



Ministério da
**Ciência, Tecnologia
e Inovação**



SER300 – Introdução ao Geoprocessamento

Cálculo de Irradiação Direta em Regiões Sombreadas do Estado do Rio de Janeiro

Jefferson Gonçalves de Souza

Monografia da disciplina de Introdução ao Geoprocessamento (SER-300) do Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, ministrado pelos Profs. Dr. Antonio Miguel Vieira Monteiro
Dr. Claudio Clemente Faria Barbosa

Resumo

Nos últimos anos a preocupação em se obter energias limpas, em prol do meio ambiente, vem se tornando o foco de muitas discussões pelo mundo, com o objetivo principal de se desenvolver e pesquisar fontes de energia com menor impacto ambiental.

Uma dessas fontes é a energia solar, pois consiste em uma fonte de energia renovável e que não emitem poluentes. Porém a energia solar ainda é pouco utilizada em razão de variabilidade associada ao clima.

Com o aumento da demanda de energia elétrica e as preocupações ambientais quanto ao uso de fontes convencionais de energia, vem se intensificando as pesquisas com o intuito de obter conhecimento e dados confiáveis para fins de planejamento energético e estudos de viabilidade de adoção e de investimentos em unidades de geração a partir de energia solar. Empresas privadas e públicas têm instalados instrumentos com sensores que medem a radiação em determinados pontos no Brasil. Mas com esses sensores os dados de radiação são apenas para uma área pontual. Assim, há uma necessidade de se utilizar modelos computacionais que estime valores de irradiância solar. Porém esses modelos por serem 2D realizam todos os cálculos em um plano horizontal não levando em consideração as mudanças de topografia.

Se os modelos calculassem a DMI em todos os dias e horários com os ângulos corretos, os valores estimados por eles seriam muitos mais próximos dos valores observados.

O objetivo deste trabalho é criar uma metodologia para calcular a DNI levando em consideração o mapa topográfico do estado do Rio de Janeiro, dado observacional do INMET para fim de comparação, dados de transmitância do Modelo BrasilSR.

1 Introdução

Com o aumento da demanda energética, onde no Brasil setenta por cento é gerada pelas hidroelétricas, e com as condições hidrológicas desfavoráveis, houve uma redução da oferta de energia hidráulica. (Bem/EPE).

Com a preocupação de que em um futuro próximo os problemas com a falta de água nos reservatórios seja um problema para a geração de energia, muitas pesquisas para se obter energia de outra fonte que não seja poluente, como a energia solar, provida pelo sol, estão sendo realizadas.

A radiação solar fornece 99,9% da energia radiante que é utilizada no sistema terrestre. Ao atravessar a atmosfera, cada comprimento de onda dessa radiação interage de forma diferente, através de complexos processos radiativos de absorção, espalhamento e emissão, como mostrados na figura 1. (LUTGENS E TARBUCK,2012).

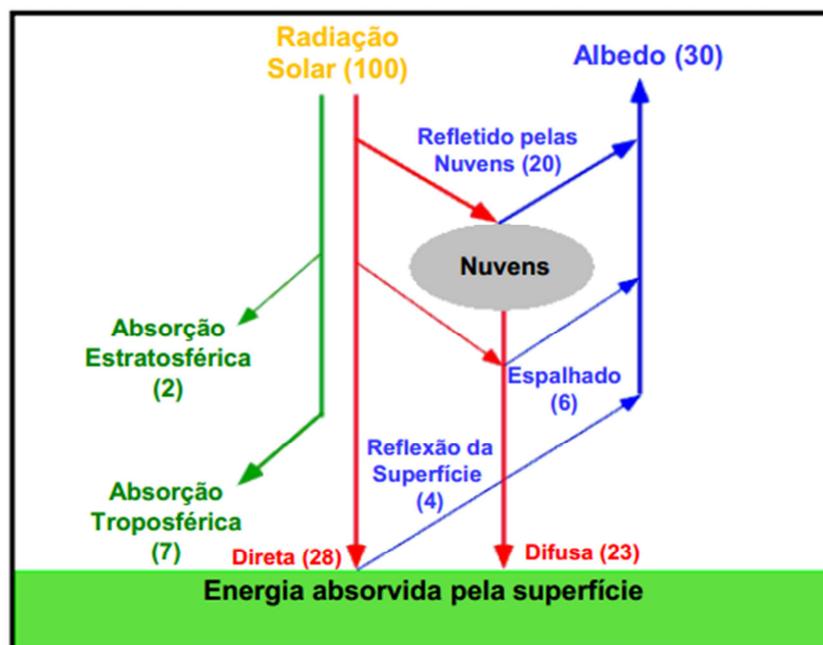


Figura 1 – Interação da radiação solar com a atmosfera terrestre
Fonte: Adaptado de Pidwirny(2006)

A radiação que chega à superfície da terra proporciona inúmeras aplicações como: mapas de insolação em grandes áreas com aplicações na agricultura e silvicultura (FU; RICH, 2002); modelos de crescimento de culturas como força

motriz na produção de biomassa (REUTER; KERSEBAUM; WENDROTH, 2005); levantamento de potencial solar para instalações de usinas de energia solar (GUEYMARD; WILCOX, 2011); balanço energético e estimativas de evapotranspiração (ALLEN; TREZZA; TASUMI, 2006); entendimento do aquecimento do solo e massas de ar, formação de ventos e derretimento de neve (FU; RICH, 2002); projetos de construção, sensoriamento remoto e gestão territorial (HOFIERTA; SORI, 2002).

Outra aplicação é a conversão da radiação direta que chega à superfície para energia através de painéis fotovoltaicos instalados em casas, indústrias ou até em parques solares. Existem testes também de que a energia provida pelo sol seja utilizada como combustível para automóveis e aviões. Recentemente um avião, de nome Solar Impulse 2 com painéis solares, decolou para uma viagem de volta ao mundo, utilizando apenas a energia solar como combustível.(solar Impulse 2)

Mesmo se mostrando importante no Cesário da pesquisa e para o equilíbrio da terra, existe uma grande dificuldade em se obter dados de radiação, considerando os altos custos envolvidos na instalação e manutenção das estações de monitoramento de radiação solar, indisponibilidade de dados por um longo período e problemas de calibração.

