

---

## **ESTIMATIVA DA TEMPERATURA MÉDIA DO AR NO ESTADO DO CEARÁ POR MEIO DO SENSORIAMENTO REMOTO**

Mirelle Tainá Vieira **LIMA**

Mestranda em Desenvolvimento Regional Sustentável da Universidade Federal do Cariri.

E-mail: mirellet.vieira@gmail.com

Carlos Wagner **OLIVEIRA**

Doutor em Engenharia de Biosistemas. Docente dos cursos de graduação e pós-graduação da  
Universidade Federal do Cariri.

E-mail: carlos.oliveira@ufca.edu.br

Antônio Erivando **BEZERRA**

Mestre em Engenharia Agrícola pela Universidade Federal de Campina Grande.

E-mail: aerivando86@gmail.com

**RESUMO:** O presente estudo teve como objetivo estimar as temperaturas médias do ar presentes no estado do Ceará, por meio da correlação entre imagens de satélite e dados normais climatológicos. Utilizou-se os dados mensais de temperatura média do ar (normal climatológica de 1981-2010), e os dados geográficos (Latitude, Longitude, Altitude) das 12 estações meteorológicas presentes no estado (INMET), além de onze recortes de imagens do satélite Landsat 8 para o cálculo de temperatura da superfície do solo. Em seguida, os dados de satélite foram relacionados por meio de regressão linear com os dados normais climatológicos do estado até a obtenção da equação utilizada para estimar a temperatura média do ar. Validaram-se os valores estimados com os valores observados, por meio dos métodos MAD, MSE, RMSE e MAPE. O índice proposto para aferir a temperatura média mensal anual do estado ( $T_{ar}$ ) alcançou um  $R^2 = 0.9614$  e é composto da seguinte expressão:  $T_{ar} = -15,59818 - (\text{Temperatura do solo} * 0,14406) - (\text{longitude} * 1,18551) - (\text{latitude} * 0,76993) - (\text{altitude} * 0,01186)$ . A validação da equação indicou a eficácia da estimativa, sendo que o erro tende a amenizar a temperatura na região dos Inhamuns e acentuar a temperatura nas áreas próximas ao litoral, provavelmente pela influência da altitude. As menores temperaturas encontram-se nas Regiões da Ibiapaba, Cariri e serra do Baturité. As maiores temperaturas observam-se na região litorânea e sertões dos Inhamuns.

**Palavras-chave:** Modelagem. Geoprocessamento. Climatologia. Estado do Ceará.

## **PREDICTION OF AVERAGE AIR TEMPERATURE IN CEARÁ STATE BY REMOTE SENSING**

**ABSTRACT:** The present study aimed to estimate the average air temperatures present in the state of Ceará, through the correlation between satellite images and normal climatological data. The monthly data of average air temperature (climatological normal of 1981-2010) and geographic data (Latitude, Longitude, Altitude) of the 12 meteorological stations present in the state (INMET) were used, in addition to eleven clippings from the satellite Landsat 8 for the calculation of soil surface temperature.

Then, the satellite data were related using linear regression with the normal climatological data of the state until obtaining the equation used to estimate the average air temperature. The estimated values were validated with the observed values, using MAD, MSE, RMSE and MAPE methods. The index proposed to measure the annual average monthly temperature of the state ( $T_{ar}$ ) reached  $R^2 = 0.9614$  and is composed of the following expression:  $T_{ar} = -15.59818 - (\text{Soil temperature} * 0.14406) - (\text{longitude} * 1.18551) - (\text{latitude} * 0.76993) - (\text{altitude} * 0.01186)$ . The validation of the equation indicated the effectiveness of the estimate, and the error tends to soften the temperature in the Inhamuns region and increase the temperature in the areas close to the coast, probably due to the influence of altitude. The lowest temperatures are found in the regions of Ibiapaba, Cariri and Serra do Baturité. The highest temperatures are observed in the coastal region and in the backlands of Inhamuns.

**Keywords:** Modeling. Geoprocessing. Climatology. State of Ceará.

## ESTIMACIÓN DE LA TEMPERATURA MEDIA DEL AIRE EN EL ESTADO DE CEARÁ A TRAVÉS DE LA DETECCIÓN REMOTA

**RESUMEN:** El presente estudio tuvo como objetivo estimar las temperaturas promedio del aire presentes en el estado de Ceará, a través de la correlación entre las imágenes de satélite y los datos climatológicos normales. Se utilizaron los datos mensuales de la temperatura promedio del aire (normal climatológica de 1981-2010) y los datos geográficos (latitud, longitud, altitud) de las 12 estaciones meteorológicas presentes en el estado (INMET), además de once recortes de las imágenes de satélite. Landsat 8 para el cálculo de la temperatura de la superficie del suelo. Luego, los datos del satélite se relacionaron mediante regresión lineal con los datos climatológicos normales del estado hasta obtener la ecuación utilizada para estimar la temperatura promedio del aire. Los valores estimados se validaron con los valores observados, utilizando los métodos MAD, MSE, RMSE y MAPE. El índice propuesto para medir la temperatura mensual promedio anual del estado ( $T_{ar}$ ) alcanzó  $R^2 = 0.9614$  y se compone de la siguiente expresión:  $T_{ar} = -15.59818 - (\text{Temperatura del suelo} * 0.14406) - (\text{longitud} * 1.18551) - (\text{latitud} * 0.76993) - (\text{altitud} * 0.01186)$ . La validación de la ecuación indicó la efectividad de la estimación, y el error tiende a suavizar la temperatura en la región de Inhamuns y aumentar la temperatura en las áreas cercanas a la costa, probablemente debido a la influencia de la altitud. Las temperaturas más bajas se encuentran en las regiones de Ibiapaba, Cariri y Serra do Baturité. Las temperaturas más altas se observan en la región costera y en el interior de Inhamuns.

**Palabras clave:** Modelado. Geoprociamiento. Climatología. Estado de Ceará.

## INTRODUÇÃO

De acordo com Medeiros *et al.* (2005), a temperatura do ar é o fator climático que mais exerce influência de forma direta e significativa sobre os processos fisiológicos de seres vivos. De acordo com Capuchinho *et al.* (2019), este fator climático também é responsável por influenciar diversas atividades econômicas desenvolvidas pela sociedade, em seus múltiplos aspectos. A variabilidade climática deve ser considerada em diversos setores, como economia, pecuária, engenharia e produção de energia (MEDEIROS; HOLANDA, 2019).

Nesse contexto, o zoneamento climático das regiões, ou seja, a divisão da área em unidades individualizadas segundo as suas características, contribui para registrar e delimitar o potencial físico e biológico para a manutenção dos recursos naturais, existentes em cada

localidade. Essa demanda pelo zoneamento parte da necessidade de promover o conhecimento sobre cada território.

