

ATLAS SOLARIMÉTRICO DO CEARÁ – METODOLOGIA E RESULTADOS PRELIMINARES

Otacilio Leandro de Menezes Neto – otacilio@funceme.br

Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos - FUNCEME

Alexandre Araújo Costa – alexandrearaujoc@gmail.com

Fernando Pinto Ramalho – fpramalho@gmail.com

Universidade Estadual do Ceará, Mestrado em Ciências Físicas Aplicadas.

Resumo. A utilização de fontes alternativas de energias, como a solar, a eólica e a biomassa, vem crescendo significativamente nos últimos anos, sendo a energia solar, em particular, uma fonte abundante na região Nordeste do Brasil. O conhecimento preciso da radiação solar incidente é, assim, de grande importância para o planejamento energético brasileiro, servindo de base para o desenvolvimento de futuros projetos de plantas fotovoltaicas e de aproveitamento da energia solar. Neste sentido a Secretaria de Infra-Estrutura do estado do Ceará (SEINFRA-CE), em parceria com a Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME) firmaram um convênio para o desenvolvimento do Atlas Solarimétrico do Ceará. Este trabalho, ainda em fase de desenvolvimento, apresenta uma metodologia para o mapeamento da energia solar incidente ao nível do solo para a região Nordeste do Brasil, utilizando um modelo atmosférico de mesoescala (Regional Atmospheric Modeling System – RAMS), validado e ajustado por meio dos dados medidos pela rede de plataformas de coleta de dados (PCDs) da FUNCEME. Os resultados mostraram que o modelo apresenta erros sistemáticos, sobreestimando a radiação na superfície, mas que, após as devidas correções estatísticas, utilizando-se uma relação entre a fração de cobertura de nuvens prevista pelo modelo e a radiação observada e estimada no topo da atmosfera, encontram-se correlações de 0,92 com intervalos de confiança de 13,5 W/m^2 para dados com base mensal. Usando essa metodologia, a estimativa do valor médio anual (após ajustes) da radiação solar incidente no estado do Ceará é de 215 W/m^2 (máximo em outubro, com média mensal de 260 W/m^2).

Palavras-chave: Energia Solar, Transferência Radiativa, Modelagem Numérica.

1. INTRODUÇÃO

A energia que recebemos do Sol é indispensável para a vida na Terra, pois ela é responsável por diversos processos que ocorrem em nosso planeta, desde a fotossíntese realizada pelas plantas até os fenômenos atmosféricos. Esta energia pode também ser aproveitada para gerar energia elétrica, através de painéis fotovoltaicos, ou para aquecimento.

Na região Nordeste do Brasil é abundante a quantidade de energia solar e sua conversão em energia elétrica deve ser estimulada, o que certamente contribuirá para poupar a água armazenada nos reservatórios das usinas hidrelétricas, permitindo o seu uso para fins mais nobres, já que a região citada sofre bastante com problemas de escassez de água.

Por estes motivos, o mapeamento (na forma de Atlas) da radiação solar incidente no estado do Ceará e na sua extensão para a região Nordeste como um todo é de extrema importância para o planejamento energético brasileiro permitindo que projetos de instalação de plantas fotovoltaicas e de aproveitamento de energia solar pelas mais diversas tecnologias possam ser efetuados numa base sólida que reduza os riscos econômicos e estratégicos para os investidores ou o próprio governo.

A metodologia proposta utiliza o modelo atmosférico RAMS na sua última versão 6.0, para os cálculos da radiação solar incidente. O *Regional Atmospheric Modeling System* (RAMS) 6.0, tratando-se de um modelo de área limitada desenvolvido a partir do conjunto completo de equações não-hidrostáticas compressíveis da atmosfera além de equações de conservação para grandezas escalares. Conta ainda com diferentes opções de parametrização que permitem a reprodução de grande parte dos fenômenos atmosféricos mais relevantes (Cotton et al. 2003; Pielke et al. 1992).

Com a utilização dos dados coletados nos últimos anos pelas mais de 70 estações meteorológicas (Plataformas de Coleta de Dados - PCDs) operadas pela Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME), usados na fase de validação do modelo, pôde-se estabelecer com boa precisão o mapeamento da radiação solar incidente sobre o estado do Ceará e toda a região Nordeste do Brasil através de ajustes nos resultados do modelo RAMS baseados nas medidas reais obtidas das PCDs. As PCDs operam hoje com piranômetros SP-LITE, mas futuramente serão utilizados piranômetros dos modelos LP02 e CMP11 (em fase de licitação).

2. METODOLOGIA

Foram realizados testes de sensibilidade no modelo RAMS a fim de escolher a melhor configuração para os cálculos da radiação solar incidente. As simulações continham a mesma configuração, exceto pela parametrização de radiação.

O ano de 2005 (janeiro a dezembro) foi escolhido devido à disponibilidade dos dados observados pelas PCDs e este espaçamento de grade foi determinado devido ao alto custo computacional caso fossem escolhidas grades mais finas. As condições iniciais e forçante de grande escala foram fornecidos pelos dados de reanálise do NCEP/NCAR, com assimilação utilizando Relaxamento Newtoniano de 1200s nas laterais, 43200s no topo e 86400s no centro da grade. A grade horizontal continha 60 pontos em cada direção, com 40 km de espaçamento, cobrindo quase todo o Nordeste do Brasil (Fig. 1) a grade vertical continha 39 níveis, com espaçamento de grade de 80 m próximo à superfície, razão de expansão de 1,10, espaçamento máximo de 1000 m e topo a aproximadamente 24 km. As principais parametrizações utilizadas foram as de convecção (Kuo), turbulência (Mellor-Yamada), microfísica (Walko et al. 1995) e radiação (variável testada: Harrington, 1997 versus Chen-Cotton, 1983). A radiação foi calculada pelo modelo a intervalos de 10 minutos (por serem computacionalmente muito dispendiosos) e os resultados foram armazenados a cada hora de simulação.

