

Avaliação da radiação solar com base em dados de nebulosidade

Solar radiation evaluation based on cloudiness data

Thomaz Menna Barreto Moojen¹
Rosane Barbosa Lopes Cavalcante²
Carlos André Bulhões Mendes³

RESUMO A radiação solar que atinge a superfície terrestre é essencial para uma ampla gama de atividades humanas. Contudo, observações desta importante variável meteorológica são escassas. Tendo isto em vista, este trabalho apresenta uma metodologia para estimar a radiação solar em uma dada área com base em dados de fácil obtenção. Foram analisadas ambas as componentes da radiação: direta e difusa. Para isto foram utilizados dados mensais de cobertura de nuvens de normal climatológica e o modelo digital de elevação do terreno (MDE). A transmissividade atmosférica e a proporção da parcela difusa foram estimadas a partir da adaptação de uma relação empírica envolvendo a nebulosidade. Com base no MDE, a radiação solar foi estimada levando em conta a declividade e orientação da superfície e a influência do relevo. Estas estimativas foram comparadas com medições diretas da radiação global ao longo do ano de 2009. Devido à utilização de dados mensais de nebulosidade, não foi obtida boa correlação para a radiação diária. Contudo, a radiação diária integrada em base mensal, mostrou melhores resultados, especialmente nos meses em que a precipitação foi semelhante à normal climatológica de precipitação. Ainda, analisando todo ano de 2009 a metodologia proposta apresentou bons resultados, superestimando a radiação global em 7,25%.

PALAVRAS-CHAVE: Radiação solar; SIG; nebulosidade; radiação direta; radiação difusa.

ABSTRACT *The solar radiation reaching the earth's surface is essential for a wide range of human activities. However, observations of this important meteorological variable are scarce. Having this said, this paper proposes a methodology to estimate the solar radiation upon a given area from easily obtained data. Both radiation components were analyzed: direct and diffuse. To do so, monthly climatic cloudiness data and the digital elevation model (DEM) were used. The atmospheric transmissivity and the diffuse ratio were estimated from an adaptation of an empirical relation involving cloudiness. Based on the DEM, the solar radiation was evaluated taking into account the slope and orientation of the surface and the influence of surrounding topography. These estimates were compared with direct global radiation measurements along the year of 2009. Due to the use of monthly cloudiness data, no good correlation was obtained for daily radiation. However, daily radiation integrated in a monthly base showed better results, especially in the months in which the observed rainfall was similar to the climatic precipitation expected. Furthermore, analyzing 2009 as a whole year, the proposed methodology showed good results, overestimating the global radiations in 7.25%.*

KEYWORDS: Solar radiation; GIS; cloudiness; direct radiation; diffuse radiation.

INTRODUÇÃO

¹ Engenheiro Ambiental. Mestrando em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental pelo Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) / Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).

² Engenheira Civil. Doutoranda em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental pelo IPH/UFRGS.

³ Pós-Doutor em Engenharia Ambiental. Professor associado do IPH/UFRGS

A radiação solar é um dos elementos meteorológicos mais importantes, pois é a fonte energética que impulsiona a circulação atmosférica e o único meio de troca de energia entre a Terra e o resto do universo (GEIGER, 1965). Nos ecossistemas, a radiação é uma das principais variáveis nos processos que envolvem energia, água e carbono (WANG; CHEN; CIHLAR, 2002). Em última análise, quase todas as atividades humanas dependem da insolação (FU; RICH, 1999).

Devido ao seu importante papel, o estudo desta fonte energética proporciona inúmeras aplicações práticas. A literatura mostra que os dados de radiação têm sido utilizados em diversas aplicações, tais 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; WANG; CHEN; CIHLAR, 2002); levantamento do potencial solar para instalação de usinas de energia solar (GUEYMARD; WILCOX, 2011); balanço energético e estimativas de evapotranspiração (ALLEN; TREZZA; TASUMI, 2006) entendimento do aquecimento de solo e massas de ar, formação de ventos e derretimento de neve (FU; RICH, 2002); projetos de construção, sensoriamento remoto e gestão territorial (HOFIERTA; SURI, 2002).

Apesar de sua vasta importância e aplicação, diversos autores têm relatado obstáculos na obtenção destes dados. Entre as principais dificuldades relatadas estão os altos custos envolvidos na instalação e manutenção das estações de monitoramento de radiação solar (FU; RICH, 2002; HUNT; KUCHAR; SWANTON, 1998); indisponibilidade de dados por longos períodos (GUERYMARD; WILCOX, 2011) problemas na calibração da instrumentação necessária, falhas nas séries históricas e valores registrados fora do intervalo esperado (HUNT; KUCHAR; SWANTON, 1998). Além disto, não há monitoramento em todos os locais do globo. Assim, para a maioria das áreas geográficas, dados precisos de insolação não estão disponíveis (FU; RICH, 2002).

Na ausência de observações diretas, algumas alternativas têm sido propostas para obter estimativas de radiação diária global. De acordo com Podesta et al. (2004), existem três grandes grupos de métodos com esta finalidade: derivados de dados de satélites, geração estocástica e associações empíricas. A metodologia proposta neste trabalho pertence ao último grupo, uma vez que esta baseada em uma relação empírica entre a nebulosidade e a radiação solar.

