

AUTOMATIZAÇÃO DO CÁLCULO DO BALANÇO DE RADIAÇÃO ELETROMAGNÉTICA A PARTIR DE IMAGENS LANDSAT 5

Matheus Costa Coldibeli, Celina Cândida Ferreira Rodrigues, Marcell Terra de Oliveira, Thales Sehn Körting e Gilberto Ribeiro de Queiroz

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Caixa Postal 515 - 12227-010 - São José dos Campos - SP, Brasil

{matheus.coldibeli, celina.rodrigues, marcelli.terra, thales.korting, gilberto.queiroz}@inpe.br

RESUMO

O balanço de radiação da Terra permite estudar a quantidade de energia disponível na superfície terrestre para a realização de fenômenos físicos terrestres, como transpiração e fotossíntese. A utilização de imagens de satélites, de recursos e linguagens computacionais possibilitam automatizar e otimizar os numerosos cálculos radiativos. O objetivo deste trabalho é apresentar e avaliar um conjunto de algoritmos escritos na linguagem Python, para o cálculo do balanço radiativo utilizando imagens Landsat 5 de uma área localizada no município de Santa Rita do Passa Quatro no Estado de São Paulo. A automatização possibilitou uma maior facilidade nos cálculos e visualização dos resultados, tornando-se uma ferramenta complementar para trabalhos em sensoriamento remoto.

Palavras-chave — balanço de radiação, Python, Landsat 5.

ABSTRACT

The Earth's radiation balance enables the study of the amount of energy available on the Earth's surface for terrestrial physical phenomena such as transpiration and photosynthesis. The use of satellite imagery, computational languages and resources makes it possible to automate and optimize the numerous radiative calculations. The objective of this work is to present and evaluate a set of algorithms written in Python language to calculate the radiative balance using Landsat 5 imagery from an area located in the city of Santa Rita do Passa Quatro - State of São Paulo. Automation made it easier to calculate and display the results, making it a complementary tool for remote sensing work.

Key words — radiation balance, Python, Landsat 5.

1. INTRODUÇÃO

Alguns fenômenos físicos da superfície terrestre podem ser compreendidos a partir da interação da radiação eletromagnética (REM) com os diferentes alvos terrestres, podendo ser interpretados com base em técnicas de sensoriamento remoto empregadas em imagens de satélites. A principal fonte de REM é a radiação solar, a qual interfere nos processos físicos e biológicos que ocorrem na biosfera e, em particular na floresta, sendo de fundamental importância

para os processos de fotossíntese, de aquecimento da superfície e evapotranspiração [1].

A superfície e a atmosfera terrestre estão constantemente absorvendo parte da radiação solar incidente e também refletindo e/ou emitindo sua própria radiação para o espaço de forma a sempre manter o equilíbrio radiativo. A relação da quantidade de radiação incidente e emitida pelo sistema superfície-atmosfera é chamada de balanço de radiação. De acordo com [2], o resultado do balanço entre os fluxos de radiação de ondas curtas e ondas longas estabelecem o saldo de radiação, ou seja, é a quantidade de energia disponível para os processos físicos que ocorrem na superfície terrestre, como evaporação, aquecimento do solo, entre outros.

O contínuo avanço de recursos computacionais permite o desenvolvimento de novos programas em diferentes linguagens de computação a fim de automatizar processos, modelos que são bastante utilizados por inúmeros pesquisadores. Assim, o objetivo deste trabalho consiste em apresentar e avaliar um conjunto de algoritmos escritos utilizando a linguagem Python, para o cálculo do balanço de radiação na superfície a partir de imagens Landsat 5 TM.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

O algoritmo foi desenvolvido em linguagem Python e estruturado e apresentado na plataforma Jupyter Notebook. A linguagem Python, de acordo com [3], é interpretada e escrita para que possa ser de fácil aprendizado, além disso, oferece diversos módulos bastante convenientes, o que torna a linguagem Python uma opção que provê de alta produtividade no desenvolvimento de aplicações [3].