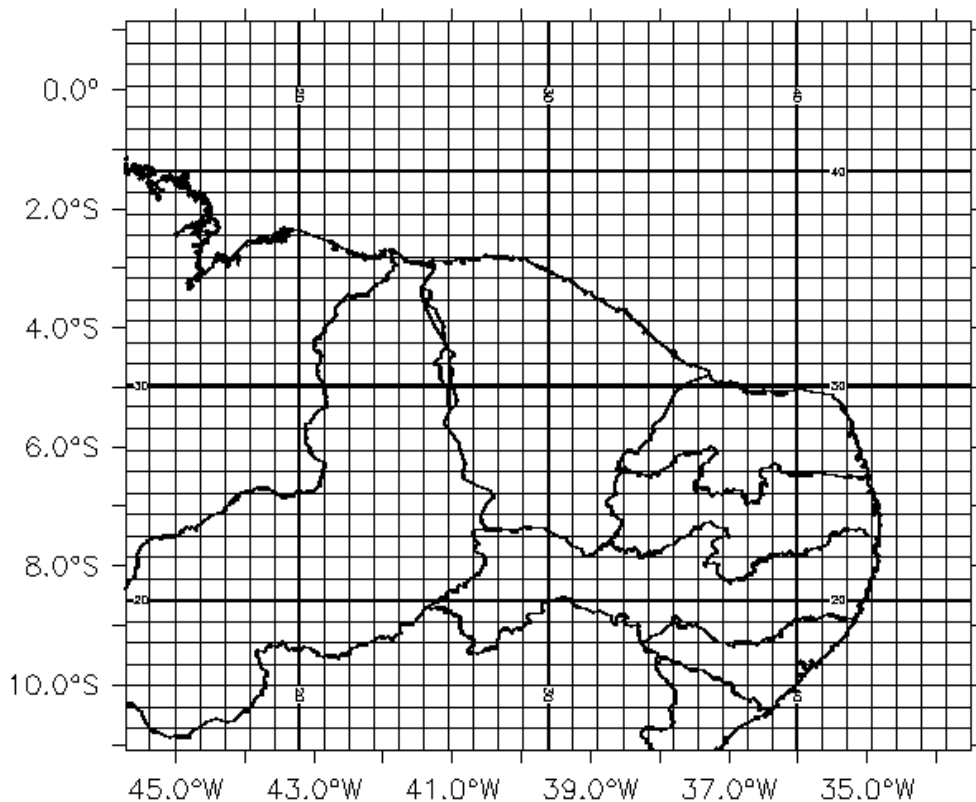


Figura 1 – Grade horizontal usada nas simulações do presente trabalho.

Para esta configuração, com espaçamento de grade de 40 km, a parametrização de Chen-Cotton mostrou resultados mais consistentes.

Uma especulação para que a parametrização de Harrington não tenha tido sucesso nesta simulação deve-se ao fato de termos uma caixa de grade muito grossa, não sendo assim possível para o modelo resolver com precisão a formação dos sistemas de nuvens e a interação da microfísica com a radiação, necessária para este esquema. Possivelmente em simulações com grades mais finas, haja uma melhoria significativa dos resultados para o esquema de radiação de Harrington, mas esta hipótese ainda precisa ser testada.

Uma comparação entre os dois tipos de parametrização utilizados e os dados observados é mostrada na Fig. 2, para duas localidades no interior do estado do Ceará.

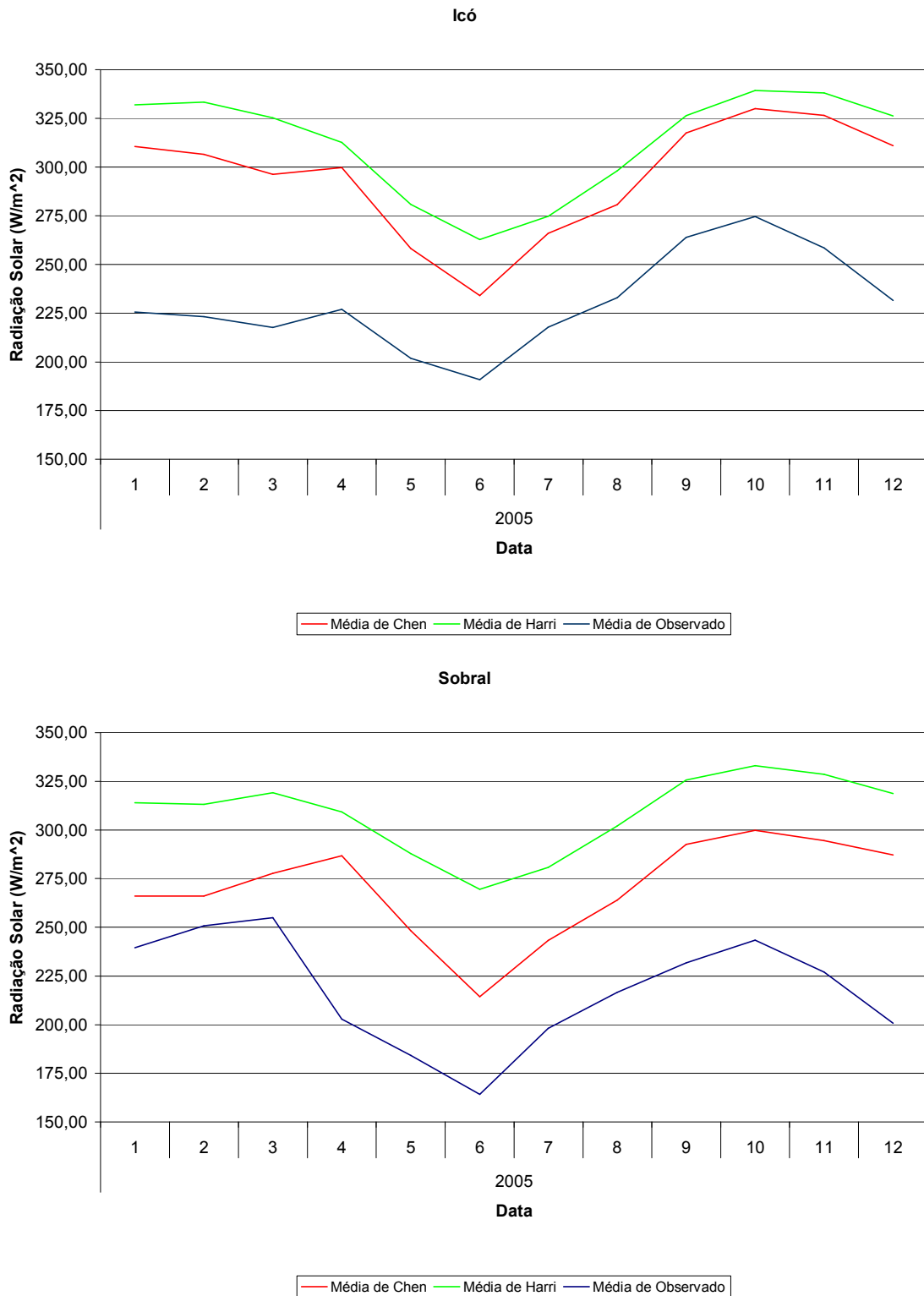


Figura 2 – Comparação entre as simulações e as PCDs para as localidades de (a) Icó e (b) Sobral.

