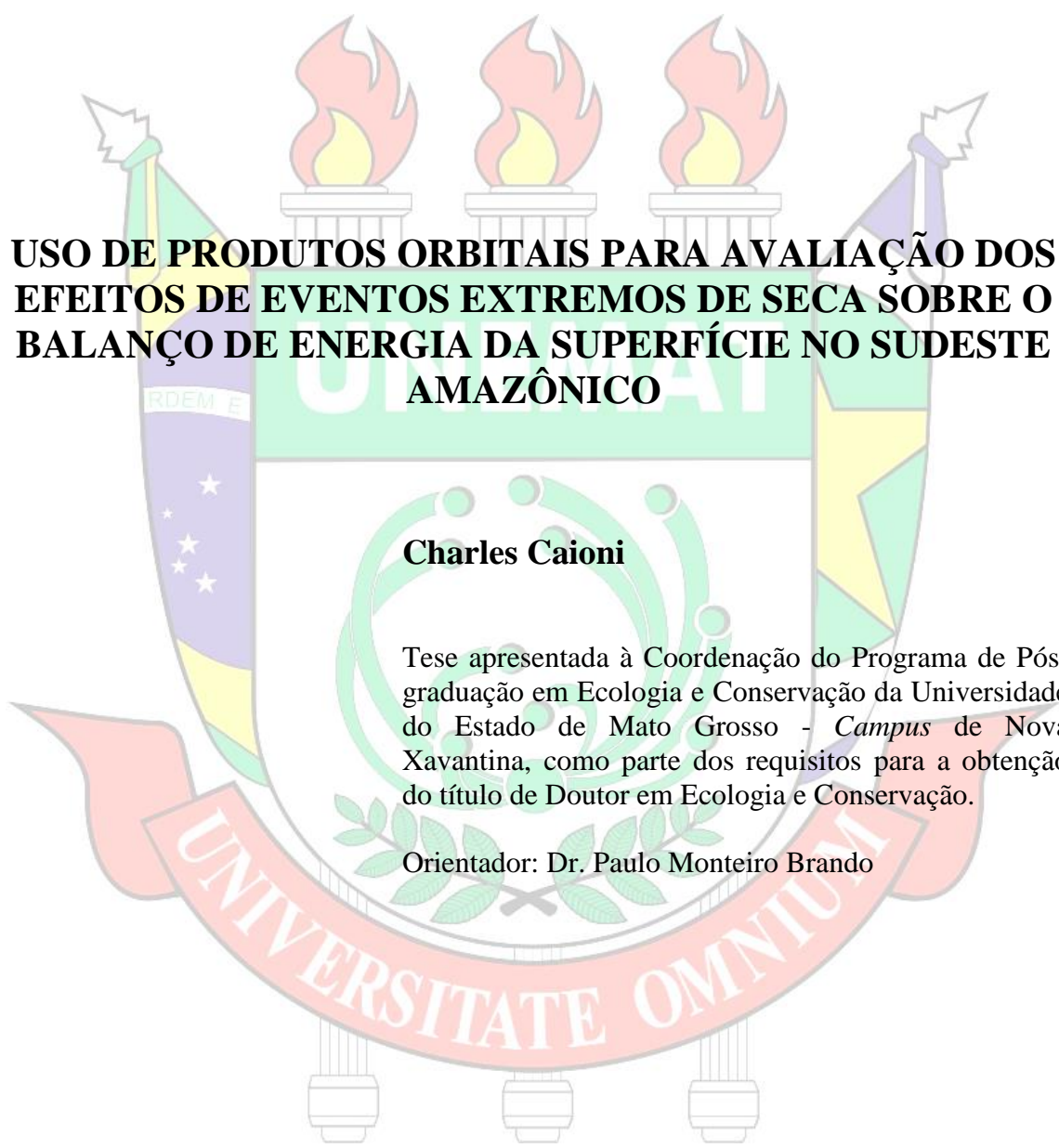


SECRETARIA DE ESTADO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE DO ESTADO DE MATO GROSSO  
CAMPUS DE NOVA XAVANTINA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ECOLOGIA E  
CONSERVAÇÃO



**USO DE PRODUTOS ORBITAIS PARA AVALIAÇÃO DOS  
EFEITOS DE EVENTOS EXTREMOS DE SECA SOBRE O  
BALANÇO DE ENERGIA DA SUPERFÍCIE NO SUDESTE  
AMAZÔNICO**

**Charles Caioni**

Tese apresentada à Coordenação do Programa de Pós-graduação em Ecologia e Conservação da Universidade do Estado de Mato Grosso - *Campus* de Nova Xavantina, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutor em Ecologia e Conservação.

Orientador: Dr. Paulo Monteiro Brando

Nova Xavantina-MT  
Março, 2020

SECRETARIA DE ESTADO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE DO ESTADO DE MATO GROSSO  
*CAMPUS* DE NOVA XAVANTINA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ECOLOGIA E  
CONSERVAÇÃO

**USO DE PRODUTOS ORBITAIS PARA AVALIAÇÃO DOS  
EFEITOS DE EVENTOS EXTREMOS DE SECA SOBRE O  
BALANÇO DE ENERGIA DA SUPERFÍCIE NO SUDESTE  
AMAZÔNICO**

**Charles Caioni**

Tese apresentada à Coordenação do Programa de Pós-graduação em Ecologia e Conservação da Universidade do Estado de Mato Grosso - *Campus* de Nova Xavantina, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutor em Ecologia e Conservação.

Orientador: Dr. Paulo Monteiro Brando

Nova Xavantina-MT  
Março, 2020

**FICHA CATALOGRÁFICA:**

Luiz Kenji Umeno Alencar CRB 1/2037

CAIONI, Charles.

C133u            Uso de Produtos Orbitais para Avaliação dos Efeitos de  
Eventos Extremos de Seca Sobre o Balanço de Energia da  
Superfície no Sudeste Amazônico / Charles Caioni – Nova  
Xavantina, 2020.

67 f.; 30 cm. (ilustrações) Il. color. (sim)

Trabalho de Conclusão de Curso (Tese/Doutorado) – Curso de Pós-  
graduação Stricto Sensu (Doutorado) Ecologia e Conservação, Faculdade  
de Ciências Agrárias Biológicas e Sociais Aplicadas, Câmpus de Nova  
Xavantina, Universidade do Estado de Mato Grosso, 2020.

Orientador: Dr. Paulo Monteiro Brando

1. Balanço de Energia. 2. Controle de Qualidade. 3. Produtos  
Orbitais. 4. Seca. 5. Sudeste Amazônico. I. Charles Caioni. II. Uso de  
Produtos Orbitais para Avaliação dos Efeitos de Eventos Extremos de  
Seca Sobre o Balanço de Energia da Superfície no Sudeste Amazônico:

CDU 621.311(811)

**TERMO DE APROVAÇÃO****USO DE PRODUTOS ORBITAIS PARA AVALIAÇÃO DOS  
EFEITOS DE EVENTOS EXTREMOS DE SECA SOBRE O  
BALANÇO DE ENERGIA DA SUPERFÍCIE NO SUDESTE  
AMAZÔNICO****Charles Caioni**

Tese apresentada à Coordenação do Programa de Pós-graduação em Ecologia e Conservação da Universidade do Estado de Mato Grosso - *Campus* de Nova Xavantina, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutor em Ecologia e Conservação.

Aprovado em 20 de dezembro de 2019.

Banca Examinadora:



---

**Prof. Dr. Paulo Monteiro Brando**

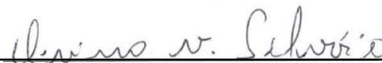
Universidade do Estado de Mato Grosso/Instituto de Pesquisa Ambiental da  
Amazônia



---

**Dra. Marcia Nunes Macedo**

Woods Hole Research Center



---

**Prof. Dr. Divino Vicente Silvério**

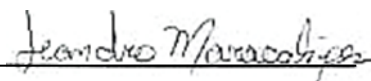
Universidade do Estado de Mato Grosso/Instituto de Pesquisa Ambiental da  
Amazônia



---

**Prof. Dr. Eddie Lenza de Oliveira**

Universidade do Estado de Mato Grosso



---

**Dr. Leandro Maracahipes dos Santos**

Instituto de Pesquisa Ambiental da Amazônia

---

**Prof. Dr. Paulo Sérgio Morandi**

Universidade do Estado de Mato Grosso

---

**Prof. Dr. Joaquim Manoel da Silva**

Universidade do Estado de Mato Grosso

---

---

**Dr. Michael Thomas Coe**  
Woods Hole Research Center

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO GERAL .....	9
2. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS DA INTRODUÇÃO GERAL.....	11
CAPÍTULO 1 – A SECA AMPLIFICA A DIFERENÇA NO BALANÇO DE ENERGIA ENTRE ÁREAS DE LAVOURA E DE FLORESTA AMAZÔNICA .....	13
1. INTRODUÇÃO .....	15
2. MATERIAL E MÉTODOS.....	16
2.1 Área de estudo .....	16
2.2 Conjunto de Dados .....	16
2.2.1 Cobertura da terra.....	17
2.2.2 Temperatura da superfície.....	17
2.2.3 Evapotranspiração .....	17
2.2.4 Albedo .....	18
2.2.5 Intensidade da Seca .....	18
2.3 Análise estatística .....	19
3. RESULTADOS .....	20
4. DISCUSSÃO .....	23
5. CONCLUSÃO .....	26
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	26
7. APÊNDICES .....	32
CAPÍTULO 2 – VALIDAÇÃO DE PRODUTOS ORBITAIS NA BACIA DO RIO XINGU, SUDESTE AMAZÔNICO .....	43
1 INTRODUÇÃO .....	43
2 MATERIAL E MÉTODOS.....	44
2.1 Área de estudo e torres de fluxo .....	44
2.2 Obtenção dos dados.....	45
2.2.1 Precipitação (produtos CHIRPS e TRMM_3B42) .....	45
2.2.2 Evapotranspiração (produto MOD16).....	46
2.2.3 Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (Produto MOD13Q1).....	46
2.2.4 Temperatura da superfície, evapotranspiração, albedo e índice de vegetação da diferença normalizada (projeto METRIC-EEFLUX).....	47
2.2.5 Dados observados.....	48
2.3 Análise estatística .....	48
3. RESULTADOS .....	49
3.1 Evapotranspiração .....	49

3.2 <i>Albedo</i> .....	51
3.3 <i>Temperatura superficial</i> .....	52
3.4 <i>Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI)</i> .....	53
3.5 <i>Precipitação</i> .....	54
4. DISCUSSÃO .....	55
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	57
6. APÊNDICES .....	60

## RESUMO

Eventos de seca têm sido mais frequentes na Amazônia, sendo esperado que venham a ocasionar aumentos na diferença dos componentes do balanço de energia entre áreas desmatadas de floresta. Contudo, para tais constatações é preciso de dados orbitais consistentes. Na presente tese, procuramos (i) entender e quantificar qual o efeito da seca sobre a temperatura da superfície, albedo e evapotranspiração, e ainda, (ii) a acurácia de diferentes produtos orbitais para essas variáveis. O trabalho está dividido em dois capítulos: no primeiro, testamos a hipótese de que o efeito da seca na evapotranspiração (ET), temperatura da superfície terrestre (LST) e albedo é menor em áreas de floresta em comparação com Cerrado e agricultura. Nossa hipótese recebeu apoio com aumentos no déficit hídrico mensal em todo o estado de Mato Grosso (sul da Amazônia e norte do Cerrado) gerando maiores elevações na LST e no albedo nas áreas de lavoura agrícola do que na floresta. Além disso, durante as secas de 2007 e 2010, as áreas de lavoura ficaram mais quentes (0,1 a 0,8 ° C) do que as áreas de Cerrado (0,3 a 0,6 ° C) e floresta (0,2 a 0,3 ° C). No entanto, ET florestal foi maior do que ET em todos os outros tipos de usos da terra. No segundo capítulo, utilizamos dados medidos em campo para validar produtos orbitais de albedo, temperatura superficial e índice de vegetação da diferença normalizada (obtidos a partir de imagens LANDSAT e MOD13), assim como produtos de evapotranspiração (MOD16) e precipitação (CHIRPS e TRMM) para a região sudeste da Amazônia. Em escala local, destacamos consistência nas estimativas de albedo, NDVI e LST. O NDVI estimado demonstrou, ainda, ser mais indicado para áreas de lavoura comparada a florestais. Para a precipitação estimada foram evidenciados melhores resultados para o produto CHIRPS, embora o TRMM também tenha exibido considerável consistência. De modo geral, nossas descobertas indicam que os remanescentes florestais contribuem para mitigação dos impactos negativos de eventos extremos de seca, e que é fundamental o uso de dados concisos que permitam compreender como a seca associada ao desmatamento pode influenciar os ecossistemas e clima futuro da Amazônia.

**Palavras-chave:** balanço de energia, controle de qualidade, produtos orbitais, seca, sudeste amazônico.

## ABSTRACT

Drought events have been more frequent in the Amazon, and are expected to lead to increases in the difference in energy balance components between deforested forest areas. However, such findings require consistent orbital data. In the present thesis, we seek *(i)* to understand and quantify the effect of drought on surface temperature, albedo and evapotranspiration, and *(ii)* the accuracy of different orbital products for these variables. The work is divided into two chapters: in the first, we tested the hypothesis that the effect of drought on evapotranspiration (ET), land surface temperature (LST) and albedo is smaller in forested areas compared to Cerrado and agriculture. Our hypothesis received partial support, with increases in the monthly water deficit throughout the state of Mato Grosso (southern Amazonia and northern Cerrado) leading to larger increases in LST and albedo in agricultural than forest areas. In addition, during the 2007 and 2010 droughts, the cultivated areas became warmer (0,1 to 0,8°C) than savannas (0,3 to 0,6°C) and forests (0,2 at 0,3°C). However, forest ET was higher than ET in all other types of land uses. In the second chapter, we use field-measured data to validate albedo orbital products, surface temperature and normalized difference vegetation index (obtained from LANDSAT and MOD13 images), as well as evapotranspiration (MOD16) and precipitation products (CHIRPS and TRMM), for the southeast region of the Amazon. In local scale, we evidenced consistency in the albedo, NDVI and LST estimates. The estimated NDVI also showed to be more suitable for agricultural compared to forested areas. For the estimated precipitation better results were evidenced for the product CHIRPS, although the TRMM also showed considerable consistency. Overall, our findings indicate that forest remnants contribute to mitigating the negative impacts of extreme drought events, and that the use of concise data to understand how drought associated with deforestation can influence Amazon ecosystems and future climate is critical.

**Keywords:** drought, energy balance, orbital products, quality control, southeastern Amazon.



## 1. INTRODUÇÃO GERAL

No momento, estima-se que aproximadamente 20% da cobertura florestal do bioma amazônico já foi convertida em diferentes usos da terra (INPE, 2019; Macedo *et al.*, 2012; Vanwey *et al.*, 2013). Mato Grosso está entre os estados com maior percentual de área desmatada (INPE, 2019). Entre 2000 e 2005, somente o estado representou cerca de 40% de todo o desmatamento ocorrido na Amazônia brasileira (Macedo *et al.* 2011). Mesmo que tais percentuais tenham sido reduzidos nos anos seguintes em decorrência da flutuação do preço de commodities e de iniciativas públicas, atualmente o desmatamento ainda é recorrente no estado.

Eventos de seca que eram raros na Amazônia têm se tornando mais frequentes nos últimos anos (Cox *et al.*, 2008, Malhi *et al.*, 2008). Suas causas compreendem desde a elevação da temperatura das águas do Oceano Atlântico Norte (SST) e Pacífico Sul (El Niño), ao deslocamento da Zona de Convergência Intertropical (ITCZ) (Lewis *et al.*, 2011, Marengo *et al.*, 2008). Estudos recentes (Butt *et al.*, 2011; FU *et al.*, 2013) sugerem que, em anos de seca extrema, há um aumento na diferença dos componentes do balanço de energia entre áreas de floresta e desmatadas. Isso ocorre porque o processo de evapotranspiração, que é maior nas florestas, consome grande parte da energia que chega à superfície terrestre. Com a redução desse consumo pelas áreas desmatadas, há uma quantidade adicional de energia entre a superfície terrestre e a atmosfera, ocorrendo assim um aumento do fluxo de calor sensível e da temperatura do ar (Bonan, 2008; Silvério *et al.*, 2015).

Os componentes do balanço de energia (calor latente e sensível, albedo e temperatura da superfície), assim como a precipitação ocorrente no Sudeste Amazônico, podem ser estimados a partir de diferentes produtos orbitais. Para a evapotranspiração, temos o sensor Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS, produtos MOD16 coleções 005 e 006) (Mu *et al.*, 2011), e também estimativas realizadas a partir de imagens do satélite LANDSAT (projeto METRIC-EFFLUX). Também utilizando imagens LANDSAT, o projeto EEFLUX-METRIC fornece estimativas de albedo e temperatura da superfície. Para a precipitação, há ainda dados do sensor Tropical Rainfall Measuring Mission (3B42\_TRMM) (Huffman *et al.*, 2007) e do Climate Hazards Group Infra Red Precipitation with Station Data (CHIRPS) (Stackhouse *et al.*, 2015; Funk *et al.*, 2015). Mesmo que a obtenção de dados via sensores remotos seja uma boa alternativa, estudos têm demonstrado discrepâncias entre os dados observados e estimados (Oliveira *et al.*, 2017; Ramoelo *et al.*, 2014). Isso porque

grande parte dos produtos orbitais utilizados são calibrados principalmente para o Hemisfério Norte.

De modo geral, apesar da certeza da ocorrência de mudanças no clima, ainda existem algumas questões a serem melhor esclarecidas como, por exemplo, *(i)* de que forma os eventos extremos de seca afetam os componentes do balanço de energia (albedo, calor latente, calor sensível e temperatura da superfície), no sudeste da Amazônia?; E também, *(ii)* qual a acurácia dos dados orbitais de precipitação e das variáveis do balanço de energia para essa mesma região?

Nessa conjectura, organizamos esta tese em dois artigos/capítulos. No primeiro, testamos a hipótese de que os efeitos da seca sobre a ET, LST e albedo são mais acentuados em áreas de lavoura e Cerrado quando comparados com os ambientes florestais em razão da baixa deciduidade e elevada capacidade de obtenção (raízes mais profundas) e armazenamento de água (caule espesso) das espécies arbóreas em períodos de elevado déficit hídrico. No segundo capítulo, utilizamos dados medidos em campo para validar produtos orbitais de albedo, temperatura superficial e índice de vegetação da diferença normalizada (obtidos a partir de imagens LANDSAT), assim como produtos de evapotranspiração (MOD16) e precipitação (CHIRPS, TRMM) para a região sudeste da Amazônia.

## 2. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS DA INTRODUÇÃO GERAL

BONAN, G. B. Forests and climate change: forcings, feedbacks, and the climate benefits of forests. **Science**, v320, p.1444–9. 2008.

BUTT, N.; OLIVEIRA, P. A.; COSTA, M. H. Evidence that deforestation affects the onset of the rainy season in Rondonia, Brazil. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 116, n.11. 2011.

COX, P. M.; HARRIS, P. P.; HUNTINGFORD, C.; BETTS, R. A.; COLLINS, M.; JONES, C. D.; NOBRE, C. A. Increasing risk of Amazonian drought due to decreasing aerosol pollution. **Nature**, v. 453, n. 7192, p. 212, 2008.

FUNK, C.; PETERSON, P.; LANDSFELD, M.; PEDREROS, D.; VERDIN, J.; SHUKLA, S.; ... & MICHAELSEN, J. The climate hazards infrared precipitation with stations—a new environmental record for monitoring extremes. **Scientific data**, v. 2, p. 150066, 2015.

FU, R.; YIN, L. LI, W.; ARIAS, P.A.; DICKINSON, R.E.; HUANG, L.; CHAKRABORTY, S.; FERNANDES, K.; LIEBMANN, B.; FISHER, R.; MYNENI, R.B. Increased dry-season length over southern Amazonia in recent decades and its implication for future climate projection. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 110, n. 45, p. 18110-18115, 2013.

HUFFMAN, G. J.; BOLVIN, D. T.; NELKIN, E. J.; WOLFF, D. B.; ADLER, R. F.; GU, G.; HONG, Y.; BOWMAN, K. P. STOCKER, E. F. The TRMM multisatellite precipitation analysis (TMPA): Quasi-global, multiyear, combined-sensor precipitation estimates at fine scales. **Journal of hydrometeorology**, v. 8, n. 1, p. 38-55, 2007.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. Projeto PRODES: Monitoramento da floresta Amazônica Brasileira por satélite. Disponível em: <<http://www.obt.inpe.br/OBT/assuntos/programas/amazonia/prodes>>. Acessado em: 05 set. 2019.

LEWIS, S. L.; BRANDO, P.; PHILLIPS, O. L.; HEIJDEN, G. M. F; NEPSTAD, D. The 2010 amazon drought. **Science**, v. 331, n. 6017, p. 554-554, 2011.

MALHI, Y.; ROBERTS, J. T.; BETTS, R. A.; KILLEEN, T. J.; LI, W.; NOBRE, C. A. Climate change, deforestation, and the fate of the Amazon. **Science**, v. 319, n. 5860, p.169–72, 2008.

MACEDO, M. N.; COE, M. T.; DEFRIES, R.; URIARTE, M.; BRANDO, P. M.; NEILL, C.; WALKER, W. S.

Land-use-driven stream warming in southeastern Amazonia. **Phil. Trans. R. Soc. B**, v. 368, n. 1619, 2013.

MARENGO, J. A.; TOMASELLA, J.; ALVES, L. M.; SOARES, W. R.; RODRIGUEZ, D. A. The drought of 2010 in the context of historical droughts in the Amazon region. **Geophysical Research Letters**, v. 38, n. 12, 2011.

OLIVEIRA, G.; BRUNSELL, N. A.; MORAES, E. C.; SHIMABUKURO, Y. E.; BERTANI, G.; DOS SANTOS, T. V.; ARAGAO, L. E. Evaluation of MODIS-based estimates of water-use efficiency in Amazonia. **International Journal of Remote Sensing**, v. 38, n. 19, p. 5291-5309, 2017.

RAMOELO, A.; MAJOZI, N.; MATHIEU, R.; JOVANOVIC, N.; NICKLESS, A.; DZIKITI, S. Validation of global evapotranspiration product (MOD16) using flux tower data in the African savanna, South Africa. **Remote Sensing**, v. 6, n. 8, p. 7406-7423, 2014.

SILVÉRIO, D.V.; BRANDO, P.M.; MACEDO, M.N.; BECK, P.S.; BUSTAMANTE, M.; COE, M.T. Agricultural expansion dominates climate changes in southeastern Amazonia: the overlooked non-GHG forcing. **Environmental Research Letters**, v.10, n.10, p.104015, 2015.

STACKHOUSE, P. W.; WESTBERG, D.; HOELL, J. M.; CHANDLER, W. S.; ZHANG, T. Prediction Of Worldwide Energy Resource (POWER)-Agroclimatology Methodology-(1.0 Latitude by 1.0 Longitude Spatial Resolution). **Technical Report of NASA Langley Research Center and SSAI/NASA Langley Research Center**, p. 1-46, 2015.

VANWEY, L. K.; SPERA, S.; SA, R.; MAHR, D.; MUSTARD, J. F. Socioeconomic development and agricultural intensification in Mato Grosso. **Philosophical Transactions of the Royal Society of London B: Biological Sciences**, v. 368, n. 1619, p. 20120168, 2013.