A etapa inicial da automatização do cálculo do balanço de radiação consiste no pré-processamento das imagens de satélite para a conversão dos números digitais em valores de radiância e, posteriormente, para valores de reflectância. Em seguida, aplica-se os índices espectrais (NDVI, SAVI e IAF) e o cálculo do albedo planetário. A emissividade e a temperatura de superfície terrestre pode ser calculada a partir dos valores de reflectância do infravermelho termal. Na etapa final é possível o cômputo das radiações solar atmosférica e de superfície para a determinação do saldo final de radiação na superfície.

A Figura 1 ilustra o diagrama das etapas destinadas à obtenção do saldo de radiação de superfície pelo algoritmo.

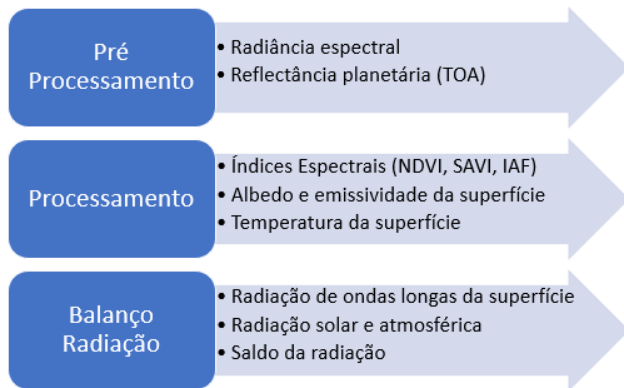


Figura 1. Diagrama das etapas do algoritmo para obtenção do saldo de radiação à superfície.

As equações utilizadas para determinar os parâmetros em cada etapa são apresentadas de acordo com [4]. Na etapa inicial é realizado o processo de calibração radiométrica, isto é, os níveis de cinza são convertidos em radiância espectral. Essa conversão é apresentada pela Equação 1:

$$L_{\lambda i} = a_i + \left(\frac{b_i - a_i}{254} \right) (ND - 1) \quad (1)$$

* a_i e b_i são as radiâncias espectrais mínima e máxima correspondentes às bandas do Landsat 5 (Tabela 1); ND corresponde ao valor digital atribuído em cada pixel.

A conversão de radiância espectral em reflectância é dada pela Equação 2:

$$\rho_i = \frac{\pi * L_{\lambda i}}{K_{\lambda i} * \cos Z * d_r} \quad (2)$$

* ρ_i é a radiância espectral de cada banda, $L_{\lambda i}$ é a irradiância solar espectral de cada banda no topo da atmosfera (Tabela 1); Z é o ângulo zenital solar e d_r é o quadrado da razão entre a distância média Terra-Sol e a distância Terra-Sol em dado dia do ano (DSA), que é representado pela Equação 3:

$$d_r = 1 + 0,033 * \cos \left(\frac{DSA * 2\pi}{365} \right) \quad (3)$$

*DSA representa o Dia Sequencial do Ano.

O albedo planetário é obtido no topo da atmosfera terrestre, ou seja, o albedo da superfície ainda sem correção atmosférica. A Equação 4 determina o albedo planetário.

$$\alpha_{toa} = 0,293\rho_1 + 0,274\rho_2 + 0,233\rho_3 + 0,157\rho_4 + 0,033\rho_5 + 0,011\rho_7 \quad (4)$$

* $\rho_1, \rho_2, \rho_3, \rho_4, \rho_5$ e ρ_7 representa os albedos planetários das bandas 1, 2, 3, 4, 5 e 7.

O albedo corrigido dos efeitos atmosféricos é apresentado pela Equação 5:

$$\alpha = \frac{\alpha_{toa} - \alpha_p}{t_{sw}^2} \quad (5)$$

* α_{toa} é o albedo planetário, α_p é a reflectância da própria atmosfera. De acordo com [4], o valor de α_p em várias aplicações tem sido recomendado de 0,03; t_{sw} é a transmissividade atmosférica que para condições de céu claro, pode ser obtida pela Equação 6:

$$t_{sw} = 0,75 + 2 * 10^{-5} * z \quad (6)$$

* z é a altitude de cada pixel (m).