No entanto, um grande impedimento para essa caracterização territorial está na carência por informações oficiais de dados climáticos de forma detalhada. O estado do Ceará, que compreende a área de estudo deste trabalho, apresenta extensão de 148.826 km<sup>2</sup>, em que apenas 12 estações meteorológicas, monitoradas pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), fornecem os dados mensais locais de temperatura média do ar em todo o estado. No estado do Ceará, predomina o clima tropical semiárido, onde as temperaturas são elevadas durante todo o ano, as chuvas concentram-se num curto período de três ou quatro meses em média e a umidade varia de acordo com a pluviosidade (LIMA *et al.*, 2019).

De acordo com Filgueiras *et al.* (2016), devido ao elevado espaçamento da rede de estações meteorológicas, a correlação entre os dados obtidos pelas estações meteorológicas com os dados estimados por sensoriamento remoto promove a possibilidade de determinar valores proporcionais aos dados de temperatura do ar em áreas onde a disponibilidade de dados meteorológicos é escassa

Conforme Capuchinho *et al.* (2019), diferentes métodos têm sido utilizados a fim de se obter maior exatidão nas estimativas de temperatura do ar onde os dados meteorológicos são ausentes, a fim de contornar as limitações decorrentes da falta destes registros climáticos. Diante da escassez de informações meteorológicas, como de temperatura média do ar por município e de outras variáveis climáticas e geográficas relevantes, se lança mão da análise de regressão como uma alternativa para a estimativa dessas informações, visto que constitui uma metodologia prática e eficiente, sobre a qual já foram realizados diversos estudos no Brasil (MEDEIROS *et al.*, 2005).

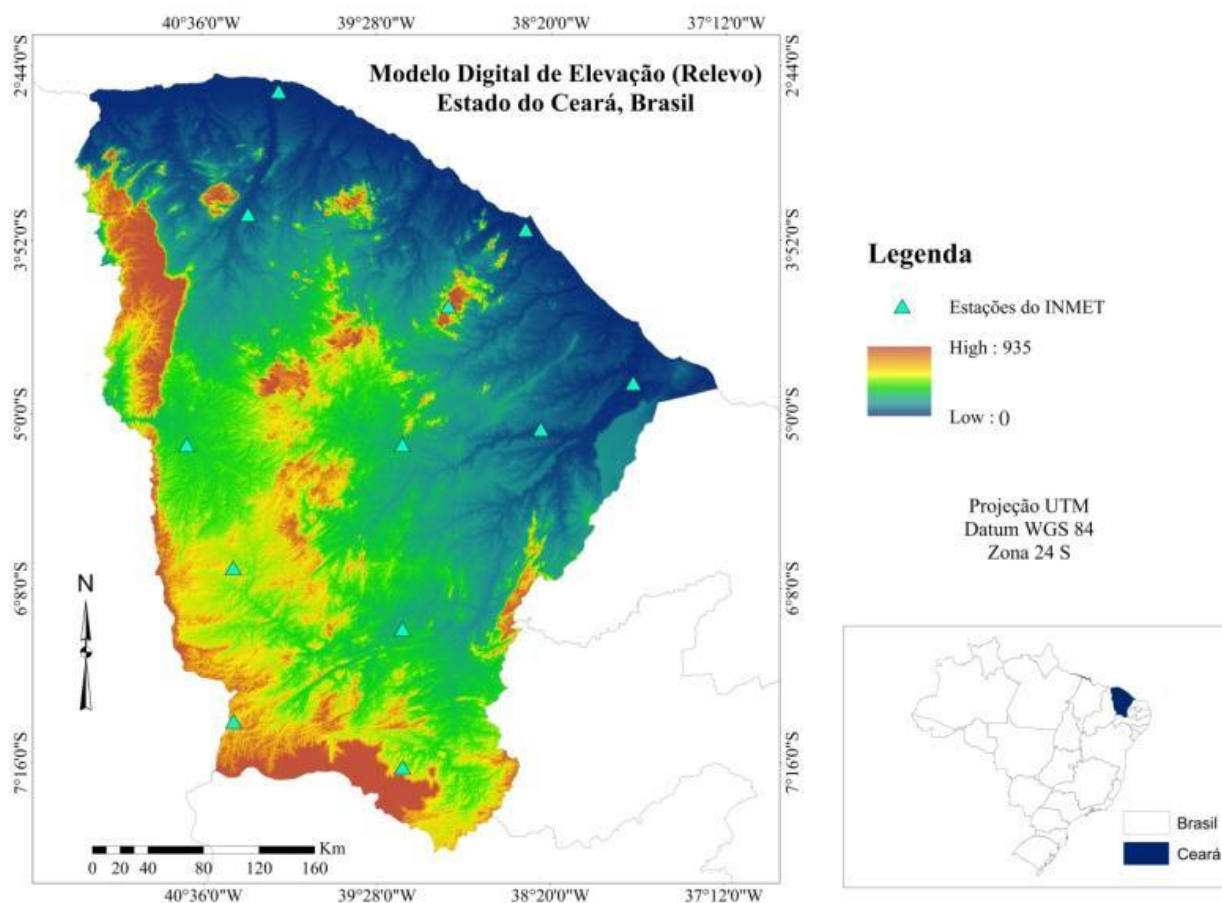
Nesse contexto, a utilização de Sistemas de Informação Geográficas (SIG) aplicados à espacialização de informações acerca de um território auxilia na compreensão e discussão de diversos fatores. Esta tecnologia permite uma melhor organização espacial das informações ambientais, otimizando a implantação de novas atividades socioeconômicas, identificação de áreas propícias à produção e exploração de diversas áreas (CÂMARA *et al.*, 2002).

Dessa forma, o presente estudo teve como objetivo estimar as temperaturas médias do ar presentes no estado do Ceará, por meio da correlação entre imagens de satélite Landsat 8, dados normais climatológicos de temperatura média do ar e os dados geográficos de latitude, longitude e altitude.

## METODOLOGIA DA PESQUISA

Inicialmente, coletou-se da plataforma do Instituto Nacional de Meteorologia – INMET os dados mensais de temperatura média do ar, correspondentes à normal climatológica de 1981-2010, e os dados geográficos (Latitude, Longitude, Altitude) das 12 estações meteorológicas presentes no estado do Ceará (Figura 1).

Figura 1. Localização das estações meteorológicas em relação à hipsometria (Relevo) do Ceará.



Fonte: Autoria própria.

Para o desenvolvimento da pesquisa dispõe-se de imagens adquiridas na plataforma Earth Explorer do U.S. Geological Survey (USGS), correspondentes aos sensores Operational Land Imager (OLI)/Thermal Infrared Sensor (TIRS) a bordo do satélite Landsat 8. Este satélite possui resolução espacial de 30 metros por pixel nas bandas curtas (OLI) e 120 metros por pixel nas ondas longas (TIRS). São utilizados 11 recortes para cobrir o estado, com datas entre 2013 e 2015, visando obter as melhores imagens, correspondentes ao período seco (Agosto a Outubro) e com a menor quantidade de nuvem (Tabela 1).

