de investigação também podem ser detectadas. De fato, fontes localizadas no interior deste círculo contribuem com um percentual ao campo gama total registrado a uma altura  $h$ . Consequentemente, a escolha do raio  $R$  depende deste percentual. Pode-se expressar o raio  $R$  por

$$R = nh \quad (1)$$

onde  $n$  é um número escolhido adequadamente (Duval et al., 1971). É importante notar que a contribuição relativa das fontes do círculo de investigação, ou por extensão  $n$  é independente da atividade da fonte, sendo fracamente dependente da energia do fóton (Duval et al., 1971).

Serão considerados somente detectores esféricos, isto é, a sensibilidade não depende do ângulo de incidência do fóton. Na prática, isto não é completamente verdadeiro, mas supondo que todas as fontes estejam inscritas no círculo de investigação, pode-se mostrar que essa dependência é bastante reduzida (Grasty et al., 1979). Os ângulos de incidência são então restritos a valores menores que  $\arcsen [n/\sqrt{1+n^2}]$ . Supõe-se o detector estático. Os efeitos devidos à velocidade do avião podem ser negligenciados para o semi-espaço e para anomalias localizadas (Pitkin & Duval, 1980).

É necessário corrigir os dados radiométricos da blindagem devida aos absorvedores situados entre a fonte e o detector. Alguns exemplos de absorvedores encontrados na natureza são: o ar, a umidade, a biomassa das florestas e plantações e a neve. O efeito dos absorvedores é de reduzir a taxa de contagem dos fótons primários.

## 2.3. CARACTERÍSTICAS DA FLORESTA

A Floresta Amazônica é uma das mais extensas áreas florestais do mundo e a maior dos trópicos. Neste estudo, utilizam-se dados de uma floresta tropical de terra firme, próxima a Manaus, cujo ecossistema é dominante na Amazônia (Fittkau & Klinge, 1973), de modo a modelar o efeito de blindagem de uma floresta tropical típica. A descrição detalhada de como os dados de uma floresta tropical úmida são utilizados para a confecção do modelo de absorção, encontra-se na literatura citada (Travassos, 1981; Pereira & Nordemann, 1983). Deste modo, o presente trabalho apenas descreve brevemente as características da floresta, relevantes à confecção do modelo numérico.

Geologicamente, o terreno onde se assenta a mata é formado de sedimentos do Terciário, representado pela formação Barreiras do período Plioceno (Anônimo, 1969), o solo é um latossolo amarelo de textura muito pesada (Anônimo, 1969). A precipitação anual média está em torno de 2000 mm, enquanto que a umidade relativa média é de 80,9% (Rodrigues, 1966).

A floresta possui uma média de 102 árvores por hectare. A altura média do dossel é de 25 m, sendo que 95% das árvores possuem diâmetro na faixa de 24 a 54 cm (Klinge & Rodrigues, 1968). As árvores emergentes chegam a atingir alturas de 35 a 40 m (Rodrigues, 1966).

As raízes ocorrem principalmente na camada superficial do solo. Nos primeiros 20 cm de solo, encontram-se de 40 a 90% da biomassa radicular, enquanto que nos 50 cm superficiais essa percentagem chega a 70-100% (Klinge, 1973a). A relação percentual entre a biomassa radicular e a biomassa área de cada árvore ou palmeira, decresce com a altura na faixa de 24 a 3% (Klinge, 1973b).

A fitomassa aérea pode ser dividida em suas frações: troncos, galhos e folhagem das árvores e

palmeiras. Outras plantas como lianas, epífitas e outros parasitas, também contribuem para a fitomassa aérea. Árvores e palmeiras abaixo de 1,5 m de altura são muito numerosas, perfazendo quase 90% da população vegetal. A fração correspondente aos troncos é dominante, respondendo com 64% da biomassa aérea total, seguida pela fração de galhos com 27,5% e folhas com 2,5%.

Os totais para as diversas frações da fitomassa aérea e subterrânea podem ser encontrados na literatura (Fittkau & Klinge, 1973; Klinge, 1973; Klinge et al., 1973a e b; Klinge et al., 1975; Jordan, 1982). A camada superficial da matéria orgânica ou manta, está bem separada do solo, sendo composta principalmente de folhas (cerca de 72%), troncos e galhos (21%) (Klinge & Rodrigues, 1968). Neste estudo, considerar-se-á que a fitomassa aérea atinja 7,6 g/cm<sup>2</sup>, valor compilado de vários autores, para a matéria vegetal viva (Travassos, 1981).

A densidade das madeiras é elevada. Em um estudo que cobriu 1 ha, encontraram-se densidades variando na faixa de 0,40 a 1,22 g/cm<sup>3</sup> (Lechthaler, 1955), para árvores pertencentes às classes de alturas mais elevadas, correspondendo a uma densidade média  $\delta = 0,83\text{g/cm}^3$ .

