Revista Brasileira de Climatologia
Brazilian Journal of Climatology
OPEN ACCESS

TERMODINÂMICA NOTURNA DOS ECOSSISTEMAS AMAZÔNICOS

The Nocturnal Thermodynamics of Amazonian Ecosystems

La Termodinámica Nocturna de los Ecosistemas Amazónicos

Iramaia J.C. de Paulo
Grupo de Pesquisa de Física Ambiental/Universidade Federal de Mato Grosso (UFMT), Cuiabá-MT, Brasil
irafisufmt@gmail.com

Hozana S. Ferreira
Grupo de Pesquisa de Física Ambiental/Universidade Federal de Mato Grosso (UFMT), Cuiabá-MT, Brasil
hznsilva@gmail.com

Sérgio R. de Paulo
Grupo de Pesquisa de Física Ambiental/Universidade Federal de Mato Grosso (UFMT), Cuiabá-MT, Brasil
sergio@fisica.ufmt.br

José S. Nogueira
Grupo de Pesquisa de Física Ambiental/Universidade Federal de Mato Grosso (UFMT), Cuiabá-MT, Brasil
parananogueira@gmail.com

Renata G. Aguiar
Departamento de Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Rondônia (UNIR), Ji-Paraná-RO, Brasil
rgaguiar@unir.br

Marta O. Sá
Instituto Nacional de Pesquisa da Amazônia, /LBA Programa, Manaus-AM, Brasil
martasa.inpa@gmail.com

Resumo: O objetivo deste artigo é estabelecer um modelo teórico não-empírico para o resfriamento noturno dos ecossistemas amazônicos dentro do escopo de compreender melhor a termodinâmica de

tais ecossistemas. As características noturnas de temperatura em cinco diferentes ecossistemas da Amazônia brasileira foram estudadas, a saber, floresta profunda, floresta média, floresta de transição, savana (Cerrado) e uma floresta sazonalmente inundada (Pantanal). Durante um ano, foram analisados dados micrometeorológicos, especificamente temperatura e umidade do ar. Foi observado que a temperatura em todos os ecossistemas diminui a uma taxa de 0,9 °C/h no início da noite, que é coerente com a taxa de resfriamento teórica esperada em condições de ar "seco", ou seja, quando a umidade não exerce influência significativa na termodinâmica do ecossistema. Os dados analisados revelaram que quando a umidade relativa é superior a aproximadamente 85% no meio da noite, a taxa de resfriamento cai mais de uma ordem de magnitude até o final da noite, em todos os ecossistemas. Isso significa que a água presente no ar efetivamente libera energia para o meio ambiente. Como hipoteticamente o efeito é produzido pela coalescência de aglomerados de duas moléculas de água, a quantidade de energia necessária para produzir o efeito corresponde a uma taxa de coalescência de 10^{22} aglomerados por metro cúbico por hora, uma quantidade muito pequena para ser devidamente detectada por sistemas de medição de fluxo.
Palavras-chave: Modelagem de temperatura. Termodinâmica de ecossistemas. Taxa de resfriamento noturno. Fluxos de calor. Entropia.

Abstract: The purpose of this article is to establish a non-empirical theoretical model for the nocturnal cooling of Amazonian ecosystems with the aim of better understanding the thermodynamics of such ecosystems**.** The nocturnal features of temperature in five different ecosystems in the Brazilian Amazon region have been studied, namely deep forest, medium forest, transitional forest, savannah (Cerrado) and a seasonally flooded forest (Brazilian Pantanal). Over the course of one year, micrometeorological data, specifically air temperature and humidity, were analysed. It has been observed that temperature in all ecosystems decreases at a rate of 0.9°C/h at the beginning of the night. The above rate is coherent with the theoretical cooling rate expected in conditions of "dry" air, i.e., when humidity does not exert a significant influence on the ecosystem thermodynamics. Data analysed revealed that when relative humidity is higher than approximately 85% in the middle of the night, the cooling rate drops down more than one order of magnitude until the end of the night, in all ecosystems. This means that the water present in the air effectively releases energy into the environment. Since hypothetically the effect is produced by the coalescence of clusters of two water molecules, the amount of energy necessary to produce the effect corresponds to a coalescence rate of 10^{22} clusters per cubic meter per hour, a very small quantity to be properly detected by latent heat flux measurement systems.
Keywords: Hourly temperature modelling. Forest thermodynamics. Nocturnal cooling rate. Heat flux. Entropy.

