UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE ENERGIA E AMBIENTE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA AMBIENTAL

RAIANNY LEITE DO NASCIMENTO WANDERLEY

**SERVIÇOS ECOSSISTÊMICOS DE REGULAÇÃO TÉRMICA EM
ÁREAS FLORESTAIS DE MATA ATLÂNTICA E CERRADO**

Versão corrigida

SÃO PAULO
2018

RAIANNY LEITE DO NASCIMENTO WANDERLEY

Serviços ecossistêmicos de regulação térmica em áreas florestais de Mata
Atlântica e Cerrado

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência Ambiental do Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Doutor em Ciência Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Humberto Ribeiro da Rocha

Versão corrigida

SÃO PAULO
2018

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

FICHA CATALOGRÁFICA

Wanderley, Raianny Leite do Nascimento.

Serviços ecossistêmicos de regulação térmica em áreas florestais de Mata Atlântica e Cerrado. / Raianny Leite do Nascimento Wanderley; orientador: Humberto Ribeiro da Rocha. – São Paulo, 2018.
78f.: il; 30 cm.

Tese (Doutorado em Ciência Ambiental) – Programa de Pós-Graduação em Ciência Ambiental – Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo.

1. Temperatura atmosférica. 2. Sensoriamento remoto. 3. Florestas tropicais. 4. Cana-de-açúcar. 5. Pastagens. I. Título.

Elaborado por Maria Penha da Silva Oliveira CRB-8/6961

Nome: WANDERLEY, Raianny Leite do Nascimento

Título: Serviços ecossistêmicos de regulação térmica em áreas florestais de Mata Atlântica e Cerrado

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência Ambiental do Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Doutor em Ciência Ambiental.

Aprovada em:

Banca Examinadora

Julgamento: _____

Assinatura: _____

Julgamento: _____

Assinatura: _____

Julgamento: _____

Assinatura: _____

Julgamento: _____

Assinatura: _____

Julgamento: _____

Assinatura: _____

Presidente: _____

Assinatura: _____

AGRADECIMENTOS

Primeiramente ao meu Deus que é quem me ampara e me guia por todas as escolhas que faço na minha vida;

À minha amada mãe, Lucinha, que é a minha estrela, minha mentora e minha melhor conselheira;

Às minhas irmãs, Raniely e Rayssa e ao meu primo Anderson, que juntos, sempre me ajudam e me apoiam desde que posso lembrar;

Ao meu melhor amigo e companheiro de uma vida, José Rubens, que junto com nosso Logan, me deram uma família linda;

Ao querido e melhor professor que já tive na vida, Dr. Humberto Rocha, que foi sempre muito presente e solícito em todas as vezes que precisei e até mesmo quando eu nem pensei que precisaria e, além de tudo, sua generosidade que, com certeza, é uma das suas características que levarei na minha memória para sempre;

Ao meu grande amigo, Leonardo, que foi a melhor companhia que eu poderia ter encontrado dentro da USP, sempre com bom humor e uma das pessoas mais inteligentes com quem tive o privilégio de compartilhar sorrisos e lágrimas;

Aos amados irmãos em Cristo, Teodoro e Lucilene pelas palavras de conforto e momentos de alegria compartilhados;

Aos amigos do Laboratório de Clima e Biosfera, pois sem eles esse trabalho não teria gerado os resultados tão promissores, em especial Helber, Emília e Duda;

Aos funcionários, amigos e professores do PROCAM e do IAG;

À FAPESP, pelo apoio financeiro, sob o projeto nº: 2012/51872-5: Fapesp/NERC (*Natural Environment Research Council*) “ECOFOR: Biodiversidade e funcionamento de ecossistemas em áreas alteradas pelo homem nas Florestas Amazônica e Atlântica”.;

À CAPES pela bolsa concedida sob o código 001.

“Eu conjecturei mil hipóteses e fui vencida por um fato:

eu não posso alcançar a verdade absoluta”

Autor desconhecido

RESUMO

WANDERLEY, Raianny Leite do Nascimento. **Serviços ecossistêmicos de regulação térmica em áreas florestais de Mata Atlântica e Cerrado**. 71f. Tese (Doutorado em Ciência Ambiental) – Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo, 2018.

As florestas tropicais desempenham um papel importante na regulação climática por sua característica funcional mais eficiente de absorver energia radiativa e transformá-la em umidade do ar superficial, que reduz a produção de calor sensível e promove resfriamento diurno. Neste sentido a antropização das áreas de vegetação nativa é uma das principais causas de modificação do clima em escalas local e regional. Esta tese visa quantificar os padrões de temperatura em áreas de coberturas florestais e nas áreas antropizadas de entornos para subsidiar informações ao entendimento dos serviços ecossistêmicos de regulação térmica. Foram utilizadas medidas da temperatura do ar com estação meteorológica em áreas de cerrado, cana-de-açúcar, eucalipto na região de Ribeirão Preto, SP e de áreas com pastagem e floresta na região da Serra do Mar na região de São Luiz do Paraitinga, SP, com dados obtidos parcialmente no intervalo de 2005 a 2018. Foram calculadas a temperatura de superfície (LST) e a temperatura aerodinâmica por meio de imagens de satélite de alta resolução e do modelo de balanço de energia por sensoriamento remoto SEBAL. Mostrou-se que a temperatura do ar máxima diurna foi maior em ≈ 1 °C e a mínima foi menor em ≈ 3 °C sobre as áreas de cana-de-açúcar em relação ao cerrado. Para área de eucalipto, a temperatura máxima diurna foi de $\approx 1,2$ °C menor e nas mínimas de $\approx 0,5$ °C em comparação com o cerrado. As áreas de pastagem foram mais quentes que as áreas de floresta de Mata Atlântica em ≈ 5 °C na máxima diária e ≈ 1 °C na mínima noturna. Os padrões da temperatura de superfície e aerodinâmica calculadas mostraram regimes semelhantes de aquecimento/resfriamento, mas com valores numéricos diferentes. A estimativa da LST na região de Mata Atlântica mostrou significativa dependência da topografia, que controlou o regime térmico médio entre ≈ 1 a 2 °C devido ao aspecto do terreno e ≈ 2 a 4 °C devido à altitude. A LST corrigida pela topografia mostrou uma relação de dependência com o grau de antropização florestal de Mata Atlântica. A taxa de

aquecimento foi aproximadamente linear, em que cada 25 % de incremento de antropizada resultou em 1°C de aquecimento da superfície. Nesta projeção média, o aquecimento máximo ocorre no caso de antropização total de 4°C. A avaliação do regime térmico de superfície com modelos de balanço de energia por sensoriamento remoto, em conjunto com dados medidos de campo por estações meteorológicas adequadas, mostrou significativos indicadores dos padrões de funcionalidade climática em diferentes usos da terra na região de Cerrado e Mata Atlântica do estado de SP, que por sua vez estabelecem subsídios quantificadores ao levantamento dos serviços ecossistêmicos florestais de regulação térmica.

Palavras-chave: Temperatura do ar, Floresta, Cerrado, Pastagem, Cana-de-açúcar, Sensoriamento remoto.

ABSTRACT

WANDERLEY, Raianny Leite do Nascimento. **Ecosystem services of thermoregulation in areas of the Atlantic Forest and Cerrado.** 73f. Doctorate Thesis (Environmental Science) – Institute of Energy and Environment of University of São Paulo, São Paulo, 2018.

Tropical forests play an important role in climate regulation due to their functional feature of being more efficient in absorbing radiation and turning it in surface air humidity, that reduces sensible heat production and promotes diurnal cooling. In this sense, the anthropization of native vegetation areas is one of the main causes of climate modification in local and regional scales. This thesis aims to quantify the temperature patterns on areas of forest cover and on anthropized areas in the surroundings, using both field weather data and satellite data, in order to subsidize information for the understanding of ecosystem services in thermal regulation. We used air temperature measurements from weather stations over areas of cerrado, sugar-cane and eucalyptus in Ribeirão Preto-SP region, and over areas of pasture and forest in the Serra do Mar region, next to São Luiz do Paraitinga-SP, with data obtained from 2005 to 2018. Land surface temperature (LST) and aerodynamic temperature were calculated using high resolution satellite images and the energy budget model by remote sensing, SEBAL. It was shown that the diurnal maximum and minimum air temperatures were $\approx 1^{\circ}\text{C}$ larger and $\approx 3^{\circ}\text{C}$ smaller, respectively, over sugar-cane areas in comparison to cerrado. For eucalyptus areas, the diurnal maximum and minimum temperatures were $\approx 1,2^{\circ}\text{C}$ and $\approx 0,5^{\circ}\text{C}$ smaller, respectively, in comparison to cerrado. Pasture areas were $\approx 5^{\circ}\text{C}$ and $\approx 1^{\circ}\text{C}$ warmer than Atlantic forest areas in the daily maximum and minimum, respectively. The calculated LST and aerodynamic temperature patterns presented similar regimes of heating/cooling, but different numeric values. The estimated LST in Atlantic forest region showed significant dependence on topography, which controlled the mean thermal regime between ≈ 1 to 2°C due to the aspect, and ≈ 2 to 4°C due to altitude. The LST corrected from topography was dependent on the level of anthropization of Atlantic forest, with an approximately linear heating rate, so that each 25% of increment in the anthropization area resulted in 1°C of surface heating. In this mean projection, the maximum heating is $\approx 4^{\circ}\text{C}$ and happens in the case of total anthropization. The evaluation of the surface thermal regime using energy budget models via remote sensing, along with field data provided by appropriate weather stations, showed significant indicators of the climate functionality patterns in different land uses in cerrado and Atlantic forest regions, which in turn establish quantifying subsidies to the ecosystem services of forests in regulating temperature.

Key words: Air temperature, Forest, Cerrado, Pasture, Sugar-cane, Remote sensing.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Diagrama de serviços ecossistêmicos.	15
Figura 2: Mapa de biomas nativos do Brasil (a) e mapa de biomas do Brasil da última década (b).....	16
Figura 3: Mapa revisado de áreas prioritárias de preservação do Cerrado Brasileiro.	17
Figura 4: Imagem (ano 2010) da área de estudo (linha sólida vermelha) próxima do litoral norte do estado de São Paulo (SP) com o Parque Estadual da Serra do Mar (linha sólida branca). Ponto vermelho: Estação automática em área de pastagem (CTB); ponto branco: torre micrometeorológica em área de floresta (SVG).	21
Figura 5: a) Altitude, em metros; b) Imagem classificada da cobertura vegetal da área de estudo para o ano de 2010; c) Aspecto, em graus de orientação da face.....	22
Figura 6: Área de estudo na região dos municípios de Guataporã e Pradópolis, Luís Antônio e Santa Rita do Passa Quatro (SP). Ponto vermelho: cerrado (PEG), ponto azul: eucalipto (VCP), pontos verdes: cana-de-açúcar (Usina Santa Rita, Fazenda Nossa Senhora de Aparecida, Fazenda São Luís, Mirante, Votorantim Celulose e Papel).	23
Figura 7: a) Altitude (m); b) Aspecto (°) da orientação da face da área de estudo no noroeste do estado de São Paulo.....	23
Figura 8: Extensão da Camada Limite interna (δ_i , abaixo da linha tracejada) com vento na direção χ , onde se diferenciam os efeitos das regiões vizinhas A e B.	24
Figura 9: Torres de monitoramento micrometeorológico instaladas nas áreas de (a) cana (USR), (b) eucalipto e (c) cerrado, no noroeste do Estado de São Paulo, e altitude onde estão instaladas.....	25
Figura 10: Fotografias da área de cerrado PEG, tomadas em diferentes datas na perspectiva da torre meteorológica, mostrando a sazonalidade da vegetação.	26
Figura 11: Locais das estações automáticas em plantação de cana-de-açúcar na região de Guataporã e Pradópolis, SP: Mirante, Fazenda Nossa Senhora de Aparecida e Fazenda São Luís.	27
Figura 12: Vista da área de Mata Atlântica no Núcleo Santa Virgínia, São Luiz do Paraitinga, São Paulo. Imagem setembro de 2014.	28
Figura 13: Torre micrometeorológica instalada em área de Mata Atlântica, Núcleo Santa Virgínia, São Luiz do Paraitinga. Fonte: Freitas (2012).....	28

Figura 14: Sítio experimental em área de pastagem no distrito de Catuçaba (sítio CTB).	29
Figura 15: Fluxograma de parte do SEBAL utilizado para cálculo da temperatura de superfície.....	31
Figura 16: Esquematização dos principais componentes do Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL) que convertem medidas espectrais obtidas remotamente (radiâncias refletida e emitida) em balanço de energia à superfície.	33
Figura 17: Total de imagens por mês, em condições de céu claro, para as regiões noroeste (cerrado, cana-de-açúcar, período de 2001 a 2018) e litoral (Mata Atlântica e pastagem, período de 2006 a 2018) do estado de São Paulo.....	34
Figura 18: Curva chave do comprimento de rugosidade (Z_0 , em metros) em função do índice de área foliar (IAF), baseado em Sellers et al. (1996).	35
Figura 19: Fluxograma do processo iterativo do cálculo do fluxo de calor sensível (H).	36
Figura 20: a) Classificação de cobertura vegetal da área de estudo com seleção de área (box preto) para exemplo de tamanho de pixels; b) Aproximação da área selecionada (box preto); b) Exemplo da degradação da resolução espacial utilizada: Pixel de 15mx15m de resolução destacado com círculo em vermelho (classificação a partir de imagem do Google Earth) e quadrados vermelhos destacando pixels de 120mx120m e 30mx30m.	37
Figura 21: Média diária da temperatura do ar medida sobre cerrado (linha preta), cana (linha vermelha) e eucalipto (linha azul), para o período de 2005 a 2008.	40
Figura 22: Média diária da temperatura do ar medida sobre cerrado (linha preta), e sobre os sítios de cana-de-açúcar: Aparecida (linha vermelha), São Luís (linha azul) e Mirante (linha verde), para o período de 2017 a 2018.	40
Figura 23: Média diária da temperatura do ar medida sobre floresta de Mata Atlântica (linha preta), e sobre pastagem (linha vermelha), para o período de 2015 a 2018.	40
Figura 24: Ciclo diurno médio da diferença entre a temperatura do ar medida no cerrado menos temperatura do ar medida sobre cana (corrigida) ($\Delta T_{\text{cerrado-cana}}$).....	42
Figura 25: Ciclo diurno médio da diferença entre a temperatura do ar medida sobre cerrado menos temperatura do ar medida sobre eucalipto ($\Delta T_{\text{cerrado-eucalipto}}$).	43
Figura 26: Amplitude térmica diária média medida (ATD), em °C, por estação do ano para cerrado (preto), eucalipto (azul) e cana-de-açúcar (vermelho) (corrigida). Período de 2005 a 2008.	44
Figura 27: Diferença da temperatura do ar medida máxima diária (ΔT_{max}) de Cerrado menos Eucalipto (linha vermelha), e Cerrado menos Cana corrigida (linha preta),	

para o intervalo de 2005 a 2008. Linha tracejada azul indicando o zero, sombra azul indica estação úmida e sombra vermelha a estação seca.	45
Figura 28: Diferença da temperatura do ar medida mínima diária (ΔT_{min}) de Cerrado menos Eucalipto (linha vermelha), e Cerrado menos Cana corrigida (linha preta), para o intervalo de 2005 a 2008. Linha tracejada azul indicando o zero, sombra azul indica estação úmida e, sombra vermelha a estação seca.	45
Figura 29: Ciclo diurno médio da temperatura do ar medida sobre área de cerrado (linha preta) e sobre áreas de cana-de-açúcar (corrigida) (linhas vermelha, azul e verde) para o período de novembro de 2017 a agosto de 2018.	46
Figura 30: Diferença da temperatura do ar medida sobre área de cerrado menos cana-de-açúcar para mínima diária (ΔT_{min}) (linha azul), e para máxima diária (ΔT_{max}) (linha vermelha), para o intervalo de Out/2017 a Ago/2018. Linha sólida preta indicando o zero, sombra azul indica estação úmida e, sombra vermelha a estação seca.	47
Figura 31: Ciclo diurno médio sazonal da temperatura do ar medida sobre floresta de Mata Atlântica (linha preta) e pastagem (linha vermelha).	48
Figura 32: Ciclo anual do índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) de área de floresta e de pastagem para o período de 2015 a 2018.	49
Figura 33: Classificação simplificada da cobertura vegetal da terra (2007) para a região dos municípios de Luiz Antônio e Santa Rita do Passa Quatro (São Paulo). Ponto preto indicando a posição da torre micrometeorológica nas coberturas de cerrado (verde) e cana-de-açúcar (vermelho).	50
Figura 34: Ciclo anual médio do NDVI frequente nos pixels de cana e cerrado amostrados.	50
Figura 35: Campo médio da temperatura de superfície calculada (LST) a partir de imagens do satélite Landsat-5 e 8 para o período úmido (a) e seco (b) em região de cana-de-açúcar e cerrado no noroeste do estado de São Paulo.	51
Figura 36: Relação da distribuição quantil-quantil (intervalos de 1%) da temperatura de superfície calculada em área de cerrado (LST Cerrado) e cana-de-açúcar (LST Cana). Período: 2001 a 2018.	52
Figura 37: Dispersão da relação da temperatura do ar medida (T_{ar} medida) com a temperatura aerodinâmica calculada a partir de imagens de satélite (T_a calculada) para área de cerrado (esquerda) e cana (direita).	53

