

## Correlação entre as componentes direta e difusa da radiação solar global estimadas com o uso de modelo digital de elevação e variáveis meteorológicas em centro urbano

Suzy Darley de Lima<sup>1</sup>  
Vanessa Augusto Mattos Silva<sup>2</sup>  
Luciana Sanches<sup>1</sup>  
Marcelo de Carvalho Alves<sup>3</sup>  
Eduardo Cairo Chilletto<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal de Mato Grosso - UFMT  
Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental  
Av. Fernando Correa da Costa, 2367, Boa Esperança, Cuiabá, CEP. 78600-090  
suzydarley@hotmail.com  
lsanches@ufmt.br

<sup>2</sup> Universidade Federal de Mato Grosso - UFMT  
Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental  
vanessa@fisica.ufmt.br

<sup>3</sup> Universidade Federal de Mato Grosso - UFMT  
Departamento de Solos e Engenharia Rural  
mdecalves@ufmt.br

<sup>4</sup> Universidade de Cuiabá - UNIC  
Faculdade de Arquitetura, Urbanismo, Engenharia e Belas Artes  
chiletto@terra.com.br

**Abstract:** The global solar radiation and its direct and diffuse components calculated through Solar Analyst, developed under ArcView GIS, for each cell of the Digital Elevation Model (Shuttle Radar Topography Mission - SRTM) was correlated with micrometeorological variables measured by field observations in a urban area, located in Mato Grosso state, Brazil during wet and dry seasons of year 2007. During January, the correlation between diffuse and micrometeorological variables (air temperature and air relative humidity) was significant ( $r > 0.69$ ), however, during July, it was not significant correlated ( $r > 0.28$ ). Many factors can be influenced by the solar radiation estimated base on SRTM during wet and dry seasons; for example, (a) the large built-up areas in the urban center such as buildings were considered as the terrain topography, (b) the high levels of suspended solids in the atmosphere due pollution especially during dry season and (c) the climate conditions which can be considered as sky conditions. In general, the Solar Analyst presented satisfactory predictions for global solar radiation and its components considering the sky conditions.

**Palavras-chave:** remote sensing, Shuttle Radar Topography Mission, urban climate, clearness index.

### 1. Introdução

De um modo geral, as interferências humanas no meio urbano e rural vêm acarretando alterações no meio ambiente como, diminuição de áreas verdes, aumento da área construída, poluição proveniente dos veículos automotores e de indústrias e influencias significativas no clima que causam aumento da temperatura e diminuição da umidade relativa do ar.

A radiação solar global pode ser considerada como agente principal do clima, que interfere diretamente nas variáveis climáticas de temperatura, umidade do ar, precipitação e velocidade e direção do vento. Segundo Angelocci et al. (2002), a radiação solar é a maior fonte de energia para a Terra, sendo primordial no entendimento da variação dos demais. Ela desencadeia todo o processo meteorológico afetando todos os outros elementos como a temperatura do ar, pressão atmosférica, velocidade e direção do vento, precipitação, umidade

do ar, etc. A energia solar é a fonte primária de energia para todos os processos terrestres, desde a fotossíntese, responsável pela produção vegetal e manutenção da vida na presente forma, até o desenvolvimento de furacões, tempestades, enfim, pela circulação geral da atmosfera e oceanos.

A forma mais simples para conhecer a disponibilidade da energia radiante do Sol que incide na superfície da Terra é a sua medida direta por meio de radiômetros colocados na superfície Tiba et al. (2000). Os radiômetros fornecem medidas pontuais da radiação solar global com grande acurácia, mas, além de apresentarem custo elevado para grandes extensões territoriais, como é o caso do Brasil, produzem resultados com elevado grau de incerteza devido aos processos de interpolação e extrapolação entre estações de superfície distribuídas de forma esparsa e muito heterogênea. Uma alternativa é a aplicação de modelos computacionais que estimam a radiação solar incidente na superfície pela parametrização dos processos radiativos no sistema Terra-Atmosfera fornecendo resultados bastante confiáveis a custo relativamente baixo em comparação à implantação e operação de redes de radiômetros Martins et al. (2004).

