

ANÁLISE SAZONAL DA RELAÇÃO ENTRE SEQUESTRO DE CARBONO E ILHAS DE CALOR URBANAS NAS METRÓPOLES DE SÃO PAULO, RIO DE JANEIRO, BELO HORIZONTE E BRASÍLIA

Seasonal Analysis of the Relation between Carbon Sequestration and Urban Heat Islands in the Brazilian Metropolis of São Paulo, Rio de Janeiro, Belo Horizonte and Brasilia

Marceli Terra de Oliveira, Khalil Ali Ganem & Gustavo Macedo de Mello Baptista

**¹Universidade de Brasília – UnB
Instituto de Geociências**

**Campus Universitário Darcy Ribeiro, 70910-900, Caixa Postal 4465, Brasília, DF – Brasil
marceliterra@gmail.com, khalilganem@hotmail.com, gmbaptista@unb.br**

Recebido em 22 de Novembro, 2016/ Aceito em 7 de Abril, 2017

Received on November 22, 2016/ Accepted on April 7, 2017

RESUMO

O objetivo desse trabalho foi analisar a influência da sazonalidade e da supressão vegetal no aumento de temperatura em grandes metrópoles, tais como São Paulo, Rio de Janeiro, Belo Horizonte e Brasília. Correlacionar esses parâmetros implica num melhor conhecimento dos impactos associados à expansão dessas cidades, bem como avaliar aspectos ambientais relacionados ao planejamento urbano das mesmas. Por meio dos dados do sensor OLI do Landsat 8 foram obtidos dados do índice CO₂flux, o qual detecta o sequestro de carbono. Posteriormente utilizou-se dados do sensor TIRS do mesmo satélite, os quais foram calibrados para obter a temperatura de brilho. Os dois parâmetros foram correlacionados utilizando-se o Coeficiente de Kendall. De modo geral, os resultados tiveram ampla variação do CO₂flux e temperatura ao se comparar áreas urbanizadas e não urbanizadas, sendo que a relação estabelecida entre os parâmetros é inversa. As cidades do Rio de Janeiro e São Paulo, respectivamente, apresentaram maior registro de temperatura e menor variação do sequestro de carbono em função da sazonalidade. A diferença sazonal entre os parâmetros para a cidade de Belo Horizonte foi mínima. Já para Brasília, a sazonalidade demonstrou ter uma forte influência, especialmente no comportamento do sequestro de carbono. Ao final, a correlação dos índices comprovou que a relação inversa entre o CO₂flux e a temperatura ocorre devido a variação sazonal do balanço de radiação solar recebido e à capacidade fotossintética florestal.

Palavras-chave: CO₂flux, Ilha de Calor Urbana, Sequestro de Carbono, Landsat 8, Temperatura de Brilho.

ABSTRACT

The main objective of this work was to analyze the influence of the seasonality and vegetation suppression on the rising of the temperature in big Brazilian metropolises, such as Sao Paulo, Rio de Janeiro, Belo Horizonte and Brasília. To correlate these parameters implies in a better understanding of the expansion of these cities, as well as to evaluate the environmental aspects related to urban planning. Using the data of sensor OLI, from Landsat 8, CO₂flux data was

obtained, which detects the carbon sequestration in the forest. Later on, data from the sensor TIRS, that belongs to the same satellite, was used. They were calibrated to obtain the brightness temperature. Both parameters were correlated using the Kendall Coefficient. In a general way, the results had a wide variation in the CO₂ flux and temperature when compared to urbanized and non-urbanized areas, considering that the established relation between those parameters is inverse. Rio de Janeiro and São Paulo, respectively, presented a larger record in temperature and smaller variation in carbon sequestration, in relation to the seasonality. The seasonal difference between the parameters for the city of Belo Horizonte was minimal. For Brasília, the seasonality has shown a strong influence, especially in the behavior of the carbon sequestration. In the end, the indexes correlation has proven that the inverse relation between CO₂ flux and temperature is due to the seasonal variation on the solar radiation balance received and the forest photosynthetic capacity.

Keywords: CO₂ flux; Urban Heat-island, Carbon Sequestration, Landsat 8, Brightness Temperature.

1. INTRODUÇÃO

O intenso processo de urbanização enfrentado pelas principais metrópoles brasileiras impulsionou o surgimento das chamadas Regiões Metropolitanas (RM's), que apesar dos benefícios econômicos e logísticos, caracteriza-se por um intenso fluxo populacional e conseqüente adensamento de edificações. No entanto, esse processo foi marcado pelo aumento da temperatura nos centros urbanos, fato que se tornou uma preocupação crescente para milhares de pessoas (ROTH, 2013).

As ilhas de calor urbanas é um fenômeno caracterizado pelas temperaturas mais quentes das regiões urbanas em comparação com os ambientes rurais em seu entorno (ROTH, 2013). Essa diferença de registros de temperatura, de acordo com Teza & Baptista (2005), ocorre em função das diferenças de irradiação de calor entre as diversas superfícies, por exemplo, regiões edificadas, com solo exposto e com vegetação, e também da concentração de poluentes.

Diversos estudos foram desenvolvidos para investigar causas, efeitos e principais fatores associados à ocorrência desse fenômeno. No entanto, no campo do sensoriamento remoto, é necessário investigar como a sazonalidade interfere na intensidade das ilhas de calor urbanas e, ainda, qual a relação desse fenômeno com a supressão vegetal e conseqüente expansão da mancha urbana.

O *Landsat Data Continuity Mission* - LDCM, também conhecido por Landsat 8, é uma parceria entre a *National Aeronautics and Space Administration* - NASA e *United States Geological Survey* - USGS e foi lançado em órbita em 11 de fevereiro de 2013. Traz novidades em relação aos satélites anteriores da série Landsat, possuindo dois instrumentos imageadores, sendo um deles um sensor ótico

(OLI – *Operational Land Imager*) com duas novas bandas, uma para detectar nuvens de alta altitude (*Cirrus*) e outra para estudos da atmosfera e a qualidade da água em lagos e águas costeiras (*Coastal /Aerosol*). Além disso, o sistema apresenta um sensor infravermelho termal (TIRS – *Thermal Infrared Sensor*) com duas bandas (10 e 11) de ondas longas, as quais representam o intervalo da antiga banda 6 do Landsat 7, e que irão coletar dados termais e co-registrar com dados OLI (USGS, 2012).

Assim, considerando a enorme contribuição das ferramentas de sensoriamento remoto para o fornecimento de um panorama mais preciso, tanto a despeito das transformações no meio físico como com sua relação com fenômenos climáticos, o principal objetivo deste trabalho é avaliar a relação entre sequestro de carbono e ilhas de calor urbanas, assim como o comportamento desses parâmetros diante de variações sazonais, por meio do uso de dados de dos sensores OLI e TIRS do Landsat-8 nas metrópoles de São Paulo, Rio de Janeiro, Belo Horizonte e Brasília.

1.1 Sequestro de Carbono

O conceito de sequestro de carbono consagrou-se na Conferência de Kyoto, no Japão, em 1997, na qual uma das principais pautas foi a reversão do acúmulo de CO₂ na atmosfera como medida de redução do efeito estufa. Desde então, o papel da vegetação passou a ganhar cada vez mais atenção da comunidade científica por se tratar de um meio potencial como fonte captadora de CO₂ atmosférico, o qual também pode ocorrer por meio da ação do homem, a partir da utilização de tecnologias disponíveis. Entretanto, a vegetação ainda é considerada o meio mais eficiente, econômico e com maior tendência à manutenção do equilíbrio ecológico.

Com relação ao sequestro de carbono, Yu (2004) destaca o fato de haver um maior interesse voltado às florestas tropicais úmidas pela sua elevada taxa de produtividade primária. Isso caracteriza o fato de as árvores removerem quantidades consideráveis de carbono da atmosfera, as quais vão reduzindo gradativamente a taxas quase insignificantes quando já estão formadas.

Com base nas palavras de Yu (2004) constata-se que o sequestro de carbono consiste no processo de crescimento das plantas, o qual ocorre por meio da fotossíntese, que em suma, representa a fixação do carbono em forma de biomassa nas plantas. Assim, quanto maior o porte de uma planta, por exemplo, maior sua biomassa e conseqüente maior o carbono acumulado. Por isso as plantas são consideradas importantes sumidouros de carbono (MALHI *et al.*, 1999), pois proporcionam o estoque do elemento por um maior espaço de tempo.

Um dos aspectos importantes do ciclo do carbono, de acordo com Manahan (2013) está no fato de ele ser o ciclo pelo qual a energia solar é transferida para sistemas biológicos. Nesse momento pode-se destacar o papel da fotossíntese, que de acordo com Galston (1992), trata-se, em suma, do processo que consiste na conversão do CO₂ e da água em açúcares, para o crescimento e desenvolvimento das plantas, utilizando luz solar como fonte de energia, sendo que durante esse processo a molécula de água é dividida em átomos de hidrogênio e oxigênio, com este último sendo liberado ao ambiente e o hidrogênio convertendo o carbono inorgânico contido no CO₂ em material.

No campo do sensoriamento remoto, um dos índices espectrais que pode ser utilizado para avaliar o sequestro de carbono é o CO₂ flux. Trata-se de um índice que foi utilizado pela primeira vez por Rahman *et al.* (2001) para o melhor entendimento dos fluxos de carbono de florestas boreais e a resposta que essas florestas poderiam ter com mudanças climáticas, fato esse que era estudado em grande escala na região boreal canadense pelo *Boreal Ecosystem-Atmosphere Study*. O CO₂ flux foi proposto pelo autor por meio da integração de outros dois índices espectrais: o *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) e o *Photochemical Reflectance Index* (PRI). O NDVI (ROUSE *et al.*, 1973) é uma função da fração de radiação fotossinteticamente ativa

absorvida pela vegetação, já o PRI (GAMON *et al.*, 1997) funciona como um instrumento de medição da eficiência do uso da radiação pela vegetação. No entanto, é importante que fique claro que essa metodologia está sendo utilizada neste trabalho para avaliar onde há presença ou ausência de vegetação, sendo que pela presença de vegetação é possível inferir se há ou não sequestro de carbono.

