

Análise do Comportamento da Temperatura de Superfície e Fluxo de Calor no Solo: um Estudo de Caso no Perímetro Urbano de Montes Claros, Minas Gerais

Analysis of the Behavior of Surface Temperature and Heat Flow in Soil: a Case Study in the Urban Area of Montes Claros, Minas Gerais

Manoel Reinaldo Leiteⁱ

Universidade Estadual de Montes Claros
Montes Claros, Brasil

Lucas Augusto Silvaⁱⁱ

Universidade Estadual de Montes Claros
Montes Claros, Brasil

Raul de Magalhães Filhoⁱⁱⁱ

Universidade Estadual de Montes Claros
Montes Claros, Brasil

Resumo: Este trabalho objetiva compreender o comportamento do fluxo de calor no solo e da temperatura de superfície em diferentes usos e ocupações no perímetro urbano do município de Montes Claros (Minas Gerais) através de técnicas de sensoriamento remoto. A escolha desta área de estudo se deu devido ao crescimento populacional exercido sobre Montes Claros, e, em função deste crescimento, a demanda por construções habitacionais e suprimentos alimentícios industrializados aumentam gradativamente; assim, entender o comportamento das variáveis apresentadas é de suma importância. Os resultados expostos nesta pesquisa mostraram-se pertinentes aos estudos sobre a dinâmica das ocupações do uso do solo urbano para com as variáveis do balanço de energia. O fluxo de calor no solo teve os menores valores para áreas com cobertura vegetal bem definida, assim como áreas de Cerrado e Floresta Tropical Caducifólia, com comportamento reverso às áreas de natureza antrópica, entretanto, salienta-se o elevado valor de fluxo de calor no solo para corpos hídricos, justificado pela fundamentação de quantidade de

ⁱ Professor do Departamento de Geociências; Departamento de Engenharia de Minas das Faculdades Integradas Pitágoras de Montes Claros. leitemanoelreinaldo@gmail.com

ⁱⁱ Pesquisador estagiário do Laboratório de Geoprocessamento. lucaskaio1605@gmail.com

ⁱⁱⁱ Mestrando em Geografia, Pesquisador bolsista do Laboratório de Geoprocessamento. rgeo.sig@gmail.com

energia utilizada para aquecimento dos corpos hídricos e pelas literaturas analisadas. As médias termais aqui analisadas seguiram o comportamento do fluxo de calor no solo em relação às áreas de vegetação nativa, com menores valores e maiores valores para áreas antropogênicas dentro do perímetro urbano de Montes Claros.

Palavras-Chave: Fluxo de Calor no Solo; Temperatura de Superfície; Uso da Terra.

Abstract: The goal of this work is to use remote sensing methods to understand the behavior of soil heat flux and surface temperature in different urban land uses in Montes Claros. This municipality was chosen for study because the city has experienced rapid population growth which has increased demand for housing and industrialized food supplies. The results presented in the research are shown to be relevant for other studies treating urban land use dynamics related to energy balance variables. The heat flux in the soil had the lowest values for areas with well defined vegetation cover, both Cerrado and Tropical Rainforest, and the opposite was observed in areas of anthropic action. However, the highest value of heat flow in the soil occurred in water, justified by the amount of energy used to heat water mass and by the analyzed literature. The thermal averages analyzed here followed the flux of soil heat flux in relation to native vegetation areas, with lower values and higher values observed for anthropogenic areas within the urban zone of Montes Claros.

Keywords: Soil Heat Flux; Surface Temperature; Land Use.

Introdução

O crescimento populacional é um fator que pode contribuir significativamente para os avanços de problemas ambientais nas áreas urbanas, uma vez que, o fluxo populacional tende demandar mais espaço nas ocupações do solo e, conseqüentemente, afetando áreas naturais, como a vegetação, para as construções de edifícios, inserção de pavimentações e etc.

No século 18, com a Revolução Científica-Tecnológica, ocorreram transformações significativas na capacidade antropogênica de produção e de intervenção na natureza, gerando certo crescimento econômico desordenado acompanhado da grande utilização de energia e intensificação da exploração dos recursos naturais (FREITAS et al., 2016).

Uma dinâmica que é recorrente debatida no cenário científico acerca das transformações ocasionadas pelas ações humanas, é a climática, bem como as suas variáveis, que por vez são voláteis a eventos meteorológicos (a exemplo do *El Niño* e *La Niña*) e às mudanças demasiadas na estrutura natural do meio. É sabido que as variáveis climáticas são advindas do balanço de radiação e energia em constante interação da Terra para com a atmosfera, e diante deste devir é possível nortear as atividades antrópicas como influenciadoras diretas no balanço de radiação e energia à superfície.

Diante desta premissa, os estudos em prol da dinâmica entre o uso do solo urbano e componentes do balanço energético vêm se intensificando nos últimos anos, estudos como os de Pereira et al., (2017), Nascimento (2011), Lombardo (1985), Kim e Baik (2005),

Nichol (1996) e Weng et al. (2004). Assim, entre os parâmetros que tendem a sofrer distorções em suas propriedades com maior intensidade, são a temperatura de superfície e o fluxo de calor no solo, uma vez que os mesmos são parâmetros que mantêm relação intrínseca com os usos e ocupações.

O fluxo de calor no solo, representa a transferência de energia nas camadas superficiais do solo para as do interior. Este fluxo é fortemente dependente das condições climáticas e, também, das condições da superfície (BEZERRA, 2006). De acordo com Tubelis e Nascimento (1980), este fluxo energético pode ser positivo e negativo. Ele é positivo quando há entrada (descendente) de energia nas camadas do solo aquecendo-o, e negativo quando é ascendente, ou seja, quando a energia é dissipada, tendo o comportamento proporcional ao balanço diário de radiação. Já a temperatura de superfície refere-se ao fluxo de calor dado em função da energia que chega e sai do corpo, sendo de extrema importância para o entendimento das interações superfície terrestre-atmosfera (PEREIRA et al., 2012).

