

## **Cálculo do fator topográfico de iluminação solar para modelagem ecofisiológica a partir do processamento de Modelos Digitais de Elevação (MDE)**

Márcio de Morisson Valeriano<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE  
Caixa Postal 515 - 12245-970 - São José dos Campos - SP, Brasil  
Bolsista do CNPq - valerian@dsr.inpe.br

**Abstract.** This work presents the calculus for the distribution of daily solar radiation based on a digital elevation model (DEM). Since solar radiation distribution by topographic effect is controlled by slope and aspect, these layers were taken from TOPODATA project, where SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) data were refined (from 3" to 1" resolution) and derived into basic geomorphometric variables. Other input data were latitude, daytime and yearly date, applied in the determination of the occurring illumination angles based on solar dynamics. As an attempt to perform the calculus in a dataset encompassing widely varying latitude, latitude may be entered as a layer, instead of a scalar value. The first step was the calculus of solar angles of selected hours of a typical day of each month. These instantaneous radiation rates were integrated through the typical solar dynamics of those days, to represent each month, and the monthly results were integrated throughout the year as well. Yearly radiation distribution may be applied in eco-physiological modeling of natural vegetation and other long-term applications, such as evaporation process modeling or other environmental factor affect by solar radiation. Monthly based radiation may be helpful for integrating within selected periods of the year to model crop development throughout its growing cycle, or seasonal processes of perennial vegetation.

**Palavras-chave:** digital elevation model, solar radiation, database, modelo digital de elevação, radiação solar.

### **1. Introdução**

Não é raro encontrar, entre trabalhos de geoprocessamento, o uso das variáveis declividade e orientação de vertentes como insumos isolados para a compartimentação do terreno em unidades homogêneas. Enquanto o uso direto e isolado da declividade se justifica por fundamentos conceituais, o mesmo não ocorre com a orientação, exceto quando há conhecimento prévio de sua relação com determinadas condições do terreno. Apesar disso, percebe-se que em muitos casos seu uso decorre, além da facilidade de obtenção com recursos básicos de SIG, de uma tentativa simplificada de incorporar variações no regime de radiação solar como condicionante à diferenciação de compartimentos. Nesses casos, são definidas classes de orientação relativas a uma condição média de iluminação (ou do sombreamento, reciprocamente) por simples fatiamento, de forma que, em classes, temos vertentes a Sul como sombreadas e a Norte como iluminadas, no hemisfério Sul (e vice-versa no hemisfério Norte), com aquelas a Leste e a Oeste em situação intermediária. Quando relacionada ao brilho de imagens de satélites, o Norte é substituído pelo azimute solar no momento da aquisição, para imagens óticas, ou da posição da antena transmissora, no caso de RADAR.

Embora muitas simplificações, justificadas por questões operacionais, possam representar desvios aceitáveis em relação à realidade, a iluminação requer um nível mínimo de cuidados sem o quais não se atinge um desempenho funcional razoável. Esta questão é mais complexa, e resolvida mais adequadamente somente sob uma abordagem que considere os vetores da iluminação e da normal à superfície no espaço tridimensional. Se mantivermos a geometria de iluminação (elevação e azimute solar) constante, resta a geometria da superfície, definida em função dos ângulos de declividade e orientação de vertentes, que varia de um local a outro (Figura 1). Assim, na definição de Wilson e Gallant (2000), a iluminação pode ser considerada uma variável geomorfométrica secundária, uma vez que advém da combinação de dois ou mais atributos topográficos primários.