Nesse contexto, este trabalho tem por objetivo estimar a radiação solar sobre a superfície terrestre através de uma metodologia simplificada utilizando apenas o modelo digital de elevação do terreno (MDE) da região e a normal climatológica de nebulosidade de uma estação meteorológica próxima.

RADIAÇÃO SOLAR

A radiação que atinge o topo da atmosfera, ou radiação extraterrestre, pode ser calculada com base na latitude geográfica, na declinação solar, na altitude do sol e na constante solar (PODESTA et al., 2004).

A atmosfera terrestre desempenha papel fundamental na composição da radiação global através dos processos de reflexão, espalhamento e absorção (GEIGER, 1965). A transmissão e a atenuação da radiação direta na atmosfera são determinadas principalmente pela absorção por ozônio, vapor d'água e aerossol e pelo processo de espalhamento de Rayleigh (WANG; CHEN; CIHLAR, 2002).

Uma parte considerável da enorme quantidade de energia proveniente do sol é refletida pela superfície das nuvens e, portanto, não contribui para a insolação sobre a superfície. Na atmosfera, as moléculas de ar e as partículas em suspensão difundem a radiação, espalhando-a em todas as direções.

Nas aplicações práticas, a parcela da radiação mais importante é a que atinge de fato a superfície terrestre, também conhecida como radiação global (R_g). Esta radiação é composta essencialmente por duas parcelas, a radiação direta (R_{dir}) e a radiação difusa (R_{dif}), conforme a equação (1). A componente direta da radiação global corresponde aos fótons provenientes diretamente do feixe solar, e a componente difusa é constituída pelos fótons que sofreram espalhamentos múltiplos na atmosfera e foram redirecionados para a superfície terrestre (Echer et al., 2001).

$$R_g = R_{dir} + R_{dif} \quad (1)$$

Ainda, sabe-se que existe uma terceira componente da radiação global que é a radiação que é refletida pela superfície terrestre circunvizinha. Esta componente passa a ser significativa quando há relevo complexo com grande albedo, como é o caso de superfícies cobertas com neve ou gelo. No entanto, neste trabalho a componente refletida de regiões vizinhas é desprezada.

Influência da nebulosidade

Um parâmetro de grande relevância em termos de balanço radioativo são as nuvens, que são observadas cobrindo parte do planeta praticamente todo o tempo. A maior parte da reflexão da radiação solar pelas nuvens se faz diretamente ao espaço, sendo assim considerada como energia perdida sob o ponto de vista da superfície terrestre; porém, uma

parte se reflete na superfície inferior das camadas de nuvem mais elevada, sendo refletida de volta para a Terra (ECHER; SOUZA, 2001).

Análises teóricas da atenuação da radiação solar que passa através das nuvens requerem grande quantidade de informações referentes à espessura instantânea, à posição e ao número de camadas de nuvens, bem como a suas propriedades ópticas. Portanto, devido a grande dificuldade de obtenção de todos estes dados, técnicas empíricas têm sido utilizadas para estimar a atenuação resultante da cobertura de nuvens (HOFIERTA; SURI, 2002).

Kasten e Czeplak (1980) investigaram a correlação entre a radiação solar e a cobertura de nuvens. Os autores avaliaram dez anos de registros contínuos com intervalo horário na cidade de Hamburgo (Alemanha). Os autores elaboraram duas equações parametrizadas. Em ambas, as radiações são funções da nebulosidade, onde n representa a cobertura de nuvens em octantes da abóboda celestes.

A primeira, equação (2), relaciona a fração de cobertura de nuvens com a transmitância atmosférica, isto é, a relação entre a radiação global quando o céu possui uma nebulosidade de n octantes e quando o céu encontra-se limpo:

$$\frac{R_g(n)}{R_g(0)} = 1 - 0,75 \left(\frac{n}{8} \right)^{3,4} \quad (2)$$

A segunda, equação (3), relaciona a radiação difusa com a radiação global. Nesta equação, é considerada a mesma cobertura de nuvens. Observa-se que com o aumento da nebulosidade a radiação difusa passa a ter maior contribuição na radiação global.

$$\frac{R_{dif}(n)}{R_g(n)} = 0,3 + 0,7 \left(\frac{n}{8} \right)^2 \quad (3)$$

Influência espacial

Em escala global, os gradientes latitudinais de radiação são causados pela geometria da Terra, seus movimentos de rotação e de revolução ao redor do Sol. Contudo, em escalas regionais e locais, o relevo é o principal fator que altera a distribuição de radiação (HOFIERTA; SURI, 2002).

Os efeitos de sombreamento pelo relevo adjacente, a orientação e a declividade das vertentes determinam se a superfície recebe a radiação diretamente do Sol. É importante ressaltar que estas variações em função do relevo também variam ao longo do ano, uma vez que dependem essencialmente da posição solar e esta depende do movimento de translação da Terra ao redor do Sol.