Diversas técnicas são desenvolvidas para subsidiar estes estudos, como o apoio técnico operacional das geotecnologias, tendo ênfase no sensoriamento remoto, que diante da percepção de Rosa (2011) é uma forma de obter informações acerca da superfície terrestre sem que haja contato físico com os corpos situados na mesma, tendo uma assinatura/resposta espectral individual dos corpos na superfície.

Como incremento fundamental para as análises supracitadas, vêm sendo desenvolvidos diversos modelos matemáticos para auxiliar as técnicas de sensoriamento remoto, entre estes, tem-se o SEBAL. O SEBAL é um algoritmo de grande aceitação na comunidade científica, uma vez que o mesmo vem propiciando vários resultados satisfatórios quanto à mensuração de dados envolvendo o balanço de radiação e energia. Este algoritmo foi testado e validado em diversas regiões do mundo como, por exemplo, EUA, China, Egito, Espanha, Argentina, Índia, Brasil entre outros, conforme Tasumi (2003).

Diante do exposto, este trabalho se objetivou em compreender o comportamento do fluxo de calor no solo e da temperatura de superfície em diferentes usos e ocupações do solo no perímetro urbano do município de Montes Claros (Minas Gerais) através de técnicas de sensoriamento remoto e algoritmo SEBAL, aplicado em 16/7/2016.

A escolha desta área de estudo se deu devido ao crescimento populacional que vem ocorrendo em Montes Claros, e, em função deste crescimento, a demanda por construções habitacionais e suprimentos alimentícios aumenta gradativamente, assim, entender o comportamento das variáveis apresentadas (fluxo de calor no solo e temperatura de superfície) é de suma importância.

Material e Métodos

Caracterização da Área de Estudo

O perímetro urbano do município de Montes Claros está inteiramente inserido na bacia hidrográfica do Rio Vieira, ocupando 15,80% das suas terras. Conforme destacam os dados do censo de 2010 do IBGE a cidade abriga uma população de 344.479 habitantes, com densidade demográfica de 3.770,57 ha.b/km², valor 37,18 vezes maior que

a densidade demográfica do município, cuja população total é de 361.915 habitantes, distribuídos numa área de 3.568,94 km² (IBGE, 2011).

No entender de Leite (2006), Montes Claros se destaca como um dos principais entroncamentos rodoviários do país, sendo três rodovias federais e duas rodovias estaduais passando pelo perímetro urbano. São elas: a BR 135, que liga Montes Claros a Belo Horizonte e ao estado da Bahia; a BR 365, que liga a Uberlândia; a MG 251, que conecta a BR 116 (Rio–Bahia) a Montes Claros; a MG 308, que liga Montes Claros ao município de Juramento, e a MG 654, que conecta Montes Claros ao Noroeste de Minas como pode ser observado na Figura 1.

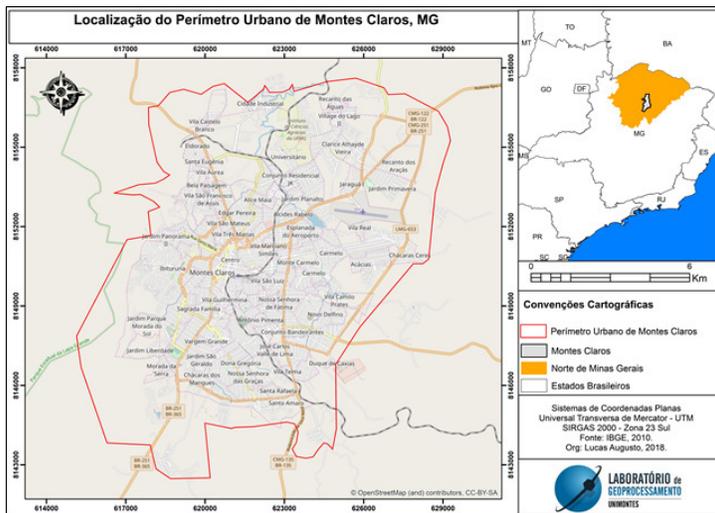


Figura 1 – Localização da Área de Estudo

No tocante à climatologia da área de estudo, Nimer e Brandão (1989) classifica o clima no perfil tropical quente semiúmido úmido, próximo aos limites do semiúmido seco, com períodos de 4 a 6 meses secos. Quanto ao aspecto climático, faz-se necessária a descrição no dia 16/7/2016, que conforme o INMET, registrou média de temperatura do ar em 23,12 °C, não registrando eventos pluviométricos nesta data. É importante frisar que de acordo com os registros do INMET, não teve registro de eventos pluviométricos 5 dias antes da análise, e dessa forma tende a deixar a superfície urbana propícia a elevado aquecimento.

No que se refere aos aspectos biogeográficos, o município de Montes Claros tem predominância de vegetação de Cerrado, sendo arbustivo e arbóreo, além de formações afins de Cerrado, Floresta Tropical Caducifólia e Subcaducifólia.

Procedimentos Técnico-Operacionais

Em primeiro momento, para realizar este trabalho, realizou-se a aquisição do produto cartográfico junto ao INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais), onde foi

selecionada a imagem do satélite Landsat 8 (OLI/TIRS), referente à órbita 219 e ponto 072, no dia 16/7/2016. Justifica-se a escolha de somente uma data já que o estudo não se objetivou em uma análise espaço-temporal. Ainda nesta etapa foi analisada a imagem de satélite por fotointerpretação, a fim de estabelecer os usos da terra no perímetro urbano de Montes Claros.

Após a fotointerpretação, iniciou-se o processo de mapeamento – do uso da terra, esta expressão refere-se a exploração dos recursos naturais à superfície a fim de obter benefícios para as sociedades, através de diversas atividades, como a pecuária, agricultura, reflorestamento, expansão urbana, entre outros.