Para tentar sanar as dificuldades de obter dados de radiação solar, modelos de transferência radiativa foram propostos para tentar estimar a radiação solar incidente por meio de relações empíricas ou por uma solução da equação de transferência radiativa da atmosfera.

Porém, os modelos ao realizar os cálculos levam em consideração dados altimétricos, mas não consideram se a área a ser estimada está sombreada. Para isso seria necessário dados de ângulo zenital para cada horário calculado, ângulo de declividade, ângulo de incidência entre a normal a uma encosta e os raios solares.

Este trabalho tem de forma objetiva calcular a radiação em regiões sombreadas no estado do Rio de Janeiro, criando assim, um modelo que utilizando a álgebra de mapas tenta estimar a radiação direta, a fim de ajudar em estudos futuros de radiação solar.

2 Metodologia

A área de estudo é o estado do Rio de Janeiro com aproximadamente 43.696km² de extensão e localizado no sudeste brasileiro. Foi escolhido o dia 11 de Fevereiro de 2010, dia 42 juliano, nos horários de 10h30m e 20h00m. E para validação as estações de Campos dos Goytacazes e Resende como mostrado na figura 2.

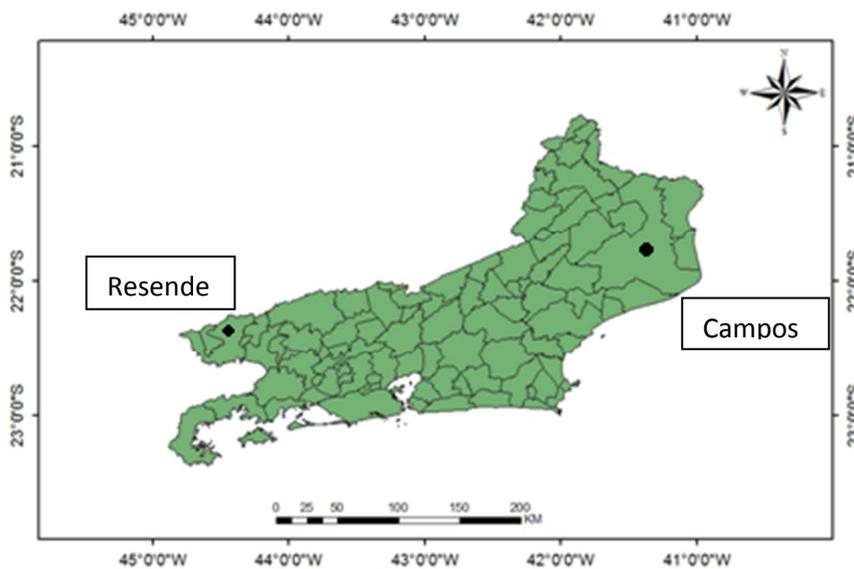


Figura 2, Estado do Rio de Janeiro e estações de validação

Os dados topográficos utilizados foram obtidos do Topodata, uma base de dados do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Os dados com resolução espacial de 30m foram reamostrados para uma área de 4x4km, figura 3, afim de diminuir o tempo computacional e o mesmo se ajustar ao dado de transmitância que está em uma resolução de 4x4km.

O dado topográfico foi inserido no Spring, Sistema de Processamento de Informações Georeferenciadas desenvolvido Pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, e com ele foi gerado o dado de declividade, figura 4. O SPRIG é um sistema de informação geográfica com funções de processamento de imagens, análise espacial, modelagem numérica de terreno e consulta a banco de dados espaciais. A declividade é definida por BURROUGH (1986) como sendo um plano tangente a superfície, expresso como a mudança de

elevação sobre certa distância, correspondendo ao ângulo de inclinação da superfície local, figura 4.