Tabela 1. Lista das imagens de satélite utilizadas no estudo, referenciadas pelo Caminho (Path) e Linha (Row), Data da fotografia, Horário de passagem do satélite no centro da cena, Porcentagem de cobertura de nuvem (%), Dia juliano (DOY).

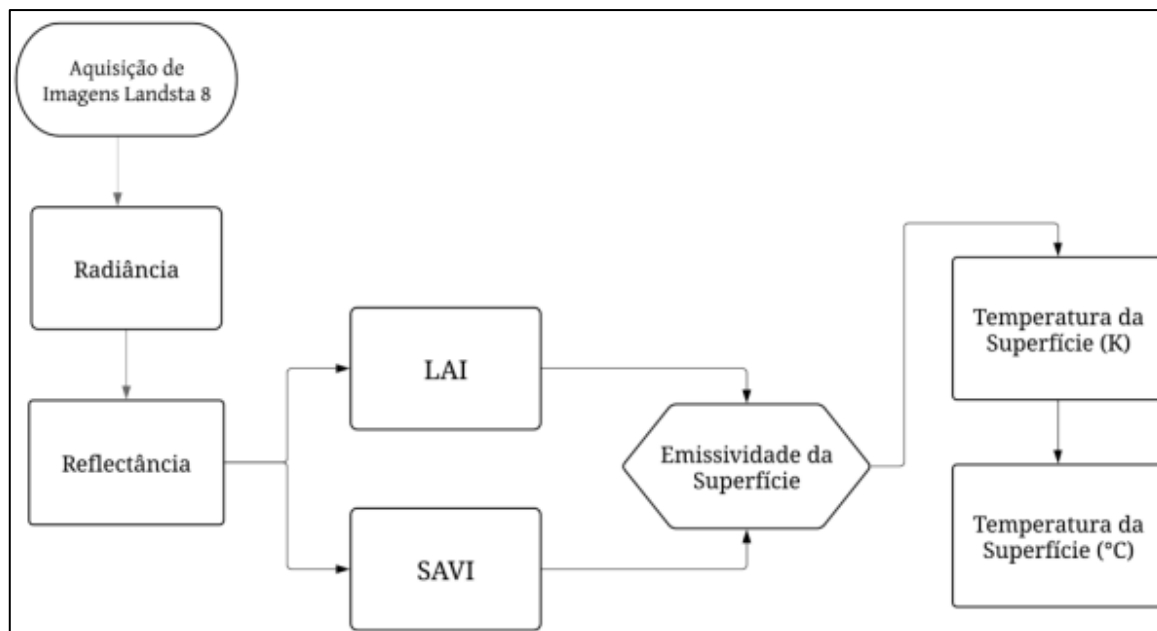
Caminho	Linha	Data	Hora	Nuvem (%)	DOY
218	065	10/09/2013	12:55:47	2,20	253
218	064	12/08/2014	12:53:26	0,00	224
218	063	26/09/2013	12:54:51	0,44	269
218	062	25/08/2013	12:54:38	2,56	237
217	065	19/09/2013	12:49:33	0,22	262
217	064	19/09/2013	12:49:09	0,11	262
217	063	27/10/2015	12:46:54	3,91	300
217	062	02/08/2013	12:48:25	7,60	214
216	065	12/09/2013	12:43:25	3,15	255
216	064	15/09/2014	12:41:10	0,00	258
216	063	15/09/2014	12:40:46	3,21	258

Fonte: Adaptado de USGS.

Note que, a imagem Caminho 217 linha 62, possui uma porcentagem de nuvem três vezes superior as demais, já que boa parte da cena está sobre o mar, mas a cobertura de nuvem na terra é de somente 2,65%, valor comparada as demais.

O processamento das imagens selecionadas e a obtenção da temperatura de superfície (Figura 2) foi realizada na versão profissional do software Erdas 2014 grátis para testes, foram utilizados as metodologias de Chander, Markham, Helder (2009) e Allen *et al.* (2007), em que as etapas estão esquematizadas na Figura 2. O modelo utilizado para a estimativa da temperatura de superfície foi gerado a partir de equações de regressão múltipla, com ajuste quadrático, fruto da correlação das normais climatologias de temperatura média do estado e demais variáveis independentes (Lat., Long., Alt.). Em seguida, foi realizada a geração de mapa temático de temperatura do estado por meio do modelo obtido. O software de SIG utilizado para confeccionar os mapas ou figuras foi o ArcMap 10.2, versão com licença.

Figura 2. Fluxograma das etapas para a obtenção das temperaturas de superfície.



Fonte: Autoria própria.

O processamento das etapas sequenciais do modelo tem início com o empilhamento das imagens correspondentes as bandas 1 a 6, 10 e 7 de cada cena, obrigatoriamente nessa ordem. Em seguida, com o objetivo de atenuar os efeitos da atmosfera, foi realizada a calibração radiométrica por meio do cálculo da radiância espectral ( $L_b$ ). As radiâncias espectrais constituem a energia solar emitida e refletida pelas superfícies, as quais são medidas e armazenadas como dados digitais pelos satélites. A radiância (Equação 1) constitui uma das medidas radiométricas mais precisa em sensoriamento remoto, cuja finalidade é calcular para cada banda de ondas curtas, o número digital de cada pixel, de acordo com a equação (1).

$$L_b = \left( \frac{L_{MAX} - L_{MIN}}{QCALMAX - QCALMIN} \right) \times (DN - QCALMIN) + L_{MIN} \quad (1)$$

Onde; DN é o número digital de cada pixel presente na imagem, LMAX e LMIN são constantes de calibração encontradas no arquivo MTL associado ao download da imagem. QCALMAX e QCALMIN são, respectivamente, o maior e menor intervalo de valores para radiância redimensionada em números digitais – DN, que também são encontrados no arquivo MTL. As unidades para  $L_b$  são  $W/m^2/sr/\mu m$ .

A partir da radiância calcula-se a refletividade, que é definida pela relação entre o fluxo de radiação refletida e o fluxo de radiação incidente sobre a superfície. As reflectâncias para cada banda são calculadas em duas etapas: Primeiro, a reflectância espectral planetária

no topo da atmosfera - como é "vista" pelo satélite - é calculada através da relação entre a radiância ( $L_b$ ) medida no satélite e a energia que incide na mesma banda de onda curta. Em seguida, a energia refletida “no satélite” é corrigida para a energia refletida “na superfície”, através do ajuste da atenuação atmosférica da radiação de onda curta incidida na banda específica (entrada) e a atenuação da radiação refletida na banda ao passo que ela viaja da atmosfera para o satélite. A refletância do satélite ( $\rho_{t,b}$ ), expressa na Equação 2, é computada segundo Allen *et al.* (2007), Tasumi *et al.* (2008) e Silva *et al.* (2016).

$$\rho_{t,b} = \frac{\pi \times L_b}{ESUN_b \times \cos\theta \times d_r} \quad (2)$$

Onde, o t subscrito em  $\rho_{t,b}$  representa a energia refletida no topo da atmosfera (no satélite) e o b subscrito indica o número específico da banda de ondas curtas,  $L_b$  é a radiação espectral para cada banda computada no primeiro modelo,  $ESUN_b$  é a média solar da irradiância exo-atmosférica para banda b ( $W/m^2/m$ ),  $\cos\theta$  é o cosseno do ângulo de incidência solar (de nadir), e  $d_r$  é o quadrado inverso da relativa distância terra-sol (Equação 3). Os valores de  $ESUN$  foram calculados conforme Silva *et al.* (2010). O termo  $d_r$  é definido como  $1/d_{es}^2$  onde  $d_{es}$  é a distância relativa entre a terra e o sol em unidades astronômicas. O  $d_r$  é computado usando a seguinte equação de Duffie e Beckman (1980), que também foi usada por Allen *et al.* (2007):

$$d_r = 1 + 0.033 \times \cos\theta \left( DOY \times \frac{2\pi}{365} \right) \quad (3)$$

Onde: DOY é o dia Juliano do ano e o ângulo é dado em radianos.