O crescimento populacional e a exploração desenfreada dos recursos naturais no decorrer dos anos causaram diversos problemas ambientais, desde a poluição visual até possíveis alterações no balanço energético à superfície.

Diante dessa premissa, surgem métodos quantitativos para compreender a dinâmica do espaço terrestre, destacando as Geotecnologias, em ênfase o imageamento da superfície por meio de produtos orbitais. Tangente a este imageamento, ele deve contemplar as variações dos heterogêneos sistemas de usos da terra em vastas escalas espaciais.

O mapeamento de uso e ocupação do solo foi realizado através do *software Arcmap 10.3.1* tendo como base a classificação supervisionada. De acordo com as concepções de Novo (2008), na classificação supervisionada o pesquisador está em constante interação com o sistema de análise digital, dispondo de informações sobre a cena. Para tanto, foi utilizado o classificador por Máxima Verossimilhança, este utiliza classes de treinamento para estimar a forma de distribuição dos pixels contidos em cada classe, e desta maneira na imagem de satélite cada pixel é destinado à classe que tem mais alta probabilidade de ser similar (MENESES; SANO, 2012, p. 205).

A justificativa deste mapeamento é direcionada à proposta desta pesquisa, de estimar a evapotranspiração real diária por diferentes usos da Terra, desta forma as seguintes classes de usos da Terra foram selecionadas: Pastagem/Vegetação Rala, Edifícios/Pavimentos, Solo Exposto, Mineração, Floresta tropical Caducifólia, Cerrado e Água.

Tendo os dados sobre o uso da terra gerados, iniciou-se o processamento no ERDAS IMAGINE 2014 para obtenção da temperatura de superfície e fluxo de calor no solo. Tais procedimentos foram realizados por meio do Model Maker, que é um modelador matemático que permite a entrada do algoritmo SEBAL.

Os parâmetros das imagens disponibilizadas nos cabeçalhos das mesmas, como tempo central (GMT), orientação da imagem, azimute e ângulo de elevação do Sol, e dados de calibração fornecidos pelo serviço geológico dos EUA, são utilizados como dados de calibração do algoritmo SEBAL. É importante ressaltar que esta metodologia foi aplicada em diversos trabalhos utilizando Landsat 5 e Landsat 8, entretanto, nos trabalhos envolvendo Landsat 8, algumas equações sofrem alterações, como as equações para obtenção da Radiância, Reflectância e Albedo de superfície.

São sugeridas essas alterações devido ao produto cartográfico utilizado, que estão propostas de acordo com o trabalho de Machado (2016). É uma adequação do algoritmo SEBAL que foi seguida nas três primeiras etapas abaixo e sugere-se alterações nas etapas mencionadas, devido ao uso das diferentes bandas do sensor OLI/

TIRS que como mencionado. A seguir será explicitado por meio de expressões matemáticas o processo de obtenção da temperatura de superfície e fluxo de calor no solo no modelo SEBAL:

Etapa 1: Radiância

Esta etapa consiste na conversão dos números digitais (ND) em radiância espectral monocromática que representa a radiação solar refletida e a radiação emitida pela Terra, para as bandas 1, 2, 3, 4, 5, 6 e 7. Utilizou a equação 01 proposta por Markham e Barker (1986):

$$L_{\lambda_i} = \frac{a_i + b_i}{255} - a_i \times ND \quad (01)$$

Onde a e b correspondem às radiâncias espectrais máximas e mínimas ($Wm^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1}$), ND são os níveis digitais de cada pixel da imagem, que variam de 0 a 255, i são as bandas (1,2,3,4,5,6 e 7) do satélite TM Landsat-5.

Etapa 2: Reflectância

A reflectância é a razão entre o fluxo de radiação solar refletido pela superfície e o fluxo de radiação global incidente, para tal, utilizou-se a equação 02 proposta por Allen et al. (2002):

$$\rho_{\lambda_i} = \frac{\pi \cdot L_{\lambda_i}}{k_{\lambda_i} \cdot \cos Z \cdot d_r} \quad (02)$$

L_{λ_i} é a radiância monocromática de cada banda do TM Landsat-5, K_{λ_i} é a irradiância solar no topo da atmosfera de cada banda. Z é o ângulo zenital.

d_r é o inverso do quadrado da distância relativa Terra-Sol de acordo com o dia ao longo do ano. Pode ser encontrada com a equação 03 proposta por Duffie e Beckman (1980):

$$d_r = 1 + 0,033 \cos (2 \pi DDA / 365) \quad (03)$$

Sendo DDA o dia sequencial do ano, começando de 1 de janeiro e considerando fevereiro com 28 dias.

Etapa 3: Albedo planetário

O albedo planetário corresponde ao poder de reflexão da superfície mais a atmosfera e seus componentes para os comprimentos de onda curta (0,3 – 3,0 μm). Sua obtenção

se dá através do ajuste linear das reflectâncias espectrais ρ_λ com pesos ω_λ através da equação 04 (GOMES, 2009).

(04)

$$\bar{\omega}_{\lambda,b} = \frac{ESUN_{\lambda,b}}{\sum ESUN_{\lambda,b}}$$

Etapa 4: Albedo corrigido

O poder refletor da superfície ou albedo de superfície pode ser entendido como o coeficiente de reflexão da superfície para a radiação de onda curta, corrigidos os efeitos atmosféricos. Trata-se de uma medida adimensional que pode ser avaliada pela razão entre a radiação direta e a difusa em função do ângulo zenital solar. A obtenção do albedo de superfície se deu por meio da equação 05 recomendada por Allen et al. (2002).

(05)

$$\alpha = \frac{\alpha_{toa} - \alpha_p}{\tau_{sw}^2}$$

Sendo que, α_{toa} é o albedo planetário e α_p é a radiação solar refletida pela atmosfera variando de 0,025 a 0,04. E τ_{sw} é a transmissividade da atmosfera que nas condições de transparência calcula-se utilizando a equação 06 de acordo com Allen et. al. (2002).