1.2 Ilhas de Calor Urbanas

O processo de ocupação antrópica representa um impacto considerável em termos de disponibilidade dos recursos naturais. Um dos principais resultados da interação homem-meio ambiente se dá por meio do processo de urbanização, o qual produz impactos negativos ao meio ambiente principalmente em razão de fatores como a geração de poluição, modificação das propriedades químicas e físicas da atmosfera, assim como da cobertura da superfície do solo, o que, conseqüentemente, está ligado à remoção da vegetação.

De acordo com Fialho (2012), a expansão da mancha urbana intensifica a conurbação, além de incrementar a densidade da área construída, o que acarreta uma diferença no tempo de absorção da energia solar disponível durante o dia e da reemissão da energia terrestre à noite, fazendo com que haja um resfriamento mais lento da cidade após o pôr do sol, como conseqüência deste novo balanço energético. Isso ocorre em função da presença de materiais escuros presentes nas cidades, tais como asfaltos utilizados na pavimentação dos solos e telhados presentes em edificações, que possuem a capacidade de absorver e armazenar calor.

Já durante a noite, esses materiais mantêm a temperatura nas cidades mais elevadas, quando comparadas com áreas rurais, com vegetação predominante. Esse fenômeno é denominado ilhas de calor urbanas, cujo termo foi utilizado pela primeira vez por Howard em 1818. Dentre as principais conseqüências resultantes desse fenômeno destacam-se o aumento da temperatura, o aumento da concentração de poluentes e uma diminuição da umidade relativa.

Arrau e Peña (2015) descreveram o fenômeno de ilhas de calor como a presença de qualquer área mais quente do que a paisagem ao seu redor, as quais podem se desenvolver

tanto em áreas urbanas quanto rurais, embora haja um conhecimento relativamente menor quanto ao comportamento das ilhas de calor que ocorrem em áreas fora do eixo urbano, tendo em vista seu menor potencial de risco ao ser humano ou ao meio ambiente. Ainda de acordo com os autores, um dos principais efeitos desse fenômeno se revela com o aumento da temperatura atmosférica. Isso se deve ao fato de as superfícies das áreas urbanas que sofrem o efeito serem caracterizadas por baixo albedo, elevada impermeabilidade e propriedades térmicas favoráveis ao armazenamento de energia e liberação de calor.

A temperatura de superfície pode exercer uma influência, mesmo que indireta, bastante significativa na temperatura do ar. Parques e áreas verdes, por exemplo, que geralmente possuem temperatura de superfície mais frias, influenciam na diminuição da temperatura do ar, enquanto que áreas construídas e pavimentadas influenciam no sentido oposto. As temperaturas de superfície e do ar se misturam na atmosfera e não possuem uma relação constante. Mesmo assim, a temperatura do ar varia menos que a temperatura de superfície ao longo de uma determinada área.

O comportamento térmico urbano se difere das áreas rurais, uma vez que a temperatura em áreas urbanas é fortemente influenciada pela temperatura do ar, cuja interação com os diferentes alvos do meio urbano se dá na forma de energia radiante, também denominada de temperatura

de brilho, a qual contribui diretamente para a formação das ilhas de calor urbanas. Além disso, o efeito das ilhas de calor pode modificar as correntes de ar e a precipitação, o que pode ser influenciado pelo tipo de sistema meteorológico predominante no local analisado, sua posição geográfica e ainda a estrutura das edificações.

Rao (1972) foi o primeiro a demonstrar que áreas urbanas poderiam ser identificadas por meio de análises de dados na faixa do infravermelho termal adquiridos por um satélite. Anos depois, Wukelic (1989) demonstrou a potencialidade da temperatura de brilho para obtenção de dados termais ao retomar técnicas de Markham & Barker (1986) para transformação dos números digitais da imagem para dados de radiância, onde propôs uma nova calibração para a banda termal do imageador TM – *Thematic Mapper*. De acordo com Kazmierczak (2015), o sensor do satélite mede a radiância termal da área imageada numa determinada passagem e, por meio da inversão da função de Planck na faixa de comprimento de onda de atuação do sensor, essa radiância é convertida para temperatura de brilho.

2. MATERIAL E MÉTODOS

Conforme já citado anteriormente, esse trabalho apresenta a relação entre supressão vegetal e ilhas urbanas de calor em quatro cidades brasileiras, sendo elas: São Paulo, Rio de Janeiro, Belo Horizonte e Brasília (Figura 1).

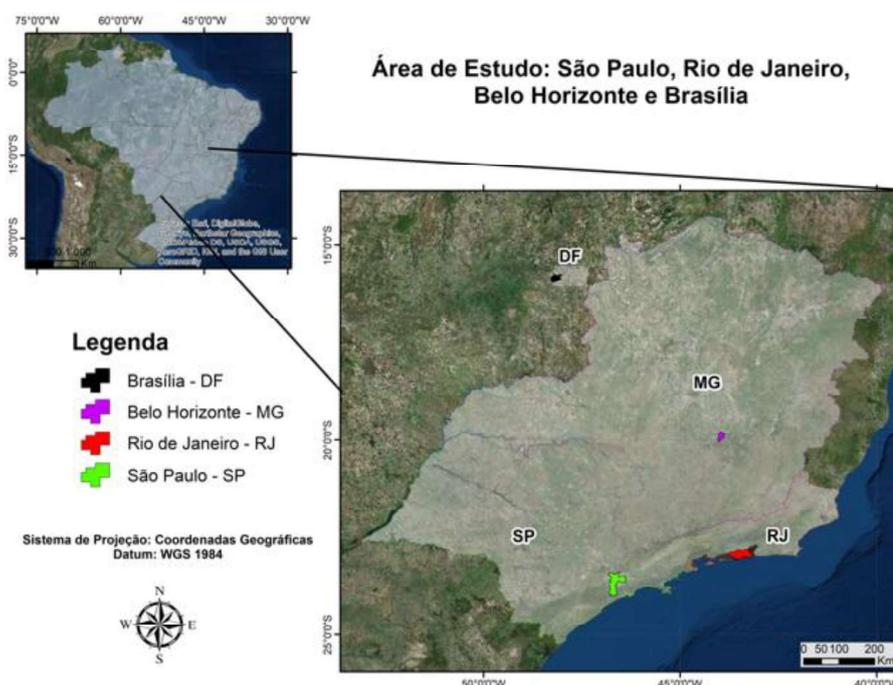


Figura 1 – Localização das áreas de estudo

A definição das áreas de estudo se deu em razão das cidades de São Paulo, Rio de Janeiro, Belo Horizonte e Brasília integrarem, os núcleos de formação das maiores regiões metropolitanas do país (ou regiões integradas de desenvolvimento econômico, no caso de Brasília) tanto em termos de densidade populacional, quanto extensão territorial, todas tendo apresentado um crescimento bastante elevado nas últimas décadas.

De acordo com dados do IBGE do ano de 2014, São Paulo possui população estimada em 11.895.893 habitantes, sendo considerada a mais populosa e mais extensa do país, com área aproximada de 1.521 km² e densidade demográfica de 7.398,26 habitantes/km². A cidade de São Paulo juntamente com outros 39 municípios integra a Região Metropolitana de São Paulo – RMSP, com população estimada em 19.683.975 habitantes, área de 8.047 km² e taxa de urbanização de 98,9% (IBGE, 2010).

O Rio de Janeiro tem população estimada em 6.453.682 habitantes, área aproximada de 1.200 km² e densidade demográfica de 5.265,82 habitantes/km² (IBGE, 2014). Isso faz com que a cidade do Rio de Janeiro seja considerada a segunda maior do Brasil, tanto em termos de densidade demográfica, quanto em extensão territorial. A cidade, juntamente com outros 19 municípios forma a Região Metropolitana do Rio de Janeiro – RMRJ, com população total estimada em 11.711.233 habitantes (IBGE, 2010) e área de 5.292 km². Além disso, a RMRJ apresenta a maior taxa de urbanização do país, chegando a 99,5% (IBGE, 2010).

Belo Horizonte, por sua vez, possui 2.491.109 habitantes, de acordo com dados do Instituto Brasileiro de Geografia Estatística – IBGE – de 2014. A cidade tem uma área de 331,401 km², densidade demográfica de 7.167 habitantes/km² e pertence à terceira maior região metropolitana do país, a Região Metropolitana de Belo Horizonte – RMBH, formada por 34 municípios, com população total de cerca de 4.819.288 habitantes (IBGE, 2010), área de aproximadamente 9.467 km² e taxa de urbanização de 97,5% (IBGE, 2013).

Por fim, Brasília conta uma população estimada em 2.852.372 habitantes, área aproximada de 5.780 km² e densidade demográfica de 444,66 habitantes/km² (IBGE, 2014).

A cidade forma, juntamente com o Distrito Federal e 22 municípios do entorno, dos quais 19 estão situados no Estado de Goiás e 3 no Estado de Minas Gerais, a Região Integrada de Desenvolvimento – RIDE – do Distrito Federal e Entorno, a qual abrange uma área de 55.402,2 km² e uma população estimada em 3.717.728 habitantes (IPEA, 2013). A taxa de urbanização do Distrito Federal é de 95,6%, a maior da região Centro-Oeste (IPEA, 2013).

Para melhor evidenciar a interferência da sazonalidade no presente trabalho, o principal critério utilizado para escolher as imagens de satélite foi a cobertura mínima de nuvens e a garantia de que pertencessem a duas estações diferentes, chuvosa e de estiagem. Os gráficos de pluviosidade do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) deram subsídio para definir os meses que correspondem a cada estação. Com isso, observou-se maior ocorrência de chuvas nos primeiros meses do ano (estação chuvosa) e menor ocorrência nos meses de junho a setembro (estação seca).