A radiação de ondas longas de saída é o fluxo de radiação térmica emitida a partir da superfície para a atmosfera ( $W/m^2$ ). É calculado estimando a emissividade térmica da superfície e temperatura da superfície. A partir desse passo, calcula-se o SAVI (Equação 4), que significa “Índice de vegetação ajustado para o solo”, semelhante ao NDVI descrito por Allen *et al.* (2007), mas que tenta subtrair o efeito da umidade do solo. O SAVI é calculado conforme a equação abaixo (ALLEN et. al, 2007):

$$SAVI = \frac{(1+L) (\rho_{t,4} - \rho_{t,3})}{(L + \rho_{t,4} + \rho_{t,3})} \quad (4)$$

Onde: L é uma constante para o SAVI. Se L for igual a zero, o SAVI se tornará igual ao NDVI. O valor de L pode variar de 0,25 a 1 dependendo da cobertura do solo e  $\rho_{t,ivp}$  e  $\rho_{t,vm}$  são os valores da refletância das bandas infravermelho próximo e vermelho, nesta mesma ordem.

Por sua vez, o Índice de Área Foliar – IAF (LAI – Leaf Area Index) é um índice biofísico definido pela razão entre a área total de todas as folhas de uma planta (um lado das folhas) e a área do solo ocupada pela planta, e varia de 0 a 6. O LAI é um indicador da resistência da biomassa e do dossel ao fluxo de vapor, e pode ser calculado segundo Allen *et al.*, (2007) pela equação 5 e 6:

$$\text{Para } \text{SAVI} \leq 0,81 \{ \text{LAI} = 11 \times \text{SAVI}^3 \quad (5)$$

$$\text{Para } \text{SAVI} > 0,817 \{ \text{LAI} = 6 \quad (6)$$

A temperatura de superfície do solo foi calculada conforme Chander *et al.* (2009), com a correção da emissividade da superfície, proposto por Allen *et al.* (2007), conforme a Equação 7:

$$T_s = \frac{K_2}{\left( \frac{\epsilon_{NB} \times K_1}{R_c} + 1 \right)} \quad (7)$$

Onde:  $T_s$  é a temperatura da superfície (K);  $\epsilon_{NB}$  corresponde à emissividade térmica da superfície;  $R_c$  é o brilho térmico corrigido da superfície e  $K_1$  e  $K_2$  são constantes para imagens Landsat no arquivo MTL. Unidades para  $R_c$  devem ser os mesmos que para  $K_1$  ( $W / m^2 / sr / m$ ). Em seguida, os valores de temperatura obtidos em Kelvin foram convertidos para Celsius.

A emissividade térmica da superfície ( $\epsilon_{NB}$ ) é expressa pelas equações 8 e 9 abaixo (ALLEN *et al.*, 2007):

$$\text{Para } \text{LAI} \leq 3 \quad \{ \text{NB} = 0,97 = 0,0033 \quad (8)$$

$$\text{Para } \text{LAI} > 3 \quad \{ \text{NB} = 0,98 \quad (9)$$

A correção para a radiação térmica da superfície ( $R_c$ ) é calculada por Wukelic *et al.* (1989) como na Equação 10:

$$R_c = \frac{L_{TIRS} - R_p}{\tau_{NB}} - (1 - \epsilon_{NB}) * R_{sky} \quad (10)$$

Onde, TIRS é a banda do sensor termal infravermelho do Landsat 8 (10.600-11.190 nm);  $R_p$  é a radiância na faixa de 10,4 a 12,5 m ( $W/m^2/sr/\mu m$ ),  $R_{sky}$  é a banda estreita radiação térmica descendente de um céu claro ( $W/m^2/sr/\mu m$ ).  $R_p$  e  $R_{sky}$  podem ser vistos detalhadamente em Allen *et al.* (2007).

Foi utilizada a ferramenta Mosaic Wisard no software Erdas 2014. Essa ferramenta realiza uma equalização automática do brilho de cada cena fazendo com que se assemelhem a



uma única imagem. Pois, dependendo do dia em que foi tirada a fotografia, elas podem ter diferenças no brilho, umas mais claras que as outras.

Os valores da temperatura de superfície a imagem, presentes em cada pixel que coincidiam com a localização de cada estação climática, de acordo com as coordenadas disponibilizadas pelo INMET, foram agregadas ao banco de dados. Na análise de regressão, cada uma das médias mensais presentes numa mesma estação foi correlacionada com o mesmo valor de pixel correspondente àquele ponto. A equação de regressão encontrada para estimar os valores de temperatura média do ar foi determinada por meio do software SAS University Edition, após a correlação entre a variável dependente: normais mensais da temperatura do ar; e as independentes: temperatura do solo por imagem de satélite ( $T_{sat}$ ), latitude ( $\delta$ ), longitude ( $\lambda$ ) e altitude ( $\varphi$ ). Assim foi composta base de dados com 144 conjuntos de valores mensais normais de temperatura do ar e as variáveis independentes, os quais foram observados nas 12 estações meteorológicas do estado ao longo do ano.