# **CAPÍTULO 1– A SECA AMPLIFICA A DIFERENÇA NO BALANÇO DE ENERGIA ENTRE ÁREAS DE LAVOURA E DE FLORESTA AMAZÔNICA**

Publicado no periódico: Remote Sensing

## **RESUMO**

As secas podem exercer uma forte influência no balanço energético regional da Amazônia e do Cerrado, assim como a substituição da vegetação nativa por áreas de cultivo. O que permanece incerto é como esses dois fatores forçantes interagem e se as mudanças na cobertura do solo alteram fundamentalmente a sensibilidade do balanço energético aos eventos de seca. Para preencher essa lacuna, usamos dados de sensoriamento remoto para testar a hipótese de que as secas têm mais impactos na evapotranspiração (ET), temperatura da superfície da terra (LST) e albedo, quando as áreas de Cerrado e de floresta são convertidas em áreas agrícolas. Nossos resultados (para a seca sazonal) indicaram que nos meses de maior intensidade da seca há um maior aumento na LST e no albedo nas áreas de lavoura do que nas áreas de florestas. Além disso, durante as secas de 2007 e 2010, as áreas de lavoura ficaram mais quentes (0,1 a 0,8 ° C) do que as áreas de Cerrado (0,3 a 0,6 ° C) e de florestas (0,2 a 0,3 ° C). No entanto, o ET florestal era consistentemente maior que o ET em todos os outros usos da terra. Essa descoberta provavelmente indica que as florestas podem acessar águas mais profundas do solo durante as secas. Nossos resultados indicam que, em escalas regionais, os remanescentes florestais podem desempenhar um papel determinante na mitigação dos impactos negativos dos eventos extremos de seca, contribuindo com menor albedo e temperatura e maior ET.

**Palavras-chave:** extremo climático, mitigação da seca, sudeste amazônico.

**ABSTRACT**

Droughts can exert a strong influence on the regional energy balance of the Amazon and Cerrado, as can replacement of native vegetation by croplands. What remains unclear is how these two forcing factors interact and whether land-cover changes fundamentally alter the sensitivity of the energy balance to drought events. To fill this gap, we used remote sensing data to test the hypothesis that droughts have greater impacts on evapotranspiration (ET), land surface temperature (LST), and albedo when forests and savannas are replaced by agricultural crops. Our results (for seasonal drought) indicate that increases in monthly dryness across Mato Grosso state (southern Amazonia and northern Cerrado) drive greater increases in LST and albedo in croplands than in forests. Furthermore, during the 2007 and 2010 droughts, croplands became hotter (0.1–0.8°C) than savannas (0.3–0.6°C) and forests (0.2–0.3°C). However, forest ET was consistently higher than ET in all other land uses. This finding likely indicates that forests can access deeper soil water during droughts. Our results indicate that, at regional scales, forest remnants can play a key role in mitigating the negative impacts of extreme drought events, contributing to lower albedo and temperature, and higher ET.

**Keywords:** climatic extreme, mitigation of drought, southeastern amazon.

## 1. INTRODUÇÃO

Aproximadamente 20% e 50% da vegetação da Amazônia e do Cerrado, respectivamente, já foram convertidos em diferentes usos da terra [1], sobretudo em pastagens e cultivos agrícola [2-5]. Embora as taxas de desmatamento em ambos os biomas tenham reduzido no início dos anos 2000 [3, 6], cerca de 5000 a 9000 km<sup>2</sup> de floresta ainda são desmatados a cada ano. Mato Grosso tem liderado o desmatamento, correspondendo por 40% de todo o desmatamento na Amazônia entre 2000 e 2005 e cerca de 20% até o momento (1341 km<sup>2</sup>) [7]. As taxas de desmatamento do Cerrado também são mais altas no Mato Grosso, representando 24% do desmatamento no bioma entre 2014-2017 [7]. É esperado que essas mudanças no uso da terra contribuam para mudanças climáticas regionais [8, 9], porque as áreas desmatadas cobertas por culturas e pastagens tendem a ser mais quentes e a evapotranspirar menos [10-12] comparado as áreas cobertas por florestas e savanas nativas [13].

Nas últimas duas décadas, o Ecótono Amazônia-Cerrado sofreu quatro secas severas [13–17]. Em 2005 e 2010, a precipitação ficou abaixo da média histórica da Amazônia em 37% e 50%, por conta principalmente de aumentos nas temperaturas superficiais do Oceano Atlântico Norte [14,15,18]. Em 2007, a precipitação na região do Xingu (sudeste da Amazônia) também foi menor entre 2000-2010. Por último, em 2015, a Amazônia e o Cerrado novamente passaram por outra seca severa, desta vez relacionada ao evento de El Niño [12,16,18,19]. Diferentes estudos indicam que a frequência de secas severas irá aumentar nas próximas décadas [13,20], ainda não está claro como a intensificação desses eventos poderá influenciar o balanço energético regional em diferentes usos da terra.

As florestas (Amazônia) e as savanas (Cerrado) neotropicais desenvolveram distintas estratégias para lidar com a seca [6,19]. Por exemplo, árvores e arbustos neotropicais podem acessar grandes volumes de água do solo (abaixo de 15 m de profundidade) por meio de sistemas radiculares profundos que sustentam a fotossíntese e a evapotranspiração mesmo durante os meses de maior déficit hídrico no solo [11,21,22]. No entanto, as secas mais extremas podem ter graves consequências para a estrutura e funcionamento da vegetação tropical [23]. Em um experimento de exclusão de chuvas em larga escala, por exemplo, a mortalidade das árvores aumentou abruptamente após a umidade do solo cair abaixo de 50% por dois anos consecutivos [24]. Esses resultados sugerem que há um limite de tolerância da vegetação à limitação sazonal de água, mas esse limite pode ser quebrado, caso os eventos

seca extrema se intensifiquem nas próximas décadas, conforme previsto em diferentes estudos.

A intensificação desses eventos ocorre também como consequências das atividades humanas e de mudanças no uso da terra. Por exemplo, a medida em que a vegetação nativa do bioma Cerrado e Amazônico é convertida em pastagens exótica ou cultivo agrícola, a capacidade das plantas da região de extraírem água do solo e emitirem para a atmosfera tende a reduzir [18]. As mudanças climáticas associadas ao desmatamento na Amazônia e no Cerrado podem ainda exacerbar os efeitos das secas regionais. Isso porque, a conversão da floresta e do Cerrado em áreas de lavoura ou pastagem exótica tende a reduzir a evapotranspiração e a aumentar o calor sensível [12,25,26]. Essas mudanças no balanço energético alteram o clima regional e podem ser parcialmente responsáveis pelo prolongamento da estação em até 18 dias no sudeste da Amazônia [27–29].

Nessa conjectura, focamos em testar a hipótese de que os efeitos da seca sobre a evapotranspiração (ET), temperatura superficial (LST) e albedo são mais acentuados em áreas de lavoura e Cerrado comparados a ambientes florestais, por conta da baixa deciduidade, elevada capacidade de obtenção (raízes mais profundas) e armazenamento de água (caule espesso) das espécies arbóreas em períodos de elevado déficit hídrico.

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 *Área de estudo* - Nosso estudo foi desenvolvido no estado de Mato Grosso, que demonstrou nas últimas três décadas elevadas taxas de desmatamento, seguido de forte aumento da atividade agrícola [56]. Com uma área de 903.358 km<sup>2</sup>, o estado de Mato Grosso abrange três distintos biomas: floresta amazônica (480.216 km<sup>2</sup>; 53,6%); Cerrado (354.823,5 km<sup>2</sup>; 39,60%); Pantanal (60.885,02 km<sup>2</sup>; 6,8%) [23]. Em 2018, o estado foi responsável por um quarto da produção de grão no Brasil (59,5 milhões de toneladas), incluindo 30,5 milhões de toneladas de soja e 26,4 milhões de toneladas de milho [11]. O clima no estado apresenta dois períodos bem definidos (seco e chuvoso), com precipitação entre 1500 e 2000 mm [10, 50] e temperaturas entre 23 e 25°C [55] e altitude entre os 350 e 800 m.

2.2 *Conjunto de dados* – Para avaliarmos o efeito das recentes secas sobre a evapotranspiração, temperatura superficial e albedo em áreas de floresta, Cerrado e lavoura, nós combinamos produtos do MODIS, Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MOD8, MCD43A3, MOD11A2, MOD16A2), e do TRMM, Tropical Rainfall Measuring



Mission (TRMM 3B43) [60] com mapas dos principais usos/cobertura da terra no estado [8, 21, 27, 38, 51].

*2.2.1 Cobertura da terra* – Utilizamos três diferentes séries temporais de mapas de usos e cobertura da terra para determinar as principais coberturas existente no Mato Grosso. As principais coberturas identificadas foram: floresta, Cerrado e área de lavoura. Primeiro, extraímos a classe “floresta” com base nos mapas globais de mudança florestal publicados por [21]. Esse conjunto de dados é composto por mapas anuais de alterações florestais de 2000 a 2014 com resolução de 30 m. Eles foram desenvolvidos com base em imagens dos satélites Landsat 5 (Thematic Mapper - TM), Landsat 7 plus (Enhanced Thematic Mapper - ETM+) e Landsat 8 (Operational Land Imager, OLI) [21]. A cobertura florestal foi estimada com base na porcentagem de cobertura arbórea (acima de 5 metros de altura). As áreas com inserção de cultura agrícolas foram obtidas por meio do mapeamento realizado por [51]. Elaborados através do produto MOD13Q1 do MODIS (resolução de 250 metros), estes mapas retratam as principais culturas cultivadas no estado de Mato Grosso, identificadas a partir de padrões e limiares fenológicos [2, 19]. A classe Cerrado foi obtida a partir dos dados do projeto TerraClass Cerrado [8]. Obtido a partir de 118 cenas do satélite Landsat 8 (sensor Operational Land Imager-OLI) do ano de 2013, os mapas retratam os principais usos e cobertura da terra no bioma Cerrado.

Para integrar esses produtos, primeiro padronizamos a resolução espacial dos três conjuntos de dados para uma resolução de 250 metros. Posteriormente, excluimos todas as áreas de cobertura florestal não pertencentes ao bioma Amazônico. Para a aquisição da classe lavoura, desconsideramos dos dados de [51] as áreas de Cerrado e de sobreposição com a classe floresta. Em seguida, agrupamos em uma única classe todos as culturas agrícolas mapeadas no estado. Para a classe Cerrado, apenas extraiu-se do projeto TerraClass Cerrado [8] as áreas naturais (florestais e não florestais) pertencentes ao estado de Mato Grosso.

*2.2.2 Temperatura da superfície* – Os valores de temperatura da superfície da terra (LST) foram obtidos a partir da série temporal (2000–2014) do produto MOD11A2 (coleção 006). Com uma resolução espacial de 1 km e uma resolução temporal de 8 dias, os dados de LST são estimados a partir do algoritmo “*generalized split-window*” [61].

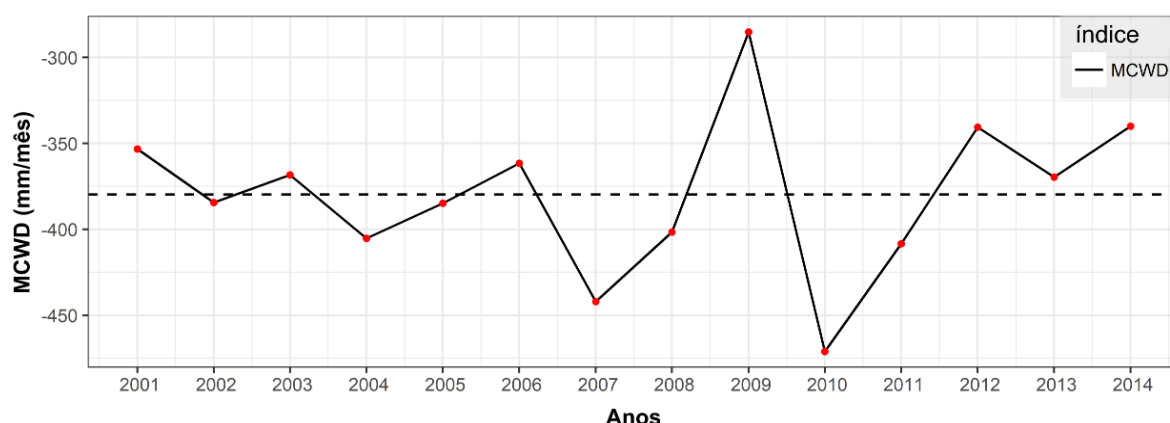
*2.2.3 Evapotranspiração (ET)* – Os dados de ET foram obtidos a partir da série temporal (2001/2014) do produto MOD16A2 (coleção 005). Com resolução espacial de 1km,



2.3 *Análise estatística* - Realizamos três análises para avaliarmos se os efeitos da seca sobre a ET, LST e o albedo foram menos acentuados nas áreas de florestas em relação as áreas Cerrado e lavoura Primeiro, identificamos anos com secas acima da média histórica (seca extrema). Em seguida, comparamos as variáveis resposta (ET, LST e albedo) no ano de seca extrema com sua média de quatro anos nos anos mais próximos da seca extrema (dois antes e dois depois). Por último, utilizamos análises de covariância para avaliar como a relação entre a intensidade da seca e cada variável resposta (ET, LST e albedo) variou para os três tipos de cobertura da terra (florestas, savana e agropecuária).

(I) *Identificação de eventos extremos de seca*

Para identificarmos os anos apresentaram déficits hídricos superiores à média histórica ( $\bar{x}_h$ ), calculamos a média pixel dos valores de MCWD presentes dentro do estado de Mato Grosso. Por exibir significativamente ( $p < 0.001$ ) os maiores valores de déficit hídrico adotamos os anos de 2007 e 2010 como objeto de estudo (Figura 1).



**Figura 1.** Comportamento temporal do índice de seca (MCWD) entre 2001 e 2014. A linha pontilhada representa a médias histórica.

A distribuição da seca no estado foi ainda categorizada em áreas com desvio padrão ( $DP$ )  $\leq 1.49$  e  $\geq 1.5$ . Por meio da equação 4, consideramos como áreas com  $DP \geq 1.5$  todos os locais que em 2007 e 2010 vieram a exibir déficits inferiores a  $-501.09$  mm e  $-499.20$  mm, respectivamente.

$$Tewd = MCWD_{xh} - (MCWDDP * 1.50) \quad (Eq. 4)$$

Sendo:

$Ldh$  = Limiar de déficit hídrico extremo;

$MCWD_{DP}$  = desvio padrão da série histórica de MCWD;

$MCWD_{\bar{x}h}$  = média histórica de MCWD;

(II) Comparando ET, LST e albedo em anos de seca com médias históricas e semestrais

Em nossa segunda análise, calculamos a porcentagem de mudanças no albedo, LST e ET (em áreas de lavoura, floresta e Cerrado) em todo o estado e em áreas nas quais a seca excedeu 1,50 desvio padrão da média. Para isso, primeiro determinamos duas médias históricas para cada variável, com base nas séries temporais de 2001 a 2014.

Para controlar as tendências históricas nos dados (ou seja, valores crescentes ou decrescentes), também criamos duas médias semestrais - com base nas médias do par de anos anteriores e posteriores a cada ano focal (2007 e 2010). Para remover os efeitos de anos extremos nos meios históricos, excluimos os anos focais dessas médias. Assim como no MCWD, calculamos todas as médias anuais com base no ano hidrológico (outubro-setembro).

Para estimar o efeito das secas no balanço energético regional ( $\Delta e$ ), calculamos a diferença entre anos de seca (2007 e 2010) e anos de não seca (2001-2014, excluindo anos de seca) para cada variável de interesse (ET, albedo e LST). Em seguida, extraímos essas diferenças ( $\Delta e$ ) para pixels puros de cada uso da terra, definidos como áreas que não mudaram durante o período do estudo. No caso da floresta, incluímos apenas pixels com 100% de cobertura florestal. Também extraímos o  $\Delta e$  para pixels puros em áreas onde a seca foi mais ou menos intensa. Todos os cálculos foram realizados usando o pacote raster em R [20].

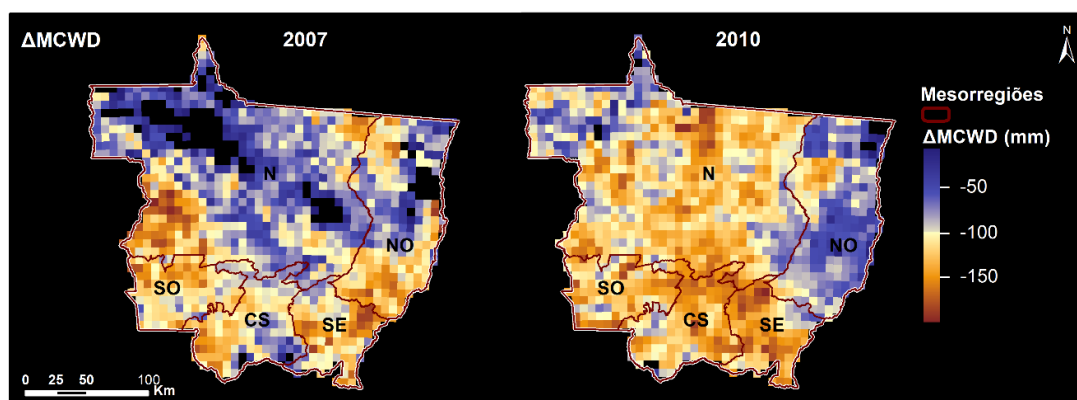
(III) *Efeito sazonal da seca sobre ET, LST e albedo para os diferentes usos/cobertura da terra:*

Para quantificar como a intensidade da estação seca afeta o balanço de energia, primeiro extraímos (apenas da estação seca) os valores mensais de LST, ET e albedo proveniente dos pixels puros de cada uso da terra (floresta, Cerrado, lavoura). Em seguida, por meio do pacote raster R [20] realizamos a média pixel mensal de cada variável, o que nos permitiu posteriormente realizar regressões lineares entre os valores de CDW (variável preditora), e ET, LST e albedo (variáveis resposta).

### 3. RESULTADOS

A estação seca no estado de Mato Grosso durante os anos de 2007 e 2010 foi 18,05% (MCWD = -67.6 mm/mês) e 26.44% (MCWD = 99.8 mm/mês), maior respectivamente em relação à média histórica (2001-2014; figura 2). Assim, embora 2010 tenha sido o ano mais seco em média, os maiores extremos de déficits hídrico foram observados em 2007 (mínima de -600,15 mm/mês), no sudeste do estado. Considerando a média por região, o Sudoeste do

estado foi a região de maior intensidade da seca tanto em 2007 (-97,29 mm; 28,55%) quanto em 2010 (-116,77 mm; 34,39%). Por outro lado, as regiões com menor intensidade da seca foram o norte em 2007 (65,48 mm, 17,65%) e o Nordeste em 2010 (64,89 mm, 15,87%).



**Figura 2.** Aumento do Déficit Máximo Climatológica de Água (2007 e 2010) para cada região do estado de Mato Grosso (N: Norte, NO: Nordeste, CS: Centro-Sul, SO: Sudoeste, SE: Sudeste). Obtidos a partir do satélite TRMM [22] cada pixel representa a diferença entre o déficit anual e o déficit histórico ( $\Delta MCWD$ ).

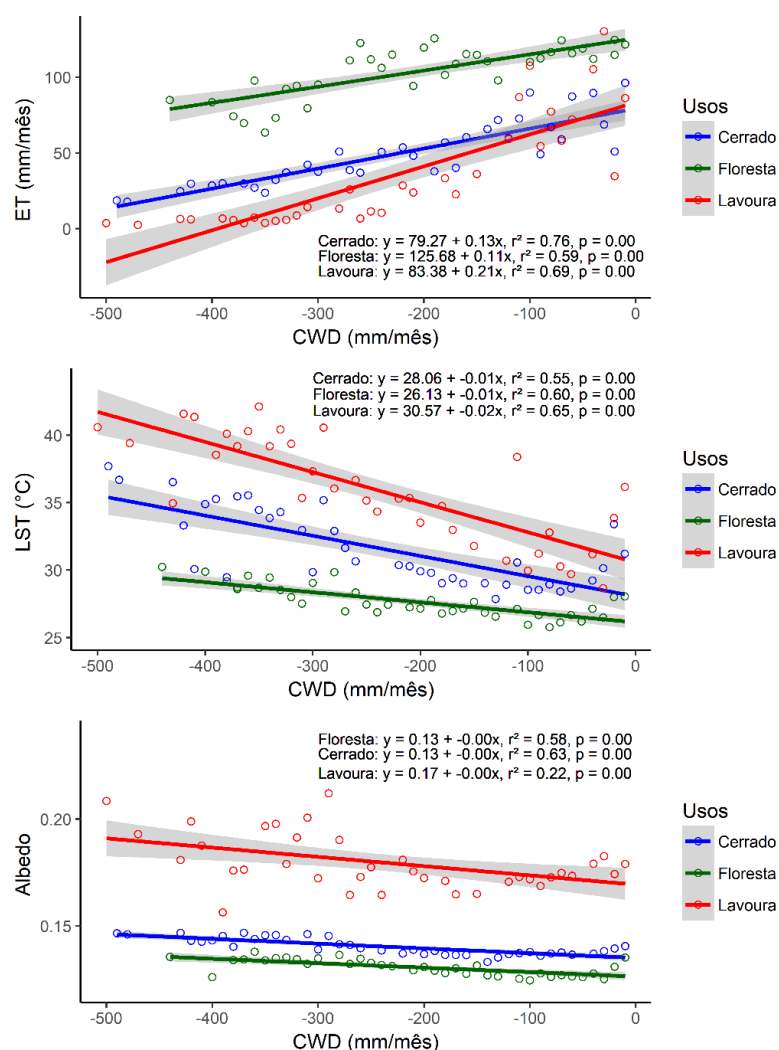
Quando analisamos para todo o estado de Mato Grosso as possíveis mudanças nos componentes do balanço de energia, evidenciamos em 2007 e 2010 um aumento geral na temperatura da superfície e no albedo. A temperatura superficial, em 2007 e 2010, foi  $0,3^{\circ}\text{C}$  (média de  $30,8^{\circ}\text{C}$ ) e  $0,7^{\circ}\text{C}$  (média de  $30,1^{\circ}\text{C}$ ) maior quanto à média histórica, respectivamente. O albedo também aumentou durante esses dois anos de seca, contudo, apenas em 0,01 (média = 0,143) em 2007 e 0,04 em 2010 (média = 0,147).

Quando controlamos as mudanças no uso da terra durante o período do estudo (ou seja, excluimos os pixels nos quais houve mudanças de uso da terra), descobrimos que as métricas de balanço de energia em áreas florestais eram mais estáveis ao longo dos anos, em comparação com as de áreas desmatadas. Por exemplo, a LST média (anual) em 2010 aumentou menos na floresta ( $0,3^{\circ}\text{C}$ ) que no Cerrado ( $0,6^{\circ}\text{C}$ ) e na área de lavoura ( $0,8^{\circ}\text{C}$ ) (Apêndice 1). Em 2007, mesmo que os aumentos de LST tenham sido mais semelhantes entre os usos da terra. O albedo também demonstrou maior aumento na área de lavoura durante as secas de 2007 e 2010 (0,007 e 0,01, respectivamente). Em 2007 e 2010, a ET durante a seca de 2007 diminuiu  $-1,0\text{ mm}$  e  $-1,2\text{ mm}$  por mês nas áreas de floresta e Cerrado, respectivamente, em comparação com os dois anos anteriores. Em 2010, houve uma redução na ET de  $-3,97\text{ mm}$  mensal nas áreas de floresta,  $-4,10\text{ mm}$  no Cerrado e  $-2,85\text{ mm}$  nas áreas de lavoura (Apêndice 2.3).

A comparação das áreas com secas mais ( $MCWD \leq -1,5 SD$ ) e menos intensa ( $MCWD \geq -1,5 SD$ ) para todo o estado de Mato Grosso (em todas as classes de uso da terra) indicou aumentos na LST e no albedo em função da intensidade da seca (Apêndices 3 e 4). Em 2007, por exemplo, as áreas com MCWD mais negativo estiveram  $0,1^{\circ}C$  mais quentes (LST) que as áreas com MCWD acima da média. Para o albedo, esses aumentos foram semelhantes em 2007 ( $\sim 0,001$ ), mas em 2010 as áreas com maior intensidade da seca expressaram albedo superior ( $+ 0,003$ ). Para ET, em 2007, as áreas de maior intensidade da seca exibiram  $0,85$  mm/mês a menos que as áreas de menor intensidade. Contudo, o inverso ocorreu em 2010, quando as áreas de maior intensidade exibiram aumentos superiores de  $1,69$  mm/mês.