Nos dois casos (e nos demais não apresentados aqui), a parametrização de Chen-Cotton apresentou resultados mais próximos às medidas observadas pelas PCDs, embora com erros ainda consideráveis. Por este motivo esta será a parametrização utilizada, mas com ajustes, a fim de minimizar os erros sistemáticos do modelo. Como mostrado nos exemplos da Fig. 2, a parametrização de radiação proposta por Chen-Cotton mostrou os melhores resultados. Na próxima secção teremos a descrição da física utilizada nesta parametrização.

2.1 Descrição da Parametrização de Chen-Cotton, 1983.

Esta parametrização se refere à modelagem de nuvens do tipo *stratocumulus* numa condição mista entre céu claro e encoberto por este tipo de nuvens. Por este motivo, somente este tipo de nuvem é considerada ao longo desta seção.

O modelo de radiação de ondas curtas inclui o espalhamento molecular atmosférico, absorção de ozônio desenvolvida por Lacis e Hansen (1974), e a parametrização de refletância, transmitância e absortância de camadas de nuvens desenvolvida por Stephens (1978). A estrutura do modelo de radiação de ondas curtas segue o desenvolvido por Stephens e Webster (1979), que usa o modelo de “dois-fluxos” (fluxos ascendentes e descendentes). A “transmitância equivalente” de Stephens (1977) é empregada para derivar a refletância, transmitância e absortância de uma atmosfera “mista de céu claro e encoberto por nuvens”.

De acordo com Chen & Cotton, 1983, uma vez que a parametrização de ondas curtas de Stephens para de uma camada de nuvens pode ser “ajustada” para os resultados de um modelo teórico detalhado, os valores quantitativos são mais confiáveis. O exato perfil das variáveis radiativas - refletância, transmitância e absortância de uma camada de nuvens – é muito importante para a evolução diurna de nuvens tipo *stratocumulus*. Isto ocorre, pois a “distância de penetração” da radiação de ondas curtas é determinada pelas variáveis radiativas acima citadas. A simulação de nuvens *stratus* do ártico durante o verão (Herman e Goody, 1976) mostram que a penetração da radiação de ondas curtas é a fonte de aquecimento que conduz à formação de duas camadas de nuvens distintas, entretanto, para um elevado conteúdo de água líquida, esta penetração é superficial (Chen & Cotton, 1983).

2.1.1 Equação da transferência radiativa

Uma vez que a refletância, a absortância e a transmitância são conhecidas para uma dada camada, o modelo de transferência radiativa de “dois-fluxos” (fluxo ascendente e fluxo descendente) pode ser construído.

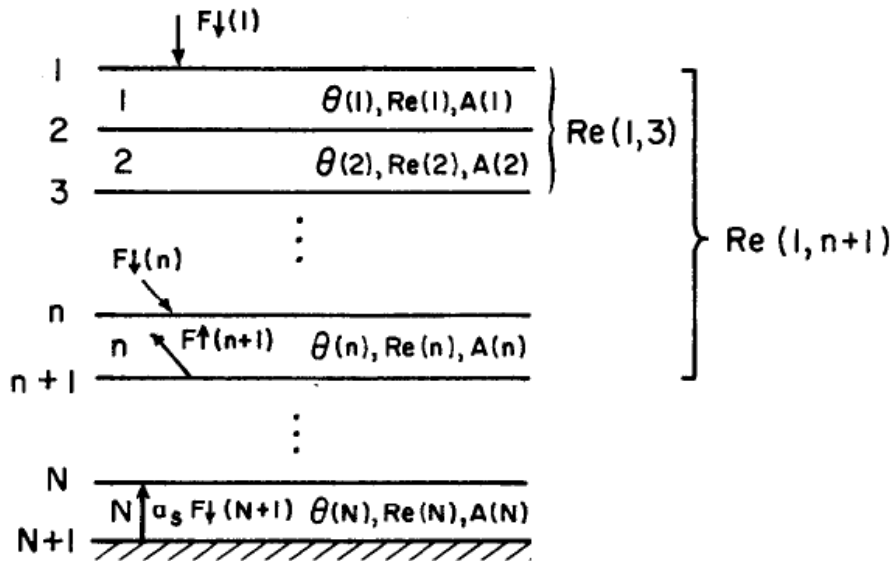


Figura 3 – O modelo de transferência radiativa, F_{\downarrow} e F_{\uparrow} denotam os fluxos descendentes e ascendentes. $Re(n)$ e $A(n)$ representam respectivamente a refletância e a absortância na n -ésima camada. $Re(1, n+1)$ é a múltipla refletância para todas as camadas acima da camada $(n+1)$.

A Figura 3 (de Stephens e Webster (1979)) representa um ilustração simples do modelo de transferência radiativa usado, onde os fluxos descendentes e ascendentes são denotados por F_{\downarrow} e F_{\uparrow} respectivamente e podem ser escritos como:

$$F_{\downarrow}(n+1) = Re(1, n+1) \cdot F_{\uparrow}(n+1) + V_{\downarrow}(n+1/2) \quad (2.1)$$

$$F_{\uparrow}(n) = \frac{Tr_{\uparrow}(n) \cdot F_{\uparrow}(n+1)}{1 - Re(1, n) \cdot Re(n)} + V_{\uparrow}(n+1/2) \quad (2.2)$$

O número de camadas é denotado por n ; $Re(n)$, $A(n)$ e $Tr(n)$ representam, respectivamente, a refletância, a absortância e a transmitância. $Re(1, n+1)$ representa as múltiplas refletâncias para todas as camadas acima da camada $n+1$, definida como

$$Re(1, n+1) = Re(n) + \frac{Tr_{\downarrow}(n) \cdot Tr_{\uparrow}(n) \cdot Re(1, n)}{1 - Re(1, n) \cdot Re(n)} \quad (2.3)$$

O segundo termo do segundo membro da Eq. (2.3) representa o efeito interno dobrado entre as camadas (Stephens, 1977).

$V_{\downarrow}(n+1/2)$ representa o fluxo transmitido da camada acima, calculado como

$$V_{\downarrow}(n+1/2) = \frac{Tr_{\downarrow}(n) \cdot V_{\downarrow}(n-1/2)}{1 - Re(1, n) \cdot Re(n)} \quad (2.4)$$

$V_{\uparrow}(n+1/2)$ representa o fluxo transmitido da camada abaixo, calculado como

$$V_{\uparrow}(n+1/2) = \frac{Re(n) \cdot V_{\downarrow}(n-1/2)}{1 - Re(1, n) \cdot Re(n)} \quad (2.5)$$

As condições de fronteira para este modelo de transferência radiativa são:

$$\begin{aligned} Re(1, 1) &= 0 \\ V_{\downarrow}\left(\frac{\downarrow}{2}\right) &= F_{\downarrow}(1) \\ F_{\uparrow}(n+1) &= a_s \cdot F_{\downarrow}(n+1) \end{aligned}$$

onde a_s é o albedo da superfície.