As imagens de satélite foram coletadas do site do USGS (<http://earthexplorer.usgs.gov/>) e suas datas estão dispostas na Tabela 1, de acordo com os dados pluviométricos e a possibilidade de uso das mesmas, como por exemplo, sem a interferência de nuvens na área de estudo. Os produtos do Landsat 8 tem resolução radiométrica de 16 bits (reescalonado para 55000 níveis de cinza), o que permite melhor distinção espectral dos alvos. Conta com resolução espacial de 30 m e a obtenção das cenas ocorre a cada 16 dias (USGS, 2012).

Tabela 1: Definição das Cidades e Datas das Imagens de Satélite Coletadas

Cidade	Data Chuvosa	Data Estiagem
Belo Horizonte	06/04/2014	25/08/2013
Brasília	05/01/2014	29/07/2013
Rio de Janeiro	25/01/2014	02/08/2013
São Paulo	08/02/2014	01/09/2013

O fluxograma apresentado na Figura 2 sintetiza o que será explicado nos itens que se seguem.

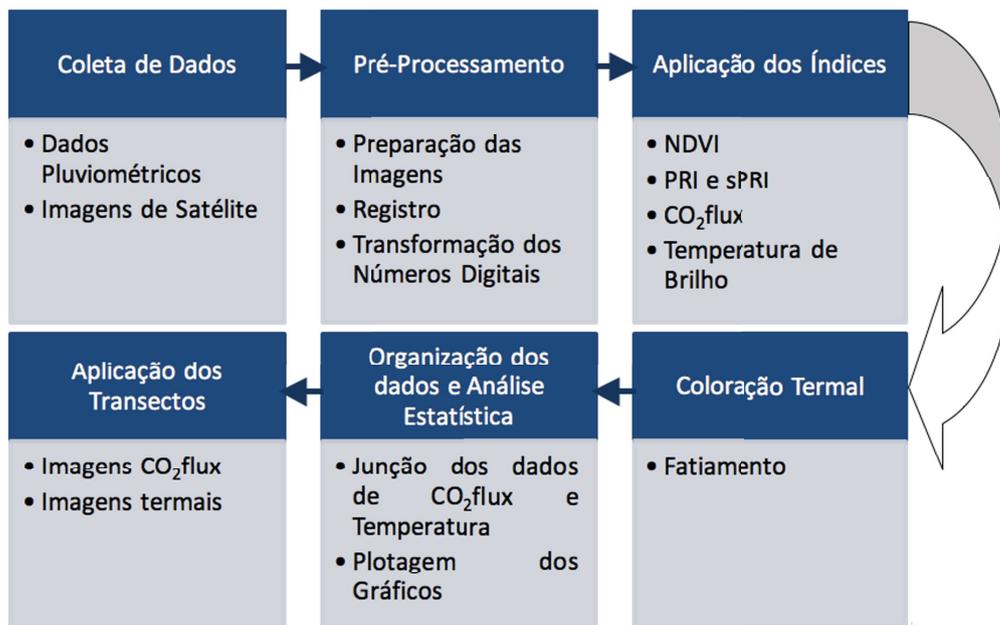


Fig. 2 – Fluxograma com procedimentos adotados para os métodos.

As etapas de pré-processamento realizadas consistem em registro das imagens e transformação de Números Digitais (ND) para dados de radiância, o qual será utilizado nos dados termais e reflectância para os dados de sequestro de carbono. As conversões consistem em reescalonar os ND para medições no topo da atmosfera (TOA - *Top of Atmosphere*) utilizando coeficientes de reescalonamento radiométricos disponíveis nos metadados.

O estudo apresenta dois produtos finais utilizados para análise e comparação, o CO₂ flux e a Temperatura de Brilho, conforme destacado na Figura 3.

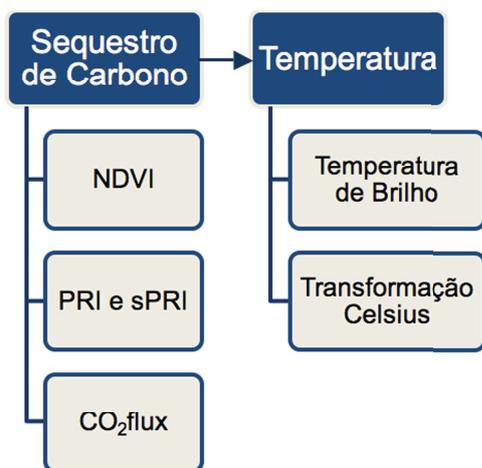


Fig. 3 – Fluxograma de aplicação dos índices.

Para o cálculo dos índices espectrais e da temperatura de brilho utiliza-se as fórmulas dispostas na Tabela 2.

Tabela 2: Índices, suas Respectivas Bandas e Equações utilizadas no Landsat 8

Índices	Bandas / L8	Equações
NDVI	Vermelho e infravermelho / 4 e 5	$NDVI = \frac{(R_{NIR} - R_{Red})}{(R_{NIR} + R_{Red})}$
PRI	Azul e verde / 2 e 3	$PRI = \frac{(R_{Blue} - R_{Green})}{(R_{Blue} + R_{Green})}$
CO ₂ flux	NDVI e sPRI	$CO_2flux = (NDVI \times sPRI)$
Temperatura	Termal / 10	$T = \frac{K_2}{\ln(\frac{K_1}{L_\lambda} + 1)}$

onde:

R_{NIR} = Banda do infravermelho próximo (*Near Infrared*). = Banda do vermelho.

R_{BLUE} = Banda do azul.

R_{GREEN} = Banda do verde.

sPRI = PRI reescalonado para valores positivos.

T = Temperatura de Brilho (K)

L_λ = Radiância Espectral no Topo da Atmosfera (Watts/m²srad⁻¹μm⁻¹)

K₁ = Constante de conversão termal obtido nos metadados.

K₂ = Constante de conversão termal obtido nos metadados.

O critério utilizado para a definição dos transectos teve como base a identificação dos chamados Centros de Negócios (do inglês *Central Business District* - CBD) ou ainda o centro de cada metrópole, já que se trata de áreas com intensa urbanização em termos de espaço físico construído, principalmente devido à elevada verticalização do espaço, fato esse que contribui consideravelmente para a alteração do clima e da atmosfera local (DOURADO FILHO, 2004).

Com isso, os transectos foram aplicados de modo a abranger uma parte considerável da mancha urbana, incluindo as áreas centrais, nos quais, para São Paulo considerou-se a Avenida Paulista; para o Rio de Janeiro o bairro do Centro, nas proximidades das Avenidas Presidente Vargas e Rio Branco; para Belo Horizonte, a Avenida Amazonas e para Brasília, regiões administrativas de Taguatinga e entorno, que apesar de não serem consideradas oficialmente centros comerciais, destacam-se pelo crescente adensamento.

As análises estatísticas foram divididas em duas partes. Primeiramente, utilizou-se de estatística descritiva no *Excel* com os cálculos das médias e desvios padrão das variáveis CO₂ flux e temperatura, com isso foi possível a análise dos dados dessas variáveis quanto aos alvos dispostos na mesma cena e também a análise sazonal para as cidades.

A segunda parte se deu por meio de estatística inferencial por meio de software *BioEstat*. Para testar a normalidade dos dados obtidos nos transectos, utilizou-se o método de D'Agostino-Pearson, adotado em conjuntos amostrais superiores a 50 unidades. Nesse método o valor de K² calculado é comparado com valores tabelados da distribuição do χ^2 (QUI-quadrado) utilizando dados de grau de liberdade e medida de significância. Assim, testou-se a hipótese nula (H₀) de que os dados de CO₂ flux e de temperatura de brilho obtidos nos transectos, tanto para a estação chuvosa como na seca, apresentam distribuição normal.

Dessa forma, se o valor calculado for maior ou igual ao tabelado, rejeita-se a hipótese nula e as análises necessitam de testes estatísticos não paramétricos, como o coeficiente de correlação de Kendall (τ), o qual resulta numa medida de correspondência e intensidade de correlação das variáveis (CÂMARA, 2001) e, de acordo com Callegari-Jacques (2003) a avaliação qualitativa da correlação se dá pela tabela a seguir:

Tabela 3: Avaliação Qualitativa da Correlação

	Positiva	0 = Nula	Negativa
0,0 a 0,3	Fraca (+)	0,0 a -0,3	Fraca (-)
0,3 a 0,6	Regular ou Moderada (+)	-0,3 a -0,6	Regular ou Moderada (-)
0,6 a 0,9	Forte (+)	-0,6 a -0,9	Forte (-)
0,9 a 0,99	Muito Forte (+)	-0,9 a -0,99	Muito Forte (-)
1	Plena ou Perfeita (+)	-1	Plena ou Perfeita (-)

Fonte: Callegari-Jacques (2003).

Como último produto foi feito o fatiamento dos resultados de temperatura para melhor visualização. A coloração da imagem implica na definição de intervalos de cores de acordo com o dado analisado, por exemplo, numa imagem termal. Essa técnica é possível por meio da ferramenta *Density Slice* para a aplicação nas imagens. Primeiramente foi feita a análise dos máximos e mínimos de temperatura das quatro cidades em suas duas estações e em seguida a escolha de um conjunto de intervalos de temperatura para todas as cidades, de modo a estabelecer um padrão.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir da análise dos resultados mostrados pelos transectos foi possível observar uma variação no sequestro de carbono entre as estações de estiagem e chuvosa para todas as quatro cidades. Em áreas com presença mínima de vegetação verificou-se uma interferência pouco representativa da sazonalidade, com valores de CO₂ flux chegando a zero em determinados pixels. Isso está relacionado a uma menor quantidade de árvores na composição paisagística em algumas áreas dessas cidades, ou ainda, em um fluxo mais intenso e irregular de urbanização, o que resulta na supressão dos vestígios remanescentes de vegetação. Já nas áreas com predomínio de vegetação os efeitos da sazonalidade são claramente evidenciados, sendo possível constatar um maior sequestro de carbono na estação úmida em detrimento da estação de estiagem.