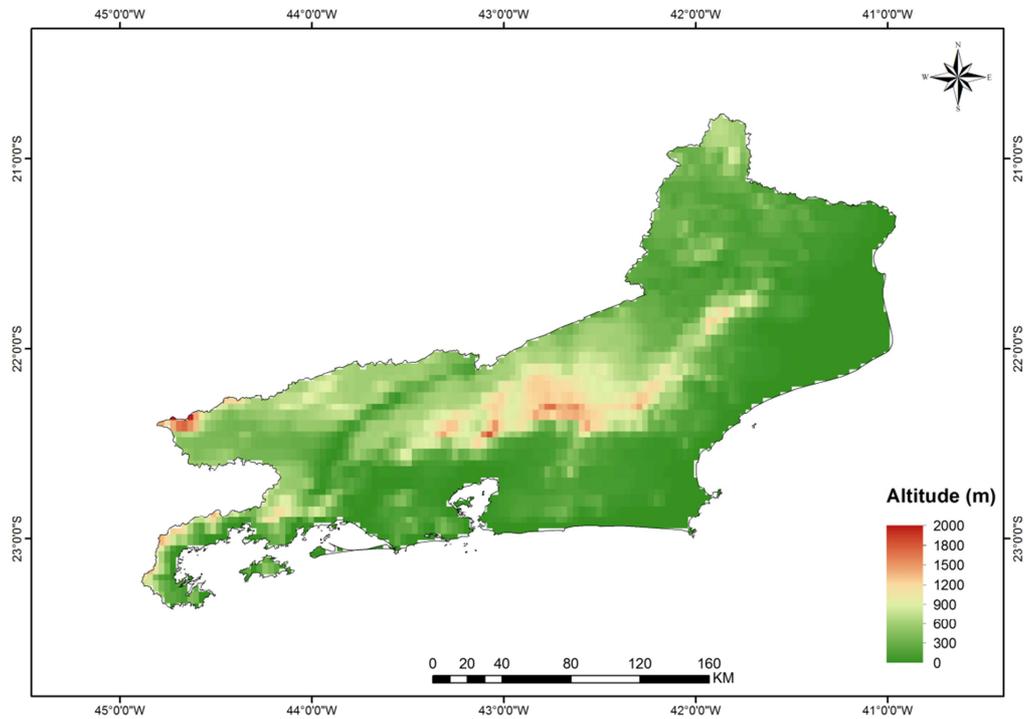


Figura 3 – Mapa Altimétrico do Estado do Rio de Janeiro

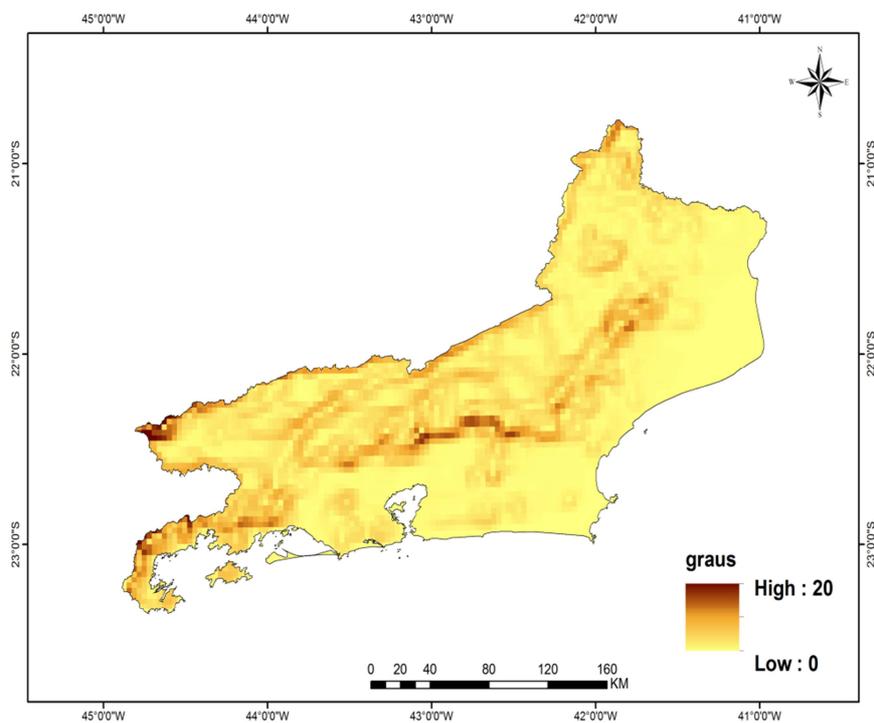


Figura 4 – Mapa de Declividade do Estado do Rio de Janeiro

O ângulo de incidência é uma medida de desvio do ângulo que incide sobre um objeto e a normal a uma encosta, figura 5. Foi utilizado a equação 1, onde G_z é o ângulo zenital da superfície e G_a é o ângulo azimutal da superfície.

$$\text{AngIn}_{\theta,\alpha} = \text{acos} [\cos(\theta)\cos(G_z) + \text{sen}(\theta)\text{sen}(G_z)\cos(\alpha - G_a)] \quad (1)$$