Na etapa de processamento o Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (*Normalized Difference Vegetation Index* - NDVI), Índice de Vegetação Ajustado para os Efeitos do Solo (*Soil Adjusted Vegetation Index* - SAVI) e o Índice de Área Foliar (IAF) são apresentados pelas Equações 7, 8, 9, respectivamente.

$$NDVI = \frac{\rho_{IV} - \rho_V}{\rho_{IV} + \rho_V} \quad (7)$$

* ρ_{IV} e ρ_V correspondem, respectivamente, aos canais infravermelho e vermelho.

$$SAVI = \frac{(1+L) * (\rho_{IV} - \rho_V)}{(L + \rho_{IV} + \rho_V)} \quad (8)$$

*o fator L é uma função do tipo de solo.

$$IAF = - \frac{\ln \left(\frac{0,69 - SAVI}{0,59} \right)}{0,91} \quad (9)$$

Para a obtenção da temperatura da superfície, é utilizada a equação de Planck invertida, válida para um corpo negro (Equação 10 e 11):

$$\varepsilon_{NB} = 0,97 + 0,0033 * IAF \quad (10)$$

$$\varepsilon_0 = 0,95 + 0,01 * IAF \quad (11)$$

* ε_{NB} representa a emissividade de cada pixel na banda espectral do infravermelho termal e ε_0 a emissividade em cada pixel.

Para a obtenção da temperatura da superfície são utilizadas a radiância espectral da banda termal e a emissividade ε_{NB} . Dessa forma, obtém-se a temperatura da superfície (K) pela seguinte expressão (Equação 12):

$$T_s = \frac{K_2}{\ln \left(\frac{\varepsilon_{NB} * K_1 + 1}{L_{\lambda,6}} \right)} \quad (12)$$

* $K_1 = 607,76 \text{ Wm}^{-2} \text{ sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$ e $K_2 = 1260,76 \text{ Wm}^{-2} \text{ sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$ são constantes de calibração da banda termal do Landsat 5 – TM (Tabela 1).

A etapa final tem como objetivo o cálculo do balanço de radiação, assim, a radiação de onda longa emitida pela superfície $R_{ol,emi}$ é obtida através da equação de Stefan-Boltzman (Equação 13):

$$R_{ol,emi} = \varepsilon_0 * \sigma * T_{sup}^4 \quad (13)$$

* σ é a constante de Stefan-Boltzman e T_{sup} é a temperatura da superfície (K).

A radiação de onda curta incidente $R_{sol,inc}$ é o fluxo de radiação solar direta e difusa que atinge a superfície terrestre, que para condição de céu claro é dada pela seguinte expressão (Equação 14):

$$R_{sol,inc} = S * \cos Z * d_r * t_{sw} \quad (14)$$

*S é a constante solar (1367 Wm^{-2}).

A radiação de onda longa incidente emitida pela atmosfera na direção da superfície $R_{ol,atm}$, pode ser computada pela equação de Stefan-Boltzmann (Equação 15):

$$R_{ol,atm} = \epsilon_a * \sigma * T_a^4 \quad (15)$$

* ϵ_a é a emissividade atmosférica.

O saldo de radiação à superfície R_n é determinado pela Equação 16 do balanço de radiação na superfície:

$$R_n = R_{sol,inc}(1 - \alpha_{sup}) - R_{sol,emit} + R_{ol,atm} - (1 - \epsilon_0)R_{ol,atm} \quad (16)$$

2.1. Área de Estudo

A área de estudo localiza-se no município de Santa Rita do Passa Quatro (coordenadas: $21^\circ 42' 37'' \text{ S}$, $47^\circ 28' 41'' \text{ O}$) no estado de São Paulo, com altitude média de 748 m. Na área de estudo há uma área de reserva legal chamada “Cerrado Pé-de-Gigante”, com uma área aproximada de 1060 ha. A área é predominantemente de cerrado *stricto sensu*, com altura do dossel em torno de 10 m, circundada por plantações de eucalipto, citrus e cana-de-açúcar [5].