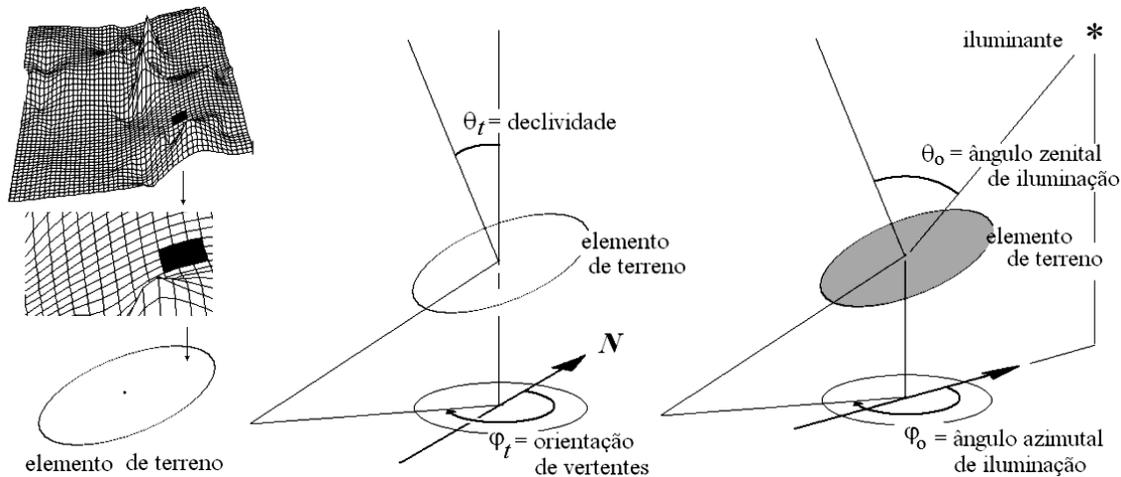


Figura 1 – Geometria de iluminação/sombreamento de um elemento de terreno.

A distribuição da iluminação dada pelo relevo se relaciona ao que se estuda na física do sensoriamento remoto como fator cosseno ( $\cos\theta_o$ ), ou efeito cosseno (Slater, 1980), uma vez que afeta brilho das imagens de satélites, ou na climatologia física, aplicado na estimativa na radiação solar direta (Sellers, 1965), definido pela Equação 1, da trigonometria esférica:

$$\cos\theta_o = \cos\theta_s \cos\theta_t + \sin\theta_s \sin\theta_t \cos(\varphi_s - \varphi_t) \quad (1)$$

em que  $\cos\theta_o$  é o fator cosseno,  $\theta_s$  é o ângulo zenital solar,  $\theta_t$  é o ângulo zenital da normal à superfície do terreno (que corresponde à declividade),  $\varphi_s$  é o ângulo azimutal solar e  $\varphi_t$  é o ângulo azimutal da normal à superfície (que corresponde à orientação de vertente). O ângulo azimutal de iluminação ( $\varphi_o$ , Figura 1) é a diferença entre  $\varphi_s$  e  $\varphi_t$ .

Consideradas as condições atmosféricas, é evidente que tanto o brilho de imagens como a radiação solar são subestimadas pela Equação 1, que não considera a fração difusa da radiação incidente. Para tratamento de dados de RADAR, por outro lado, ou do brilho de imagens de planetas desprovidos de atmosfera, esta solução é bem mais próxima da realidade. Para o cálculo da radiação difusa, o conceito de abertura (*openess*), um descritor geomorfológico (Yokoyama et al., 2002), pode ser empregado para o cálculo do ângulo sólido de exposição local à abóbada celeste, porém resta caracterizar a densidade óptica da atmosfera, variável no espaço e no tempo. Em todos os casos, restam ainda as componentes adicionais, de sombras projetadas pelas feições positivas do relevo e da iluminação de segunda ordem, provinda da reflexão de faces do próprio terreno, em interações múltiplas. A primeira componente pode ser modelada, com aumento da complexidade da análise, enquanto que a segunda depende do albedo das superfícies responsáveis pelas reflexões.

Com todas estas restrições, podem-se conceber ao menos duas aplicações das derivações puramente geomorfológicas relacionadas à iluminação: como esquema de representação do MDE para interpretação visual de feições do relevo e como insumo numérico para representar, mesmo com simplificações, a iluminação como variável bioclimatológica.

As condições de cálculo da iluminação para o atendimento às duas finalidades são diferentes. Como insumo visual, interessa o realce do relevo, para o que contribuem iluminante posicionado a baixos ângulos de elevação (complemento do ângulo zenital, ou  $90^\circ - \theta_s$ ) e exagero vertical do MDE. Tais condições diferem daquelas que representam o aspecto bioclimatológico com maior exatidão: sem exagero vertical e geometria de

iluminação representativa da dinâmica anual e diurna do disco solar (Figura 2). Esta variável será referida aqui como *iluminação solar*,