Figura 38: Temperatura da superfície média calculada (LST) em área de floresta e Mata Atlântica na região do Parque Estadual da Serra do Mar (linha sólida preta) para o período de 2006 a 2018.....	53
Figura 39: Comparação da temperatura de superfície calculada a partir de imagens de satélite entre floresta e pastagem.	54
Figura 40: Comparação entre a temperatura do ar medida e a temperatura aerodinâmica calculada (T_a calculada) a partir de imagens de satélite para áreas de floresta (esquerda) e pastagem (direita).....	55
Figura 41: (a) HMFF médio na res. 120m (em %); (b) LST média na res.120m (em °C); (c) histograma de ocorrência de HMFF por classes: 0%, depois a cada 5% de variação ($> 0\%$ e $< 100\%$), e 100%.	56
Figura 42: (a) Relação da LST bruta (°C) com HMFF (%) (círculos azuis são LST média em cada classe FAAI; área sombreada cinza é limitada pelo desvio padrão de LST por classe HMFF; linha vermelha é regressão linear de todos os dados LST contra HMFF, $LST = 0,03 \text{ HMFF} + 19,6$; $R^2 = 0,6$; p-valor significativo $< 2,2e^{-16}$); e (b) histograma da distribuição LST em cada classe HMFF de 0%, 50% e 100% e coeficiente de assimetria associado (S_{sk}).	57
Figura 43: a) Fragmento de vegetação florestal ao Sul e área de contato de pastagem ao Norte (perímetro delineado em verde claro) (fonte: Microsoft Bing Maps Services©, 01/ago/2010) próximo ao distrito Catuçaba, São Luiz do Paraitinga, SP, com informações associadas de: b) Temperatura da superfície LST (°C); (c) Aspecto, em graus de orientação da face; (d) altitude em metros.	58
Figura 44: LST bruta média (°C) em função do aspecto do terreno (em classes de 10°) e para classes de HMFF (5% a 95%). A escala de cinza é a mediana de cada classe de HMFF (em %).	60
Figura 45: LST média (°C) em função da altitude (m) para classes de HMFF. A escala de cinza indica a mediana da classe de HMFF (em %).	61
Figura 46: (a) Gráfico de dispersão da LST bruta e LST corrigida ($y = 4,7 + 0,83x$); $R^2 = 0,82$, p-value $< 2,2e^{-16}$). (b) Distribuição quantil-quantil da LST bruta e LST corrigida. (c) relação da LST corrigida com HMFF (%) (círculos azuis são LST média em cada classe de HMFF; a área sombreada cinza é limitada pelo desvio padrão da LST por classe de HMFF; a linha vermelha é regressão linear de todos os dados LST contra HMFF, $LST = 0,038 \text{ HMFF} + 20,9$; $R^2 = 0,63$; p-value $< 2,2e^{-16}$).	63

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Período de medidas em campo para os sítios experimentais em áreas de Cerrado, eucalipto e cana-de-açúcar (sombra verde), com destaque para o período em comum às três coberturas (hachurado diagonal em linha preta).....	25
Tabela 2: Período de medidas em campo para os sítios experimentais em áreas de floresta de Mata Atlântica e pastagem (sombra verde), com destaque para o período em comum às três coberturas (hachurado diagonal em linha preta).....	29
Tabela 3: Características principais dos sensores utilizados nos cálculos.....	30
Tabela 4: Descrição das equações aplicadas no SEBAL para o sensor TM (Landsat-5) e OLI (Landsat-8) no cálculo da temperatura de superfície.....	31
Tabela 5: Constantes de calibração (L_{MAX} e L_{MIN}) do Landsat-5 – TM. (Chander e Markham, 2003).	32
Tabela 6: Valores de $ESUN_{\lambda}$ ($Wm^{-2}\mu m^{-1}$) válidos para o Landsat 5 – TM. (Chander e Markham, 2003).	32
Tabela 7: Resumo das características das imagens Landsat-5 utilizadas no cálculo da LST para obtenção da relação da variação com a cobertura vegetal.	38
Tabela 8: <i>Lapse-rate</i> terrestre para correção da temperatura do ar durante o dia (> 6 h e < 18 h) e a noite (≥ 18 h e ≤ 6 h), nos períodos seco e chuvoso (Martin et al., 2018).	41
Tabela 9: Diferença média sazonal e desvio padrão (diurna e noturna) ($\pm$ sd), entre cerrado e cana; cerrado e eucalipto.....	43
Tabela 10: Amplitude térmica diária sazonal e desvio padrão ($\pm$ sd) da temperatura do ar medida sobre floresta e pastagem.	48
Tabela 11: Temperatura de superfície média calculada ($^{\circ}C$), para cerrado e cana, estimada por satélite em períodos sazonais entre 2005 e 2008, para o horário das 10 h local.....	52
Tabela 12: Amplitude máxima absoluta de LST (LST_{max} menos LST_{min} , em $^{\circ}C$) para classes de HMFF (%); mediana e desvio padrão para classe ($\pm$ sd), para variação do aspecto (colunas 2 e 3) e altitude (colunas 4 e 5).	59

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	15
1.1 Objetivo.....	20
2. MATERIAIS E MÉTODOS	21
2.1 Áreas de estudo	21
2.2. Sítios experimentais	24
2.2.1. Área de Cerrado, eucalipto e cana-de-açúcar	24
2.2.2 Área de Mata Atlântica e pastagem	27
2.3. Sensoriamento Remoto (produtos e processamento).....	29
2.4. O algoritmo SEBAL aplicado ao Landsat-5 e Landsat-8.....	30
2.5. Cálculo da Temperatura de superfície (LST)	30
2.6. Temperatura aerodinâmica	34
2.7. Quantificação da LST e do grau de antropização em um domínio de espaço na região de Mata Atlântica.....	37
2.7.1. Correção do efeito da topografia.....	38
3. RESULTADOS	39
3.1. Comparação das medidas meteorológicas de temperatura do ar observadas nas áreas de cerrado, cana e eucalipto.....	39
3.1.1. Comparações de Cerrado, Cana e Eucalipto.....	41
3.1.2. Comparações de floresta de Mata Atlântica e pastagem.....	47
3.1.3. Temperatura de superfície (LST) e temperatura aerodinâmica (Ta) por sensoriamento remoto.....	49
3.2. Relação de temperatura de superfície (LST) e grau de antropização florestal na Mata Atlântica	55
3.2.1. Redução dos efeitos topográficos na LST.....	59
3.2.2. Relação entre LST e antropização	62
4. CONCLUSÕES.....	65

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	69
APÊNDICE I.....	75

1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento e crescimento da humanidade sempre tiveram na natureza uma fonte de subsistência, sob uma relação que hoje é conceituada de forma mais abrangente como Serviços Ecossistêmicos (Figura 1). Burkhard et al. (2012) definem os serviços ecossistêmicos (SE) como as contribuições da função e da estrutura do ecossistema para o bem estar do homem, também incluídos os sistemas agroecológicos, divididos em quatro classes (*Millennium Ecosystem Assessment*, 2005): Serviços de Provisão (abastecimento), Serviços de Suporte, Serviços Culturais e Serviços de Regulação, sendo o último especialmente importante para a saúde e bem estar do homem, principalmente nos dias atuais, pois é responsável pela regulação do clima, controle de pragas e doenças, entre outros.

Figura 1: Diagrama de serviços ecossistêmicos.

Fonte: traduzido de metrovancouver.org, s.d.

No serviço de regulação há uma série de elementos ligados aos sistemas florestais, que controlam a filtragem do ar, a qualidade da água e a regulação térmica da temperatura. Constanza et. al. (1997) exemplifica a função da mata ciliar e da zona ripária, praticamente suprimidas nas áreas urbanas e em grande parte das áreas rurais durante várias décadas no Brasil, ao controlar e atenuar as flutuações ambientais, fluxos hidrológicos, processos de erosão, captação de nutrientes, etc.

Em especial, os processos de interação biosfera-atmosfera nas áreas naturais compõem complexos mecanismos de troca de energia e água. Isso contribui com a para a conservação da fauna e da flora estabelecidos evolutivamente, e que de forma geral controlam os serviços ecossistêmicos reguladores. O desflorestamento nas últimas décadas levantou uma preocupação mundial devido aos seus reflexos no aquecimento global, na perda de biodiversidade e habitats naturais, e, portanto, nos serviços ecossistêmicos (Brown et al., 2011). Nas últimas décadas, a crescente urbanização e a antropização de áreas nativas produziram uma queda substancial das florestas no Brasil (Figura 2), aqui entendidas de forma simples como ambientes com estrato arbóreo, que ocorrem nos biomas brasileiros.

Figura 2: Mapa de biomas nativos do Brasil (a) e mapa de biomas do Brasil da última década (b).

Uma das modificações de cobertura mais expressivas ocorreu na Mata Atlântica. Sua área de cerca de 1,3 milhões km² foi reduzida para apenas 12,5%, levando em consideração todos os remanescentes de área acima de 3 ha, mas se considerados os remanescentes acima de 100 ha, seria 8,5% (SOS Mata Atlântica, 2014). A Mata Atlântica foi decretada Reserva da Biosfera pela UNESCO e Patrimônio Nacional, na Constituição Federal Brasileira de 1988, o que contribuiu para a implantação de áreas de conservação, permitindo uma desaceleração no desflorestamento. Já o cerrado, que ocupava aproximadamente de 22% do território nacional, foi reduzido para cerca de

40% de sua área original (Ministério do Meio Ambiente, 2015). O percentual de áreas sobre proteção integral é de 8,21%, das quais 2,85% são unidades de conservação de proteção integral e 5,36% correspondentes a unidades de conservação de uso sustentável. Essas informações foram concluídas a partir de um levantamento de áreas prioritárias (Figura 3) baseado em informações de biodiversidade e também socioantropológicos.

Figura 3: Mapa revisado de áreas prioritárias de preservação do Cerrado Brasileiro.

Fonte: Ministério do Meio Ambiente (2007).

As florestas tropicais úmidas desempenham um papel importante na regulação climática (Myers 1977; Davidson et al. 2012; Mahmood et al. 2014; Laurance & Vandekar 2014), devido sua função de absorver energia e transformá-la em umidade da superfície (vapor d'água). Essa característica contribui para a queda de produção de calor sensível e a atenuação da amplitude térmica, ou seja, há surgimento de aquecimento local da superfície decorrente da antropização de florestas tropicais. Esse aquecimento se dá, principalmente, por alterações no balanço de energia devido à maior conversão da energia radiativa em evapotranspiração, como observado na Amazônia (Culf et al. 1996; da Rocha et al. 2009). Também ocorre aquecimento do ar indiretamente pela perda de carbono da biomassa que leva ao aumento dos gases de efeito estufa globalmente (Watson et al. 2000), no que, por exemplo, o aumento das

florestas tropicais no século 21 poderia contribuir significativamente para mitigar o aquecimento global segundo Bala et al. (2007).

Em geral se reconhece o papel das florestas no microclima local e regional, mas que é incipiente e limitado devido à escassez de medições observacionais e estudos específicos nos distintos ecossistemas dos diversos biomas brasileiros. O desflorestamento da Amazônia em escala regional é reportado pela grande importância da floresta na manutenção do regime de chuvas devido à alta taxa de evapotranspiração da floresta nativa, o que afetaria o próprio bioma pela redução das chuvas e por um processo de retroalimentação, conforme revisão de estudos de modelagem numérica de Spracklen et. al. (2015). O resultado de entrevistas, com habitantes do sudeste asiático, indicou que a população percebe que a presença de florestas contribui positivamente para o resfriamento do ar e a oferta de recursos hídricos (Sodhi et al. 2010).

Nos processos de troca de calor do ambiente da floresta com a atmosfera notam-se efeitos diferentes, se for dentro ou acima do dossel, ou de dia ou à noite, quando se compara com as áreas antropizadas. Na Amazônia brasileira, Culf et al. (1996) mediram a temperatura do ar acima do dossel e estimaram uma média anual de aquecimento sobre pastagens de aproximadamente 2 °C na temperatura máxima diária em relação às áreas florestais, assim como um resfriamento da temperatura mínima diária de 2 °C sobre o pasto em relação à floresta. Tatsch (2006) reportou mudanças de temperatura do ar medidas acima do dossel em regiões de cerrado, cana-de-açúcar e eucalipto no Estado de São Paulo, no intervalo de fevereiro de 2005 a fevereiro de 2006. Ele mostrou que a temperatura máxima média do cerrado foi menor que na da cana-de-açúcar (de 1,3 °C a 2 °C) e maior que a do eucalipto (de 0,5 °C a 1,3 °C). Ewers & Banks-Leite (2016) mediram a temperatura do ar a 1m de altura, fora e no interior do dossel, em fragmentos de floresta de Mata Atlântica no sudeste de SP, e reportaram um efeito de resfriamento, com amortecimento de 40% na temperatura máxima e de 60% na temperatura mínima sob o dossel florestal (i.e. um aumento de 10°C no exterior provocou no interior do dossel o aquecimento de 4°C na máxima e 6°C na mínima).