A comparação de ET, LST e albedo de áreas com secas mais ou menos intensas, mostrou diferenças significativas para albedo e LST, mas não para ET (Apêndice 5). Em 2007, a LST da floresta ( $0,1^{\circ}C$ ), da área de lavoura ( $0,2^{\circ}C$ ) e do Cerrado ( $0,1^{\circ}C$ ) foi maior nas áreas onde a seca foi mais intensa. Contudo, em 2010, essa diferença ocorreu apenas para a área de lavoura, sendo  $0,1^{\circ}C$  maior onde a seca foi mais intensa. Em 2007 e 2010, o albedo na floresta ( $0,02$  e  $0,01$ , respectivamente) e no Cerrado ( $0,01$  e  $0,01$ ) também foi maior nas áreas de elevada intensidade da seca. O mesmo ocorreu também com área de lavoura em 2010 ( $\Delta = 0,03$ ). Para ET, em 2007, o Cerrado ( $2,39$  mm/mês) e a lavoura ( $2,56$  mm/mês) demonstraram menores acréscimos em áreas de maior intensidade da seca. Entretanto, o inverso ocorreu em 2010, quanto tanto as áreas de lavoura ( $1,39$  mm/mês) quanto de Cerrado ( $2,39$  mm/mês) e floresta ( $3,44$  mm/mês) demonstraram menores acréscimos nas áreas de menor intensidade da seca.

Nossos resultados indicaram que aumentos na intensidade da seca resultam em significativas mudanças na temperatura da superfície, evapotranspiração e albedo, porém a intensidade dessas mudanças tende a variar conforme o tipo de uso/cobertura da terra (Figura 3). Por exemplo, evidenciamos que aumentos de  $100$ mm no déficit hídrico resultam em acréscimos de  $3^{\circ}C$ ,  $2^{\circ}C$  e  $1^{\circ}C$  na temperatura da superfície em áreas de lavoura, Cerrado e floresta, respectivamente. A ET da floresta também foi menos afetada pela seca em comparação com outros usos da terra. Por exemplo, para um aumento de  $100$  mm na intensidade da estação seca, a ET caiu  $9$  mm por mês nas florestas,  $12$  mm no Cerrado e  $20$  mm na lavoura. Mesmo que o albedo dos três tipos de cobertura da terra esteja relacionado com a intensidade da seca, ele não aumentou significativamente com a elevação de  $100$  mm no déficit hídrico.



**Figura 3.** Efeito da seca (CWD) sobre a evapotranspiração (ET) (painel superior), temperatura da superfície (LST) (painel intermediário) e albedo (painel inferior) dentro do estado de Mato Grosso. As áreas sombreadas denotam o intervalo interquartil.

#### 4. DISCUSSÃO

Nossa hipótese de que os efeitos da seca sobre a ET, LST e albedo são mais acentuados em áreas de lavoura e Cerrado que em áreas de floresta, devido à baixa deciduidade e elevada capacidade de obtenção (raízes mais profundas) e armazenamento de água (caule espesso) das espécies arbóreas em períodos de elevado déficit hídrico, foi parcialmente corroborada. Isso porque durante a seca de 2010, as áreas de Cerrado e floresta permaneceram significativamente mais frias (representado pelo LST) comparado as áreas de lavoura. O albedo também foi mais estável no Cerrado e na floresta. De modo geral, nossos resultados revelam que o aumento do desmatamento pode amplificar os efeitos das secas, elevando ainda mais a temperatura e o albedo de superfície, duas variáveis importantes que regulam o clima regional.

A floresta exibiu menores elevações na temperatura da superfície durante os anos de seca (em comparação com outros usos da terra) provavelmente em decorrência da sua capacidade em acessar água em maiores profundidades do solo. Por manter alta taxa de ET mesmo durante seca, é possível afirmar que as florestas contribuem para o esfriamento da LST no estado de Mato Grosso. Essa afirmação é apoiada por diferentes estudos que demonstram que a floresta amazônica converte ~ 75% da radiação solar recebida em calor latente [4, 43]. As terras cultiváveis também podem esfriar sua superfície (via evapotranspiração) no início das secas; no entanto, à medida que as secas se intensificam, há uma tendência de secagem dessas culturas, seguida por um rápido aumento da temperatura da superfície. Em comparação com essas áreas de cultivo agrícola, também observamos (durante a seca) menores aumentos de LST nas áreas de Cerrado. Vale frisar que, embora o Cerrado tenha uma fração menor da cobertura do dossel em comparação com a floresta, ele mostrou mais eficiência no resfriamento da superfície da terra durante os anos de seca, em comparação com outros usos da terra. No geral, observamos as maiores diferenças de LST entre florestas/Cerrado e áreas de lavoura durante a estação seca. A maior LST evidenciada na lavoura pode estar relacionada tanto com a baixa presença de cobertura vegetal durante os meses de maior intensidade da seca (entressafra) quanto ao baixo índice de área foliar e ao comprimento das raízes das espécies agrícolas, que limitam a obtenção de água [39,57].

O albedo controla grande parte da troca de energia entre a biosfera e a atmosfera. Os usos do solo que refletem uma proporção maior da radiação de ondas curtas recebidas têm menos energia disponível para alimentar o ciclo hidrológico e, conseqüentemente, para esfriar as superfícies do solo. Em nosso estudo, esperávamos que as florestas mantivessem um albedo menor do que outros usos da terra, devido ao seu dossel escuro durante todo o ano. No entanto, observamos aumentos significativos no albedo nas regiões florestadas, particularmente naquelas que apresentam alto estresse hídrico. Isso sugere que as secas de 2007 e 2010 foram intensas o suficiente para ocasionar tanto a redução da fotossíntese quanto a queda anormal de folhas das árvores. Esse padrão também foi observado para Cerrado, que é um tipo de vegetação considerada tolerante à seca. Contrariamente ao que esperávamos, observamos ainda nas áreas de lavoura, apenas pequenos aumentos no albedo nessas regiões durante a estação seca. Uma possível explicação para esses resultados inesperados é que o albedo em áreas de cultivo já é extremamente alto, em média, e as secas têm pouco efeito adicional. As florestas e savanas, por outro lado, têm um albedo muito mais baixo e podem experimentar aumentos maiores durante os anos de seca.



Nossas descobertas de aumento da ET durante anos de seca em regiões florestais corroboram aqueles de estudos recentes, os quais têm demonstrado que, durante a seca, a água armazenada no solo de estações chuvosas anteriores pode ser suficiente para manter a ET da floresta com níveis semelhantes ou até superiores ao da estação chuvosa [32, 45 57, 58]. O aumento da ET nas áreas de lavoura (em 2007 e 2010) pode também estar relacionado com a data de plantio adotada pelo produtor e a alta variabilidade das áreas de soja e milho no estado. Por exemplo, estudos recentes no bioma Cerrado sugerem que, durante a maior parte da estação chuvosa (dezembro-maio), as áreas de cultivos duplo (soja e milhos safrinha) podem expressar ET superior a vegetação nativa, sobretudo quando há a inserção de braquiária durante o período de pousio [52].

Aumentos na intensidade da estação seca (representada por CWD) causaram reduções de ET e elevação de LST em todos os usos da terra. Nas áreas de cultivo, o efeito das secas sazonais sobre a ET foi ainda maior, possivelmente devido à redução da cobertura foliar [57, 77], mas também a um provável aumento na área exposta do solo resultante de colheitas precoces ou falhas na colheita. Estudos mostram que durante a estação seca há uma redução na atividade fotossintética líquida, pois as plantas desenvolveram várias estratégias para conservar a água, muitas das quais tendem a reduzir a transpiração. À medida que o ar mais seco/quente aumenta a demanda de água na atmosfera (ou seja, déficit de pressão de vapor), as plantas tendem a fechar seus estômatos para impedir que o potencial da água nas folhas caia abaixo dos níveis críticos para a estabilidade do sistema de transporte de água da planta. Em alguns casos, as plantas até deixam cair as folhas para reduzir a perda excessiva de água.

Em geral, nossos resultados sugerem que o desmatamento para a expansão de áreas de lavoura pode ampliar os efeitos das secas, uma vez que a temperatura da superfície e o albedo aumentaram mais nas áreas de lavoura do que nas áreas de floresta. Contudo, estudos de modelagem que considerem os feedbacks entre mudanças no balanço de energia e o clima devem ser realizados para aferimentos mais concisos. Mato Grosso é o principal produtor brasileiro de commodities agrícolas, incluindo carne bovina, soja, milho e algodão [11]. Também possui uma estação seca prolongada, durante a qual pequenas alterações no ciclo hidrológico podem ter grandes impactos negativos na produtividade das culturas, provocando aumentos nos incêndios florestais ou abandono das culturas de colheita curta [13]. Dados seus efeitos estabilizadores no balanço energético regional, a preservação das florestas remanescentes deve ser uma prioridade nas estratégias de desenvolvimento agrícola. As altas taxas de evapotranspiração e baixas temperaturas da superfície encontradas em ambientes florestais podem fornecer um importante amortecedor para as condições de seca, além de

contribuir, ao mesmo tempo, com os esforços globais de mitigação das mudanças do clima causadas pela emissão dos gases de efeito estufa [12, 53].

## 5. CONCLUSÃO

Nossa hipótese recebeu forte apoio. Descobrimos que os efeitos da seca na temperatura da superfície da terra (LST) e no albedo são maiores em áreas de lavoura e Cerrado, quando comparados com ambientes florestais. À medida que as secas aumentaram de intensidade (conforme medido pelo déficit acumulado de água, CWD), as florestas mantiveram a evapotranspiração relativamente estável em comparação com o Cerrado e as áreas de lavoura. Um maior aumento da LST também foi observado nas áreas de agricultura, comparado ao Cerrado e a floresta. Ainda que o albedo não tenha exibido expressivos acréscimos em função ao aumento da seca, sua relação com a seca foi significativa para todos os usos/cobertura da terra.

Em 2007 e 2010, as áreas de lavoura apresentaram um aumento maior no albedo e na LST do que o observado no Cerrado e na floresta. Ao mesmo tempo em que a ET emitidas pelas florestas foi responsável por metade da ET registrada em todo o estado de Mato Grosso. Nossos resultados indicaram que, em anos de seca extrema, a floresta tem contribuído para menores mudanças no balanço de energia local e regional. Mantendo altos níveis de ET e baixa LST e albedo, esses ambientes têm colaborado não apenas para a manutenção do ciclo hidrológico, mas também para o tamponamento da seca.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Aragão, L. E. O. C.; Malhi, Y.; Roman-Cuesta, R. M.; Saatchi, S.; Anderson, L. O.; Shimabukuro, Y. E. Spatial patterns and fire response of recent Amazonian droughts *Geophys. Res. Lett.* **2007**, 34 1–5. doi: 10.1029/2006GL028946
2. Arvor, D.; Jonathan, M.; Meirelles, M. S. P.; Dubreuil, V.; Durieux, L. Classification of MODIS EVI time series for crop mapping in the state of Mato Grosso, Brazil. *International Journal of Remote Sensing*, **2011**, 32(22), 7847-7871. doi: 10.1080/01431161.2010.531783
3. Beuchle, R.; Grecchi, R. C.; Shimabukuro, Y. E.; Seliger, R.; Eva, H. D.; Sano, E., Acharda, F. Land cover changes in the Brazilian Cerrado and Caatinga biomes from 1990 to 2010 based on a systematic remote sensing sampling approach. *Appl Geogr.* **2015**, 58: 116–127. doi: 10.1016/j.apgeog.2015.01.017
4. Bonan, G. B.; Defries, R. S.; Coe, M. T.; Ojima, D.; Van Der Meer, F. D. Land use and climate. In *Land Change Science*, 1st ed.; G. Gutman, A. C. Janetos, C. O. Justice, E. F. Moran, J. F. Mustard, R. R. Rindfuss, M. A. Eds.; Kluwer Academic Publishers, 2004, pp. 301–314.

5. Bonan, G. B. Forests and climate change: forcings, feedbacks, and the climate benefits of forests. *Science*, **2008**, 320, 1444–9. doi: 10.1126/science.1155121
6. Brando, P. M.; Balch, J. K.; Nepstad, D. C.; Morton, D. C.; Putz, F. E.; Coe, M. T.; Silvério, D.; Macedo, M. N.; Davidson, E. A.; Nóbrega, C. C.; Alencar, A.; Soares-filho, B. S.; Monteiro, P.; Silverio, D. V.; Nobrega, C. Abrupt increases in Amazonian tree mortality due to drought-fire interactions. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A*, **2014**, 111, 6347–6352. doi: 10.1073/pnas.1305499111
7. Bruijnzeel, L. Hydrological functions of tropical forests: not seeing the soil for the trees? *Agriculture, Ecosystems & Environment*, **2004**, 104, 185–228. doi: 10.1016/j.agee.2004.01.015
8. BRASIL, Mapeamento do Uso e Cobertura da Terra do Cerrado – Projeto TerraClass Cerrado 2013, 2015. Available online: <http://www.mma.gov.br/images/arquivo/80049/Cerrado/publicacoes/Livro%20EMBRAPA-WEB-1-TerraClass%20Cerrado.pdf> (accessed on 21 April 2019).
9. Butt, N.; de Oliveira, P. A.; Costa, M. H. Evidence that deforestation affects the onset of the rainy season in Rondonia, Brazil. *J. Geophys. Res.*, **2011**, 116, 1–11. doi: 10.1029/2010JD015174
10. Carvalho, K. S.; Balch, J.; Moutinho, P. Influências de *Atta* spp (Hymenoptera: Formicidae) na recuperação da vegetação pós fogo em floresta de transição amazônica. *Acta Amazonica*, **2012**, 42, 81–88. doi: 10.1590/S0044-59672012000100010
11. CONAB - Companhia de abastecimento. Acompanhamento da safra brasileira de grãos. 2012. Available online: <https://www.conab.gov.br>. (accessed on 05 April 2019).
12. Coe, M. T.; Brando, P. M.; Deegan, L. A.; Macedo, M. N.; Neill, C.; Silverio, D. V. The forests of the Amazon and Cerrado moderate regional climate and are the key to the future. *Tropical Conservation Science*, **2017**, 10, 1–6. doi: 10.1177/1940082917720671
13. Duffy, P. B.; Brando, P.; Asner, G. P.; Field, C. B. Projections of future meteorological drought and wet periods in the Amazon. *Proc. Natl. Acad. Sci.* **2015**, 112, 13172–13177. doi: 10.1073/pnas.1421010112
14. Eck, T. F.; Deering, D. W. Canopy albedo and transmittance in a spruce-hemlock forest in mid-September. *Agricultural and forest meteorology*, **1992**, 59, 237–248. doi: 10.1016/0168-1923(92)90095-L
15. Ferreira, J.; Sousa, A. M.; Vitorino, M. I.; De Souza, E. B.; De Souza, P. J. O. P. Estimate of evapotranspiration in the eastern Amazon using SEBAL. *Revista de Ciências Agrárias/Amazonian Journal of Agricultural and Environmental Sciences*, **2013**, 56, 33–39. doi: 10.4322/rca.2013.001
16. Fisher, J. B.; Malhi, Y.; Bonal, D.; Da Rocha, H. R.; De Araújo, A. C.; Gamo, M.; Goulden, M. L.; Rano, T. H.; Huete, A. R.; Kondo, H.; Kumagai, T.; Loescher, H. W.; Miller, S.; Nobre, A. D.; Nouvellon, Y.; Oberbauer, S. F.; Panuthai, S.; Roupsard, O.; Saleska, S.; Tanaka, K.; Tanaka, N.; Tu, K. P.; Von Randow, C. The land-atmosphere water flux in the tropics. *Glob. Chang. Biol.*, **2009**, 15, 2694–714. doi: 10.1111/j.1365-2486.2008.01813.x
17. Foley, J. A.; Asner, G. P.; Costa, M. H.; Coe, M. T.; DeFries, R.; Gibbs, H. K.; Snyder, P. Amazonia revealed: forest degradation and loss of ecosystem goods and services in the

- Amazon Basin. *Frontiers in Ecology and the Environment*, **2007**, 5, 25–32. doi: 10.1890/1540-9295(2007)5[25:ARFDAL]2.0.CO;2
18. Fu, R.; Yin, L.; Li, W.; Arias, P.A.; Dickinson, R. E.; Huang, L.; Chakraborty, S.; Fernandes, K.; Liebmann, B.; Fisher, R.; Myneni, R. B. Increased dry-season length over southern Amazonia in recent decades and its implication for future climate. **2013**, 110, 18110-18115. doi: 10.1073/pnas.1302584110
  19. Galford, G. L.; Mustard, J. F.; Melillo, J.; Gendrin, A.; Cerri, C. C.; Cerri, C. E. Wavelet analysis of MODIS time series to detect expansion and intensification of row-crop agriculture in Brazil. *Remote sensing of environment*, **2008**, 112, 576-587. doi: 10.1016/j.rse.2007.05.017
  20. Hijmans, R. J.; van Etten, J.; Etten, J.; van, Mattiuzzi, M.; Sumner, M.; Greenberg, J. A.; Lamigueiro, O. P., Andrew, B.; Racine, E. B.; Shortridge, A. raster: Geographic analysis and modeling with raster data. R package version 2.2-31, 2014.
  21. Hansen, M. C.; Potapov, P. V.; Moore, R.; Hancher, M.; Turubanova, S. A.; Tyukavina, A.; Thau, D.; Stehman, S. V.; Goetz, S. J.; Loveland, T. R.; Kommareddy, A.; Egorov, A.; Chini, L.; Justice, C. O.; Townshend, J. R. G. High-resolution global maps of 21st century forest cover change. *Science*, **2013**, 342, 850–3. doi: 10.1126/science.1244693
  22. Huffman, G. J.; Bolvin, D. T.; Nelkin, E. J.; Wolff, D. B.; Adler, R. F.; Gu, G.; Hong, Y.; Bowman, K.P.; Stocker, E.F. The TRMM Multisatellite Precipitation Analysis (TMPA): Quasi-Global, Multiyear, Combined-Sensor Precipitation Estimates at Fine Scales. *J. Hydrometeorol*, **2007**, 8, 38–55. doi:10.1175/JHM560.1
  23. IBGE - Banco de dados por Estado. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. 2017. Available online: <https://ww2.ibge.gov.br/estadosat/>. (accessed on 22 April 2019).
  24. INPE - Projeto Prodes: Monitoramento da floresta Amazônica Brasileira por satélite. 2014. Available online: <http://www.obt.inpe.br/OBT/assuntos/programas/amazonia/prodes>. (accessed on 20 April 2019).
  25. INPE. TerraBrasilis. Monitoramento do Cerrado. 2018. Available online: <http://www.obt.inpe.br/Cerrado/>. (accessed on 20 April 2019).
  26. Khanna, J.; Medvigy, D.; Fueglistaler, S.; Walko, R. Regional dry-season climate changes due to three decades of Amazonian deforestation. *Nature Climate Change*, **2017**, 7,200-204. doi: 10.1038/nclimate3226
  27. Kalnay, E.; Kanamitsu, M.; Kistler, R.; Collins, W.; Deaven, D.; Gandin, L.; Zhu, Y. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bulletin of the American meteorological Society*, **1996**, 77, 437-471. doi: 10.1175/1520-0477(1996)077<0437:TNYRP>2.0.CO;2
  28. Klink, C. A; Machado, R. B. Conservation of the Brazilian Cerrado. *Conserv Biol*. **2005**, 19, 707–713. doi: 10.1111/j.1523-1739.2005.00702.x
  29. Lewis, S. L.; Brando, P.; Phillips, O. L.; Van der Heijden, G. M. F.; Nepstad, D. The 2010 Amazon drought. *Science*, **2011**, 331, 554. doi: 10.1126/science.1200807.
  30. Luyssaert, S.; Jammot, M.; Stoy, P. C.; Estel, S.; Pongratz, J.; Ceschia, E.; Dolman, A. J. Land management and land-cover change have impacts of similar magnitude on surface temperature. *Nature Climate Change*, **2014**, 4, 389–393. doi: 10.1038/nclimate2196.

31. Macedo, M. N.; DeFries, R. S.; Morton, D. C.; Stickler, C. M.; Galford, G. L.; Shimabukuro, Y. E. Decoupling of deforestation and soy production in the southern Amazon during the late 2000s. *Proc. Natl. Acad. Sci.*, **2012**, 109, 1341–1346. doi: 10.1073/pnas.1111374109.
32. Malhi, Y.; Pegoraro, E.; Nobre, A. D.; Pereira, M. G. P.; Grace, J.; Culf, A. D.; Clement, B. Energy and water dynamics of a central Amazonian rain forest. *J. Geophys. Res.*, **2002**, 107, 8061. doi: 10.1029/2001JD000623.
33. Malhi, Y.; Roberts, J. T.; Betts, R. A.; Killeen, T. J.; Li, W.; Nobre, C. A. Climate change, deforestation, and the fate of the Amazon. *Science*, **2008**, 319, 169–172. doi: 10.1126/science.1146961
34. Marengo, J. A.; Nobre, C. A.; Seluchi, M. E.; Cuartas, A.; Alves, L. M.; Mendiando, E. M.; Sampaio, G. A seca e a crise hídrica de 2014-2015 em São Paulo. *Revista USP*, **2015**, 106, 31-44. doi: 10.11606/issn.2316-9036.v0i106p31-44
35. Meir, P.; Wood, T. E.; Galbraith, D. R.; Brando, P. M.; Da Costa, A. C.; Rowland, L.; Ferreira, L. V. Threshold responses to soil moisture deficit by trees and soil in tropical rain forests: insights from field experiments. *BioScience*, **2015**, 65, 882-892. doi: 10.1093/biosci/biv107
36. Moura, M. A. L.; Lyra, R. F. F.; Benincasa, M.; Souza, J. L.; Nascimento Filho, M. F. Variação do albedo em áreas de floresta e pastagem na Amazônia. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, **1999**, 7, 163-168. doi: 10.1590/S0102-77862013000400006
37. Muñoz, J. C. J.; Mattar, C.; Barichivich, J.; Santamaría-Artigas, A.; Takahashi, K.; Malhi, Y.; Van Der Schrier, G. Record-breaking warming and extreme drought in the Amazon rainforest during the course of El Niño 2015–2016. *Scientific reports*, **2016**, 6, 1-7. doi: 10.1038/srep33130
38. Mu, Q.; Zhao, M.; Running, S.W. Improvements to a MODIS global terrestrial evapotranspiration algorithm. *Remote Sens. Environ.* **2011**, 115, 1781–1800. doi: 10.1016/j.rse.2011.02.019
39. Nepstad, D. C.; de Carvalho, C. R.; Davidson, E. A.; Jipp, P. H.; Lefebvre, P. A.; Negreiros, G. H.; da Silva, E. D.; Stone, T. A.; Trumbore, S. E.; Vieira, S. The role of deep roots in the hydrological and carbon cycles of Amazonian forests and pastures. *Nature*, **1994**, 372, 666–669. doi: 10.1038/372666a0
40. Nepstad, D.; Lefebvre, P.; Lopes da Silva, U.; Tomasella, J.; Schlesinger, P.; Solorzano, L.; Guerreira Benito, J. Amazon drought and its implications for forest flammability and tree growth: a basin-wide analysis. *Global Change Biology*, **2004**, 10, 704–717. doi: 10.1111/j.1529-8817.2003.00772.x
41. Nepstad, D.; McGrath, D.; Stickler, C.; Alencar, A.; Azevedo, A.; Swette, B.; Armijo, E. Slowing Amazon deforestation through public policy and interventions in beef and soy supply chains. *Science*, **2014**, 344, 1118-1123. doi: 10.1029/2002JD002062
42. Nishida, K.; Nemani, R. R.; Running, S. W.; Glassy, J. M. An operational remote sensing algorithm for land surface evaporation. *Journal of Geophysical Research*. **2003**, 108, 1-14. doi: 10.1029/2002jd002062
43. Omran E. S. E. Detection of land-use and surface temperature change at different resolutions. *Journal Geograph Inf Syst*, **2012**, 4, 189–203. doi: 10.4236/jgis.2012.43024