2.2 Parametrizações da refletância, transmitância e absortância numa atmosfera sem nuvens.

2.2.1 Parametrização da Absortância.

Similar ao modelo de Oliver e Lewellen, et al (1978), a parametrização de Lacis e Hansen (1974) e Herman e Goody (1976), adota-se a parametrização de Yamamoto (1962) para a absortância de uma atmosfera sem nuvens. Assim, a absortância é definida por

$$A_r(m_z) = 2,9 \cdot m_z / [(1 + 141,5 \cdot M \cdot m_z)^{0,635} + 5,925 \cdot M \cdot m_z] \quad (2.6)$$

Onde m_z é o caminho óptico do vapor de água acima da camada z e pode ser escrito como

$$m_z = \int_z^{\infty} \rho_v dz = \int_z^{\infty} \rho_0 \cdot r_v dz$$

Onde ρ_v , ρ_0 são as densidades do vapor de água e do ar respectivamente e r_v é razão de mistura do vapor de água. O fator M (Rodgers, 1967) considera a inclinação do caminho óptico e a refração. M é definido por

$$M = 35 / (1224 \cdot \mu_0^2 + 1)^{1/2}$$

Onde $\mu_0 = \cos \phi$, ϕ é o ângulo zenital.

Existe uma limitação, entretanto, ao usar a Eq. (2.6). Quando a atmosfera contém uma camada de nuvem, é muito difícil calcular a real absortância para uma atmosfera mista com e sem nuvens.

2.2.2 Espalhamento Molecular da Atmosfera

A maioria do espalhamento molecular Rayleigh ocorre em níveis mais baixos da atmosfera. Quando integrado para toda a atmosfera, o espalhamento Rayleigh fornece o total de 7% da refletância dentro da troposfera que corresponde à média climatológica da refletância. Stephens parametriza a refletância para cada camada devido ao espalhamento Rayleigh como

$$Re_{clear}(P) = (0,219 \times 0,517) \cdot P / [(1 + 0,816 \cdot \mu_0) \times 3039 \times 10^3] \quad (2.7)$$

Onde P é a pressão.

2.2.3 Absorção do Ozônio

A parametrização da absorptância devido à absorção do ozônio em uma camada intermediária acima do topo do modelo segue Lacis e Hansen (1974), e é dada por

$$A_{oz}(X_l) = A_{oz}^{uv}(X_l) + A_{oz}^{vis}(X_l) \quad (2.8)$$

Onde A_{oz} representa a total absorptância. O comprimento do caminho óptico acima da l -ésima camada é denotado por X_l . Os sobrescritos uv e vis representam as faixas espectrais do ultravioleta e visível respectivamente.

A_{oz}^{uv} e A_{oz}^{vis} podem ser definidos por

$$A_{oz}^{uv}(X_l) = \frac{1,082 \cdot X_l}{(1 + 138,6 \cdot X_l)^{0,805}} + \frac{0,0658 \cdot X_l}{1 + (103,6 \cdot X_l)^3} \quad (2.9)$$

$$A_{oz}^{vis}(X_l) = \frac{0,02118 \cdot X_l}{1 + 0,042 \cdot X_l + 0,000323 \cdot X_l^2} \quad (2.10)$$

2.2.4 Parametrização da refletância, transmitância e absorptância numa atmosfera com nuvens.

Com o intuito de representar os efeitos dos principais absorvedores da radiação de ondas curtas (por exemplo, vapor d'água, ozônio e dióxido de carbono), Stephens (1978) parametrizou a refletância, transmitância e absorptância para uma camada considerando duas bandas com comprimento de onda λ é menor ou maior do que $0,75\mu m$. O vapor de água absorve na região próxima ao infravermelho onde $0,7\mu m \leq \lambda \leq 2,1\mu m$, o ozônio absorve na região do ultravioleta e do visível onde $\lambda \leq 0,35\mu m$ e $0,5\mu m \leq \lambda \leq 0,7\mu m$. O dióxido de carbono absorve numa região do espectro que sobrepõe à absorção do vapor de água onde $2,1\mu m \leq \lambda \leq 2,9\mu m$. Então, o comprimento de onda de $0,75\mu m$ é limiar apropriado. A absorção do ozônio é dominante para $\lambda < 0,75\mu m$ enquanto a absorção do vapor de água e o dióxido de carbono é dominante para $\lambda > 0,75\mu m$. Esta abordagem permite particionar a variação da refletância, transmitância e absorptância desde que 51,7% dos comprimentos de onda seja menor que $0,75\mu m$ e que 48,3% seja maior que $\lambda > 0,75\mu m$.

Segundo Stephens (1978), a parametrização de refletância, transmitância e absorptância para uma camada contendo nuvens são as seguintes:

(1) Na região do ultravioleta e do visível ($\lambda < 0,75\mu m$), a refletância (Re_1), a transmitância (Tr_1) e a absorptância (A_1) são parametrizadas como:

$$Re_1 = \frac{\beta_1(\mu_0) \cdot \tau_N / \mu_0}{1 + \beta_1(\mu_0) \cdot \tau_N / \mu_0} \quad (2.11)$$

$$Tr_1 = 1 - Re_1(\mu_0) \quad (2.12)$$

$$A_1(\mu_0) = 0 \quad (2.13)$$

(2) Na região do infravermelho próximo ($\lambda > 0,75\mu m$), a refletância (Re_2), a transmitância (Tr_2) e a absorptância (A_2) são calculadas como:

$$Re_2(\mu_0) = (u^2 - 1)[\exp(\tau_{eff}) - \exp(-\tau_{eff})] / R \quad (2.14)$$

$$Tr_2(\mu_0) = 4u / R \quad (2.15)$$

$$A_2(\mu_0) = 1 - Re_2(\mu_0) - Tr_2(\mu_0) \quad (2.16)$$

onde

$$u^2 = [1 - \omega_o + 2 \cdot \beta_2 \cdot \omega_o] / (1 - \omega_o) \quad (2.17)$$

$$\tau_{eff} = \{(1 - \omega_o) \cdot [1 - \omega_o + 2 \cdot \beta_2 \cdot \omega_o]\}^{\frac{1}{2}} \cdot \tau_N / \mu_0 \quad (2.18)$$

$$R = (u + 1)^2 \cdot \exp(\tau_{eff}) - (u - 1)^2 \cdot \exp(-\tau_{eff}) \quad (2.19)$$

τ_N é a espessura óptica da camada de nuvem para a qual:

$$\log_{10}(\tau_{N_1}) = 0,2633 + 1,7095 \cdot \log_e[\log_{10}(W)] \quad (2.20)$$

quando $\lambda < 0,75 \mu m$. Também temos

$$\log_{10}(\tau_{N_2}) = 0,3492 + 1,6518 \cdot \log_e[\log_{10}(W)] \quad (2.21)$$

quando $\lambda > 0,75 \mu m$, onde W é o caminho de água líquida ($g \cdot m^{-2}$) definido por

$$W = \int_0^{\Delta z} \rho_0 \cdot r_1 \cdot dz \quad (2.22)$$

onde Δz é a espessura da camada de nuvem. ω_0 é o albedo de espalhamento simples, β_1 e β_2 são as frações de retro-espalhamento da radiação incidente para o ângulo zenital ϕ .