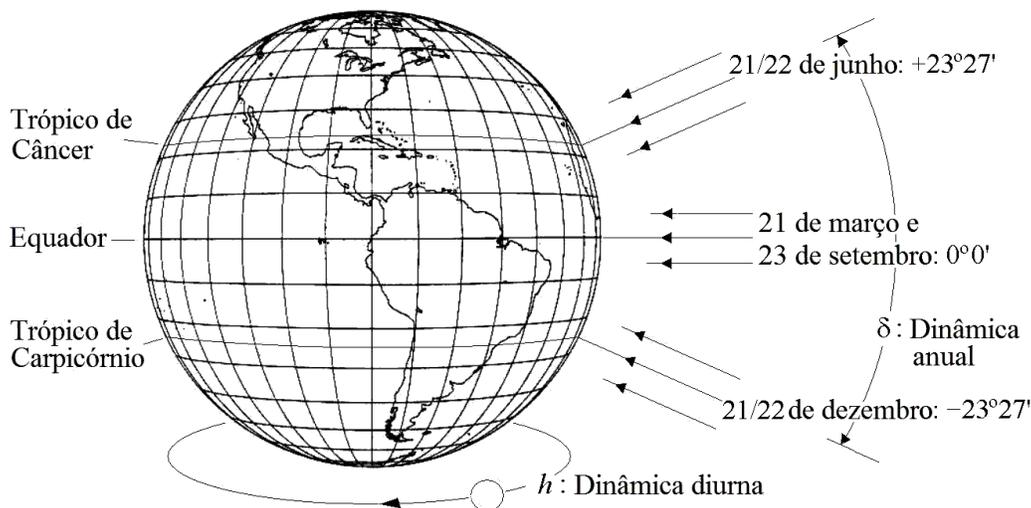


Figura 2 – Dinâmicas diurna do ângulo horário ( $h$ ) e anual da declinação solar ( $\delta$ ).

Nesse caso, os ângulos solares  $\varphi_s$  e  $\theta_s$  são controlados por ciclos de dinâmica anual, da declinação ( $\delta$ ), e diurna, do ângulo horário ( $h$ ), de acordo com a Figura 2. É necessário, portanto, estabelecer a situação desejável de declinação solar ( $\delta$ ) e ângulo horário ( $h$ ) para aplicar a Equação 1 com os valores de  $\theta_s$  e  $\varphi_s$  correspondentes, calculados como (Ometto, 1981):

$$\cos \theta_s = \sin Y \cdot \sin \delta + \cos Y \cdot \cos \delta \cdot \cos h \quad (2)$$

$$\sin \varphi_s = \cos \delta \sin h / \sin \theta_s \quad (3)$$

em que  $Y$  representa a latitude local. O ângulo horário ( $h$ ) e o de declinação ( $\delta$ ) são calculados em função da hora local e do dia do ano ( $D$ ) pelas equações:

$$h = 15^\circ \cdot [hora\ local - 12] \quad (4)$$

$$\delta = -23,45^\circ \cdot \cos ((360^\circ/365) \cdot (D+10)) \quad (5)$$

Para acolher com fidelidade as variações naturais da geometria solar num plano de informação representativo da situação média, este deve considerar as dinâmicas diurna e anual dos ângulos de iluminação e integrar as diferentes condições vigentes ao longo do período de interesse. Para planos de informação designados a caracterizar determinados períodos do ano, como valores mensais para serem integrados no ciclo de uma cultura agrícola, por exemplo, pode-se calcular a posição do disco solar representativa de cada mês. Casos mais específicos vão exigir tantos mais produtos quanto mais restritos forem os períodos considerados. Os cuidados com a adequação da geometria à situação de interesse não livram o cálculo da iluminação das ressalvas à sua exatidão como variável climática e das limitações para sua estimativa. Assim, este insumo não deve ser aplicado diretamente como parâmetro para o cômputo da radiação solar, mesmo que restrita à sua fração direta, embora se garantam, do

ponto de vista bioclimatológico, as relações numéricas que permitem caracterizar sua distribuição regionalizada, na escala da exposição topográfica, com bases coerentes.