44. Phillips, O. L.; Aragão, L. E. O. C.; Lewis, S. L.; Fisher, J. B.; Lloyd, J.; López-gonzález, G.; Salamão, R. Drought Sensitivity of the Amazon Rainforest. *Science*, **2009**, 323, 1344–1347. doi: 10.1126/science.1164033
45. Randow, C.; von, Manzi, A. O.; Kruijt, B.; Oliveira, P. J. de, Zanchi, F. B.; Silva, R. L.; Kabat, P. Comparative measurements and seasonal variations in energy and carbon exchange over forest and pasture in South West Amazonia. *Theoretical and Applied Climatology*, **2004**, 78, 5–26. doi: 10.1007/s00704-004-0041-z
46. Sampaio, G.; Nobre, C.; Costa, M. H.; Satyamurty, P.; Soares-Filho, B. S.; Cardoso, M., 2007. Regional climate change over eastern Amazonia caused by pasture and soybean cropland expansion. *Geophysical Research Letters*, **2007**, 34, 1-7. doi: 10.1029/2007GL030612
47. Schaaf, C. B.; Gao, F.; Strahler, A. H.; Lucht, W.; Li, X.; Tsang, T.; Strugnell, N. C.; Zhang, X.; Jin, Y.; Muller, J. P.; Lewis, P.; Barnsley, M.; Hobson, P.; Disney, M.; Roberts, G.; Dunderdale, M.; Doll, C.; D'Entremont, R. P.; Hu, B.; Liang, S.; Privette, J. L.; Roy, D.. First operational BRDF, albedo nadir reflectance products from MODIS. *Remote Sens. Environ*, **2002**, 83, 135–148. doi: 10.1016/S0034-4257(02)00091-3
48. Shuttleworth, W. J. Observations of radiation exchange above and below Amazonian forest. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, **1984**, 110, 1163-1169. doi: 10.1002/qj.49711046623
49. Shuttleworth, W.J. *Evaporation*. In Handbook of Hydrology; Maidment, D.R., Ed.; McGraw Hill: New York, NY, USA, **1993**; pp.1–53.
50. Souza, A. P.; Mota, L. L.; Zamadei, T.; Martin, C. C.; Almeida, F. T.; Paulino, J. Classificação climática e balanço hídrico climatológico no estado de Mato Grosso. *Nativa*, **2013**, 1, 34-43. doi: 10.14583/2318-7670.v01n01a07
51. Spera, S. A.; Cohn A. S.; VanWey, L. K.; Mustard, J. F.; Rudorff, B. F.; Risso, J.; Adami, M. Recent cropping frequency, expansion, and abandonment in Mato Grosso, Brazil had selective land characteristics *Environ. Res. Lett.* **2014**, 9, 1-11. doi: 10.1088/1748-9326/9/6/064010
52. Spera, S. A.; Galford, G. L.; Coe, M. T.; Macedo, M. N.; Mustard, J. F. Land-use change affects water recycling in Brazil's last agricultural frontier. *Global change biology*, **2016**, 22, 3405-3413. doi: 10.1111/gcb.13298
53. Silvério, D. V.; Brando, P. M.; Macedo, M. N.; Beck, P. S. A.; Bustamante, M.; Coe, M. T. Agricultural expansion dominates climate changes in southeastern Amazonia: the overlooked non-GHG forcing *Environ. Res. Lett.* **2015**, 10,1-9. doi: 10 104015
54. Spracklen, D. V.; Arnold, S. R.; Taylor, C. M. Observations of increased tropical rainfall preceded by air passage over forests. *Nature*, **2012**, 489, 282–285. doi: 10.1038/nature11390
55. Tarifa, J. R. *Mato Grosso: clima–análise e representação cartográfica*. Cuiabá: Entrelinhas, **2011**; pp.69-96.
56. Vourlitis, G. L.; Priante, N.; Hayashi, M. M. S.; Nogueira, J. D.; Caseiro, F. T.; Campelo, J. H. Seasonal variations in the evapotranspiration of a transitional tropical forest of Mato Grosso, Brazil. *Water Resour. Res.* **2002**, 30, 1:11. doi: 10.1029/2000WR000122

57. Vourlitis, G. L.; Nogueira, J. S.; Lobo, F. A. K. M.; Sendall, S. R.; Paulo, C. A. A.; Dias, O. B.; Pinto Jr.; Andrade, N. L. R. Energy balance and canopy conductance of a tropical semi-deciduous forest of the southern Amazon Basin. *Water Resources Research*, **2008**, 44, 1-14. doi: 10.1029/2006WR005526
58. Zelazowski, P.; Malhi, Y.; Huntingford, C.; Sitch, S.; Fisher, J. B. Changes in the potential distributions of humid tropical forests on a warmer planet. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London – Biological Sciences*, **2011**, 369, 137-160. doi: 10.1098/rsta.2010.0238
59. Wan, Z.; Zhang, Y.; Zhang, Q.; Li, Z.-L. Quality assessment and validation of the MODIS global land surface temperature. *Int. J. Remote Sens.* **2004**, 25, 261–274. doi: 10.1080/0143116031000116417
60. Wan, Z.; Hook, S.; Hulley, G. 2015. MOD11A2 MODIS/Terra Land Surface Temperature/Emissivity 8-Day L3 Global 1 km SIN Grid V006. NASA EOSDIS Land Processes DAAC, USGS Earth Resources Observation and Science (EROS) Center. <https://lpdaac.usgs.gov> (accessed 16 June 2016): Sioux Falls, SD, doi: 10.5067/MODIS/MOD11A2.006

## 7. APÊNDICES

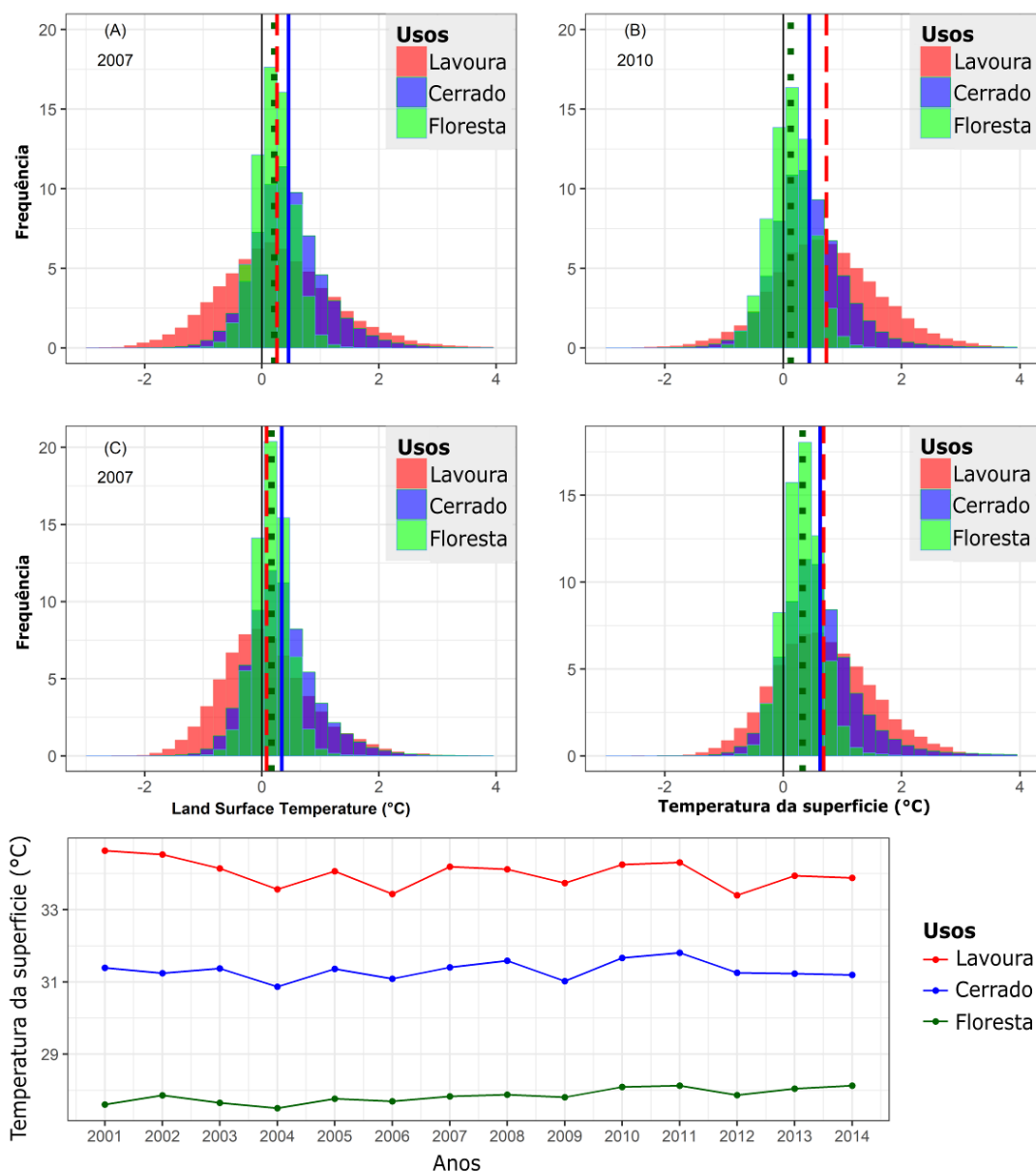
**Apêndice 1-** Parâmetros utilizados para avaliar o comportamento da evapotranspiração (ET), temperatura superficial (LST) e albedo (em anos de seca severas) entre os principais usos da terra (Floresta, Cerrado e Lavoura) no estado de Mato Grosso.

<b>Temperatura superficial</b>							
<b>2007</b>							
<b>Usos</b>	$\bar{X}Ae$	$\Delta e$	$\Sigma_b$		$\Sigma_h$		
			<b>teste de Tukey</b>	<b><i>p</i></b>	$\Delta e$	<b>teste de Tukey</b>	<b><i>p</i></b>
Floresta	27,81 ± 0,6°C	0,2 ± 0,3°C	Floresta-Cerrado	<0,001	0,2 ± 0,3°C	Floresta-Cerrado	<0,001
Cerrado	31,45 ± 2,2°C	0,5 ± 0,6°C	Floresta-Lavoura	<0,001	0,3 ± 0,6°C	Floresta-Lavoura	<0,001
Lavoura	33,85 ± 1,3°C	0,3 ± 1,0°C	Cerrado- Lavoura	<0,001	0,1 ± 0,8°C	Cerrado- Lavoura	<0,001
<b>2010</b>							
Floresta	27,80 ± 0,7°C	0,1 ± 0,4°C	Floresta-Cerrado	<0,001	0,3 ± 0,3°C	Floresta-Cerrado	<0,001
Cerrado	31,43 ± 2,1°C	0,4 ± 0,7°C	Floresta-Lavoura	<0,001	0,6 ± 0,7°C	Floresta-Lavoura	<0,001
Lavoura	33,81 ± 1,2°C	0,7 ± 0,9°C	Cerrado- Lavoura	<0,001	0,8 ± 0,8°C	Cerrado- Lavoura	<0,001
<b>Albedo</b>							
<b>2007</b>							
Floresta	0,133 ± 0,003	0,000	Floresta-Cerrado	ns	0,000	Floresta-Cerrado	ns
Cerrado	0,139 ± 0,012	0,002 ± 0,007	Floresta-Lavoura	<0,001	0,000	Floresta-Lavoura	<0,001
Lavoura	0,179 ± 0,007	0,009 ± 0,009	Cerrado- Lavoura	<0,001	0,007 ± 0,008	Cerrado- Lavoura	<0,001
<b>2010</b>							
Floresta	0,132 ± 0,003	0,001 ± 0,005	Floresta-Cerrado	<0,001	0,003 ± 0,004	Floresta-Cerrado	<0,001
Cerrado	0,139 ± 0,014	0,001 ± 0,007	Floresta-Lavoura	<0,001	0,002 ± 0,007	Floresta-Lavoura	<0,001
Lavoura	0,139 ± 0,007	0,004 ± 0,010	Cerrado- Lavoura	<0,001	0,010 ± 0,009	Cerrado- Lavoura	<0,001
<b>Evapotranspiração</b>							
<b>2007</b>							
Floresta	113,33 ± 6,03 mm	-1,0 ± 3,42 mm	Floresta-Cerrado	<0,001	3,93 ± 3,08 mm	Floresta-Cerrado	<0,001
Cerrado	72,90 ± 23,35 mm	-1,2 ± 6,06 mm	Floresta-Lavoura	<0,001	6,83 ± 6,06 mm	Floresta-Lavoura	<0,001

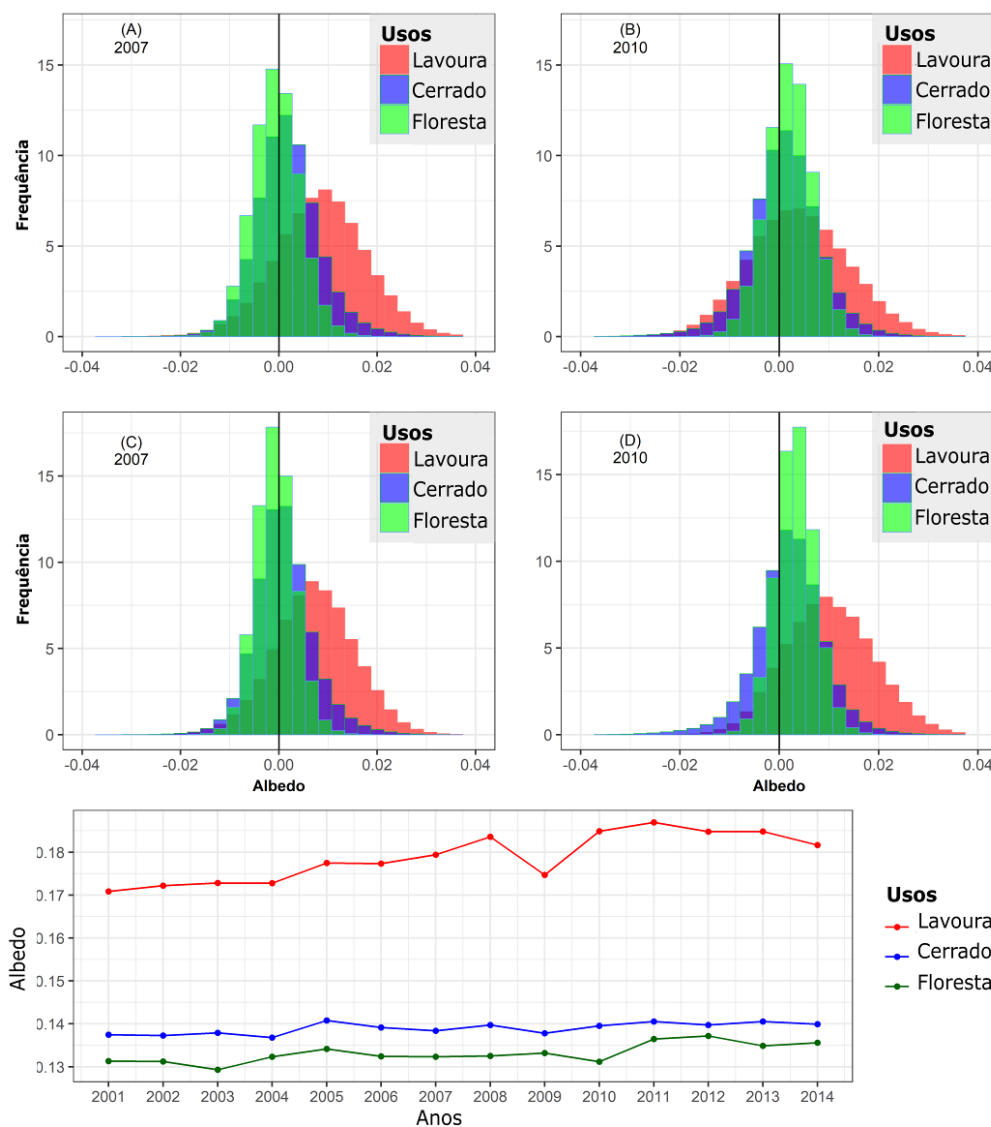


Lavoura	$51,55 \pm 10,51$ mm	$4,33 \pm 9,52$ mm	Cerrado- Lavoura	<0,001	$9,01 \pm 8,06$ mm	Cerrado- Lavoura	<0,001
<b>2010</b>							
Floresta	$113,47 \pm 22,56$ mm	$-3,97 \pm 3,41$ mm	Floresta-Cerrado	<0,001	$3,96 \pm 4,19$ mm	Floresta-Cerrado	<0,001
Cerrado	$72,67 \pm 21,36$ mm	$-4,10 \pm 5,31$ mm	Floresta-Lavoura	<0,001	$9,99 \pm 8,06$ mm	Cerrado- Lavoura	<0,001
Lavoura	$60,56 \pm 11,62$ mm	$-2,85 \pm 8,96$ mm	Cerrado- Lavoura	<0,001	$14,60 \pm 8,57$ mm	Floresta-Cerrado	<0,001

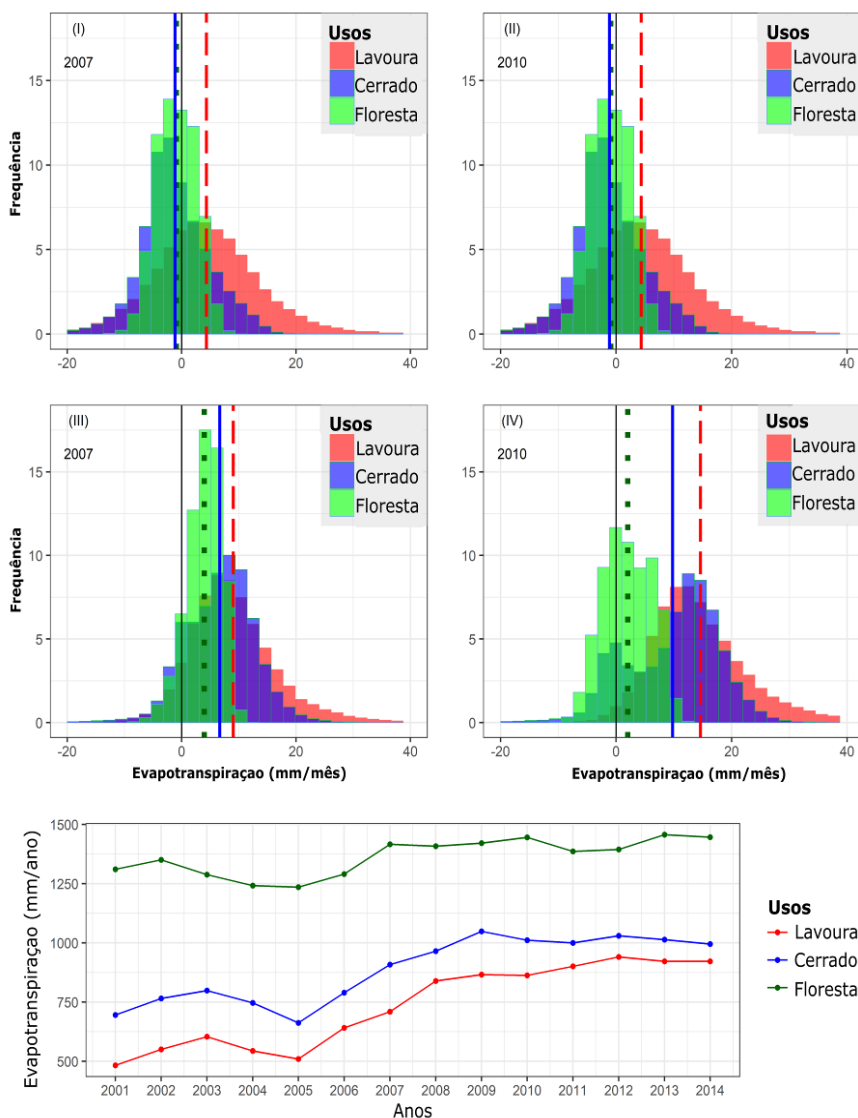
$\Sigma_h$ = razões obtidas com adoção de média histórica;  $\Sigma_b$ = razões obtidas com adoção de médias bianuais;  $\bar{Ae}$  = média anual de 2007 ou 2010,  $\Delta e$  = diferença da LST, ET e albedo (em 2007 e 2010) em relação à média histórica ou bianual; ns= não significativo estatisticamente (p>0,05).



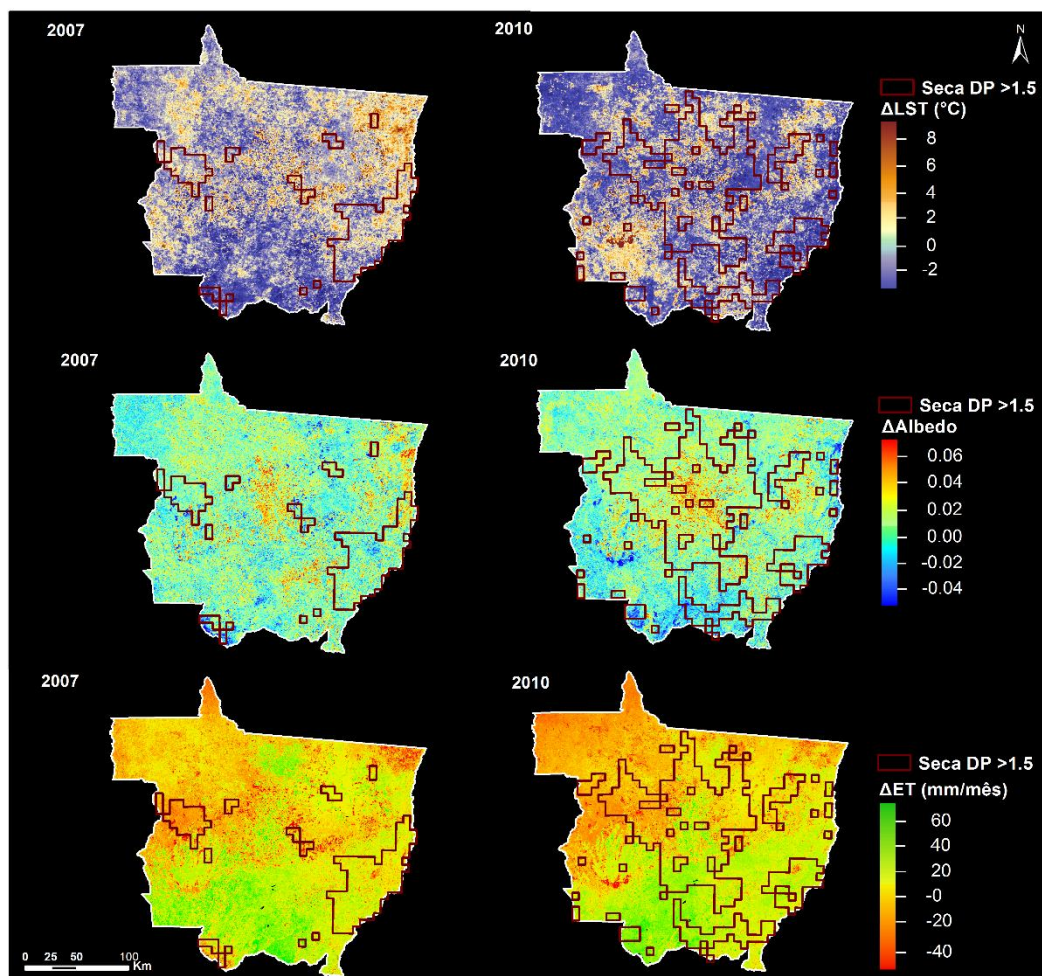
**Apêndice 2.1.** Histogramas da dinâmica da temperatura superficial para os principais usos da terra no estado de Mato Grosso (durante as secas de 2007 e 2010). As linhas pontilhadas (verde, floresta; azuis, Cerrado; vermelha, lavoura) representam as médias em cada uso. Nos painéis I e II,  $\Delta e$  consiste na razão entre média do ano extremo de seca ( $Ae$ ) e a média bianual ( $\bar{\lambda}b$ ). Nos painéis III e IV,  $\Delta e$  consiste na razão entre média do ano extremo de seca ( $Ae$ ) e a média histórica ( $\bar{\lambda}Ae$ ). O painel V representa a dinâmica temporal da temperatura superficial entre 2001 e 2014.