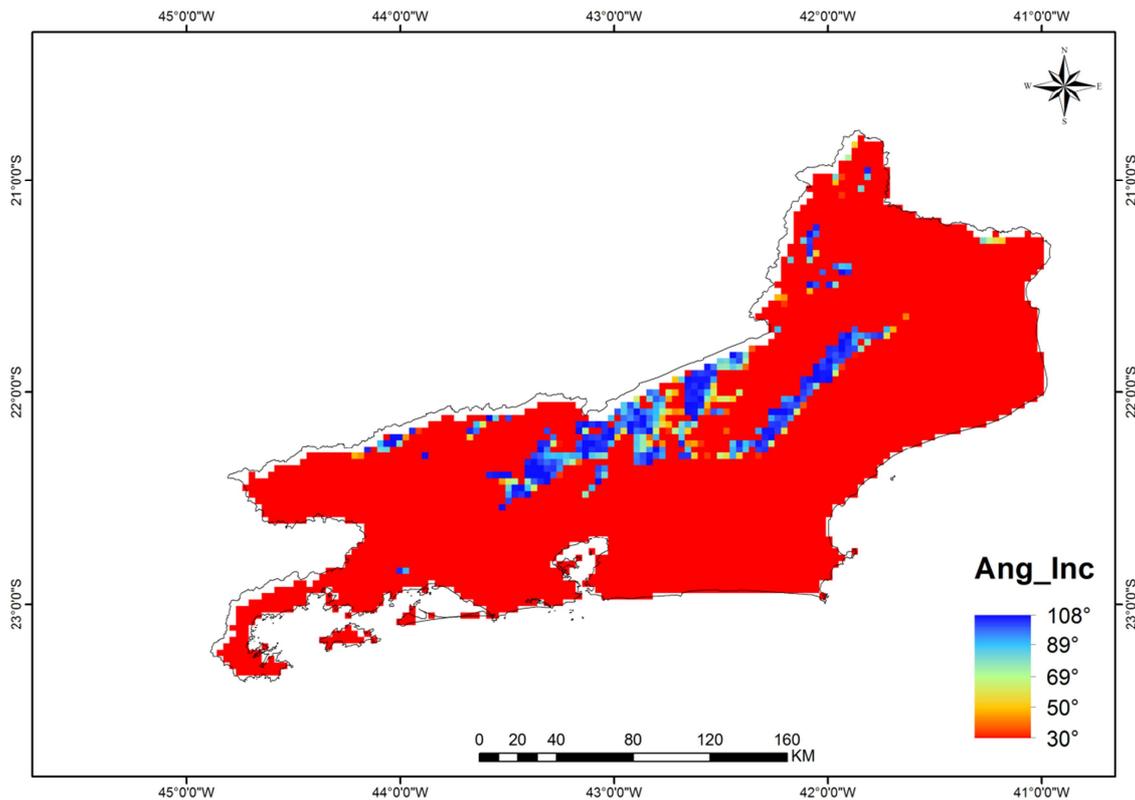


Figura 5 – Mapa do Ângulo de Inclinação do Estado do Rio de Janeiro

O ângulo zenital é o ângulo formado entre os raios solares e a vertical local. Para o cálculo é considerado a latitude do local, dia e horário. Essas informações são importantes para se saber exatamente a posição em que o sol está e assim calcular o ângulo que ele faz em relação ao ponto. Foi utilizado um programa em Matlab para realizar o cálculo, figura 6, os dados gerados foram convertidos em Shape, figura 7.a.b. O Matlab é um software voltado para o cálculo numérico, ele integra análise numérica no cálculo de matrizes.

```

% CALCULO DO ANGULO ZENITAL %
day_angle(i) = ((360*(dia-1))/365.15)*pi/180;
dec(i) = (0.006918 - 0.399912 * cos(day_angle(i)) + 0.070257 * sin(day_angle(i)) - 0.006758 * cos(2* day_angle(i)) +
+0.000907 * sin(2* day_angle(i)) - 0.002697 * cos(3* day_angle(i)) + 0.001480 * sin(3* day_angle(i)));

% CALCULO DA EQUAÇÃO DO TEMPO EM HORA %
eqtime(i) = (0.000075 + 0.001868 * cos(day_angle(i)) - 0.032077 * sin(day_angle(i)) - 0.014615 * cos(2* day_angle(i)) -
- 0.040849 * sin(2* day_angle(i)))*((180*4)/(pi));

% CALCULO DO TEMPO TOTAL TRANSCORRIDO OU HORA SOLAR EM MINUTO %
tcorr(i) = (minuto/60 + ((longitude(i)/15) + eqtime(i)/60));

% CALCULO DA DISTÂNCIA MÃO DIA TERRA-SOL PARA CADA DIA JULIANO %
e0(i) = 1.00011 + 0.034221 * cos(day_angle(i)) + 0.00128 * sin(day_angle(i)) + 0.000719 * cos(2 * day_angle(i)) +
+ 0.000077 * sin(2 * day_angle(i));

% CALCULO DO ANGULO HORARIO EM GRAU %
hour_angle(i) = (12.00 - tcorr(i))* 15;

% CALCULO DO ÂNGULO ZENITAL, COSENO DO ANGULO ZENITAL E DO ANGULO DE ELEVAÇÃO %
u0(i) = ((sin(dec(i)) * sin(latitude(j)*pi/180) + (cos(dec(i)) * cos(latitude(j)*pi/180) * cos(hour_angle(i)*pi/180)));
zenit_angle(i,j) = (acos(u0(i)))*180/pi;

```

Figura 6 – Programa em Matlab para o cálculo do ângulo Zenital

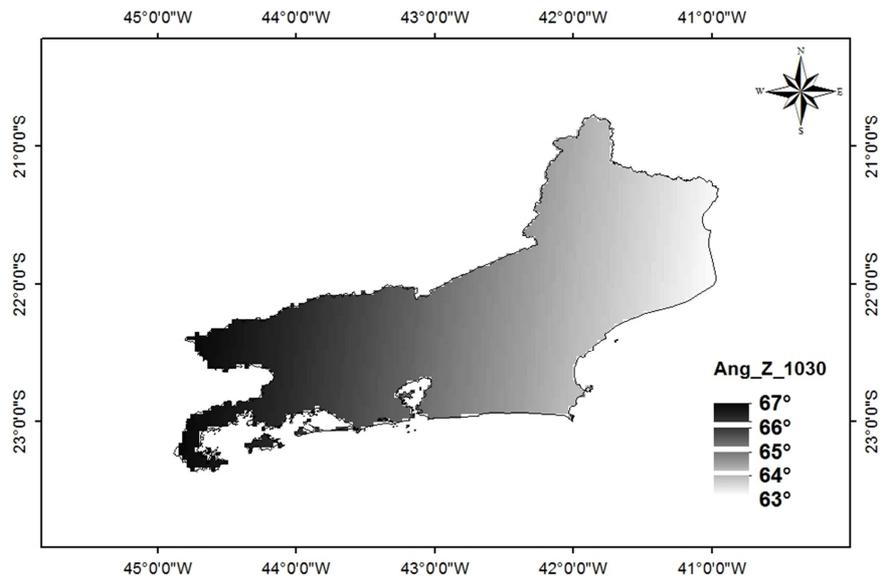


Figura 7a – Mapa de ângulo zenital às 10h30m no estado do Rio de Janeiro

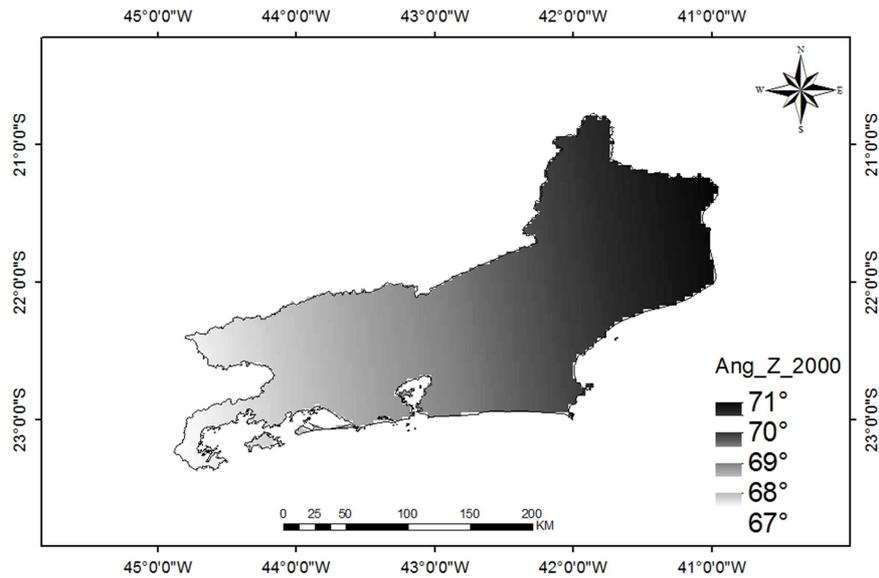


Figura 7b – Mapa de ângulo zenital às 20h00m no estado do Rio de Janeiro

A transmitância foi obtida da base de dados do Modelo de transferência radiativa BrasilSR, desenvolvido no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. O Modelo BrasilSR utiliza a aproximação de dois fluxos na solução da equação de transferência radiativa.