(06)

$$\tau_{sw} = 0,75 + 2 \times 10^{-5} z$$

Em que z é a altitude em metros de cada pixel da imagem.

Etapa 5: NDVI, SAVI e IAF

O Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (*Normalized Difference Vegetation Index – NDVI*) é obtido através da razão entre a diferença das refletividades do IV-próximo (IV ρ) e do vermelho (V ρ), pela soma das mesmas, de acordo com a equação 07:

(07)

$$NDVI = \frac{\rho_4 - \rho_3}{\rho_4 + \rho_3}$$

Onde IV ρ e V ρ correspondem, respectivamente, às bandas 4 e 3 do LandSat-5 Sensor TM.

Para o cálculo do Índice de Vegetação Ajustado para os Efeitos do Solo (*Soil Adjusted Vegetation Index – SAVI*), que é um índice que busca amenizar os efeitos do “background” do solo, tem sido utilizada a expressão 08 (Huete, 1988):

(08)

$$SAVI = \frac{(1 + L) \times (\rho_4 - \rho_3)}{(L + \rho_4 + \rho_3)}$$

Onde o fator L é uma função do tipo de solo. Em estudo recente, utilizamos $L = 0,1$, embora o seu valor mais frequente seja $L = 0,5$ (Huete e Warrick, 1990; Accioly et al., 2002; Boegh et al., 2002).

O Índice de Área Foliar (IAF) é definido pela razão entre a área foliar de toda a vegetação por unidade de área utilizada por essa vegetação. O IAF é um indicador da biomassa de cada pixel da imagem e o mesmo foi computado pela seguinte equação 09, obtida por Allen et al. (2002):

(09)

$$IAF = - \frac{\ln \left(\frac{(0,69 - SAVI)}{0,59} \right)}{0,91}$$

Etapa 6: Emissividades

Para a obtenção da temperatura da superfície, é utilizada a equação de Planck invertida, válida para um corpo negro. Como cada pixel não emite radiação eletromagnética como um corpo negro, há a necessidade de introduzir a emissividade de cada pixel no domínio espectral da banda termal ϵ_{NB} , qual seja: $10,4 - 12,5 \mu\text{m}$. Por sua vez, quando do cômputo da radiação de onda longa emitida por cada pixel, há de ser considerada a emissividade no domínio da banda larga ϵ_0 ($5 - 100 \mu\text{m}$). Segundo Allen et al. (2002), as emissividades ϵ_{NB} e ϵ_0 podem ser obtidas, para $NDVI > 0$ e $IAF < 3$, segundo as equações 10 e 11:

$$\epsilon_{NB} = 0,97 - 0,0033 \cdot IAF \quad (10) \quad \epsilon_0 = 0,95 - 0,01 \cdot IAF \quad (11)$$

Para pixels com $IAF \geq 3$, $\epsilon_{NB} = \epsilon_0 = 0,98$ e para corpos de água ($NDVI < 0$) $\epsilon_{NB} = 0,99$ e $\epsilon_0 = 0,985$, conforme recomendações de Allen et al. (2002).

Etapa 7: Temperatura de superfície

Para a obtenção da temperatura de superfície (T_s) são utilizadas a radiância espectral da banda termal $L_{\lambda, 6}$ e a emissividade ϵ_{NB} obtida na etapa anterior. Dessa forma, obtém-se a temperatura da superfície (K) pela equação 12:

(12)

$$T_s = \frac{K_2}{\ln \left(\frac{\epsilon_{NB} K_1}{L_{\lambda,6}} + 1 \right)}$$

$$K_1 = 607,76 \text{ Wm}^{-2} \text{ sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$$

$$K_2 = 1260,56 \text{ K}$$

São constantes da banda termal do Landsat-5 (Allen et al., 2002; Silva et al., 2005).

Etapa 8: Saldo de Radiação

O saldo de radiação à superfície (R_n) é computado utilizando as cartas de albedo da superfície, de emissividade da superfície, de temperatura de cada pixel, e estimativas da radiação de onda incidente e onda longa da atmosfera, através da seguinte equação (13):

(13)

$$R_n = R_{s_i} + \alpha R_{s_i} + R_{L_i} - R_{L_i} - (1 - \epsilon_0) R_{L_i}$$

onde R_{s_i} é a radiação de ondas curtas incidente em cada pixel (admitida ser constante para toda a área de estudo), α é o albedo corrigido para cada pixel, R_{L_i} é a radiação de onda longa emitida pela atmosfera na direção de cada pixel (também admitida ser constante para toda a área de estudo), R_{L_i} é a radiação de onda longa emitida por cada pixel e ϵ_0 é a emissividade de cada pixel da área estudada.

Etapa 9: Fluxo de Calor no Solo

O fluxo de calor no solo é obtido no SEBAL segundo equação (14) desenvolvida por Bastiaanssen (2000):

(14)

$$G/R_n = T_s / \alpha (0,0038 \alpha + 0,0074 \alpha^2) (1 - 0,98 \text{ NDVI}^4)$$

onde T_s é a temperatura da superfície, α o albedo da superfície e NDVI o índice de vegetação da diferença normalizada.

Resultados e Discussão

Para demonstrar as variações termais e energéticas foram mapeados inicialmente os usos do solo, na Figura 2 está o mapa do uso do solo no perímetro urbano de Montes Claros para o período analisado em 16/7/2016.