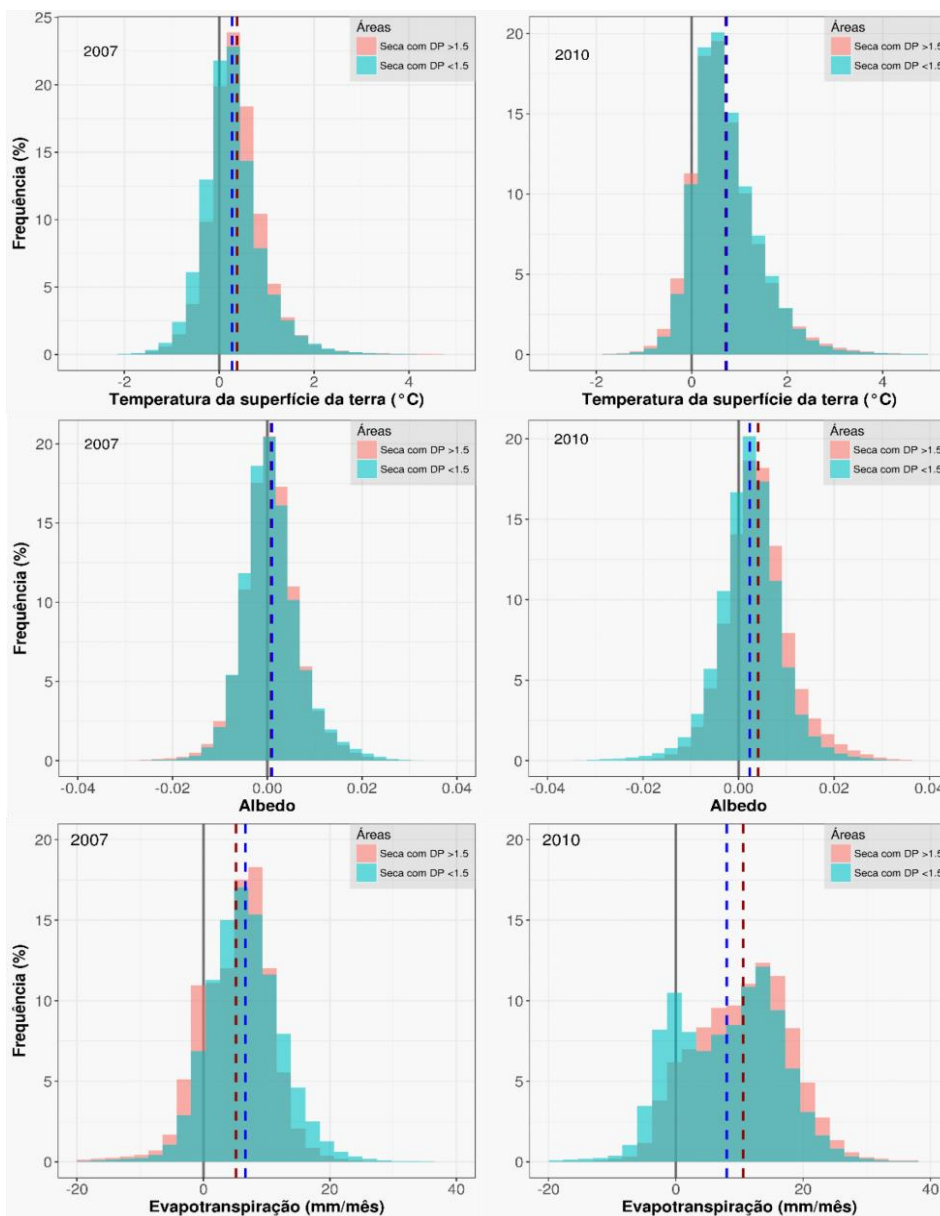
**Apêndice 2.2.** Histogramas do comportamento do albedo nos diferentes usos da terra no estado de Mato Grosso (durante as secas de 2007 e 2010). As linhas pontilhadas (verde, floresta; azuis, Cerrado; vermelha, lavoura) representam as médias em cada uso. Nos painéis I e II,  $\Delta e$  consiste na razão entre média do ano extremo de seca ( $Ae$ ) e a média bianual ( $\bar{\chi b}$ ). Nos painéis III e IV,  $\Delta e$  consiste na razão entre média do ano extremo de seca ( $Ae$ ) e a média histórica ( $\bar{\chi Ae}$ ). O painel V representa o comportamento do albedo entre 2001 e 2014.



**Apêndice 2.3.** Histogramas da dinâmica da evapotranspiração para os principais usos da terra no estado de Mato Grosso (durante as secas de 2007 e 2010). As linhas pontilhadas (verde, floresta; azuis, Cerrado; vermelha, lavoura) representam as médias em cada uso. Nos painéis I e II,  $\Delta e$  consiste na razão entre média do ano extremo de seca ( $Ae$ ) e a média bianual ( $\bar{X}b$ ). Nos painéis III e IV,  $\Delta e$  consiste na razão entre média do ano extremo de seca ( $Ae$ ) e a média histórica ( $\bar{X}Ae$ ). O painel V representa a dinâmica temporal da evapotranspiração entre 2001 e 2014.



**Apêndice 3-** Comportamento da temperatura superficial (LST e mapas centrais obtidos a partir do produto MOD11A2), albedo (mapas inferiores obtidos a partir do produto MOD11A2) e evapotranspiração (ET e mapas superiores obtidos a partir do produto MOD16), em áreas onde a seca foi maior e menor que 1,5DP. Áreas não compreendidas por polígonos em vermelho correspondem a locais onde a seca foi  $<1,5$  DP.



**Apêndice 4.** Histograma de aumento e redução da temperatura superficial (painéis superiores), albedo (painéis centrais) e evapotranspiração (painéis inferiores) para as áreas que exibiram secas com  $DP > 1,5$  e  $DP < 1,5$  (em 2007 e 2010). As linhas pontilhadas (vermelhas, seca com  $DP > 1,5$ ; azuis, seca com  $DP < 1,5$ ) representam as médias de área.

**Apêndice 5.** Parâmetros utilizados para avaliar o comportamento da evapotranspiração (ET), temperatura superficial (LST) e albedo (em anos de seca severa) entre os principais usos da terra (Floresta, Cerrado e Lavoura) sob diferentes intensidades de seca (seca severa e não severa).

<b>Temperatura superficial</b>							
<b>2007</b>							
<b>Usos</b>	<b><math>\bar{x}Ae</math></b>		<b><math>\Delta e</math></b>		<b>Test t</b>	<b>N</b>	
	<b>DP &gt;1,5</b>	<b>DP &lt;1,5</b>	<b>DP &gt;1,5</b>	<b>DP &lt;1,5</b>	<b>p</b>	<b>DP &gt;1,5</b>	<b>DP &lt;1,5</b>
No geral	31,29 ± 2,6°C	30,28 ± 2,5°C	0,4 ± 0,6°C	0,3 ± 0,3°C	<0,001	3205	3205
Floresta	27,9 ± 0,5°C	27,8 ± 0,5°C	0,3 ± 0,3°C	0,2 ± 0,3°C	<0,001	5914	129982
Cerrado	31,6 ± 2,3°C	31,4 ± 1,9°C	0,3 ± 0,6°C	0,3 ± 0,6°C	<0,001	141445	313656
Lavoura	34,3 ± 0,8°C	33,8 ± 0,9°C	0,3 ± 0,8°C	0,1 ± 0,7°C	<0,001	3205	34576
<b>2010</b>							
No geral	30,42 ± 2,6°C	29,87 ± 2,6°C	0,7 ± 0,7°C	0,7 ± 0,7°C	<0,001	233310	
Floresta	28,0 ± 0,7°C	27,8 ± 0,5°C	0,3 ± 0,4°C	0,3 ± 0,3°C	<0,001	35106	111172
Cerrado	31,5 ± 1,9°C	31,6 ± 2,0°C	0,7 ± 0,6°C	0,7 ± 0,8°C	<0,001	177554	309650
Lavoura	33,9 ± 1,0°C	33,7 ± 0,9°C	0,6 ± 0,8°C	0,7 ± 0,8°C	<0,001	20650	21203
<b>Albedo</b>							
<b>2007</b>							
No geral	0,143 ± 0,018	0,143 ± 0,017	0,001 ± 0,007	0,001 ± 0,006	<0,001	601683	
Floresta	0,132 ± 0,002	0,133 ± 0,003	0,001 ± 0,004	- 0,001 ± 0,004	<0,001	23540	520359
Cerrado	0,139 ± 0,012	0,140 ± 0,012	0,001 ± 0,006	0,000	<0,001	565467	1253626
Lavoura	0,179 ± 0,007	0,179 ± 0,007	0,006 ± 0,008	0,007 ± 0,008	<0,001	12676	138484
<b>2010</b>							
No geral	0,147 ± 0,017	0,146 ± 0,013	0,005 ± 0,008	0,002 ± 0,007	<0,001	932970	
Floresta	0,131 ± 0,003	0,133 ± 0,003	0,004 ± 0,004	0,003 ± 0,004	<0,001	140289	445091
Cerrado	0,142 ± 0,012	0,140 ± 0,012	0,003 ± 0,007	0,002 ± 0,007	<0,001	709736	1236756
Lavoura	0,179 ± 0,007	0,178 ± 0,006	0,012 ± 0,009	0,009 ± 0,009	<0,001	82945	84752

**Evapotranspiração****2007**

No geral	64,88 ± 26,52 mm	79,23 ± 26,51 mm	5,33 ± 5,63 mm	6,48 ± 6,48 mm	<0,001	150685	
Floresta	107,24 ± 6,69 mm	113,50 ± 7,02 mm	5,59 ± 3,04 mm	3,92 ± 3,06 mm	<0,001	5908	130762
Cerrado	72,60 ± 29,49 mm	73,00 ± 25,02 mm	5,09 ± 5,64 mm	7,48 ± 6,15 mm	<0,001	141610	177544
Lavoura	59,49 ± 8,50 mm	61,04 ± 6,72 mm	6,52 ± 7,35 mm	9,08 ± 7,64 mm	<0,001	3167	34601

**2010**

No geral	70,73 ± 21,31 mm	76,86 ± 23,77 mm	9,34 ± 8,43 mm	7,65 ± 8,65 mm	<0,001	223437	
Floresta	107,73 ± 5,70 mm	114,54 ± 6,99 mm	4,95 ± 3,03 mm	1,51 ± 4,12 mm	<0,001	35167	111936
Cerrado	72,03 ± 25,31 mm	71,07 ± 26,28 mm	11,11 ± 7,56 mm	9,98 ± 8,06 mm	<0,001	167541	309498
Lavoura	61,59 ± 6,45 mm	59,31 ± 6,68 mm	15,25 ± 8,39 mm	13,86 ± 8,54 mm	<0,001	20729	21146

$\bar{X}Ae$  = média de 2007 ou 2010;  $\Delta e$  = diferença da LST, ET e albedo (em 2007 e 2010) em relação à média histórica;  $N$  = número de repetições; DP <1,5 = seca com desvio padrão inferior a 1,5; DP >1,5 = seca com desvio padrão superior a 1,5; ns = não significativo estatisticamente ( $p > 0,05$ ).



## VALIDAÇÃO DE PRODUTOS ORBITAIS NA BACIA DO RIO XINGU, SUDESTE AMAZÔNICO

A ser submetido para publicação no periódico: Theoretical and Applied Climatology

### RESUMO

O estudo de vários dos mecanismos que explicam as interações entre a biosfera e a atmosfera requererem informações que sejam acuradas e que cubram uma grande extensão territorial e, neste contexto, os dados de sensoriamento remoto são os que apresentam maior potencial. Nessa perspectiva, o objetivo deste trabalho foi utilizar dados medidos em campo para validar produtos orbitais de albedo, temperatura superficial e Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI; obtidos a partir de imagens LANDSAT e MOD13), bem como, produtos de evapotranspiração (MOD16) e precipitação (CHIRPS e TRMM), para a região sudeste da Amazônia. Evidenciamos alta acurácia nas estimativas de albedo, temperatura da superfície, evapotranspiração (MOD16, coleção 005) e NDVI (LANDSAT e MOD13), para o sudeste amazônico. Os dados de precipitação do CHIRPS apresentaram ainda, maior acurácia em relação ao TRMM. Os erros encontrados nas estimativas de cada produto podem estar associados à diferentes fatores, como por exemplo, a dificuldade de calibrar o modelo METRIC nos meses de maior intensidade e frequência de chuvas, e a resolução espacial grosseira dos produtos de precipitação. De modo geral ressaltamos, que ainda que pequena a margem de erro das estimativas dos produtos investigados, a tomada de decisões pautada em seu uso deve ser seguida de ressalvas visto suas possíveis implicações.

**Palavras-chave:** controle de qualidade, sensoriamento remoto, sudeste amazônico, torre de fluxo.

**ABSTRACT**

Studying many of the mechanisms that explain the interactions between the biosphere and the atmosphere requires information that is accurate and covers a large territorial extent, and in this context, remote sensing data has the greatest potential. From this perspective, the objective of this work was to use field-measured data to validate albedo orbital products, surface temperature and vegetation index of normalized difference (obtained from LANDSAT and MOD13 images), as well as evapotranspiration products (MOD16) and (CHIRPS and TRMM) for the southeastern Amazon region. We found high accuracy in the estimates of albedo, surface temperature, evapotranspiration (MOD16, collection 005) and NDVI (LANDSAT and MOD13) for southeastern Amazonia. Precipitation data from CHIRPS also showed higher accuracy than TRMM. The errors found in the estimates of each product may be associated with different factors, such as difficulties in calibrating the METRIC model in the months of highest intensity and frequency of rainfall, and the coarse spatial resolution of precipitation products. In general, we emphasize that, although the margin of error of the estimates of the investigated products is small, the decision making based on its use should be followed by caveats given its possible implications.

**Keywords:** flow tower, quality control, remote sensing, southeast amazona.

## 1. INTRODUÇÃO

A floresta Amazônia desempenha um importante papel na manutenção do ciclo hidrológico local e regional (Spera *et al.*, 2016; Bonan 2008). Isto porque, a floresta captura vapor d'água oriundo do oceano Atlântico que é precipitado sobre a floresta e depois retorna em grande parte para a atmosfera via evapotranspiração (Aragão, 2012). Apesar dos serviços ecossistêmicos prestados pela floresta, nas últimas quatro décadas a região sudeste da Amazônia tem experimentado uma acelerada perda da cobertura florestal (Macedo *et al.*, 2012; VanWey *et al.*, 2013). Estas mudanças no uso e cobertura dos solos da região tem potencial para alterar o balanço de energia e a estabilidade hidrológica, que são fatores essenciais para a manutenção da produção agrícola da região (Oliveira *et al.*, 2013; Silvério *et al.*, 2015).

Diversas ferramentas e conjunto de dados podem ser utilizados para avaliação dos impactos das mudanças no uso e cobertura da terra sobre o balanço de energia regional (Costa & Foley, 1997; Bonan, 2002; Spera *et al.*, 2016). De maneira geral, essas avaliações exigem informações acuradas em uma grande escala espacial. As variáveis mais sensíveis às mudanças no uso da terra são precipitação, evapotranspiração, temperatura da superfície e albedo. Essas variáveis podem ser obtidas tanto de forma direta (através de medições em campo) quanto indireta (através de instrumentos de sensores remotos) (Huffman *et al.*, 2007; Mu *et al.*, 2011; Funk *et al.*, 2015; Foolad *et al.*, 2018). Uma das vantagens da forma direta é a acurácia das informações, visto que essas são obtidas *in situ*. No entanto, o número ideal de estações meteorológicas e de torres de fluxo (“*Eddy Covariance*”) para cobrir grandes áreas seria muito alto e requereria elevado custo financeiro. Essas limitações logísticas e financeiras tornam o uso de sensores remotos uma alternativa interessante na aquisição periódica de dados espaciais em maior escala (Rosa *et al.*, 2005; Costa & Yanagi, 2006; Malhi *et al.*, 2008).

Atualmente, há diferentes produtos orbitais para uma mesma variável. Para precipitação, por exemplo, temos o produto TRMM (“*Tropical Rainfall Measuring Mission*”) que tem como finalidade melhorar nossa compreensão à respeito da distribuição e variabilidade das chuvas nos trópicos (Huffman *et al.*, 2007). Há ainda o CHIRPS (“*Climate Hazards Group Infra Red Precipitation with Station data*”), que é usado para a criação de séries temporais quadriculadas de chuva, incorporando tanto imagens de satélite quanto dados de estações *in situ* (Stackhouse *et al.*, 2015; Funk *et al.*, 2015). Para a temperatura da superfície da terra (LST), albedo e Índice de Vegetação da Diferença

Normalizada (NDVI), há produtos obtidos a partir de imagens do satélite LANDSAT, que opera no espectro óptico e termal, com resolução espacial de 30 metros. Para a evapotranspiração há o MOD16, obtido a partir do sensor MODIS e que tem sido empregado tanto em estudos sobre os mecanismos de interação solo-planta-atmosfera quanto sobre o balanço hídrico local e regional.

Embora a obtenção de dados via sensores remotos seja uma boa alternativa, estudos tem demonstrado discrepâncias entre os dados observados e estimados. Por exemplo, o produto MOD16 tem demonstrado baixa relação entre a evapotranspiração estimada e a observada em áreas não florestais — agricultura e pastagem — (Ramoelo *et al.*, 2014; Oliveira *et al.*, 2017; Moreira *et al.*, 2018). Da mesma forma, A precipitação estimada pelo sensor TRMM também tem demonstrado discrepância a observada em estações meteorológicas, possivelmente em decorrência de sua área de abrangência de 25 x 25 km (Karaseva *et al.*, 2001; Collischonn *et al.*, 2017). De maneira geral, a maioria dos produtos orbitais utilizados no Hemisfério Sul são calibrados no Hemisfério Norte, isto faz com que aumente o risco de imprecisão das informações oriundas de produtos orbitais, tornando-se clara a necessidade de estudos focados na validação de diferentes produtos orbitais na Amazônia.

Há consenso de que a correta avaliação dos impactos das mudanças no uso e cobertura da terra é fundamental para o entendimento do atual ciclo hidrológico, principalmente em escala local, o que por sua vez, é vital para a segurança hídrica, alimentar, e preservação e manutenção dos serviços ecossistêmicos de áreas naturais. Nesse sentido, a validação de dados de produtos orbitais de larga escala através de dados de campo é importante porque permite identificar a acurácia dos diferentes produtos orbitais existentes, norteando a escolha daqueles produtos mais eficientes na avaliação dos efeitos das mudanças no uso da terra sobre o ciclo hidrológico e no balanço de energia. Desse modo, o presente estudo teve como objetivo utilizar dados medidos em campo para validar e comparar a acurácia de produtos orbitais de albedo, temperatura superficial e Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (obtidos a partir de imagens LANDSAT e MOD13), assim como, produtos de evapotranspiração (MOD16) e precipitação (CHIRPS, TRMM), para a região sudeste da Amazônia.

## **2. MATERIAL E MÉTODOS**

### **2.1 Área de estudo e torres de fluxo**

A área de estudo compreendeu a Bacia do Rio Xingu (sudeste da Amazônia), mais especificamente a Fazenda Tanguro (de 12°40'S a 13°45'S e 52°52'W a 52°25'W), onde estão instaladas três torres de fluxos (“*Eddy Covariance*”) (Brando *et al.*, 2019), distribuídas em três ambientes distintos: floresta intacta (controle), floresta queimada experimentalmente e área agrícola (mais informações em apêndice 1). A vegetação local é característica da transição Cerrado-Amazônia (Balch *et al.*, 2011; Panday *et al.*, 2015). A precipitação média anual é altamente sazonal variando de 1500 a 2400 mm, com período seco pronunciada de maio a agosto, e período chuvoso de novembro a fevereiro (Hijmans *et al.*, 2005; Alvares *et al.*, 2014).

## 2.2 Obtenção dos dados

Com o intuito de identificar, qual produto orbital apresenta estimativa de evapotranspiração mais acurada, utilizamos dados do sensor MODIS, *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (produto MOD16A2) (Mu *et al.*, 2011), e do projeto METRIC-EEFLUX (Fluxo de evapotranspiração do Google Earth Engine), que se baseia no modelo com calibração internalizada (METRIC). Para o **Índice de Vegetação da Diferença Normalizada** (NDVI) utilizamos tanto os dados do METRIC-EEFlux quanto do Produto MOD13Q1 do *MODIS*. Para as variáveis albedo e temperatura superficial, utilizamos apenas os dados do METRIC- EEFLUX.

Avaliamos a acurácia das estimativas de precipitação (para toda a bacia) a partir dos produtos CHIRPS (*Climate Hazards Group Infra Red Precipitation with Station data*) (Stackhouse *et al.*, 2015, Funk *et al.*, 2015) e TRMM\_3B42 (versão 7), do satélite TRMM (*Tropical Rainfall Measuring Mission*) (Huffman *et al.*, 2007). Obtivemos as informações de campo (ET, LST, albedo, NDVI e PPT) a partir de torres de fluxo (*Eddy Covariance*) instaladas no Sudeste Amazônico e de estações pluviométricas da Agência Nacional de Águas (ANA).

### 2.2.1 Precipitação (produtos CHIRPS e TRMM\_3B42)

Os dados estimados de precipitação (para toda a bacia) foram obtidos a partir dos produtos CHIRPS (*Climate Hazards Group Infra Red Precipitation with Station data*) (Stackhouse *et al.*, 2015, Funk *et al.*, 2015), e TRMM\_3B42 (versão 7), e do satélite TRMM (*Tropical Rainfall Measuring Mission*) (Huffman *et al.*, 2007).

Os dados do produto CHIRPS compreenderam de 01/01/1981 a 31/12/2018. O produto CHIRPS possui resolução espacial de 0,25° e temporal de 1 dia, respectivamente.

As estimativas de precipitação têm como base os dados do produto TRMM\_3B42; satélite geoestacionário quase-global no canal do infravermelho (IR); e dados de precipitação de estações de superfície de serviços regionais e nacionais de meteorologia (Funk *et al.*, 2015).

Para o produto TRMM\_3B42, utilizamos um conjunto de dados que compreendeu de 01/01/1998 a 31/12/2018, com resolução espacial de 0,25° e temporal de 3 horas. O produto TRMM\_3B42 possui a formulação estrutural oriunda de metadados e matrizes (Huffman *et al.*, 1995). Os dados fornecidos são estimados por meio da combinação de estimativas de precipitação dos canais de micro-ondas provenientes do "*Microwave Imager*" (TMI), "*Special Sensor Microwave Imager*" (SSM/I), "*Advanced Microwave Scanning Radiometer*" (AMSR-E), "*Advanced Microwave Sounding Radiometer*" (AMSU-B), com informações de precipitação mensais de superfícies, provenientes do "*Global Precipitation Climatology Center*" (GPCC) (Huffman *et al.*, 2007).

### **2.2.2 Evapotranspiração (produto MOD16)**

Obtivemos os dados de evapotranspiração (ET) a partir do produto MOD16 (Mu *et al.*, 2011), disponível em intervalos de 8 dias e em resolução espacial de 0,5 km (coleção 006) e 1 km (coleção 005). No intuito de haver coincidência temporal entre os valores estimados e observados, utilizamos os dados de 2014 para a coleção 005, e de 2014 a 2018 para a coleção 006. Assim, utilizamos imagens de 12 meses durante 5 anos (somando duas vezes 2014), com um único quadrado (tile) h12v10, totalizando, então, para a análise, 228 imagens do produto MOD16A2.

O produto MOD16 é calculado a partir do MOD12 (cobertura da superfície), MOD15 (Fração da Radiação Fotossinteticamente Ativa Absorvida, Índice de Área Foliar) e dados meteorológicos do modelo GMAO (Global Modeling and Assimilation Office). O algoritmo utilizado é baseado na equação de Penman-Monteith, adaptada por Mu *et al.* (2011).

### **2.2.3 Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (Produto MOD13Q1)**

Para a obtenção do Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI) utilizamos a série temporal do produto MOD13Q1, versão 6, quadro (tile) h12v10 (NASA - <http://reverb.echo.nasa.gov>), os dados compreenderam de junho de 2017 a dezembro de 2018, um total de 34 imagens.