### 3. APROXIMAÇÃO POR CAMADAS

Como primeira aproximação à estimativa do efeito de blindagem da floresta, supor-se-á uma estrutura em camadas para o meio absorvedor (Kogan, 1958). Uma camada de ar de altura  $h_\alpha$ , praticamente igual, em massa, à camada de ar que vai da superfície do solo ao ponto de observação, e uma camada de matéria vegetal de altura  $\rho_f/\delta$ . As espessuras destas camadas em termos de livre caminho médio serão, respectivamente:

$$H_\alpha = \mu_\alpha h_\alpha \quad (2)$$

$$H_f = \mu_f \rho_f / \delta$$

onde  $\mu_\alpha$  e  $\mu_f$  são os coeficientes de atenuação do ar e da madeira,  $\delta$  a densidade média da madeira  $\rho_f$  a biomassa aérea.

Considere-se um ponto de observação situado a uma altura  $h$  do solo. É fácil notar que, considerando o princípio da superposição,  $h \approx h_\alpha$ , pois na floresta

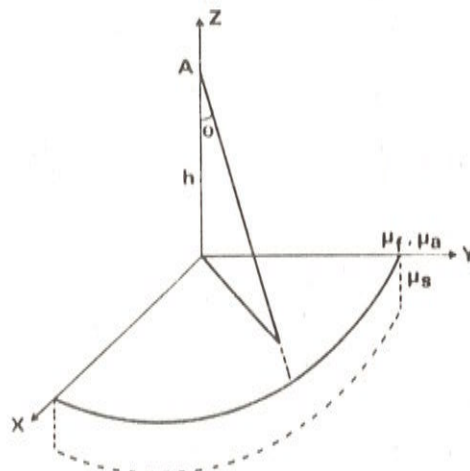


Figura 1. Geometria utilizada no cálculo da absorção da radiação proveniente de uma fonte isotrópica e uniforme. O ponto de observação é denotado pela letra A,  $\rho_s$  é o coeficiente de atenuação do solo.

(Geometry adopted for the calculation of the absorption of radiation from an isotropic uniform source. A is the point of observation, and  $\rho_s$  is the coefficient in the ground.)

$h_f = \rho_f/\delta$ . Neste ponto  $h$ , a intensidade primária para fótons emitidos pela camada superficial do solo será  $J(h)$ . O efeito de atenuação da biomassa aérea pode ser corrigida por

$$J_0(h) = K_f J(h) \quad (3)$$

(Israel et al., 1962) onde  $K_f$  é um coeficiente de correção ao efeito de blindagem da floresta.  $K_f$  será referido simplesmente como o coeficiente de blindagem, e  $J_0(h)$  a intensidade que seria obtida na ausência da cobertura vegetal.

Para o cálculo de  $K_f$ , supõe-se inicialmente um cilindro vertical semi-infinito, cujo topo coincide com a interface terra-ar, com uma atividade de fonte  $q(x,y,z) = q(\text{quanta. cm}^{-3} \times \text{s}^{-1})$  e um coeficiente de atenuação do solo  $\mu_s$ . Deste modo o coeficiente de atenuação é  $\mu_s$  para  $z \leq 0$  e  $\mu_\alpha, \mu_f$  para  $z > 0$ . O eixo dos z está orientado ao longo do cilindro, como mostra a Fig. 1.

A intensidade primária no ponto de observação A, será fornecida por

$$J(h) = (q/2\mu_s)[E_2(H_\alpha + H_f) - \cos \theta E_2((H_\alpha + H_f) \cos \theta)] \quad (4)$$

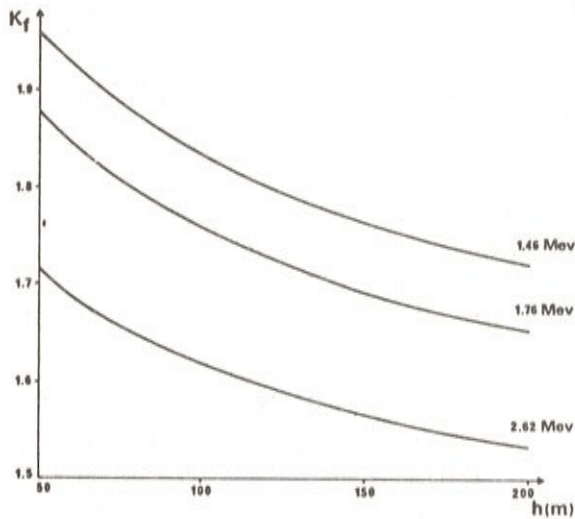


Figura 2. Valores de  $K_f$  para a biomassa aérea de  $\rho_f = 7,6g/cm^2$ , considerando todo o semi-espaço como fonte. As alturas são usuais em vôos gamaespectrométricos.

