

Modelagem do efeito do relevo sobre a radiação solar em diferentes condições de atmosfera, localização e períodos de estimativa

Ana Cláudia dos Santos Luciano¹
Márcio de Morisson Valeriano¹

¹Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Caixa Postal 515 - 12245-970 - São José dos Campos - SP, Brasil
Bolsistas do CNPq – ana_luciano@dsr.inpe.br; valerian@dsr.inpe.br

Abstract. A topographical solar radiation model was tested over a set of widely varying temporal, atmospheric and geographical parameters. Digital Elevation Model (DEM) of three study sites, located in the equatorial, tropical and subtropical regions of Brazil were taken from Topodata database, a refinement of the 3" Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), to feed *Solar Analyst* software package. Tests with atmospheric parameters included a comparison of *default* data with ground data derived from pyranometer measurements and the observation of results with data varying from clear sky to cloudy conditions. Nebulosity caused solar radiation to decrease and to reduce topographic effect into a more homogeneous distribution. The maxima/minima ratio of solar radiation results was notably decreased with increasing periods (months, semesters or year), due to a wider distribution of solar positions along the time span. Flat terrain presented narrow variation of annual solar radiation, whereas increasing slopes caused a slight increment on the observed maxima and a strong decrease in minima, thus increasing amplitude. Increasingly higher latitudes resulted in systematically lower annual solar radiation of average and flat terrain levels, and the amplitude was widened through a reduction for minima much larger than for maxima. In the equatorial area, flat terrain presented the highest levels of annual solar radiation, gradually decreasing (in absolute and relative to distribution) with latitude, until the subtropical area, where a significant portion of the mountainous areas presented higher levels than the former.

Key words: solar energy, topography, DEM, SRTM, energia solar, topografia, MDE, SRTM.

1. Introdução

A radiação solar incidente na superfície terrestre é uma variável microclimática com aplicações diversas, além da própria climatologia (balanço de energia, luz e regime térmico), como hidrologia (regime hídrico), ecologia, agricultura (produtividade, planejamento de sistemas de irrigação e construções rurais), engenharia e silvicultura. Há ainda aplicações potenciais relacionadas ao conforto térmico em criatórios ou em ambientes urbanos, assim como à disponibilidade de energia para instalação de usinas fotovoltaicas.

Quando observadas em escalas adequadas (topoclimáticas), as variações de sua distribuição mostram-se associadas ao relevo, conforme a geometria de iluminação, por sua vez determinada pela localização e do período (do dia e do ano) observado. A distribuição pelo relevo da radiação solar interceptada por área de terreno baseia-se na relação entre e densidade do fluxo e o cosseno do ângulo entre o feixe de iluminação e a normal à superfície. Os valores de radiação solar incidente são estimados a partir da radiação incidente no topo da atmosfera, que é dividida em fluxo direto e difuso pela atmosfera. A radiação em cada elemento da superfície inclui os fluxos incidentes devidos à radiação direta, ao total da porção difusa (com origem distribuída na abóbada celeste) e ao total refletido por terrenos vizinhos (Dubayah e Rich, 1995). Este cálculo foi implementado no algoritmo *Solar Analyst* como um recurso de Sistemas de Informação Geográfica - SIG (Fu e Rich, 1999). Aliado à disponibilidade de Modelos Digitais de Elevação (MDE), tal recurso torna possível uma ampla experimentação do cálculo da radiação solar incidente no terreno para o mapeamento de sua distribuição, com ampla flexibilidade de condições, como a escolha de localidades, períodos (momentâneos a anuais), condições atmosféricas, assim como resultados parciais de radiação incidente das porções direta e difusa e da duração do período de insolação.

A operação do *Solar Analyst* requer como dados atmosféricos a transmitância e a porção difusa da radiação solar. Os desenvolvedores do algoritmo (Fu e Rich, 1999) propõem que se usem os valores de 0,5 e 0,3 (adimensionais), respectivamente, para fins gerais, uma vez que estes parâmetros são obtidos com auxílio de piranômetros em estações meteorológicas, uma condição nem sempre fácil de se atender. Uma caracterização da situação momentânea destes dados (Alves et al., 2013) para a localidade de Cuiabá no período de agosto de 2006 a junho de 2008 mostra uma relação inversa entre os dois parâmetros: a porção difusa da radiação solar aumenta com a diminuição da transmitância atmosférica. Caso não sejam conhecidos, resta permitir a operação com parâmetros estabelecidos pelo fabricante, cujos resultados, se não garantem exatidão dos valores absolutos (em $W.h/m^2$), seriam consistentes com sua variação proporcional no relevo. De maneira indireta, pode-se calcular apenas a porção difusa pela razão entre dados da radiação difusa e global, obtidas a partir da leitura do Atlas de Energia Solar (Pereira et al., 2006), que as apresenta em períodos anuais e trimestrais. Na metodologia deste mapeamento, dados coletados em plataformas terrestres e orbitais de 1995 a 2005 foram integrados no cálculo das componentes da radiação solar para superfície.