Ao analisar o comportamento da temperatura frente à sazonalidade, todas as cidades, com exceção de Belo Horizonte, que

teve imagem analisada no período do outono, apresentaram registros mais elevados na estação chuvosa do que na estação de estiagem. Isso pode ser explicado pelo fato de as imagens da estação de estiagem compreenderem o período de julho a setembro, que corresponde ao inverno e início da primavera, onde as temperaturas são mais amenas. No caso das imagens da estação chuvosa, todas as cidades compreendem o período do verão, cujos registros de temperatura são mais elevados.

Para todas as cidades os gráficos que relacionam as variáveis mostraram uma relação inversa entre sequestro de carbono e temperatura,

independente da estação. Na faixa de pixels correspondente a área urbanizada, o sequestro de carbono diminui enquanto a temperatura aumenta. Uma vez que a vegetação é a principal responsável pelo sequestro de carbono presente na atmosfera, e como o processo de urbanização envolve a supressão da vegetação, essa relação ficou bem evidenciada.

3.1 São Paulo

O transecto estabelecido para São Paulo saiu da Parque Estadual da Cantareira passando pela Avenida Paulista e chegando ao Parque Ecológico do Tietê (Figura 4).

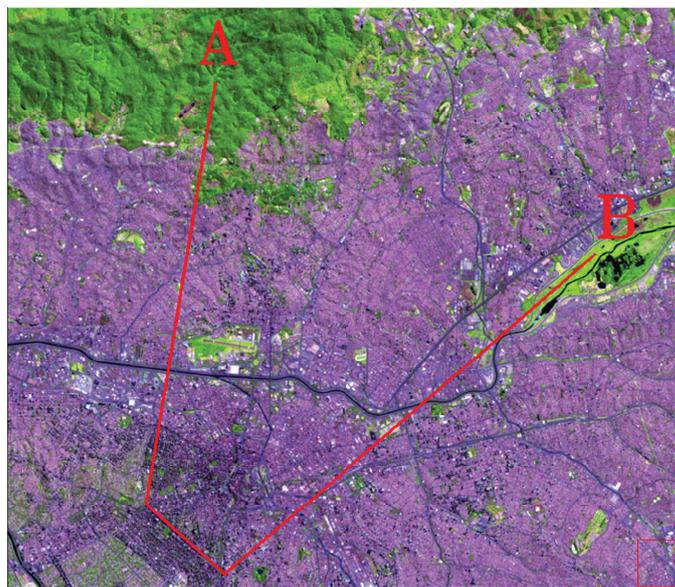


Fig. 4 – Transecto aplicado na imagem Landsat de São Paulo em composição R6G5B4.

Os valores de CO₂ flux se mostraram baixos, tanto na estação seca quanto na estação úmida, o que caracteriza uma variação mínima do sequestro de carbono em função da sazonalidade.

Já com relação à temperatura, a sazonalidade exerceu uma forte influência, apresentando valores de temperatura mais elevados na estação úmida (Figura 5).

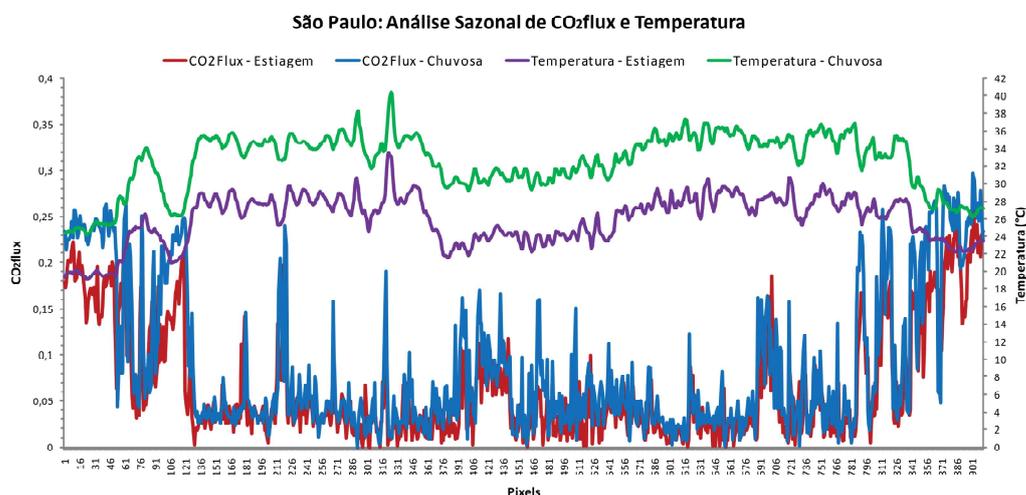


Fig. 5 – Resultado do transecto apresentando comportamento do CO₂ flux e da temperatura em função da sazonalidade na cidade de São Paulo.

A relação entre sequestro de carbono e temperatura para a referida cidade se mantém inversa, sendo que nesse caso, a temperatura determina a amplitude dessa variação, em que nos dois períodos analisados há uma diferença de aproximadamente 7°C nos valores máximos de temperatura.

Os resultados obtidos pelo coeficiente de correlação de Kendall demonstram a correlação inversa dos resultados, o que significa que enquanto há o acréscimo de uma variável, haverá o decréscimo da outra.

Para São Paulo os valores variaram de -0.3381 a -0.4514 entre as estações, o que implica numa correlação regular ou moderada negativa para ambas de acordo com a Tabela 4.

Tabela 4: Resultados do Coeficiente de Correlação de Kendall para a Cidade de São Paulo e suas Estações

	Estação	τ (TAUxy)
São Paulo	Estiagem	-0.3381
	Chuvosa	-0.4514

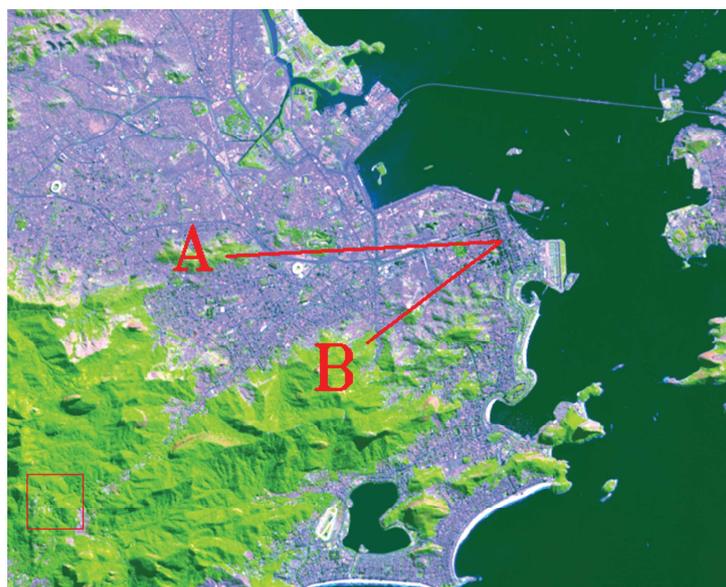


Fig. 6 – Transecto aplicado na imagem do Rio de Janeiro.

3.2 Rio de Janeiro

O transecto estabelecido para o Rio de Janeiro saiu de uma área de vegetação próximo ao Túnel Noel Rosa em Vila Isabel passando pelo Centro e chegando à Área de Proteção Ambiental Bairro de Santa Teresa (Figura 6).

O sequestro de carbono para a cidade do Rio de Janeiro, se comparado à cidade de São Paulo, apresenta uma maior variação em função da sazonalidade. Entretanto, essa variação fica mais evidente em áreas com predomínio de vegetação. No caso da temperatura, o mesmo padrão observado para a cidade de São Paulo se manteve, com temperaturas mais elevadas na estação úmida e temperaturas menores na estação seca (Figura 7).

A relação entre CO₂ flux e temperatura para a cidade do Rio de Janeiro se mantém inversa. Apesar de a cidade de São Paulo ter apresentado maiores registros de temperatura, no Rio de

Janeiro observou-se uma maior variação na amplitude dos valores de temperatura, chegando a uma diferença de até 10°C nos valores máximos de temperatura.

Os dados da cidade do Rio de Janeiro apresentaram valores entre -0.2742 e -0.4413, correlações consideradas, de acordo com a Tabela 5, fraca negativa para a estação de estiagem e regular ou moderada negativa para a estação chuvosa.

Tabela 5: Resultados do Coeficiente de Correlação de Kendall para a Cidade do Rio de Janeiro e suas estações

	Estação	τ (TAUxy)
Rio de Janeiro	Estiagem	-0.2742
	Chuvosa	-0.4413

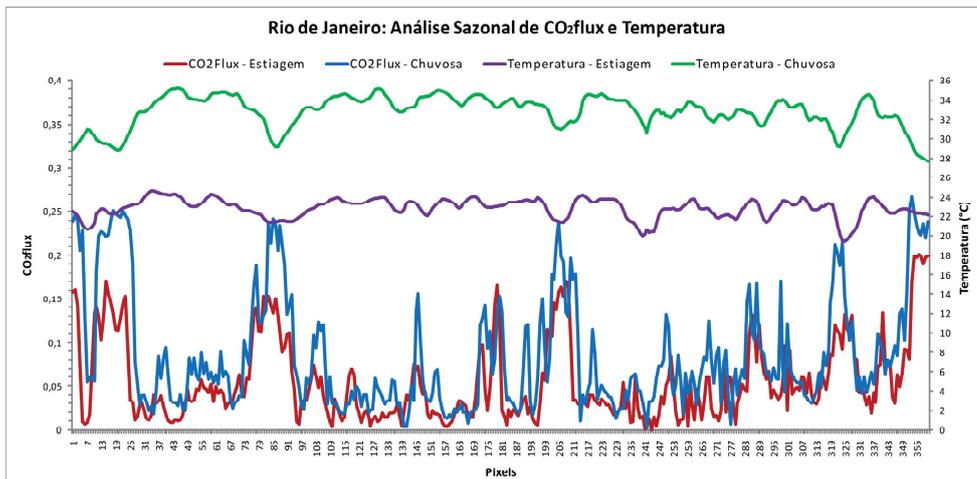


Fig. 7 – Resultado do transecto apresentando comportamento do CO₂flux e da temperatura em função da sazonalidade na cidade do Rio de Janeiro.

