



## **Análise Inversa para Estimar Propriedades Físicas de uma Superfície Vegetada a partir do Balanço de Radiação.**

**Paz, R. S.**

UFPB/DCA

Av. Nego, 935/301 – Tambaú – João Pessoa – Pb – CEP 58039- 000

[romulo@les.ufpb.br](mailto:romulo@les.ufpb.br)

**Da Silva, Z.E.**

UFPB/LES

[zaqueu@les.ufpb.br](mailto:zaqueu@les.ufpb.br)

**Figueiredo, J.C.**

IPMET/UNESP

[figueiredo@ipmet.unesp.br](mailto:figueiredo@ipmet.unesp.br)

**Filho B, C. R.**

[celso@dem.ufpb.br](mailto:celso@dem.ufpb.br)

**Resumo.** *Um problema inverso de radiação para estimação de parâmetros radiativos é resolvido. O modelo teórico para determinar a radiação líquida é obtido a partir de um balanço de energia numa superfície vegetada o qual condiciona a repartição da energia solar em calor latente de evaporação, calor sensível e calor condutivo no solo. Neste trabalho, usou-se a componente do balanço de energia referente à troca radiativa entre a superfície e a atmosfera para calcular a radiação líquida em um dia característico. Os dados experimentais da repartição da radiação foram coletados em uma estação meteorológica automática na região do Cariri paraibano. O problema inverso de radiação consiste então em estimar a emissividade e o albedo da superfície vegetada. O método de Levenberg-Marquardt foi utilizado como procedimento de estimação desses parâmetros. Os resultados são apresentados para a emissividade e albedo da superfície vegetada assim como uma análise dos erros introduzidos no cálculo da radiação líquida quando os valores da emissividade e do albedo consagrados na literatura são utilizados, comparando-os com os valores obtidos após a estimação dos parâmetros.*

**Palavras-chave:** *problema inverso, radiação líquida, propriedades radiativas, albedo, emissividade*

### **1. INTRODUÇÃO**

O completo conhecimento dos parâmetros climáticos tais como: temperatura, umidade relativa, pressão atmosférica, chuvas, visibilidade, etc., é importante para o entendimento da energia total disponibilizada por um sistema. O balanço de energia à superfície da terra tem papel fundamental, pois condiciona a repartição da energia solar em calor latente de evaporação, calor sensível e calor condutivo no solo, fenômenos, estes, ligados diretamente à dinâmica da vegetação e constituindo as condições de contorno do processo de circulação atmosférica. Esse balanço de energia pode ser obtido experimentalmente ou através de modelos teóricos ou empíricos.

Os cálculos desses parâmetros climáticos têm uma necessidade em comum: o conhecimento das propriedades termodinâmicas, termofísicas e radiativas do solo vegetado e da atmosfera. A exatidão desses cálculos, do balanço de energia e de outros cálculos necessários às previsões climáticas depende da precisão da medição ou da estimação dessas propriedades.

Tasadduq et al (2002) faz uma breve revisão dos trabalhos concernentes aos procedimentos de cálculos de parâmetros climáticos porém no que diz respeito a métodos e estimação das propriedades verifica-se o uso de valores consagrados na literatura ou cálculo através de relações empíricas.

Esse trabalho introduz o uso do paradigma “métodos inversos” (Beck e Arnold, 1977) para estimar a emissividade de uma superfície vegetada, albedo ou fração da radiação solar refletida pela superfície e emissividade do ar corrigida através do uso do método de Levenberg-Marquardt. Dados experimentais para a radiação líquida foram obtidos em uma estação micrometeorológica localizada na região semi-árida do Cariri paraibano os quais foram comparados com a radiação líquida calculada a partir de medições da radiação global e da temperatura da superfície a uma altura de 10m do solo.