A modelagem da distribuição de radiação solar com MDE mostra-se ainda pouco explorada, de modo que ainda não temos um conjunto de trabalhos que permita uma familiaridade com os resultados e suas possíveis variações. Dessa forma, a análise descritiva de resultados em função de parâmetros de operação e de características da área de estudo é oportuna para fornecer bases empíricas para avaliar sua aplicação como variável climática, assim como possíveis limitações do algoritmo e dos dados. Este trabalho tem como objetivo apresentar os níveis típicos e padrões gerais de variação da radiação solar calculada para diferentes períodos (diários, mensais, semestrais e anual) sob diferentes condições de latitude, relevo e atmosfera.

2. Material e métodos

Para o cálculo da radiação solar anual foi utilizada somente a altitude na forma do MDE do Topodata (BRASIL, 2008): as derivações necessárias ao cálculo do cosseno do ângulo de incidência são obtidos no funcionamento interno do algoritmo de cálculo da radiação solar. Dados de declividade e orientação de vertentes foram consultados para as análises conjuntas da relação da radiação solar anual calculada e o relevo. Foram selecionadas três áreas, nas latitudes equatorial, tropical e subtropical, representadas por quadrículas de aproximadamente 27x27 quilômetros, correspondentes a grades de 900x900 células (*pixels*) de dados (Figura 1).

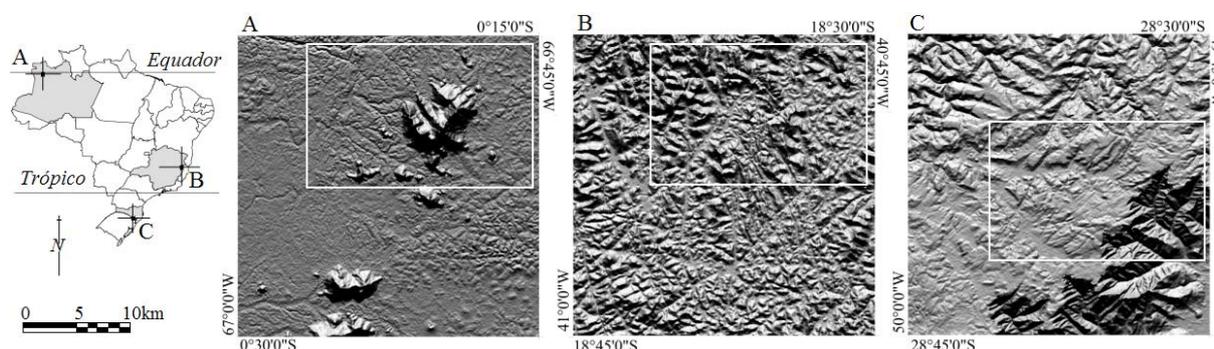


Figura 1. Localização e relevo sombreado (Sol de Norte, a 45° de elevação e MDE com exagero vertical de 3x) das áreas de estudo. Em retângulos brancos estão assinaladas as áreas apresentadas em detalhe nas Figuras 4, 5 e 6.

Estas áreas apresentam diversidade topográfica, em função da presença de classes de declividade de plana a montanhosa, em vertentes que dispostas em orientações variando de Norte a Sul (Figura 2). Na Tabela 1 estão apresentados os dados descritivos destas áreas.

Tabela 1. Dados descritivos das áreas de estudo

Área	Município de referência	¹ Bacia	² Relevo	² Altitudes (m)	² Declividades (%)	Clima
A	S.Gabriel Cachoeira, AM	Rio Negro	suave a forte ondulado	44 a 1044	0,4 a 13,5	³ Af
B	Mantena, MG	Rio Doce	forte ond. a montanhoso	128 a 932	3,7 a 45,0	⁴ Aw
C	Morro Grande, SC	Uruguai	ondulado a montanhoso	133 a 1386	3,0 a 45,0	⁵ Cfa/Cfb

(¹) Brasil (2000); (²) Topodata (Brasil, 2008); (³) Bastos (1982); (⁴) Antongiovanni e Coelho (2005); (⁵) Pandolfo et al.(2002).