Atualmente, existem diversos algoritmos que avaliam estes fatores na estimativa da radiação global. De maneira geral, eles têm apresentado resultados satisfatórios, além de serem economicamente muito atrativos (FU; RICH, 2002). Segundo Hofiarta e Sóri (2002), estas técnicas integradas a sistemas geográficos de informação permitem estimativas precisas da radiação de forma rápida e não onerosa em grandes áreas.

METODOLOGIA

A metodologia proposta neste trabalho visa à estimativa da radiação global ao nível do solo, uma vez que observações desta variável meteorológica ainda são escassas. O método proposto está baseado em uma simplificação do processo de atenuação e espalhamento da radiação solar pela atmosfera, através de relações empíricas cuja variável é a cobertura de nuvens. Ainda, as características topográficas (orientação e declividade), o relevo circunvizinho e seus efeitos de sombreamento são levados em conta na avaliação tanto da radiação direta como da difusa. Estas estimativas foram comparadas com medições diretas da radiação global ao longo do ano de 2009.

Estimativa da radiação solar

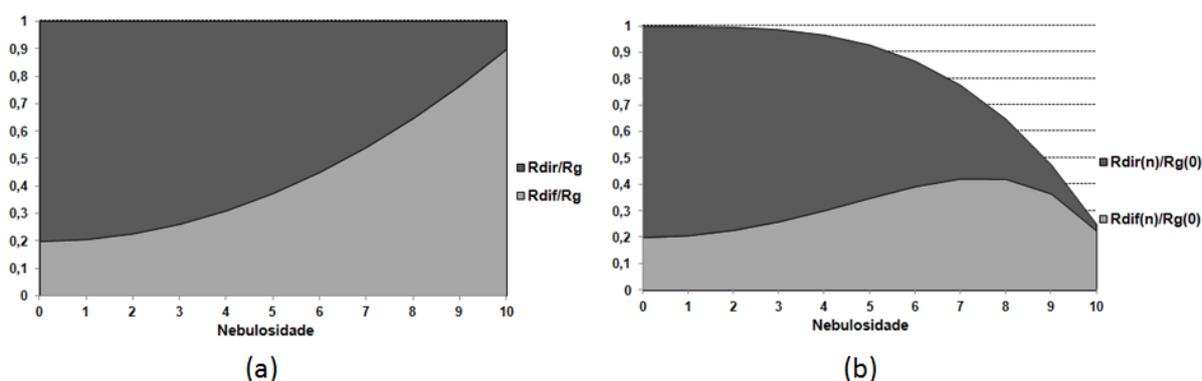
A influência da atmosfera terrestre na radiação solar, isto é, a transmissividade atmosférica e a proporção da parcela difusa foram estimadas a partir dos dados de nebulosidade. Neste trabalho foram utilizadas modificações das relações propostas por Kasten e Czeplak (1980). A primeira modificação diz respeito à nebulosidade. Os dados de nebulosidade utilizados neste trabalho representam a fração decimal de cobertura da abóboda celeste. Por isso, foi feita a alteração do denominador de n para 10 nas equações 2 e 3. Além disto, segundo Fu e Rich (1999), em condições de céu limpo, a proporção da radiação difusa em relação à radiação global atinge valores típicos de 20%. Tendo isso em vista, a equação **Erro! Fonte de referência não encontrada.** foi alterada de forma a respeitar este valor. As equações resultantes são as seguintes:

$$\frac{R_g(n)}{R_g(0)} = 1 - 0,75 \left(\frac{n}{10} \right)^{3,4} \quad (4)$$

$$\frac{R_{dif}(n)}{R_g(n)} = 0,2 + 0,7 \left(\frac{n}{10} \right)^2 \quad (5)$$

Assim, de posse da fração de cobertura da abóboda, foram estimadas as parcelas direta e difusa da radiação global. O gráfico da figura 1(a) apresenta a composição da radiação global para cada possibilidade de cobertura de nuvem. Observa-se que, para céu limpo, a parcela difusa representa 20% da radiação global enquanto a parcela direta é responsável pelos outros 80%. Porém, quando a cobertura de nuvens é máxima, a radiação difusa passa a ser a mais relevante, sendo responsável por 90% da radiação global.

Figura 1. Composição da radiação global (Rdir: radiação direta; Rdif: radiação difusa; Rg: radiação global) em função da nebulosidade; (a) sob mesma nebulosidade; (b) em relação à condição de céu claro.



Fonte: Os autores.

O gráfico apresentado na figura 1(b) também apresenta a composição da radiação global. Contudo, a referência utilizada é a radiação global para céu claro. Observa-se que com o aumento da nebulosidade, a radiação global apresenta declínio. É importante ressaltar que, embora a participação da radiação difusa aumente com a nebulosidade, o valor bruto desta parcela atinge seu valor máximo para cobertura de 70% e, a partir deste valor, começa a decrescer.

A radiação solar global foi calculada através do algoritmo desenvolvido por Fu e Rich (2002) que está implementado dentro do programa de sensoriamento remoto *ArcView* (versão 9.3) como ferramenta *Solar Radiation*, apresentado resumidamente a seguir. O *Solar Radiation* é um algoritmo capaz de estimar a radiação global sobre uma determinada superfície. Os dados de entrada necessários são bastante simples: modelo digital de

elevação do terreno (MNT) georreferenciado, transmissividade atmosférica, proporção difusa da radiação global e dia do ano a ser analisado.