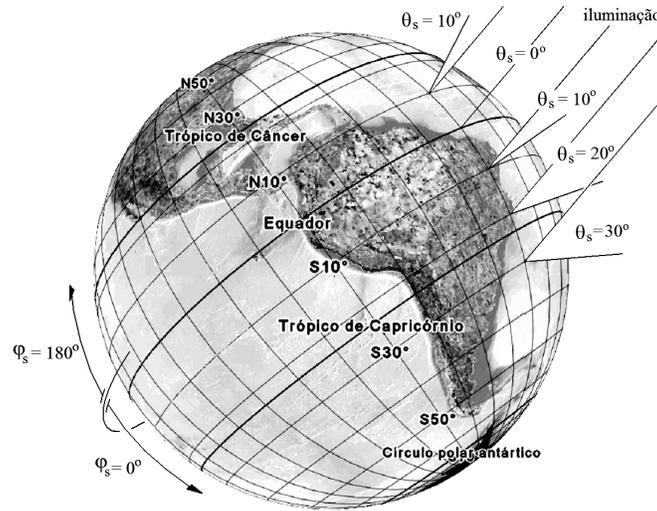


Figura 3 – Variação de  $\theta_s$  e  $\varphi_s$  ao meio-dia do equinócio em função da latitude.

## 2. Desenvolvimento

O desenvolvimento descrito a seguir foi projetado para incorporar a iluminação solar entre os produtos oferecidos no Topodata (Valeriano, 2008). A configuração do iluminante foi definida conforme a dinâmica do Sol, o que requer o atendimento prévio das Equações 1 a 4, que permitem calcular os ângulos  $\theta_s$  e  $\varphi_s$ . Para entrada da latitude em áreas pequenas, esta pode ser introduzida no cálculo como escalar (constante no espaço). No contexto do Topodata, as variações latitudinais requereram sua espacialização em planos de informação (Figura 4), conforme Valeriano e Albuquerque (2010).

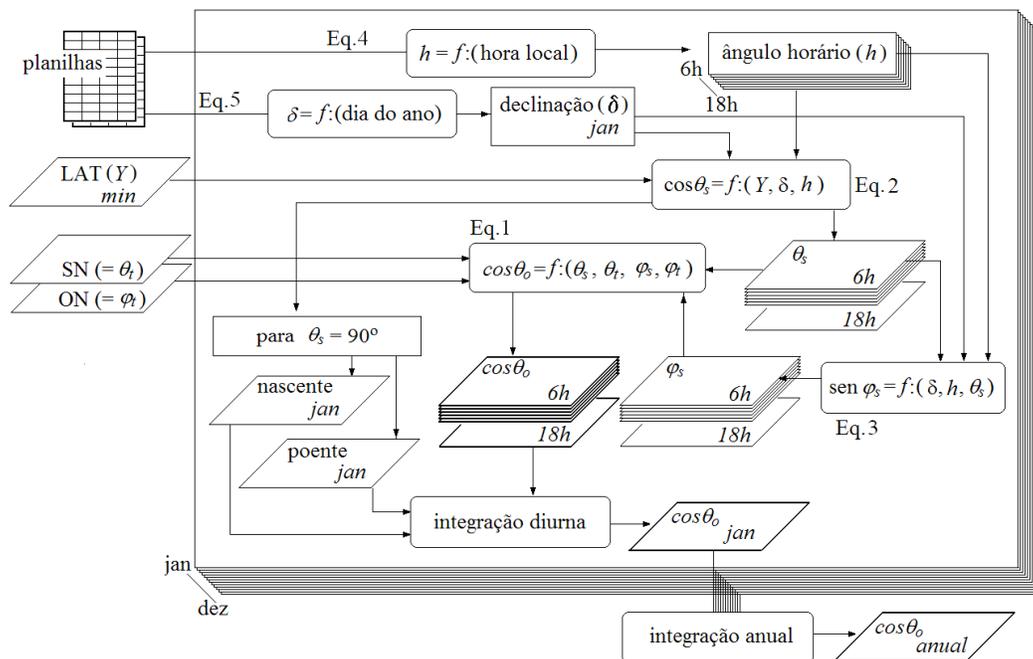


Figura 4 - Fluxo geral da obtenção dos fatores mensais e anuais de iluminação.