As variações geográficas na radiação solar e disponibilidade de luz natural dependem de dois fatores. A primeira são as variações de latitude relacionadas devido às mudanças na posição solar no céu com a latitude. As características da posição do sol para uma localização geográfica fornecem informações para projetos de construção, por exemplo, para selecionar a orientação do edifício, determinar o tipo de janela e área, e escolher o dispositivo correto de sombreamento. Em segundo lugar estão as variações climáticas, que podem ser consideradas como condições do céu que são difíceis de prever, podendo ser classificadas em tipos de céu claro, parcialmente nublado e nublado pelos parâmetros climáticos prevaletentes (Li e Lam, 2001).

O desenvolvimento da tecnologia de sensoriamento remoto por meio de satélites artificiais permitiu grande avanço no desenvolvimento de modelos computacionais. As imagens de satélite são ferramentas de grande utilidade na determinação da cobertura de nuvens e demais parâmetros atmosféricos necessários para a parametrização dos processos radiativos. Os primeiros estudos que utilizaram dados obtidos por satélite para estimar a irradiação solar na superfície foram desenvolvidos na década de 1970 por Hanson (1971); Vonder Haar (1973) e Vonder Haar et al. (1975).

A radiação solar também pode ser estimada pelo sensoriamento remoto considerando-se o Modelo Digital de Elevação (MDE, em inglês DEM – *Digital Elevation Model*) do terreno que é uma representação matemática computacional da ocorrência de um determinado fenômeno espacialmente distribuído numa região limitada da superfície terrestre, sendo caracterizado como um modelo numérico das características do terreno, ou seja, um vetor de números que representa a distribuição espacial de um conjunto de propriedades do terreno.

Os modelos digitais são freqüentemente utilizados para gerar dados derivados, sendo sua variação no espaço geodésico contínuo suavizado por métodos de interpolação espacial, os quais podem ajustar, de forma global, uma superfície matemática para toda uma área de interesse, ou então, se dedicar ao ajuste local das descontinuidades em partes da região.

Neste contexto, o objetivo do trabalho foi verificar a correlação entre a radiação solar difusa estimada em função de um MDE (projeto *Shuttle Radar Topography Mission* - SRTM) e as variáveis meteorológicas medidas por estações meteorológicas *in loco* na região do Centro Político Administrativo (CPA) e no centro de Cuiabá/MT em dias do período úmido e seco de 2007.

## 2. Material e métodos

### 2.1 Localização e descrição das áreas em estudo

A área em estudo está localizada na região Centro-Oeste do Brasil, na capital do estado de Mato Grosso, Cuiabá (15°10', 15°50'S e 50°50', 50°10'O, altitude 165m) em que foram instaladas estações meteorológicas em dois pontos nomeadas como estação Centro e estação CPA, com diferentes características de construção urbana (densidade construtiva).

A estação Centro, estava localizada na Rua Manoel Ferreira de Mendonça, n. 260, Bairro Bandeirantes, no centro do município de Cuiabá, (15°36'1"S; 56°5'29"O, altitude 187m), com entorno com grande concentração de construções civis.

Já a estação CPA, localizada na Rua C, Secretaria Estadual de Planejamento, Centro Político Administrativo, (15°33'59"S; 56°4'30"O, altitude 239m) com entorno com poucas construções destinado a edifícios governamentais e próximo a lagoa Paiaguás.

A distância em linha reta entre as estações foi de 4 Km.

### 2.2 Instrumentação

A temperatura do ar (T), umidade relativa do ar (UR), velocidade do vento (u), e radiação solar global (R<sub>g</sub>) foram medidas por estações automáticas (WM 918, Davis *Instruments*, Hayward, Califórnia, USA) com Dataloger e console Vantage Pro2, programadas para armazenamento de dados a cada 30 minutos durante o ano de 2007.

Visando a segurança das estações meteorológicas, a estação Centro foi instalada a 4,20m de altura, e a estação CPA a 10,50m de altura.

Para representar o período úmido e seco selecionaram-se 18 dias consecutivos de janeiro (dia Juliano 14 a 31) e 18 dias de julho (dia Juliano 191 a 208). Foram calculadas as médias diárias, diurnas e noturnas da temperatura do ar, umidade relativa do ar, velocidade e direção do vento e diária da radiação solar global para posteriormente serem correlacionadas com a radiação solar difusa estimada pelo *Solar Analyst* em função do MDE.