Os dados obtidos no formato texto contendo dados de longitude, latitude e transmitância, tem a resolução temporal de 4x4km, e foram convertidos para shape, figura 8.a.b.

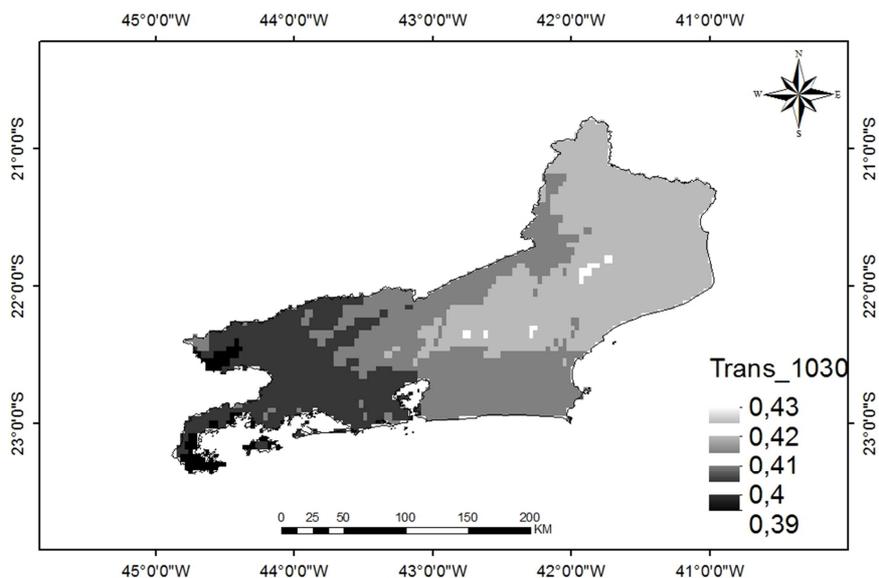


Figura 8a – Mapa de Transmitância do Estado do Rio de Janeiro às 10h30m

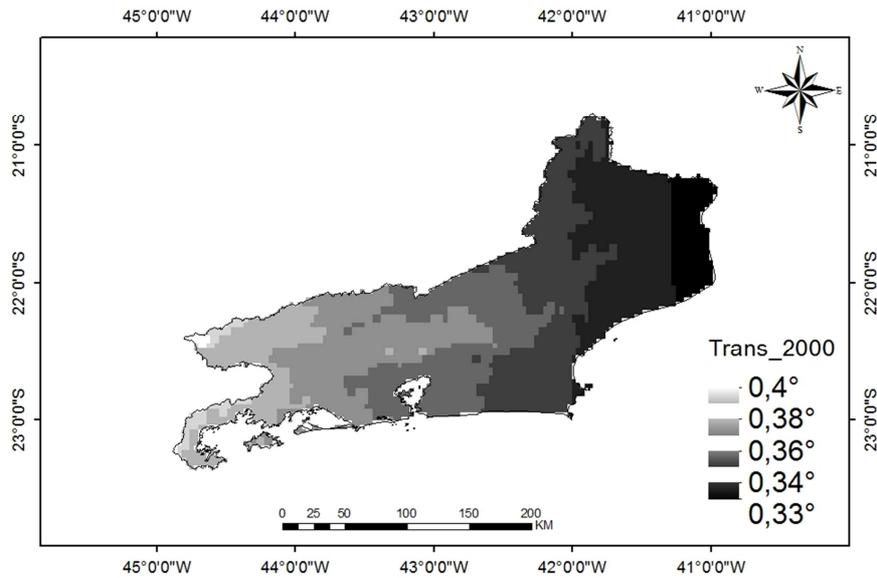


Figura 8b – Mapa de Transmissão do Estado do Rio de Janeiro às 20h00m

Com todos os mapas necessários criados, foi desenvolvido utilizando álgebra de mapas um modelo capaz de calcular a radiação direta em áreas sombreadas. Este modelo utiliza a equação sugerida por Hungerford (1989) e Glassy & Running (1994), equação 2.

$$R_{\downarrow s} = S_0 \times N \times \tau^{AM} \times \cos \varphi + \cos^2 \left(\frac{\beta}{2} \right) \times \left\{ \left[(S_0 N \cos Z)^2 \tau^{AM} \right]^{0,5} (1 - S_0 N \tau^{AM} \cos Z)^{0,5} \right\} \quad (2)$$

Para a equação acima, foi utilizado o fotoperíodo representado por N , que representa a quantidade de horas diárias de sol, calculado pela equação 3.

$$N = \delta = 23,45 \text{sen} \left[\left(\frac{360}{365} \right) (\text{dia} - 80) \right] \quad (3)$$

dia é o dia Juliano;

$$AM = \left[\frac{1}{\cos Z} \right] + 1 \times 10^{-7}$$

β ângulo de inclinação do Terreno

S_0 constante solar

N fotoperíodo

Z ângulo zenital

φ ângulo de incidência entre a normal e a encosta

τ transmitância da atmosfera

A constante solar é a quantidade de energia por unidade de área e tempo em uma superfície plana. Neste trabalho foi fixado o valor da constante solar em 1.367Wm^2 .

Para o cálculo da equação de radiação, foi utilizado o Model Builder Windows, função do software ArcGis, ele é um sistema de informação geográfica que trabalha com criação de mapas, compilação de dados geográficos, análise de mapas, uso de mapas e informações geográficas.. O Model Builder é uma janela de programação onde se desenvolve modelos, representações simplificada e gerenciável da realidade, com alguns operadores que manipulam campos geográficos, neste caso as imagens criadas. Na literatura de Geoprocessamento esse conjunto de operadores é chamado de Álgebra de Mapa. Na figura 9 a,b,c, pode-se observar a equação, que foi dividida em três partes, para o cálculo de radiação.