Na estrutura geral do algoritmo (Figura 4), o cálculo de  $\theta_s$  e  $\varphi_s$  foi feito para diferentes horários do dia representativo de cada um dos 12 meses. Em cada horário, estes resultados são aplicados conforme a Equação 1 para obtenção dos respectivos fatores momentâneos de iluminação ( $\cos\theta_o$ ), que requer sua integração com os planos de declividade (\_\_\_\_sn) e de orientação de vertentes (\_\_\_\_on). Os fatores momentâneos foram integrados ao longo do dia para o cálculo de cada um dos fatores mensais de iluminação e estes, enfim, integrados para a determinação do fator anual. Ao fim do programa, são armazenados como produtos finais os 12 planos de fatores mensais e um com valores anuais, a serem submetidos aos pós-processamento (conversões de formato, essencialmente) antes de serem colocados à disposição. Os processos correm em ciclos de funções subordinadas segundo a ordem: hora-mês-ano-folha-latitude: cumpridos os cálculos horários, integram-se os valores mensais, que são por sua vez integrados anualmente para os resultados de uma folha. Após este ciclo se completar para todas as folhas de mesma latitude, reinicia-se com nova latitude e assim por diante. O processamento das etapas deste fluxo geral será pormenorizado a seguir.

Num primeiro módulo, a programação incide sobre os planos auxiliares de entrada relativos à latitude juntamente com a declinação solar vigente para o cálculo dos ângulos solares locais ( $\theta_s$  e  $\varphi_s$ ) nos diferentes meses do ano. Uma vez fixos os valores de latitude de cada folha ao longo do ano (variam somente no espaço), tal cálculo se inicia com a determinação do ângulo de declinação solar, que depende somente da época do ano considerada (Equação 5) e que, portanto, foi feita fora do ambiente SIG e seus resultados inseridos como escalares. Como simplificação, foram tomados os dias 15 de cada mês, exceto nos meses de junho e dezembro, quando há uma inflexão na dinâmica da declinação solar (Figura 5). Nesses meses, o valor foi tomado a partir da integração dos valores diários.

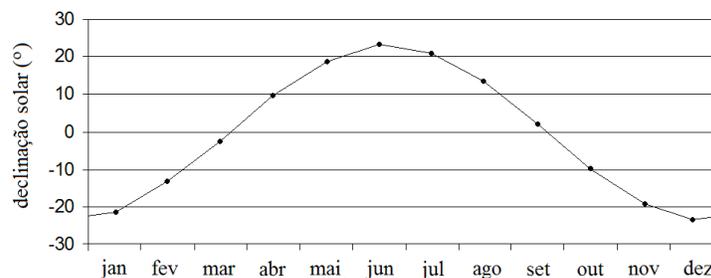


Figura 5 – Dinâmica anual dos valores de declinação solar.

Com a declinação (do mês) e a latitude, calculam-se os horários do nascente e do poente daquele mês pela Equação 2, invertida para  $\theta_s = 90^\circ$ . Observa-se que, a partir deste ponto, com a inclusão da latitude, introduz-se a dimensão espacial. Portanto, os horários de nascente e poente são armazenados em planos de informação de SIG. Da mesma forma, o ângulo zenital solar  $\theta_s$  é calculado pela Equação 2 (aqui na forma direta), em função dos ângulos horários (Equação 4, ainda tabular, obtidos via planilha) respectivos aos horários, escolhidos arbitrariamente, 6:00h, 8:00h, 10:00h, 12:00h, 14:00h, 16:00h e 18:00h. A Equação 3 relaciona o ângulo horário, a declinação e o ângulo zenital para a determinação do ângulo azimutal solar  $\varphi_s$ . O ângulo zenital solar  $\theta_s$  refere-se ao fator de iluminação na situação hipotética da superfície terrestre perfeitamente esférica, isto é, sem relevo. Este e o ângulo azimutal  $\varphi_s$  são, enfim, sobrepostos à declividade e à orientação de vertentes para o cálculo do fator cosseno ( $\cos\theta_o$ ) através da Equação 1. A integração dos valores diurnos de  $\cos\theta_o$  é feita em conjunto com os horários de nascente e poente como limites do dia solar, o que resulta no

fator de iluminação mensal. O fator anual é calculado como a média dos fatores mensais (Figura 4).

Os fatores momentâneos foram calculados para os horários acima independentemente do período de luz determinado pelos horários de nascente e poente. Adiante, na integração diurna (Figura 6), somente os valores pertinentes foram computados. A integração foi determinada como a área delimitada pelos fatores momentâneos dentro do período de luz, conforme a Figura 6. Esta integração geométrica obedeceu a três condições possíveis de período, conforme o horário de nascente (e, reciprocamente, de poente): (a) após 08:00h, (b) entre 06:00h e 08:00h e (c) antes de 06:00h (Figuras 6-a, -b e -c, respectivamente). Em testes de simulação, estes horários abrangem todas as condições possíveis. Na latitude extrema da cobertura dos dados SRTM ( $60^\circ$ ), por exemplo, o período de luz diurna varia de 02:45h a 21:15h no verão até 09:15h a 14:45h no inverno.