O MOD13 é resultado da aplicação de um algoritmo que recebe por entrada 16 imagens da mesma região, obtidas em 16 diferentes dias. Entretanto, o produto representa um índice de vegetação, calculado a partir de pixels escolhidos dentre um universo de 16 possibilidades para cada posição geográfica. Com resolução espacial e temporal de 250 metros e 16 dias respectivamente, o algoritmo empregado utiliza informações sobre correção geométrica, máscara de nuvens e ângulo solar. Os valores de radiância que compõem a imagem de saída é proveniente do produto MOD09.

#### **2.2.4 Temperatura da superfície, evapotranspiração, albedo e índice de vegetação da diferença normalizada (projeto METRIC-EEFLUX)**

Os dados históricos (2014 a 2018) de temperatura da superfície da terra (LST), evapotranspiração (ET), albedo e Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI) foram obtidos na plataforma do Google Earth Engine-EEFlux (projeto METRIC-EEFLUX) (Allen *et al.*, 2015; Gorelick *et al.*, 2017; Foolad *et al.*, 2018).

O EEFLUX (Fluxo de evapotranspiração do Google Earth Engine) é uma versão do METRIC (mapeamento de evapotranspiração em alta resolução com calibração internalizada) que utiliza o sistema do Google Earth Engine. O EEFLUX foi desenvolvido em parceria pela *University of Nebraska-Lincoln*, *Desert Research Institute* e *University of Idaho*. O EEFlux utiliza cenas Landsat e disponibiliza produtos desde 1984 até o presente, com resolução quase global. O EEFlux usa dados climáticos do NLDAS nos EUA e também do CFSV2 globalmente para calibrar o balanço de energia da superfície da imagem. O EEFlux utiliza a banda térmica do Landsat para controlar o balanço de energia da superfície e as bandas de ondas curtas para estimar o albedo. O nível 1 do EEFlux emprega calibração automatizada da imagem.

- *Evapotranspiração* – A ET real é calculada como resíduo do balanço de energia da superfície ( $ET = R_n - G - H$ , onde  $R_n$  é radiação líquida,  $G$  é o fluxo de calor do solo e  $H$  é o fluxo de calor sensível).

- *Albedo* – representa a refletância total e integrada em todo o espectro eletromagnético. É calculado a partir das seis bandas principais de ondas curtas (Tasumi *et al.*, 2008).

- *NDVI* – Índice de Vegetação com Diferença Normalizada, calculado a partir da faixa de infravermelho próximo (NIR) e da faixa vermelha, usando a refletância na superfície.

- *Temperatura da superfície* – é a temperatura da superfície terrestre derivada da imagem do Landsat usando uma calibração atmosférica fixa de acordo com Allen *et al.* (2007). A

resolução do Landsat 5 é de 120 m, do Landsat 6 é de 60 m e do Landsat 8 é de 100 m. Todos esses são reamostrados para 30 m pelo USGS-EROS usando convolução cúbica.

### 2.2.5 Dados observados

Coletamos os dados de evapotranspiração, temperatura superficial, albedo e índice de vegetação da diferença normalizada em três torres de fluxo (“*Eddy Covariance*”), instaladas em áreas de floresta intacta (controle), floresta queimada, e área agrícola (com soja/milho), ambas pertencentes a fazenda Tanguro (mais informações em Apêndices 2 e 3). Para o controle de qualidade dos dados de fluxo (obtidos a cada 30 minutos), excluimos ainda todas aquelas informações em momentos nos quais notamos mau funcionamento do instrumento. Para a precipitação observada ao longo de toda a bacia, utilizamos dados registrado em estações pluviométricas (convencionais e automáticas) de particulares e da Agência Nacional de Águas-ANA (mais informações em Apêndice 4.1).

### 2.3 Análise estatística

Para compararmos os dados estimados com os observados, primeiro, criamos buffers de 200 metros, ao redor das três torres de fluxo. Em seguida, extraímos os valores de ET, NDVI, LST e albedo (METRIC-EEFLUX), contidos dentro de cada buffer. Para os produtos MOD16, MOD13, CHIRPS e TRMM\_3B42, extraímos os valores de PPT de acordo com as coordenadas geográficas de cada torre de fluxo ou estação pluviométrica.

Procedemos com a validação dos produtos orbitais de três maneiras. (i) inicialmente, obtivemos dos produtos TRMM\_3B42 e CHIRPS a média mensal e anual da precipitação para, em seguida, empregá-la na análise de validação. (ii) para os produtos (com resolução temporal de 8 dias) cuja variável representa a soma ou média de um único dia (EEFLUX-METRIS, variáveis LST, NDVI, albedo), calculamos a média dos dados observados (a cada 8 dias) para, posteriormente, utilizá-las nas análises de validação. Para o produto MOD13Q1 (resolução temporal de 16 dias), a média do NDVI (observado) foi obtida a cada 16 dias. (iii) nossa última análise foi empregada com o produto MOD16A2, cuja variável representa a soma de 8 dias de evapotranspiração. Inicialmente, dividimos por 8 o valor de cada imagem do MOD16. Posteriormente, calculamos a média de 8 dias de ET observadas na torre de fluxo, afim de utiliza-la para validar a ET fornecida pelo MOD16.

O coeficiente de determinação ( $R^2$ ), erro médio quadrático (RMSE), viés (BIAS) e Percent Bias (PBIAS) (GUPTA *et al.*, 1999) foram obtidos a partir das seguintes equações.



$$R^2 = \frac{(S_{xy})^2}{S_{xx}S_{yy}} \quad (Eq. 1)$$

Onde:

$S_{xx}$  e  $S_{yy}$  representam a soma dos quadrados dos desvios das médias; e  $S_{xy}$  a soma dos produtos cruzados dos desvios de  $x$  e  $y$ .

$$RMSE = \sqrt{(V_{ft} - V_{orb})^2 / N} \quad (Eq. 2)$$

$$BIAS = (V_{ft} - V_{orb}) / N \quad (Eq. 3)$$

$$PBIAS = \frac{Bias}{\left(\frac{1}{n}\right)\sum V_{ft}} * 100 \quad (Eq. 4)$$

Sendo que:

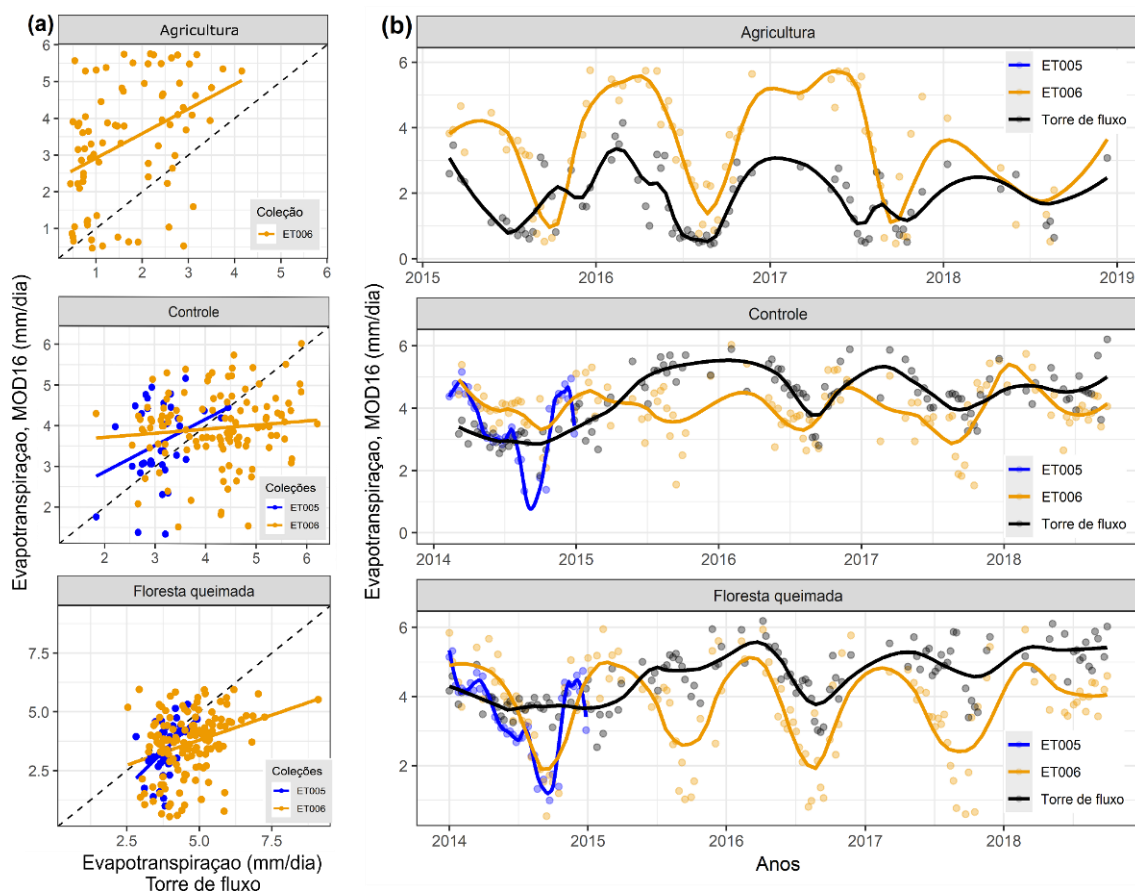
$V_{ft}$  representa dados observados da Torre de Fluxo,  $V_{orb}$  os dados dos produtos orbitais (MOD16 e TRMM\_3B42) e  $N$  o número de medidas. Quanto mais próximo de zero os valores de RMSE, BIAS e PBIAS, maior a acurácia dos dados modelados. Valores negativos e positivos de BIAS representam, respectivamente, subestimação e superestimação das variáveis estimadas.

### 3. RESULTADOS

#### 3.1 Evapotranspiração

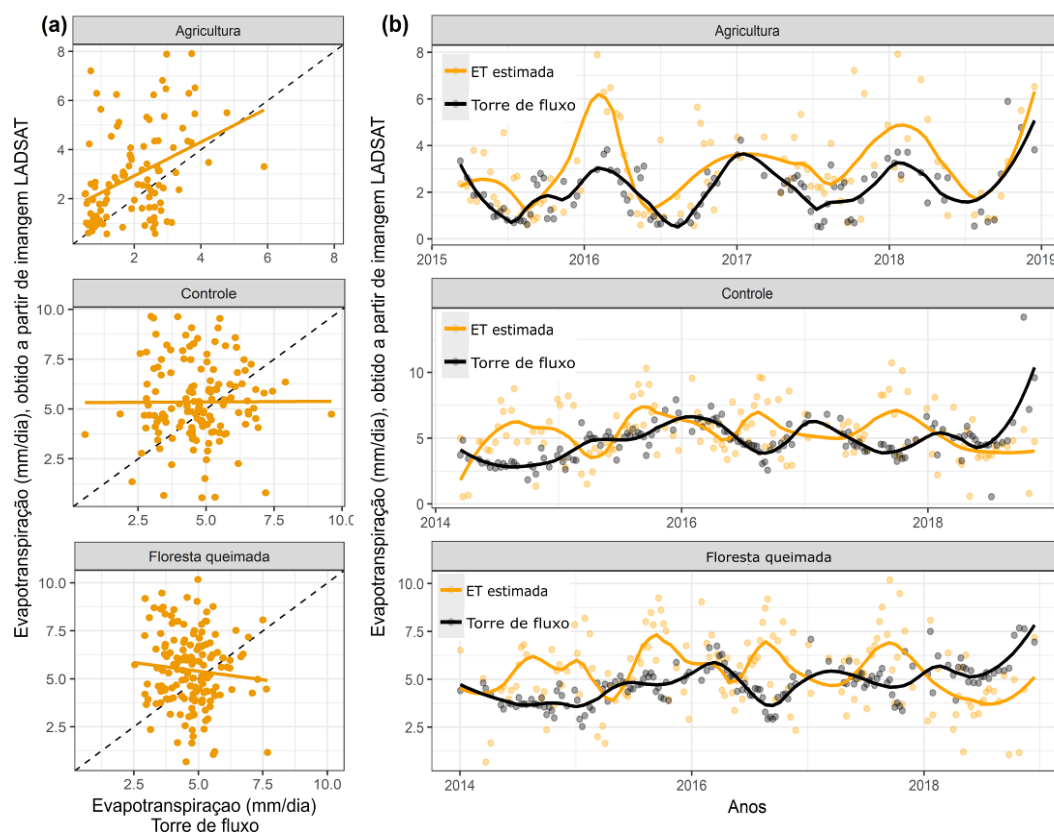
Evidenciamos que o produto de evapotranspiração do MODIS (MOD16 coleções 005 e 006) apresentou maior acurácia para floresta preservada (Figura 2 e Apêndice 2). Na floresta queimada, a relação entre a ET observada empiricamente e as estimativas do produto MOD16 foi maior para a coleção 005 ( $r^2 = 0,27$ ) que para a 006 ( $r^2 = 0,06$ ). As métricas RMSE e BIAS também demonstraram maior acurácia para a coleção 005 (RMSE = 0,08; BIAS = -0,41) em comparação a 006 (RMSE = 0,08; BIAS = -0,84). Na área de floresta intacta, embora a ET estimada e observada não tenha exibido relações, ambas coleções demonstraram resultados satisfatórios para os demais parâmetros de avaliação, sobretudo a coleção 005 que exibiu BIAS de 3,18 e RMSE de 0,93. Na área agrícola, a coleção 006 demonstrou relação com os dados observados ( $r^2 = 0,17$ ) e também um erro quadrado baixo (RMSE = 0,16), entretanto, o algoritmo MOD16 superestimou a ET em mais de 100% (~14,49 mm d<sup>-8</sup>). Com relação ao comportamento temporal da ET, observamos uma nítida tendência sazonal para os dados estimados, principalmente para a área agrícola. De modo geral, a ET do produto MOD16 (coleções 005 e 006) esteve relacionada a quantidade de chuvas na região, uma vez que, a ET aumentou durante o

período chuvoso (de outubro a novembro) e reduziu durante o período seco (de maio a setembro).



**Figura 1.** Comparação entre a evapotranspiração estimada pelo algoritmo MOD16 e a observada em torres de fluxo (*Eddy Covariance*) no Sudeste amazônico. Os valores observados de evapotranspiração foram obtidos a partir da média a cada 1 dia. Nos painéis à esquerda (a), os símbolos representam medições e os pontos em laranja e azul representam respectivamente as coleções 005 e 006 do MOD16; as linhas pontilhadas indicam correspondências 1: 1.

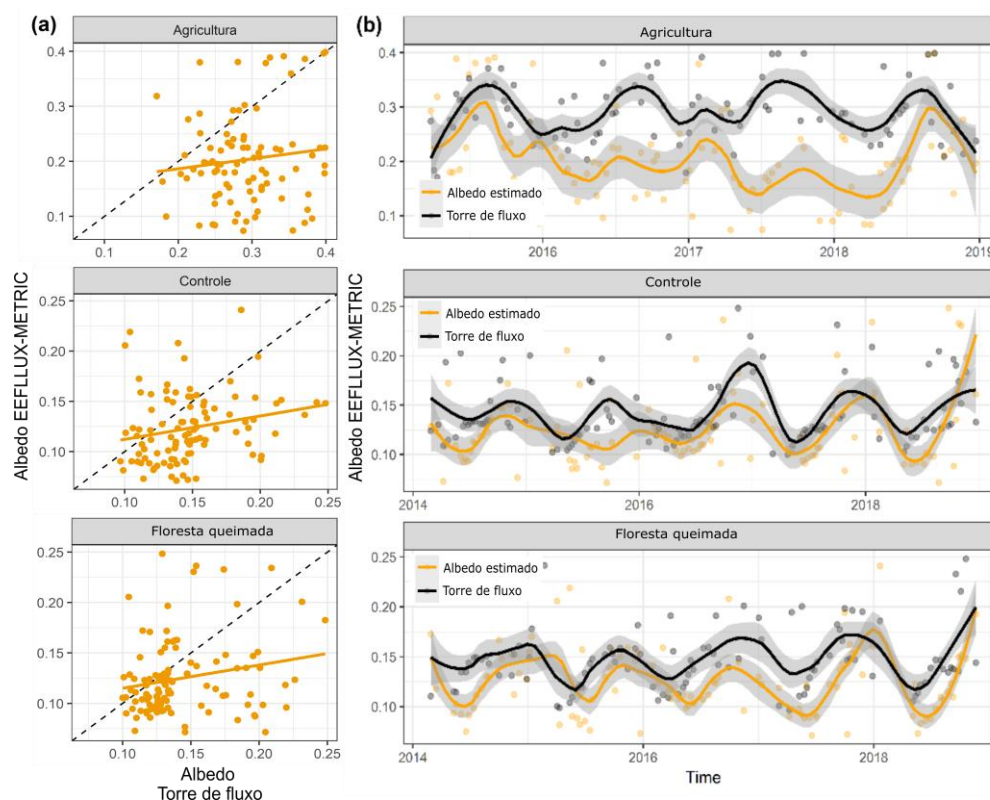
A evapotranspiração estimada a partir de imagens LANDSAT demonstrou maior acurácia para floresta intacta (RMSE= 0,11; BIAS= -0,66), comparado a floresta queimada (RMSE= 0,10, BIAS= 0,72) e a área agrícola (RMSE= 0,10; BIAS=0,940) (Figura 2 e Apêndice 3). Entretanto, apenas na área agrícola foi constatado relação entre a evapotranspiração observada e a estimada. A área agrícola, também demonstrou comportamento temporal próximo entre os dados estimados e observados.



**Figura 2.** Comparação entre a evapotranspiração (estimada com imagens LANDSAT) e dados observados a partir de torres de fluxo (*Eddy Covariance*) instaladas em áreas de floresta intacta (controle), queimada e agrícola. Nos painéis à esquerda (a), as linhas pontilhadas indicam correspondências 1:1.

### 3.2 Albedo

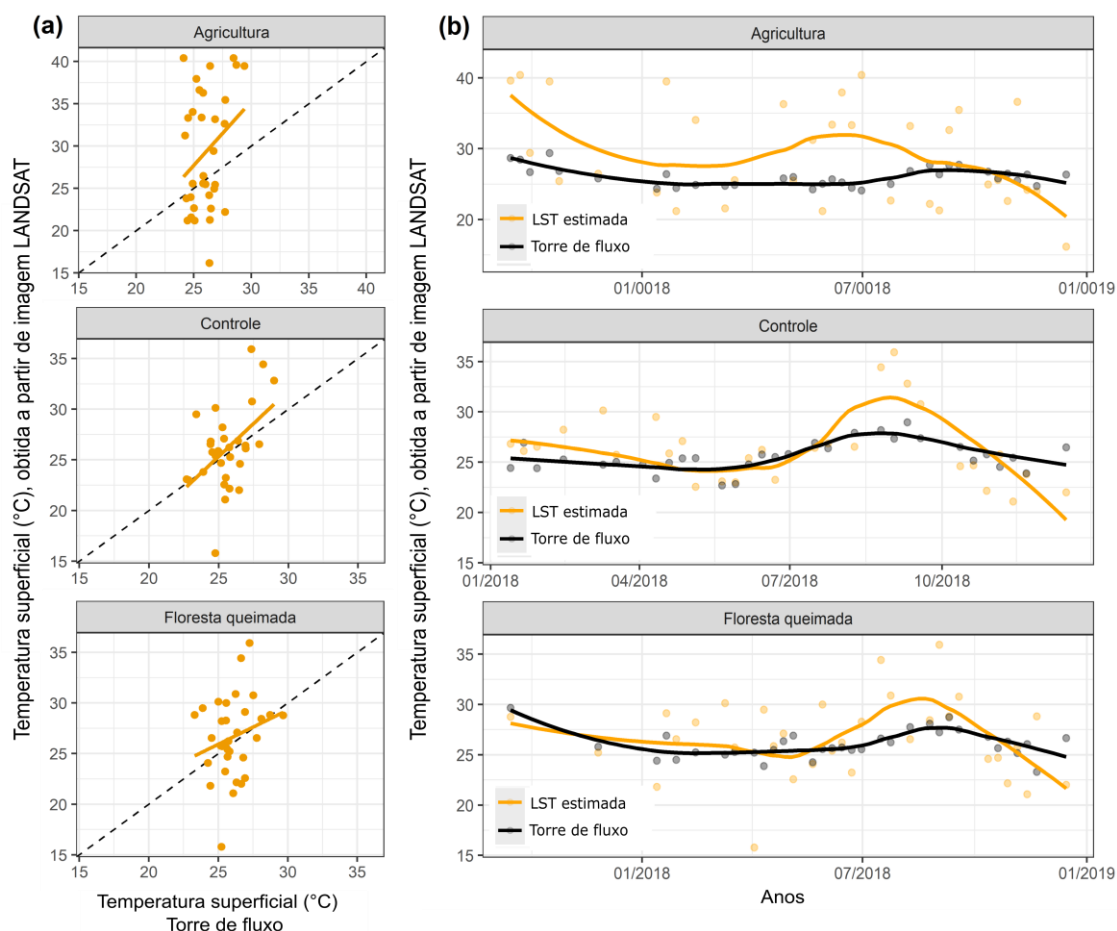
O albedo estimado com o LANDSAT demonstrou consistência, ao exibir BIAS de -0,66 para a área agrícola, 0,94 para a floresta intacta, e 0,72 para a floresta queimada (Figura 3). No entanto, houve relação entre os valores estimados e observados apenas na área agrícola ( $r^2= 0,16$ ). Nossa análise temporal demonstrou que o albedo estimado esteve próximo ao observado na maior parte do ano para os três ambientes. Na área agrícola essa proximidade foi maior entre janeiro e maio, enquanto nas áreas de floresta intacta e queimada, a maior proximidade ocorreu entre janeiro e julho.



**Figura 3.** Comparação entre o Albedo (estimado com imagens LANDSAT) e dados observados a partir de torres de fluxo (*Eddy Covariance*) instaladas em áreas de floresta intacta (controle), queimada e agrícola. Nos painéis à esquerda (a), as linhas pontilhadas indicam correspondências 1:1.

### 3.3 Temperatura superficial

Os valores de temperatura superficial (obtidos a partir de imagens LANDSAT) estiveram próximos aos observados na área agrícola (BIAS= 3,27; RMSE= 0,73), floresta intacta (BIAS= 0,5; RMSE= 0,33), e floresta queimada (BIAS= 0,6; RMSE= 0,40) (Figura 4). A temperatura superficial estimada também demonstrou relação para a área de floresta intacta ( $r^2= 0,23$ ), agrícola ( $r^2= 0,09$ ) e queimada ( $r^2= 0,06$ ). Referente ao comportamento temporal, constatamos similaridade na variação da temperatura superficial estimada e observada. Contudo, na floresta intacta e queimada houve uma tendência de aumento no erro do produto entre agosto e outubro. Essa tendência também foi observada para a área agrícola a partir de maio.