Com base no modelo digital de elevação do terreno e demais dados de entrada, o programa retorna a radiação diária estimada para cada pixel, a partir das quais foi calculada a radiação média na área de estudo. A radiação global diária acumulada média da área de estudo foi estimada para 27 dias ao longo do ano espaçados entre si por no máximo 15 dias. Ainda, foram avaliados os dias extremos, isto é, o mais longo e o mais curto do ano. Por fim, a partir destes valores, foi ajustada uma função que atribui valores da radiação global para todos os dias ao longo do ano.

Solar Radiation

O algoritmo detalhado utilizado no Solar Radiation juntamente com o equacionamento do modelo de transmissão de radiação podem ser obtidos em Fu e Rich (1999) e no manual do programa *ArcView* (ARCGIS, 2013). A seguir são descritas brevemente as etapas do algoritmo.

Com base no modelo digital de elevação do terreno, é gerado, para cada pixel do MDE, um campo de visibilidade (Figura 2(a)), ou seja, são determinadas quais regiões da abóboda celeste estão obstruídas pelo relevo circunvizinho e, conseqüentemente, não contribuem com radiação direta e com radiação difusa.

A quantidade de radiação solar direta originária de cada direção do céu é representada através da criação de um mapa solar na mesma projeção hemisférica utilizada pelo campo de visibilidade. O mapa solar, figura 2(b), consiste em uma representação da trajetória solar, isto é, da posição aparente do sol e sua variação com o tempo. A posição do sol (ângulos zênite e azimute) é calculada a partir de uma fórmula padrão astronômica com base na latitude, dia do ano, e horário do dia.

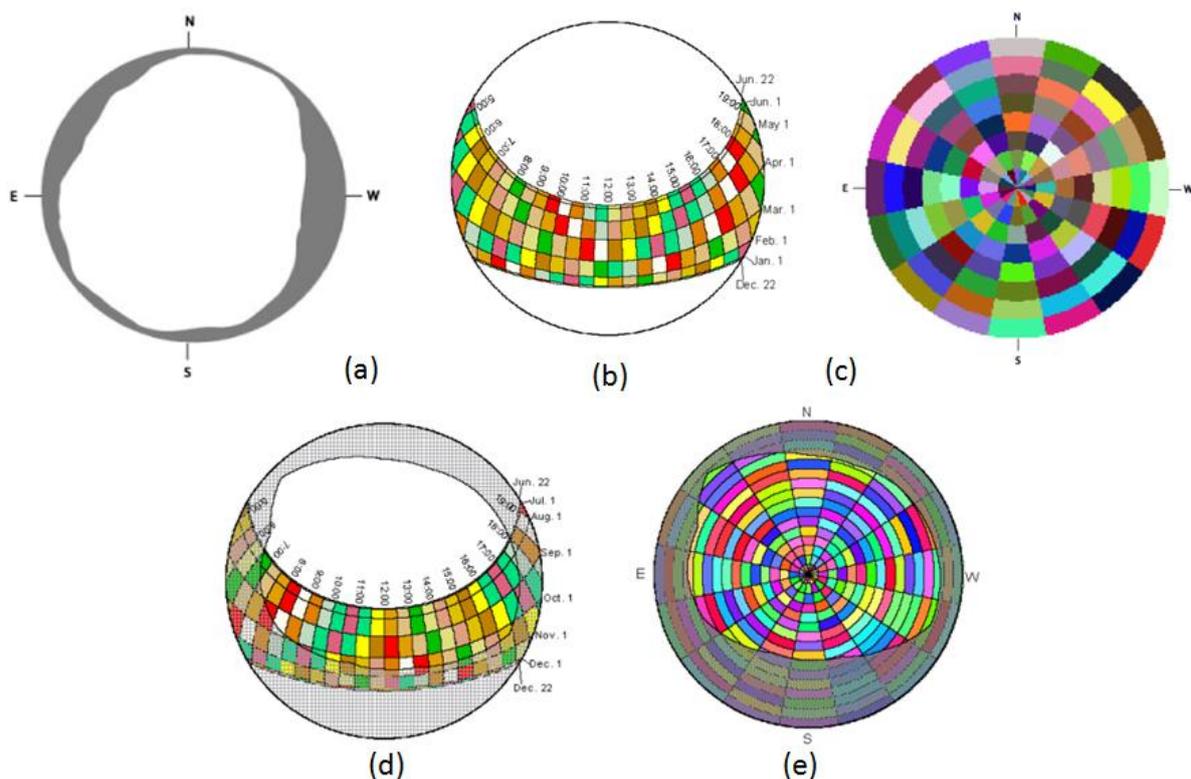
Diferentemente da radiação direta que só é originada em direções ao longo da trajetória solar, a radiação solar difusa pode ser originada em qualquer direção do céu. O mapa do céu, figura 2(c), é dividido em uma série de setores definidos pelos ângulos zênite e azimute, a partir dos quais é determinada a radiação difusa.