Em escala global, Arora & Montenegro (2011) estimaram índices de regulação térmica pela recomposição da floresta nativa utilizando projeções de modelos globais com vegetação dinâmica no séc. 21, e reportaram um efeito de resfriamento médio na superfície de aproximadamente 0,5°C entre 2081 a 2100 no cenário de reflorestamento completo de áreas ocupadas por agricultura. Em especial os autores enfatizaram que a

eficiência de resfriamento das florestas tropicais foi três vezes acima das demais florestas (boreal e temperada).

Uma das formas de verificação do resultado do processo do balanço de energia nos casos de mudança por uso da terra é abordada pelos padrões da temperatura de superfície (*land surface temperature* ou LST), uma estimativa da temperatura radiométrica do corpo da superfície baseada na emissão do fluxo do infravermelho termal captado pelo sensor instantaneamente e sob certo ângulo de medição (PRATA et al., 1995). Ter a variabilidade espacial da LST é uma vantagem pela grande disponibilidade de informação dos satélites, como o Landsat-5 na resolução 30m (120m no termal), porém com composição longa de 16 dias, e dos satélites Terra/Aqua com duas medidas diárias e resolução espacial de 250 m. Por ex. Wang et al. (2017) quantificaram a variação da LST por satélite em escala local para três locais distintos próximos do Rio Yangtzé, China (área urbana, pastagem e agricultura) e reportaram um aquecimento da pastagem em relação à área irrigada de +1,8 °C em abril, e aquecimento da área urbana entre 1 °C a 2,2 °C em relação às áreas rurais. Peng et al. (2014) avaliaram o resfriamento nas florestas da China com a utilização da LST do sensor MODIS (1km res.), em uma vasta área de 160.000 km² com florestas plantadas e naturais, pastagem e agricultura. Os autores reduziram a amostragem em faixas de altitude comuns para evitar correções topográficas, e reportaram o resfriamento na floresta de 1,1 °C na temperatura diurna, e aquecimento de 0,2 °C noturno. Li et al (2016) reportaram o efeito de resfriamento nas florestas tropicais utilizando a LST do satélite MODIS, por meio de pixels de florestas na resolução de 5 km comparados com pixels de áreas antropizadas vizinhas, tendo também destacado as tendências temporais de escala decenal naquelas coberturas de vegetação. Nascimento (2012) utilizou o modelo *Surface Energy Balance Algorithm for Land* (SEBAL), desenvolvido por Bastiaansen (1998 a, b), e avaliou o impacto da mudança de cobertura de vegetação na LST com produtos do MODIS e do sensor TM, e reportou que a conversão de floresta amazônica de Rondônia em pastagem causou aquecimento de aproximadamente 2,5°C.

Para regiões urbanas há relatos do aumento da proporção de espaços verdes em meio às áreas urbanas, que produzem efeito de resfriamento na LST (Connors et al., 2012; Jenerette et al., 2007; Kong et al. 2014). Kong et al. (2014) reportou que um aumento de 10% na área coberta por vegetação florestal resultou no resfriamento de aproximadamente 0,8 °C da LST. Todavia não se encontrou estudos na literatura sobre a

variabilidade da LST em regiões de florestas tropicais que utilizem dados de alta resolução espacial, e com detalhamento de áreas com diferentes níveis de antropização amostral. Além disso, os efeitos topográficos na variabilidade de LST geralmente não são considerados, exceção feita em Kong et al. (2014).

Sendo assim, para entender a variabilidade espacial da temperatura do ar e da superfície, é necessário avaliar as componentes ambientais, levando em consideração não apenas a cobertura vegetal, mas também a posição geográfica das áreas avaliadas, bem como a composição do relevo de cada região.

1.1 Objetivo

O objetivo desta tese é quantificar os padrões de temperatura em áreas de coberturas florestais e nas áreas antropizadas de entornos, por meio de medidas meteorológicas de campo e medidas de satélite, com ênfase nas regiões de Mata Atlântica e de Cerrado do estado de SP, para subsidiar informações ao entendimento dos serviços ecossistêmicos de regulação térmica em escala local e regional.

O desenvolvimento do trabalho foi realizado segundo as seguintes metas específicas:

a) Medição e utilização de medidas existentes da temperatura do ar com estação meteorológica em áreas de cerrado, cana-de-açúcar, eucalipto na região de Ribeirão Preto, SP e de áreas com pastagem e floresta na região da Serra do Mar na região do município de São Luiz do Paraitinga, SP.

b) Avaliação das diferenças de regime de temperatura do ar com estação meteorológica em áreas florestais de Mata Atlântica e entornos, e de cerrado e entornos.

c) Avaliação das diferenças de regime de temperatura do ar com estimativa por satélite, em áreas florestais de Mata Atlântica e entornos, e de cerrado e entornos, utilizando a temperatura de superfície (LST) e a temperatura aerodinâmica por meio de imagens de satélite de alta resolução (30m) e do modelo de balanço de energia por sensoriamento remoto SEBAL.

d) Estimativa da relação de dependência entre temperatura de superfície (LST) e o grau de antropização florestal na região de Mata Atlântica, por meio de imagens de satélite e do modelo de balanço de energia por sensoriamento SEBAL.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Áreas de estudo

As análises com dados de satélite foram realizadas em duas áreas na região de Mata Atlântica e Cerrado no estado de SP, a primeira no litoral norte paulista e nos domínios do Parque Estadual da Serra do Mar (PESM) com 712 km² (Figura 4). A área de Mata Atlântica tem clima dominante Cwb (temperado chuvoso moderadamente quente) com precipitação média anual de 2000 mm, com período chuvoso de outubro a março (Luiz 2008). Esta área está situada em uma macrorregião geográfica de elevado e estratégico crescimento socioeconômico e populacional, assim vulnerável à pressão do crescimento e importante no contexto regional como produtora de serviços ecossistêmicos.

Figura 4: Imagem (ano 2010) da área de estudo (linha sólida vermelha) próxima do litoral norte do estado de São Paulo (SP) com o Parque Estadual da Serra do Mar (linha sólida branca).

Ponto vermelho: Estação automática em área de pastagem (CTB); ponto branco: torre micrometeorológica em área de floresta (SVG).

Fonte: Microsoft Bing Maps Services©, 2011.

Os mapas de altitude (Figura 5a) e aspecto (Figura 5c) foram obtidos com imagens do Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) 1 Arc-Second Global, disponíveis em <https://earthexplorer.usgs.gov/>, página da NASA EODIS Land Processes

Distributed Active Archive Center (LP DAAC), USGS/Earth Resources Observation and Science (EROS) Center, Sioux Falls, South Dakota. O relevo tem altitude variando entre aproximadamente 740 m a 1650 m, com conjunto montanhoso a nordeste com cotas acima de 1000 m. O aspecto da região segue um padrão de organização no qual as cristas das colinas (i.e, a linha que divide faces com aspectos aproximadamente opostos) estão alinhadas com o traçado do litoral (ou seja, aproximadamente SW-NE) (Figura 5c). Portanto, nestas cristas nota-se a predominância de faces aproximadamente ortogonais à linha da crista, ou seja, de aspecto SE ou o oposto de NW.

A classificação do tipo de cobertura vegetal (Figura 5b) foi elaborada a partir de uma imagem do Google Earth (resolução espacial 15m, ano 2010), seguindo o método de classificação supervisionada sugerido pelo grupo do programa ARSET (NASA/Arset, 2017) e adaptado às recomendações da extensão de análise espacial do *software* de sistemas de informações geográficas ArcGIS 10, tendo sido aqui especificada em duas classes complementares, por simplicidade: área florestada (78.455 pixels) e área não florestada (18.792 pixels), com acurácia de 98,8%.

Figura 5: a) Altitude, em metros; b) Imagem classificada da cobertura vegetal da área de estudo para o ano de 2010; c) Aspecto, em graus de orientação da face.

A área na região de Cerrado está localizada no oeste do estado de SP na sub-região de Ribeirão Preto, em um transecto entre os municípios de Pradópolis e Santa Rita do Passa Quatro, que apresenta cobertura dominante de agroecossistemas (cana-de-açúcar principalmente, e eucalipto) (Figura 6). A região tem clima Cwa (tropical de altitude com verão úmido e inverno seco), precipitação média anual de 1440 mm, tendo janeiro o mais chuvoso (270 mm) e julho o menos chuvoso (20 mm). A altitude da área

selecionada varia entre 500m a 700m predominantemente, com algumas áreas pontuais de serra em torno de 900m (Figura 7a), e de aspecto bem distribuído (Figura 7b).

Figura 6: Área de estudo na região dos municípios de Guataporã e Pradópolis, Luís Antônio e Santa Rita do Passa Quatro (SP). Ponto vermelho: cerrado (PEG), ponto azul: eucalipto (VCP), pontos verdes: cana-de-açúcar (Usina Santa Rita, Fazenda Nossa Senhora de Aparecida, Fazenda São Luís, Mirante, Votorantim Celulose e Papel).

Figura 7: a) Altitude (m); b) Aspecto (°) da orientação da face da área de estudo no noroeste do estado de São Paulo.

2.2. Sítios experimentais

As medidas meteorológicas de campo foram realizadas acima do dossel da vegetação, sob um desenho experimental com expectativa de confinamento na camada limite interna (Figura 8), para que os efeitos locais dos fluxos turbulentos de energia e radiação estivessem associados ao máximo com as características da cobertura de vegetação local.

Figura 8: Extensão da Camada Limite interna (δ_i , abaixo da linha tracejada) com vento na direção x , onde se diferenciam os efeitos das regiões vizinhas A e B.

Fonte: Adaptado de Stull (1988).

2.2.1. Área de Cerrado, eucalipto e cana-de-açúcar

As medidas na área de cerrado foram feitas acima do dossel a partir uma torre micrometeorológica a 22 m de altura do solo, no intervalo de novembro/2000 até agosto/2018 (Rocha et al., 2002), a 710 m de altitude, com 1100 ha de cerrado *Sensu stricto* predominante ($-21,619^\circ$ e $-47,632^\circ$), na Gleba Pé de Gigante/Parque Vassununga/Instituto Florestal de SP, aqui chamado sítio PEG. A altura média do dossel do cerrado nessa região é 12 m (Figura 9c e 10).

A área de plantação de eucalipto monitorada por uma torre micrometeorológica operada de 2004 a 2009 (sítio VCP) (Fig. 9b). Essa área se tratava de um talhão de 45 ha na Fazenda Cara Preta ($-21,583^\circ$ e $-47,602^\circ$), altitude de 761 m, espaçamento de 3 x 3 m entre as árvores e entre as linhas, em meio a vários outros talhões da então proprietária Votorantim Celulose e Papel SA.

O monitoramento meteorológico sobre agroecossistema de plantação de cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) foi feito em quatro áreas: na Usina Santa Rita (USR), município de Luiz Antônio, SP ($-21,637^\circ$ e $-47,790^\circ$), a 552 m de altitude, operacional

Figura 10: Fotografias da área de cerrado PEG, tomadas em diferentes datas na perspectiva da torre meteorológica, mostrando a sazonalidade da vegetação.

Fonte: Tatsch, 2006.

A partir de outubro/2017 até agosto/2018 foram iniciadas as medições de mais três áreas de cana-de-açúcar, com estações automáticas WXT-520 (Vaisala) nas cercanias da Usina São Martinho (Pradópolis, SP) (Figura 11): Fazenda São Luís (SLUIS) ($-21,440^{\circ}$ e $-48,053^{\circ}$), Fazenda Nossa Senhora de Aparecida (APAR) ($-21,375^{\circ}$ e $-47,986^{\circ}$) e Mirante (MIRA) ($-21,446^{\circ}$ e $-47,993^{\circ}$), com época de corte da cana-de-açúcar por volta dos meses de agosto/setembro.

A estação MIRA (altitude 728 m) foi montada na altura de 12 m do solo, em uma torre de comunicação, a estação APAR (altitude 595 m) foi instalada a 2 m de

altura do solo ao lado de uma estação meteorológica do proprietário da fazenda e a estação SLUIS (altitude 559 m) instalada a 2m de altura do solo. A estação meteorológica do cerrado (PEG) está a aproximadamente a 5 km da estação do eucalipto, 16 km a oeste da estação de cana (USR) e 45 km das estações de cana Aparecida, Mirante e São Luís.

Figura 11: Locais das estações automáticas em plantação de cana-de-açúcar na região de Guataporá e Pradópolis, SP: Mirante, Fazenda Nossa Senhora de Aparecida e Fazenda São Luís.

2.2.2 Área de Mata Atlântica e pastagem

As estações de monitoramento em área de Mata Atlântica e pastagem estão localizadas na região do Parque Estadual da Serra do Mar (PESM) e cercanias. A área de floresta de Mata Atlântica foi estabelecida no Núcleo Santa Virgínia/Instituto Florestal de SP, em São Luiz do Paraitinga ($-23,328^{\circ}$ e $-45,093^{\circ}$, 990 m de altitude), e os dados utilizados foram a partir de 2008, obtidos a partir de um torre micrometeorológica (Freitas, 2012) (Figuras 12 e 13). A vegetação é de floresta nebulosa ombrófila densa, em processo de sucessão há aproximadamente 50 anos (Medeiros, 2009).

Figura 12: Vista da área de Mata Atlântica no Núcleo Santa Virgínia, São Luiz do Paraitinga, São Paulo. Imagem setembro de 2014.

Figura 13: Torre micrometeorológica instalada em área de Mata Atlântica, Núcleo Santa Virgínia, São Luiz do Paraitinga. Fonte: Freitas (2012).

A área de pastagem está localizada no distrito de Catuçaba (sítio experimental CTB) ($-23,250^{\circ}$ e $-45,252^{\circ}$), em São Luiz do Paraitinga, SP, distante 18 km (em linha reta) do sítio de floresta SVG. É uma área sobre uma colina de inclinação suave utilizada para pecuária (Figura 14) onde foi instalada uma estação meteorológica WXT-520 Vaisala na altitude de 900m, com medidas desde set/2015 a ago/2018.

Figura 14: Sítio experimental em área de pastagem no distrito de Catuçaba (sítio CTB).

Para fins de comparabilidade entre os dados medidos em campo nos sítios de floresta e pastagem, o período utilizado foi o intervalo comum aos dois sítios, conforme Tabela 2.

Tabela 2: Período de medidas em campo para os sítios experimentais em áreas de floresta de Mata Atlântica e pastagem (sombra verde), com destaque para o período em comum às três coberturas (hachurado diagonal em linha preta).

Período	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Mata Atlântica											
Pastagem											

2.3. Sensoriamento Remoto (produtos e processamento)

Foram utilizadas informações obtidas em sensores a bordo de satélites de observação da terra para prescrição da cobertura vegetal, e de índices espectrais derivados necessários para o cálculo da LST. Os sensores utilizados foram *Thematic Mapper* (TM), para o período de 2005 a 2008 (região de cerrado, cana e eucalipto), *Operational Land Imager* (OLI) e *Thermal Infrared Sensor* (TIRS) para o período de 2015 (Mata Atlântica e pastagem), e o radar SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*), cujas características principais são listadas na Tabela 3. Todos os produtos

foram adquiridos de forma gratuita. O cálculo da LST foi realizado com o software estatístico R.

Tabela 3: Características principais dos sensores utilizados nos cálculos.