## 2. FORMULAÇÃO DO PROBLEMA DIRETO

O problema direto envolve o cálculo da troca líquida de radiação de ou para uma superfície vegetada. O balanço de radiação sobre uma superfície terrestre envolve forma de radiação ambiental com grandes comprimentos de onda que incluem a emissão da superfície, assim como a emissão de certos componentes da atmosfera e obviamente a radiação solar. O balanço de energia radiante em uma superfície tem portanto a forma:

$$Q_{liq} = G_s + G_{ar} - rG_s E_g \quad (1)$$

onde

$Q_{liq}$ , representa a troca líquida por radiação de ou/para a superfície

$G_s$ , representa a irradiação solar ( $W/m^2$ ).

$G_{ar} = \epsilon_{ar} \sigma T_{ar}^4$ , representa a irradiação terrestre devido à emissão atmosférica ( $W/m^2$ ).

$E_g = \epsilon_g \sigma T_g^4$ , representa o poder emissivo associado à superfície terrestre ( $W/m^2$ ).

Efetuada a substituição das expressões matemáticas de cada variável, a Eq. (01) a troca líquida da radiação de ou para a superfície pode ser calculada por:

$$Q_{liq} = (1 - r_s)G_s + e_{ar}\sigma T_{ar}^4 - e_g\sigma T_g^4 \quad (2)$$

onde

$\rho_s$  representa a refletividade do solo para a radiação solar, também referenciado como albedo.

$\epsilon_{ar}$  e  $\epsilon_g$ , representam, respectivamente, as emissividades do ar e do solo.

$\sigma$  é a constante de Stefan-Boltzmann ( $W/m^2.K^4$ )

A emissividade do ar deve levar em conta a influência do teor de umidade do ar e da nebulosidade. Assim, a emissão atmosférica no sentido da superfície é dada pela equação:

$$G_{ar} = e_g \sigma f T_a^4 \quad (3)$$

onde  $f$  representa o efeito das nuvens e da umidade.

## 3. PROBLEMA INVERSO DE ESTIMAÇÃO DE PARÂMETRO

O balanço total de energia é ilustrado na Fig. (01). Uma superfície vegetada é perturbada pela radiação solar e a radiação atmosférica. A superfície emite radiação devido a sua temperatura finita e

reflete parte da radiação solar. A troca líquida de radiação da ou para a superfície vegetada pode ser calculada através da Eq. (02). O nosso problema inverso é estimar as propriedades radiativas do solo e do ar.

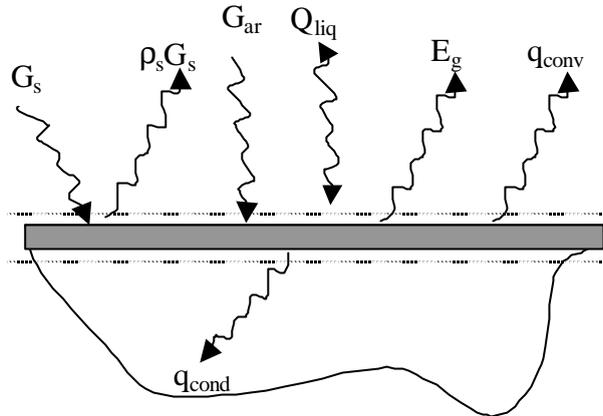


Figura 1. Balanço de energia total na superfície vegetada

O método de Levenberg-Marquardt (Press et al, 1992) foi o escolhido para resolver o problema de identificação. Esse método, baseado no ajuste da função mérito  $S^2$ , é capaz de resolver modelos não lineares para um número variável de incógnitas. A função de mérito é dada pela expressão:

$$S^2(\mathbf{b}, t) = \sum_{i=1}^N \frac{\epsilon Q_{liq,med}^i(\mathbf{b}, t) - Q_{liq,mod}^i(\mathbf{b}, t)}{\sigma_i} \quad (5)$$

Como  $\sigma_i$  representa o desvio-padrão do  $i$ -ésimo tempo.