3.3 Belo Horizonte

O transecto estabelecido para Belo Horizonte parte de uma área de vegetação próximo ao Morro do Confisco passando pelo Centro e chegando no Mirante do Mangabeiras (Figura 8).

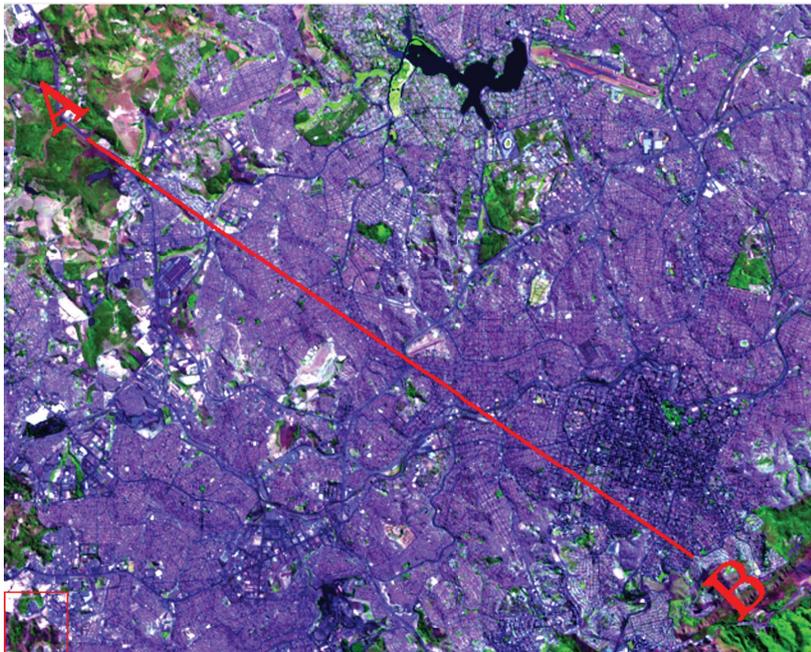


Fig. 8 – Transecto aplicado na imagem de Belo Horizonte.

O comportamento do CO₂flux na cidade demonstrou um padrão similar às cidades de São Paulo e do Rio de Janeiro, com uma baixa variação em função da sazonalidade (Figura 9).

O gráfico da cidade de Belo Horizonte apresentou comportamento bastante particular, com variações de temperatura bem menores em função da sazonalidade em toda a faixa encoberta pelo transecto. Esse fato pode ser explicado pela ocorrência de um evento de chuvas de grande intensidade na cidade, o qual

atingiu níveis pluviométricos 130% acima da média mensal histórica (INMET, 2013). Essa chuva exerceu forte influência na temperatura local e o comportamento do histograma é também explicado devido ao fato da imagem de estação chuvosa de Belo Horizonte corresponder ao mês de abril, ou seja, mudando o padrão de imagens de verão (janeiro e fevereiro) das outras cidades e se enquadrando na estação do outono, a qual apresenta temperaturas mais amenas (Figura 10).

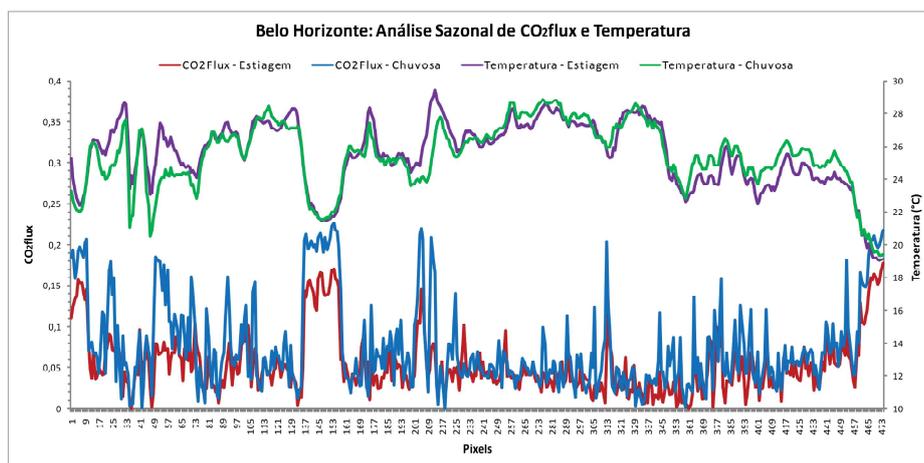


Fig. 9 – Resultado do transecto apresentando comportamento do CO2flux e da temperatura em função da sazonalidade na cidade de Belo Horizonte.

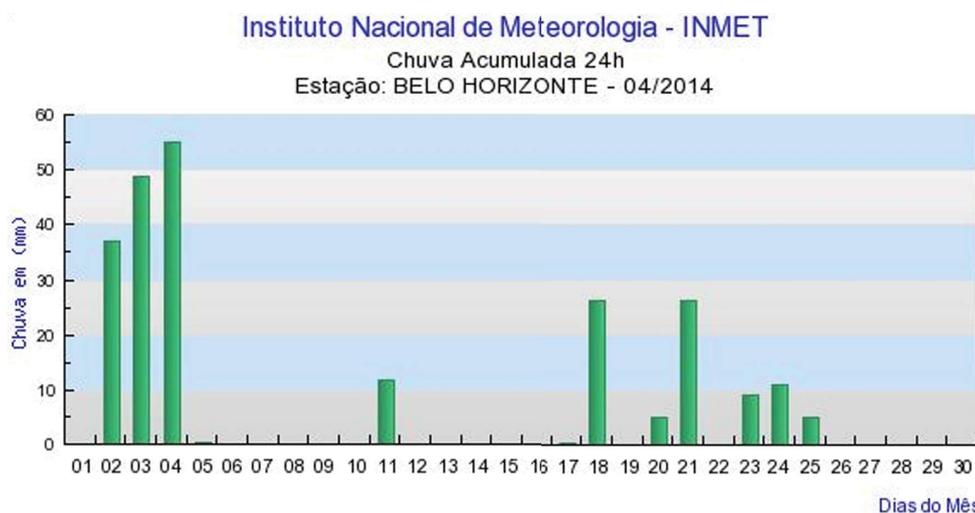


Fig. 10 – Chuva acumulada em 24h do mês de abril de 2014 na cidade de Belo Horizonte demonstrando a peculiaridade das chuvas do início desse mês. Fonte: INMET.

A cidade de Belo Horizonte, assim como outras grandes metrópoles brasileiras, sofreu intensas modificações ao longo da história em termos de modificação na estrutura de sua paisagem natural em detrimento do intenso processo de ocupação territorial, o que levou à intensificação do fenômeno de ilhas de calor. Na década de 1920, a cidade chegou a ser conhecida pelo nome de Cidade Jardim, em referência à presença de vegetação como uma característica predominante na composição da paisagem local. A partir dos anos 40, com a entrada de Juscelino Kubitschek na prefeitura da cidade, a mesma passou por um processo de modernização, com a construção de diversas obras arquitetônicas. Entretanto, foi a partir da década de 60 que, de acordo com Magalhães Filho (2006), a cidade

passa por uma fase intensa de crescimento, onde casas eram demolidas para dar lugar aos arranha-céus, o que resultou na derrubada de árvores e na pavimentação do solo.

Nas décadas seguintes, a degradação ambiental passou se intensificar ainda mais, como resultado direto do processo de urbanização, criando, de acordo com Magalhães Filho (2006) um “impacto ambiental de natureza térmica” na área urbana da cidade, o que fez com que a ilha de calor de Belo Horizonte gerasse uma pluma de contaminação térmica ao longo da região metropolitana da cidade, especialmente em direção aos municípios de Betim e Contagem.

A cidade apresentou correlação diferenciada entre suas estações. De acordo com a Tabela 6, para a estação de estiagem a correlação

resultou em -0.2362, considerada fraca negativa, enquanto que para a estação chuvosa o valor é de -0.343, implicando numa correlação regular ou moderada negativa.

Tabela 6: Resultados do Coeficiente de Correlação de Kendall para a Cidade de Belo Horizonte e suas Estações

	Estação	τ (TAUxy)
Belo Horizonte	Estiagem	-0.2362
	Chuvosa	-0.343

3.4 Brasília

O transecto estabelecido para Brasília parte de da Floresta Nacional de Brasília passando por Ceilândia, Taguatinga e Samambaia e chegando a uma mata de galeria próxima ao Recanto das Emas (Figura 11).

A variação do CO₂ flux na cidade de Brasília foi claramente evidenciada pela diferença entre as estações, fazendo com que a amplitude da variação do sequestro de carbono para Brasília seja superior às demais cidades, com média de 0,073 e 0,113 para as estações de estiagem e chuvosa, respectivamente (Figura 12).