### 2.3 Modelo Digital de Elevação

O modelo digital de elevação é uma representação digital da topografia (declividade, aspecto e elevação) da superfície. Os arquivos MDE, resultado do projeto *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM), foram obtidos gratuitamente pela USGS (<ftp://e0srp01u.ecs.nasa.gov/srtm/version2/SRTM3/>). Os dados foram distribuídos com projeção geográfica (Latitude/ Longitude), *datum* horizontal WGS84 e *datum* vertical EGM96. A coleta foi feita a cada 3 segundos de arco para a versão 3.0 SRTM (aproximadamente 90 m de resolução espacial). Todos os dados vetoriais foram transformados para o formato *shapefile*, específico do software utilizado, e para a projeção UTM (*Universal Transverse Mercator*) e *datum* SAD 69 (*South America Datum* de 1969) fuso 21S (Figura 1).

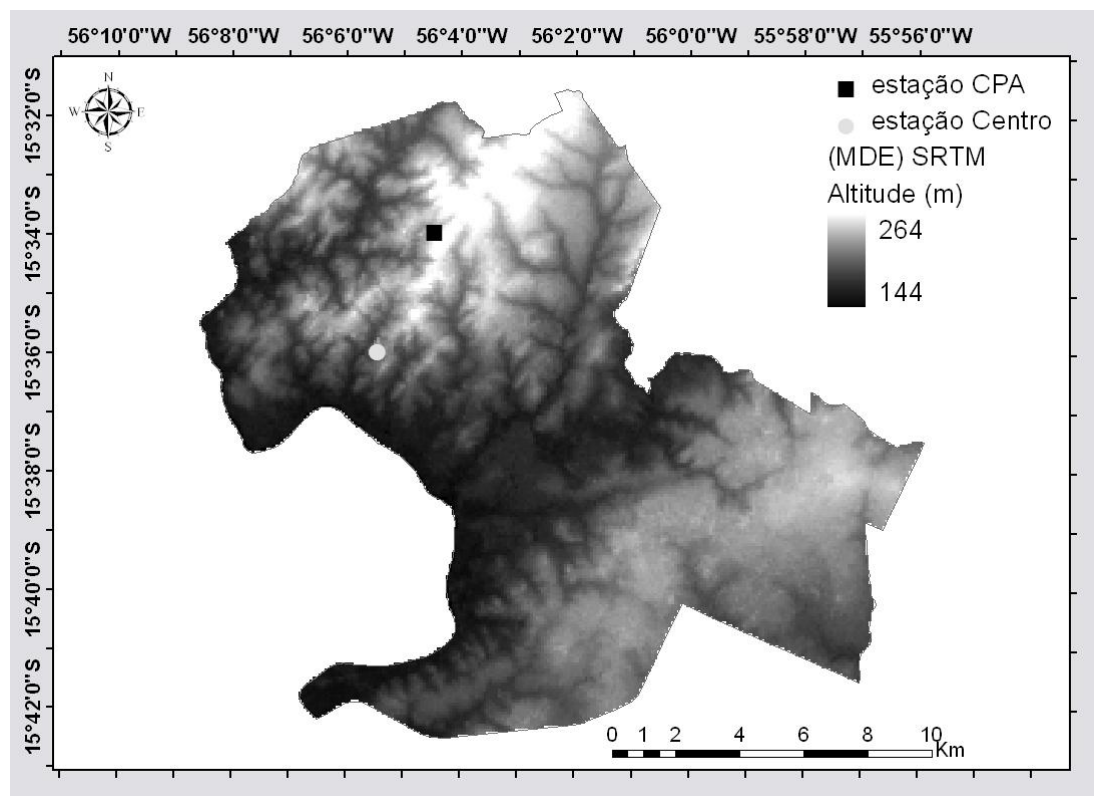


Figura 1. Modelo digital de elevação (*Shuttle Radar Topography Mission - SRTM*) da área do perímetro urbano de Cuiabá-MT.