O modelo teórico que permite calcular a radiação líquida ( $Q_{liq}$ ), inclui a temperatura do solo ( $T_g$ ), a temperatura do ar ( $T_{ar}$ ) (sensor a 10 metros da superfície), a irradiação solar ( $Q_s$ ), a emissividade do solo ( $\epsilon_g$ ) e emissividade do ar ( $\epsilon_{ar}$ ). E, as medidas da marcha temporal da radiação líquida, com informações a cada 20 min do dia 28 de fevereiro de 2000, foram realizadas na Estação Micrometeorológica do Laboratório de Recursos Hídricos/UPPB, localizada no Município de São João do Cariri-Pb, com as seguintes coordenadas geográficas: latitude  $07^{\circ}55'08''S$ , longitude  $47^{\circ}27'00''W$  e altitude de 786m, região de caatinga caracterizada por vegetação do tipo Hiperxerófila.

A Figura (2) mostra a evolução da troca líquida radiativa medida e calculada através do balanço sobre a superfície vegetada. Os valores da radiação líquida calculada foram obtidos utilizando valores do albedo e da emissividade do ar consagrados na literatura. O comportamento das curvas mostra que existe dispersão entre as duas curvas desde o aparecimento da fonte de energia (sol) propagando-se por todo o período estudado. Esse comportamento pode estar associado a duas causas. Primeiro, os erros de medidas associados aos dispositivos experimentais e segundo pelas propriedades radiativas necessárias ao cálculo da troca radiativa de ou para superfície vegetada.

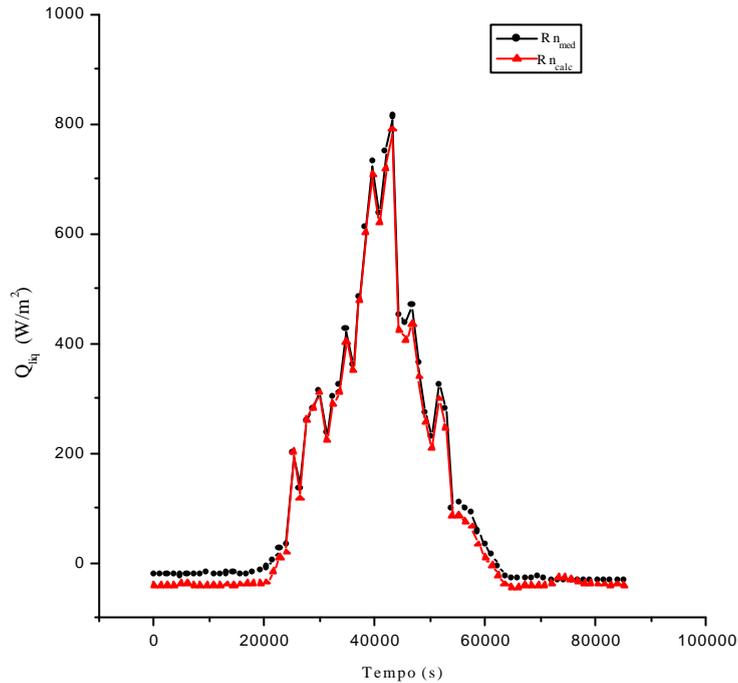


Figura 2. Repartição da troca líquida radiativa medida e calculada de ou para uma superfície vegetada durante um dia típico.

#### 4. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE E ESTIMAÇÃO DOS PARÂMETROS

A fim de examinar com detalhe a influência dos vários parâmetros que intervêm no cálculo da troca líquida radiativa para ou da superfície vegetada deve-se efetuar um estudo de sensibilidade aos parâmetros. Esse estudo nos permite verificar a resposta do modelo matemático da troca líquida radiativa quando se efetua uma pequena mudança no valor do parâmetro. Para o nosso problema, pode-se verificar que a troca líquida radiativa, radiação líquida, tem a seguinte dependência funcional:

$$Q_{liq} = F(\mathbf{r}_s, \mathbf{e}_a, f, \mathbf{s}, T_g, T_{ar}, G_s, x, t) \quad (6)$$

Desses parâmetros, a Estação Micrometeorológica fornece as medidas da temperatura do ar ( $T_{ar}$ ), temperatura do solo ( $T_g$ ) e da irradiação solar total ( $G_s$ ). A constante de Stefan-Boltzmann é conhecida ( $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$ ). Assim, a estimação da troca líquida radiativa, dada em termo das propriedades do ar e do solo, passa a ter a seguinte relação funcional:

$$Q_{liq} = F(\mathbf{r}_s, \mathbf{e}_g, f, x, t) \quad (7)$$

A função  $f$  é, portanto, calculada através do balanço da energia radiativa na superfície vegetada.