Resumen: El objetivo de este artículo es establecer un modelo teórico no empírico para el enfriamiento nocturno de los ecosistemas amazónicos en el marco de una mejor comprensión de la termodinámica de dichos ecosistemas. Se estudiaron las características nocturnas de la temperatura en cinco ecosistemas diferentes de la región amazónica brasileña, a saber, selva profunda, selva media, selva de transición, sabana (Cerrado) y selva estacionalmente inundable (Pantanal brasileño). Durante un año se analizaron datos micrometeorológicos, en concreto temperatura y humedad del aire. Se ha observado que la temperatura en todos los ecosistemas desciende a razón de 0,9 °C/h al comienzo de la noche. La tasa anterior es coherente con la tasa de enfriamiento teórica esperada en condiciones de aire "seco", es decir, cuando la humedad no ejerce una influencia significativa en la termodinámica del ecosistema. Los datos analizados revelaron que cuando la humedad relativa supera aproximadamente el 85 % en medio de la noche, la tasa de enfriamiento desciende más de un orden de magnitud hasta el final de la noche, en todos los ecosistemas. Esto significa que el agua presente en el aire libera efectivamente energía al medio ambiente. Dado que hipotéticamente el efecto se produce por la

coalescencia de cúmulos de dos moléculas de agua, la cantidad de energía necesaria para producir el efecto corresponde a una tasa de coalescencia de 10^{22} cúmulos por metro cúbico por hora, una cantidad muy pequeña para ser detectada adecuadamente por calor latente. sistemas de medida de flujo de calor latente.

Palabras clave: Modelado de temperatura horaria. Termodinámica forestal. Tasa de enfriamiento nocturno. Flujo de calor. Entropía.

Submetido em: 10/05/2022
Aceito para publicação em: 18/01/2023
Publicado em: 20/01/2023

1. INTRODUÇÃO

Os ecossistemas tropicais têm um papel importante no clima global e especificamente na termodinâmica da baixa atmosfera (CHAMBERS; ARTAXO, 2017; SCOTT *et al*., 2018; O'CONNEL *et al*., 2018; KOOPERMAN *et al*., 2018). No entanto, vários aspectos sobre o papel termodinâmico das florestas tropicais e outros ecossistemas não são bem conhecidos. Por exemplo, resultados sobre o balanço de fluxos de energia, medidos por métodos documentados e amplamente empregados, não encontram fechamento na maioria das pesquisas relatadas na literatura (FOKEN, 2008) para todos os ecossistemas, em geral. Portanto, o estudo de processos termodinâmicos acoplados a diferentes ecossistemas tropicais é importante para aprimorar o conhecimento sobre a influência dos sistemas no clima global.

Uma pesquisa de Paulo, de Paulo e de Decker (2015) relatou que a temperatura do ar é uma das variáveis micrometeorológicas que carregam mais informações sobre a dinâmica dos ecossistemas. Embora esta variável tenha sido medida em vários pontos da superfície da Terra durante séculos, atualmente não existe uma expressão matemática confiável que descreva o comportamento horário da variável, com exceção de formulações semi-empíricas ou abordagens numéricas (CESARACCIO *et al*., 2001; SOUZA *et al*., 2011; REICOSKY *et al*., 1989; FLOYD; BRADDOCK, 1984; GEURTS, 1983; PARTON e LOGAN, 1981; JOHNSON; FITZPATRICK, 1977; WALTER, 1967). A maioria dos modelos é baseada em uma representação matemática de uma série de funções senoidais e exponenciais para a temperatura diária do ar e ou mesmo outras funções senoidais para a temperatura noturna. Consequentemente, não há explicação termodinâmica para a evolução horária da temperatura do ar explicitamente estabelecida na literatura científica. O objetivo deste artigo é estabelecer um modelo teórico não-empírico para o resfriamento noturno dos ecossistemas amazônicos dentro do escopo de compreender melhor a termodinâmica de tais ecossistemas.

O estudo atual encontrou algumas semelhanças nos parâmetros termodinâmicos para vários ecossistemas tropicais brasileiros, especificamente no período noturno, o que pode permitir a construção de um modelo universal para a termodinâmica desses ecossistemas. O principal resultado é que, durante a noite, nos cinco ecossistemas estudados, a temperatura diminui com uma taxa global de 0,9 °C por hora quando a umidade relativa é inferior a 85% e a taxa de resfriamento cai para menos de 0,1 °C /h quando for superior a 85%.

2. METODOLOGIA

Medições de temperatura do ar (T) e umidade relativa (UR) foram realizadas por sensores automatizados em cinco diferentes ecossistemas brasileiros: floresta profunda, floresta de fronteira, floresta de transição, cerrado e Pantanal. As principais características de cada ecossistema são descritas a seguir.