Foi utilizada uma imagem de satélite Landsat 5-TM na data 22/02/2005, referente à órbita/ponto 200/75. Os dados da imagem TM utilizados nos cálculos do balanço de radiação, tais como hora da passagem do satélite, ângulos de elevação e zenital solar e distância relativa Terra-Sol, são adquiridos no próprio metadado.

A temperatura média do ar de $26,4^\circ\text{C}$ foi obtida pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Na etapa inicial (pré-processamento) é necessário utilizar os coeficientes de calibração para as imagens do satélite Landsat 5 descritos em [6]. Os coeficientes de calibração (a, b1, b2, b3) são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Coeficientes de calibração das imagens Landsat 5.

Banda	λ	a	b1	b2	b3	Irrad TOA
1 (azul)	0,452–0,518	-1,52	152,10	193	169,0	1957
2 (verde)	0,528–0,609	-2,84	296,81	365,0	333,0	1796
3 (verm)	0,626–0,693	-1,17	204,30	264,0	264,0	1536
4(IV) Próx.	0,776–0,904	-1,51	206,20	221,0	221,0	1031
5(IV) Médio	1,567–1,784	-0,37	27,19	30,2	30,2	220
6(IV) Termal	10,45–12,42	1,2378	15,303	15,303	15,303	-
7(IV) Médio	2,097–2,349	-0,15	14,38	16,5	16,0	83,44

Para a automatização do balanço radiativo as principais bibliotecas utilizadas foram GDAL e Numpy, que são pacotes com funções desenvolvidas em python que permitem realizar manipulações de imagens (arquivos raster), além de operações com matrizes.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O algoritmo foi construído na plataforma Jupyter Notebook em blocos sequenciais a fim de que o pesquisador possa informar somente os parâmetros necessários de acordo com o progresso dos cálculos. Os resultados obtidos podem ser visualizados qualitativamente, ou seja, a partir da visualização das imagens geradas, como os índices de vegetação, reflectância, saldo de radiação na superfície, entre outros. As Figura 2 e 3 ilustram os parâmetros NDVI e Saldo de Radiação, respectivamente.

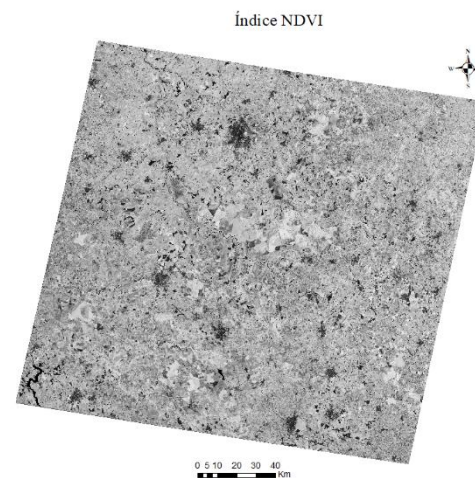


Figura 2. Índice NDVI obtido pelo algoritmo.

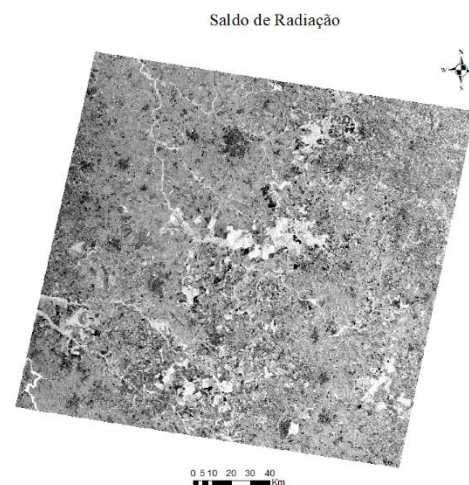


Figura 3. Saldo de Radiação calculado pelo algoritmo.