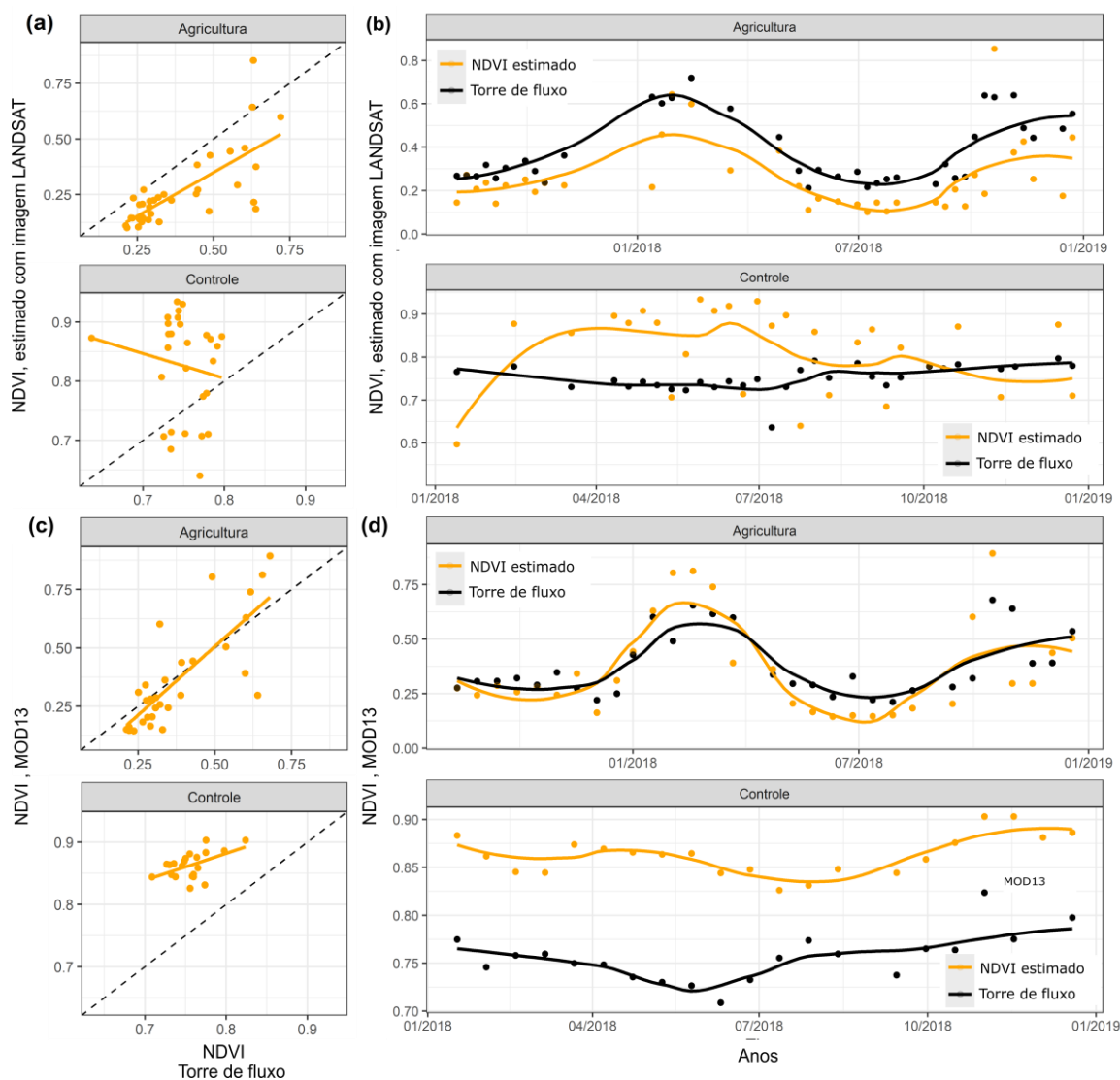


**Figura 4.** Comparação entre a temperatura superficial (estimada com imagens LANDSAT) e a observada em torres de fluxo (*Eddy Covariance*) instaladas em áreas de floresta intacta (controle), queimada e agrícola. Nos painéis à esquerda (a), as linhas pontilhadas indicam correspondências 1:1.

### 3.4 Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI)

Tanto o NDVI do produto MOD13, quanto o obtido por meio de imagens LANDSAT, exibiram consistência para todos os ambientes (figura 5). Contudo, na área agrícola o NDVI do MOD13 demonstrou maior acurácia (BIAS= -0,12; RMSE= 0,02) comparado ao obtido a partir do LANDSAT (BIAS= -0,01; RMSE= 0,01). Padrão semelhante foi evidenciado na floresta intacta, com o NDVI do MOD13 demonstrando BIAS e RMSE de 0,11 e 0,02, e o estimado com o LANDSAT demonstrando BIAS e RMSE de 0,01 e 0,08, respectivamente. O produto MOD13 exibiu ainda uma boa relação com os dados observados, tanto na área agrícola ( $r^2= 0,62$ ), quanto na floresta intacta ( $r^2= 0,27$ ). O NDVI estimado com o LANDSAT também exibiu boa relação, contudo, apenas para a área agrícola ( $r^2=0,55$ ). Nossa análise temporal revelou que em áreas de lavoura, o NDVI do MOD13 e também o estimado com o LANDSAT tendem a exibir variação temporal similar ao observado nas torres de fluxo, com máximas em fevereiro e mínimas

em agosto. Na floresta intacta, essa similaridade ocorreu apenas para o NDVI do MOD13, que exibiu máximas entre janeiro e fevereiro e mínimas entre junho e agosto.

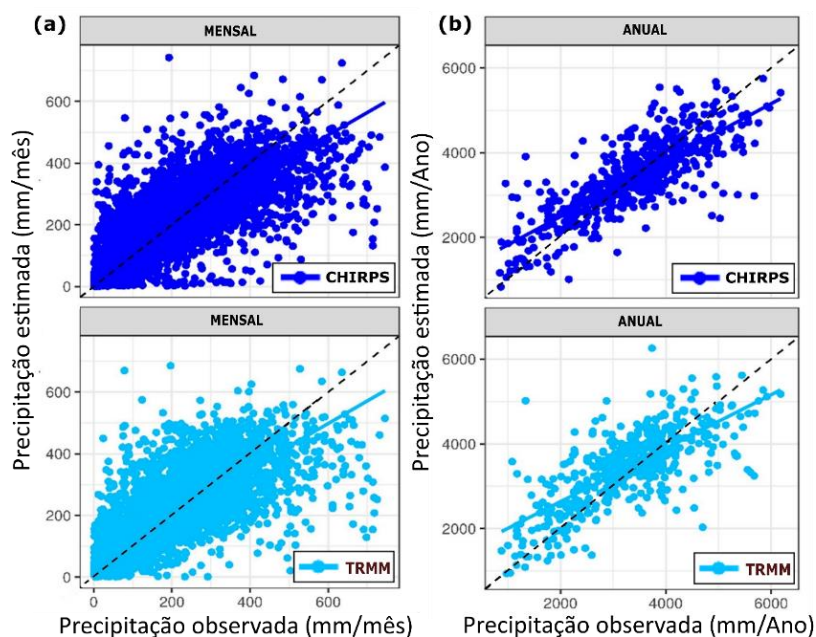


**Figura 5.** Comparação entre o NDVI (estimado com imagens LANDSAT) e o observado em torres de fluxo (*Eddy Covariance*) instaladas em áreas de floresta intacta (controle) e agrícola. Nos painéis (a) e (b) estão representados os dados do EFFLUX, enquanto, nos painéis (c) e (d) estão apresentados os dados do MOD13. Os valores observados de NDVI foram obtidos a partir da média, a cada 16 dias. As linhas pontilhadas indicam correspondências 1:1.

### 3.5 Precipitação

Nossa validação da precipitação para toda a bacia do Rio Xingu demonstrou que precipitação mensal observada esteve próxima à estimada com CHIRPS (BIAS= 2,65; RMSE= 0,35) e TRMM (BIAS= 8,77; RMSE= 0,48), e que a relação com os dados observados é maior para o CHIRPS ( $r^2= 0,64$ ) do que para o TRMM ( $r^2= 0,58$ ) (Figura 7 e Apêndice 4). Para a precipitação anual também constatamos maior relação para o CHIRPS ( $r^2= 0,61$ ) comparado ao TRMM\_3B42 ( $r^2= 0,50$ ) (Apêndice 4.1). Contudo, embora o

CHIRPS tenha demonstrado maior acurácia (BIAS= 15,20; RMSE= 12,86) que o TRMM (BIAS=161,43, RMSE= 18,04), ambos os produtos demonstraram superestimar a precipitação.



**Figura 6.** Comparação entre a precipitação estimada (CHIRPS e TRMM\_3B42) e a observada. Painéis à direita (a) representam a soma mensal, e à esquerda (b) a soma anual da precipitação. Os pontos representam medições e as linhas pontilhadas indicam correspondências 1:1.

#### 4. DISCUSSÃO

As estimativas de evapotranspiração, albedo, temperatura da superfície, NDVI, e precipitação a partir de produtos orbitais demonstraram-se adequadas para serem utilizadas em estudos que visam avaliar os efeitos das mudanças no uso da terra sobre o balanço hídrico e energético no sudeste amazônico. Entretanto, cabe ressaltar que a acurácia dos produtos variou entre as diferentes áreas (agricultura, floresta intacta, floresta queimada), e que também houve maior acurácia de um produto sobre o outro. De modo geral, ainda que as diferenças na acurácia entre os produtos sejam pequenas elas podem ter implicações econômicas e ambientais. Por exemplo, no setor agrícola, estimativas equivocadas de precipitação podem orientar produtores rurais a realizarem o plantio em uma data de maior risco de perda da produção. Na área ambiental, além de dificultar a compreensão dos processos biogeoquímicos, há risco de gestores públicos desconsiderarem áreas prioritárias para a conservação, ambientes que além de possuírem grande riqueza de fauna e flora, desempenham importante papel na contenção de alagamentos ou desmoronamentos.

Para o produto MOD16 evidenciamos maior proximidade entre os dados estimados e observados nas áreas de floresta, possivelmente em decorrência da menor variabilidade temporal nos índices de área foliar (Apêndices 2.2 e 2.4). Estudos recentes sugerem que as maiores incertezas no produto MOD16 estão associadas as imprecisões na classificação dos tipos de cobertura da terra e as incertezas nos dados de entrada, tais como o índice de área foliar, a fração fotossinteticamente ativa, e aos dados meteorológicos de reanálise do GMAO (Global Modeling and Assimilation Office) (Mu *et al.*, 2011; Kim *et al.*, 2012; Ruhoff *et al.*, 2013; Ramoelo *et al.*, 2014).

O albedo estimado foi mais próximo ao observado na floresta queimada, local onde as informações meteorológicas são escassas e em sua grande maioria redimensionadas. Ainda que pequenas, as diferenças entre o albedo estimado e observado nos três ambientes, podem ser decorrentes da dificuldade em calibrar as imagens em meses de maior intensidade e frequência de chuvas (Foolad *et al.*, 2018). Na área agrícola, o rápido crescimento das cultivares (soja e milho), combinado com técnicas de manejo (dessecação e colheita), colaboram ainda para mudanças abruptas nas taxas de refletância da superfície e, conseqüentemente, para maior imprecisão nas estimativas do albedo de superfície.

Não foi possível de forma clara, evidenciar distinção na acurácia das estimativas de LST para áreas de floresta e agricultura, possivelmente em decorrência do baixo número de cenas amostradas. Entretanto, ressalta-se que em todos os ambientes as estimativas de LST foram adequadas, e que os dados utilizados em nossas análises são provenientes da versão 0.10, e como METRIC-EEFLUX ainda está em andamento, é esperado que no futuro a LST estimada seja ainda mais precisa.

A maior acurácia do produto MODQ1 (NDVI) pode ser atribuída ao menor número de imagens LANDSAT processadas para a região, decorrente da elevada presença de nuvens. Para o produto METREC-EEFLUX avaliamos 12 imagens a menos que o MODQ1, o que pode ter aumentado a influência dos valores extremos (outliers) nos resultados. Evidenciamos maior acurácia e sazonalidade (nos valores de NDVI) na área agrícola, possivelmente em decorrência de dois fatores, (i) uma maior janela temporal de dados analisados, e (ii) uma menor capacidade das espécies agrícolas em resistir ao aumento de déficit hídrico, comparado a espécies florestais (Nepstad *et al.*, 1994; Culf *et al.* 1995; Sampaio *et al.*, 2007). Isso ocorre porque espécies agrícolas (como soja e milho) possuem raízes pouco profundas, o que as restringe o acesso à água apenas nas camadas superficiais do solo e, conseqüentemente, levando ao ponto de murcha permanente ainda nos primeiros meses de estiagem. Pequenos decréscimos no índice de vegetação entre o



início de dezembro e o final de janeiro, pode ainda ser atribuído a colheita de espécie de ciclo curto, como a soja ou milho.

Ao considerarmos a magnitude dos produtos TRMM\_3B42 e CHIRPS, ambos exibiram estimativas de precipitação adequadas. Cabe ressaltar ainda que os dados da ANA correspondem a uma determinada estação pluviométrica, enquanto, os dados do CHIRPS e TRMM se referem à precipitação média de cada pixel (de 0,25° x 0,25°). O uso do produto CHIRPS demonstrou ser mais adequado para a Bacia do Rio Xingu, no entanto, há superestimação da precipitação na maior parte da bacia (Apêndice 4). Possivelmente isso se deve à redução do número de estações utilizadas para gerar dados CHIRPS ao longo dos anos (Paredes-Trejo *et al.*, 2017). De modo geral, o produto CHIRPS pode ser um bom substituto ao algoritmo 3B42 do TRMM no estudo do comportamento da precipitação pluviométrica na Bacia do Rio Xingu, e assim avaliar melhor o efeito da variabilidade climática nas sub-bacias componentes, e caracterizar os períodos de cheia e estiagem para a melhoria da rede de monitoramento e avaliação de impactos sobre os ambientes locais.

## 5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Allen, R. G., Morton, C., Kamble, B., Kilic, A., Huntington, J.; Thau, D., Gorelick, N., Erickson, T., Moore, R., Trezza, R., Ratcliffe, I., Robison, C. 2015. EEFlux: A Landsat-based 664 Evapotranspiration mapping tool on the Google Earth Engine. In; American Society of Agricultural and Biological Engineers, pp. 1–11.
- Alvares, C. A., Stape, J. L., Sentelhas, P. C., Moraes, G., Leonardo, J., Sparovek, G. 2013. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, 22(6), 711–728.
- ANA, 2018. Sistema de informações hidrológicas [WWW Document]. Agência Nacional de Águas.
- Aragao, L. E. O., Malhi, Y., Roman-Cuesta, R. M., Saatchi, S., Anderson, L. O., & Shimabukuro, Y. E. 2007. Spatial patterns and fire response of recent Amazonian droughts. *Geophysical Research Letters*, 34(7).
- Balch, J.K., Nepstad, D.C., Curran, L.M., Brando, P., Portela, O., Guilherme, P., Reuning-Scherer, J.D., de Carvalho Jr., O., 2011. Size, species, and fire behavior predict tree and liana mortality from experimental burns in the Brazilian Amazon. *For. Ecol. Manage.* 261, 68–77. doi:10.1016/j.foreco.2010.09.029.
- Bonan, G. B. 2008. Forests and climate change: forcings, feedbacks, and the climate benefits of forests. *Science* 320, 1444–9. doi:10.1126/science.1155121.
- CHG- Climate Hazard Group. Available online: [ftp://ftp.chg.ucsb.edu/pub/org/chg/products/CHIRPS2.0/diagnostics/global\\_monthly\\_station\\_density/tifs/p05/](ftp://ftp.chg.ucsb.edu/pub/org/chg/products/CHIRPS2.0/diagnostics/global_monthly_station_density/tifs/p05/). (Accessed on 22 December October 2018).

- Collischonn, B., Collischonn, W., & Tucci, C. E. M. 2008. Daily hydrological modeling in the Amazon basin using TRMM rainfall estimates. *Journal of Hydrology*, 360 (1-4), 207-216.
- Brando, P. M., Silvério, D., Maracahipes-Santos, L., Oliveira-Santos, C., Levick, S. R., Coe, M. T.,... Trumbore, S. Prolonged tropical forest degradation due to compounding disturbances: Implications for CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>O fluxes. *Global Change Biology*, 2019, 2019, 1–14. doi:10.1111/gcb.14659
- Costa, M. H., & Yanagi, S. N. M. 2006. Effects of Amazon deforestation on the regional climate – historical perspective, current and future research. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 21, 200–211.
- Culf, A. D., Fisch, G., Hodnett, M.H. 1995. The albedo of Amazonian forest and ranchland. *Journal of Climate*, n. 8, v. 6, p. 1544-1554.
- Foolad, F., Blankenau, P.; Kilic, A., Allen, R. G., Huntington, J. L., Erickson, T. A., Ozturk, D., Morton, C. G., Ortega, S., Ratcliffe, I., Franz, T. E., Thau, D., Moore, R., Gorelick, N., Kamble, B., Revelle, P., Trezza, R., Zhao, W., Robison, C.W. 2018. Comparison of the Automatically Calibrated Google Evapotranspiration Application—EEFlux and the Manually Calibrated METRIC Application. *Preprints*, 2018070040.
- Funk, Chris, Pete Peterson, Martin Landsfeld, Diego Pedreros, James Verdin, Shraddhanand Shukla, Gregory Husak, James Rowland, Laura Harrison, Andrew Hoell & Joel Michaelsen. 2015. The climate hazards infrared precipitation with stations—a new environmental record for monitoring extremes. *ScientificData*. 2, 150066. doi:10.1038/sdata.2015.66.
- Gupta, H. V., Sorooshian, S., Yapo, P. O. 1999. Status of automatic calibration for hydrologic models: Comparison with multilevel expert calibration. *Journal of Hydrologic Engineering*, 4(2), 135-143.
- Hijmans, R. J, Cameron SE, Parra JL, Jones PG, Jarvis A. 2005. Superfícies climáticas interpoladas de alta resolução para áreas terrestres globais . *Int. J. Climatol*. 25, 1965 - 1978.
- Huffman, G.J., Bolvin, D.T., Nelkin, E.J., Wolff, D.B., Adler, R.F., Gu, G., Hong, Y., Bowman, K.P., Stocker, E.F., 2007. The TRMM Multisatellite Precipitation Analysis (TMPA): Quasi-Global, Multiyear, Combined-Sensor Precipitation Estimates at Fine Scales. *J. Hydrometeorol*. 8, 38–55. doi:10.1175/JHM560.1
- Huffman, G., Adler, R. F.; Rudolf, B., Schneider, U., Keehn, P. 1995. Global precipitation estimates based on a technique for combining satellite based estimates, rain gauge analysis, and NWP model precipitation information. *Journal of Climate*, 8 (5), 1284–1295.
- Karaseva, M., Prakash, S., Gairola, R. 2001. Validation of highresolution TRMM-3B43 precipitation product using rain gauge measurements over Kyrgyzstan. *Theoretical and Applied Climatology*. 108 (1-2), 147-157.
- Kim, H.W.; Hwang, K.; Mu, Q.; Lee, S.O.; Choi, M. Validation of MODIS 16 global terrestrialevapotranspiration products in various climates and land cover types in Asia. *KSCE J. Civ. Eng*. 2012, 16, 229–238.
- Malhi, Y., Roberts, J. T., Betts, R. A., Killeen, T. J., Li, W., & Nobre, C. A. 2008. Climate change, deforestation, and the fate of the Amazon. *Science (New York, N.Y.)*, 319(5860), 169–72.

- Mu, Q., Zhao, M., Running, S.W. 2011. Improvements to a MODIS global terrestrial evapotranspiration algorithm. *Remote Sens. Environ.* 115, 1781–1800. doi:10.1016/j.rse.2011.02.019.
- Nepstad, D. C., de Carvalho, C. R., Davidson, E. A., Jipp, P. H., Lefebvre, P. A., Negreiros, G. H., da Silva, E. D., Stone, T. A., Trumbore, S. E., Vieira, S. 1994. The role of deep roots in the hydrological and carbon cycles of Amazonian forests and pastures. *Nature* 372, 666–669. doi:10.1038/372666a0.
- Moreira, A. A., Adamatti, D. S., Ruhoff, A. L. 2018. Avaliação dos produtos de evapotranspiração baseados em sensoriamento remoto mod16 e gleam em nove sítios de torres de fluxo brasileiros. *Ciencia e natura*, 50, 112 – 118.
- Oliveira, G.; Brunsell, N. A.; Moraes, E. C.; Shimabukuro, Y. E.; Bertani, G.; Santos, T. V. 2017. Evaluation of MODIS-based estimates of water-use efficiency in Amazonia. *Int. J. Remote Sens.* 38(19), 5291–5309.
- Oliveira, L. J. C., Costa, M.H., Soares-Filho, B.S., Coe, M.T., 2013. Large-scale expansion of agriculture in Amazonia may be a no-win scenario. *Environ. Res. Lett.* 8, 024021. doi:10.1088/1748-9326/8/2/024021
- Panday, P. K., Coe, M. T., Macedo, M. N., Lefebvre, P., Castanho, A. D. A. 2015. Deforestation offsets water balance changes due to climate variability in the Xingu River in eastern Amazonia *J. Hydrol.* 523 822–9.
- Paredes-Trejo, F.J., Barbosa, H. A., Lakshmi Kumar, T. V. 2017. Validating CHIRPS-based satellite precipitation estimates in Northeast Brazil. *J. Arid Environ.* 139, 26–40.
- Ramoelo, A., Majozi, N., Mathieu, R., Jovanovic, N., Nickless, A., Dziki, S. 2014. Validation of Global Evapotranspiration Product (MOD16) using Flux Tower Data in the African Savanna, South Africa. *Remote Sensing*, 6, 7406-7423.
- ROSA, R. 2005. Geotecnologias na geografia aplicada. *Revista do Departamento de Geografia*, 16, 81-90.
- Sampaio, G., Nobre, C., Costa, M.H., Satyamurty, P., Soares-Filho, B.S., Cardoso, M., 2007. Regional climate change over eastern Amazonia caused by pasture and soybean cropland expansion. *Geophysical Research Letters*, 34 (17). doi: 10.1029/2007GL030612.
- Stackhouse, P. W., Westberg, D., Hoell, J. M., Chandler, W. S., Zhang, T. 2015. Prediction of Worldwide Energy Resource (POWER). *Agroclimatology Methodology*. (1.0 Latitude by 1.0 Longitude Spatial Resolution) p. 1–45.
- Silvério, D. V, Brando P M, Macedo M N, Beck P S A, Bustamante M and Coe, M. T. 2015. Agricultural expansion dominates climate changes in southeastern Amazonia: the overlooked non-GHG forcing *Environ. Res. Lett.* 10 104015 Online: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/10/10/104015>.
- Spera, S. A., Galford, G. L., Coe, M. T., Macedo, M. N., & Mustard, J. F. 2016. Land-use change affects water recycling in Brazil's last agricultural frontier. *Global change biology*, 22(10), 3405-3413.
- Tasumi, M., Allen, R.G., Trezza, R. 2008. At-Surface Reflectance and Albedo from Satellite for Operational Calculation of Land Surface Energy Balance. *Journal of Hydrologic Engineering*, 13, 51-63.