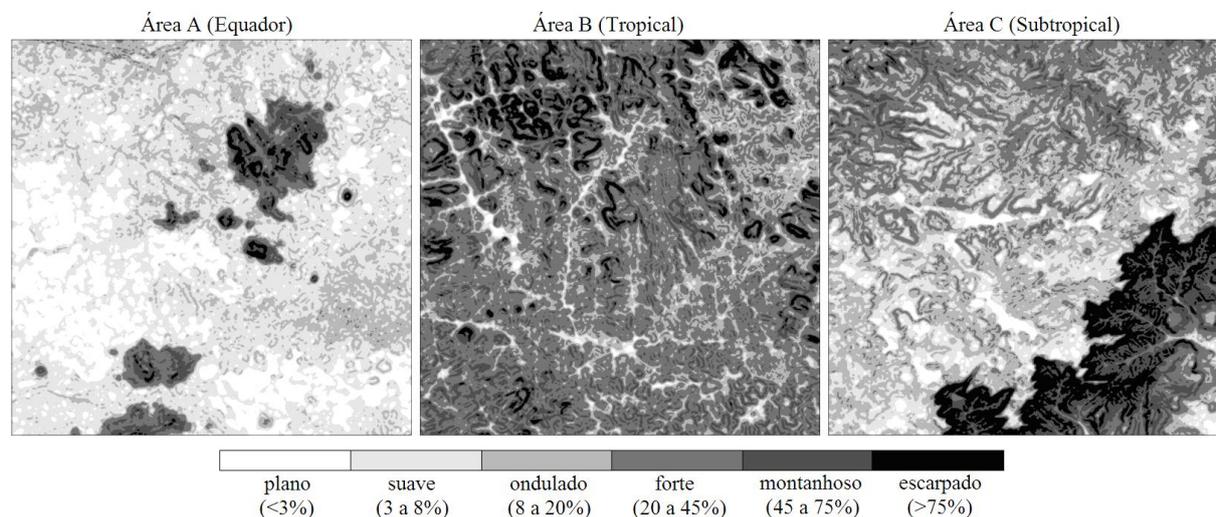


Figura 2. Classes de declividade das áreas de estudo.

Em relação aos dados atmosféricos, foram mantidos os valores fornecidos na condição *default* do programa, de nome *clear sky* (Fu e Rich, 2000), exceto nos testes especificamente relacionados às condições atmosféricas, em que foram testados parâmetros medidos em Cuiabá-MT sob diferentes condições de nebulosidade (Alves et al., 2013) (Tabela 2). De forma subsidiária, foram observados ainda dados do Atlas de Energia Solar (Pereira et al., 2006), para avaliação e considerações sobre as alternativas de parametrização da atmosfera.

Tabela 2. Dados de porção de radiação difusa e transmitância da atmosfera

Fonte	Condição	Porção difusa	Transmitância
Alves et al. (2013) (Cuiabá, MT)	Céu claro	0,200	0,680
	Parcialmente nublado	0,320	0,490
	Nublado	0,770	0,130
Fu e Rich (2000)	<i>Clear sky (default)</i>	0,300	0,500

O cálculo da radiação solar anual foi feito a partir do algoritmo *Solar Analyst* (Fu e Rich, 2000) implementado no programa ArcGIS 9.3. Neste mesmo software, foram feitas operações de pré-processamento e visualização dos dados. Para o geoprocessamento geral e execução de análises estatísticas de regressão entre imagens foi utilizado o programa *Idrisi Selva* 17.0. Outros softwares foram utilizados na conversão de formatos para auxiliar a migração de arquivos entre os programas usados.

3. Resultados e discussão

A comparação entre os dados atmosféricos indica que os valores *default* do programa *Solar Analyst* se aproximam do que se descreve como céu parcialmente nublado segundo Alves et al. (2013), apesar da expressão *clear sky* usada por Fu e Rich (2000). Os níveis de transmitância dos demais dados plotados na Figura 3, calculados com a equação de ajuste (2ª ordem), mostram que os dados sazonais também se distribuem mais próximos aos de céu

parcialmente nublado. Comparados os resultados médios de radiação solar anual da área C, os parâmetros para *clear sky* e parcialmente nublado (Tabela 2) diferiram em apenas 1%.