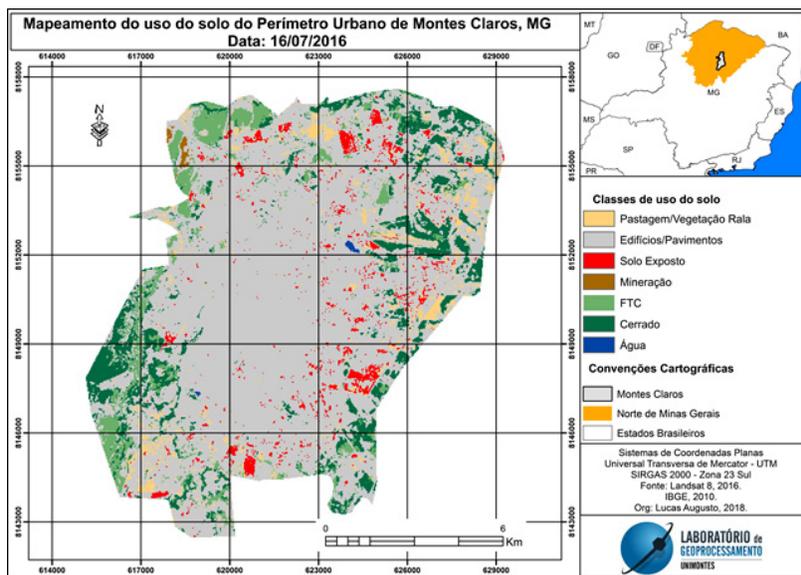


Figura 2 – Mapa de Uso do Solo no Perímetro Urbano de Montes Claros em 2016.

Na Figura 3 estão demonstrados os usos do solo por percentual:

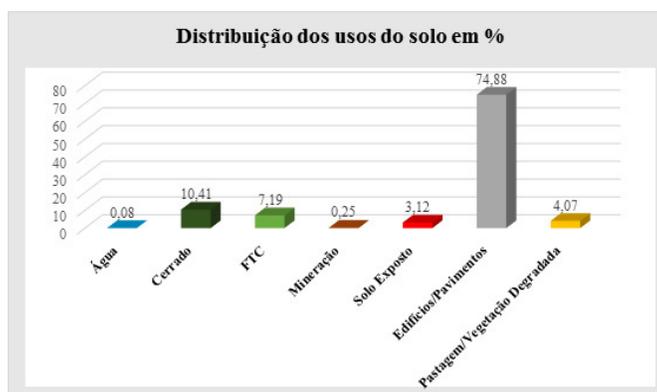


Figura 3 – Totais Percentuais das Classes de Uso do Solo.
Fonte: Landsat 8 (2016). Organização dos autores.

Observa-se que no período analisado (ano de 2016), como era de se esperar diante de um perímetro urbano, o maior percentual se deu para áreas classificadas como “Edifícios e Pavimentos”. Tal fato está relacionado aos condicionantes demográficos do município de Montes Claros, que tem como característica, na mesorregião do Norte Minas, ser o polarizador dos demais municípios pertencentes a essa mesorregião, resultado da demanda por empregos, com as grandes redes universitárias, o setor industrial e agropecuário; fato este que corrobora com Leite e Pereira (2008) supracitados por Brito et al., (2013) que avaliando os dados censitários do IBGE, entre as décadas de 1960 e 2000, argumentam que a população urbana de Montes Claros saltou de 155.483, em 1980, para 289.183 habitantes em 2000, provocando um aumento de mais de 85% da população em 20 anos. De acordo com o mapeamento realizado, esta classe ocupa 74,88% da superfície do perímetro urbano de Montes Claros.

No tocante às áreas mapeadas como solo exposto, tem-se 3,12% de ocupação no perímetro urbano de Montes Claros (em 2016), podendo estar relacionado a propriedades urbanas sem cobertura vegetal.

As áreas denominadas como pastagem e vegetação rala possuíam neste período de análise 4,07% no território analisado, mostrando a relevância desta classe mapeada, observada ao longo do município de Montes em si, tendo relação intrínseca com o modelo desenvolvimentista de Montes Claros, o agropecuário.

Com 0,25% da área mapeada em 2016 está a classe mineração, como extração de pedra brita, utilizada na construção civil municipal. Neste período, a área mapeada como água representou 0,08% do território mapeado, sendo representada por lagos e córregos que percorrem o perímetro urbano de Montes Claros.

No tocante às áreas de vegetação nativa, o Cerrado se mostra mais presente no perímetro urbano de Montes Claros, possuindo 10,41% do território diante da fotoleitura foi possível observar variações entre Cerrado Arbustivo e Arbóreo, já as áreas de Floresta Tropical Caducifólia representaram 7,19% da área mapeada. Desta forma, observa-se que a vegetação nativa no perímetro urbano de Montes Claros detém de 17,6% em extensão territorial.

Diante desses dados expostos, a análise do comportamento da temperatura de superfície e do fluxo de calor no solo é necessária para compreender a dinâmica entre as ocupações humanas e suas atividades, para com variáveis do balanço de energia. Nas Figuras 4 e 5, estão os mapas de temperatura de superfície e fluxo de calor no solo para o perímetro urbano de Montes Claros.

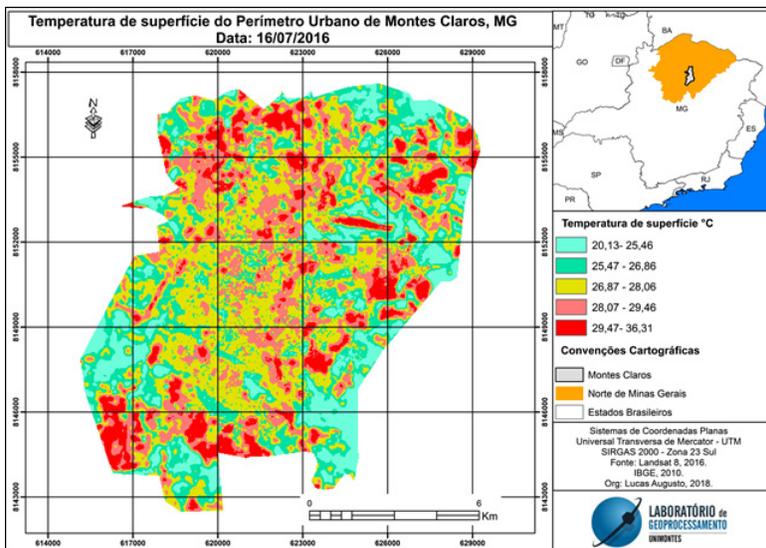


Figura 4 – Mapa de Temperatura de Superfície no Perímetro Urbano de Montes Claros em 2016.