Sensor	Satélite/missão	Bandas	Resolução espacial (m), temporal (dias)	Fonte
TM	LANDSAT 5	1 a 7	30 – 120, 16	USGS
OLI/TIRS	LANDSAT 8	1 a 7, 10, 11	30 - 30 (reamostrada), 16	USGS
Tipo RADAR	SRTM		30, missão única	USGS

Para comparar a LST (instantânea) com a temperatura meteorológica de campo foi selecionada a LST no pixel central referente ao local de instalação do instrumento, no horário das 10 h da manhã (horário local).

2.4. O algoritmo SEBAL aplicado ao Landsat-5 e Landsat-8

O modelo *Surface Energy Balance Algorithm for Land* (SEBAL) é um algoritmo desenvolvido por Bastiaanssen *et al.* (1998a, b, 2005), que calcula a variação espacial dos fluxos radiativos e de energia (saldo de radiação, fluxo de calor sensível e evapotranspiração) sob certa variação espacial dependente da resolução da imagem, e resolução temporal restrita ao instante e data da passagem do satélite, nesse caso, às 10 h da manhã.

2.5. Cálculo da Temperatura de superfície (LST)

Para obter a LST a partir do algoritmo SEBAL, calculam-se os valores de radiância e reflectância, das emissividades e dos índices de vegetação (NDVI - *Normalized Difference Vegetation Index*, IAF Índice de Área Foliar e SAVI *Soil Adjusted Vegetation Index*), conforme o fluxograma (Figura 15) e a sequência de equações da Tabela 4.

Figura 15: Fluxograma de parte do SEBAL utilizado para cálculo da temperatura de superfície. **Tabela 4:** Descrição das equações aplicadas no SEBAL para o sensor TM (Landsat-5) e OLI (Landsat-8) no cômputo da temperatura de superfície.

COMPONENTE	EQUAÇÃO	DESCRIÇÃO
Radiância (L_{λ})	$\left(\frac{L_{MAX}-L_{MIN}}{255}\right) DN+L_{MIN}$	L_{MAX} e L_{MIN} : constantes de calibração espectral do sensor (Tabela 5); DN: número digital do pixel
Reflectância (ρ_{λ}) ⁽¹⁾	$\frac{\pi L_{\lambda}}{ESUN_{\lambda} \cos \theta_d r}$	$ESUN_{\lambda}$: constante solar monocromática (Tabela 6); θ : ângulo zenital do Sol; dr : distância relativa Terra-Sol.
Distância relativa Terra-Sol (dr)	$1+0,033\cos\left(DOA\frac{2\pi}{365}\right)$	DOA: dia de ordem do ano
SAVI ⁽²⁾	$\frac{(1+L)(\rho_{IV} - \rho_V)}{(L+\rho_{IV} + \rho_V)}$	$L=0$ (vegetação densa), 1 (vegetação esparsa), 0,5 (vegetação intermediária)
NDVI ⁽³⁾	$\frac{\rho_{IV} - \rho_V}{\rho_{IV} + \rho_V}$	IV: infravermelho; V: vermelho

¹ Allen *et al.*, 2002² Huete, 1998 e Allen *et al.*, 2002³ Tucker, 1979, *apud* Tasumi, 2003.

IAF (2)	$\frac{\ln\left(\frac{0,69 - SAVI}{0,59}\right)}{0,91}$	
Emissividade (ENB)	$0,97 + 0,0033 \cdot IAF$	
		$K_{1,L5} = 606,76 \text{ Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}\mu\text{m}^{-1}$
Temperatura da superfície (LST)	$\frac{K_2}{\ln\left(\frac{\varepsilon_{NB} K_1}{L_{\lambda,6/10}} + 1\right)}$	$K_{2,L5} = 1260,56 \text{ Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}\mu\text{m}^{-1}$
		$K_{1,L8} = 774,88 \text{ Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}\mu\text{m}^{-1}$
		$K_{2,L8} = 1321,07 \text{ Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}\mu\text{m}^{-1}$

Tabela 5: Constantes de calibração (L_{MAX} e L_{MIN}) do Landsat-5 – TM. (Chander e Markham, 2003).

Banda (λ)	$L_{MIN} (\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}\mu\text{m}^{-1})$	$L_{MAX} (\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}\mu\text{m}^{-1})$
1	-1,52	193,0
2	-2,84	365,0
3	-1,17	264,0
4	-1,51	221,0
5	-0,37	30,2
6	1,2378	15,303
7	-0,15	16,5

Tabela 6: Valores de $ESUN_{\lambda}$ ($\text{Wm}^{-2}\mu\text{m}^{-1}$) válidos para o Landsat 5 – TM. (Chander e Markham, 2003).

Banda 1	Banda 2	Banda 3	Banda 4	Banda 5	Banda 6	Banda 7
1957	1826	1554	1036	215,0	-	80,67

As constantes de calibração, bem como os valores de $ESUN_{\lambda}$, para o Landsat-8 são fornecidas no documento de informações para cada imagem.

O modelo utiliza as radiâncias espectrais dos sensores dos satélites e após o cálculo da LST, calcula o saldo de radiação, seguindo as principais etapas apresentadas na Figura 16. Com um conjunto de dados meteorológicos de superfície (em um local específico apenas) que incluem a velocidade do vento e a temperatura do ar é calculada a resistência aerodinâmica ao fluxo de calor sensível, depois escalonada para os demais pixels da imagem (COURAULT *et al.*, 2002). Com um algoritmo de seleção de pixels frios e quentes (chamados de âncora), estabelece os gradientes de temperatura que vão controlar a estimativa do fluxo de calor sensível para cada pixel da imagem. Posteriormente o fluxo de calor latente é estimado como resíduo do balanço de energia.

Figura 16: Esquematisação dos principais componentes do Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL) que convertem medidas espectrais obtidas remotamente (radiâncias refletida e emitida) em balanço de energia à superfície.

Foi feita uma comparação da LST para pixels de cerrado VS cana-de-açúcar, e de floresta de Mata Atlântica VS pastagem, com imagens do satélite Landsat-5 e Landsat-8, no intervalo de 2001 a 2018, totalizando 103 imagens em condições de céu claro para a região de cerrado/cana, com 80 para o período coincidente com as medições em campo, e 93 para a região de floresta/pastagem (litoral), das quais, 36 coincidem com o período de medidas, e em ambas as regiões tiveram a maioria das imagens entre maio a outubro (Figura 17).

Figura 17: Total de imagens por mês, em condições de céu claro, para as regiões noroeste (cerrado, cana-de-açúcar, período de 2001 a 2018) e litoral (Mata Atlântica e pastagem, período de 2006 a 2018) do estado de São Paulo.

Foi feita também a comparação da LST em uma área da região de Mata Atlântica com imagens no ano de 2010 (item 2.7), às 10 h local, resolução espacial de 30m e resolução temporal de 16 dias. Estas estimativas de LST (floresta de Mata Atlântica e pastagem) foram calculadas utilizando uma adaptação do SEBAL para o Landsat 8, resguardando as constantes fornecidas pela USGS (*United States Geological Survey*). Sendo assim, um campo médio da LST foi obtido como a média do conjunto.

2.6. Temperatura aerodinâmica

Foram feitas modificações do modelo SEBAL original para o cálculo do comprimento de rugosidade de momentum (Z_{0m}) para todos os pixels, e na escolha dos pixels frio e quente. Segundo Bastiaansen (2000) o comprimento Z_{0m} para todos os pixels é calculado em função do SAVI (Equação 1), que, todavia, o subestimou para os tipos de cobertura vegetal. Baseado em Sellers et al. (1996) foi elaborada uma curva chave para cada cobertura com funções de expressão mais adequadas (cerrado (Equação 1), eucalipto (Equação 2), e cana-de-açúcar (Equação 3)). Essas curvas definem que o comprimento de rugosidade varia em função do índice de área foliar (IAF) de cada tipo de cobertura (Figura 18).

Figura 18: Curva chave do comprimento de rugosidade (Z_0 , em metros) em função do índice de área foliar (IAF), baseado em Sellers et al. (1996).

$$Z0m_cer = -0,0005x^5 + 0,013x^4 - 0,11x^3 + 0,3166x^2 + 0,2221x + 0,0286 \quad (\text{Eq. 1})$$

$$Z0m_euc = -0,0018x^4 + 0,0473x^3 - 0,4626x^2 + 1,9098x + 0,0489 \quad (\text{Eq. 2})$$

$$Z0m_cana = -0,0006x^4 + 0,0117x^3 - 0,0877x^2 + 0,291x + 0,029 \quad (\text{Eq. 3})$$

O comprimento de rugosidade é utilizado para calcular a velocidade de atrito (u_*) para todos os pixels da imagem que, por sua vez, é aplicado no cálculo da resistência aerodinâmica, e iniciar o ciclo de convergência para valores sucessivos da diferença de temperatura (dT) e da resistência termodinâmica (r_{ah}) no pixel quente, conforme apresentado no fluxograma da Figura 19.

Figura 19: Fluxograma do processo iterativo do cálculo do fluxo de calor sensível (H).

Para escolha dos pixels frio e quente foram estabelecidos os seguintes critérios:

- Frio: na classe de 1% dos pixels quando $LST > 0$ e $NDVI < 0$;
- Quente: na classe de 99,9% dos pixels quando $LST > 0$ e $NDVI$ entre 0,15 a 0,20.

Para fazer a comparação mais adequada com a LST, foi estimada a temperatura aerodinâmica da superfície, obtida a partir do cálculo do fluxo de calor sensível (eq. 4). Os dados meteorológicos necessários para esse processo incluem a temperatura do ar, velocidade do vento e altura do anemômetro, e altura média do dossel, para o local específico da estação. O número de iterações necessárias nesse cálculo geralmente é de oito, quando uma vez convergente se obtém o fluxo de calor sensível (H). Desta forma estimou-se a temperatura aerodinâmica T_a (em K) conforme Equação 4, em que T_s é a temperatura de superfície (em K), suposta aqui igual a LST, H é o fluxo de calor sensível (em $W m^{-2}$), r_{ah} é a resistência aerodinâmica ao calor sensível (em sm^{-1}), ρ é a massa específica do ar ($kg m^{-3}$), c_p é o calor específico do ar ($J kg^{-1} K^{-1}$).

$$T_a = T_s - \frac{H \cdot r_{ah}}{\rho \cdot c_p} \quad (\text{Eq. 4})$$

2.7. Quantificação da LST e do grau de antropização em um domínio de espaço na região de Mata Atlântica

Para definir um grau de antropização em área de floresta, foi utilizado o mapa de classificação da cobertura vegetal, que foi reamostrado para uma resolução empírica de 120 m (14.400 m²). O índice de fração de área de floresta antropizada (aqui chamado de HMFF, ou *Human Modified Forest Fractional Area*), igual ao percentual de ocorrência da classe não-florestada (especificada por pixels de 15m x 15m) dentro da área de um quadrado de 120mx120m (Figura 20c). Ou seja, em cada quadrado há 64 pixels de 15m de resolução com cobertura vegetal prescrita, onde, por exemplo, a ocorrência de 16 pixels de regiões não-florestadas leva ao HMFF de 25%.

Figura 20: a) Classificação de cobertura vegetal da área de estudo com seleção de área (box preto) para exemplo de tamanho de pixels; b) Aproximação da área selecionada (box preto); b) Exemplo da degradação da resolução espacial utilizada: Pixel de 15mx15m de resolução destacado com círculo em vermelho (classificação a partir de imagem do Google Earth) e quadrados vermelhos destacando pixels de 120mx120m e 30mx30m.

2.7.1. Correção do efeito da topografia

A média anual de LST foi calculada a partir das 8 imagens selecionadas em uma resolução de 30 m para o ano de 2010 (Tabela 7), bandas de 1 a 7, *path* 2018 e *row* 76.

Tabela 7: Resumo das características das imagens Landsat-5 utilizadas no cálculo da LST para obtenção da relação da variação com a cobertura vegetal.

Data	% de nuvem	Elevação do Sol (°)	Azimute do Sol (°)
06/02/2010	01	55,08	84,13
22/02/2010	04	53,19	75,42
27/04/2010	37	41,42	43,51
13/05/2010	03	38,11	39,47
14/06/2010	11	33,70	36,76
01/08/2010	04	36,92	42,24
02/09/2010	01	45,43	49,86
20/10/2010	09	59,39	70,38

A quantificação da LST e do grau de antropização em um domínio de espaço na região de Mata Atlântica (retângulo vermelho da Figura 20a), em que a resolução espacial do campo da LST média foi degradada para 120m no cálculo da LST média da área, totalizando em 49.457 pixels. A LST foi corrigida levando em consideração a altitude e o aspecto do terreno para reduzir os efeitos destes na variabilidade espacial. Desse modo, os efeitos topográficos foram relativizados, e enfatizou-se o controle da cobertura vegetal na variação da LST.

As equações de correção para topografia foram obtidas a partir de ajustes de regressão estatísticos entre a LST e a altitude média (ajuste linear) e o aspecto médio (ajuste polinomial). Todas as cotas de altitude foram trazidas para o nível de 800 m (menor que a maioria), e o aspecto levado para 45° (nordeste), pois foi a partir desses valores quando se notou a maior variabilidade da LST. A altitude foi separada em intervalos de 50 m, o aspecto em classes de 20° e o HMFF em classes de 10%. Logo, cada grupo de combinação apresentou uma equação de ajuste particular (Apêndice I). A correção foi aplicada a todo conjunto de dados com a resolução de 120 m, preservando a informação de cada combinação (altitude, aspecto, HMFF).

3. RESULTADOS

As etapas desse trabalho seguiram um roteiro para desenvolvimento dos resultados que foram expostos na seguinte ordem:

- Análise exploratória dos dados de campo para cerrado, eucalipto e cana, complementando a série de Tatsch (2006) e comparação da temperatura entre as coberturas;
- Análise exploratória dos dados de campo para as estações meteorológicas de floresta de Mata Atlântica e pastagem;
- Análise da temperatura de superfície (LST) e temperatura aerodinâmica (T_a) por sensoriamento remoto;
- Redução dos efeitos topográficos na variabilidade da temperatura de superfície calculada por sensoriamento remoto;
- Relação de temperatura de superfície (LST) e grau de antropização florestal na Mata Atlântica.

3.1. Comparação das medidas meteorológicas de temperatura do ar observadas nas áreas de cerrado, cana e eucalipto

Mostram-se a temperatura do ar média diária consolidada por sítio e intervalos de tempo com simultaneidade de medidas para a comparação, entre 2005 a 2008 para (PEG, USR e VCP) (Figura 21); de outubro/2017 a agosto/2018 para (MIRA, APAR, SLUIS e PEG) (Figura 22); e de 2015 a 2018 para (SVG, CTB) (Figura 23). De forma geral estes padrões são de caráter verificador de consistência física. Eles mostram que existe uma razoável concordância de resposta da variabilidade sinótica da atmosfera, entre todas as estações de cada região, que a amplitude térmica nestes intervalos está dentro de faixas de expectativa climatológica, e que, apesar de pequenas falhas, os dados analisados não têm erros grosseiros que possam penalizar uma comparação mais fina.

Figura 21: Média diária da temperatura do ar medida sobre cerrado (linha preta), cana (linha vermelha) e eucalipto (linha azul), para o período de 2005 a 2008.