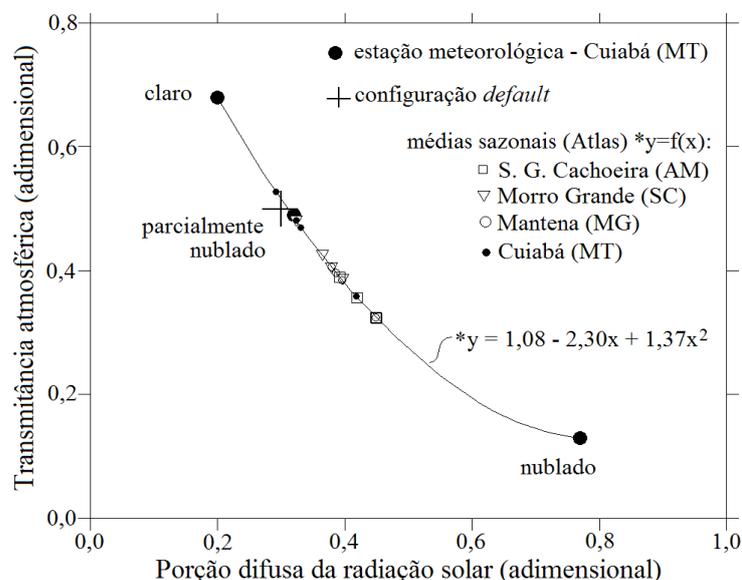


Figura 3. Diferentes combinações de dados atmosféricos para o cálculo da radiação solar (transmitância e porção difusa): estação meteorológica de Cuiabá (Alves et al., 2013); Atlas Brasileiro de Energia Solar (Pereira et al., 2006), com transmitância estimada; e parâmetros de configuração *default* do *Solar Analyst* (Fu e Rich, 2000).

Os dados da estação de Cuiabá referem-se a registros momentâneos (período de 30 minutos), em que é possível a observação de condições extremas da atmosfera. A partir de uma integração das condições que ocorrem em intervalos maiores, o valor médio tende a se aproximar daqueles observados num momento parcialmente nublado, conforme se observa nos dados sazonais de Cuiabá extraídos do Atlas de Energia Solar em relação aos da estação. Se, por um lado, tais observações indicam o grau de semelhança dos valores *default* em relação a condições observadas, também sugerem que a exatidão de estimativas da radiação por períodos menores (horas, dias ou semanas) dependem de dados atmosféricos que caracterizem os parâmetros de maneira mais fiel e detalhada.

A comparação dos resultados de radiação solar anual incidente na área C sob céu nublado e parcialmente nublado em relação à condição de céu claro mostrou correlação entre mapas, apesar das diferenças absolutas. Os dados da Tabela 3 resumem a comparação entre resultados sob diferentes condições atmosféricas.

Tabela 3. Comparações entre resultados médios de radiação solar anual para Área C sob diferentes condições atmosféricas

¹ Condição	Proporção relativa a céu claro (%)	% difusa incidente	r ² (%) (base céu claro)	² Desvio relativo (%)
Céu claro	100	16,5	100	0
Parcialmente nublado	74,5	25,8	98,3	1,7
Nublado	38,3	68,4	68,9	7,7

(¹) Dados de Alves et al. (2013). (²) em relação à média de radiação obtida com a respectiva parametrização da atmosfera.

Além da redução dos níveis gerais de radiação solar, observou-se que o aumento da nebulosidade causou redução do efeito do relevo, verificada através da diminuição da amplitude proporcional à declividade da classe observada. As áreas mais iluminadas apresentaram maior redução de radiação solar do que as áreas menos iluminadas. Tal diferença de efeitos reduziu a correlação com resultados de céu claro, cujo ajuste chega a um

desvio médio de 7,7% em relação à radiação média calculada para dias nublados. Considera-se que as diferenças sejam maiores e que haja menos correlação entre resultados sob atmosferas diferentes à medida que se observam períodos menores devido à geometria de iluminação mais restrita. Por fim, o total incidente em períodos com diferentes condições atmosféricas tende a se correlacionar com resultados sob céu claro devido à maior proporção de radiação solar desta condição no saldo dos totais. Em médias ponderadas entre resultados anuais, com peso de um quarto para a radiação solar calculada para céu claro há um ganho no coeficiente de determinação (a partir de $r^2=69\%$) para 90% e, com metade, para 97%.

Com parâmetros atmosféricos *default* (Tabela 2), os resultados diários para os solstícios e equinócios variaram de 120Wh/m^2 a 6830Wh/m^2 e os mensais de $3,7\text{kWh/m}^2$ a 206kWh/m^2 . Os mapas diários mostraram-se semelhantes aos totais dos meses correspondentes (Figura 4), exceto pela escala das respectivas legendas, numa expressão da alta correlação (r^2 de 0,982 a 0,999) entre a radiação solar de um dia e aquela de seu respectivo mês.