O coeficiente de sensibilidade representa a resposta do modelo matemático da troca líquida de radiação a uma variação finita no valor de parâmetro e é representado pela derivada parcial da função  $Q_{liq}$  em relação ao parâmetro aqui chamado genericamente  $\beta_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, k$ .

O coeficiente de sensibilidade da troca líquida radiativa  $Q_{liq}$  ao parâmetro  $\beta_i$  na posição  $x$ , no instante  $t$  é definida por :

$$\chi_i(\beta_i, x, t) = \frac{\partial Q_{liq}(\beta_i, x, t)}{\partial \beta_i} \quad (8)$$

$\mathbf{b}$  é um vetor de n componentes,  $\chi_i$  indica quantitativamente a variação da troca líquida radiativa na posição x no instante t quando o parâmetro  $\beta_i$  varia de maneira finita.

O coeficiente de sensibilidade depende do valor de cada parâmetro. Para comparar os diferentes coeficientes de sensibilidade  $\chi_i$  é utilizado um coeficiente de sensibilidade adimensional definido como:

$$\chi_i^*(\beta_i, x, t) = \beta_i \chi_i(\beta_i, x, t) = \frac{\partial Q_{liq}(\beta_i, x, t)}{\left(\frac{\partial \beta_i}{\beta_i}\right)} \quad (9)$$

Assim temos unidades idênticas ao modelo. Portanto, coeficiente de sensibilidade representa a variação absoluta da troca líquida radiativa  $Q_{liq}$  provocada por uma variação relativa do parâmetro.

Se eventuais problemas de dependências lineares entre os parâmetros ocorrerem, os seguintes critérios podem ser utilizados como princípios para determinar qualitativamente a possibilidade de se identificar unicamente ou simultaneamente um conjunto de parâmetros:

Se  $\chi_i(\beta_i, x, t) = 0$ , é impossível estimar  $\beta_i$ .

Se  $\chi_i(\beta_i, x, t) \leq 0.01 \mid Q_{liq}(\beta_i, x, t) \mid$  a estimativa é delicada.

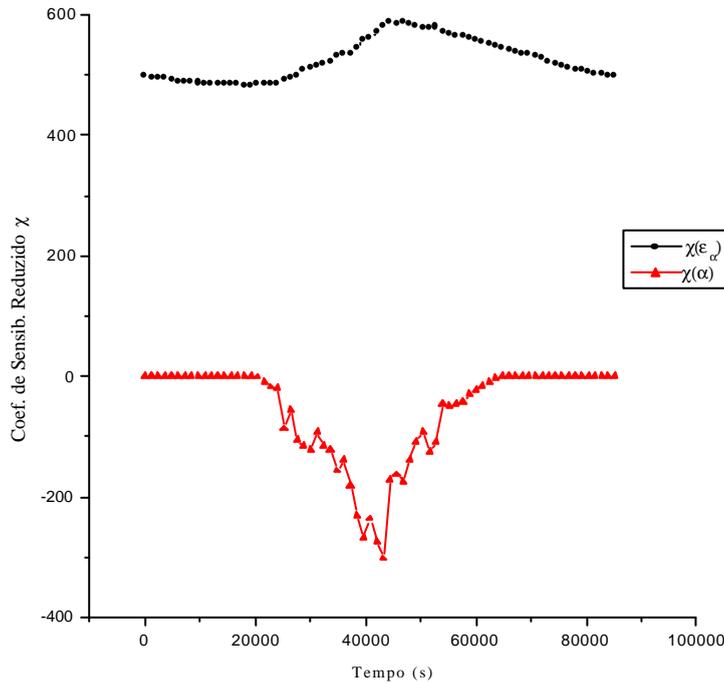


Figura 3. Evolução temporal dos coeficientes de sensibilidade ao albedo ( $\alpha$ ) e à emissividade do ar ( $\epsilon_{ar}$ )