## 2.4 Estimativa da radiação solar global e suas componentes

Para estimativa da radiação solar global e suas componentes foi utilizado o *Solar Analyst* que é uma ferramenta de extensão do *ArcView GIS (ESRI)* de modelagem geométrica da radiação solar, que estimou mapas de insolação, a radiação solar global e suas componentes, direta e difusa, considerando a influência da latitude, altitude, orientação da superfície (declividade e aspecto), do MDE, com o dado de entrada do modelo. Em essência, esse programa usou algoritmos desenvolvidos por Fu e Rich (2002), que gerou *viewsheds*, distribuição angular de obstrução do céu (fotografia hemisférica), para calcular a radiação direta, sobrepondo-o ao *sunmap* e difusa, sobrepondo-o ao *skymap* de cada direção do céu. O *sunmap* representou a posição aparente do sol, calculado com base na latitude, dia do ano e hora do dia. O *skymap* representa uma visão hemisférica de todo o céu dividido em uma série de setores definidos pelo ângulo zênite e azimute. Tanto o *sunmap* quanto o *skymap* foram calculados com base na fração de abertura, posição do sol, atenuação atmosférica, com base na transmissividade e profundidade de uma massa de ar. Os valores adotados dos parâmetros utilizados para estimativa da radiação estão de acordo com Mattos et al., 2010.

## 3. Resultados e discussões

### 3.1 Variáveis meteorológicas

Houve maior amplitude diária na temperatura do ar em julho/2007, alcançando máximas temperaturas de 30°C e mínimas de 13°C. O mesmo não ocorreu em janeiro, em que houve uma menor amplitude de temperatura do ar entre janeiro (30°C) e julho (25°C) em ambas as estações meteorológicas (Figura 2). A temperatura do ar na estação Centro e CPA apresentam valores semelhantes tanto em janeiro quanto julho, possivelmente devido as estações meteorológicas terem sido instaladas acima da altura das coberturas das edificações existentes

nos locais, fazendo com que o calor absorvido pelas construções, próximas a estação do centro, não interferisse na temperatura do ar.

A umidade relativa do ar (UR) apresentou maiores variações em julho, com maiores variações na estação CPA. No centro houve um aumento da temperatura do ar e uma diminuição da UR podendo ser ocasionada por diversos fatores, como menor área verde, aumento de edificações construídas e pela poluição proveniente dos veículos automotores.

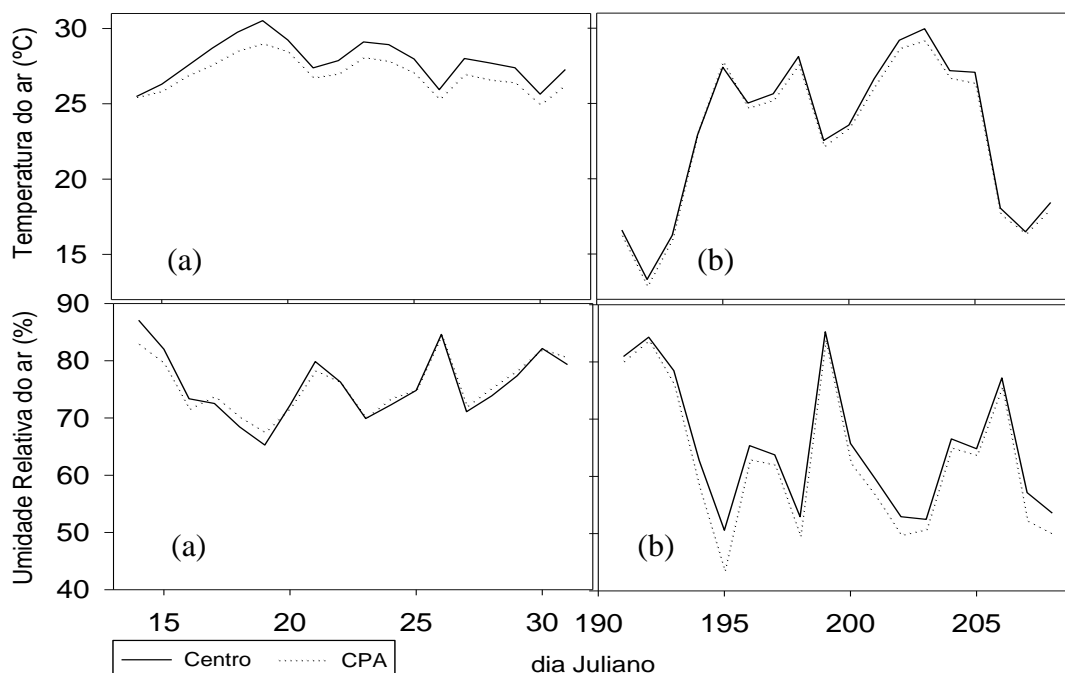


Figura 2. Média diária da temperatura e umidade relativa do ar nas estações Centro e CPA em (a) janeiro (dia Juliano 14 a 31) e (b) julho (dia Juliano 191 a 208).