Os coeficientes ω_0 , β_1 e β_2 são funções de τ_N e μ_0 . Stephens (1978) desenvolveu uma equação de regressão para ω_0 , β_1 e β_2 a partir de observações. Chen & Cotton (1983) adotaram um método de interpolação simples para calcular estes coeficientes.

2.5 Parametrizações de refletância, transmitância e absorvância numa atmosfera mista com céu claro e cobertura de nuvens.

Quando uma coluna de ar contém uma camada de nuvem, a parametrização de Yamamoto (1962) para a absorvância numa atmosfera sem nuvens [Eq.(2.6)] não funciona corretamente. Um novo esquema foi desenvolvido por Chen & Cotton, como segue:

A transmitância de uma atmosfera sem nuvens pode ser definida por um somatório de funções exponenciais (Stephens, 1977), como:

$$\begin{aligned} Tr(m) &= \sum_{n=1}^3 W_n \cdot \exp(-K_n \cdot m) \\ &= \sum_{n=1}^3 W_n \cdot Tr_n(m) \end{aligned} \quad (2.23)$$

Onde $Tr_n(m) = \exp(-K_n m)$, m é o comprimento óptico do vapor de água, K_n é o coeficiente de extinção equivalente e W_n é a função peso. Os coeficientes W_n e K_n são derivados a partir de ajustes experimentais usando a função de absorção de Yamamoto e são mostrados na Tabela 1.

Tabela 1 – Valores dos parâmetros da Eq. (2.23)

N	1	2
W_n	0,12096	0,80556
K_n	0,19649	0,00132

Seguindo este procedimento, o espectro solar completo pode ser imaginado sendo dividido em três bandas. Em cada banda, a transmitância (Tr) pode ser representada por uma função exponencial. A vantagem deste esquema é que a transmitância entre uma camada l e uma camada $(l+1)$ pode ser simplesmente representada por

$$Tr_{n/l} = \exp(-K_n(m_{l+1} - m_l)) \quad (2.24)$$

onde m_l ($g \cdot cm^{-2}$) é o caminho óptico total do vapor de água acima da l -ésima camada. A absorvância de Yamamoto [Eq. (2.6)] pode ser também representada por

$$A(m) = 1 - Tr(m) \quad (2.25)$$

Por que $Tr(m)$ foi particionado artificialmente em três bandas, a absorvância em cada banda pode ser escrita como

$$A_n(m) = 1 - Tr_n(m) \quad (2.26)$$

Então, a “real” absorptância entre a camada l e a $(l+1)$ dentro de cada banda pode ser escrita como

$$\begin{aligned} A_{n/l} &= A_n(m_{l+1}) - A_n(m_l) \\ &= (1 - \exp(-K_n \cdot m_{l+1})) - (1 - \exp(-K_n \cdot m_l)) \\ &= Tr_n(m_l) \cdot (1 - Tr_{n/l}) \end{aligned} \quad (2.27)$$

Onde $Tr_n(m_l)$ é a transmitância da atmosfera acima da l -ésima camada. Para uma atmosfera sem nuvens, $Tr_n(m_l)$ pode ser expresso como

$$Tr_n(m_l) = \exp(-K_n m_l) \quad (2.28)$$

Para uma atmosfera mista com céu claro e nuvens, esta expressão é um pouco diferente:

$$Tr_n(m_l) = \prod_{i=1}^{l-1} Tr_{n/i} \quad (2.29)$$

As Equações (2.28) e (2.29) são idênticas se não existirem nuvens na atmosfera. O caminho óptico total do vapor de água (m_l) pode ser também escrito como

$$m_l = \sum_{i=1}^{l-1} \rho_0 \cdot r_v \cdot (Z_{i+1} - Z_i) \quad (2.30)$$

A Eq. (2.29) pode simular a presença de uma camada de nuvens. Se a i -ésima camada for coberta por nuvens, a transmitância desta camada de nuvens pode ser calculada pela parametrização de Stephens (1978).

As equações que seguem representam o procedimento para se computar as variáveis radiativas (A_n , Tr_n , e Re_n) em uma atmosfera mista com e sem nuvens.

$$Tr_{n/l} = H(0,517 \cdot Tr_1 + 0,483 \cdot Tr_2) + (1-H) \cdot \exp(-K_n(m_{l+1} - m_l)) \quad (2.31)$$

$$A_{n/l} = 0,483 \cdot H \cdot A_2 + A_{oz-n/l} + (1-H) \cdot Tr_n(m_l) \cdot (1 - Tr_{n/l}) \quad (2.32)$$

$$Re_{n/l} = H \cdot (0,517 \cdot Re_1 + 0,483 \cdot Re_2) + (1-H) \cdot Re_{clear} \quad (2.33)$$

$$Tr_{n/l} = 1 - A_{n/l} - Re_{n/l} \quad (2.34)$$

$$Tr_n(m_{l+1}) = \prod_{i=1}^l Tr_{n/i} \quad (2.35)$$

Neste caso H é a fração de cobertura de nuvem, e a Eq. (2.31) representa a primeira estimativa da transmitância. As variáveis radiativas $A_{n/l}$, $Tr_{n/l}$, e $Re_{n/l}$ são as “reais” absorptâncias, transmitâncias e refletâncias entre as camadas l e $l+1$. $Tr_n(m_{l+1})$ representa a transmitância total entre as camadas l e $l+1$.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Como foi mostrado na Fig. 2, o resultado do modelo possui um erro sistemático, sempre superestimando os valores da radiação solar incidente. Para correção do modelo, foram feitas algumas regressões simples para tentar encontrar o melhor ajuste que se aproximasse dos resultados observados. A regressão mais simples primeiramente testada foi uma regressão linear cuja fórmula é:

$$Rad = (rshort - 129,33) / 0,7132 \quad (3.1)$$

Onde Rad é a radiação solar corrigida e $rshort$ é o nome da variável para a radiação solar de onda curta no modelo RAMS, ou seja, o resultado bruto do modelo. Após o uso dessa correção, a correlação entre estimativas do modelo e observações, numa base mensal, é de 0,7614, com erro quadrático médio de 21,33 W/m², que são valores razoáveis. O motivo pelo qual essa correção não ter sido utilizada na estimativa final da radiação é que ela subestima os valores mínimos, devido ao termo independente (-129,33) na Eq. (3.1). Por exemplo, a estimativa mensal para o mês de Junho de 2005 usando a Eq. (3.1) foi de somente 80 W/m², muito abaixo da média observada.