Se os coeficientes de sensibilidade de dois parâmetros  $\beta_i$  e  $\beta_j$  são linearmente dependentes, ou seja  $\chi_j(\beta_j, x, t) = C \chi_i(\beta_i, x, t)$ , então uma variação de  $\beta_i$  e  $\beta_j$  provoca efeitos similares sobre a evolução de  $Q_{liq}$ , em consequência, a identificação única e simultânea dos parâmetros é impossível. Nesse caso, deve-se introduzir uma nova relação entre os dois parâmetros que nos permita distingui-los, ou nos contentarmos de estimar uma relação por exemplo, do tipo  $\beta_k = \beta_i/\beta_j$ .

A Figura (3) mostra a evolução dos coeficientes de sensibilidade ao albedo ( $\alpha$ ) e a emissividade do ar ( $\epsilon_a$ ). Pode-se constatar através de uma análise visual da evolução desses coeficientes de sensibilidades que:

- ✓ a sensibilidade ao albedo é nula no período noturno e durante o período diurno a sensibilidade varia ao longo do dia de um valor mínimo até atingir o valor máximo ao meio dia solar. Isso indica que a variação do albedo provoca efeitos importantes sobre a troca líquida radiativa;
- ✓ a evolução da sensibilidade a emissividade mostra que esse parâmetro provoca efeitos mais importantes sobre a troca líquida radiativa pois sua ordem de grandeza é significativa durante todo o período de medição;
- ✓ finalmente, os dois parâmetros são independentes linearmente, do ponto de vista de estimação de parâmetros, assim pode-se pensar que a estimação simultânea dos dois parâmetros a partir da medida da troca radiativa de ou para a superfície vegetada é perfeitamente possível.

As identificações do albedo ( $\alpha$ ) e emissividade do ar ( $\epsilon_{ar}$ ) foram efetuadas utilizando o método de Levenberg – Marquardt. Os erros de medidas do sistema de aquisição de dados foram fornecidos pelo fabricante e o desvio-padrão de cada ponto de medida foi também considerado. A Fig. (4) mostra as curvas da troca líquida radiativa medida e calculada utilizando os valores estimados através do problema inverso. A similaridade entre as duas curvas fica evidenciada como anteriormente, no entanto, pode-se agora verificar que o ajuste entre as duas curvas melhorou significativamente. Esse comportamento é um indicativo que os valores das propriedades usados para alimentar o cálculo da troca líquida radiativa não eram de inteira confiabilidade e que a qualidade dos procedimentos experimentais para aquisição de dados são aceitáveis.

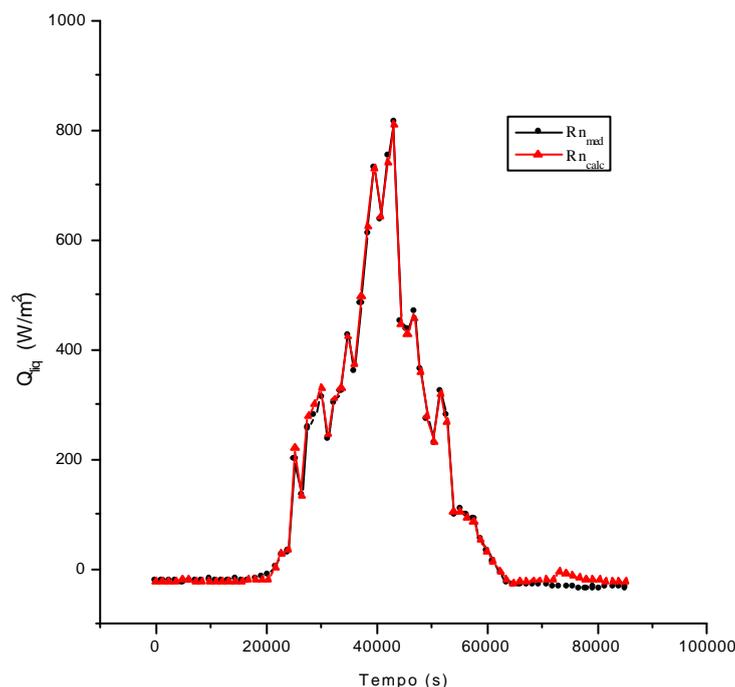


Figura 4. Evolução temporal da troca líquida radiativa medida calculada utilizando os parâmetros  $\epsilon_a$  e  $\alpha$  estimados através da solução do problema inverso de radiação.