### 3.2. Relação entre a radiação solar estimada pelo *Solar Analyst* e a observada *in loco*

As radiações solar global, direta e difusa apresentaram valores menores em julho, o mesmo aconteceu com as variáveis de temperatura do ar, umidade do ar, velocidade e direção do vento. Julho é um mês característico do período seco, em que os índices de precipitação são bem baixos, e há grande concentração de material particulado devido ao aumento de queimadas na região.

Em janeiro houve 26,36% de radiação difusa e em julho 30,93% na estação Centro, na estação CPA a radiação difusa em janeiro foi 26,75% e em julho 29,37%, observa-se que a radiação difusa estimada em pontos distintos apresentou valores semelhantes.

Em janeiro, dos 18 dias analisado, foram verificados três dias nublados em que o aumento da radiação difusa foi bem significativo, e em julho foram quatro dias nublados, mas os valores de radiação difusa não variaram muito.

O coeficiente de determinação foi significativo ( $R^2=0,64$ , CI=95%) entre a radiação solar global medida em campo e a estimada com base o SRTM (Figura 3). Um fator que pode ter influenciado na estimativa da radiação solar global pelo *Solar Analyst* é que o seu uso é adequado o suficiente para o estudo da irradiação solar em DEMs pequenos (isto é, da ordem de milhares de pontos) e por períodos pequenos, mas é bastante limitado para maiores áreas (Romero et al., 2008).

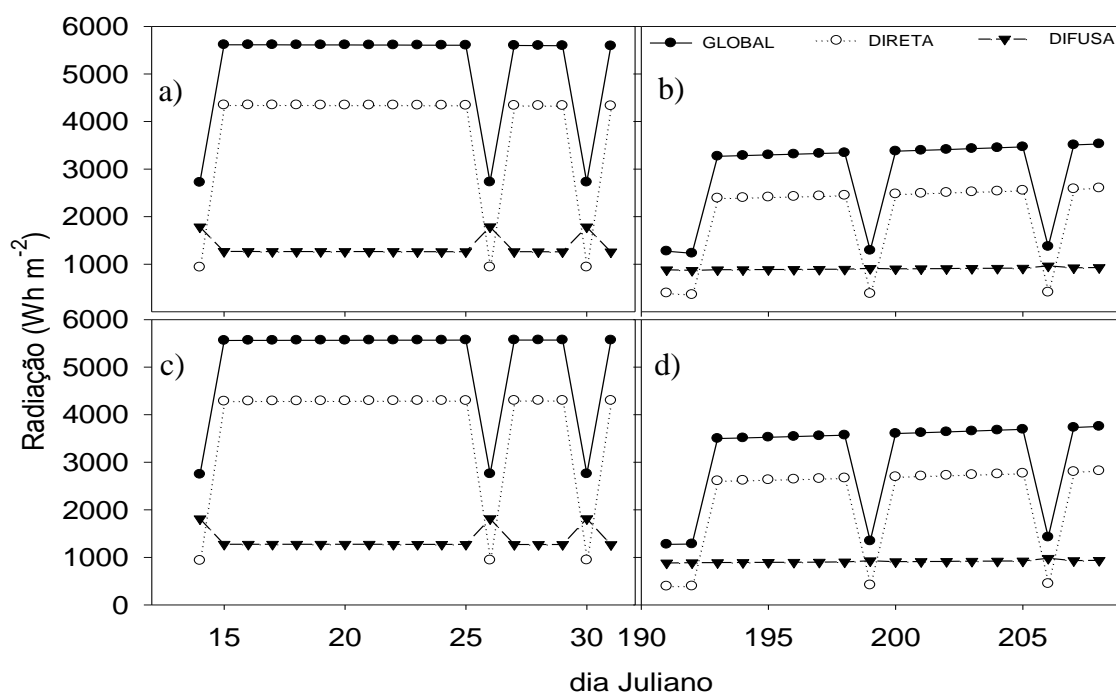


Figura 3. Radiação solar global, radiação direta e radiação difusa, estimada pelo *Solar Analyst* em função de um MDE para: estação Centro (a) janeiro, (b) julho e estação CPA (c) janeiro e (d) julho.