Figura 22: Média diária da temperatura do ar medida sobre cerrado (linha preta), e sobre os sítios de cana-de-açúcar: Aparecida (linha vermelha), São Luís (linha azul) e Mirante (linha verde), para o período de 2017 a 2018.

Figura 23: Média diária da temperatura do ar medida sobre floresta de Mata Atlântica (linha preta), e sobre pastagem (linha vermelha), para o período de 2015 a 2018.

3.1.1. Comparações de Cerrado, Cana e Eucalipto

Foi analisado o intervalo de dados entre 2005 a 2008, comum aos sítios de cerrado (PEG), cana-de-açúcar (USR) e eucalipto (VCP), e de 2017 a 2018, comum às medidas nas áreas PEG e cana-de-açúcar (APAR, MIRA e SLUIS). As análises também foram feitas levando em consideração a estação do ano, definindo-se os trimestres: seco (junho, julho e agosto JJA), transição seco-úmido (setembro, outubro e novembro SON), úmido (dezembro, janeiro e fevereiro DJF), e transição úmido-seco (março, abril e maio MAM). Os valores de temperatura do ar na região de cana-de-açúcar foram corrigidas para o efeito de altitude, utilizando o *lapse-rate* terrestre reportado por Martin et al. (2018) (Tabela 7), uma vez que há 3 sítios de cana (USR, APAR, SLUIS) com cota um pouco inferior (em torno de 200 m) mas ainda assim significativamente diferente à do cerrado.

Tabela 8: *Lapse-rate* terrestre para correção da temperatura do ar durante o dia (> 6 h e < 18 h) e a noite (≥ 18 h e ≤ 6 h), nos períodos seco e chuvoso (Martin et al., 2018).

Período do dia	Estação do ano	Varição de temperatura ($^{\circ}\text{C } 100\text{m}^{-1}$)
Noite	Seca	1,05
	Úmida	0,24
Dia	Seca	-0,74
	Úmida	-0,70

As diferenças entre a temperatura mostraram que, na média, o cerrado é $0,7^{\circ}\text{C}$ mais frio que a cana durante o dia (sd médio $2,2^{\circ}\text{C}$) e $1,2^{\circ}\text{C}$ durante a noite (sd médio 3°C).

Na perspectiva do ciclo diurno médio sazonal notou-se que a temperatura do ar sobre a cana USR é maior do que no cerrado PEG durante o dia, e menor durante a noite. Esse efeito foi mais acentuado no período seco (JJA), quando a diferença alcançou $4,2^{\circ}\text{C}$ durante a noite (sd médio $3,5^{\circ}\text{C}$), e no período de transição úmido-seco (MAM) (máximo de 2°C e sd médio $2,7^{\circ}\text{C}$), quando a cana foi recentemente colhida e está com o solo mais exposto e sem vegetação. Isso faz com que a capacidade de armazenar calor diminua, aumentando a perda radiativa noturna, adicionada a sua fase final, antes da colheita, quando geralmente há queda da fotossíntese e, portanto, da

transpiração, aumentando o calor sensível. O cerrado se mostrou mais frio do que a cana desde o final da manhã em aproximadamente 10 h até 18 h, principalmente no outono e inverno. Na estação chuvosa (DJF) as diferenças foram relativamente pequenas, em média 0,1 °C (sd médio 1 °C).

Com a correção da temperatura do ar da cana em USR pelo *lapse-rate* terrestre, houve uma redução de sua temperatura máxima e um aumento das mínimas, visto que a altitude da estação de cana nesse sítio é menor do que no cerrado PEG, o que reduziu o impacto de desvio comparativo. Certos picos secundários às 7 h na Figura 24 são os diferentes limiares de correção no período diurno e noturno.

Figura 24: Ciclo diurno médio da diferença entre a temperatura do ar medida no cerrado menos temperatura do ar medida sobre cana (corrigida) ($\Delta T_{\text{cerrado-cana}}$).

Também na perspectiva do ciclo diurno médio sazonal (Figura 25), o eucalipto apresentou temperaturas mais frias que no cerrado durante o dia, em média 0,8 °C (sd médio de 0,7 °C). Durante a noite o cerrado também foi mais quente em média de 0,7 °C (sd médio de 0,6 °C). Esse efeito foi mais evidente no período diurno da estação úmida (DJF), quando a diferença média foi de 1 °C (sd médio 0,7 °C). As diferenças máximas ocorreram em torno de 17 h, o que sugere que no eucalipto tenha havido além

de um possível efeito de maior transpiração, também mais armazenamento de calor na biomassa e no ar do dossel no decorrer da tarde, devido ao adensamento da plantação. A Tabela 9 apresenta um resumo das diferenças sazonais, durante o dia e a noite, entre cerrado e cana, bem como entre cerrado e eucalipto.

Figura 25: Ciclo diurno médio da diferença entre a temperatura do ar medida sobre cerrado menos temperatura do ar medida sobre eucalipto ($\Delta T_{\text{cerrado-eucalipto}}$).

Tabela 9: Diferença média sazonal e desvio padrão (diurna e noturna) ($\pm$ sd), entre cerrado e cana; cerrado e eucalipto.

Meses	Média Cerrado-Cana $\pm$ sd (°C)		Média Cerrado-Eucalipto $\pm$ sd (°C)	
	DIA	NOITE	DIA	NOITE
DJF	0,1 $\pm$ 1,0	-0,2 $\pm$ 1,6	1,0 $\pm$ 0,7	0,6 $\pm$ 0,4
MAM	0,1 $\pm$ 1,2	1,7 $\pm$ 2,7	0,9 $\pm$ 0,5	0,7 $\pm$ 0,6
JJA	0,6 $\pm$ 1,3	3,5 $\pm$ 3,4	0,5 $\pm$ 0,6	0,7 $\pm$ 0,7
SON	-0,1 $\pm$ 1,2	0,0 $\pm$ 2,8	0,6 $\pm$ 0,7	0,7 $\pm$ 0,6

Para a amplitude térmica diária média (ATD) (Figura 26) por estação do ano nota-se que, independente da estação, é sempre maior na cana USR do que nas outras coberturas PEG cerrado e eucalipto FCP. Este desvio é maior nas estações seca e úmido-seca, que ficam entre 3 °C a 4 °C de diferença, e que ocorre principalmente pela diferença da temperatura mínima noturna.

Figura 26: Amplitude térmica diária média medida (ATD), em °C, por estação do ano para cerrado (preto), eucalipto (azul) e cana-de-açúcar (vermelho) (corrigida). Período de 2005 a 2008.

A comparação da temperatura máxima diária, na forma de desvio $\Delta T_{\max}$ entre as áreas, mostra que no cerrado apresenta-se de forma dominante uma temperatura mais fria que na cana, de -0,6°C na média de todo o intervalo (Figura 27, linha preta). De maneira detalhada os desvios foram até em alguns casos positivos, com recorrência na estação úmida, que é quando a cana-de-açúcar está com elevado nível de crescimento e índice de área foliar. Nas demais estações, ou seja, na maior parte do ano, os desvios foram predominantemente negativos, indicando o resfriamento diurno do cerrado em torno de -1 °C a -1,5 °C em relação à plantação de cana. A comparação da temperatura máxima diária do cerrado com o eucalipto (Figura 27, linha vermelha) mostrou no eucalipto de forma dominante uma temperatura mais fria, de -1,2 °C na média de todo o intervalo. Este resultado corrobora os padrões de Tatsch (2006), que reportou o fluxo de calor latente maior nas áreas de eucalipto do que no cerrado. Em alguns casos os desvios foram aproximadamente nulos, mais evidentes na estação seca.

Figura 27: Diferença da temperatura do ar medida máxima diária ($\Delta T_{\max}$) de Cerrado menos Eucalipto (linha vermelha), e Cerrado menos Cana corrigida (linha preta), para o intervalo de 2005 a 2008. Linha tracejada azul indicando o zero, sombra azul indica estação úmida e sombra vermelha a estação seca.

Para a temperatura mínima diária indicou-se no cerrado maiores valores de forma geral, mas mais acentuado na estação seca, para a cana nos estágios iniciais de desenvolvimento (Figura 28, linha preta). De maneira detalhada os desvios foram em alguns casos negativos, mais recorrentes na estação úmida, quando a cana-de-açúcar no seu maior nível de crescimento tem mais potencial de armazenar energia. O aumento da temperatura mínima no cerrado foi na média de 4,0 °C, mas com muitos eventos em torno de 6 °C.

Para a temperatura mínima diária (Figura 28, linha vermelha) o cerrado também se mostrou de forma sistemática mais quente que o eucalipto, menos expressivo e em torno de 0,5 °C na média.

Figura 28: Diferença da temperatura do ar medida mínima diária ($\Delta T_{\min}$) de Cerrado menos Eucalipto (linha vermelha), e Cerrado menos Cana corrigida (linha preta), para o intervalo de 2005 a 2008. Linha tracejada azul indicando o zero, sombra azul indica estação úmida e, sombra vermelha a estação seca.

As observações no intervalo de outubro/2017 a agosto/2018 entre a área de Cerrado PEG e as áreas de cana em Pradópolis (APAR, SLUIS, MIRA) também mostraram que a temperatura no cerrado foi menor do que na cana, de forma geral para todo o dia (09 h às 18 h), enquanto que no período noturno o cerrado apresentou temperaturas mais elevadas que nos sítios Aparecida e São Luís, porém em relação ao sítio Mirante, o cerrado apresentou temperaturas menores durante todo o período (Figura 29). Nestes casos a temperatura no período diurno também foi mais quente sobre a cana, semelhante à comparação do sítio USR, e atingiu, na máxima diurna, valores de aquecimento de 0,5 °C (sítio APAR) a 1,7 °C (sítios APAR e SLUIS). No período noturno o resfriamento das áreas de cana (APAR e SLUIS) variou entre 0,4 °C e 1,7 °C. No sítio do Mirante o aquecimento foi menor, e aproximou-se de zero em algumas horas com ênfase nos horários de transição (6 h e 18 h). A redução do aquecimento diferencial, relativamente ao longo do dia, também se assemelhou com o caso do sítio USR. A estação São Luís tem a menor altitude em relação ao cerrado (~150 m abaixo do cerrado), no que, mesmo aplicando-se a correção do *lapse-rate*, que diminuiu aproximadamente 1°C a temperatura diurna, ainda se apresentou neste caso a maior diferença do que os outros dois sítios. Em todos os casos, as diferenças entre as temperaturas mínimas se acentuaram no início da estação de transição para o período seco (Figura 30), enquanto que nas máximas o cerrado sempre apresentou temperaturas mais frias em relação à cana, mas com menores diferenças se comparado à estação do Mirante.

Figura 29: Ciclo diurno médio da temperatura do ar medida sobre área de cerrado (linha preta) e sobre áreas de cana-de-açúcar (corrigida) (linhas vermelha, azul e verde) para o período de novembro de 2017 a agosto de 2018.

Figura 30: Diferença da temperatura do ar medida sobre área de cerrado menos cana-de-açúcar para mínima diária ($\Delta T_{\min}$) (linha azul), e para máxima diária ($\Delta T_{\max}$) (linha vermelha), para o intervalo de Out/2017 a Ago/2018. Linha sólida preta indicando o zero, sombra azul indica estação úmida e, sombra vermelha a estação seca.

3.1.2. Comparações de floresta de Mata Atlântica e pastagem

Foi avaliada a temperatura do ar medida nas áreas de floresta e pastagem na região de Mata Atlântica no intervalo de outubro/2015 a junho/2018. De modo geral, a temperatura média horária do ar sobre a floresta é expressivamente menor do que na pastagem durante todo o dia, exceto nas últimas horas da noite e primeiras horas da manhã (Figura 31). Em outras palavras a temperatura mínima foi ≈ 1 °C maior na pastagem do que na área de floresta, enquanto a temperatura máxima diária foi substancialmente superior na pastagem, com diferenças de 4 °C a 5 °C. A amplitude térmica diária foi maior no pasto (> 8 °C), alcançando a máxima por volta das 13 h, enquanto que sobre o dossel florestal foi em torno de 5 °C, com pico entre 10 h e 13 h (Tabela 10).

Figura 31: Ciclo diurno médio sazonal da temperatura do ar medida sobre floresta de Mata Atlântica (linha preta) e pastagem (linha vermelha).

A amplitude térmica diária foi mais evidente na estação seca (de maio a agosto) e maior sobre a pastagem (9,7 °C), enquanto na floresta a amplitude foi semelhante aos trimestres DJF e MAM. Nessa estação a pastagem é mais seca, possivelmente até com mais fração de solo exposto, o que explicaria parcialmente esta sazonalidade. A diferença de biomassa entre pastagem e floresta, e a sazonalidade da biomassa verde na pastagem podem ser características interpretadas pelo ciclo anual do NDVI (Figura 32), o que ajuda a explicar estas comparações.

Tabela 10: Amplitude térmica diária sazonal e desvio padrão ($\pm$ sd) da temperatura do ar medida sobre floresta e pastagem.

	ATD DJF $\pm$ sd	ATD MAM $\pm$ sd	ATD JJA $\pm$ sd	ATD SON $\pm$ sd
Pastagem	8,9 $\pm$ 2,0	9,1 $\pm$ 2,9	9,7 $\pm$ 3,1	8,6 $\pm$ 3,4
Floresta	5,5 $\pm$ 2,1	5,5 $\pm$ 3,0	5,7 $\pm$ 3,7	4,4 $\pm$ 3,7

Figura 32: Ciclo anual do índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) de área de floresta e de pastagem para o período de 2015 a 2018.

3.1.3. Temperatura de superfície (LST) e temperatura aerodinâmica (T_a) por sensoriamento remoto

Para compreender melhor a temperatura estimada por sensoriamento remoto assim como sua variabilidade em função da cobertura vegetal, se fez uma avaliação da LST e da temperatura aerodinâmica calculada no modelo SEBAL, em comparação com as temperaturas do ar medidas no campo.

A Figura 33 apresenta a classificação simplificada de uso da terra para o ano de 2007, destacando-se apenas as regiões de cerrado, eucalipto e cana-de-açúcar. Estas estimativas contabilizaram amostras de cana-de-açúcar (28.670 pixels) predominante na região, e de cerrado com 19.817 amostras (pixels). O NDVI médio destas amostras (Figura 34) mostra a sazonalidade do cerrado mais suave (variação entre 0,70 a 0,85) do que na cana-de-açúcar, entre 0,70 a 0,35, que reflete o corte e rebrota da cana na estação seca (safra agrícola).

Figura 33: Classificação simplificada da cobertura vegetal da terra (2007) para a região dos municípios de Luiz Antônio e Santa Rita do Passa Quatro (São Paulo). Ponto preto indicando a posição da torre micrometeorológica nas coberturas de cerrado (verde) e cana-de-açúcar (vermelho).

Figura 34: Ciclo anual médio do NDVI frequente nos pixels de cana e cerrado amostrados.

No campo espacial da LST média (para 10 h), nas estações úmida (Figura 35a) e seca (Figura 35b), observou-se que há diferenças marcantes e bem definidas em função da cobertura vegetal. Nas regiões de cana a LST alcançou médias de aproximadamente 5 °C (2 °C) mais quente do que no cerrado na estação seca (úmida), conforme a Tabela 7.

Figura 35: Campo médio da temperatura de superfície calculada (LST) a partir de imagens do satélite Landsat-5 e 8 para o período úmido (a) e seco (b) em região de cana-de-açúcar e cerrado no noroeste do estado de São Paulo.