## 5. ANÁLISE DE RESULTADOS

Os valores estimados para o albedo ( $\alpha$ ) igual a  $0.2618 \pm 0.00001$  e da emissividade do ar ( $\epsilon_{ar}$ ) igual a  $0.98 \pm 0.00001$  são diferentes dos valores usualmente utilizados no cálculo do balanço radiativo da superfície terrestre. Além do mais, o valor da emissividade do ar ( $\epsilon_{ar}$ ) assim estimado

já inclui os efeitos da nebulosidade sobre a emissividade da atmosfera e dispensa o uso de uma correlação empírica para estimá-lo.

A análise do erro relacionado ao cálculo da radiação líquida, obtida a partir de valores usuais dos parâmetros, apresenta um erro médio relativo de 14,3%, reduzindo para 5,51% após o processo de identificação.

## **6. CONCLUSÃO**

Um problema inverso de estimação de parâmetros foi resolvido. As propriedades radiativas, emissividade e o albedo, necessárias para os cálculos da troca líquida radiativa de ou para uma superfície vegetada foram estimadas através do método de Levenberg Marquardt. Os resultados mostram a eficiência da técnica e a melhoria na precisão da estimação dessas propriedades em relação aos valores usualmente consagrados. Além de disso, o resultado obtido para a emissividade leva em conta os efeitos da nebulosidade.. Os valores estimados permitiram um ajuste eficiente nas curvas da Radiação Líquida medida e calculada, diminuindo a dispersão entre os dados de 14,3% quando utilizados valores usuais para os parâmetros até 5,54% após identificação o que comprova a eficiência do procedimento utilizado nesse trabalho.

## **7. AGRADECIMENTOS**

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, pelo apoio financeiro.

## **8. BIBLIOGRAFIA**

- Beck, J. V. and Arnold, K. J. Parameter estimation in engineering and sciences. John Wiley and Sons, New York, 1977.
- Press, W. H., Teukolsky, S.A., Vetterling, W. T., E Flannery, P. B., Numerical Recipes in Fortran - The Art of Scientific Computing – Second Edition, New York : Cambridge University Press.
- Tasaddug, I., Reman, S., Bubshait, K. Application of neural networks for the prediction of hourly mean surface temperatures in Saudi Arabia. Renewable Energy 2002, p. 545-54.

## **9. DIREITOS AUTORAIS**

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

## **Inverse analysis to determine radioactive properties of a vegetated surface from the radiation budget**

**Paz, R. S.**

UFPB/DCA

[romulo@les.ufpb.br](mailto:romulo@les.ufpb.br)

**Da Silva, Z. E.**

UFPB/LES

[zaqueu@les.ufpb.br](mailto:zaqueu@les.ufpb.br)

**Figueiredo, J. C.**

IPMET/UNESP

[figueiredo@ipmet.unesp.br](mailto:figueiredo@ipmet.unesp.br)

**Filho, C. R. B.**

[celso@dem.ufpb.br](mailto:celso@dem.ufpb.br)

**Abstract.** *From the equation of the radiation budget to calculate the net radiation, an inverse problem was analysed to determine the emissivity and the albedo on a vegetated surface at a specific day. The results showed values of the identified parameters associated with similar results between the net radiation measured and the radiation calculated with the data collected in an automatic meteorological station in the area of the Cariri at Paraíba state. The inverse problem of radiation consists in estimating the emissivity and the albedo on the vegetated surface. Levenberg-Marquardt's method was used as procedure of estimation of those parameters. The results are presented to show the emissivity and albedo of the planted area as well as an analysis of the mistakes introduced in the calculation of the distribution of the net radiation when the values of the emissivity and albedo found in literature are used in illustrations of calculations of the distribution of the net radiation.*

**Keywords.** *Inverse problem, net radiation, radioactive properties, albedo, emissivity*