No cálculo da radiação direta, é feita a sobreposição do campo de visibilidade com o mapa solar. A figura 2(d) ilustra esta sobreposição. Nos setores do mapa que não estão totalmente obstruídos, a radiação direta é calculada levando em consideração a

posição do Sol, a atenuação atmosférica e a orientação da superfície. De forma análoga, no cálculo da radiação difusa o campo de visibilidade é sobreposto ao mapa do céu, ilustrado na figura 2(e). No modelo de difusão uniforme, é considerado que a radiação difusa tem a mesma intensidade em todas as direções do céu. O algoritmo calcula a radiação difusa no centróide de cada setor não totalmente obstruído. Assim, a radiação difusa total é a soma das parcelas de todos os setores.

Por fim, a radiação global é calculada através da soma das componentes direta e difusa. O resultado é a radiação global acumulada durante o período de um dia. Desta forma, obtém-se um mapa da região onde a cada célula do arquivo raster é atribuído o valor da radiação global acumulada para o dia do ano analisado.

Figura 2. (a) Campo de visibilidade; (b) mapa solar (hemisfério norte); (c) mapa do céu (8 divisões de zênite e 16 de azimute); (d) sobreposição do campo de visibilidade com mapa solar; (e) sobreposição do campo de visibilidade com mapa do céu; - Imagens adaptadas do *manual Arcgis Desktop 9.3* e Fu e Rich (1999).

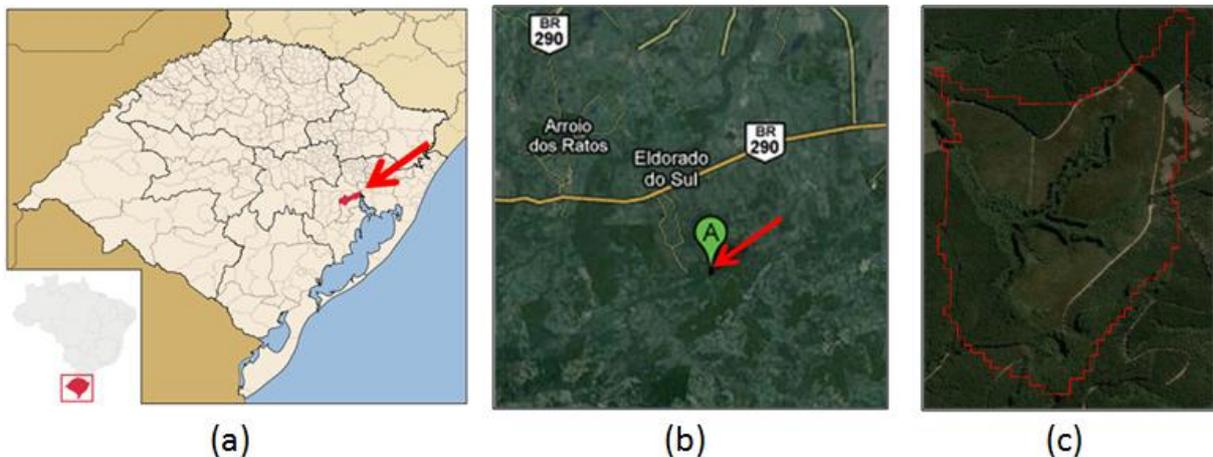


Fonte: Os autores.

Área de estudo

Devido à importância da radiação no ciclo hidrológico, foi escolhida como região de estudo uma microbacia experimental. A área de estudo deste trabalho foi a microbacia do Horto Florestal Terra Dura. Este território (figura 3) está localizado no município de Eldorado do Sul - RS e é delimitado pelas coordenadas UTM 22K 440.902 e 441.931E e 6.662.028 e 6.660.462 S (Datum SAD 69). Esta microbacia possui área de 115,9 ha, sendo 86,8 ha destes plantados com eucalipto para produção de celulose. O clima, segundo a classificação de Köppen, é o Cfa, subtropical ou virginiano (COSTA et al., 2009).

Figura 3. Localização da área de estudo (Microbacia do Horto Florestal Terra Dura) no município de Eldorado do Sul – RS.

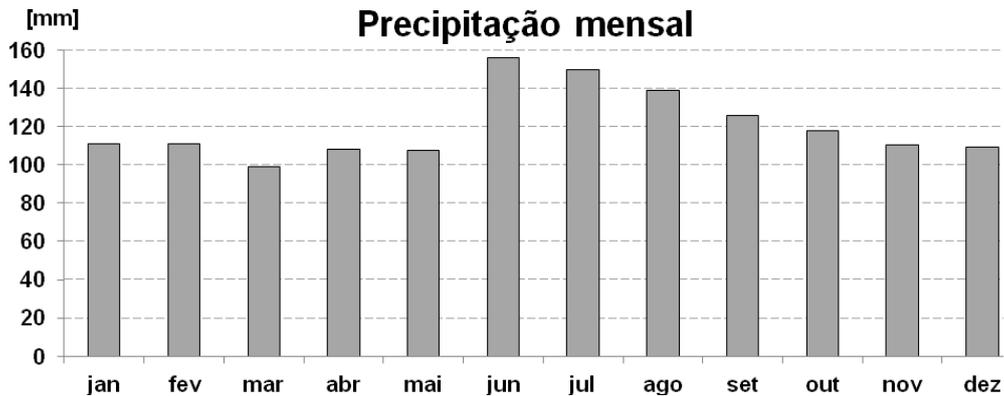


Fonte: Os autores.