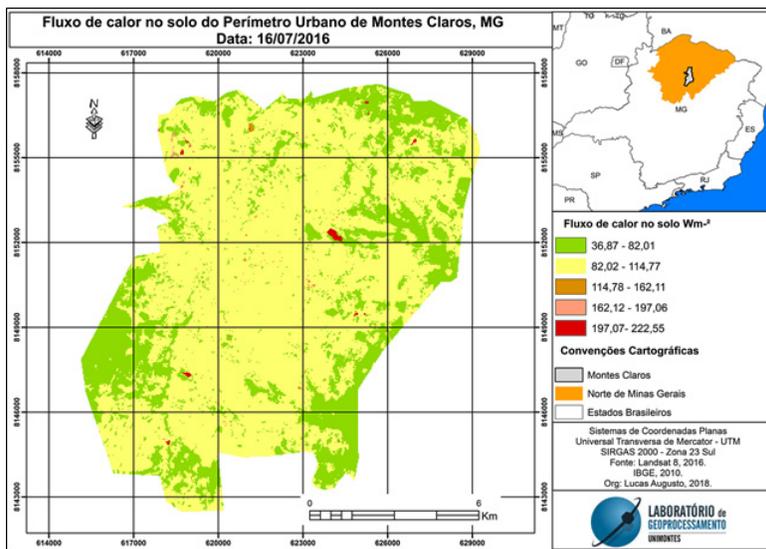


Figura 5 – Mapa de Fluxo de Calor no Solo no Perímetro Urbano de Montes Claros em 2016.

No tocante à temperatura de superfície, observa-se variabilidade entre as médias termais, com variação de 20,13°C a 36,31°C para o período analisado em 2016, sendo

notório grande concentração das médias termais entre 26,87°C e 36,31°C na espacialização territorial do perímetro urbano de Montes Claros. Tangente à distribuição do fluxo de calor no solo, observa-se na Figura 5 que ele variou de 36,87 Wm⁻² e 222,55 Wm⁻², tendo maiores concentrações do intervalo estimado entre 82,02 Wm⁻² e 162,11 Wm⁻².

No que se refere à análise por pontos amostrais, este norteamento está relacionado à exatidão que isto concede à análise, ou seja, com o conhecimento prévio da área de estudo, torna-se possível analisar pontualmente os fluxos energéticos à superfície da cidade de Montes Claros. Na Tabela 1 estão os valores para cada amostra de uso da terra no perímetro urbano de Montes Claros foram denominados de P1 a P7, contendo valores médios para temperatura de superfície e fluxo de calor no solo para o período analisado em 2016.

Tabela 1 – Dados de TST e G para os Pontos Amostrais.

Pontos Amostrais	Temperatura de superfície (°C)	Fluxo de Calor no Solo Wm ⁻²
P1 (água)	24,77	219,15
P2 (Edifícios/Pavimentos)	27,82	88
P3 (Mineração)	27,48	104,98
P4 (Pastagem/Vegetação Rala)	29,06	90,92
P5 (Cerrado)	24,05	67,75
P6 (FTC)	26,74	82,4
P7 (Solo Exposto)	27,49	84,26

Fonte: Análise por Modelo SEBAL. Organização dos Autores.

No P1, foram selecionadas amostras de corpos hídricos no perímetro urbano de Montes Claros, tendo média de temperatura de superfície estimada em 24,77°C e valor médio de fluxo de calor no solo estimado em 219,15 Wm⁻².

No tocante à média termal desta amostra, está entre as menores médias analisadas nesta pesquisa, isto podendo estar associado ao processo de evaporação em ambientes hídricos, causando umidificação do ar, consequentemente diminuindo o comportamento termal nestes ambientes. Já referindo-se ao fluxo de calor no solo, a média da amostra demonstra que os maiores valores de fluxo de calor estão relacionados aos corpos hídricos, sendo possível argumentar, diante da concepção de Allen et al. (2002), que é utilizado percentual de 50% de energia do saldo de radiação para aquecimento dos corpos hídricos.

Estes valores de fluxo de calor no solo nos corpos hídricos são maiores evidenciados nesta pesquisa, corroborando com o trabalho de Veloso (2013), onde o mesmo demonstra que o fluxo de calor no solo variou de 101 a 227 Wm⁻² no Rio São Francisco, no perímetro do projeto Jaíba no norte de Minas Gerais, o autor supracitado menciona trabalhos com valores semelhantes ao desta pesquisa, sendo Gomes (2009), estimando

valores acima de 200 Wm^{-2} e Bezerra (2006), encontrando valores superiores a 190 Wm^{-2} , em pequenos corpos hídricos.

Tangente ao P2, a amostra das áreas com edifícios e pavimentos registraram média termal de $27,82^\circ\text{C}$ no período de análise, já o fluxo de calor no solo representou valor médio de 88 Wm^{-2} para o período de análise em 2016 no perímetro urbano de Montes Claros. Essa média termal elevada demonstrada no P2 pode ser observada também ao analisar as figuras 2 e 4, e relacionar o mapa de uso do solo no perímetro urbano e o mapa de temperatura de superfície, onde as médias termais analisadas na Figura 4, variando entre $26,87^\circ\text{C}$ e $36,31^\circ\text{C}$, estão sobrepostas em grande maioria às áreas de edifícios e pavimentações do perímetro urbano de Montes Claros, e a média do ponto amostral está inserida dentro dos intervalos supracitados. Este comportamento nas áreas de edifícios e pavimentos tende estar correlacionado com os aspectos físicos destes locais, onde se encontram aglomerados de edificações retendo grandes quantidades de calor, asfaltos superaquecidos devido à incidência de radiação solar, causando reflexão por albedo de superfície e elevando a temperatura de superfície.