Ocorreu uma maior disponibilidade da radiação solar global, e de suas componentes direta e difusa, em janeiro do que julho, sendo que a componente direta foi a que apresentou maior contribuição (Figura 4). Em julho a intensidade de radiação foi atenuada, seguindo o comportamento da radiação que chega no topo da atmosfera para a latitude local. Essa variabilidade sazonal da radiação global evidencia a influência do movimento de translação da Terra sobre esta região. Devido a esse movimento, no local de análise para o período de janeiro corresponde a uma época de máxima elevação do Sol, solstício de verão e menor no período de julho, solstício de inverno. Isso evidencia a influência da latitude, estação do ano e hora do dia na radiação local.

É possível constatar que as áreas com maior radiação global coincidem com as zonas de maior altitude e com exposição favorável à captação da energia solar incidente.



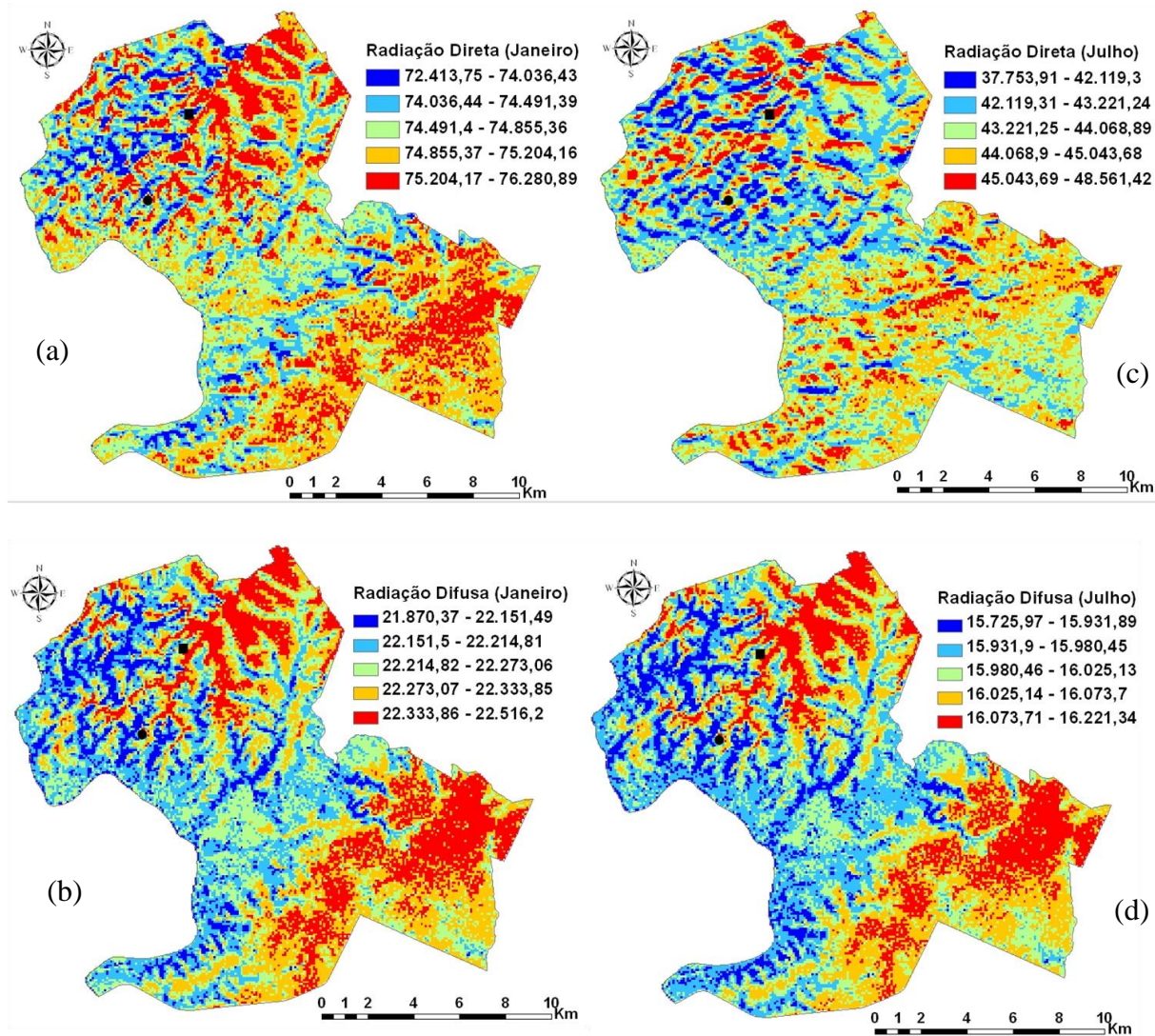


Figura 4. Mapas da radiação solar direta e difusa: (a) e (b) Janeiro; (c) e (d) Julho para o perímetro urbano de Cuiabá.

A componente difusa teve os maiores valores em janeiro, embora em julho a diferença entre direta e difusa foi menor em comparação com janeiro, acentuando a influência dos componentes atmosféricos que no verão ocorrem maiores concentrações de chuva influenciando nas alterações da nebulosidade acarretando maior variabilidade da radiação nesse período.

### 3.3. Correlação entre a radiação difusa e variáveis meteorológicas

As variáveis meteorológicas foram comparadas entre si para verificar até que ponto elas dependem uma da outras, sabendo-se que as alterações climáticas em um determinado ecossistema são acarretadas por vários fatores isolados ou decorrentes de uma série de parâmetros.

As variações entre as variáveis, temperatura e umidade do ar, e a radiação difusa, quando comparadas em janeiro apresentam correlação significativa ( $r > 0,69$ ), esse resultado se refere à estação Centro e CPA, em julho a radiação difusa não apresentou correlação significativa ( $r < 0,28$ ) com temperatura do ar e umidade em nenhuma das estações.

As correlações entre a radiação difusa e as variáveis meteorológicas nas estações Centro e CPA não foram significativas, uma das explicações para este fato pode ser devido a grandes áreas construídas, podendo alterar os dados medidos pelo SRTM talvez considere esses