Em seguida, com o objetivo de validar a eficiência da equação, realizou-se a comparação entre os dados de temperatura média anual disponibilizados pelo INMET e o valor médio anual estimado pelo modelo proposto. Isto é, comparou-se a média anual de cada uma das 12 estações do INMET com o valor estimado para cada estação. A validação estatística dos dados foi realizada por meio dos métodos estatísticos: Desvio absoluto médio - MAD (Mean Absolute Deviation), Erro médio quadrado - MSE (Mean Square Error), Raiz do erro médio quadrado - RMSE (Root Mean Square Error) e Média do erro absoluto percentual - MAPE (Mean Absolute Percentage Error), calculado através das equações 11 a 14.

$$MAD = \frac{\sum_{t=1}^n |A_t - F_t|}{n} \quad (11)$$

$$MSE = \frac{\sum_{t=1}^n (A_t - F_t)^2}{n} \quad (12)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^n (A_t - F_t)^2}{n}} \quad (13)$$

$$MAPE = \frac{\sum_{t=1}^n \left| \frac{A_t - F_t}{A_t} \right|}{n} \times 100 \quad (14)$$

Onde,  $A_t$  representa o valor médio anual de temperatura observado, conforme a normal climatológica,  $F_t$  o valor estimado,  $n$  o número de observações, que neste caso foram 12.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

As variáveis independentes analisadas na análise de regressão foram selecionadas por serem facilmente obtidas em todo o território analisado e por obterem um bom índice de correlação ( $R^2$ ). O índice proposto para aferir a temperatura média mensal anual do estado ( $T_{ar}$ ) alcançou um  $R^2 = 0.9614$  e é composto da seguinte expressão (Equação 15):

$$T_{ar} = -15,59818 - (T_{sat} * 0,14406) - (\lambda * 1,18551) - (\delta * 0,76993) - (\varphi * 0,01186) \quad (15)$$

Na equação anterior, o F tabelado para 4 graus de liberdade e 7 residual é igual a 4,1203, entretanto o valor do F calculado nessa estatística é igual a 43,59. Como o F calculado é maior que o F tabelado, rejeita-se a hipótese nula e se aceita a hipótese alternativa (Tabela 2). Ou seja, a estatística realizada indica que há uma correlação bastante forte entre a temperatura observada nas estações e a temperatura estimada por meio do modelo.

Tabela 2. Análise de Variância do modelo – Anova.

	Gl	SQ	MQ	F	F de significação
Regressão	4	53.55265	13.38816	43.59	<.0001
Resíduo	7	2.14985	0.30712		
Total	11	55.70250			

Fonte: Autoria própria.

Antonini *et al.* (2009), formularam um modelo matemático para estimativa da temperatura média diária do ar no Estado de Goiás correlacionando a temperatura média diária com as variáveis independentes: altitude, latitude e longitude, através de regressão linear.

Filgueiras *et al.* (2016), estimando a temperatura do ar na estação meteorológica da Faculdade de Ciências Agronômicas – UNESP, campus de Botucatu-SP, concluíram que a regressão linear de dados de temperatura de superfície, com dados de temperatura do ar no momento da passagem do satélite, e temperatura média do ar, apresentaram forte coeficiente de determinação, indicando a possibilidade do uso do sensor TM na estimativa e espacialização da temperatura média diária do ar.

As menores e maiores temperaturas médias estimadas para o Estado do Ceará conforme a Figura 3 foram, respectivamente, 18 e 30,46 °C e o valor médio de temperatura foi de 25,78 °C. É notável a influência da altitude na temperatura, onde as regiões serranas se destacaram por apresentar os menores valores de temperatura de superfície e de temperatura

estimada do ar, principalmente quando essas serras são cobertas com vegetação de mata úmida (FUCK JUNIOR, 2008; MORO *et al.*, 2015).

A influência da altitude sobre a temperatura na troposfera pode ser explicada, apesar de ser um fenômeno bastante complexo. Um dos fatores que influenciam nesse processo é a pressão atmosférica sobre as partículas do ar. Quanto maior a coluna de ar sobre uma superfície, maior a pressão e, conseqüentemente, maior a temperatura. Outro fator é o efeito da gravidade que concentra as moléculas do ar nas regiões mais próximas da superfície terrestre, o que promove uma maior concentração de ar e pressão em altitude mais baixa e a sensação de ar rarefeito em altitudes elevadas.

De acordo com Maciel *et al.* (2012), a atmosfera pode ser estudada a partir de seus elementos constituintes e variáveis atmosféricas. Em que os elementos constituintes são os gases, aerossóis e materiais particulados em suspensão, enquanto as variáveis atmosféricas são representadas pela temperatura, umidade e pressão. Segundo o mesmo autor, essas variáveis são influenciadas pela posição atmosférica, aspectos geográficos da localidade, configuração do território, altitude, relevo, por sua proximidade com o mar, pela vegetação e pelos efeitos da continentalidade, além das interferências antrópicas.

Dessa forma, a menor densidade de partículas em lugares altos dificulta a transferência de calor na atmosfera e irradiação solar. Já em lugares baixos, a expansão das partículas devido à maior incidência de energia solar e a maior quantidade de partículas, promove o aumento da pressão atmosférica e o conseqüente aumento da temperatura.

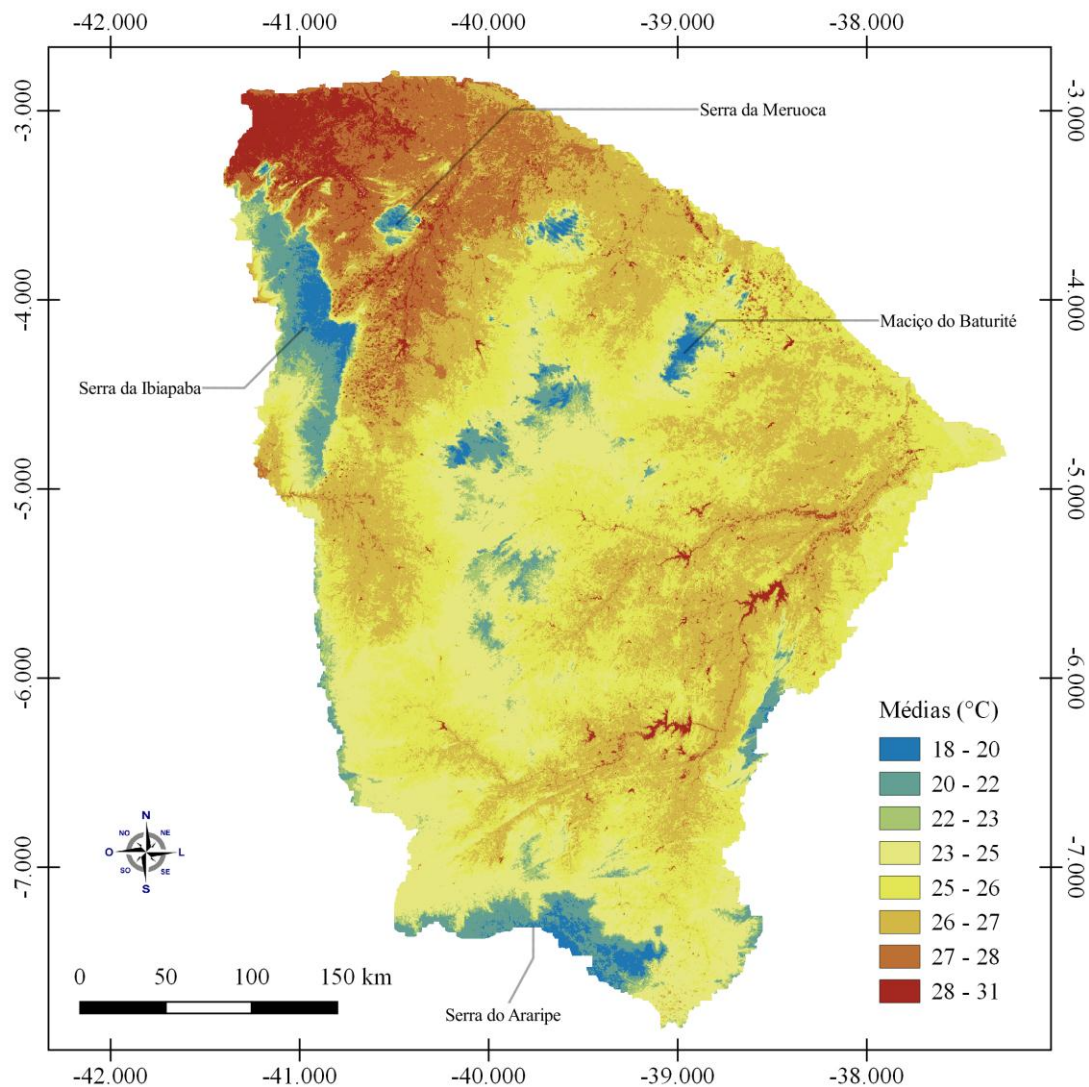
Em estudo realizado por Cargnelutti Filho *et al.* (2006), verificaram que a temperatura mínima média do ar, no Estado do Rio Grande do Sul, analisada em intervalos de 10 dias em vários locais do estado, poderia ser estimada por meio das coordenadas geográficas. Segundo os mesmos autores, a altitude e a latitude, nessa ordem, foram os fatores que exerceram maior efeito sobre a temperatura mínima média decendial do ar. Cargnelutti Filho *et al.* (2006), incluem a longitude como uma coordenada geográfica capaz de estimar as temperaturas máxima e média do ar.