No que tange ao comportamento do fluxo de calor no solo, o valor amostrado nos pixels coletados (88 Wm^{-2}) estão dentro do intervalo de fluxo de calor no solo entre $82,02 \text{ Wm}^{-2}$ e $114,77 \text{ Wm}^{-2}$, isso sendo observado ao analisar a Figura 5 e relacionar ao mapa de uso do solo no perímetro urbano (Figura 4), corroborando com resultados encontrados por Santos et al., (2010) onde os autores encontraram resultados na ordem de $85,53 \text{ Wm}^{-2}$ e $224,83 \text{ Wm}^{-2}$, avaliando os fluxos de calor e evapotranspiração pelo modelo SEBAL com uso de dados do sensor ASTER. Na pesquisa destes autores supracitados, eles dão ênfase à cidade de Paraíso do Sul, onde o fluxo de calor no solo é mais elevado, o que indica a ocorrência de ilhas de calor, fenômeno frequentemente observado em áreas urbanas (WENG et al., 2004).

No tocante às áreas de mineração amostradas no P3, a média termal da amostra se assimila com a média da temperatura de superfície amostrada para edifícios e pavimentos, devido às características físicas, sendo estimada média de $27,48^\circ\text{C}$. Já o fluxo de calor no solo foi estimado valor de $104,98 \text{ Wm}^{-2}$ neste período de análise, estando dentro do intervalo de $82,02 \text{ Wm}^{-2}$ e $114,77 \text{ Wm}^{-2}$ conforme a 4.

Referindo-se ao P4 (Pastagem/Vegetação Rala), a média termal neste período de análise foi estimada em $29,05^\circ\text{C}$, isto estando associado ao período analisado (inverno), onde a biomassa nestas áreas torna-se escassa, afetando as suas propriedades termais. Outro fato que pode correlacionar com esta média é que durante a passagem do sensor em período de inverno na área de pasto, a matriz vista pelo mesmo é a do solo.

O fluxo de calor no solo para estas áreas amostradas foi computado em $90,92 \text{ Wm}^{-2}$, estando dentro do intervalo de $82,02 \text{ Wm}^{-2}$ e $114,77 \text{ Wm}^{-2}$, corroborando com o estudo de Bezerra (2006), que encontrou na faixa de 115 a 190 Wm^{-2} para áreas descobertas ou com vegetação nativa rala, ao mensurar o balanço de energia e evapotranspiração em áreas com diferentes tipos de cobertura de solo no Cariri Cearense com o algoritmo SEBAL. Em áreas de pastagem e vegetação rala, Veloso (2013) encontrou valores de fluxo de calor no solo na magnitude de $95,53 \text{ Wm}^{-2}$ e $102,62 \text{ Wm}^{-2}$ para o dia 255 (dia Juliano em 2011) analisando áreas irrigadas do projeto Jaíba – MG.

O P5 representa as amostras de vegetação nativa de Cerrado remanescente no perímetro urbano de Montes Claros, a média termal para esta amostra foi estimada em 24,05°C. As áreas de vegetação de Cerrado estão inseridas no intervalo de 20,13°C e 26,86°C, isto sendo evidenciado nas Figuras 4 e 5. Comportamento este sendo associado à umidificação do ar provinda destes ambientes devido o processo de evapotranspiração nessas áreas. Já no que se refere ao fluxo de calor no solo para as áreas de Cerrado, foi estimado para o ponto amostral em 67,75 Wm⁻², estando inserido no intervalo de 36,87 Wm⁻² e 82,01 Wm⁻², conforme demonstrado nas figuras 4 e 5.

O P6 representa áreas de Floresta Tropical Caducifólia, a média termal deste ponto de amostra foi estimada em 26,74°C, tendo comportamento médio semelhante às áreas de Cerrado. Estes valores são pouco superiores aos encontrados por Veloso (2013) para os dias Julianos 31, 111, 175, 191 do ano de 2011, valores médios de 21,62°C, 22,35°C, 22,85°C (para os dias 175 e 191) respectivamente. No tocante ao fluxo de calor no solo para o P6, a média foi estimada em 82,4 Wm⁻² conforme a Tabela 1, corroborando com o autor supracitado acima, que encontrou valor médio aproximado estimado em 90,90 Wm⁻² para áreas de mata seca.

Referindo-se ao P7, amostrando áreas de solo exposto, obteve-se média termal de 27,49°C, estando essas áreas dentro do intervalo de 26,87 e 36,31°C, conforme é possível observar na Figura 5. Essas áreas por estarem descobertas, tendem a manter temperaturas superficiais elevadas, devido à incidência direta de radiação solar e, conseqüentemente, por não haver vegetação presente, há o escape de energia por meio de albedo de superfície, elevando a temperatura de superfície. No tocante à média do fluxo de calor no solo, a média da amostra foi computada em 84,26 Wm⁻², entretanto, esta classe de uso do solo se encontra dentro do intervalo de 82,02 Wm⁻² e 162,11 Wm⁻², conforme demonstra a Figura 5.

Considerações Finais

Os resultados expostos nesta pesquisa mostraram-se pertinentes aos estudos sobre a dinâmica das ocupações do uso do solo urbano para com as variáveis do balanço de energia. No tocante à variável fluxo de calor no solo, observou-se os menores valores para áreas com cobertura vegetal bem definida, assim como áreas de Cerrado e Floresta Tropical Caducifólia, com comportamento reverso às áreas de natureza antrópica, entretanto, salienta-se o elevado valor de fluxo de calor no solo para hídricos, justificada pela fundamentação de quantidade de energia utilizada para aquecimento dos corpos hídricos e seu calor específico, como visto nas literaturas analisadas.

As médias termais analisadas seguiram o comportamento do fluxo de calor no solo em relação às áreas de vegetação nativa, com menores valores e maiores valores para áreas antropogênicas dentro do perímetro urbano de Montes Claros.