VanWey, L. K., Spera, S., Sa, R. de, Mahr, D., & Mustard, J. F. (2013). Socioeconomic development and agricultural intensification in Mato Grosso. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 368(1619). doi:10.1098/rstb.2012.0168

## 6. APÊNDICES

### Apêndice 1. Localização e variáveis observadas em torres de fluxo (*Eddy Covariance*)

Área	Latitude	Longitude	Variáveis observadas
Agrícola	-13,06904	-52,40970	ET, LST, NDVI, albedo
Floresta queimada	-13,07902	-52,38644	ET, LST, albedo
Floresta não perturbada (controle)	-13,08331	- 52,37673	ET, LST, NDVI, albedo

ET = Evapotranspiração; LST= Temperatura Superficial; NDVI=Índice de Vegetação da Diferença Normalizada,

### Apêndice 1.1. Série temporal de dados observados nas torres de fluxo (*Eddy Covariance*).

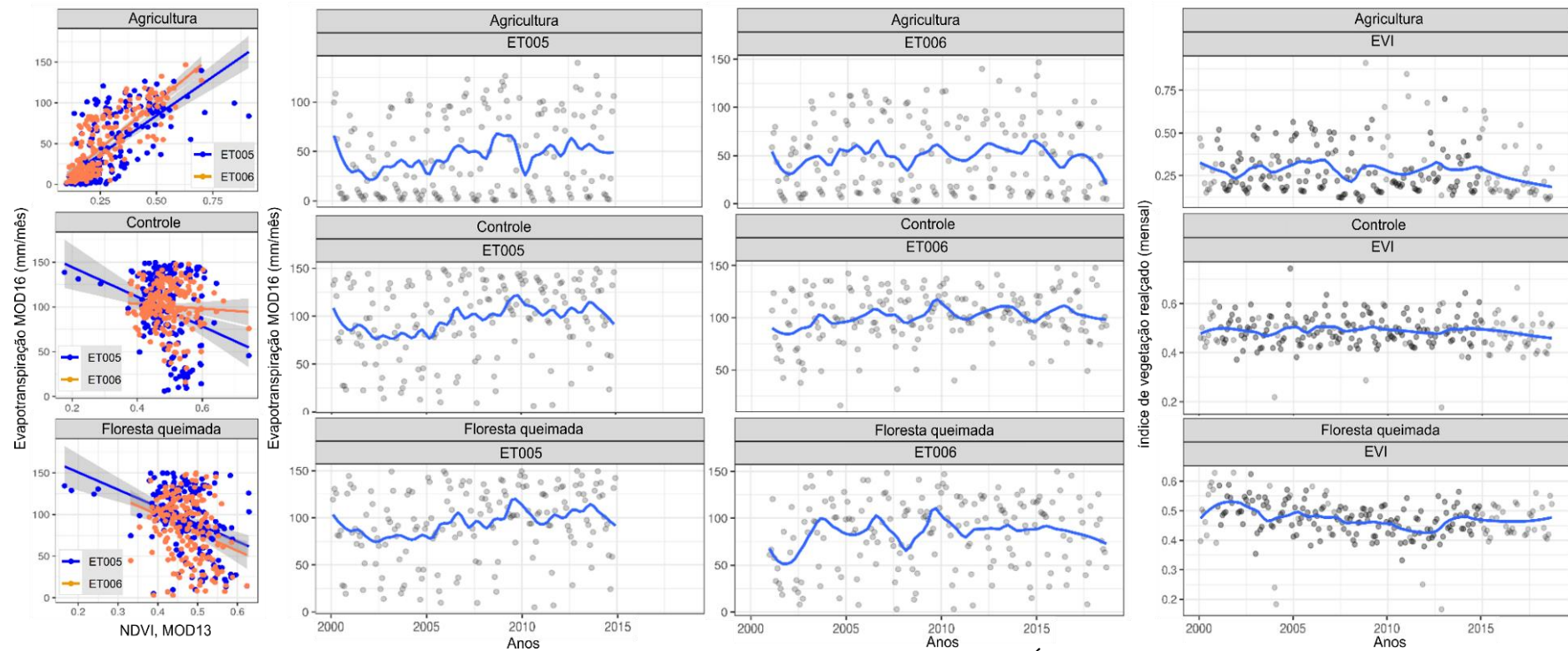
Área	Série temporal para cada variável			
	ET	LST	Albedo	NDVI
Agrícola	01/03/2015	20/08/2018	01/04/2016	01/06/2017
	à	à	à	à
	30/12/2018	30/12/2018	30/12/2018	30/12/2018
Floresta queimada	17/12/2013	22/11/2018	01/02/2015	
	à	à	à	--
	30/12/2018	30/12/2018	30/12/2018	
Floresta não perturbada (controle)	10/12/2013	15/02/2018	01/02/2015	01/12/2018
	à	à	à	à
	30/12/2018	30/12/2018	30/12/2018	30/12/2018

ET = Evapotranspiração; LST= Temperatura Superficial; NDVI=Índice de Vegetação da Diferença Normalizada, -- = Sem observações.

### Apêndice 2. Comparação entre a evapotranspiração observada e estimada pelo algoritmo MOD16 (produto MOD16A2, coleções 005 e 006).

EVAPOTRANSPIRAÇÃO (MOD16A2)		
Agricultura		
	Col. 005	Col. 006
$R^2$		0,23
valor de $p$		< 0,00
BIAS		1,89
PBIAS		116,95
RMSE		0,15
Floresta queimada		
$R^2$	0,27	0,06
valor de $p$	0,00	0,00

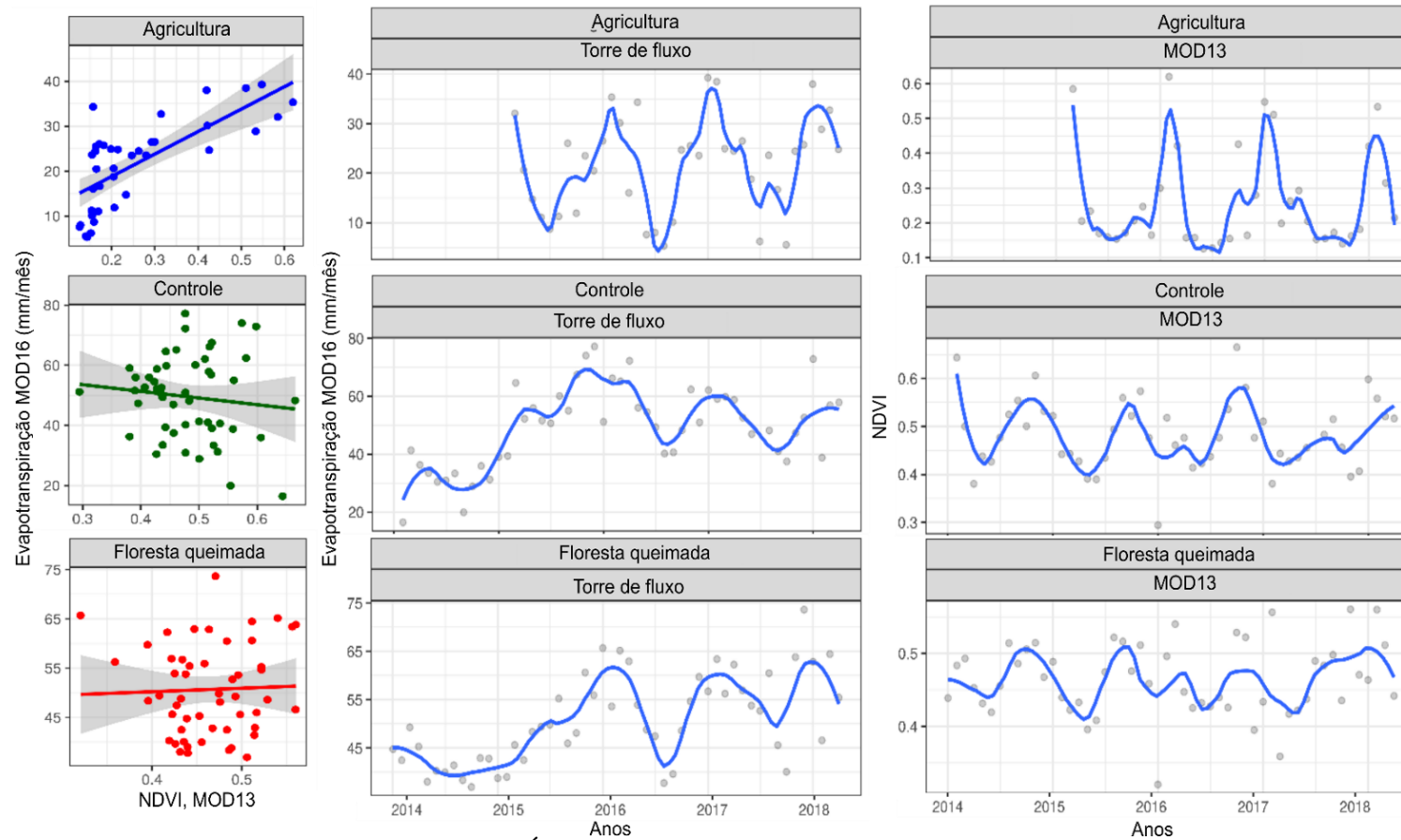
<b>BIAS</b>	-0,41	-0,85
<b>PBIAS</b>	-10,49	-19,22
<b>RMSE</b>	0,08	0,08
<b>Floresta intacta (Controle)</b>		
<b><math>R^2</math></b>	0,11	0,01
<b>valor de <math>p</math></b>	0,00	0,09
<b>BIAS</b>	0,48	-0,33
<b>PBIAS</b>	15,48	-7,82
<b>RMSE</b>	0,10	0,07



**Apêndice 2.1.** Comparação entre os produtos MOD16A2 (evapotranspiração) e MOD13Q1 (Índice de Vegetação Melhorado-EVI), com dados observados a partir de torres de fluxo (*Eddy Covariance*) instaladas em áreas de floresta intacta (controle), queimada e agrícola.

**Apêndice 2.2.** Resultados para a comparação entre os produtos MOD16A2 (evapotranspiração) e MOD13Q1 (Índice de Vegetação Melhorado-EVI), com dados observados a partir de torres de fluxo (*Eddy Covariance*).

<b>MOD13Q1 (EVI) x MOD16A (ET)</b>		
<b>Agricultura</b>		
	Col. 005	Col. 006
<b>R<sup>2</sup></b>	0,46	0,65
<b>Valor de p</b>	0,00	0,00
<b>Coefficientes</b>	-10,95 + 190,51x	y = -12,81 + 227,62x
<b>Floresta queimada</b>		
<b>R<sup>2</sup></b>	0,14	0,09
<b>Valor de p</b>	0,00	0,00
<b>Coefficientes</b>	y = 192,20 + -207,46x	y = 185,73 + -215,54x
<b>Floresta intacta (Controle)</b>		
<b>R<sup>2</sup></b>	0,08	0,00
<b>Valor de p</b>	0,00	0,37
<b>Coefficientes</b>	y = 177,35 + -164,94x	114,10 + -26,59x



**Apêndice 2.3.** Comparação entre o produto MOD13Q1 (Índice de Vegetação Melhorado-EVI), e evapotranspiração observada a partir de torres de fluxo (*Eddy Covariance*) instaladas em áreas de floresta intacta (controle), queimada e agrícola.



**Apêndice 2.4.** Resultados para a comparação entre o produto MOD13Q1 (Índice de Vegetação Melhorado-EVI), e evapotranspiração observada a partir de torres de fluxo (*Eddy Covariance*).

<b>MOD13Q1 (EVI) x Evapotranspiração observada</b>	
<b>Agricultura</b>	
<b>R<sup>2</sup></b>	0,52
<b>Valor de p</b>	0,00
<b>Coefficientes</b>	$y = 0,03 + 0,01x$
<b>Floresta queimada</b>	
<b>R<sup>2</sup></b>	0,00
<b>Valor de p</b>	0,79
<b>Coefficientes</b>	$y = 0,45 + 0,00x$
<b>Floresta intacta (Controle)</b>	
<b>R<sup>2</sup></b>	0,01
<b>Valor de p</b>	0,43
<b>Coefficientes</b>	$y = 0,51 + -0,00x$

**Apêndice 3.** Comparação entre dados observados (albedo, evapotranspiração, temperatura superficial e Índice de Vegetação da Diferença Normalizada) e estimados.

<b>EVAPOTRANSPIRAÇÃO, EEFLUX-METRIC</b>	
<b>Agricultura</b>	
<b>R<sup>2</sup></b>	0,16
<b>valor de p</b>	0,00
<b>BIAS</b>	0,94
<b>PBIAS</b>	46,99
<b>RMSE</b>	0,10
<b>Floresta queimada</b>	
<b>R<sup>2</sup></b>	0,01
<b>valor de p</b>	0,10
<b>BIAS</b>	0,72
<b>PBIAS</b>	15,21
<b>RMSE</b>	0,10
<b>Floresta intacta (controle)</b>	
<b>R<sup>2</sup></b>	0,00
<b>valor de p</b>	0,94
<b>BIAS</b>	-0,66
<b>PBIAS</b>	13,95
<b>RMSE</b>	0,11
<b>ALBEDO, EEFLUX-METRIC</b>	
<b>Agricultura</b>	
<b>R<sup>2</sup></b>	0,11
<b>valor de p</b>	0,01
<b>BIAS</b>	-0,09
<b>PBIAS</b>	-30,27
<b>RMSE</b>	0,008
<b>Floresta queimada</b>	
<b>R<sup>2</sup></b>	0,04
<b>valor de p</b>	0,00
<b>BIAS</b>	-0,017
<b>PBIAS</b>	-12,37
<b>RMSE</b>	0,002

<b>Floresta intacta (controle)</b>	
$R^2$	0,05
valor de $p$	0,94
BIAS	-0,66
PBIAS	13,95
RMSE	0,11
<b>TEMPERATURA SUPERFICIAL, EEFLUX-METRIC</b>	
<b>Agricultura</b>	
$R^2$	0,09
valor de $p$	0,02
BIAS	3,27
PBIAS	12,54
RMSE	0,73
<b>Floresta queimada</b>	
$R^2$	0,05
valor de $p$	0,06
BIAS	0,60
PBIAS	3,20
RMSE	0,40
<b>Floresta intacta (controle)</b>	
$R^2$	0,23
valor de $p$	0,03
BIAS	0,5
PBIAS	1,97
RMSE	0,33
<b>ÍNDICE DE VEGETAÇÃO DA DIFERENÇA NORMALIZADA, METRIC-EEFLUX</b>	
<b>Agricultura</b>	
$R^2$	0,55
valor de $p$	0,00
BIAS	-0,12
PBIAS	-32,50
RMSE	0,02
<b>Floresta intacta (controle)</b>	
$R^2$	0,02
valor de $p$	0,26
BIAS	0,08
PBIAS	10,08
RMSE	0,01
<b>ÍNDICE DE VEGETAÇÃO DA DIFERENÇA NORMALIZADA, MOD13Q1</b>	
<b>Agricultura</b>	
$R^2$	0,62
valor de $p$	0,00
BIAS	-0,01
PBIAS	-3,84
RMSE	0,01
<b>Floresta intacta (controle)</b>	
$R^2$	0,27
valor de $p$	0,00
BIAS	0,11
PBIAS	14,14

<b>RMSE</b>	0,02
-------------	------

Apêndice 4. Comparação entre a precipitação mensal observada e a estimada (produtos TRMM\_3B42 e CHIRPS) na Bacia do Rio Xingu.

Local	Local		TRMM				CHIRPS					
	Estações	Latitude	Longitude	R <sup>2</sup>	valor de p	BIAS	PBIAS	RMSE	R <sup>2</sup>	valor de p	BIAS	PBIAS
Agropecuária Malp	-3,3417	-54,0772	0,66	< 0,00	21,37	13,32	3,38	0,75	< 0,00	14,62	9,11	2,66
Agropecuária Três Irmão	-2,7978	-54,2486	0,47	< 0,00	-32,44	-13,83	6,16	0,66	< 0,00	-26,24	-11,30	5,04
Agrovensa	-12,8131	-54,7516	0,49	< 0,00	32,50	20,39	4,32	0,59	< 0,00	12,10	7,38	2,34
Altamira Km-35	-3,2000	-51,8500	--	--	--	--	--	0,89	< 0,00	27,68	16,50	6,45
Boa Esperança	-6,7025	-51,7986	0,33	< 0,00	15,45	9,03	4,8	0,71	< 0,00	4,02	2,40	1,71
Brasil Novo	-3,3007	-52,5419	0,83	< 0,00	-15,40	-8,00	2,3	0,78	< 0,00	-6,43	-3,55	1,67
Canarana	13,5000	-52,5000	--	--	--	--	--	0,25	< 0,00	-32,84	-18,63	16,40
Cláudia	-1,4933	-54,8656	0,42	< 0,00	-49,77	-17,82	6,63	0,45	< 0,00	-55,52	-19,89	6,59
Divineia	-2,9397	-51,8264	0,59	< 0,00	13,63	7,42	3,75	0,75	< 0,00	1,59	0,91	1,86
Estância Rodeio	-3,8419	-53,2417	0,66	< 0,00	16,34	9,39	3,07	0,79	< 0,00	2,70	1,59	1,66
Fazenda Agrochapada	-3,4483	-54,2811	0,66	< 0,00	5,86	3,19	3,11	0,72	< 0,00	-3,60	-1,91	1,99
Fazenda Cipaubá	-3,7231	-51,5681	0,71	< 0,00	8,89	5,14	2,81	0,66	< 0,00	47,39	27,45	3,66
Fazenda Cumaru do Norte	-7,8283	-50,8289	0,62	< 0,00	-3,33	-1,69	2,98	0,74	< 0,00	-9,31	-4,78	1,96
Fazenda Itaguaçu	-3,1381	-54,4439	0,55	< 0,00	15,06	8,24	4,65	0,64	< 0,00	1,01	0,53	3,83
Fazenda Rio Dourado	-8,3269	-51,4603	0,47	< 0,00	6,36	3,57	3,88	0,52	< 0,00	11,19	6,30	3,65
Fazenda Rio Negro	-11,5242	-54,3589	0,61	< 0,00	14,25	6,92	3,98	0,68	< 0,00	10,48	5,16	3,47
Fazenda Santa Emília	-10,5392	-53,6088	0,55	< 0,00	40,54	23,90	4,35	0,75	< 0,00	8,82	4,80	2,21
Fazenda Sete de Setembro	-13,8836	-52,4127	0,75	< 0,00	17,95	10,75	2,60	0,81	< 0,00	5,80	3,55	1,61
Fazenda Tanguro	-13,0750	-52,3890	0,64	< 0,00	22,90	13,20	4,82	0,63	< 0,00	15,63	8,88	4,57
São Felix do Xingu	-6,6333	-51,9667	0,65	< 0,00	25,22	18,01	7,88	0,65	< 0,00	9,06	6,48	5,66
Itapéua do Pará	-2,3364	-52,9186	0,65	< 0,00	9,15	5,08	2,96	0,80	< 0,00	4,05	2,33	1,57
Km-23 Transamazônica	-3,2000	-52,2167	--	--	--	--	--	0,67	< 0,00	-3,73	-2,70	5,23
Monte Alegre do	-4,6656	-52,7203	0,56	< 0,00	20,38	15,14	2,86	0,75	< 0,00	26,03	19,63	1,61

Xingu												
Núcleo Colonial Rio Ferro	-12,5178	-54,9125	0,69	< 0,00	13,06	7,27	2,94	0,70	< 0,00	11,10	6,13	2,60
Porto do Moz	-1,7333	-52,2333	0,85	< 0,00	-12,70	-6,24	2,23	0,88	< 0,00	-17,99	-9,16	1,25
Santa Cruz do Suaia	-12,6219	-52,0589	0,51	< 0,00	58,27	40,57	5,83	0,61	< 0,00	43,38	29,49	4,70
Senador José Porfírio	-2,5867	-51,9481	0,73	< 0,00	19,33	10,37	2,92	0,77	< 0,00	14,42	7,74	2,62
SuaiaLiquilândia	-11,7300	-51,9889	0,69	< 0,00	-6,18	-2,91	3,59	0,77	< 0,00	-10,57	-5,42	2,02
Vila São Jose do Xingu	-10,8072	-52,7461	0,64	< 0,00	17,72	9,45	3,59	0,68	< 0,00	13,50	7,12	2,80
Vila União da Floresta	-3,5181	-53,1406	0,78	< 0,00	-1,54	-0,94	2,14	0,73	< 0,00	19,40	12,05	2,32
<b>Média Geral</b>	--	--	<b>0,58</b>	<b>&lt; 0,00</b>	<b>8,77</b>	<b>4,82</b>	<b>0,48</b>	<b>0,64</b>	<b>&lt; 0,00</b>	<b>2,65</b>	<b>1,47</b>	<b>0,35</b>

Apêndice 4.1. Comparação entre a precipitação anual observada e a estimada (produtos TRMM\_3B42 e CHIRPS) na Bacia do Rio Xingu.

Estações	Local		TRMM					CHIRPS				
	Latitude	Longitude	R <sup>2</sup>	valor de p	BIAS	PBIAS	RMSE	R <sup>2</sup>	valor de p	BIAS	PBIAS	RMSE
Agropecuária Malp	-3,3417	-54,0772	0,43	< 0,00	238,36	9,16	87,99	0,25	< 0,02	233,91	9,11	88,38
Agropecuária Três Irmão	-2,7978	-54,2486	0,28	< 0,00	-491,75	-13,88	-13,88	0,70	< 0,00	-400,66	-11,30	163,51
Agrovensa	-12,8131	-54,7516	0,59	< 0,00	458,63	19,83	133,64	0,61	< 0,00	196,88	7,38	84,99
Altamira Km-35	-3,2000	-51,8500	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
Boa Esperança	-6,7025	-51,7986	0,29	< 0,03	278,72	-8,00	105,56	0,67	< 0,00	-82,51	2,40	69,59
Brasil Novo	-3,3007	-52,5419	0,73	< 0,00	-324,20	-8,00	2,3	0,74	< 0,00	-142,76	-3,55	72,91
Canarana	13,5000	-52,5000	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
Cláudia	-1,4933	-54,8656	0,65	< 0,00	-809,68	-17,82	229,70	0,61	< 0,00	-918,08	-19,89	268,75
Divineia	-2,9397	-51,8264	0,35	< 0,00	209,05	7,42	126,88	0,64	< 0,00	26,53	0,91	58,93
Estância Rodeio	-3,8419	-53,2417	0,29	< 0,01	287,86	9,39	121,24	0,66	< 0,00	48,77	1,59	58,57
Fazenda Agrochapada	-3,4483	-54,2811	0,68	< 0,00	94,34	3,19	84,91	0,69	< 0,00	-613,74	-1,91	58,29
Fazenda Cipauba	-3,7231	-51,5681	0,67	< 0,00	181,22	5,14	132,09	0,73	< 0,00	974,85	27,45	232,79

Fazenda Cumaru do Norte	-7,8283	-50,8289	0,57	< 0,00	-63,56	-1,69	100,93	0,80	< 0,00	-180,38	-4,78	58,48
Fazenda Itaguaçu	-3,1381	-54,4439	0,48	< 0,00	220,90	8,24	163,62	0,62	< 0,00	14,67	0,53	103,10
Fazenda Rio Dourado	-8,3269	-51,4603	0,66	< 0,00	110,45	3,57	115,19	0,72	< 0,00	196,73	6,30	106,34
Fazenda Rio Negro	-11,5242	-54,3589	0,82	< 0,00	205,24	6,92	78,21	0,80	< 0,00	155,13	5,16	89,82
Fazenda Santa Emília	-10,5392	-53,6088	0,59	< 0,00	603,98	23,90	162,90	0,87	< 0,00	137,80	4,80	60,06
Fazenda Sete de Setembro	-13,8836	-52,4127	0,61	< 0,00	307,80	10,75	95,12	0,60	< 0,00	104,44	3,55	51,25
Fazenda Tanguro	-13,0750	-52,3890	0,36	< 0,04	395,52	13,20	157,10	0,52	< 0,01	267,14	8,88	127,56
Felix do Xingu	-6,6333	-51,9667	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
Itapéua do Pará	-2,3364	-52,9186	--	--	--	--	164,92	0,57	< 0,00	92,54	2,33	75,16
Km-23 Transamazônica	-3,2000	-52,2167	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
Monte Alegre do Xingu	-4,6656	-52,7203	0,51	< 0,00	440,50	15,14	126,86	0,66	< 0,00	586,66	19,63	100,35
Núcleo Colonial Rio Ferro	-12,5178	-54,9125	0,74	< 0,00	220,08	7,27	81,20	0,65	< 0,00	187,03	6,13	82,84
Porto do Moz	-1,7333	-52,2333	0,49	< 0,00	-285,32	-6,24	97,87	0,71	< 0,00	-416,84	-9,16	78,11
Santa Cruz do Suia	-12,6219	-52,0589	0,30	< 0,04	878,50	40,57	248,19	0,41	< 0,02	647,31	29,49	181,08
Senador José Porfírio	-2,5867	-51,9481	0,67	< 0,00	394,42	10,37	132,26	0,83	< 0,00	296,97	7,74	99,45
SuiaLiquilândia	-11,7300	-51,9889	0,69	< 0,00	-2,91	-6,18	3,59	0,86	< 0,00	-169,11	-5,42	63,63
Vila São Jose do Xingu	-10,8072	-52,7461	0,76	< 0,00	294,70	9,45	104,14	0,67	< 0,00	224,60	7,12	105,57
Vila União da Floresta	-3,5181	-53,1406	0,73	< 0,00	-33,66	-0,94	89,67	0,76	< 0,00	416,30	12,05	117,84
<b>Média Geral</b>	<b>--</b>	<b>--</b>	<b>0,50</b>	<b>&lt; 0,00</b>	<b>161,43</b>	<b>4,94</b>	<b>18,04</b>	<b>0,61</b>	<b>&lt; 0,00</b>	<b>15,20</b>	<b>0,5</b>	<b>12,86</b>