Evidentemente, operações relativamente simples podem requerer soluções extensas e complexas para sua implementação em programas de lote. A resolução das Equações de 1 a 5 nas possíveis condições de combinação entre os diversos elementos (declinação, latitude e ângulo horário) requer preparações e cuidados sem os quais se produzem resultados espúrios. Para citar o exemplo mais comum, lembra-se que todas as operações trigonométricas requerem ângulos expressos em radianos, o que exige constantes conversões entre as unidades. As constantes transformações inversas (arco-seno, arco-cosseno etc.) requerem muitas vezes a reconstrução, com lógica de quadrantes, dos ângulos simples ( $0^\circ$  a  $90^\circ$ ) para o domínio circular ( $0^\circ$  a  $360^\circ$ ).

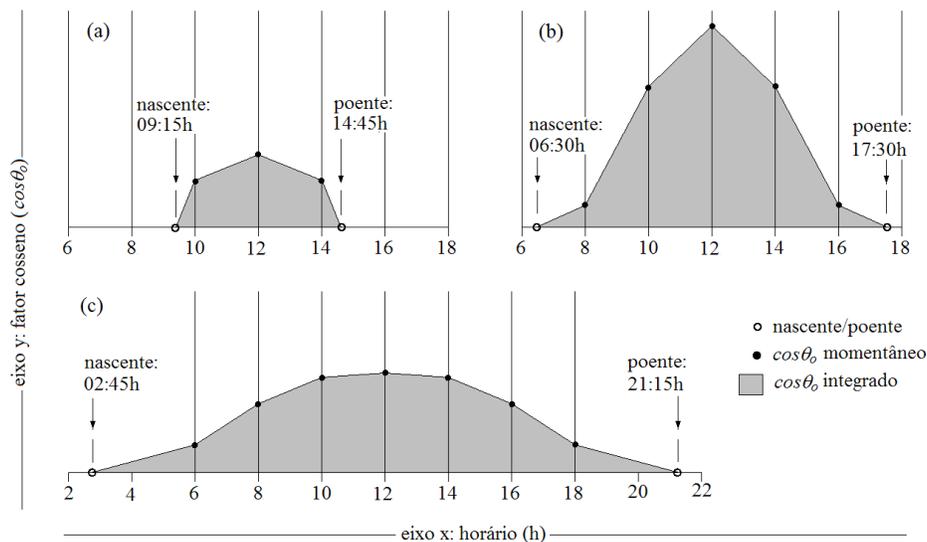


Figura 6 – Integração diurna dos fatores de iluminação de uma área plana.

Uma fonte notável de cuidados advém da circularidade das variáveis angulares, sobretudo as interações azimutais ( $\varphi_s$ ), que assumem valores de  $0^\circ$  a  $360^\circ$ , enquanto o tratamento dos ângulos zenitais ( $\theta_s$ ), restritos entre  $0^\circ$  e  $90^\circ$ , traz menos chances de problemas. A condição primordial que define duas linhas opostas de cálculo de  $\varphi_s$  é a relação entre declinação e latitude,  $\delta-Y$ , cujo sinal implica no sentido do movimento azimutal aparente do sol ( $\varphi_s$ ), horário ou anti-horário (Figura 7). Outro cuidado se refere ao sentido crescente ou decrescente do módulo de  $\varphi_s$ , que pode inverter seu sentido nas fases do dia em que se posiciona no hemisfério relativo oposto à sua situação no meio-dia (em amarelo nos diagramas da Figura 7). Este efeito é tão mais intenso e comum quanto maior for a latitude.