obstáculos como sendo da topografia do terreno e altas taxas de material em suspensão devido à poluição atmosférica (particulados em suspensão).

#### 4. Conclusões

Este trabalho avaliou as correlações entre a radiação solar difusa entre variáveis meteorológicas durante o período úmido e seco. As melhores correlações ocorreram em janeiro que em julho. Dos fatores podem ter influenciado na radiação solar estimada pelo SRTM durante as estações seca e úmida, pode-se mencionar, (a) as grandes áreas construídas no centro urbano, como edifícios foram considerados como a topografia do terreno, (b) os níveis elevados de suspensão sólidos na atmosfera devido à poluição, especialmente durante épocas de seca devido as queimadas na região e a poluição advinda dos veículos, e (c) as condições climáticas que podem ser consideradas como condições do céu. Em geral, as estimativas realizadas pelo *Solar Analyst* apresentaram satisfatórias para a radiação solar global e suas componentes consideram que as condições do céu.

#### 5. Referência

Angelocci, L. R.; Pereira, A. R.; Sentelhas, P. C. **Agrometeorologia-Fundamentos e Aplicações Práticas**. 1.ed., Guaíba, RS: Livraria e Editora Agropecuaria Ltda, 2002, 475p.

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

Tiba, C. et al. **Atlas Solarimétrico do Brasil: banco de dados terrestres**. Editora Universitária da UFPE, Recife, 2000.

Li, D. H. W.; Lam, J. C. **An Analysis of climatic parameters and sky condition classification**, v.36, p. 435-445, 2001.

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

Hanson, K. J. **Proceedings** of Miami Conference on Remote Sensing. U.S. Department of Commerce, Washington, p. 133-148, 1971.

Silva, V. A. Mattos; Sanches, L.; Alves, M. C. **Radiação solar estimada com base em modelo de elevação digital no município de Cuiabá** (em preparação).

Romero, L. F.; Tabik, S.; Vías, J. M.; Zapata, E. L. **Fast clear-sky solar irradiation computation for very large digital elevation models**, v. 178, p. 800-808, 2008.

Vonder Haar, T. H. **Solar Energy Data Workshop**, NOAA NSF-RA-N-74-062, p. 143-148, 1973.

Vonder Haar, T. H.; Ellis, J. S. **Optical Solar Energy Utilization**, 68, 18, 1975.