Valladares *et al.* (2005), propuseram um método para a estimativa da temperatura do ar baseado em um modelo de elevação digital MDE originário de dados do radar SRTM. Os autores executaram análises de regressão linear múltipla para cada região do país, tendo como variável dependente a temperatura média do ar e como variáveis independentes a latitude, a longitude e a altitude.

Os locais destacados em azul no mapa (Figura 3) representam as menores temperaturas, como no município de Guaramiranga, localizado em uma região serrana, na

Área de Proteção Ambiental (APA) da Serra de Baturité, às coordenadas:  $-38^{\circ} 56' 20''$  Oeste e  $-4^{\circ} 16' 36''$  Sul e com altitudes que variam de 240 a 1.093 metros e uma média 798 metros de altura, distante 105,5 km da capital – Fortaleza. O município de Guaramiranga é considerado um dos mais frios do estado e de todo o Nordeste, constituindo o menor em extensão territorial do estado (60,483 km<sup>2</sup>), com pouco mais de quatro mil habitantes.

Figura 3. Mapa de Temperatura média do Ar, estimada para o Estado do Ceará.



Fonte: Autoria própria.

Outros municípios da mesma Serra de Baturité se destacam, como: Palmácia, Pacoti, Mulungu e Aratuba. Alguns municípios no interior do estado apresentaram baixas temperaturas, como: Meruoca, Alcântaras, Monsenhor Tabosa, Redenção, Pedra Branca, dentre outras. No entanto, a maior porção do estado se manteve na faixa entre 26 e 27°C.

A serra da Ibiapaba, também conhecida como Serra Grande, está localizada ao extremo oeste do estado do Ceará, limitando-se com o estado do Piauí. Possui uma altitude

média elevada, superior a 700 metros, mas com uma declividade bastante suave e gradual. Possui uma vegetação densa, com características de Mata Atlântica. Suas condições climáticas são bastante favoráveis em relação ao restante do estado, onde também se pode desfrutar de uma das temperaturas mais amenas.

A região do Cariri, localizada ao extremo sul do estado, comporta a chapada do Araripe que compreende a Floresta Nacional do Araripe – FLONA, a primeira floresta reconhecida por lei do Brasil. Possui um ambiente privilegiado por estar situado em uma bacia sedimentar com três aquíferos de águas milenares e centenas de fontes que jorram ao pé da chapada. Muitas vezes a região é reconhecida como o “Oásis do Sertão”. Destacam-se no estado pela boa taxa de pluviosidade e que contribuem para as baixas temperaturas (entre 18 e 22°C) no topo da chapada.

Ferreira (2005) estimou a temperatura da superfície terrestre por meio de imagens infravermelhas do satélite NOAA e correlacionou estes resultados com os dados de temperatura do ar, e concluiu ser uma ferramenta muito útil aos estudos de monitoramento agrometeorológico.

No tocante a validação estatística dos dados, foi realizada por meio dos métodos estatísticos: MAD, MSE, RMSE e MAPE, com base nos dados da Tabela 3.

Tabela 3. Base de dados para a validação do modelo de temperatura, a partir da normal climatológica do Inmet de 1990-2010 (valor observado).

Localidade	Valor Observado	Valor Estimado	Erro	Valor Absoluto do Erro	Erro ao quadrado	Erro absoluto/ Valor observado
	$A_t$	$F_t$	$A_t - F_t$	$ A_t - F_t $	$(A_t - F_t)^2$	$  (A_t - F_t) / A_t  $
Acaraú	27,3	28,5	-1,273	1,273	1,622	0,0467
Barbalha	25,9	26,4	-0,453	0,453	0,205	0,0175
Campos Sales	25,0	24,3	0,741	0,741	0,549	0,0296
Crateús	27,4	26,9	0,537	0,537	0,289	0,0196
Fortaleza	26,9	27,9	-1,016	1,016	1,033	0,0378
Guaramiranga	20,9	20,8	0,118	0,118	0,014	0,0056
Iguatu	27,3	26,9	0,386	0,386	0,149	0,0141
Jaguaruana	27,5	28,0	-0,526	0,526	0,277	0,0191
Morada Nova	27,4	28,3	-0,853	0,853	0,727	0,0311
Quixeramobim	27,2	27,7	-0,532	0,532	0,283	0,0196
Sobral	27,2	28,2	-0,967	0,967	0,935	0,0355
Tauá	27,1	26,1	0,952	0,952	0,906	0,0351
<b>Médias</b>	<b>26,4</b>	<b>26,7</b>	<b>-0,241</b>	<b>0,696</b>	<b>0,582</b>	<b>0,026</b>

Fonte: Autoria própria.

O Erro Quadrático Médio (MSE) calcula a média dos erros do modelo ao quadrado, dessa forma, diferenças menores têm menos importância, enquanto diferenças maiores recebem mais peso. A Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE) representa o desvio padrão da amostra das diferenças entre os valores previstos e os valores observados. E, conforme Hallak e Pereira Filho (2011) é utilizada para expressar a acurácia dos resultados numéricos com a vantagem de apresentar os valores do erro nas mesmas dimensões da variável analisada. O Erro Absoluto Médio (MAD) indica a média do erro absoluto.