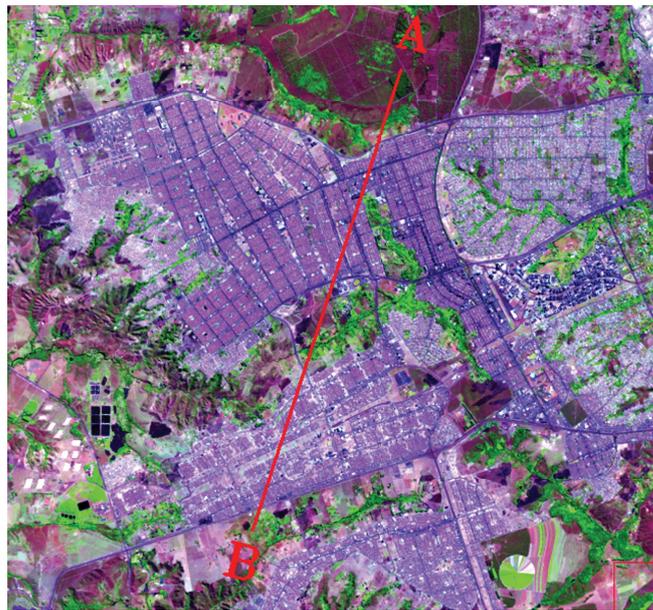


Fig. 11 – Transecto aplicado na imagem de Brasília.

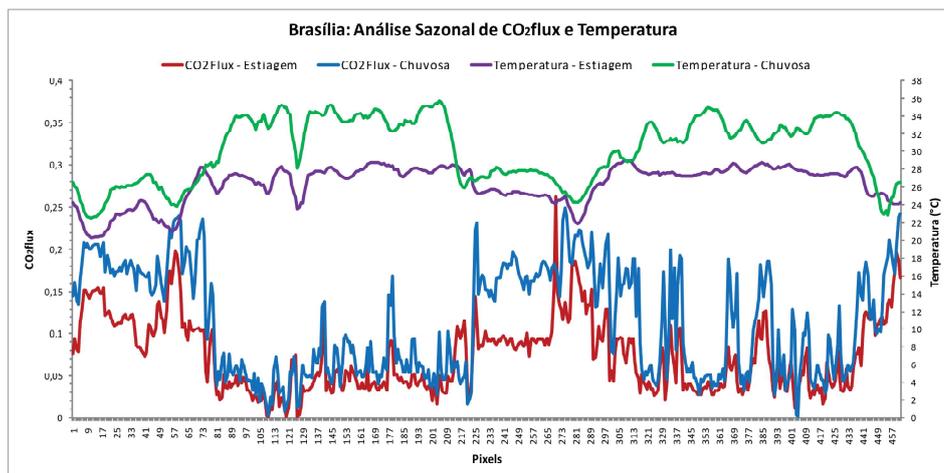


Fig. 12 – Resultado do transecto apresentando comportamento do CO₂ flux e da temperatura em função da sazonalidade na cidade de Brasília.

A variabilidade sazonal da cidade de Brasília vai de acordo com as observações realizadas por Terra-Oliveira e Baptista (2014), em que na estação de chuva (janeiro) o sequestro

de carbono é maior devido à vegetação mais vigorosa e na estação seca (setembro) há uma redução do sequestro de carbono devido ao período de estiagem onde a vegetação não se

encontra mais tão vigorosa e sua capacidade de sequestro é reduzida, característica típica do bioma Cerrado. Ainda assim é visível a grande diferenciação dos alvos, principalmente da urbana que prova o fato da supressão vegetal ser um problema em grandes centros urbanos.

Já com relação à temperatura, ainda que em menor escala, é possível verificar a influência da sazonalidade.

A relação entre sequestro de carbono e temperatura, assim como nas demais cidades se mantém inversa, sendo que para Brasília apresentou intervalo de aproximadamente 4°C entre as estações e, portanto, com uma amplitude menor comparada às cidades de São Paulo e Rio de Janeiro.

As Regiões Administrativas de Brasília têm um histórico peculiar ao serem comparadas com municípios periféricos de outras regiões metropolitanas brasileiras. Taguatinga foi a primeira região administrativa projetada em 1958 no intuito de proteger o Plano Piloto de invasões e ocupações irregulares no geral, assim, houve a necessidade de uma crescente criação de novas cidades para esse fim, as chamadas cidades satélites (PAVIANI, 2009). Taguatinga, Ceilândia e Samambaia compõem a maior parte da população brasiliense, sendo estimado quase 1 milhão de habitantes juntas, de acordo com a Pesquisa Distrital por Amostra de

Domicílios (PDAD 2015/2016).

A cidade demonstrou uma maior variação entre os coeficientes de correlação de suas estações havendo um intervalo de 0.20 entre elas. Isso se dá devido à maior redução da evapotranspiração do extrato herbáceo em relação às outras cidades, característica do bioma Cerrado para essa estação. Os coeficientes implicam, de acordo com a Tabela 7, numa correlação regular ou moderada negativa para ambas as estações.

Tabela 7: Resultados do Coeficiente de Correlação de Kendall para a Cidade de Brasília e suas Estações

	Estação	τ (TAUxy)
Brasília	Estiagem	-0.3653
	Chuvosa	-0.563

A Tabela 8 apresenta os resultados da estatística descritiva com valores mínimos e máximos observados para cada cidade, nas estações seca e chuvosa, bem como suas respectivas médias e desvios padrão, compreendendo a faixa de *pixels* abrangida pelos transectos correspondentes a cada área.

Tabela 8: Variação de CO₂flux e Temperatura em função da sazonalidade, na faixa de pixels abrangida pelos transectos

	CO ₂ flux				Temperatura (°C)			
	Valor Mínimo	Valor Máximo	Média	Desvio Padrão	Valor Mínimo	Valor Máximo	Média	Desvio Padrão
SP – ESTIAGEM	0	0,257	0,065	0,061	19,1	33,5	25,8	2,8
SP – CHUVOSA	0	0,297	0,087	0,078	24,2	40,4	32,4	3,2
RJ – ESTIAGEM	0	0,201	0,055	0,046	19,4	24,6	22,8	0,9
RJ – CHUVOSA	0,002	0,267	0,086	0,066	27,6	35,1	32,7	1,66
BH – ESTIAGEM	0	0,177	0,054	0,037	19,0	29,4	25,5	2,0
BH – CHUVOSA	0	0,226	0,075	0,054	19,3	28,8	25,4	1,9
BSB – ESTIAGEM	0,002	0,262	0,073	0,043	20,3	28,9	26,3	2,1
BSB – CHUVOSA	0,002	0,249	0,113	0,064	22,5	35,6	30,2	3,6

A crescente urbanização dos centros, normalmente não planejada, acarreta consequentemente em taxas de supressão vegetal muito altas, principalmente em locais com elevada densidade demográfica e assentamentos informais. Assim, pode-se relacionar o impacto da supressão vegetal a “alterações no microclima, elevação da temperatura, alterações no regime de chuvas, alagamentos devido à falta de superfícies permeáveis e outros que competem à qualidade de vida e à saúde pública” (COPQUE *et al.*, 2011).

De acordo com Laera (2007) apesar das florestas urbanas estocarem menos carbono por hectare em árvores, o estoque e o sequestro de carbono por unidade de árvore urbana pode ser maior do que em extratos florestais. Esse fato ocorre principalmente pela quantidade de árvores de maior porte nesses centros urbanos devido à estrutura urbana mais aberta e à possibilidade de maior taxa de crescimento (NOWAK, 1994).

Observando as imagens apresentadas na

Figura 13, percebe-se claramente a diferença entre o padrão de ocupação entre as cidades. De modo geral, nas cidades de São Paulo e Rio de Janeiro predominam temperaturas acima de 35°C, de modo geral. Enquanto que nas cidades de Brasília e Belo Horizonte, que apesar da ocupação intensa, apresentam registros de temperatura menores que as duas primeiras, sendo que no caso de Belo Horizonte, as temperaturas são ainda menores, em função do evento histórico de precipitação mencionado anteriormente.

Ainda de acordo com a Figura 13, as cidades do Rio de Janeiro e São Paulo, as quais são consideradas as duas maiores cidades brasileiras, apresentaram padrão de ocupação com maior intensidade na área urbana, na qual a presença de vegetação em meio aos pavimentos e edificações é mínima. Isso, ao mesmo tempo que reflete em temperaturas mais elevadas, também reforça a importância do papel da vegetação como reguladora do clima, especialmente em escala local.

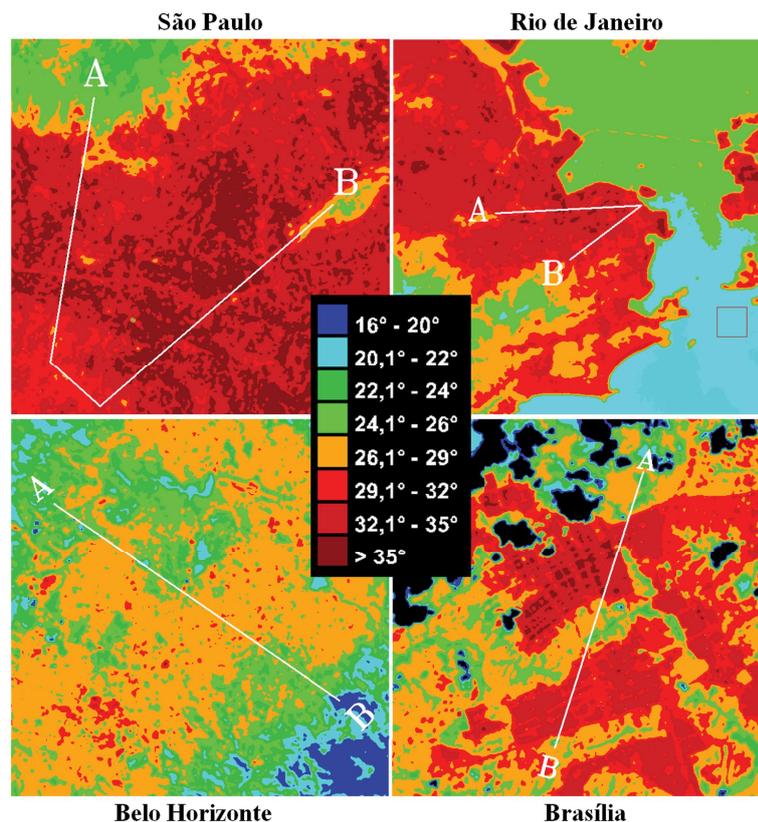


Fig. 13 – Resultado do fatiamento aplicado nas imagens de temperatura, em graus Celsius.