(Values of  $K_f$  for the aerial biomass of  $\rho_f = 7,6g/cm^2$  assuming a source in all semi-sphere. The usual heights are used.)

(Kogan et al., 1971), onde  $E_2(x)$  é a função exponencial de 2ª espécie (Abramovitz & Stegun, 1968). Utilizando-se a definição (3), pode-se escrever o coeficiente de correção do efeito de blindagem da floresta como

$$K_f = \frac{E_2(H_\alpha) - \cos \theta E_2(H_\alpha \cos \theta)}{E_2(H_\alpha + H_f) - \cos \theta E_2[(H_\alpha + H_f) \cos \theta]} \quad (5)$$

já que para  $J_0(h)$ ,  $H_f = 0$ .

De modo a garantir medidas estatisticamente válidas, os vôos aerogamaespectrométricos visando estudo das formações geológicas, ficam restritos a alturas inferiores a 225 m (Pitkin & Duval, 1980). Desta forma, os valores de  $K_f$  são calculados, neste trabalho, para alturas entre 50 e 200 m. Para a biomassa aérea, consideram-se os totais correspondentes às suas frações: manta, troncos, galhos, folhas e outras plantas. Os valores de  $K_f$  são calculados para as energias de  $E = 1,46, 1,76$  e  $2,62$  MeV. A Fig. 2 mostra, para uma floresta de biomassa aérea  $\rho_f = 7,6g/cm^2$ , os valores de  $K_f$  para o semi-espaço, isto é,  $\theta = 90^\circ S$  na expressão (5).

Utilizando-se a expressão (5) é também possível estudar separadamente as contribuições das várias

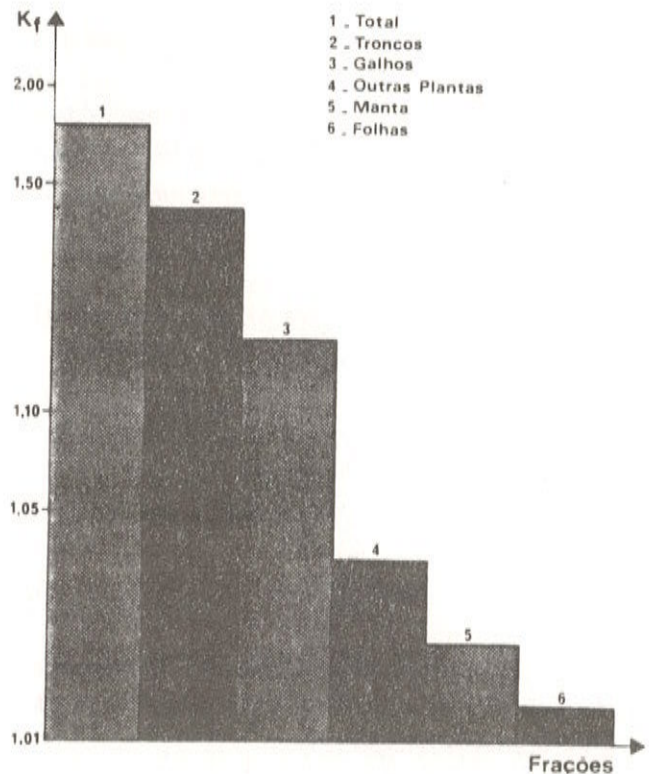


Figura 3. Valores de  $K_f$  para a biomassa aérea total e para suas diversas frações, tomadas individualmente. Os valores mostrados foram calculados para uma altura de 150 m tendo o semi-espaço como fonte.

(Values of  $K_f$  for the total aerial biomass and its fractions, calculated for a height of 150 m.)

frações da fitomassa para o valor de  $K_f$ . Neste caso, como

$$\rho_f = \rho_c + \rho_g + \rho_t + \rho_p + \rho_m \quad (6)$$

onde  $\rho_c$  é a fração da fitomassa correspondente às folhas,  $\rho_g$  aos galhos,  $\rho_t$  aos troncos,  $\rho_p$  a outras plantas e  $\rho_m$  à manta.

A Fig. 3 mostra os valores de  $K_f$  para as várias frações consideradas independentemente, isto é, para cada uma das parcelas de (6) utilizando a relação (5), e para a biomassa aérea total, a uma altura de 150 m e tendo o semi-espaço como fonte. Note-se a maior contribuição ao valor do coeficiente de blindagem da fração correspondente aos troncos, de tal modo que ao considerar-se somente esta fração para a biomassa aérea total, isto é, utilizando-se  $\rho_t$  em (5) no lugar de  $\rho_f$ , cometer-se-ia um erro de apenas 19% no valor final de  $K_f$  (Fig. 3).