Quando executados, cada modelo gera um mapa de saída e no final os três mapas foram multiplicados, respeitando a equação, para gerar o mapa de radiação solar. O modelo proposto foi executado para os dois horários, 10h30m e 20h00m do dia 11 de Fevereiro de 2010, dia 42 em juliano.

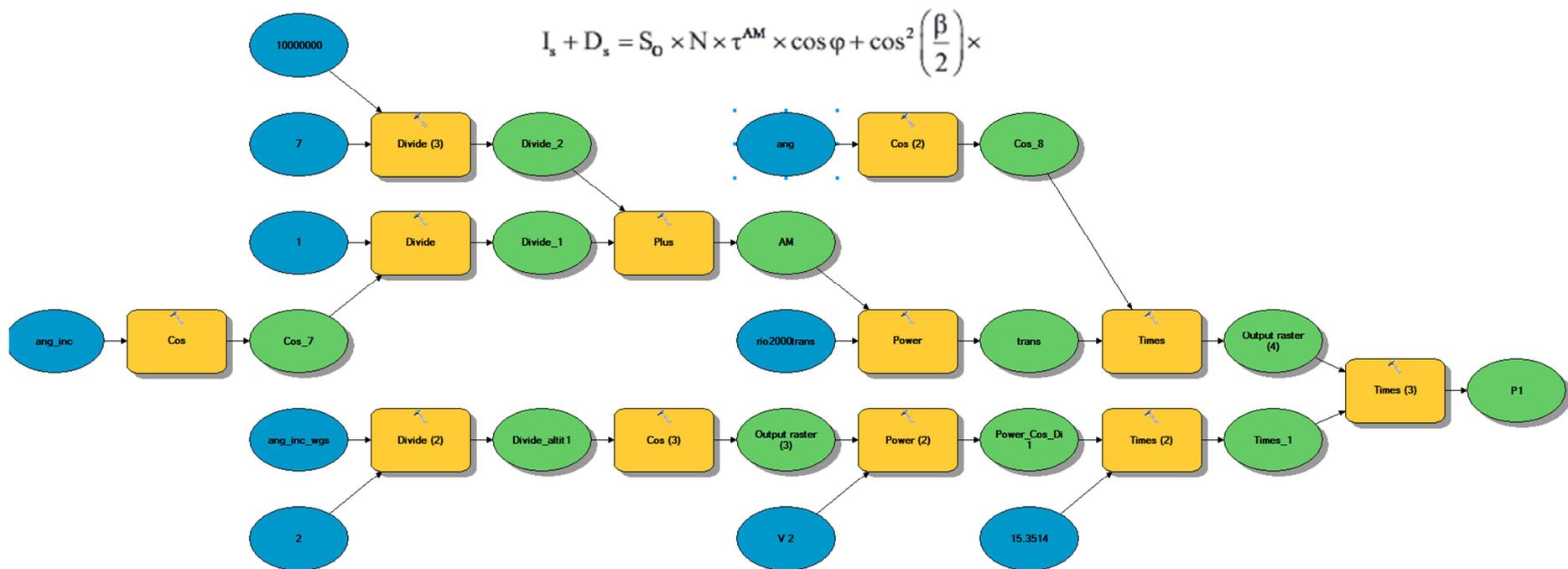


Figura 9 a – Álgebra de Mapas para o cálculo de radiação direta

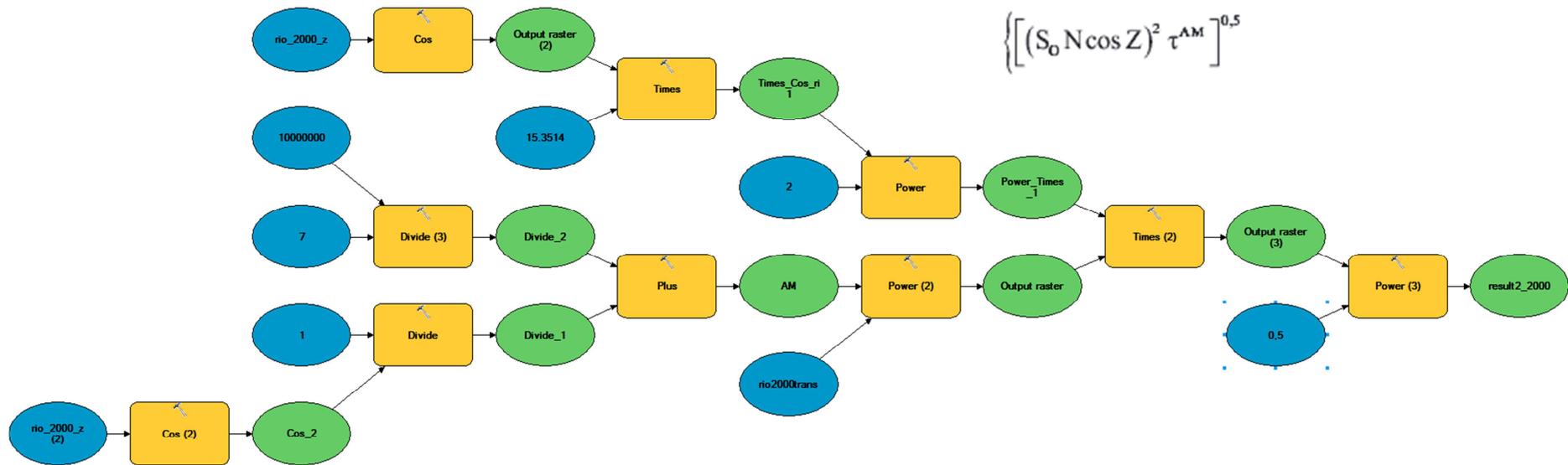


Figura 9 b – Álgebra de Mapas para o cálculo de radiação direta

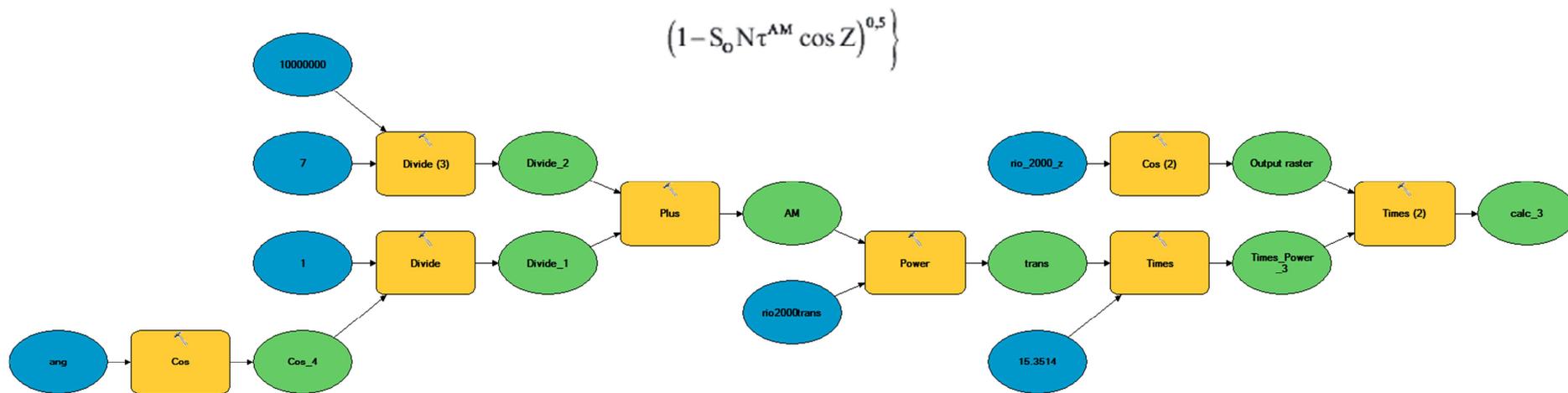


Figura 9 c – Álgebra de Mapas para o cálculo de radiação direta

3 Resultados

Depois de executados os modelos, foram gerados os mapas de radiação direta para os horários das 10h30m e 20h30m, figura 10 a,b.