Na comparação entre as LSTs das amostras de pixels total anual (Figura 36), o padrão foi semelhante ao encontrado nas medidas de temperatura do ar de campo, ou seja, temperatura no cerrado inferior à da cana durante o dia, resguardadas as grandezas das diferenças de cada tipo de avaliação, conforme a Tabela 9. Na faixa de LST mais frias, entre 15 °C e 25 °C, houve mais proximidade na comparação (aproximadamente 1° C de desvio), e na LST acima de 25 °C os desvios foram expressivamente maiores, que atingiram até 7° C no extremo superior.

Figura 36: Relação da distribuição quantil-quantil (intervalos de 1%) da temperatura de superfície calculada em área de cerrado (LST Cerrado) e cana-de-açúcar (LST Cana). Período: 2001 a 2018.

Tabela 11: Temperatura de superfície média calculada (°C), para cerrado e cana, estimada por satélite em períodos sazonais entre 2005 e 2008, para o horário das 10 h local.

COBERTURA	JJA	SON	DJF	MAM
Cerrado	22,0	23,5	26,0	22,4
Cana	27,8	28,6	27,6	24,4

A comparação da temperatura de superfície calculada (LST) com a temperatura do ar medida em campo (Tar medida) sobre os sítios de cana e de cerrado foi feita no intuito de conhecer melhor esta dependência. Essa relação mostrou que para a região de cerrado houve uma relação razoável ($R^2 = 0,64$) com desvio padrão médio de 3,0. Para a cana, a relação foi mais dispersa ($R^2 = \sim 0,02$) com desvio padrão de 9,1.

A comparação da temperatura do ar de medida com a temperatura aerodinâmica calculada (Ta calculada) (Figura 37) mostrou uma relação razoável para o cerrado, mas com grande dispersão para a cana, no último caso também pelo fato de que a série de observações é pequena. De forma geral a temperatura aerodinâmica superestimou a temperatura do ar em média aproximada de 2 °C para cana e de 1 °C para o cerrado. A LST na região de Mata Atlântica e pastagem (Figura 38) foram superiores nas áreas de pastagem, tanto na estação seca quanto na estação úmida.

Figura 37: Dispersão da relação da temperatura do ar medida (Tar medida) com a temperatura aerodinâmica calculada a partir de imagens de satélite (Ta calculada) para área de cerrado (esquerda) e cana (direita).

Figura 38: Temperatura da superfície média calculada (LST) em área de floresta e Mata Atlântica na região do Parque Estadual da Serra do Mar (linha sólida preta) para o período de 2006 a 2018.

A floresta que está dentro do limite do Parque Estadual da Serra do Mar (PESM, linha preta) apresentou temperaturas mais baixas do que fragmentos que estão inseridos na matriz antropizada. A porção de floresta amostrada dentro do PESM apresentou temperatura média de 20,1 °C no período seco (sd = 0,5) e 22,5 °C (sd = 0,8) fora do PESM. Na estação úmida essas médias foram 24,4°C (sd = 0,3 °C; dentro) e 25,8 °C (sd = 0,8 °C; fora). De modo geral e sem considerar os aspectos de relevo, essas médias indicam que há um controle na temperatura da superfície em áreas de floresta que dependem do tamanho do fragmento e da matriz onde ele está inserido.

Na comparação da LST entre todos os pixels (Figura 39), as diferenças maiores foram nas temperaturas mais altas (> 25 °C) indicando que a pastagem é aproximadamente 5 °C mais quente e duas vezes maior que a diferença média para o horário das 10 h encontrado na temperatura do ar observada.

Figura 39: Comparação da temperatura de superfície calculada a partir de imagens de satélite entre floresta e pastagem.

Na comparação da temperatura observada com a temperatura aerodinâmica (Figura 40) para todos os eventos disponíveis coincidentes com as medidas de campo, notou-se que a relação para a floresta SVG um padrão razoável de proporção, embora com um reduzido número de eventos disponíveis, onde aparecem pelo menos dois eventos discrepantes que se distanciam da reta 1:1. No horário dos eventos (10h) geralmente já se espera ter havido grande produção de calor sensível, a camada de mistura já estar razoavelmente desenvolvida e muito acima do dossel. É possível que os eventos discordantes do padrão 1:1 na floresta SVG estejam em circunstâncias especiais e diferentes destas condições típicas, como por exemplo, rajadas muito rápidas de vento

excepcionalmente fortes, ou por outro lado episódios de grande calma, difíceis de ser observadas, e que alteram a resistência aerodinâmica e venham a perturbar de forma muito transiente o padrão da LST calculada. Estas razões ainda necessitam ser investigadas, mas há caminhos para isso utilizando-se os dados de alta frequência do anemômetro sônico operado na torre micrometeorológica, que não foi abordado aqui. Para a pastagem CTB, a temperatura aerodinâmica mostrou-se também próxima da temperatura do ar observada, embora também seja uma série histórica pequena.

Figura 40: Comparação entre a temperatura do ar medida e a temperatura aerodinâmica calculada (T_a calculada) a partir de imagens de satélite para áreas de floresta (esquerda) e pastagem (direita).

3.2. Relação de temperatura de superfície (LST) e grau de antropização florestal na Mata Atlântica

O cálculo do índice de fração de área de floresta antropizada (HMFF ou *Human Modified Forest Fractional Area*) na resolução de 120m (Figura 41a) indicou que nos setores sul e leste predominam valores abaixo de 10%, onde ocorre visualmente a maior presença de florestas, e nos setores oeste e norte predominam valores acima de 50% ou onde ocorrem as áreas mais antropizadas. A LST média temporal (Figura 41b) variou aproximadamente entre 15 °C a 28 °C ao longo do domínio espacial, onde as temperaturas mais frias mostraram-se de forma geral coincidentes com as áreas de baixo HMFF. A distribuição estatística do HMFF mostrou que aproximadamente 46% dos casos foram classificados como cobertura total florestal (ou HMFF=0%) e 13% de antropização total (ou HMFF=100%), conforme a Figura 41c. As classes complementares de antropização parcial (entre 1% e 99%) somaram 41% de ocorrência, que se mostrou razoavelmente bem distribuída ao longo das classes de variação (Figura

41c). Nota-se visualmente que estes casos de HMFF parcial ocorreram recorrentemente como espaços de transição entre blocos maiores de HMFF= 0% ou 100%, e não como grandes fragmentos isolados (Figura 41a).

Figura 41: (a) HMFF médio na res. 120m (em %); (b) LST média na res.120m (em °C); (c) histograma de ocorrência de HMFF por classes: 0%, depois a cada 5% de variação (> 0% e < 100 %), e 100%.

A dispersão da LST bruta (sem correções topográficas na res. 120m) mostrou um padrão de proporcionalidade direta e crescente com a HMFF (Figura 42a), de distribuição assimétrica (com média e mediana de 20,9 °C e 20,2 °C, respectivamente, ou seja, maiores que a moda de 19,5 °C) conforme a Figura 42b. Houve maior variabilidade da LST nos valores discretos de HMFF = 0% e 100%, mesmo por que nestes percentis máximos a ocorrência de HMFF foi maior (Figura 40c).

O LST bruta (não corrigido) com uma resolução de 120 m mostrou uma associação direta positiva com HMFF (S_{sk} : 0,8), com uma distribuição assimétrica (média: 20,9 °C, mediana: 20,2 °C, moda: 19,5 °C, sd: 2,0 °C). Houve maior variabilidade da LST nos valores discretos de HMFF de 0% e 100%, devido à maior

ocorrência de valores de HMFF nesses extremos. O padrão crescente de LST com HMFF confirmou a hipótese inicial (Figura 42a); no entanto, a quantificação da variação da LST bruta com a HMFF pode ser melhorada devido à necessidade de correção da dependência da temperatura na topografia.

Figura 42: (a) Relação da LST bruta (°C) com HMFF (%) (círculos azuis são LST média em cada classe FAAI; área sombreada cinza é limitada pelo desvio padrão de LST por classe HMFF; linha vermelha é regressão linear de todos os dados LST contra HMFF, $LST = 0,03 \text{ HMFF} + 19,6$; $R^2 = 0,6$; p-valor significativo $< 2,2e^{-16}$); e (b) histograma da distribuição LST em cada classe HMFF de 0%, 50% e 100% e coeficiente de assimetria associado (S_{sk}).

Este padrão de LST crescente com a HMFF é sem dúvida concordante com as expectativas teóricas, mas a quantificação acurada da taxa de variação (da LST com a HMFF) é uma incógnita, que deve ser aperfeiçoada pela necessidade de correções da dependência parcial da temperatura com variantes topográficas. Um exemplo pertinente desta dependência é ilustrado pelo padrão da LST calculada em uma zona com fragmento de vegetação florestal em contato com pastagem na região investigada, conforme mostra a Figura 43a. Este padrão mostrou temperaturas frias de aproximadamente 19 °C dominantes sobre a floresta, e temperaturas quentes próximas de 30 °C sobre a pastagem (Figura 43b), portanto com um aquecimento diferencial muito expressivo na ordem de 10 °C. Todavia a distribuição do aspecto mostrou faces mais voltadas para o Sul na zona de floresta, e faces mais voltadas para o Norte na zona de pastagem (Figura 43c), o que explicaria parcialmente o aquecimento diferencial, uma vez que faces de aspecto Norte são mais iluminadas que as faces de aspecto Sul nesta época do ano. Na fronteira geográfica entre a floresta e a pastagem, onde ocorre também uma mudança abrupta de aspecto (Figura 43c), a temperatura mostrou valores intermediários em torno de 23 °C (Figura 43b), o que se supõe decorrer parcialmente

pela amostragem de pixels mistos frios e quentes. Há também outras variações internas de aspecto no exemplo, como as pequenas faixas de aspecto na direção Sul na zona de pastagem, que são mais frias que os entornos.

Figura 43: a) Fragmento de vegetação florestal ao Sul e área de contato de pastagem ao Norte (perímetro delineado em verde claro) (fonte: Microsoft Bing Maps Services©, 01/ago/2010) próximo ao distrito Catuçaba, São Luiz do Paraitinga, SP, com informações associadas de: b) Temperatura da superfície LST (°C); (c) Aspecto, em graus de orientação da face; (d) altitude em metros.

Uma segunda nota é que, apesar de se esperar pela variação da temperatura do ar com a altitude, não é trivial identificar imediatamente o efeito da altitude em uma região de pequena dimensão (Fig. 42a), tanto por ter pequena amplitude altitudinal de ≈ 250 m (Figura 42d). Este caso exemplifica uma possível exacerbação da estimativa da LST em uma cobertura antropizada por iluminação diferencial. Mas espera-se que, em todo o domínio de investigação, as possibilidades de casos sejam extensas e aleatórias, como por exemplo, se ocorresse à situação em que a LST de áreas antropizadas fosse reduzida por compensações negativas devido ao aspecto. Esta possível multiplicidade de casos de

certa forma exige que todas as faixas de aspecto e de antropização sejam analisadas conjuntamente.

3.2.1. Redução dos efeitos topográficos na LST

Para avaliar detalhadamente a influência do aspecto do terreno na temperatura foi mostrada a dispersão da LST bruta média por classes discretas de aspecto e de antropização (Figura 44). Nessa forma de visualização as faixas de temperaturas frias (quentes) claramente corresponderam aos menores (maiores) valores de HMFF, como esperado, mas com formas variantes conforme as classes de HMFF e sua variação de aspecto. A amplitude de temperatura mostrada pela variação do aspecto foi de ≈ 2 °C nas classes mais altas de HMFF, e de ≈ 1 °C nas classes menores. Por exemplo, na classe HMFF 95% a amplitude devido ao aspecto foi de 2,7 °C, enquanto para HMFF 5% foi de 1,1 °C, conforme indicado para todas as classes na Tabela 12. Estas diferenças de amplitude sugerem que a LST calculada teve mais sensibilidade ao aspecto nas áreas mais antropizadas, onde o aquecimento também é maior.

Tabela 12: Amplitude máxima absoluta de LST (LSTmax menos LSTmin, em °C) para classes de HMFF (%); mediana e desvio padrão para classe ($\pm$ sd), para variação do aspecto (colunas 2 e 3) e altitude (colunas 4 e 5).

HMFF (%)	Aspecto		Altitude	
	amp _{max} (°C)	mediana $\pm$ sd	amp _{max} (°C)	mediana $\pm$ sd
5	1,1	19,6 $\pm$ 1,1	2,7	19,0 $\pm$ 0,8
15	1,9	20,4 $\pm$ 1,3	3,0	19,6 $\pm$ 1,0
25	1,6	20,7 $\pm$ 1,3	3,1	19,9 $\pm$ 1,1
35	2,1	21,2 $\pm$ 1,4	2,9	20,2 $\pm$ 1,2
45	2,1	21,3 $\pm$ 1,4	3,4	20,4 $\pm$ 1,3
55	2,3	21,5 $\pm$ 1,4	3,4	20,6 $\pm$ 1,3

65	2,1	21,9 ± 1,5	3,7	20,9 ± 1,4
75	2,1	22,2 ± 1,4	3,4	21,3 ± 1,5
85	2,2	22,5 ± 1,4	3,8	21,7 ± 1,4
95	2,7	23,5 ± 1,4	2,8	22,9 ± 1,6

A dependência geral da LST com o aspecto mostrou um padrão de máximas nos segmentos de aspecto próximos da direção Norte (aspecto 0° ou 360°).

Figura 44: LST bruta média (°C) em função do aspecto do terreno (em classes de 10°) e para classes de HMFF (5% a 95%). A escala de cinza é a mediana de cada classe de HMFF (em %).

Esta direção preferencial que favoreceu o aquecimento explica-se fisicamente pela maior irradiância solar durante a maior parte do ano, ou mais exatamente de março a dezembro quando o ângulo solar se posiciona ao Norte. As classes de aspecto onde se estabeleceram os mínimos da LST também se mostraram bem definidos e coerentes com o ângulo solar, em que de forma geral situaram-se aproximadamente na direção Sudoeste, ou seja, entre aspectos de 220° a 260°, para todas as classes de HMFF. Mais claramente, estes mínimos da LST tiveram certa variação conforme a classe de HMFF.

Para classes de alta HMFF, o aspecto associado à LST mínima foi um pouco inferior quando comparado com classes de HMFF baixa.

Notou-se também um padrão sistemático de resfriamento da LST média bruta em função da altitude, de forma marcante para todas as classes de HMFF (Figura 44).

Figura 45: LST média (°C) em função da altitude (m) para classes de HMFF. A escala de cinza indica a mediana da classe de HMFF (em %).