De modo a simular um corpo radioativo isolado de dimensões finitas, utiliza-se um bastão radioativo

de seção reta elementar  $ds$  e comprimento infinito, conforme a Fig. 4. O bastão radioativo é um elemento de integração muito útil para fontes onde o eixo  $z$  não é um eixo de simetria. Para tal fonte, a intensidade do campo primário será fornecida por (Kogan et al., 1971):

$$dJ^v = (q/4\mu_s)(ds/h^2)y^{-3}(x, h)\exp[-\mu_h y(x, h)] \quad (7)$$

onde

$$\mu_h = (\mu_\alpha h_\alpha + \mu_f \rho_f / \delta)$$

$$h = h_\alpha + \rho_f / \delta$$

$$y(x, h) = [1 + (x/h)^2]^{1/2} \quad (8)$$

O coeficiente de blindagem da floresta, utilizando-se o bastão como fonte, é obtido de (3) e utilizando-se a relação (7),

$$k_f = (h/h_\alpha)^2 [y(x, h)/y(x, h_\alpha)]^3 \exp[\mu_h y(x, h) - \mu_\alpha h_\alpha y(x, h_\alpha)] \quad (9)$$

A relação (9) é utilizada na avaliação do efeito de blindagem da floresta para um corpo radioativo isolado, supondo que o mesmo é limitado por uma superfície pequena comparada com as dimensões envolvidas: a altura de vôo e a distância do corpo até a projeção do ponto de detecção. Desta forma, a relação (9) pode ser usada para a construção das curvas do coeficiente de blindagem da floresta, no caso de vôos sobre uma anomalia pequena. A Fig. 5 apresenta as curvas obtidas para os três canais de energia utilizados em aeroprospecção geofísica.

#### 4. APROXIMAÇÃO ÓPTICA

Até este ponto, o efeito de blindagem da cobertura vegetal foi aproximado por uma estrutura em camadas. No entanto, a principal contribuição à biomassa, corresponde a fitofração dos troncos, onde a aproximação por camadas deveria ser menos satisfatória do que para as demais frações: galhos, folhas, manta, etc. Estas frações estão distribuídas no espaço na maneira mais uniforme. De modo a

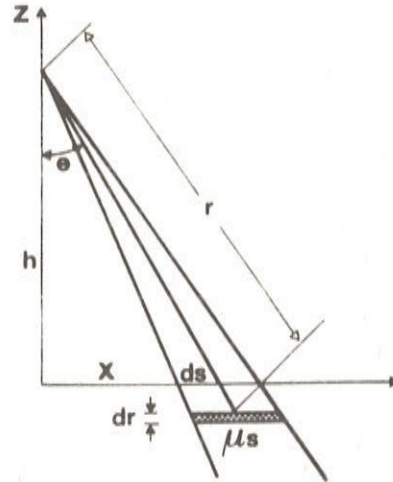


Figura 4. Geometria utilizada no cálculo da absorção da radiação primária emitida por uma fonte cilíndrica de seção reta elementar, isotrópica e uniforme.

(Geometry used in the calculation of the absorption of the primary radiation emitted by a cylindrical source of elementary cross section isotropic and uniform.)

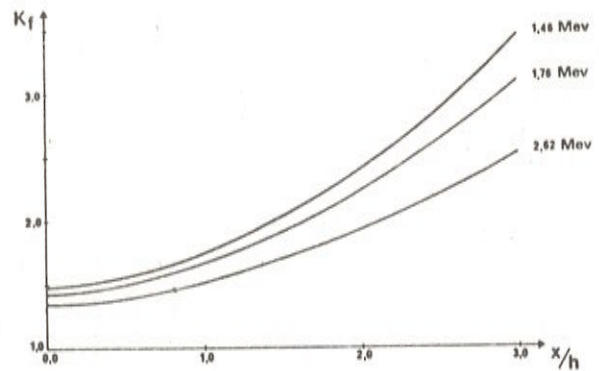


Figura 5. Valores de  $K_f$  para a biomassa aérea de  $\mu_f = 7,6g/cm^2$ , para uma anomalia cujas dimensões laterais são pequenas em relação a altura de vôo.

(Values for  $K_f$  for the aerial biomass of  $\mu_f = 7,6g/cm^2$  for an anomaly of small lateral dimensions with respect to the flight height.)

valiar-se o efeito da anisotropia do meio absorvedor, utilizar-se-á uma aproximação óptica (Israel et al., 1962) para o estudo da absorção dos troncos. Este mesmo problema já foi abordado de maneira inde-

pendente, utilizando-se o Método de Monte-Carlo (Travassos, 1981).