A área de estudo possui uma estação meteorológica com registros de algumas variáveis meteorológicas, dentre elas: temperatura, precipitação, umidade relativa, velocidade do vento e radiação solar. Contudo, a instalação desta estação é recente, e a série histórica é curta. Assim sendo, foi analisada a radiação solar ao longo do ano de 2009.

A precipitação anual da região é de cerca de 1445 mm distribuídos de forma relativamente uniforme (figura 4), sendo junho, julho e agosto os meses historicamente com maior precipitação.

Figura 4. Regime pluviométrico de Eldorado - normal climatológica (1970-2000).

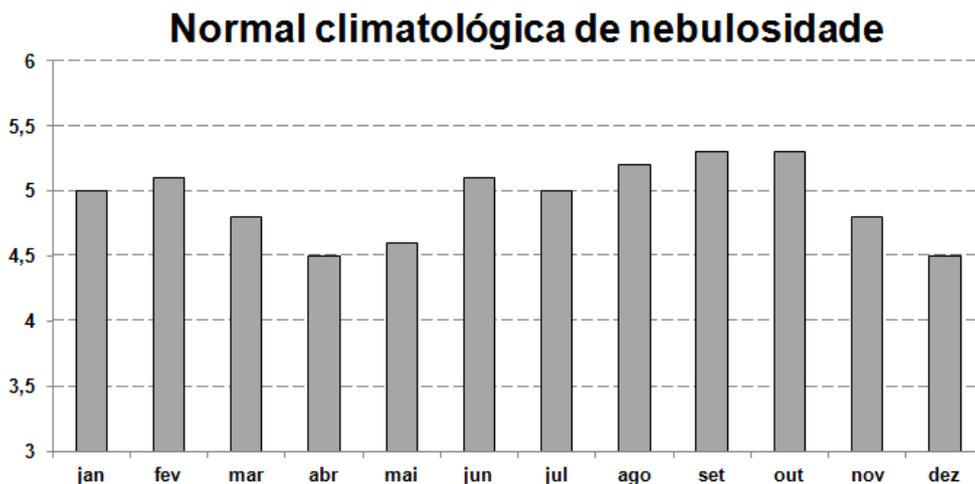


Fonte: Os autores.

Nebulosidade

Devido à inexistência de registros acerca de nebulosidade na área de estudo, foram utilizados os valores de nebulosidade da normal climatológica (1961 a 1990) da estação meteorológica de Encruzilhada do Sul por ser a estação mais próxima. Uma vez que os dados disponíveis da nebulosidade são mensais, foi atribuído o valor médio mensal para todos os dias do mesmo mês. O gráfico da figura 5 apresenta esta variação ao longo do ano.

Figura 5. Variação anual da nebulosidade – normal climatológica (1961–1990) de Encruzilhada do Sul.



Fonte: Os autores.

Devido à inexistência de registros acerca de nebulosidade na área de estudo, foram utilizados que os dados disponíveis da nebulosidade são mensais, foi atribuído o valor médio mensal para todos os dias

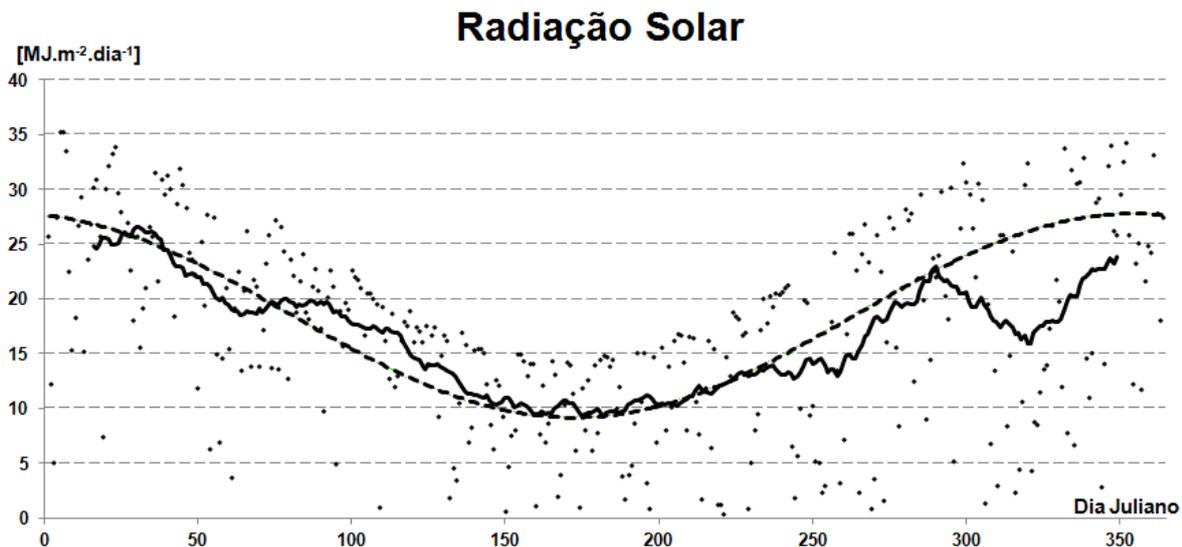
O MDE de entrada utilizado no Solar radiation foi o ASTER GDEM. Este modelo de elevação possui resolução espacial de 30 metros e foi obtido para a região de estudo gratuitamente do site da NASA (disponível em <https://wist.echo.nasa.gov/api>). As características atmosféricas de atenuação e espalhamento da radiação solar foram estimadas com base na nebulosidade média mensal histórica e as equações 2 e 3.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com base nestas estimativas da radiação diária acumulada, foi ajustada uma equação empírica (6) relacionando o dia Juliano (D_j) com a radiação diária acumulada (R_d) esperada em MJ por m^2 .