Do ponto de vista analítico, é possível argumentar na necessidade em manter a preservação de mata nativa em centros urbanos, propondo assim projetos de arborização, tendo em vista que a presença de vegetação nativa tende a manter médias termais amenas em um dado ambiente.

Salienta-se a busca por novos estudos na área analisada a fim de compreender a variação dos fluxos energéticos e da temperatura de superfície em escala cronológica

(dentro de uma média climatológica), visto que isso pode ser fundamental para a gestão urbana e diversos seguimentos, bem como a Geografia da Saúde, já que estas variáveis climáticas podem inferir na saúde do ser humano, já que este é homeotérmico e tende a sentir fisicamente as variações climáticas.

No que tange aos procedimentos metodológicos utilizados para responder a objetivação desta pesquisa, aponta-se o sensoriamento remoto, o SIG e o SEBAL como importantes ferramentas para análise de variáveis do balanço de energia e conseqüentemente climatológicas, sendo instrumentos indispensáveis para as tomadas de decisões por gestores.

Referências Bibliográficas

ALLEN, R. G.; TASUMI, M.; TREZZA, R. SEBAL (Surface Energy Balance Algorithms for Land) Advanced Training and Users Manual – Idaho Implementation, version 1.0, 2002. 97 p.

BEZERRA, B.G. *Balanço de energia e evapotranspiração com diferentes tipos de coberturas do solo no Cariri cearense através do algoritmo SEBAL*. Dissertação (Mestrado em Meteorologia). Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas, UFCG, 2006.

BRITO, J. L.; LEITE, M. R.; FERREIRA, E. J.; LEITE, M. E. *Evolução geográfica do uso/ cobertura da terra na bacia do rio Vieira no Norte de Minas Gerais*. *Revista do Departamento de Geografia, USP*. v. 26, p. 169-194, 2013.

DANTAS. M. J F.; ARRAES. F. D. D.; SANTOS. J. B.; ZIMBACK. C. R. L. Sensoriamento remoto na determinação da evapotranspiração da bacia do Riacho Jardim/CE. *Energ. Agric.*, Botucatu, v. 30, n. 4, p. 383-394, 2015.

FREITAS, A. F.; SANTOS, J. S.; LIMA. R. B. Avaliação do campo térmico urbano e projeções microclimáticas: um estudo de caso no campus I da UFPB. *Bol. geogr.*, Maringá, v. 34, n. 3, p. 81-96, 2016.

HUETE, A. R. A soil adjusted vegetation index – SAVI. *Remote Sensing of Environment*, v. 25, p.295-309, 1988.

KIM, Y. H.; BAIK, J. J. Spatial and temporal structure of the urban heat island in Seoul. *Journal of Applied Meteorology*, Seul, v. 44, p. 591-605, 2005.

LEITE, M. R. *Sensoriamento remoto aplicado à análise temporal da relação uso da terra/ temperatura e albedo de superfície na bacia hidrográfica do rio Vieira no Norte Minas Gerais*. 2011. Dissertação (Mestrado em Geografia). Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia/MG.

LOMBARDO, M. A. A ilha de calor e suas relações com as condições naturais e sociais. In:_____. *Ilha de calor nas metrópoles: o exemplo de São Paulo*. São Paulo: Hucitec, p. 209-216, 1985.

MACHADO, L.M. *Áreas de arenização e areais no Sudoeste de Goiás: o uso do sensoriamento remoto para identificação e mapeamento*. 2016. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal de Goiás.

MENESES, P. R.; SANO, E. E. Classificação pixel a pixel de imagens. In: P. R., MESES; T., ALMEIDA. (orgs.). *Introdução ao processamento de imagens de sensoriamento remoto*. Brasília, 2012.

NASCIMENTO, D. T. F. *Emprego de técnicas de sensoriamento remoto e geoprocessamento na análise multitemporal do fenômeno de ilha de calor no município de Goiânia-GO (1986/2010)*. 2011. Dissertação (Mestrado em Geografia) – UFG/IESA.

NICHOL, J. E. High-resolution surface temperature patterns related to urban morphology in a tropical city: a satellite-based study. *Journal of Applied Meteorology*, Singapura, v. 35, p. 135-46, 1996.

NIMER, E.; BRANDÃO, A. M.P. M. *Balanço hídrico e clima da região do cerrado*. Rio de Janeiro: IBGE, 1989.

PEREIRA, B. R.; MEES, M. B.; LEITE, M. R.; MAGALHÃES F. R. D. Análise da gestão ocupacional em Montes Claros – MG: Impactos do uso do solo e suas consequências na temperatura de superfície. *Revista Cerrados (Unimontes)*, v. 15, p. 285, 2017.

PEREIRA, C. C. *Temperatura de superfície na bacia da usina hidrelétrica (UHE) Barra dos Coqueiros, utilizando climatologia e sensoriamento remoto*. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal de Goiás, 2014.

ROSA, R. *Introdução ao sensoriamento remoto*. 4. ed. Uberlândia: Ed. da Universidade Federal de Uberlândia, 2001. 210 p.

SANTOS, T. V.; FONTANA, D. C.; ALVES, R. C. M. Avaliação de fluxos de calor e evapotranspiração pelo modelo SEBAL com uso de dados do sensor ASTER. *Pesq. Agropec. Bras.*, Brasília, v. 45, n. 5, p. 488-496, 2010.

TASUMI, M. *Progress in operational estimation of regional evapotranspiration using satellite imagery*. PhD thesis, Dept. Biological and Agricultural Engineering, University of Idaho, Idaho, 2003.

WENG, Q.; DENGSHENG, L.; SCHBRING, J. Estimation of land surface temperature-vegetation abundance relationship for urban heat island. *Remote Sensing of Environment*, Indianápolis, v. 89, p. 467-483, 2004.

Recebido em: 07/11/2017

Aceito em: 23/05/2018