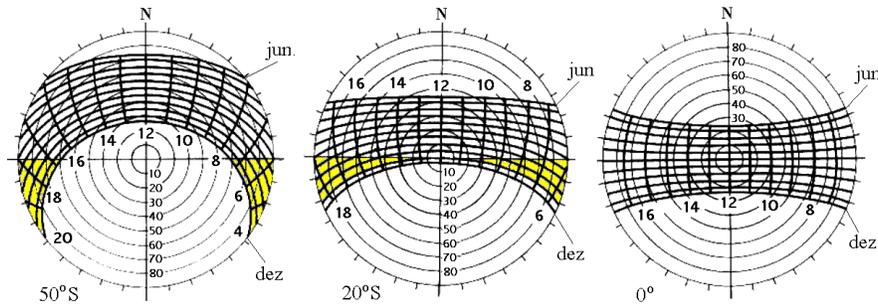


Figura 7 - Trajetória aparente do sol em diferentes latitudes.

Tais cuidados requerem um grande número de mecanismos de controle das combinações entre as variáveis, o que faz da programação uma tarefa extensa e meticulosa. Dado o grande número de operações que isso implica, é praticamente impossível evitar erros advindos das condições descritas acima, muito dos quais não são percebidos pela simples inviabilização do fluxo, pois este se conclui com resultados aparentemente válidos. No entanto, estes erros só se identificam com exame de representações do resultado, quando se percebem diferenças nas direções de sombreamento em relação ao resultado esperado para a combinação de data, horário e posição testada. Assim, o desenvolvimento do algoritmo foi acompanhado de testes intensivos. A avaliação dos resultados é particularmente favorecida no caso da iluminação pela facilidade com que se observam as variações de  $\varphi_s$ , sobretudo, devido à percepção natural das condições de sombreamento do relevo. Na Figura 8 se apresentam resultados de uma mesma área (Monte Roraima), como se fosse posicionada em 4 diferentes latitudes.

### 3. Considerações sobre a utilização dos resultados

Os arquivos de iluminação mensal e anual foram desenvolvidos sob a perspectiva de uso analítico, na modelagem da ecofisiologia, dada sua evidente relação com o potencial de fotossíntese e, portanto, a produção primária. A expectativa de uso dos resultados anuais recai sobre a modelagem da vegetação natural ou de culturas perenes, nas quais a condição de iluminação persiste como condicionante por períodos através dos anos. Porém não se deve considerar de modo exclusivo os dados anuais para estes casos, podendo-se focar a condição de períodos determinados por variações fisiológicas ou fenológicas sazonais. Os resultados mensais devem ser usados neste caso, assim como para culturas agrícolas anuais e outras aplicações em que se pretenda caracterizar ciclos intra- anuais. Apesar de sua aplicação analítica, caso o usuário necessite de sua visualização, recomenda-se a aplicação de um realce linear de contraste por duas alternativas. Caso se pretenda uma percepção condizente com a situação absoluta de iluminação, o realce deve ser aplicado com extremos nos valores 0 e 1, o que corresponde ao intervalo de variação de do efeito cosseno. Dessa forma, situações distintas de iluminação podem ser comparadas visualmente e as relações de brilho aparente entre as diferentes imagens estarão coerentes. Caso se pretenda simplesmente promover maior contraste para favorecer a observação da distribuição espacial da iluminação, pode-se aplicar o realce no mesmo intervalo da distribuição corrente (nos valores mínimo e máximo de sua distribuição). É oportuno lembrar que, para percepção do sombreamento com vistas à observação da configuração geomorfológica do terreno, recomenda-se a representação desenvolvida sob condições arbitrárias e com exagero vertical, conforme descrito na introdução.

### Agradecimentos

Este trabalho advém do projeto CNPq “Desenvolvimento de aplicações de dados topográficos SRTM”, CNPq, processo n.o. 307530/2008-6 (NV).