$$R_d = 18,469 + 9,135 \cdot \cos(0,017214 \cdot D_j) - 1,709 \cdot \text{sen}(0,017214 \cdot D_j) \quad (6)$$

Figura 6. Radiação solar diária; valores estimados (linha tracejada), valores observados (pontos) e média móvel de 30 dias dos valores observados (linha contínua).



Fonte: Os autores.

O ajuste gerado por esta equação é uma transição entre os dias de máxima e mínima radiação global e pode ser observado pela linha tracejada na figura 6. Este comportamento contínuo e suave de transição ocorre, visto que foi assumida uma

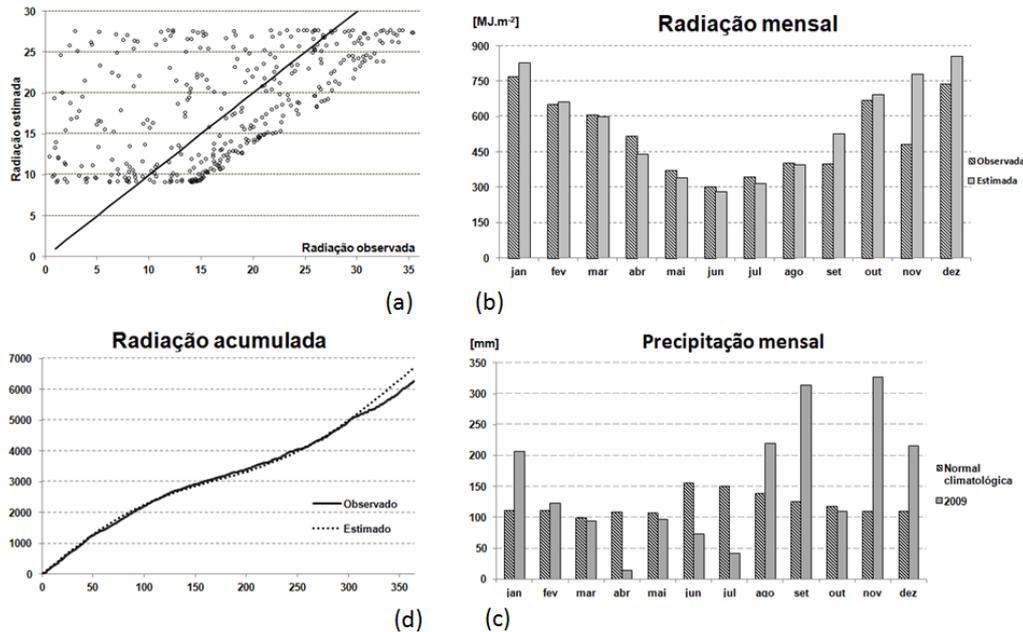
nebulosidade diária igual à média mensal. Assim, ao utilizar a normal climatológica de nebulosidade mensal ignora-se as oscilações de nebulosidade internas de cada mês. Contudo, os registros observados do ano de 2009 (dados pontuais na mesma ilustração), apresentam amplas oscilações. Este comportamento também pode ser observado na figura 7(a). Isto é esperado, uma vez que a nebulosidade pode apresentar grande variabilidade em um curto espaço de tempo. Ainda, a linha contínua na figura 6 representa a média móvel de 30 dias da radiação diária acumulada medida. Esta média, ao suprimir os extremos das oscilações diárias, apresenta comportamento próximo ao das estimativas, com excessão para os meses de novembro e dezembro..

Os resultados da radiação mensal acumulada, figura 7(b), apresentaram melhor correlação ($R^2 = 0,77$). Nos meses de janeiro, setembro, novembro e dezembro as estimativas de radiação superestimam os valores das medições. Levando em conta os resultados da precipitação, figura 7(c), observa-se que estes meses são os mesmos em que a precipitação observada é muito acima da esperada pela normal climatológica. O maior erro percentual (+60,9%) ocorre no mês de novembro. O aumento da cobertura de nuvens associado à precipitação elevada pode ter contribuído para redução da radiação. Por outro lado, nos meses de abril, maio, junho e julho as estimativas de radiação subestimam os valores das medições e estes são os meses em que a precipitação mensal foi inferior à normal climatológica.