A Média do Erro Absoluto Percentual (MAPE) possui a vantagem de utilizar termos percentuais (%) que fornecem um rápido entendimento, e a desvantagem de acentuar a discrepância quando os valores observados forem muito pequenos (CAMELO *et al*, 2016). Nesse caso (Tabela 4), o erro absoluto em percentual (MAPE) apresentou 2,6% de discrepância entre os dados reais e estimados. Interpreta-se seu valor como aceitável.

Tabela 4. Resultado da validação do modelo gerado para estimativa da temperatura média anual.

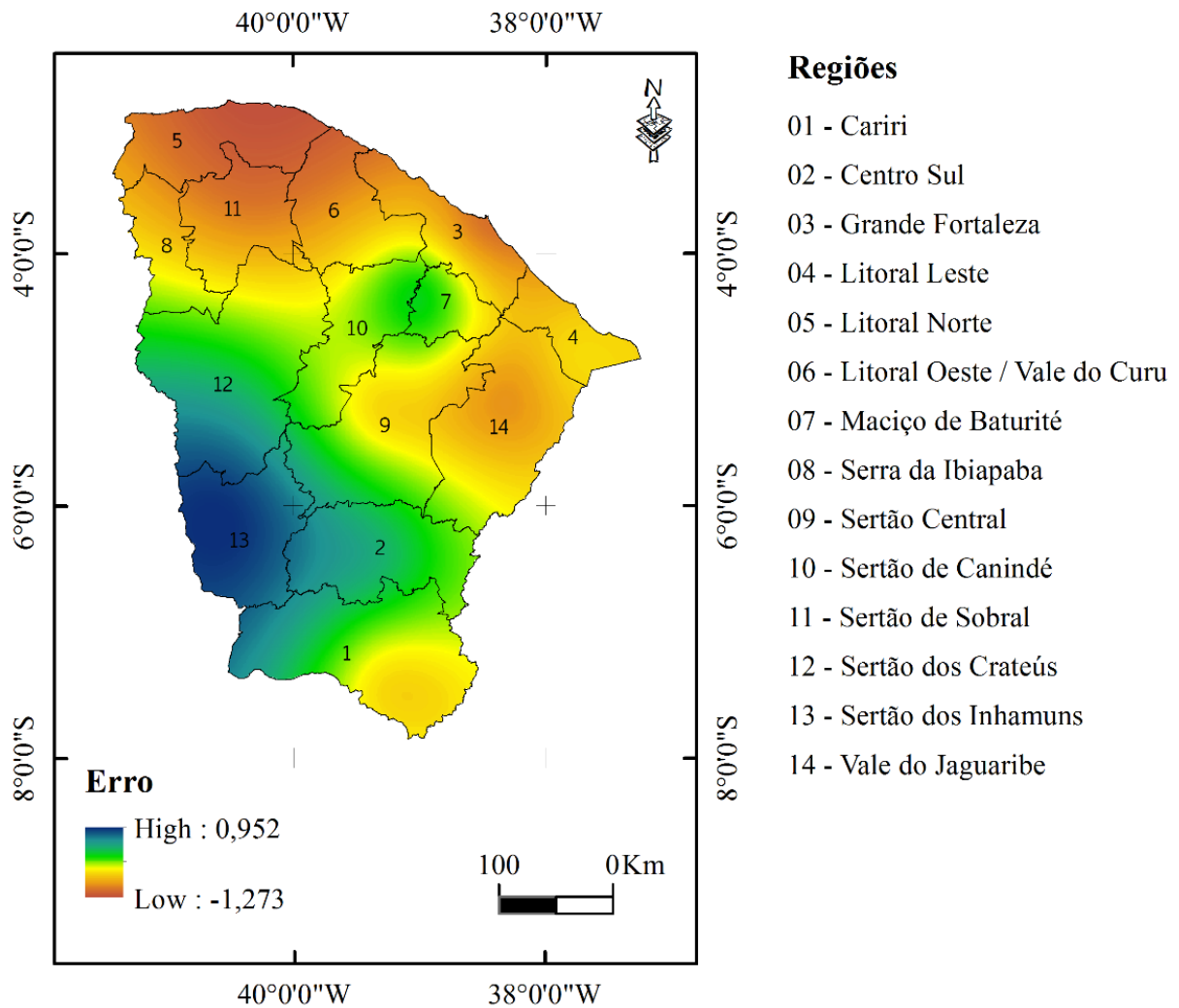
N	12
MSE	0,582
MAD	0,696
RMSE	0,763
MAPE	2,60

Fonte: Autoria própria.

Em estudo realizado por Kao *et al.* (2013), utilizando a análise de regressão para a previsão de preço das ações, encontram-se para RMSE e MAPE os respectivos valores de 3.9 e 2.18, na tentativa de validar a equação. Os mesmos autores concluem que esses valores indicam a eficácia do método, visto que, quanto menores os valores de RMSE e MAPE, mais aceitável a equação de regressão.

Foi realizada a espacialização do erro no mapa do estado do Ceará, obtido pela diferença entre o valor observado e o estimado, conforme a Figura 4. O erro da estimativa variou de -1,05 a 0,99. A estimativa tende a amenizar a temperatura na região dos Inhamuns e acentuar a temperatura nas áreas próximas ao litoral, para a qual outros efeitos além da altitude operam, como a proximidade do mar e trocas de massa de ar. As áreas identificadas com verde no mapa são as áreas em que a temperatura estimada mais se aproximou da temperatura observada nos postos do Inmet.

Figura 4. Espacialização do Erro, obtido pela diferença entre os valores observados e estimados de cada estação.



Fonte: Autoria própria.

Pode-se observar que os maiores erros foram encontrados na região do litoral, ao noroeste do estado e ao leste, nas proximidades da região dos Sertões dos Inhamuns, representada pela estação localizada no município de Tauá. Os valores mais próximos foram identificados na estação presente no município de Guaramiranga e ao sul do estado.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste estudo, o índice proposto para predição da temperatura média do ar, utilizando-se de análise de regressão entre dados meteorológicos de temperatura, com os geográficos de localização e de altitude, além dos de sensoriamento remoto, apresenta eficiência na estimativa. A equação obtida apresenta um índice de correlação  $R^2 = 0.9614$ , demonstrando a

eficiência do método. O resultado da validação do modelo proposto apresentou índices de erro menores que outros trabalhos encontrados na literatura. Desta maneira, caracterizando-se como um método possível para a avaliação de locais em que os dados meteorológicos são inexistentes.

A estimativa por meio de imagem de satélite promove um maior detalhamento das informações dentro do território analisado, fato que não seria possível utilizando apenas os dados das 12 estações climatológicas do INMET.

A temperatura média do ar estimada no estado do Ceará está intimamente ligada à altitude, tendo em vista, que, em lugares mais elevados a mesma apresenta considerável redução em relação ao restante do estado. As menores temperaturas foram encontradas nas Regiões da Ibiapaba, Cariri e serra do Baturité. As maiores temperaturas foram observadas nos sertões dos Inhamuns e na região litorânea.