Considere uma fonte luminosa situada no ponto de observação a uma altura  $h$  seja uma área  $dS$  em  $z = 0$ . Pela geometria do problema, apenas a parte do solo não atingida pelas sombras produzidas pelos troncos, poderá ser vista do ponto de observação. Mais adiante, substituiremos a fonte luminosa por um detector e as zonas não sombreadas por fontes de radiação que não sofreu espalhamento na matéria vegetal. Seja  $dS_s$  a fração sombreada total de  $dS$ .

Seja um círculo de raio  $x_0$  de centro coincidente com a projeção do ponto de observação. Deseja-se calcular a área sombreada total neste círculo devido à presença de  $n_0$  troncos por unidade de área. Inicialmente considerar-se-á a sombra de um tronco cilíndrico, cuja base encontra-se no interior do círculo. A princípio a superposição das sombras e a área ocupada pelas bases dos troncos no círculo pode ser negligenciada. A altura média dos troncos é denotada por  $h_t$  enquanto que o diâmetro médio é denotado por  $b$ .

A área sombreada total será fornecida pela contribuição das sombras dos troncos que se encontram no interior do círculo de raio  $x_0$ . É evidente que, dependendo da posição  $x$  do centro da base de cada tronco cilíndrico, algumas sombras projetar-se-ão para além do círculo de raio  $x_0$ . As sombras podem ser consideradas como trapézios isósceles cuja base menor é sempre  $b$ . A altura e o comprimento da base maior serão funções da posição  $x$  e da base do cilindro, podendo ser facilmente calculadas pela geometria do problema.

Como o problema é simétrico em relação ao eixo  $z$ , consideramos as sombras dos troncos situados em um anel de raios  $x$  e  $x + dx$ . Deste modo, integrando-se estas contribuições anulares entre 0 e  $x_0$ , encontramos a área sombreada total:

$$S'_s = \frac{b}{2} \left[ \frac{t(2-t)}{(1-t)^2} \int_0^{x_0(1-t)} x dn(x) + \int_{x_0(1-t)}^{x_0} \frac{x_0^2 - x^2}{x} dn(x) \right] \quad (10)$$

onde a primeira integral representa a soma das sombras inteiramente contidas no círculo. A segunda representa a soma da porção inscrita das sombras

parcialmente projetadas para além do círculo,  $t = h_t/h$  e  $dn(x) = 2\pi x n_0 dx$ . A integração de (10) fornecerá a área sombreada total.

Um elemento de área de um círculo de raio  $x$  é fornecido por

$$dS = 2\pi x dx$$

assim a contribuição total das sombras em  $dS$ , pode ser obtida diferenciando-se (10),

$$dS'_s = n_0 t b x ds \quad (11)$$

onde  $dS'_s$  é igual à contribuição de todas as sombras em  $dS$ . A fração média sombreada de uma área  $dS$  será

$$n' = dS'_s/dS \quad (12)$$

Como a distribuição dos troncos é aleatória, também o serão suas sombras. Isto resulta na diminuição da área sombreada devido às superposições. Assim, a área real sombreada será inferior a  $dS'_s$ , relação (11). Supondo os troncos e, consequentemente, suas sombras distribuídos segundo Poisson, é possível escrever a área sombreada de  $dS$ , onde haja pelo menos uma sombra, como

$$dS_s = (1 - \exp(-n'))dS \quad (13)$$

Deste modo, o número de troncos superpostos entre o ponto de observação e  $dS_s$  será:

$$n'' = dS'_s/dS_s = n'/(1 - \exp(-n')) \quad (14)$$

Agora podemos inverter o problema. Isto é, no lugar de uma fonte luminosa no ponto de observação, suporemos um detector, de modo a observar a intensidade da radiação proveniente de  $dS$ . Escrevemos a intensidade da radiação oriunda da área  $dS$  como

$$dJ^\alpha ds = \alpha dJ_s(dS - dS_s) + \beta dJ_s dS_s$$

(Israel et al., 1962) onde  $\alpha$  é um coeficiente ligado à absorção dos quanta na floresta e no ar não considerando os troncos, enquanto  $\beta$  inclui os troncos.  $dJ_s$  é a intensidade que seria medida na ausência do ar e da floresta. Assim, reescrevendo-se esta última expressão utilizando (12) e (13),

$$dJ^\alpha = [\alpha \exp(-n') + \beta(1 - \exp(-n'))]dJ_s$$

o que leva a

$$dJ^\alpha = A(qds/4\pi\mu_s)[\eta A \exp(-n' - H^- y(x, h_1))(1 - \exp(-n')) \exp(-(H^- + H_{ef})y(x, h_1))] \quad (15)$$