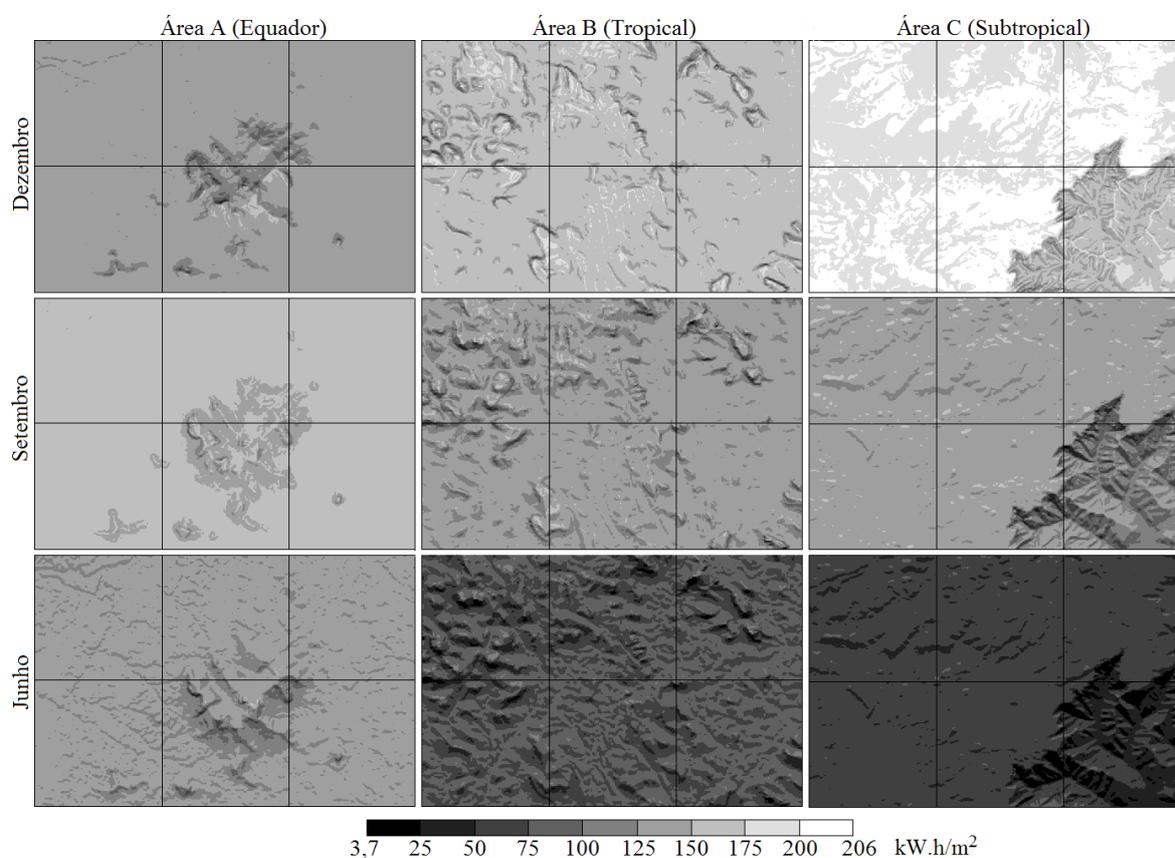


Figura 4. Totais mensais de radiação solar para junho, setembro e dezembro.

As maiores variações ocorreram na área subtropical, que apresenta os extremos de todos os resultados, em contraste com a área equatorial. Ao contrário do senso comum, a área subtropical foi também a que apresentou os maiores níveis de radiação, nos períodos da época do verão, embora tenha diferença de latitude em relação à declinação solar do período ($23^{\circ} 45' \text{ S}$) compatível com aquela da área tropical, aproximadamente 5° . Apesar da diferença latitude-declinação quase nula durante o mês do equinócio (setembro), a área equatorial apresentou níveis medianos neste período. Resta atribuir à duração do dia, que no verão aumenta conforme se observam latitudes maiores, cujo efeito sobre o total de radiação se mostra preponderante sobre a diferença entre a latitude e a declinação solar.

Os resultados semestrais (Figura 5) também indicaram maior variação na área subtropical (C). A área equatorial (A) responde por apenas uma fração da variação observada entre todos os resultados, com pequena alteração, sobretudo a inversão na distribuição entre vertentes

voltadas para Norte e para Sul no semestre primavera em relação ao semestre outonal. A escala de variação dos períodos semestrais atinge 1156 kWh/m^2 (ou $1,156 \text{ MWh/m}^2$).