### **Agradecimentos**

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, pela concessão de bolsa de pesquisa.

### **BIBLIOGRAFIA**

ALLEN, R. G., M TASUMI, AND R. TREZZA. Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC) – Model. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, n.4, v.133, p.380-394, 2007.

ANTONINI, J. D. A.; SILVA, E. D.; OLIVEIRA, L. F. C.; SANO, E. E. Modelo matemático para estimativa da temperatura média diária do ar no Estado de Goiás. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 44, n. 4, p. 331-338, 2009.

CÂMARA, G.; MONTEIRO, A. M.; FUCKS, S. D.; CARVALHO, M. S. Análise espacial e geoprocessamento. São José dos Campos. **INPE**, v. 2, 2002.

CAMELO, H. N.; LUCIO, P. S.; LEAL JUNIOR, J.B.V. Modelagem de média mensal de velocidade do vento para região litorânea no nordeste Brasileiro através do método aditivo Holt-Winters com vias a previsão de geração eólica. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, v.5, n.4, p.587-604, 2016.

CAPUCHINHO, F. F.; SIQUEIRA, M. P.; CRUZ, G. H. T.; COSTA SANTOS, L.; REIS, E. F. Coordenadas geográficas e altitude na estimativa da temperatura do ar no estado de Goiás. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada-RBAI**, v. 13, n. 2, p. 3346-3357, 2019.

CARGNELUTTI FILHO, A.; MALUF, J. R. T.; MATZENAUER, R.; STOLZ, Á. P. Altitude e coordenadas geográficas na estimativa da temperatura mínima média decendial do ar no



Estado do Rio Grande do Sul. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.41, n.6, p.893-901, 2006.

CARGNELUTTI FILHO, A.; MALUF, J.R.T.; MATZENAUER, R. Coordenadas geográficas na estimativa das temperaturas máxima e média decendiais do ar no Estado do Rio Grande do Sul. **Ciência Rural**, v.38, p.2448-2456, 2008.

CHANDER, G; MARKHAM, B.L.; HELDER, D.L. Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors. **Remote sensing of environment**, v. 113, n. 5, p. 893-903, 2009.

DUFFIE, J.A. AND W.A. BECKMAN. Solar Engineering of Thermal Processes. **John Wiley and Sons**, New York, p. 1-109, 1980.

EXPLORER, USGS Earth. US Geological Survey Earth Explorer. Disponível em: <<https://earthexplorer.usgs.gov/>> Acesso em junho de 2019.

FERREIRA, C. C. **Relações entre a temperatura mínima do ar e da relva e a temperatura da superfície terrestre, obtida a partir de imagens NOAA, no Rio Grande do Sul**. 2005. 99p. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação Sensoriamento Remoto, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

FILGUEIRAS, R.; NICOLETE, D. A. P.; CARVALHO, T. M.; CUNHA, A. R.; ZIMBACK, C. R. L. Predição da temperatura do ar por meio de sensoriamento remoto orbital. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 68, n. 8, 2016.

FUCK JUNIOR, S. C. F. subsídio à gestão ambiental: descrição fisiográfica e análise funcional das bacias hidrográficas do Ceará. **Geoambiente On-Line**, n.10, 2008.

HALLAK, R.; PEREIRA FILHO, A. J. Methodology for performance analysis of simulations of convective systems in the metropolitan area of São Paulo with the ARPS model: sensitivity to variations with the advection and the data assimilation schemes. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 26, n. 4, p. 591-608, 2011.

INMET, Instituto Nacional de Meteorologia. Normais climatológicas do Brasil 1990-2010. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/normaisClimatologicas>>. Acesso em junho de 2019.

KAO, L. J., CHIU, C. C., LU, C. J., & YANG, J. L. Integration of nonlinear independent component analysis and support vector regression for stock price forecasting. **Neurocomputing**, v. 99, p. 534-542, 2013.

LIMA, M. T. V.; FEITOSA, J. V.; OLIVEIRA, C. W.; COSTA, A. N. L. Estimativa do conforto térmico bovino no município de Barbalha, 2019. *In*: IV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS NATURAIS DO SEMIÁRIDO - SBRNS, 2019, Crato, Ceará. **Anais...** Crato: UFC, 2019.

MACIEL, A. S.; BARCELOS, B. F.; OLIVEIRA, L. A. A análise da influência da altitude na temperatura e na precipitação da mesorregião Norte de Minas–Minas Gerais. **Rev Geonorte**, v. 2, p. 250-261, 2012.

MEDEIROS, R. M.; HOLANDA, R. M. Classificação climática e balanço hídrico pelo método de Köppen e Thornthwaite do município de Barbalha, Ceará, Brasil. **Revista Equador**, v. 8, n. 3, p. 19-43, 2019.

MEDEIROS, S. DE. S.; CECÍLIO, R. A.; MELO JUNIOR, J. C. F. DE.; SILVA JUNIOR, J. L. C. Estimativa e espacialização das temperaturas do ar mínimas, médias e máximas na Região Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.9, n.2, p.247-255, 2005.

MORO, M. F.; MACEDO, M. B.; MOURA-FÉ, M. M. D.; CASTRO, A. S. F.; COSTA, R. C. D. Vegetação, unidades fitoecológicas e diversidade paisagística do estado do Ceará. **Rodriguésia**, v. 66, n. 3, p. 717-743, 2015.

SAS INSTITUTE. SAS University Edition, 9.4. 2017.

SILVA, B. B. D., BRAGA, A. C., BRAGA, C. C., DE OLIVEIRA, L. M., MONTENEGRO, S. M., BARBOSA JUNIOR, B. Procedures for calculation of the albedo with OLI-Landsat 8 images: Application to the Brazilian semi-arid. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.20, n.1, p.3-8, 2016.

SILVA, B. B., OLIVEIRA MENDONÇA, R. R., SILVA, S. T. A., COSTA FERREIRA, R. Mapeamento do albedo de áreas heterogêneas do estado do Ceará com imagens TM-Landsat 5. **Revista de Geografia**, v.25, n.2, p.24-41, 2010.

TASUMI, M.; ALLEN, R. G.; TREZZA, R. At-surface reflectance and albedo from satellite for operational calculation of land surface energy balance. **Journal of hydrologic engineering**, v. 13, n.2, p.51-63, 2008.

VALLADARES, G. S.; MARIN, F. R.; OSHIRO, O. T.; GOUVÊA, J. R. F. Uso de imagens de radar na estimativa da temperatura do ar. In: Embrapa Territorial-Artigo em anais de congresso (ALICE). In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 12., 2005, Goiânia. **Anais eletrônicos...** São José dos Campos: INPE, 2005.

WUKELIC, G. E., GIBBONS, D. E., MARTUCCI, L. M., FOOTE, H. P. Radiometric calibration of Landsat thematic mapper thermal band. **Remote Sensing of Environment**, v.28, p.339-347, 1989.

**Trabalho enviado em outubro de 2019**

**Trabalho aceito em maio de 2020**