onde:

$$A = h_1^{-2} y^{-3}(x, h_1)$$

$$H^- = \mu_\alpha h_\alpha + \mu_f \rho_f^- / \delta$$

$$H_{ef} = \mu_f h_1 n'' d_{ef}$$

$\rho_f^-$  é a biomassa aérea, subtraindo-se a fitomassa dos troncos;  $d_{ef}$  é o diâmetro efetivo de um tronco visto por um fóton de direção arbitrária;  $h_1 = h_\alpha + \rho_f^- / \delta$  é a altura do ponto de observação;  $\eta$  é um fator relacionado à redução da intensidade dos fótons provenientes de uma área não sombreada e  $n''$  é fornecido por (14). Cálculos numéricos mostram que  $\eta = 0,94 + 0,53x$  é uma aproximação que corresponde a uma altura de 100 m, distâncias entre, 1 a 1 unidades de altura e energias entre 1,46 - 2,62 MeV (Travassos & Figueiredo, 1981).

O diâmetro efetivo de um tronco,  $d_{ef}$ , é o comprimento médio dos segmentos inscritos de um feixe de retas secantes a um cilindro de raio  $b$ , com origem em um ponto  $P$ , situado a uma distância  $D$  do seu centro. O valor de  $d_{ef}(D)$  tende rapidamente a um valor assintótico, podendo ser aproximado por  $d_{ef} = 0,79b$ , para  $D > 2b$  (Travassos & Figueiredo, 1981).

O coeficiente de blindagem, utilizando-se a aproximação óptica pode ser obtido pela expressão (3), substituindo  $K_f$  utilizando na aproximação por camadas por  $K_f^\alpha$ , o novo valor. Desta forma, podemos dividir (15) por (7), em vista de (3), para obter o quociente

$$dJ^\alpha / dJ = K_f / K_f^\alpha \quad (16)$$

que permite avaliar as discrepâncias no valor do coeficiente de blindagem, quando se considera o bioabsorvedor anisotrópico uma camada isotrópica.

Da floresta estudada, só foram considerados os estratos mais elevados, acima de 8,4 m. A biomassa desses estratos contribui, no sítio estudado, com 97%

da biomassa aérea. Neste caso, tem-se um indivíduo médio de altura  $h_t = 21$  m e diâmetro  $b = 33$  cm, com uma densidade populacional de 1140 indivíduos por hectare.

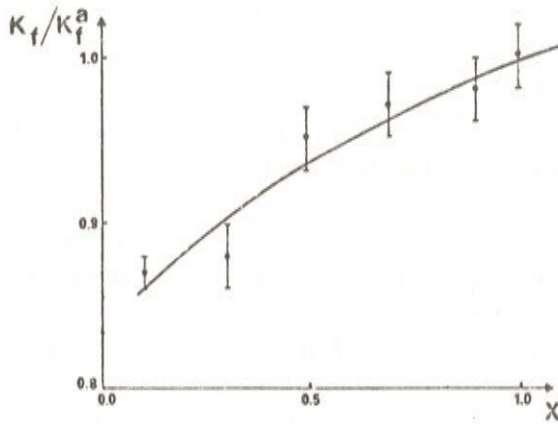
Os valores de  $K_f / K_f^\alpha$  para uma anomalia situada a uma distância na faixa de 0,1 a 1,0 unidades de altura, podem ser calculados utilizando-se (16). A Fig. 6 mostra a curva de  $K_f^\alpha$  obtida para uma altura de 100 m, para o canal de energia de 1,46 MeV. Para efeito de comparação, são apresentados na mesma figura os valores discretos, obtidos em outro trabalho, onde utilizou-se o método de Monte Carlo para avaliar  $K_f^\alpha$  (Travassos, 1981). Note como os valores obtidos com a aproximação óptica concordam com os valores obtidos independentemente pelo método de Monte Carlo. Note-se que a anisotropia na distribuição da biomassa da floresta introduz modificações no coeficiente de absorção de até 20%, para o caso de uma anomalia localizada, a uma distância inferior a uma unidade de altura. Para distâncias da ordem de uma unidade de altura em diante, o efeito da anisotropia pode ser negligenciado. O efeito para os canais do urânio e tório, é menor que para o canal do potássio (Fig. 6).