O algoritmo também permite a exibição dos resultados quantitativamente, no qual o pesquisador informa as coordenadas de um determinado local na imagem e todos os parâmetros calculados da região escolhida são exibidos. A Tabela 2 refere-se aos parâmetros calculados para a região do Cerrado Pé-de-Gigante determinada na imagem pelas coordenadas 21°42'37"S e 47°28'41"O.

Tabela 2 – Parâmetros calculados pelo Balanço de Radiação.

Parâmetros	Valor
NDVI	0,274
SAVI	0,228
IAF	0,269
Ts	305,460
Rol	470,275
Rn	579,220

O algoritmo permite manipular imagens e realizar operações matemáticas de forma simples, visto que o pesquisador necessita informar somente alguns parâmetros específicos para o cálculo do balanço de radiação, tornando-se bastante prático para trabalhos de sensoriamento remoto, principalmente com dados já corrigidos atmosféricamente. O cálculo do balanço de radiação pode ser aplicado para dados de outros sensores, sendo necessário somente o conhecimento prévio dos coeficientes de calibração de cada sensor.

Além de calcular o balanço de radiação eletromagnética na superfície, o algoritmo oferece outros produtos derivados que podem ser utilizados concomitantemente, como os índices de vegetação que podem auxiliar nos estudos sobre as características da superfície terrestre (Figura 2).

A ferramenta de consulta por inserção de coordenadas facilita a utilização do algoritmo, já que o pesquisador não necessita acessar todas as imagens geradas para identificar o valor de pixels específicos.

Neste trabalho foram utilizados modelos e equações simplificados, visto que existem modelos mais complexos na literatura utilizados para correções atmosféricas e balanço de radiação. Assim, uma forma de obter valores mais satisfatórios do balanço de radiação de superfície é adaptar as equações para que melhor representem os fenômenos abordados. O algoritmo deste trabalho encontra-se disponível no github: <https://github.com/celinacandida/Balan-o-de-radia-o-/blob/master/Trabalho%20Final.ipynb>

4. CONCLUSÕES

O programa de automatização do balanço de radiação de superfície pode se tornar uma potencial ferramenta complementar a usuários de geotecnologias já que os processamentos realizados no programa não exigem dos usuários conhecimento prévio de ferramentas, como por exemplo, a correção radiométrica e atmosférica das imagens de satélites ou a determinação dos índices de vegetação.

A automatização do balanço de radiação contribui para a redução da probabilidade de erros, já que o usuário não

precisa refazer todos os procedimentos passo a passo, principalmente em uma pesquisa embasada com múltiplas imagens, otimizando os cálculos.

5. AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com o apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPQ), da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001, pela concessão de bolsas e pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) - processo n° 2017/24086-2.

6. REFERÊNCIAS

- [1] Feitosa, J. R. P.; Ferreira da Costa, R.; Fisch, G.; SOUZA, S. D.; Nobre, C. A. Radiação solar global em áreas de floresta e pastagem na Amazônia. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, v. 6, n. 1, p. 1-7, 1998.
- [2] Aguiar, L. J. G. *Balanço de radiação em áreas de floresta e de pastagem em Rondônia*. Viçosa, MG, 2007.
- [3] Buriol, T. M.; Argenta, M. A. Acelerando o desenvolvimento e o processamento de análises numéricas computacionais utilizando python e cuda. *Métodos Numéricos e Computacionais em Engenharia-CMNE CILAMCE*, 2009.
- [4] Silva, B.B. *Balanço de Radiação com Imagens TM-Landsat*. Universidade Federal de Pernambuco, Recife-PE, 2013.
- [5] Rocha, H. R.; Freitas, H. C.; Rosolem, R.; Juarez, R. I. N.; Tannus, R. N.; Ligo, M. A.; Cabral, O. M. R.; Dias, M. A. F. S. Measurements of CO₂ exchange over a woodland savanna (Cerrado Sensu stricto) in southeast Brasil. *Biota Neotropica*, v.2, n.1, p.1-11, 2002.
- [6] Chander, G.; Markham, B. Revised Landsat-5 TM radiometric calibration procedures and postcalibration dynamic ranges. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, v.41, n.11, p.2674-2677, 2003.