Nessa visualização, as LST frias (quentes) corresponderam às baixas (altas) HMFF como esperado. De maneira geral a relação da LST com a altitude foi aproximadamente linear, exceto nos extremos de altitude a partir de 1500 m, onde se notou aparentemente uma saturação da relação. A amplitude de temperatura mostrada pela variação de altitude foi entre 2,7 a 3,8 °C ao longo de aproximadamente 700 m de variação altitudinal (Tabela 10), que foi, portanto, superior à amplitude mostrada pelo aspecto (Figura 43), e onde também não se notou aparentemente nenhum controle marcante da antropização. De forma geral o resfriamento da LST com a altitude às 10 h tem semelhanças com o *lapse-rate* terrestre da temperatura do ar medida com termômetros à 2 m de altura em uma região de montanha próxima por Martin et al. (2018), que reportaram padrões médios de aquecimento noturno e resfriamento diurno com a altitude. As equações ajustadas estatisticamente da LST bruta com as variáveis topográficas estão mostradas no Apêndice I, as quais indicam proporções de variação da

LST com a altitude variando entre aproximadamente $-3,9$ a $-5,2$ $^{\circ}\text{C km}^{-1}$, dentre todas as classes de HMFF analisadas. Estas estimativas de *lapse-rate* da LST mostram taxas de resfriamento menores que as taxas médias anuais da temperatura do ar estimadas em aproximadamente $-7,0$ $^{\circ}\text{C km}^{-1}$ por Martin et al. (2018). A comparação nestas circunstâncias deve ser ainda melhor elaborada, uma vez que as medidas dos autores são da temperatura do ar, em uma região diferente, e com uma cobertura temporal de dados muito mais fina.

3.2.2. *Relação entre LST e antropização*

A LST média corrigida removeu os efeitos aparentes de aspecto topográfico e da altitude na LST bruta, respectivamente. A informação bruta de forma geral subestimou a informação corrigida (Figura 45a), em que a correção levou ao aumento médio de $1,4^{\circ}\text{C}$. A distribuição estatística em quantis mostrou que a maior discrepância se deu nas temperaturas frias abaixo de 19°C aproximadamente, e que nas temperaturas mais quentes o desvio tendeu a reduzir proporcionalmente (Figura 45b). O efeito da correção final foi de aumento da temperatura, o que é razoável com as relações da LST bruta com a altitude e o aspecto que já antecipavam este tipo controle, uma vez que supomos uma altitude menor como referência para a correção, condicionada à variabilidade de classes de HMFF separadamente. A correção do aspecto também de modo geral levou ao aquecimento devido ao aspecto de referência próximo da direção Sul. A maior dispersão em torno das temperaturas frias está em parte associada às áreas de amostragem nas altitudes mais altas, próximas das cristas das montanhas, onde a incerteza da determinação do aspecto é mais expressiva, e, portanto, a correção resulta em maior variância.

Desta forma a LST corrigida mostrou-se significativamente diferente da LST bruta, e mais adequada para a questão principal do trabalho que é a de enfatizar o efeito do uso da terra e em especial da antropização da floresta subtropical na variabilidade de temperatura local. A LST corrigida mostrou um padrão de crescente aquecimento com o grau de antropização florestal, sob uma relação linear significativa (Figura 47c). Nos extremos de HMFF notou-se uma grande variância das estimativas da LST corrigida, semelhante à da estimativa bruta. A temperatura mínima absoluta foi associada ao HMFF = 0%, igual a $17,8^{\circ}\text{C}$, e a máxima absoluta foi de $29,8^{\circ}\text{C}$ para o HMFF = 100% ou seja uma amplitude absoluta de aproximadamente 12°C .

Figura 46: (a) Gráfico de dispersão da LST bruta e LST corrigida ($y = 4,7 + 0,83x$); $R^2 = 0,82$, $p\text{-value} < 2,2e^{-16}$. (b) Distribuição quantil-quantil da LST bruta e LST corrigida. (c) relação da LST corrigida com HMFF (%) (círculos azuis são LST média em cada classe de HMFF; a área sombreada cinza é limitada pelo desvio padrão da LST por classe de HMFF; a linha vermelha é regressão linear de todos os dados LST contra HMFF, $LST = 0,038 \text{ HMFF} + 20,9$; $R^2 = 0,63$; $p\text{-value} < 2,2e^{-16}$).

O padrão de aquecimento diurno da superfície da temperatura de superfície calculada espacialmente, confirmou haver uma significativa dependência da altitude e o aspecto da topografia, nas circunstâncias do relevo de estudo, que explicaram parcialmente a análise de variabilidade espacial e da influência do nível de antropização na temperatura, indicando que as variações de LST devido ao aspecto podem variar entre aproximadamente 1 °C a 2 °C e entre, aproximadamente, 2 °C a 4 °C com altitude. Esta variância de efeito topográfico deve-se em parte à variabilidade da antropização, que foi objeto da investigação, mas deve-se em parte também à variabilidade

atmosférica que controla taxas de *lapse-rate* da temperatura do ar conforme condições sinóticas de grande escala, segundo Martin et al. (2018).

4. CONCLUSÕES

As temperaturas do ar e da superfície são respostas e também influenciam diretamente no balanço de energia, água e carbono em escala local, no regime de conforto térmico humano, indo até os processos de interação biosfera-atmosfera. Entende-se que avaliar efetivamente o impacto das modificações humanas no regime térmico dos ecossistemas florestais promove um vasto campo de informação para o entendimento e quantificação dos serviços ecossistêmicos. A cobertura vegetal da superfície é um importante fator de influência na temperatura da superfície (LST), que por sua vez, também sofre os efeitos das características morfológicas do terreno (aspecto e altitude). Nesse contexto, buscou-se estimar padrões que expressassem a variação de temperatura da superfície (LST) em função do grau de perturbação humana, de forma simples em áreas de Cerrado em matriz agrícola e em área de floresta de Mata Atlântica em uma matriz com expansão pastoril, e buscou-se estimar um valor aproximado da variação da temperatura de superfície para graus de antropização tomando como estudo de caso uma região de Mata Atlântica suficientemente extensa, onde houvesse partes significativas de antropização alta e baixa no domínio da paisagem.

A variação da temperatura do ar diurna sobre área de cerrado indicou que há um resfriamento se comparada à temperatura do ar sobre a área de cana-de-açúcar, mas dependendo do estágio da cultura e do período do ano, essa diferença pode se inverter no período noturno devido à falta de cobertura vegetal mais expressiva, que deixa o solo exposto e sem capacidade de armazenar energia. Ao comparar cerrado com eucalipto, notou-se que o ar sobre o eucalipto estava sempre mais frio, que pode ser atribuído à taxa de evapotranspiração desse sistema que é superior ao cerrado (Tatsch, 2006) e também pelo fato de que o cerrado tem sazonalidade bem definida, enquanto que a área de eucalipto é manejada e só tem seu corte a cada sete anos. Esses padrões refletiram não só na temperatura média, mas também na amplitude térmica diária, em que a cana apresentou comportamento superior ao cerrado e ao eucalipto, o que sugere que os sistemas florestais (cerrado e o eucalipto) tendem a atenuar esse efeito de oscilação da temperatura, fazendo com que haja um maior equilíbrio térmico durante o dia.

Na região de floresta de Mata Atlântica e pastagem, área de pastagem está sempre mais quente independente se durante o período seco ou úmido. A capacidade que a floresta tem de resfriar o ar sobre si reflete um pouco da capacidade desse sistema de

resistir à influência de troca de calor com áreas vizinhas, mesmo estando em uma matriz vastamente antropizada e também pela sua capacidade de utilizar a radiação incidente para transformá-la em umidade superficial.

O comportamento da temperatura de superfície calculada desses agroecossistemas indicou que às 10hs da manhã há uma variabilidade ainda bem definida em função da cobertura vegetal, mesmo nesse horário já havendo bastante mistura no ar, um padrão condizente com o padrão climatológico encontrado com as medições de campo, em que os sistemas antropizados têm a ar mais quente.

A temperatura aerodinâmica calculada pode ser considerada como a que mais se aproxima da temperatura do ar, podendo ser aplicada para avaliar as diferenças térmicas em escala espacial, mas para áreas de sistemas agropastoris seria preciso uma série maior de observações para que seja estabelecida, de fato, uma função que represente bem as variações da temperatura, levando em consideração também o horário e imagens de satélite com resolução temporal mais fina, ou seja, com uma periodicidade que diminua os períodos sem imagens, principalmente em épocas com maior frequência de dias nublados.

A conclusão principal é que foi estimada com significância uma relação de dependência da temperatura da superfície em função do grau de antropização da cobertura vegetal florestal, esta última entendida como a fração de área não-florestada detectada por meio de amostragem de pixels e LST em maior resolução (30m) e quantificadas em elementos de resolução menor (120 m). A relação mostrou um padrão de aquecimento com o grau de antropização florestal sob taxa aproximadamente linear, em que na média a cada 25% de incremento de antropização resulta em 1°C de aquecimento da superfície. Nesta projeção média o aquecimento máximo ocorre no caso de antropização total e é de aproximadamente 4°C.

Reconhece-se que a atribuição da LST com a variabilidade de cobertura vegetal por satélite com alta resolução é uma investigação moderna e que se mostra viável apenas ao encontrar facilidades como o acesso aos dados de resolução adequada e intervalos de amostragem estatística suficiente. Todavia, pode depender de várias outras condições limitantes associadas à cobertura de superfície, a serem exploradas de forma viável *a posteriori*, para benefício da melhor acurácia da informação. Dentre estes limitantes citam-se como exemplo: a incerteza da prescrição da cobertura vegetal na escala de sub-pixel, que apesar de ser baixa na resolução de 30m, pode ser aperfeiçoada;

a dimensionalização do agrupamento estatístico de pixels suposto como elemento representativo indicador da fração de antropização; o maior detalhamento das classes de cobertura da superfície na etapa de supervisão da vegetação, que pode vir a discernir subclasses com padrões particulares de resposta da LST, dentre estas se citando, por exemplo, florestas com fisionomias diferentes, florestas em estágios de sucessão diferentes, pastagens em diferentes condições de manejo e níveis de degradação e produtividade vegetal, culturas com diferentes manejos e estágios de crescimento, e áreas com edificações na zona rural.

Adicionalmente também se reconhecem outros controles decorrentes da variabilidade temporal do balanço de energia que influenciam na resposta de temperatura, como por exemplo, as variações de índice de área foliar e de fenologia na escala sazonal, que podem limitar a comparação a subintervalos climáticos; e finalmente à variabilidade do balanço de energia na escala de ciclo diurno. Neste último limitante, a partição de energia entre evapotranspiração e calor ocorre diferencialmente ao longo do dia, e também especificamente por tipo de cobertura vegetal, além da própria variabilidade atmosférica que pode proporcionar eventos de amostragem com o dossel molhado após um episódio de chuva. Esta variabilidade de ciclo diurno sugere com que as conclusões estejam limitadas ao escopo do horário da amostragem disponível, e que poderia ser útil investigar a desagregação de padrões em outros segmentos do ciclo diurno.

Os resultados que foram discutidos se mostram como um potencial subsídio na expectativa de que se possa, de fato, gerar um índice que quantifique o benefício térmico, semelhante à Arora & Montenegro (2011), porém em microescala, avaliando como as grandes áreas verdes compostas por sistemas florestais naturais podem trazer conforto térmico e equilíbrio hidroclimático, tanto para o ser humano quanto para a biodiversidade que há nesses fragmentos.

Finalmente destaca-se um desdobramento da conclusão principal com o fato da região antropizada situar-se em uma macrorregião dependente dos mananciais hídricos na bacia do Rio Paraíba do Sul, que abastecem grandes cidades no vale do rio até à cidade do Rio de Janeiro. A superfície florestal nesta região aparece assim como uma provável reguladora de serviços ecossistêmicos climáticos de atenuação da temperatura na zona rural, e cujos efeitos às áreas urbanas pode ser expressivo, embora esta última conclusão seja ainda incerta por depender fortemente da variabilidade atmosférica, o

que ainda não foi reportado pela literatura. Aquelas áreas de floresta, adicionalmente, também mostram características reguladoras de serviços ecossistêmicos hídricos, uma vez que o aquecimento da antropização é precursor do aumento da evapotranspiração, que tem consequência de contribuir à redução da disponibilidade de água superficial na escala anual média de longo prazo e, portanto, ao abastecimento regional.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Allen, R.; Bastiaanssen, W.; Waters, R.; Tasumi, M.; Trezza, R. Surface energy balance algorithms for land (SEBAL), Idaho implementation – Advanced training and users manual, version 1.0, 2002. 97p.
- Arora V. K., Montenegro A. Small temperature benefits provided by realistic afforestation efforts. *Nature Geoscience*, 4(8):514–518, 2011.
- Bala, G.; Caldeira, K.; Wickett, M.; Phillips, T. J.; Lobell, D. B.; Delire, C.; Mirin, A... Combined climate and carbon-cycle effects of large-scale deforestation. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 104, 6550–6555, 2007.
- Bastiaanssen, W. G. M.; Menenti, M.; Feddes, R. A.; Holtslag, A. A. M. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL) 1. Formulation. *Journal of Hydrology*, v. 212–213, p.198–212, 1998a.
- Bastiaanssen, W. G. M.; Pelgrum, H.; Wang, J.; Ma, Y.; Moreno, J. F. Roenrink, G. J. Van Der Wal, T. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL) 2. Validation. *Journal of Hydrology*, v. 212–213, p.213-229, 1998b.
- Brown, K. A., Flynn, D.F.B., Abram, N.K., Ingram, J.C., Johnson, S.E., Wright, P. Assessing natural resource use by forest-reliant communities in Madagascar using functional diversity and functional redundancy metrics. *PLoS One*, 6, p. e24107, 2011.
- Burkhard, B., de Groot, R., Costanza, R., Seppelt, R., Jorgensen, S. E., Potschin, M. Solutions for sustaining natural capital and ecosystem services. *Ecological Indicators*, 21 (2012), pp. 1–6.
- Cabral, O. M. R., Ligo, M. A. V., Rocha, H. R., Freitas, H. C., Tatsch, J. D., Gomes, E., 2006: Observações micrometeorológicas em plantação de cana-de-açúcar na Usina Santa Rita – Fazenda São José do Pulador (27). Relatório de pesquisa apresentado a Usina Santa Rita.
- Chander, G.; Markham, B. Revised Landsat 5 - TM Radiometric Calibration Procedures and Postcalibration Dynamic Ranges. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, v. 41, p. 2674-2677, 2003.

- Connors, J. P.; Galletti, C. S.; Chow, W. T. Landscape configuration and urban heat island effects: Assessing the relationship between landscape characteristics and land surface temperature in phoenix, arizona. *Landsc. Ecol.* 2013, 28, 271–283
- Costanza, R., D'arge, R., de Groot, R.S., Farber, S., Grasso, M., Hannon, B., Limburg, K., Naeem, S., O'Neill, R.V., Paruelo, J., Raskin, R.G., Sutton, P., Van Den Belt, M. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature* 387, p. 253-260, 1997.
- Couralt, D.; Seguin, B.; Olioso, A. Review to estimate Evapotranspiration from remote sensing data: some examples from the simplified relationship to the use of mesoscale atmospheric models. ICID Workshop on Remote Sensing of ET for Large Regions, 17 Sept., 2002.
- Culf, A. D.; Esteves, J. L.; M. Filho, A. O.; da Rocha, H. R. Radiation, temperature and humidity over forest and pasture in amazonia. In: J. Gash; C. A. Nobre; J. M. Roberts; R. Victoria (Orgs.). *Amazon deforestation and climate*. 1st ed. Chichester: John Wiley and Sons, p. 175-192, 1996.
- Davidson, E.A.; Araújo, A.C.; Artaxo, P.; Balch, J.K.; Brown, I.F.; Bustamante, M.M.C.; Coe, M.T.; DeFries, R.S.; Keller, M.; Longo, M.; Munger, J.W.; Schroeder, W.; Soares-Filho, B.S.; Souza Jr, C.M.; Wofsy, S.C. The Amazon basin in transition. *Nature* 481, p. 321-328, 2012.
- Ewers, R. M.; Banks-Leite, C. Fragmentation Impairs the Microclimate Buffering Effect of Tropical Forests. *PLoS ONE* 8(3): e58093, 2013.
- Freitas, H. C. de. A influência dos transportes advectivos na estimativa do balanço de CO₂ do ecossistema: um estudo de caso para a mata atlântica com uso de técnicas micrometeorológicas. 2012. Tese (Doutorado em Ecologia Aplicada) - Ecologia de Agroecossistemas, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2012. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/91/91131/tde-17042012-145144/>>. Acesso em: 2016-05-24.
- Fundação SOS Mata Atlântica e Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Relatório técnico: Atlas dos remanescentes florestais da Mata Atlântica (período 2012-2013). 61p. São Paulo, 2014.