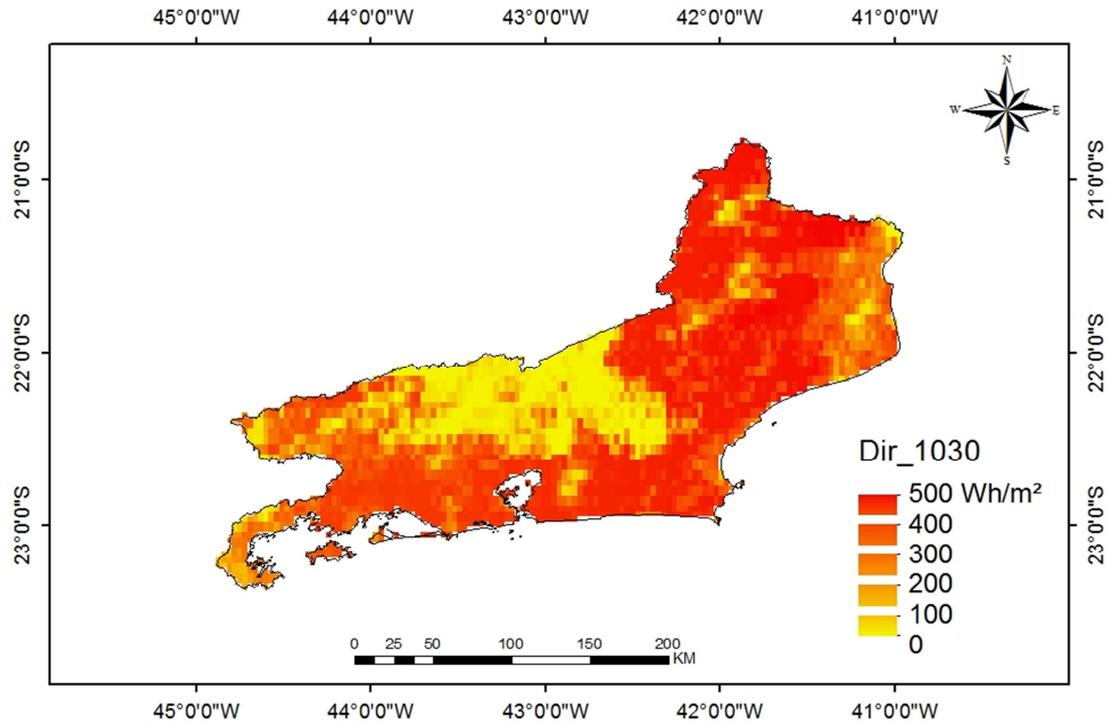


Figura 10a – Radiação direta às 10h30m do dia 11 de Fevereiro de 2010

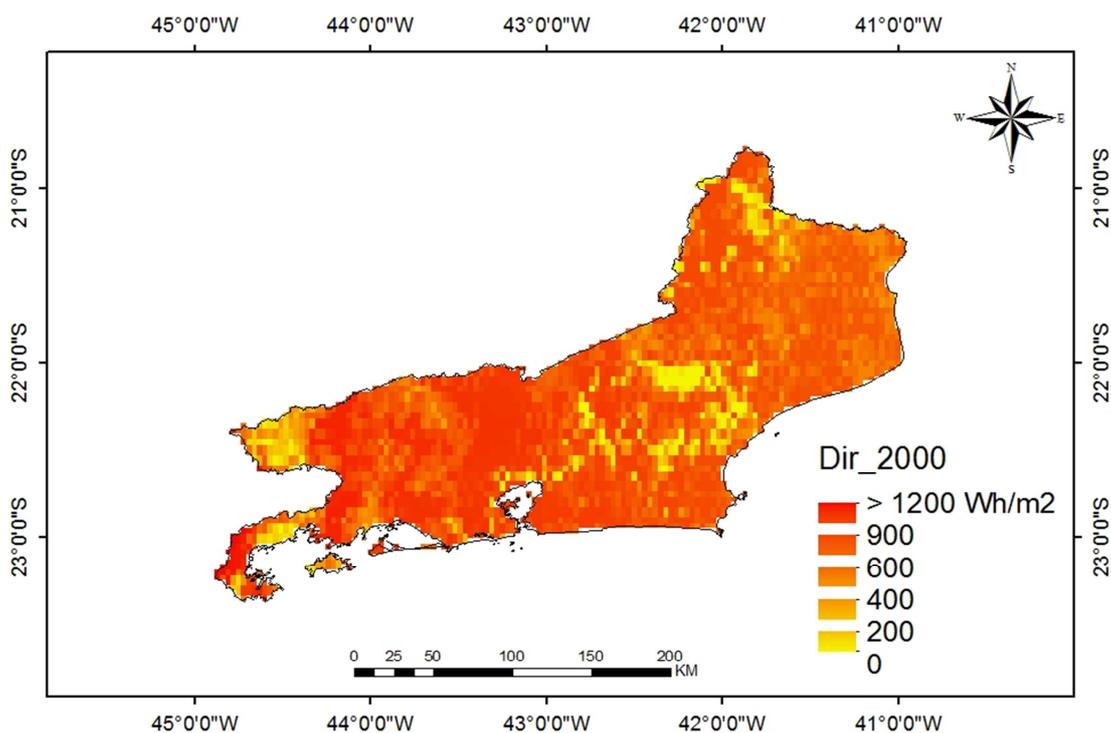


Figura 10b – Radiação direta às 20h00m do dia 11 de Fevereiro de 2010

Tabela 1 – Comparação dos dados Observados x Modelo

Estação	10h30m		20h00m	
	Observado	ModeloGeo	Observado	ModeloGeo
Campos	1751	542	280	187
Resende	1334	264	410	201

A tabela 1 mostra que os valores de radiação do modelo proposto subestimaram os dados observados, um dos motivos é que se no dia observado não tinha nenhuma nuvem, céu claro, o valor de radiação seria maior nos dados observados e no do modelo proposto por não considerar dados de cobertura de nuvens e assumir um valor de 60% de nuvens, o valor de radiação seria menor.

O modelo não levou em consideração os dados climatológicos de temperatura, umidade, albedo visibilidade e aerossóis. Esses dados são muito importantes para o cálculo de radiação, já que parte dessa radiação ao passar pela atmosfera sofre uma perda.

Todos os mapas usaram a resolução espacial de 4x4km, com a resolução espacial alta o modelo pode ter suavizado e muito a região mais alta do estado do Rio de Janeiro, dificultando assim o cálculo.

Como trabalho futuro, pretende rodar o mesmo modelo, mas com uma resolução mais fina, 30m, inserir dados climatológicos e cobertura de nuvens. Porém a região seria restrita para a serra do Rio de Janeiro ou outra região de serra.

5 Referências Bibliográficas

ALLEN, R. G.; TREZZA, R.; TASUMI, M. Analytical integrated functions for daily solar radiation on slopes. *Agricultural and Forest Meteorology*, Amsterdam, n. 139, p. 55-73, 2006.

EL-SEBAIL A.A.; TRABEA A.A. Estimation of horizontal diffuse solar-radiation in Egypt. *Energy Convers Manage*, v. 44(15): 2471–2482, 2003.

FU, P.; RICH, P. Design and implementation of the solar analyst: an arcview extension for modeling solar radiation at landscape scales. In: ANNUAL ESRI CONFERENCE, 19., 1999. Proceedings... Disponível em: . Acesso em: 23 set. 2013.