## 5. CONCLUSÕES

Escolhemos uma floresta pluvial tropical de terra firme alta, típica da região de Manaus. A biomassa total, incluindo a matéria orgânica do solo, está em torno de 10 g/cm<sup>2</sup>. Estudou-se o efeito de blindagem, da biomassa aérea da floresta, à radiação gama proveniente de fontes localizadas no solo, para dois modelos de distribuição de fontes, para o semi-espaço e uma fonte localizada. O efeito de blindagem da floresta pode ser expresso por um fator multiplicativo. Este fator dependerá da altura, distribuição das fontes e da energia dos fótons.

O coeficiente de correção do efeito de blindagem da floresta para fontes localizadas praticamente não depende de altura, mas tão somente da distância à fonte, ou à interface mais próxima. O coeficiente de correção do efeito de blindagem praticamente independe da altura, dependendo tão somente da distância, expressa em unidades de altura. Podemos calcular o coeficiente de correção do efeito de blindagem da floresta na faixa de alturas 100-200 m,





**Figura 6.** Valores de  $K_f/K_f^a$  para uma anomalia localizada a 0,1 - 1,0 unidades de altura. Considera-se aqui apenas o canal de energia do potássio,  $E = 1,46$  MeV. Os valores discretos foram obtidos independentemente para o mesmo problema, por meio de simulação de Monte Carlo (Travassos, 1981). As barras de erro representam 1 desvio padrão.

(Values of  $K_f/K_f^a$  for an anomaly at 0.1 to 1.0 height units. Only the potassium energy channel is considered,  $E = 1.46$  MeV. The discrete values were obtained independently for the same problem using Monte Carlo simulation (Travassos, 1981). The error bars represent one standard deviation.)

utilizando qualquer altura nesta faixa, sempre com erros inferiores a 10%.

Em relação às diversas frações da fitomassa, a maior contribuição ao coeficiente de correção do efeito de blindagem da biomassa aérea total pertence aos troncos, atingindo 80%. O coeficiente também pode ser decomposto nas suas contribuições por classes de altura. As 3 classes de altura mais elevadas, contribuem com 93% ao coeficiente de correção do efeito de blindagem.

Os cálculos do coeficiente de correção do efeito de blindagem da biomassa aérea, foram avaliados inicialmente aproximando-se a floresta por uma camada uniforme de alguns poucos centímetros de espessura. Isolando-se a fração dos troncos, avaliamos os erros cometidos ao se negligenciar a anisotropia do meio absorvedor. Para isto, utilizamos uma aproximação de ordem superior, chamada óptica.

A anisotropia do meio absorvedor floresta, limita a exatidão do cálculo do efeito de blindagem

da biomassa aérea da floresta. No caso geral, podemos estimar os erros cometidos entre 10-20%. Nas situações mais favoráveis, os erros serão sempre inferiores a 10%.

A avaliação do efeito da anisotropia do meio absorvedor foi feita estudando-se apenas a fitofração correspondente aos troncos. Foi, por conseguinte, considerada uma floresta composta de troncos cilíndricos e uma camada uniforme. É razoável supor que os erros cometidos ao se aproximar os troncos por cilindros retos, sejam inferiores aos cometidos ao supor que o efeito da anisotropia esteja restrito somente aos troncos. Neste trabalho é apresentado um conjunto de resultados obtidos independentemente, utilizando o método de Monte Carlo, de modo a fornecer uma idéia da qualidade da aproximação óptica.

Com o modelo de fonte limitada, mostrou-se que negligenciar a anisotropia, pode causar discrepâncias acima de 20% nos valores do coeficiente de blindagem. As discrepâncias, para distâncias superiores a 0,5 unidades de altura, são iguais ou inferiores a 10%.

É necessário assinalar que os resultados obtidos neste trabalho, embora baseados em dados de uma única floresta, não são particulares da floresta escolhida. De fato, esses resultados podem ser encarados como característicos de uma floresta qualquer, desde que tenham uma estrutura semelhante a uma biomassa da mesma ordem. Devemos ressaltar a dependência do coeficiente de correção de blindagem com respeito a biomassa de uma floresta, ao corrigir seus efeitos de blindagem, por meio das relações apresentadas no texto.

## REFERÊNCIAS

- ABRAMOVITZ, M. & STEGUN, J.A. - 1986 - Handbook of mathematical functions. Dover, New York, 1046 p.
- ADAMS, J.A.S. & GASPARINE, P. - 1970 - Gamma-ray spectrometry of rocks. Elsevier, Amsterdam, 295 p.
- ANÔNIMO - 1969 - Os solos da área Manaus-Itacoatiara. IPEAN, Estudos e Ensaios, 1, 117 p.
- BAILEY, R.C. - 1986 - The altitude dependence of terrestrial gamma-ray spectra: A simple model. Geophysics 51:2108-2116.