Uma vez que a estimativa da radiação foi realizada com base na cobertura de nuvens da normal climatológica, as variações neste parâmetro no ano de análise não são incorporadas no cálculo e estas se tornam fonte de erro. Assim, o método proposto apresenta menores erros quando o regime de precipitação é semelhante ao regime da normal climatológica.

Em termos anuais, a radiação global acumulada observada foi de 6260 MJ.m^{-2} , enquanto a radiação estimada foi de 6714 MJ.m^{-2} , isto é, a metodologia proposta superestimou a radiação anual em 7,25%. A figura 7(d) ilustra a evolução da radiação acumulada ao longo do ano. Observa-se uma boa correlação nos primeiros 300 dias, sendo que no início do ano (até dia 116) os resultados acumulados são superestimados, passando a serem subestimados no meio do ano (até dia 269). Contudo, nos últimos dois meses a radiação observada é inferior a estimada, resultando em uma radiação anual acumulada superestimada.

Figura 7. Radiação. (a) relação entre radiação medida (abcissas) e radiação estimada (ordenadas); (b) radiação acumulada mensal; (c) precipitação mensal; (d) radiação acumulada ao longo do ano.



Fonte: Os autores.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este artigo apresentou uma metodologia com a finalidade de estimar a radiação solar sobre a superfície terrestre em uma determinada área. A modelagem considera uma simplificação dos processos de atenuação e espalhamento da radiação pela atmosfera em função da nebulosidade. Ainda, utilizando o modelo digital de elevação do terreno, as características topográficas (orientação e declividade) juntamente com o relevo circunvizinho e seus efeitos de sombreamento também são levadas em conta.

As vantagens desta proposição metodológica consistem na simplicidade, baixo custo e aplicação em áreas com baixa disponibilidade de dados meteorológicos, em contrapartida das observações diretas da radiação solar que além de escassas ainda são muito onerosas.

Em virtude das variações diárias das condições atmosféricas, os resultados tendo como base o ano de 2009 mostram que a utilização de médias mensais de nebulosidade acarreta em grandes erros na estimativa da radiação diária. Com a finalidade

de reduzir estas diferenças, os autores sugerem que sejam utilizados dados observados de nebulosidades diários no ano a ser analisado.

Em intervalos mensais, as estimativas foram mais próximas dos valores observados. Contudo, foram observados erros maiores quando a precipitação mensal observada foi superior à normal climatológica de precipitação mensal. Isto era esperado, uma vez que quanto mais distante da normal climatológica de precipitação um dado ano estiver, mais distantes também estarão as condições atmosféricas e, conseqüentemente, mais distante estará a radiação solar.

Tendo o ano de 2009 como referência, a radiação global acumulada observada foi superestimada em 7,25%. A utilização de observações de nebulosidade do mesmo ano, tanto em frequência diária quanto mensal, deve reduzir esta diferença e melhorar os resultados.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a CMPC Celulose Riograndense pela disponibilização dos dados de radiação e precipitação utilizados neste estudo.

REFERÊNCIAS

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.

ARCGIS desktop 9.3 help. Disponível em: <<http://webhelp.esri.com/arcgisDEsktop/9.3>>. Acesso em: 23 set. 2013.

COSTA, A. M.; CURI, N.; MENEZES, M. D; ARAÚJO, E. F; MARQUES, J. J. Levantamento detalhado de solos da microbacia hidrográfica do horto florestal Terra Dura (RS) e considerações sobre escalas de mapeamento. **Ciências e Agrotecnologia**, Lavras, v. 33, n. 5, p. 1272-1279, 2009.

ECHER, E.; SOUZA, M. P. A lei de Beer aplicada na atmosfera terrestre. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, São Paulo, v. 23, n. 3, p. 276-283, set. 2001.

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: <<http://proceedings.esri.com/library/userconf/proc99/proceed/papers/pap867/p867.htm>>. Acesso em: 23 set. 2013.

FU, P.; RICH, P. M. A geometric solar radiation model with applications in agriculture and forestry. **Computers and Electronics in Agriculture**, New York, v. 37, p. 25-35, 2002.

GEIGER, R. J. **The climate near the ground**. Cambridge: Harvard University Press, 1965.

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 ground-based 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.

HUNT, L. A.; KUCHAR, L.; SWANTON, C.J. Estimation of solar radiation for use in crop modelling. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 91, p. 293-300, 1998.

KASTEN, F.; CZEPLAK, G.; Solar and terrestrial radiation dependent on the amount and type of cloud. **Solar Energy**, Kidlington, v. 24, p. 177-189, 1980.

PODESTÁ, G. P.; NÚÑEZ, L.; VILLANUEVA, C. A.; SKANSI, M. A.; Estimating daily solar radiation in the Argentine Pampas. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 123, p. 41-53, 2004.

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.

WANG, S.; CHEN, W.; CIHLAR, J. New calculation methods of diurnal distribution of solar radiation and its interception by canopy over complex terrain. **Ecological Modelling**, Amsterdam, v. 155, p. 191-204, 2002.

Recebido em 08/11/2011

Aceito em 02/09/2013