Governo do estado do Rio de Janeiro - <http://www.rj.gov.br/>

GUEYMARD, C. A.; WILCOX, S. M. Assessment of spatial and temporal variability in the US solar resource from radiometric measurements and predictions from models using groundbased or satellite data. *Solar Energy*, Kidlington, v. 85, p. 1068-1084, 2011.

HOFIERTA, J.; ŠÚRI, M. The solar radiation model for open source GIS: implementation and applications. In: OPEN SOURCE GIS – GRASS USER CONFERENCE, 2002, Trento. Proceedings ... Trento, 2002. p.1-19.

Instituto nacional de meteorologia – INMET, base de dados observados - <http://www.inmet.gov.br/>

IQBAL, M. Na Introductionto Solar Radiation. Ontario: Academic Press, 1983

HUNGERFORD, R. D.; NEMANI, R. R.; RUNNING, S.; COUGHLAN, J. C. MTCLIM: A mountain microclimatesimulationmodel. Ogden: USDA: IntermountainResearchStation, Forest Service, 1989. 51p.

LUTGENS, F. K; TARBUCK, E. J. Earth Science, 13. Ed Upper Saddle River, New Jersey: Pearson Education, Inc.,2012.

MARTINS, F. R.; PEREIRA, E. B.; ECHER, M. P. S. Levantamento dos recursos de energia solar no Brasil com o emprego de satélite geostacionário – o Projeto Swera. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 26, n. 2, p. 145 - 159, 2004.

PEREIRA, Enio Bueno ; MARTINS, Fernando Ramos; ABREU, Samuel Luma de; RÜTHER, R. .Atlas Brasileiro de Energia Solar. 1. Ed. São José dos Campos: INPE,2006 .V.1.60p.

PEREIRA, E. B.; ABREU, S. L.; STUHLMANN, R.; RIELAND, M. e COLLE, S. "Survey of the incident solar radiation in Brazil by use of meteosat satellite data", Solar Energy, v.57, n.2, p.125-132, 1996

REUTER, H. I.; KERSEBAUM, K. C.; WENDROTH, O. Modelling solar radiation influenced by topographic shading: evaluation and application for precision farming. Physics and Chemistry of the Earth, Oxford, v. 30, p. 143-149, 2005.

www.solarimpulse.com/

www.epe.gov.br/ - Epe - Síntese do Relatório Final de 2014