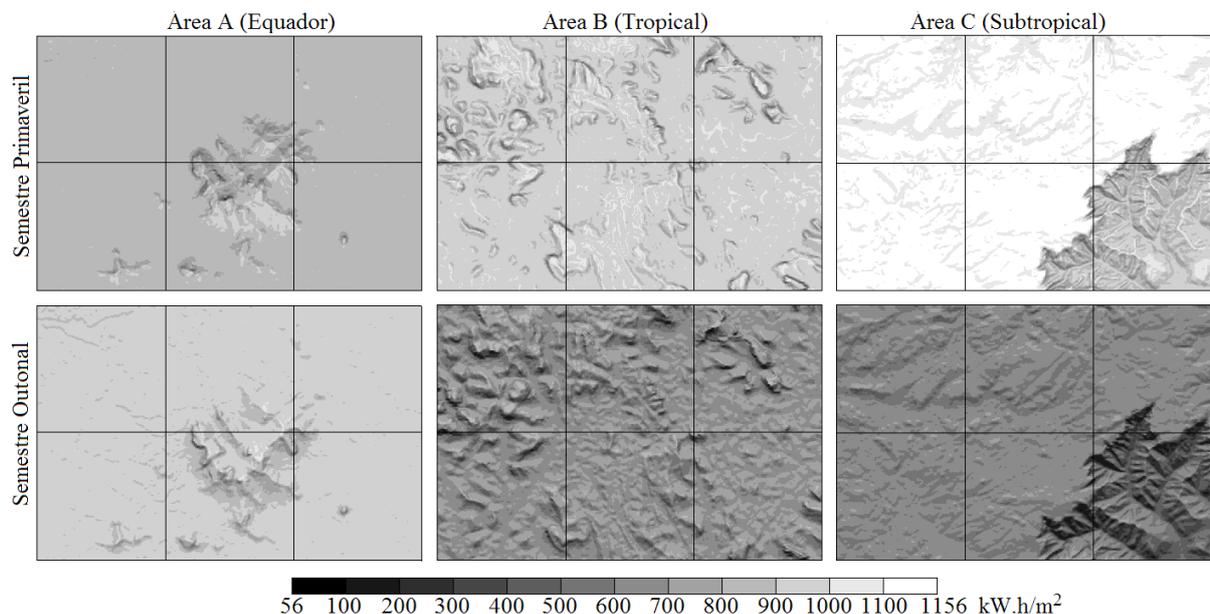


Figura 5. Totais semestrais de radiação solar para os períodos primavera e outonal.

A razão entre o nível máximo e mínimo de radiação solar se mostrou tanto menor quanto mais abrangente fosse o período considerado. No período anual (Figura 6), esta proporção foi de 5, aproximadamente, em contraste com 20 e 56, observadas para os períodos semestrais e mensais, respectivamente. Isto se explica pela distribuição das condições de iluminação pela dinâmica celeste que, em períodos mais curtos, corresponde a situações relativamente particularizadas. A comparação entre os resultados semestrais e anuais (Figuras 5 e 6) para a área A (equatorial) ilustra bem este efeito, pelo qual as orientações de vertentes N e S são contrastantes somente no primeiro caso. No cômputo anual, as condições semestrais se compensam, reduzindo as variações ao efeito mais isolado da declividade (compare Figuras 2 e 6, Área A). A distribuição das condições de iluminação também ocorre nas outras áreas, porém sem a simetria característica da região equatorial e, portanto, menos evidente.

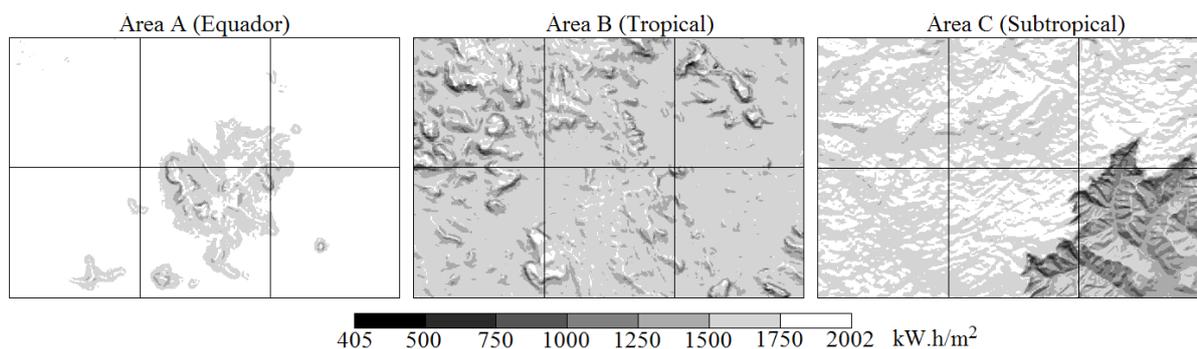


Figura 6. Totais anuais de radiação solar.