- DARNLEY, A.G. - 1972 - Airborne gamma-ray survey techniques: In S.H.V. Bowie, M. Davis, D. Ostle (eds.) Uranium prospecting handbook. London: Mining and Metall, 174-204.
- DUVAL Jr., J.S., COOK, B. & ADAMS, J.A.S. - 1971 - Circle of investigation of an airborne gamma-ray spectrometer. *J. Geophysics Res.* 76:8466-8470.
- DUVAL Jr., J.S. - 1980 - The radioactivity method. *Geophysics* 45:1690-1694.
- FITTKAU, E.J. & KLINGE, H. - 1973 - On biomass and trophic structure of the central Amazonian rain forest ecosystem. *Biotropia* 5:2-14.
- FOOTE, R.S. - 1968 - Application of airborne gamma-radiation measurements to pedologic mapping. In: Parker, D.C. Ed., Proc. 5<sup>th</sup> symp. On remote sensing of the environment. Univ. of Michigan, 855-875.
- GOLDSTEIN, H. - 1959 - Fundamental aspects of reactor shielding. Addison-Wesley, Reading, Mass, 416 p.
- GRASTY, R.L. - 1973 - Snow-water equivalent measurements using natural gamma emission. *Nord. Hydrol.* 4:1-16.
- GRASTY, R.L., KOSNAKE, K.L. & FOOTE, R.S. - 1979 - Fields of view of airborne gamma-ray detectors. *Geophysics* 44:1447-1457.
- ISRAEL, YU. A., KOGAN, R.M. & FRIDMAN, SH.D. - 1962 - Distortion of the gamma field in the atmospheric boundary layer caused by a forest cover. *Buld. (Izv.) Acad. Sci. USSR, Geophys. Ser.* 8:720-725.
- JORDAN, C.F. - 1962 - Amazon rain forest. *American Scientist* 70:394-401.
- KLINGE, H. & RODRIGUES, W.A. - 1968 - Litter production in an area of Amazonian terra firme forest, Part I: litter-fall, organic carbon and total nitrogen contents of litter. *Amazonian* 1:287-302.
- KLINGE, H. - 1973a - Root mass estimation in lowland tropical rain forest of Central Amazônia, Brazil, I: fine root masses of a pale yellow latosol and a giant humus podsol. *Tropical Ecology* 14:29-38.
- KLINGE, H. - 1973b - Root mass estimation in lowland tropical forests of Central Amazônia, Brazil, II: "coarse root mass" of tree and palms in different height classes. *An Acad. Bras. Cienc.* 45:595-609.
- KLINGE, H., RODRIGUES, W.A., BURNING, E. & FITTKAU, E.J. - 1975 - Biomass and structure in a Central Amazonian rain forest. In Golley, F.B. e Molina, E., Eds., Tropical ecological systems, trends in terrestrial and aquatic research. Springer-Verlag, New York, 115-122.
- KOGAN, R.M. - 1958 - Some integral rules regarding the distribution of gamma-field in layered media. *Bull. (Izv.) Acad. Sci. USSR, Geophys. Ser.* 2:125-128.
- KOGAN, R.M., NAZAROV, J.M. & FRIDMAN, SH.D. - 1971 - Gamma spectrometry of natural environment and formations. NTIS, Springfield, V.A., 337 p.
- LECHTHALER, R. - 1955 - Inventário das árvores de um hectare de terra firme da zona "Reserva Florestal Ducke", Município de Manaus. *Publ. Inst. Nac. Pesq. Amazônia, Botânica, IBBD* 3:7.
- PEREIRA, E.B., & NORDEMANN, D.J.R. - 1983 - The effects of a tropical rain forest cover on airborne gamma-ray spectrometry. *Rev. Bras. Geofis.* 1:99-108.
- PITKIN, J.A. & DUVAL, J.S. - 1980 - Design parameters for aerial gamma-ray surveys. *Geophysics* 45:1427-1439.
- RODRIGUES, W.A. - 1965 - Inventário florestal piloto ao longo da estrada Manaus-Itacoatiara, Estado do Amazonas: dados preliminares. *Em Lent. H., Ed., Atas do Simpósio sobre a biota amazônica, IBBD, Rio de Janeiro,* 7:257-267.
- TRAVASSOS, J.M. - 1981 - Distorção do campo gama primário na camada atmosférica superficial causada pela biomassa aérea de uma floresta. Tese de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 287 p.
- TRAVASSOS, J.M. & FIGUEIREDO, I. - 1981 - Distorção no campo gama devido a uma cobertura vegetal. III Reunião da Sociedade Brasileira de Geofísica, Salvador. Resumo publicado nos Anais da Reunião.

Versão recebida em: 20/01/90

Versão revisada em: 22/03/92

Versão aceita em: 03/04/92

Editor associado: V.W.J.H. Kirchhoff