Outra relação simples testada foi uma lei de potência, dada por:

$$Rad = 0,7109 \cdot rshort^{1,0141} \tag{3.2}$$

Esta relação de potência, pelo fato de não possuir um termo independente como na relação linear, se mostra mais adequada, mas não se percebeu melhoria na correlação (0,7615) apesar da redução no erro quadrático médio para 16,39 W/m². Várias outras relações foram testadas, como por exemplo, relações logarítmicas e polinomiais de várias ordens, mas sem apresentar melhorias significativas nos resultados.

Verificou-se então que existe uma forte relação entre a fração de cobertura de nuvens calculada pelo modelo e a razão entre a radiação observada na superfície e no topo da atmosfera (TOA, sigla em inglês) (Guarnieri et al., 2007), como mostrado na Fig. 3. O modelo RAMS calcula a fração de cobertura de nuvem como sendo a porcentagem da área de cada caixa de grade usada na simulação que está coberta por nuvens. A radiação no topo da atmosfera (TOA, sigla em inglês) foi calculada através da fórmula:

$$TOA = S \cdot \left(\frac{AU}{r} \right)^2 \cdot \cos z \tag{3.3}$$

Onde S é a constante solar, AU é a unidade astronômica, r é a distância “instantânea” Terra-Sol e cos z é o cosseno do ângulo zenital.

A função empírica que relaciona estas variáveis é:

$$Rad = (-0,6859 \cdot Nuvem + 0,69) \cdot TOA \tag{3.4}$$

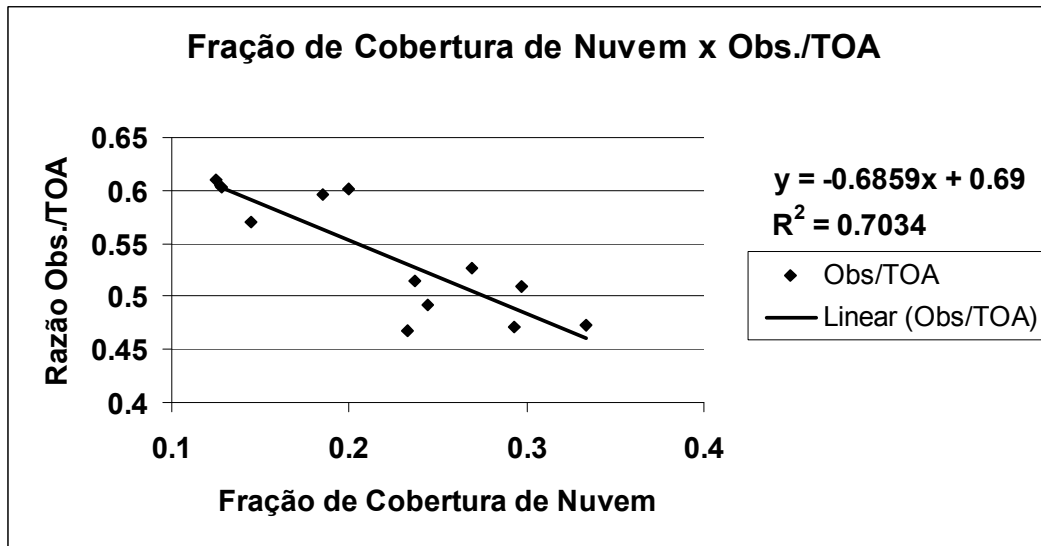


Figura 4 – Regressão linear entre a fração de cobertura de nuvem e a razão entre a radiação observada / radiação no topo da atmosfera.

Esta relação (que foi apelidada de “cloud”) apresenta melhorias significativas na correlação (0,9219) e também no erro quadrático médio (12,0 W/m²) sendo assim escolhida como o melhor ajuste para a radiação solar calculada pelo modelo. Um breve resumo das correções estatísticas testadas é mostrado na Tab. 2.

Tabela 2: Resumo das correções estatísticas testadas.

Ajuste	R	R ²	Erro Quadrático Médio (W/m ²)
Observado x Rshort (sem ajuste)	0,7614	0,5797	67,7
Observado x Correlação Linear	0,7614	0,5797	21,3
Observado x Correção por Lei de Potência	0,7615	0,5896	16,4
Observado x “Cloud”	0,9219	0,7034	12,0

Na Fig. 5 temos uma comparação entre os ajustes propostos e os dados observados, considerando-se a média sobre uma área contendo 14 PCDs com dados contínuos para o período simulado, calculada usando o método de Thiessen. Note que os dois ajustes, tanto o de potência quanto o ajuste “cloud”, aproximam-se bastante da curva observada. O intervalo de confiança para o ajuste “cloud” é de ±13,5 W/m².

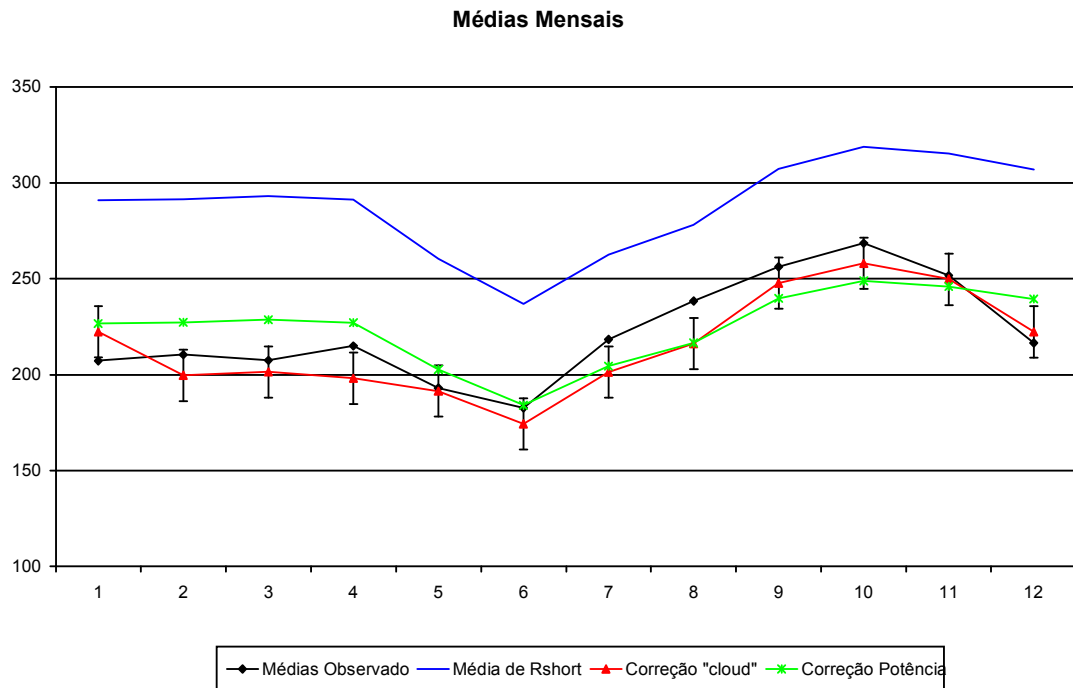


Figura 5 – Comparação entre as radiações observadas, modeladas sem ajustes e ajustadas.