Na floresta profunda, as medições foram feitas em uma torre de 60 m em São Gabriel da Cachoeira (0,15N; 66,45W), um dos segmentos da Floresta Amazônica intocados por atividades humanas. A precipitação média neste local na floresta tropical situa-se entre 3.000 e 3.500 mm por ano (SÁ *et al*., 2012).

O sítio florestal fronteiriço encontra-se na Reserva Rebio-Jaru (61,56 W; 10,46 S). A altura média do dossel é de 33 m. O local encontra-se dentro da Floresta Amazônica, mas próximo a zonas agrícolas (aproximadamente 50 km) com intensa transformação antrópica, onde a taxa média de precipitação (2100 mm/a) é consideravelmente menor do que na floresta profunda (ANDRADE *et al*., 2009).

As medições na floresta de transição foram feitas em uma torre de 40 m, em um ecossistema dentro de uma região entre a Floresta Amazônica e o cerrado, em uma fazenda (Macaraí) no município de Sinop (55,19 W; 11,25 S) (ANDRADE *et al*., 2009). A precipitação média é de 2.000 mm/ano e o ecossistema é caracterizado por uma estação seca (junho-agosto) e outra chuvosa (dezembro-março), com um dossel de aproximadamente 28 m de altura (PRIANTE FILHO *et al*., 2004).

O sítio de cerrado encontra-se em uma pastagem abandonada em uma fazenda (Miranda) no bairro da cidade de Cuiabá MT, Brasil (56,02W, 15,72S). O local é caracterizado por uma estação seca e chuvosa com precipitação média de 1200 mm/ano (PALACIOS *et al*., 2015).

Por fim, o sítio Pantanal (56,41W, 16,50S) encontra-se dentro de uma área sazonalmente inundada, em um local denominado Baía das Pedras, com período seco (julho-novembro) e inundado (dezembro-junho). A precipitação é de aproximadamente 1500 mm/ano, 80% dos quais ocorrem durante a estação chuvosa. A vegetação constitui uma espécie de floresta sucessional, com altura média de 6m (DALMAGRO *et al*., 2019).

Todas as medições foram feitas a poucos metros acima do dossel por sistemas automatizados, coletando dados a cada 10 min (para floresta profunda e Pantanal) e a cada

30 min (para floresta de fronteira, floresta de transição e Cerrado). Detalhes sobre o equipamento podem ser encontrados nas referências citadas na seção atual. Os dados analisados correspondem a 2008 para a floresta profunda (São Gabriel da Cachoeira) e a floresta de fronteira (Jaru); 2002 para a floresta de transição (Sinop); 2013 para o Cerrado (fazenda Miranda); 2012 e 2013 para o Pantanal (Baia das Pedras).

Os dados foram escolhidos de forma a utilizar séries temporais com a máxima consistência possível, em períodos que os equipamentos funcionaram bem. Essa questão é importante pois, frequentemente, os coleta de dados apresenta falhas por diversos motivos: ação de animais e insetos, condições climáticas adversas, necessidade de recalibração e acúmulo de sujeira. Consequentemente, os períodos a que se referem os dados nos diversos ecossistemas são diferentes, o que, em princípio, poderia sugerir algum viés devido a possível dependência da termodinâmica local com variabilidades climáticas. Contudo, apesar da grande diversidade dos ecossistemas em termos de período de aquisição de dados, pluviosidade, tipo de solo, insolação, altura média e densidade da vegetação, os dados analisados sugerem uniformidade na dinâmica térmica básica para todos os ecossistemas durante o período noturno, conforme será descrito a seguir.

O primeiro passo para construir um modelo para a termodinâmica de ecossistemas noturnos foi considerar uma condição onde a influência da umidade era pouco importante, chamada de seca no trabalho atual.

3. DESENVOLVIMENTO

3.1 O Modelo Seco

O modelo seco para a temperatura leva em consideração que a variação da temperatura está intimamente relacionada ao equilíbrio entre a radiação solar líquida (incidente – refletida) e a radiação infravermelha emitida, como é feito no caso de vários modelos globais clássicos (HOUGTHON, 2002; NICOLIS; PRIGOGINE, 1989), levando à seguinte equação:

$$\rho_a c_a \frac{dT}{dt} = \alpha R - \gamma \sigma T^4 \quad (1)$$

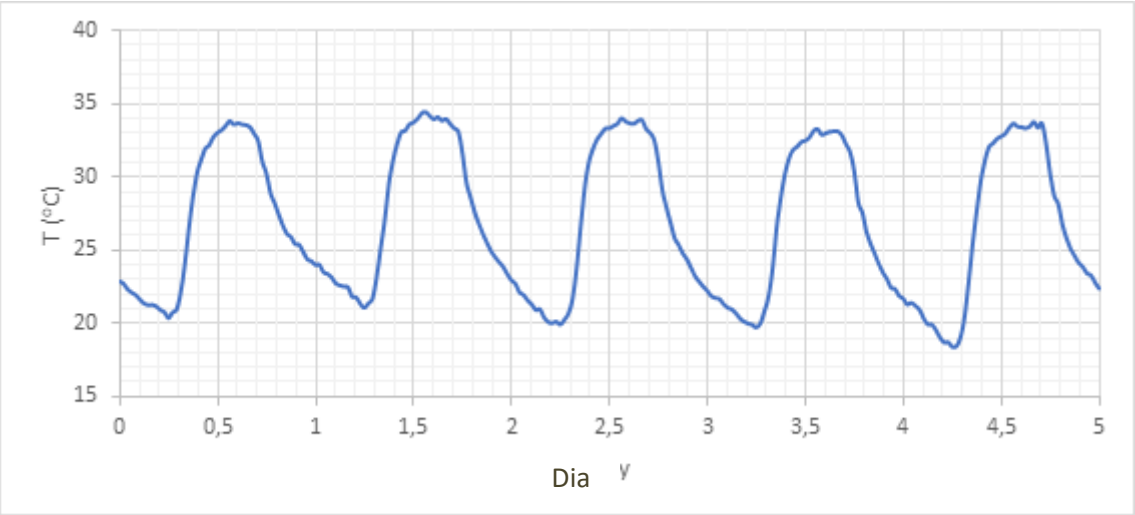
onde ρ_a é a densidade do ar (1.184 Kg/m^3); c_a é o calor específico do ar seco (1012 J/Kg°C); R (W/m^2) é o fluxo líquido de radiação solar (a radiação que é efetivamente absorvida pelo ar ou ecossistema); T(K) é a temperatura do ar; σ (5.67×10^{-8} W m^{-2} K^{-4}) é a constante de Stefan Boltzmann; α and γ são dois parâmetros ajustáveis. Esta equação é obtida em condições em que o efeito de transferência de energia pelo vento é desprezível, assim como pela chuva e nuvens.

O termo do lado esquerdo da equação está relacionado com a variação do calor sensível, enquanto o último termo do lado esquerdo corresponde à lei de Stefan Boltzmann. A dimensão da equação é J/m^3 (densidade de energia), α e ε são dados em m^{-1}. Consequentemente, o significado físico desses dois parâmetros está relacionado aos coeficientes de extinção da radiação no ar.

Para estimar os valores de α e γ para esses ecossistemas brasileiros, foram considerados os dados de um ecossistema de latitude intermediária (Sinop). Neste local, as condições válidas para a eq. 1 são alcançadas devido à baixa intensidade do vento (GRECO *et al*., 1992) e ausência de precipitação levando a condições de baixa umidade no meio do ano (PRIANTE FILHO, *et al*. 2004). A escolha de um ecossistema específico, num período de tempo específico, pode representar alguma limitação frente a possíveis mudanças climáticas e influência de longa distância, como as caracterizadas pelas condições do El Niño. No entanto, dentro de condições de baixa umidade, o comportamento da termodinâmica noturna é caracterizado por uma robusta universalidade, conforme os resultados adiante indicam.

Nas Figuras 1 e 2, estão presentes as séries temporais dos valores experimentais de temperatura e radiação líquida correspondentes aos primeiros dias de junho de 2002, em Sinop. Junho é um mês caracterizado por taxas de chuva muito baixas e baixa umidade. Os dados experimentais mostram que a temperatura aumenta quando a radiação aumenta, mas o valor máximo das duas variáveis não é atingido na mesma hora do dia. A temperatura máxima é atingida aproximadamente às 14h ou 15h, enquanto a radiação máxima ocorre ao meio-dia.

Figura 1 - Série temporal da temperatura medida em Sinop nos cinco primeiros dias de junho de 2002.



Fonte: Elaborado pelos autores (2002).