As distribuições da radiação solar anual calculada nas diferentes áreas mostram a redução dos níveis gerais com o aumento da latitude, mais claramente expressa nos resultados observados em áreas planas (Figura 7), concomitante a um aumento do efeito do relevo, indicado pela amplitude observada nas áreas montanhosas. Na região equatorial (A), as áreas planas apresentam níveis entre os mais altos da distribuição de radiação solar anual, em contraste com a região subtropical (C), em que parte expressiva das áreas montanhosas

apresentou níveis mais altos do que as planas. Na área tropical (B), o relevo montanhoso apresentou uma distribuição da radiação solar anual ligeiramente bimodal.

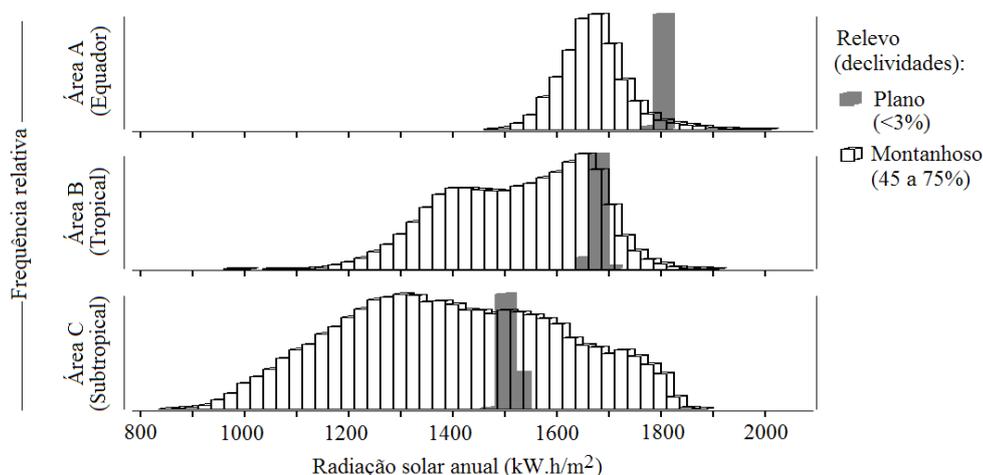


Figura 7. Distribuição dos níveis calculados de radiação solar anual em relevo plano e montanhoso nas diferentes latitudes.

Conforme se considerem relevos de declividades crescentes, os níveis máximos de radiação solar anual mostraram um aumento discreto em comparação com a forte diminuição dos níveis mínimos (Figura 8) em todas as áreas. A redução da radiação solar anual possibilitada pelo relevo se mostrou maior em declividades tanto menores quanto maior a latitude observada. A amplitude observada na região subtropical (C) em relevo plano foi atingida somente a partir de relevo ondulado na área equatorial. De acordo com as demais observações deste trabalho, a radiação solar calculada em períodos menores deve oferecer variações importantes desde terrenos menos íngremes.

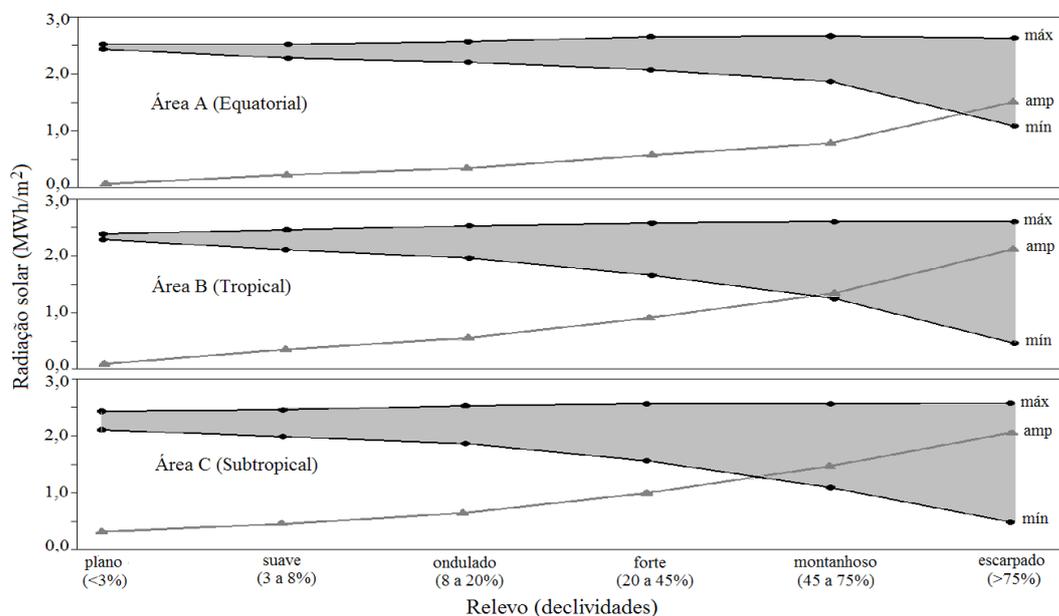


Figura 8. Níveis máximos e mínimos de radiação solar anual e amplitude em função do relevo, calculados nas diferentes latitudes.