Para verificarmos a confiabilidade do ajuste aqui proposto, na Fig. 6 é apresentada a distribuição de frequência dos erros absolutos entre os dados observados e o ajuste “cloud”.

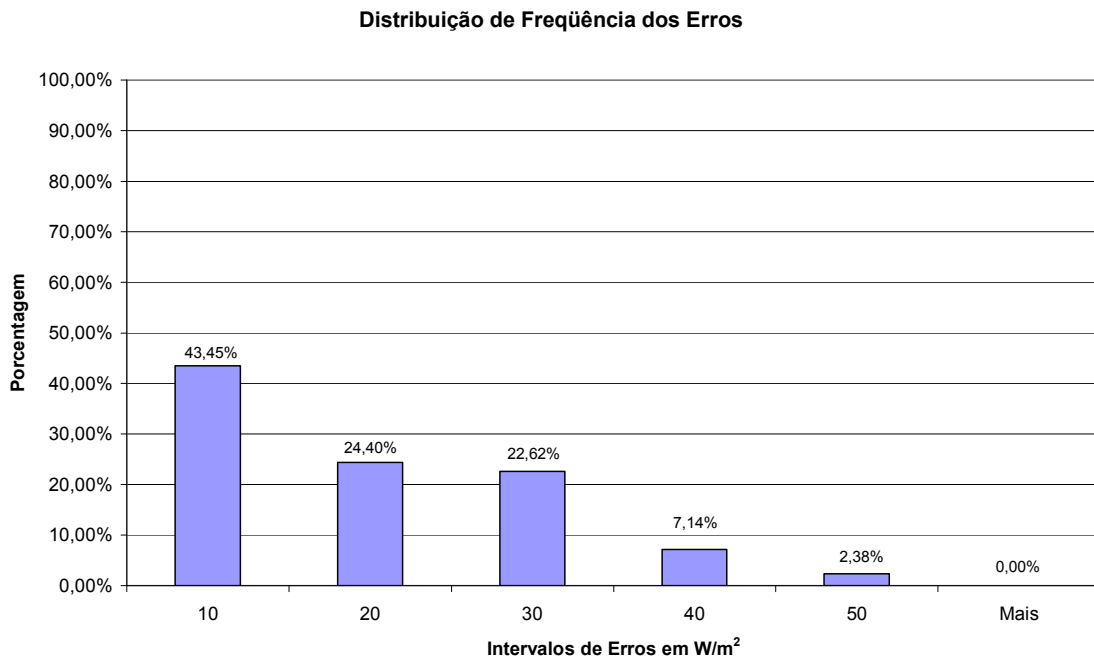


Figura 6 – Histograma de distribuição de frequência dos erros absolutos entre as séries modeladas e observadas.

Sendo o ajuste utilizando a fração de cobertura de nuvem o que apresentou melhores correlações e menor erro quadrático médio, a Fig. 7 apresenta a média anual para o ano de 2005 sobre o território de parte do Nordeste do Brasil. Os valores de radiação no estado do Ceará variam entre 200 e 250 W/m^2 , com média de 215,3 W/m^2 .

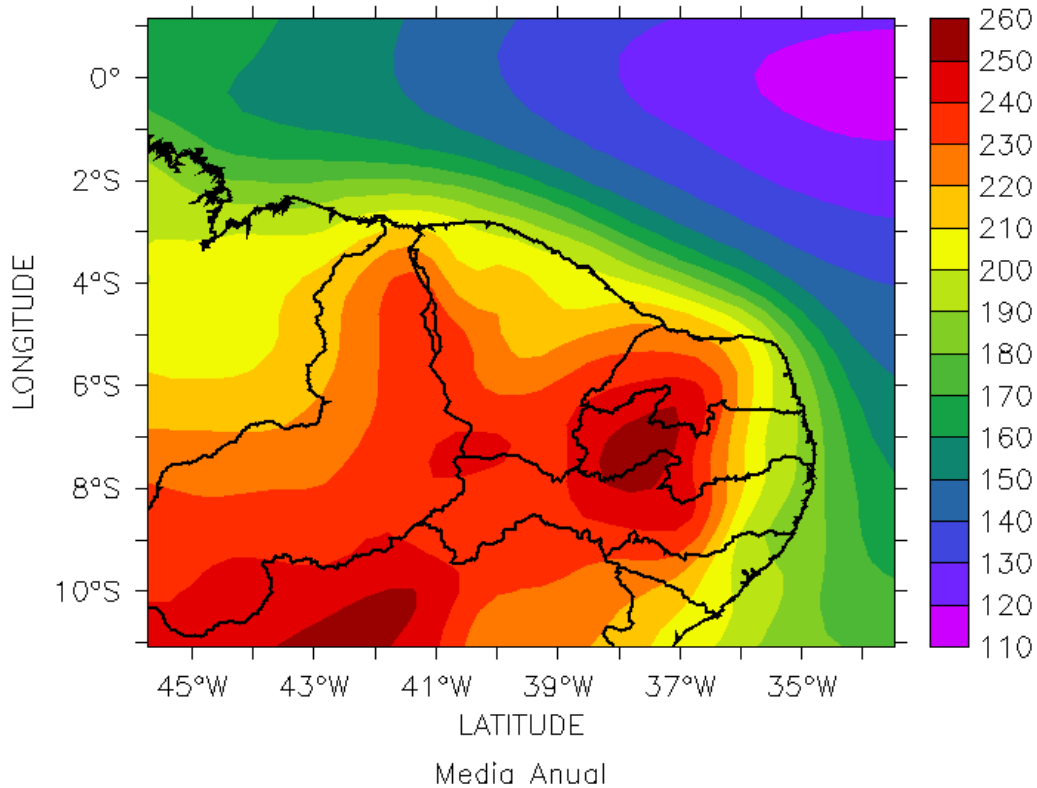


Figura 7 – Média anual corrigida através de regressão linear entre a fração de cobertura de nuvem e a razão entre a radiação observada sobre a radiação no topo da atmosfera.