- Huete, A. R. Adjusting vegetation indices for soil influences. *International Agrophysics*, v.4, n.4, p.367-376, 1988.
- Jenerette, G., Harlan, S., Brazel, A. et al. Regional relationships between surface temperature, vegetation, and human settlement in a rapidly urbanizing ecosystem. *Landscape Ecology*, v. 14, I. 3, p. 22: 353, 2007.
- Kong, F.; Yin, H.; James, P.; Hutyra, L. R.; He, H. S. Effects of spatial pattern of greenspace on urban cooling in a large metropolitan area of eastern China. *Elsevier: Landscape and Urban Planning*, v. 128, p. 34-47, 2014.
- Lawrence, D.; Vandecar, K. Effects of tropical deforestation on climate and agriculture. *Nature Climate Change*, v. 5, n. 1, p. 27, 2015.
- Li,Y.; Zhao, M.; Motesharrei, S.; Mu, Q.; Kalnay, E. and Li, S. Local cooling and warming effects of forests based on satellite observations. *Nature Communications*, 2015.
- Luiz, R. A. F. Classificação climática do núcleo Cunha do Parque Estadual da Serra do Mar, Cunha-SP. 2008. 103 f. Trabalho de Graduação Individual (Bacharelado em Geografia)–Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Departamento de Geografia, Universidade de São Paulo, São Paulo. 2008.
- Mahmood, R.; Pielk, R.A.; Hubbard, K.G.; Niyogi, D. Dirmeyer, P.A.; McAlpine, C.; Carleton, A.M.; Hale, R.; Gameda, S.; Bletrán-Przekurat, A.; Baker, B.; McNider, R.; Legates, D.R.; Shepherd, M.; Du, J.; Blanken, P.D.; Frauenfeld, O.W.; Nair, U.S.; Fall, S. Land cover changes and their biogeophysical effects on climate. *International Journal of Climatology*, v. 34, n. 4, p. 929-953, 2014.
- Martin, T. C. M.; da Rocha, H. R.; Joly, C. A.; Freitas, H. C.; Wanderley, R. L. N.; da Silva, J. M. Climate variability in a complex terrain basin using a high resolution weather station network in southeastern Brazil. *International Journal of Climatology*. 2018. DOI 10.1002/joc.5797 (in press).
- Medeiros, M. C. M. P. Caracterização fitofisionômica e estrutural de áreas de floresta ombrófila densa montana no Parque Estadual da Serra do Mar. 85p. Dissertação (Mestrado em Biodiversidade Vegetal e Meio Ambiente) – Instituto de Botânica da Secretaria do Estado do Meio Ambiente, São Paulo, São Paulo, 2009.

- Metro Vancouver: Services and solutions for a livable region. Disponível em: <<http://www.metrovancouver.org/services/regional-planning/conserving-connecting/about-ecological-health/ecological-services/Pages/default.aspx>>. Acesso em 15 de março de 2016.
- Microsoft Corporation. Bing Maps Aerial. 2011.
- Millennium Ecosystem Assessment – MEA. Ecosystem and human well-being: a framework for assessment. Washington, DC: Island Press, 2003.
- Ministério do Meio Ambiente. Bioma Mata Atlântica. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/biomas/mata-atlantica>>. Acesso em 28 de janeiro de 2016.
- Myers, N. The World's Forests and Their Ecosystem Services. In G.C. Daily, ed., *Nature's Services: Societal Dependence on Natural Ecosystems*: 215- 235. Island Press, Washington D.C., U.S.A, 1997c.
- NASA Applied Remote Sensing Training (ARSET). Advanced Webinar: Land Cover Classification with Satellite. Online Training. January 31, 2017 to February 7, 2017 at <https://arset.gsfc.nasa.gov/land/webinars/advanced-land-classification>.
- NASA Jet Propulsion Laboratory (JPL), 2015, NASA Shuttle Radar Topography Mission 1 arc second. Version 3.0 Global. 24°S46'W. NASA EOSDIS Land Processes DAAC, USGS Earth Resources Observation and Science (EROS) Center, Sioux Falls, South Dakota (<http://lpdaac.usgs.gov>), last access January 25, 2018, at <http://dx.doi.org/10.5067/MEaSUREs/SRTM/SRTMUS1.003>.
- Nascimento, R. L. Análise comparativa dos componentes do saldo de radiação em áreas de pastagem e floresta na Amazônia. 16 de março de 2012. 71 f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Universidade Federal de Campina Grande (UFCG). Campina Grande, PB. 2012.
- Peng, S. S., Piao, S., Zeng, Z., Ciais, P., Zhou, L., Li, L. Z. X., Myneni, R. B., Yin, Y., Zeng, H. Afforestation in China cools local land surface temperature. *Proceedings of the National Academy of Sciences – PNAS*, 111(8), 2915-2919, 2014.
- Prata, A. J.; Caselles, V.; Coll, C.; Sobrino, J. A.; Ottlé, C. (1995). Thermal remote sensing of land surface temperature from satellites: Current status and future prospects. *Remote Sensing Reviews*, 12(3-4), 175- 224.

- Rocha, H. R., Freitas, H. C., Negro-Juarez, R. I., Tannus, R. N., Ligo, M. V., Cabral, O. M. R., Silva Dias, M. A. F., 2002: Measurements of CO₂ exchange over a woodland savana (Cerrado Senu Stricto) in southeast Brasil; *Biota Neotropica*, 2(1). Disponível em:
<http://www.biotaneotropica.org.br/v2n1/pt/abstract?article+BN01702012002>.
 Acesso em: 20 de abril de 2016.
- Rocha, Humberto R.; MANZI, A. ; SHUTTLEWORTH, W. J. Evapotranspiration. In: Keller, M.; Bustamante, M.; Gash, J.; Silva Dias P.. (Org.). *Amazonia and Global Change*. Washington, DC, US: American Geophysical Union, p. 261-272, 2009.
- Sellers, P. J.; Los, S. O.; Tucker, C. J.; Justice, C. O.; Dalzich, D. A.; Collatz, G. J.; Randall, D. A. A revised land surface parametrization (SiB2) for atmospheric GCMs. Part II: The generation of global fields of terrestrial biophysical parameters from satellite data. *Journal of Climate*, v. 9, p. 709-737, 1995.
- Sodhi, N. S.; Lee, T. M.; Sekercioglu, C. H. et al. (2010) Local people value environmental services provided by forested parks. *Biodivers Conserv.*, 19:1175. <https://doi.org/10.1007/s10531-009-9745-9>
- Spracklen, DV and Garcia-Carreras, L. The impact of Amazonian deforestation on Amazon basin rainfall. *Geophysical Research Letters*, 42 (21). 9546 – 9552, 2015.
- Stull, R. An introduction to boundary layer meteorology. Dordrecht: Kluwer Academic Publisher. 166 p. 1988.
- Tasumi, M. Progress in operational estimation of regional evapotranspiration using satellite imagery. Idaho: University of Idaho, 2003. 378p. PhD thesis.
- Tatsch, J. D. Uma análise dos fluxos de superfície e do microclima sobre cerrado, cana-de-açúcar e eucalipto, com implicações para mudanças climáticas regionais. 2006. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/14/14133/tde-14012010-162204/>. Acesso em: 2016-02-24.
- Tucker CJ, Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sens. Envir.* 1979;8, 127-150.

- United States Geological Services – USGS. Using the USGS Landsat 8 Product. 2015. Disponível em: <http://landsat.usgs.gov/Landsat8_Using_Product.php>. Acesso em: 20 de maio de 2016.
- Wang, X.; Guo, W.; Qiu, B.; Liu, Y.; Sun, J.; Ding, A.. Quantifying the contribution of land use change to surface temperature in the lower reaches of the Yangtze River. *Atmospheric Chemistry and Physics*, v. 17, n. 8. 4989-4996, 2017.
- Watson, R. T.; Noble, I. R.; Bolin, B.; Ravindranath, N. H.; Verardo, D. J.; Dokken, D. J.. Eds (2000) *Land Use, Land-Use Change, and Forestry: A Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (Cambridge Univ Press, Cambridge, UK).

APÊNDICE I

As equações utilizadas para correção da temperatura da superfície (LST) para os efeitos topográficos foram obtidas a partir da regressão da LST bruta com a altitude ($\hat{T}_h$) e com o aspecto ($\hat{T}_a$), separados em blocos de fração de área florestal alterada pelo homem (HMFF) a cada 10% (Tabela A1 e Lista 1). Essas equações foram aplicadas a todo o conjunto de dados de LST bruta para obter um segundo valor de LST correspondente para cada grupo. Então, a diferença entre a nova temperatura e a temperatura média bruta nos 800 m ($\Delta T_h = \hat{T}_{h,FAAI} - \bar{T}_{800m,FAAI}$, para altitude) e 45° ($\Delta T_a = \hat{T}_{a,FAAI} - \bar{T}_{45^\circ,FAAI}$, para o aspecto) foi calculada em relação às classes de HMFF para obter os valores delta em função da altitude e aspecto. A LST corrigida foi obtida a partir da diferença entre os valores LST bruta e os deltas do aspecto e da altitude (LST Corrigido = LST Bruto - ΔT_h - ΔT_a).

Tabela A1: Equações para correção da variação altitudinal e dependência com o HMFF (meio da classe, em %): $\hat{T}_h$ (°C) $y = b$ (°C·100m⁻¹) · x (altitude, m) + a (°C), em que a é a média da LST na altitude de 800 m.

HMFF (%)	$\hat{T}_h$	R ²	p-value
5	-0,39x + 23,7	0,97	5,8e ⁻¹²
15	-0,46x + 25,2	0,97	6,8e ⁻¹²
25	-0,43x + 25,2	0,96	2,9e ⁻¹¹
35	-0,44x + 25,6	0,98	3,9e ⁻¹³
45	-0,46x + 26,1	0,96	8,0e ⁻¹¹
55	-0,43x + 25,9	0,94	2,0e ⁻¹⁰
65	-0,48x + 26,7	0,91	7,3e ⁻⁰⁹
75	-0,44x + 26,6	0,89	3,8e ⁻⁰⁸
85	-0,52x + 27,8	0,93	3,6e ⁻⁰⁹
95	-0,43x + 28,0	0,95	1,9e ⁻⁰⁹

Lista 1: Equações para correção do aspecto na variação da LST e dependência do HMFF (meio da classe, em %): $\hat{T}_a$ (°C) $y =$ **ajuste polinomial (graus 4 ou 5)**, em que a é a média da LST na classe de 45°.

5%: $y = 1,61779094 \cdot 10^{-12}x^5 - 2,33860247606 \cdot 10^{-9}x^4 + 1,25591999175501 \cdot 10^{-6}x^3 - 2,66671263506879 \cdot 10^{-4}x^2 + 0,0153885560872595x + 20,0653840278255$
 $R^2 = 0,98$, p-value: $< 2,2e^{-16}$

15%: $y = -3,0794805345 \cdot 10^{-10}x^4 + 4,6282823936653 \cdot 10^{-7}x^3 - 1,53386952271406 \cdot 10^{-4}x^2 + 9,666318403319 \cdot 10^{-3}x + 21,0685572245873$
 $R^2 = 0,84$, p-value: $4,2e^{-12}$

25%: $y = -5,0863959982 \cdot 10^{-10}x^4 + 6,0917545530951 \cdot 10^{-7}x^3 - 1,97423557920073 \cdot 10^{-4}x^2 + 0,0159021036803466x + 21,0782574462278$
 $R^2 = 0,86$, p-value: $3,9e^{-13}$

35%: $y = 5,3821748 \cdot 10^{-13}x^5 - 8,6679154994 \cdot 10^{-10}x^4 + 7,0215619042691 \cdot 10^{-7}x^3 - 2,0418966137292200 \cdot 10^{-4}x^2 + 0,0133777521406273x + 21,7643771919129$
 $R^2 = 0,82$, p-value: $1,8e^{-10}$

45%: $y = -2,2904374004 \cdot 10^{-10}x^4 + 3,9021701365993 \cdot 10^{-7}x^3 - 1,3378135853359110 \cdot 10^{-4}x^2 + 7,11410447819105 \cdot 10^{-3}x + 22,0576792587603$
 $R^2 = 0,83$, p-value: $1,4e^{-11}$

$$\mathbf{55\%:} y = -7,89856874 \cdot 10^{-12}x^5 + 6,27778052893 \cdot 10^{-9}x^4 - 1,40461724204566 \cdot 10^{-6}x^3 + 4,84932614366329 \cdot 10^{-5}x^2 + 3,03868257719841 \cdot 10^{-3}x + 22,1601707704622$$

$$R^2 = 0,84, \text{ p-value: } 2,1e^{-11}$$

$$\mathbf{65\%:} y = -7,1582855494 \cdot 10^{-10}x^4 + 7,3249347776281 \cdot 10^{-7}x^3 - 2,01722512451319 \cdot 10^{-4}x^2 + 9,69801123460456 \cdot 10^{-3}x + 22,6333937871236$$

$$R^2 = 0,93, \text{ p-value: } < 2,2e^{-16}$$

$$\mathbf{75\%:} y = -4,44808908 \cdot 10^{-12}x^5 + 2,69906430718 \cdot 10^{-9}x^4 - 5,213565860973 \cdot 10^{-8}x^3 - 1,63693355725414 \cdot 10^{-4}x^2 + 0,0135403068244386x + 22,8101181285683$$

$$R^2 = 0,91, \text{ p-value: } < 2,9e^{-15}$$

$$\mathbf{85\%:} y = -2,98502355 \cdot 10^{-12}x^5 + 8,3204818832 \cdot 10^{-10}x^4 + 8,1961142721354 \cdot 10^{-7}x^3 - 3,47578242561042 \cdot 10^{-4}x^2 + 2,98496198269049 \cdot 10^{-2}x + 22,7277314181438$$

$$R^2 = 0,91, \text{ p-value: } < 3,2e^{-15}$$

$$\mathbf{95\%:} y = -5,33250272 \cdot 10^{-12}x^5 + 2,77711614452 \cdot 10^{-9}x^4 + 3,3896235911157 \cdot 10^{-7}x^3 - 3,03409602835814 \cdot 10^{-4}x^2 + 2,47593032436271 \cdot 10^{-2}x + 24,154206900288$$

$$R^2 = 0,97, \text{ p-value: } < 2,2e^{-16}$$