As avaliações feitas neste trabalho podem se desdobrar em numerosas combinações entre os domínios envolvidos - temporal, geográfico, atmosférico e topográfico. Cada situação de análise permite avaliar o potencial de variação da radiação solar em determinado período de interesse (anual ou sazonal), em combinação com diferentes classes de terreno, de acordo com

suas respectivas aplicações. Por exemplo, a radiação solar em áreas de declividade adequada à exploração por culturas temporárias pode ser avaliada levando-se em conta o período das culturas de interesse, em que se esperam diferenças mais amplas do que observadas no total anual, sobretudo para as culturas de inverno. Outras questões, naturalmente, devem ter suas respectivas condições para uma particularização apropriada do cálculo da radiação solar.

Conclusões

A estimativa de radiação solar foi experimentada em função de quatro fatores: período, latitude, atmosfera e relevo. O aumento da nebulosidade causa a redução geral dos níveis de radiação solar, e do próprio efeito do relevo, com diminuição mais acentuada nas áreas mais iluminadas. Os parâmetros atmosféricos momentâneos são passíveis de grandes variações, mas quando integrados em períodos sazonais ou anuais tendem a valores mais estáveis e próximos à parametrização associada a céu parcialmente nublado. Com o aumento do período observado (mensal, semestral e anual), há uma redução na razão entre máximos e mínimos de radiação solar observados devida à maior distribuição das condições da geometria de iluminação. Localmente, terrenos planos apresentam a menor variação de radiação solar anual; quanto maior a declividade observada, verificam-se um aumento moderado nos níveis máximos e uma forte redução nos mínimos. Com o aumento da latitude, há uma redução sistemática nos níveis de radiação solar anual médios e de áreas planas, ao passo que há um aumento na amplitude em áreas montanhosas dado sobretudo pela forte redução dos níveis mínimos. Nas áreas equatoriais, os maiores níveis de radiação solar anual ocorrem em terrenos planos, em contraste com áreas subtropicais, onde uma fração expressiva das áreas montanhosas mostrou radiação solar anual maior do que as áreas planas.

Agradecimentos

Este trabalho é parte da dissertação de mestrado da autora principal. Integra o projeto CNPq coordenado pelo co-autor “Desenvolvimento de aplicações de dados topográficos SRTM”, n.o. 307530/2008-6 (NV). Os autores agradecem as respectivas bolsas do CNPq.

Referências

- Alves, M. C.; Sanches, L.; Nogueira, J. S.; Silva, V. A. M. Effects of sky conditions measured by the clearness index on the estimation of solar radiation using a digital elevation model. **Atmospheric and Climate Sciences**, v. 3, p.618-626, 2013.
- Antongiovanni, L. L.; Coelho, A. L. N. **Panorama sobre a desertificação no estado de Espírito Santo**. 2005.
- Bastos, T. X. **O clima da Amazônia Brasileira Segundo Köppen**. EMBRAPA-CPATU, n. 87. 4p. 1982.
- Brasil. **Atlas de Saneamento**. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Rio de Janeiro, 2000. Disponível em : <http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/atlas_saneamento/default_saneamento.shtm>.
- Brasil. **Topodata: banco de dados geomorfométricos do Brasil**. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). São José dos Campos, 2008. <<http://www.dsr.inpe.br/topodata/>>.
- Dubayah, R.; Rich, P. M. Topographic solar radiation models for GIS. **International journal geographical information systems**, v.9, n.4, p. 405-419, 1995.
- Fu, P.; Rich, P. M. Design and implementation of the Solar Analyst: an ArcView extension for modeling solar radiation at landscape scales. **Proceedings** of the 19th Annual ESRI User Conference, San Diego, USA. 1999.
- Fu, P.; Rich, P. M. **The Solar Analyst user manual**. Helios Environmental. Modeling Institute (HEMI), LLC, Vermont, 2000.
- Pandolfo, C.; Braga, H. J.; Silva Jr, V. P.; Massignam, A. M., Pereira, E. S.; Thomé, V. M. R.; Valci, F.V. **Atlas climatológico digital do Estado de Santa Catarina**. Florianópolis: Epagri, 2002. CD-Rom
- Pereira, E. B.; Martins, F. R.; Abreu, S. L.; Rütther, R. **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. 1. ed. São José dos Campos: INPE, 2006. v. 1. 60p.