A fraca influência da sazonalidade e os altos intervalos de temperatura para a cidade de São Paulo podem ser explicados pela característica diferenciada em relação às outras três cidades.

São Paulo está entre as dez áreas mais populosas do mundo, com cerca de 21 milhões de habitantes em sua região metropolitana e podendo ser comparada com cidades como Xangai, Cidade

do México, Déli, Tóquio e Beijing (ONU, 2014). O trabalho de Choi *et al.* (2014) demonstrou variações de temperaturas em Tóquio, Seul e Beijing, as quais apresentam intervalos de até 13°C de diferença, principalmente no verão, dado semelhante ao descrito em São Paulo.

O que explica as elevadas temperaturas nas aglomerações urbanas é o fato de o fenômeno de ilhas de calor estar fortemente associado ao aumento do calor absorvido pelos materiais utilizados na pavimentação e edificações que integram a paisagem urbana (TEZA & BAPTISTA, 2005). Parte da energia recebida pela superfície terrestre é refletida, e essa refletividade pode ser explicitada pelo albedo.

Levermore *et al.* (2017) mapearam as ilhas urbanas de calor na cidade de Manchester (Inglaterra) e perceberam que nos últimos nove anos a cidade enfrenta um processo de intensificação das ilhas. Os autores apontam que alguns fatores influenciam nesse fenômeno, como a redução da cobertura de nuvens, porém essa influência é mínima, sendo a urbanização o maior fator significativo para a intensidade das ilhas urbanas de calor.

Apesar da relação direta da formação das ilhas urbanas de calor com a irradiação, mais pesquisas devem ser realizadas em períodos noturnos. Com Sensoriamento Remoto isso é possível por meio de alguns sensores que captam dados também no período noturno. Um estudo recente (MATHEW *et al.*, 2017) utiliza o sensor MODIS (*Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer*) para o mapeamento de duas cidades na Índia. Efeitos moderados a fracos das ilhas urbanas de calor são identificados nas cidades durante o dia, porém à noite em ambas as cidades se encontrou fortes efeitos do fenômeno. Isso acontece devido à propriedade do solo de rapidamente se aquecer e esfriar, fato que não ocorre com materiais antropogênicos como concreto e asfalto (MATHEW *et al.*, 2017).

As ilhas urbanas de calor têm impacto direto com o bem-estar e saúde da população, bem como com questões ambientais. Wong *et al.* (2017) aponta efeitos do aumento de temperatura nas ilhas urbanas de calor da Malásia com o decréscimo de recursos de água, aumento de poluição e névoa, efeitos negativos físicos e psicológicos nos trabalhadores das partes centrais da cidade. O aumento de calor

também tem como consequência o acréscimo da demanda energética, por todos esses motivos é imprescindível uma melhor gestão e políticas para a mitigação eficiente das ilhas urbanas de calor. Muito tem se falado sobre pavimentos e materiais frios com alto albedo e baixa capacidade calorífica como forma para redução da temperatura. Yang *et al.* (2017) utilizaram um sistema de telhado frio e encontraram uma média de 6.8°C de decréscimo na temperatura.

Apesar de bons resultados encontrados nesses métodos para a mitigação, ainda a melhor forma de reduzir temperaturas e contribuir para uma melhora da atmosfera local é a implementação de vegetação nas ruas, de parques e telhados verdes (MOHAJERANI *et al.*, 2017). Mohajerani *et al.* (2017) também atentam ao fato de que as formas de mitigação devem ser estudadas de acordo com cada clima e em conjunto, pois a aplicação, por exemplo, de apenas pavimentos frios pode gerar um efeito inverso ao esperado.

A diminuição da temperatura observada em áreas de vegetação, e consequente aumento do sequestro de carbono ocorre devido ao fato de a vegetação afetar o microclima de maneira substancial (MANAHAN, 2013). Em massas vegetais mais densas, quase não há circulação do ar na região da superfície, devido aos limites impostos pela vegetação contra a convecção e difusão. Grande parte da energia solar é interceptada pela copa das árvores, levando a um aquecimento solar máximo que e fazendo com que a região abaixo da copa das árvores mantenha-se a temperaturas relativamente estáveis.

Além disso, de acordo com Manahan (2013), em uma massa vegetal densa, a evaporação a partir da superfície do solo não é responsável pela maior parte da perda de umidade, mas sim a transpiração das folhas das plantas. Com isso, tem-se condições de temperatura e umidade que contribuem para a manutenção de um ambiente favorável à vida para diversos organismos.

Outro aspecto levantado pelo autor demonstra que, em ambientes rurais a vegetação e os corpos hídricos têm efeito moderador, absorvendo níveis modestos de energia solar e liberando-a lentamente. Já com relação às áreas urbanas, a presença em larga escala de materiais tais como rocha, asfalto, concreto e outros,

exerce um efeito oposto, absorvendo quantidades substanciais de energia solar e reirradiando essa energia para o microclima urbano.

Molion (2001), num estudo de séries históricas na Austrália, salientou o fato da expansão urbana crescente interferir em dados meteorológicos já que antigamente as estações meteorológicas ficavam isoladas e atualmente muitas estão inseridas em meio urbano e principalmente em locais indevidos, o que afetará consideravelmente o produto final desses dados e análises equivocadas podem ser construídas. Em seu estudo, o autor demonstra claramente o efeito das ilhas urbanas de calor quando em suas análises há um acréscimo da temperatura em área urbana, porém um decréscimo nas áreas rurais.

Todas as cidades apresentaram comportamento de maior correlação das variáveis na estação de chuva e, conseqüentemente, menores valores na estação de estiagem, isso se dá ao fato das diferenças da vegetação nas estações. Na estação de chuva a relação é maior devido à vegetação estar mais vigorosa e potencializar a quantidade de vapor d'água na atmosfera por meio da evapotranspiração, e principalmente devido ao fato de as imagens serem de estações anuais distintas, as quais pertencem ao inverno (estiagem) e verão (chuvosa), portanto a variação de temperatura nessas estações sofre influência da radiação recebida pelo planeta. A variação das estações de inverno e verão acontece devido a inclinação do eixo terrestre em $23,5^\circ$, a qual provoca o fenômeno das estações do ano, assim, para o hemisfério sul, quando a Terra encontra-se no afélio (mais distante do sol) e periélio (mais próxima ao sol) a radiação recebida é diferenciada (CHRISTOPHERSON, 2012).

A variação de radiação também implica na diferença dos dados, agora em estação de inverno, os quais apresentam as mais baixas temperaturas e relação irregular com o sequestro de carbono, ou seja, ao contrário do verão, a Terra encontra-se no afélio e devido à inclinação da órbita recebe-se menos radiação para o hemisfério sul nesse período. Este fato desmistifica a ideia de que na estação de estiagem, com a diminuição do sequestro de carbono as temperaturas seriam mais elevadas por ter maiores conteúdos de CO_2 no ar, porém, os principais reguladores da temperatura são a intensidade da radiação recebida nas estações distintas, a diferença na

concentração de vapor d'água na atmosfera e o fenômeno das ilhas de calor urbanas.

Encontrar formas de tornar as cidades mais frias reduzirá o consumo de energia e o uso de combustíveis fósseis (CHRISTOPHERSON, 2012), recurso limitado no nosso planeta e também reduzirá o efeito de ilhas urbanas de calor. A *United States Environmental Protection Agency* criou um programa para a mitigação do fenômeno por meio de vários métodos como o aumento da cobertura vegetal nas cidades, instalação de telhados mais reflexivos, implementação de pavimentos com materiais mais frios e a instalação de telhados verdes, também conhecidos como eco-telhados (EPA, 2014). A cidade de Stuttgart na Alemanha conta com legislações municipais desde 1989, as quais obrigam prédios com telhado plano a terem telhados verdes (KLINKERBORG - NATIONAL GEOGRAPHIC, 2009).

4. CONCLUSÃO

Esse estudo permitiu verificar com êxito que o sensoriamento remoto é uma ferramenta bastante eficaz no mapeamento de ilhas de calor urbanas e do sequestro de carbono em grandes metrópoles. Além disso, por meio do cruzamento desses dados foi possível identificar que a diminuição do teor de vegetação em uma área impacta diretamente no aumento da emissão de calor, já que a supressão vegetal abre espaço para a construção de pavimentos e edificações.

O vigor da vegetação é fortemente influenciado pela ocorrência ou não de precipitação, fato esse que interferiu diretamente na variação sazonal dos valores do CO_2 flux. O fato de a vegetação aumentar sua atividade fotossintética na estação chuvosa (verão) implicou em maiores níveis de sequestro de carbono.

Os valores de temperatura também variaram em função da sazonalidade. No verão a temperatura se eleva em virtude da maior intensidade de radiação recebida pelos alvos e maior concentração de vapor d'água na atmosfera. Já no inverno o comportamento é inverso, implicando, assim, em menores valores de temperatura.

O coeficiente de Kendall comprovou a relação inversa entre as duas variáveis estudadas comparando-se cenários com predomínio de vegetação e com predomínio de edificações em uma mesma cena, isto é, maiores valores de

CO₂ flux e menores registros de temperatura em áreas com predomínio de vegetação e o contrário para alvos predominantemente urbanos.

O fenômeno das ilhas de calor urbanas foi comprovado nesse estudo e pode ser explicado, além da presença de materiais armazenadores de calor nas grandes metrópoles, pela melhoria do planejamento urbano e inserção de diretrizes voltadas à preservação das áreas verdes, que irão favorecer o aumento da taxa de captura de carbono a nível local.