4. CONCLUSÃO

Este trabalho busca apresentar uma metodologia para estimar a quantidade de radiação solar ao nível da superfície através do modelo atmosférico de mesoescala RAMS, que servirá para a confecção do Atlas Solarimétrico do Ceará. Nesta fase inicial, foram testadas, para o ano de 2005, as parametrizações de Chen-Cotton, 1983 e Harrington, 1997, usando, para validação dos resultados do modelo, os dados observados pelas Plataformas de Coleta de Dados (PCDs) da FUNCEME. Após validação, a parametrização de Chen-Cotton foi escolhida por seus resultados se aproximarem mais dos dados observados.

Verificou-se que o modelo apresenta erros sistemáticos, superestimando a radiação solar, e por este motivo, algumas correções foram testadas a fim de minimizar esses erros. Após estas correções, verificou-se uma boa correlação (0,92) entre a fração de cobertura de nuvens e a razão entre a radiação observada na superfície e a radiação estimada no topo da atmosfera.

Para o estado do Ceará temos que a radiação solar incidente tem maiores médias durante o segundo semestre com um pico no mês de Outubro (260 W/m^2), sendo o valor médio anual de 215 W/m^2 . Estes valores obtidos são próximos aos apresentados no Atlas Brasileiro de Energia Solar (Martins et al. 2006). Uma comparação com outras metodologias, como modelos de transferência radiativa utilizando imagens de satélites ainda está em fase de desenvolvimento.

Conclui-se que a metodologia apresentada é bastante viável para estimar a quantidade de radiação solar ao nível da superfície, podendo ser utilizada para diferentes resoluções espaciais, a critério do usuário e limitadas pelo custo computacional. A generalização dessa metodologia para uma série longa (~30 anos) comporá a base de dados necessária para a elaboração do Atlas Solarimétrico do Ceará.

Agradecimentos

Este trabalho recebeu suporte financeiro da Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico através de bolsa de pesquisa para o primeiro autor e do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), para infra-estrutura computacional da Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos – FUNCEME.

5. REFERÊNCIAS

- Chen, C. and Cotton, W. R. A one-dimensional simulation of the stratocumulus-capped mixed layer. *Boundary-layer Meteorology*, Boston, n. 25, p.289-321, 1983.
- Cotton, W. R. et al. RAMS 2001: Current status and future directions. *Meteor. Atmos Physics*, n. 82, p.5-29, 2003.
- Guarnieri, R. A. et al. Previsões de Radiação Solar Utilizando Modelo de Mesoescala: Refinamento com Redes Neurais. In: CBENS - CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR, 1., 2007, Fortaleza. Anais. Fortaleza: Abens - Associação Brasileira de Energia Solar, 2007. v. 1, CD-ROM.
- Hansen, J. E. and Travis, L. D., 1974. Light scattering in planetary atmospheres. *Space Sci. Rev.* 16, 527– 610.
- Harrington, J. The effects of radiative and microphysical processes on simulated warm and transition season arctic stratus. PhD. Colorado State University, 1997.
- Herman, G. and Goody, R.: 1976, Formation and Persistence of Summertime Arctic Stratus Clouds, *J. Atmos. Sci.* 33, 1537-1553.
- Lacis, A. A. and Hansen, J.: 1974, A Parameterization for the Absorption of Solar Radiation in Earth's Atmosphere, *J. Atmos. Sci.* 31, 118-133.
- Martins, F. R. and Abreu, S. L. de and Rütger, R. Atlas brasileiro de energia solar. São José Dos Campos: Inpe, 2006. 60 p.
- Oliver, D. A., Lewellen, W. S., and Williamson, G. G.: 1978, The Interaction Between Turbulent and Radiative Transport in the Development of Fog and Low-level Stratus, *J. Atmos. Sci.* 35. 301-316.
- Pielke, R.A. et al.: A Comprehensive Meteorological Modeling System - Rams. *Meteorol. Atmos. Phys.*, n. 49, p. 69-91, 1992.
- Stephens, G. L. and Webster, P. J.: 1979, Sensitivity of Radiative Forcing to Variable Cloud and Moisture, *J. Atmos. Sci.* 36, 1542-1556.
- Stephens, G. L. Radiation profiles in extended water clouds. II: parameterization schemes. *Journal of Atmospheric Science*, 35: 2123-2132, 1978.
- Stephens, G. L.: 1977, The Transfer of Radiation in Cloudy Atmosphere, Ph.D. Thesis, Meteorology Dept., University of Melbourne.
- Stephens, G. L.: 1978, Radiation Profiles in Extended Water Clouds, Part II, *J. Atmos. Sci.* 35,2123-2132.
- Walko, R. L. et al. New RAMS cloud microphysics parameterization: Part I: the single-moment scheme. *Atmospheric Research*, n. 38, p.29-62, 1995.
- Yamamoto, G.: 1962, Direct Absorption of Solar Radiation by Atmospheric Water Vapor, Carbon Dioxide and Molecular Oxygen, *J. Atmos. Sci.* 19, 182-188.

SOLAR ATLAS OF CEARÁ – METHODOLOGY AND PRELIMINARY RESULTS

Abstract. *The use of renewable energy sources, like solar, wind and biomass is rapidly increasing in recent years, with solar radiation as a particularly abundant energy source over Northeast Brazil. The proper quantitative knowledge of the incoming solar radiation is, thus of great importance for energy planning in Brazil, serving as basis for developing future projects of photovoltaic power plants and solar energy exploitation. In this direction, the Secretary of Infrastructure of the state of Ceará (SEINFRA-CE), partnership with State Foundation for Meteorology and Water Resources from Ceará (FUNCEME) had firmed an accord to developing the Solar Atlas of Ceará. This work, in development phase, presents a methodology for mapping the incoming solar radiation at ground level for Northeast Brazil, using a mesoscale atmospheric model (Regional Atmospheric Modeling System – RAMS), calibrated and validated using data from the network of automatic surface stations from the FUNCEME. The results showed that the model exhibits systematic errors, overestimating surface radiation, but that, after the proper statistical corrections, using a relationship between the model-predicted cloud fraction and the observed radiation observed at ground level and estimated at the top of the atmosphere, a correlation of 0.92 with a confidence interval of 13,5 W/m² is found for monthly data. Using this methodology, we found an estimate for annual average incoming solar radiation over Ceará of 215 W/m² (maximum in October with monthly average of 260 W/m²).*

Key words: Solar Energy, Radiative Transfer, Numeric Modeling.