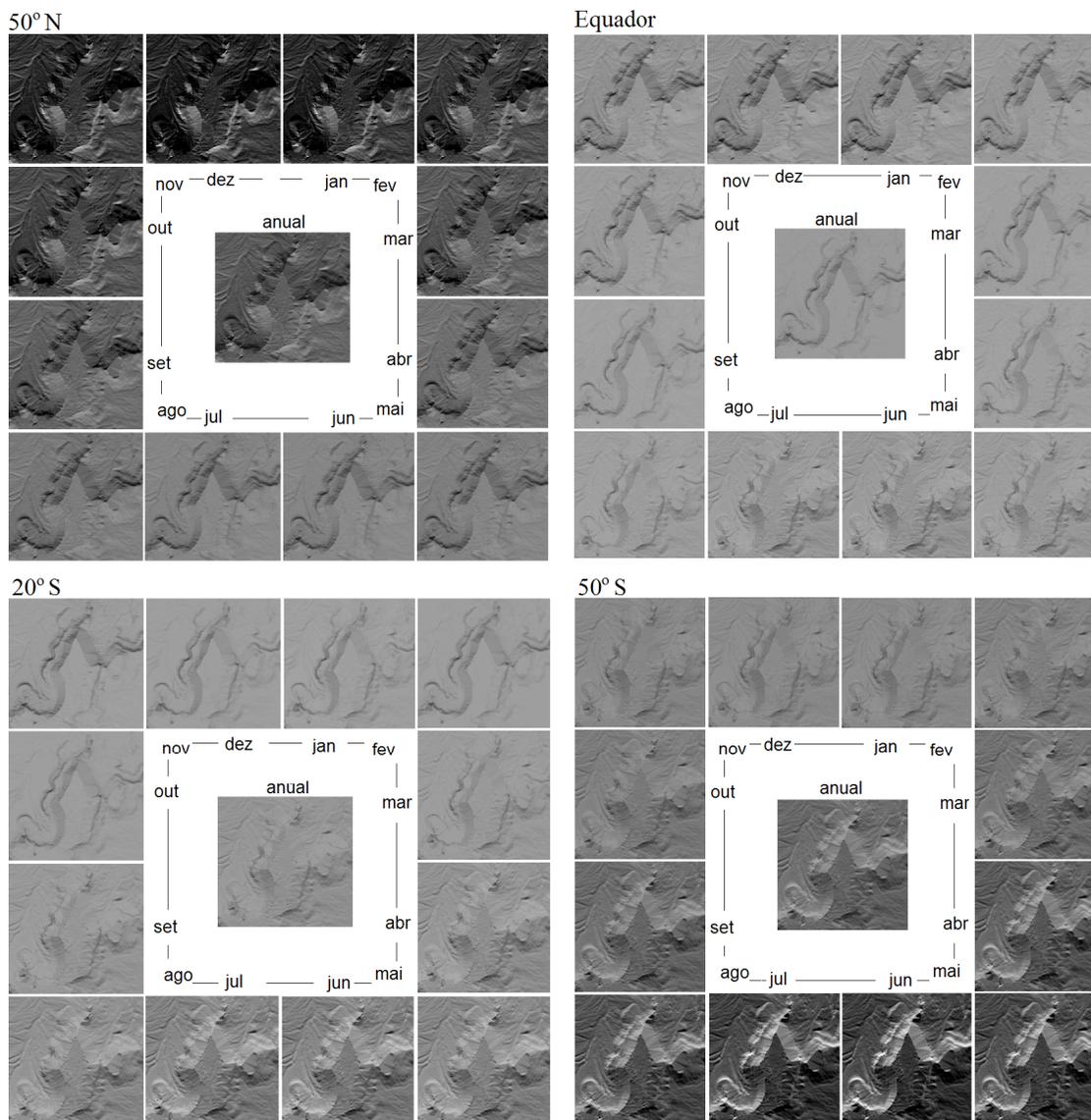


Figura 8 – Dinâmica da iluminação solar calculada para 4 diferentes latitudes.

## Referências

- Ometto, J. C. **Bioclimatologia vegetal**. São Paulo: Ceres. 1981, 425p.
- Peucker, T. K.; Douglas, D. H. Detection of surface specific points by local parallel processing of discrete terrain elevation data. **Computer Graphics and Image Processing**, v.4, n.4, p.375-387, 1975.
- Sellers, W. D. **Physical Climatology**, University of Chicago Press, Chicago, 1965. 272pp.
- Slater, P. N. **Remote sensing: optics and optical systems**. Reading, MA, Addison-Wesley, 1980. 575p.
- Valeriano, M. M. **TOPODATA: guia para utilização de dados geomorfológicos locais**. São José dos Campos: INPE, 2008. 72 p. (INPE-15318-RPE/818).
- Wilson, J.P.; Gallant, J.C. **Terrain analysis: principles and applications**. 1ª edição. New York: John Wiley e Sons, Inc., 2000. 478p. ISBN: 0-471-32188-5.
- Yokoyama, R., Shirasawa, M., Pike, R. J. Visualizing topography by openness: a new application of image processing to digital elevation models. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v.68, n.3, pp.257-266, 2002.