Para trabalhos futuros sugere-se o desenvolvimento de pesquisas que verifiquem a eficiência dos telhados verdes como solução para minimizar os efeitos do fenômeno das ilhas de calor urbanas e resolver a problemática da supressão vegetal nos grandes centros urbanos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARRAU, C. P.; PEÑA, M. A. **Urban Heat Islands**. Disponível: <http://www.urbanheatlands.com> Acesso: 14 jun. 2015.

CALLEGARI-JACQUES, S. M. **Bioestatística: princípios e aplicações**. Artmed: Porto Alegre, 2013, 264p.

CÂMARA, F. G. **Estatística Não Paramétrica – Testes de Hipóteses e Medidas de Associação**. Departamento de Matemática da Universidade do Açores: Ponta Delgada, Portugal, 2001, 121p.

CHOI, Y.-Y.; Suh, M.-S.; Park, K.-H. Assessment of Surface Urban Heat Islands over Three Megacities in East Asia Using Land Surface Temperature. Data Retrieved from COMS. **Remote Sensing**, 6, p. 5852-5867, 2014.

CHRISTOPHERSON, R. **Geossistemas: uma introdução à geografia física**, 7ª Ed. Bookman, Porto Alegre, 2012, 688p.

COPQUE, A. C. S. M.; SOUZA, F. A.; SANTOS, D. V. C.; PAIXÃO, R. C. Expansão urbana e redução de áreas verdes na localidade do Cabula VI Região do miolo da cidade do Salvador, Bahia. **XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, 706, 2011.

D'AGOSTINO, R. B.; BELANGER, A.; D'AGOSTINO JUNIOR, R. A suggestion for using powerful informative tests of normality. American Statistical Association – **The American Statistician**, 44 (4), 1990.

DOURADO FILHO, S. Estudo do comportamento termodinâmico das áreas centrais de negócios de Brasília e Taguatinga, Distrito Federal. **Dissertação (Mestrado)**. Brasília, Universidade Católica de Brasília, 2004.

EPA – ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Reducing Urban Heat Islands: Compendium of Strategies – Green Roofs**, 2014. Disponível: <http://www.epa.gov/sites/production/files/2014-06/documents/greenroodscompendium.pdf>. Acesso: 10 jul. 2015.

FIALHO, E. S. Ilha de Calor: reflexões acerca de um conceito. **ACTA Geográfica**, Ed. Esp. Climatologia Geográfica, pp.61-76, 2012. <http://dx.doi.org/10.5654/acta.v0i0.1094>

GALSTON, A. W. Photosynthesis as a basis for life support on Earth and in space. **Bioscience**, v. 42, n. 7, p. 490-493, 1992.

GAMON, J. A.; SERRANO, L.; SURFUS, J. S. The photochemical reflectance index: an optical indicator of photosynthetic radiation use efficiency across species, functional types, and nutrient levels. **Oecologia**, 112, p. 492-501, 1997.

HOWARD, L. 1818. **The Climate of London Deduced from Meteorological Observations**. London, U.K.: W. Phillips. Vol 1, 221p.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. Disponível em: <cidades.ibge.gov.br>. Acesso em 30 de setembro de 2014.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – BGE. **Censo Demográfico 2010**. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/english/estatistica/populacao/censo2010/caracteristicas_da_populacao/resultados_do_universo.pdf>. Acesso em 29 de setembro de 2014.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Síntese de Indicadores Sociais do IBGE**. Disponível em: <[FTP://ftp.ibge.gov.br/Indicadores_Sociais/Sintese_de_Indicadores_Sociais_2013/pdf/asp_demograficos_pdf.pdf](ftp://ftp.ibge.gov.br/Indicadores_Sociais/Sintese_de_Indicadores_Sociais_2013/pdf/asp_demograficos_pdf.pdf)> Acesso em: 12 de novembro de 2013. INMET.

INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA

- APLICADA – IPEA. Disponível em: <http://www.ipea.gov.br/redeipea/images/pdfs/governanca_metropolitana/rell_1_ridedf.pdf>
- INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. **Gráficos Climatológicos**, 2015. Disponível: <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/graficosClimaticos>. Acesso: 30 jun. 2015.
- KAZMIERCZAK, M. L. Sensoriamento remoto para incêndios florestais. In: SUSEN, T. M.; LACRUZ, M. S. P. **Sensoriamento Remoto para Desastres**. São Paulo: Oficina de Textos, 2015, p. 175-212.
- KLINKENBORG, V. **Up to the roof - Green Roofs**. National Geographic Magazine [online], 2009. Disponível:<http://ngm.nationalgeographic.com/2009/05/green-roofs/klinkenborg-text>. Acesso: 01 jul. 2015.
- LAERA, L. H. N. **Arborização urbana e o sequestro de carbono – um potencial mercado a ser explorado na cidade do Rio de Janeiro**. Fundação Parques e Jardins: Rio de Janeiro, 2007, 7p. Disponível: http://www.ecoeco.org.br/conteudo/publicacoes/encontros/vi_en/artigos/mesa3/arborizacao_sequestro_carbono.pdf. Acesso: 01 jul. 2015.
- LEVERMORE, G. J.; PARKINSON, J. B. An empirical model for the urban heat island intensity for a site in Manchester. **Building Services Engineering Research and Technology**, 38 (1), p. 21-31, 2017.
- MAGALHÃES FILHO, L. C. A. Ilha de calor urbana, metodologia para mensuração: Belo Horizonte, uma análise exploratória. **Tese (Doutorado)**. Belo Horizonte, Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, 2006.
- MALHI, Y.; BALDOCCHI, D. D.; JARVIS, P. G. The carbon balance of tropical, temperate and boreal forests. **Plant, Cell and Environment**, 22, p. 715-740, 1999.
- MANAHAN, S. E. **Química Ambiental**, 9ª ed. Bookman, Porto Alegre, 2013. 944p.
- MARKHAM, B. L.; BARKER, J. L. Landsat MSS and TM post-calibration dynamic ranges exoatmospheric reflectance and at-satellite temperatures. **EOSAT Landsat Tech. Notes** (Aug.), 3-8, 1986.
- MATHEW, A.; KHANDELWAL, S.; KAUL, N. Investigating spatial and seasonal variations of urban heat island effect over Jaipur city and its relationship with vegetation, urbanization and elevation parameters. **Sustainable Cities and Society**, 35, p. 157-177, 2017.
- MOHAJERANI, A.; BAKARIC, J.; JEFFREY-BAILEY, T. The urban heat island effect, its causes, and mitigation, with reference to the thermal properties of asphalt concrete. **Journal of Environmental Management**, 197, p. 522-538, 2017.
- MOLION, L. C. B. Aquecimento Global: fato ou ficção. **Ação e Ambiental**, 18, p. 19-21, 2001.
- NOWAK, D. J.; MCPHERSON, E. G.; ROWNTREE, R. A. Chicago's urban forest ecosystem: results of Chicago urban forest climate project. **USDA Forest Service Gem Tech. Rep**, 186, 1994.
- ONU – Organização das Nações Unidas, 2014. Disponível: http://www.un.org/en/development/desa/news/population/world-urbanizationprospects2014.html?utm_term=United+Nations,+DESA,+Social,+Economic&utm_content=DESA+assists+countries+in+agendasetting+and+decisionmaking+with+the+goal+of+meeting+their+economic+social+and+environmental+challenges.&utm_source=twitterfeed&utm_medium=twitter. Acesso: 21 jul. 2015.
- PAVIANI, A. Demandas sociais e ocupação do espaço urbano. O caso de Brasília, DF. **Cadernos Metrôpole** 21, 75-92, 2009.
- RAHMAN, A. F.; GAMON, J. A.; FUENTES, D. A.; ROBERTS, D.; PRENTISS, D.; QIU, H. Modeling CO2 flux of boreal forests using narrow-band indices from AVIRIS imagery. **Journal of Geophysical Research**, 106, No. D24, p. 33,579-33,591, 2001
- RAO, P.K. Remote sensing of urban “heat islands” from an environmental satellite. **Bulletin of the American Meteorological Society**, 53, p. 647-648, 1972.
- ROTH, M. Urban heat islands. **Handbook of environmental fluid dynamics**. Volume two: systems, pollution, modeling, and measurements. CRC Press, Boca Raton, FL, p. 143-160, 2013.

- ROUSE, J. W.; HASS R. H.; SCHELL, J. A.; DEERING, D. W. Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS. **NASA Remote Sensing**, 309-317, 1973.
- TERRA-OLIVEIRA, M.; BAPTISTA, G. M. M. Variações na Modelagem do fluxo de CO₂ na Área Metropolitana de Brasília, por meio de Dados OLI do Landsat 8. **XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, 323-330, 2015.
- TEZA, C. T. V.; BAPTISTA, G. M. M. Identificação do fenômeno de ilhas urbanas de calor por meio de dados ASTER on demand 08 – Kinetic Temperature (III): metrópoles brasileiras. **XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, 3911-3918, 2005.
- USGS. About Landsat., 2012. Disponível: http://landsat.usgs.gov/about_ldcm.php. Acesso: 20 jun. 2015.
- WONG, L. P. ALIAS, H. AGHAMOHAMMADI, N. AGHAZADEH, S. SULAIMAN, N. M. N. Urban heat island experience, control measures and health impact: A survey among working community in the city of Kuala Lumpur. **Sustainable Cities and Society**, 35, p. 660-668, 2017.
- WUKELIC, G. E.; GIBBONS, D. E.; MARTUCCI, L. M.; FOOTE, H. P. Radiometric calibration of Landsat Thematic Mapper Thermal Band. **Remote Sensing of Environment**, 28, p. 339-347, 1989.
- YANG, Y. K.; KANG, I. S.; CHUNG, M. H.; KIM, S. M.; PARK, J. C. Effect of PCM cool roof system on the reduction in urban heat island phenomenon. **Building and Environment**, 2017. 19 p.
- YU, C. M. **Sequestro de carbono no Brasil: dimensões políticas, socioeconômicas e ecológicas**. São Paulo: Annablume, 2004. 278 p.