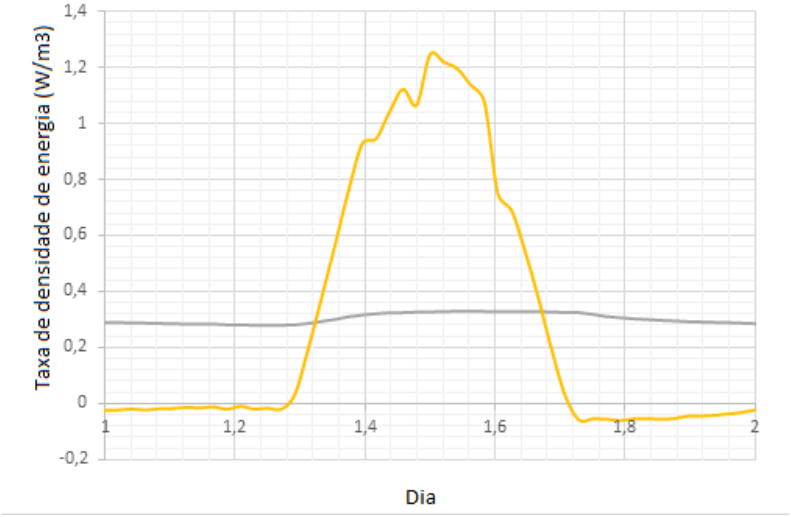
Figura 2 - Série temporal da radiação líquida medida em Sinop nos cinco primeiros dias de junho de 2002.



Fonte: Elaborado pelos autores (2002).

A temperatura tem valores máximos e mínimos diários que não variam muito de um dia para o outro, sugerindo um comportamento muito estável. Adicionalmente, a Equação 1 não é linear e tem pontos fixos quando $\alpha R = \gamma \sigma T^4$. Entretanto R é sempre menor que σT^4, mas se α and γ assumem valores plausíveis, como mostrado na Figura 3, essa condição é atingida duas vezes ao dia.

Figura 3 - Comparação entre αR e $\gamma\sigma T^4$ para o dia 2 de junho de 2002.

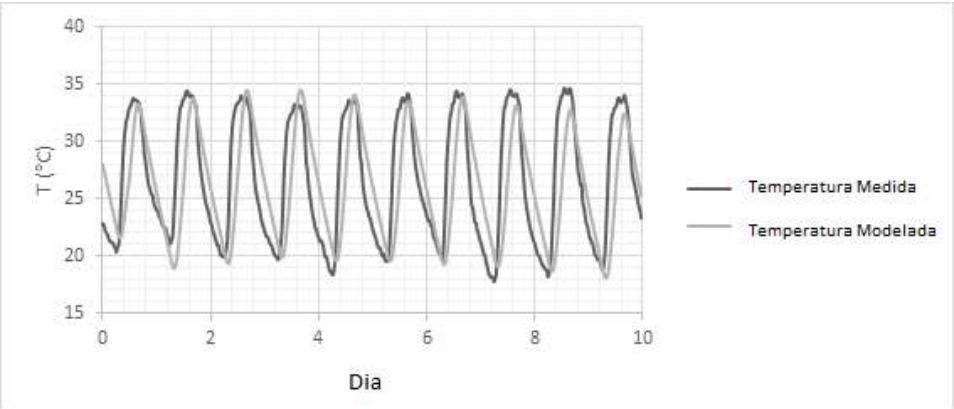


Fonte: Elaborado pelos autores (2002).

Valores plausíveis para α and γ podem ser obtidos considerando que os instantes de tempo correspondentes ao máximo e mínimo da temperatura são iguais aos instantes de tempo em que $\alpha R = \gamma\sigma T^4$. Para os dados de temperatura colhidos em Sinop em junho de 2002, esses valores são 2.7 x 10^{-3} e 6.5 x 10^{-4} m^{-1} respectivamente.

Um algoritmo computacional foi elaborado para calcular numericamente a evolução temporal da temperatura, utilizando a Equação 1. O algoritmo admite, como dados de entrada, os valores experimentais de R calculando interativamente os valores de temperatura esperados ao longo do tempo. A Figura 4 mostra uma série temporal de temperatura assim modelada e comparada com valores experimentais da variável para os primeiros dias de junho de 2002, em Sinop.

Figura 4 - Temperatura modelada comparada com valores experimentais entre os dias 1 e 10 de Junho de 2002.



Fonte: Elaborado pelos autores (2002).

Como pode ser percebido nesta figura, há um padrão semelhante entre características experimentais e teóricas. O modelo reproduz a periodicidade, a amplitude de variação da temperatura e também aproximadamente os instantes de tempo com temperatura máxima e mínima durante o dia. Consequentemente, o modelo principal constituído pela equação pode ser uma boa aproximação para dados reais, levando em consideração que esses dados se referem a um sistema aberto real. No entanto, existem diferenças entre a temperatura atual e os valores dados pelo modelo: durante a primeira metade do dia os valores experimentais aumentam mais rapidamente do que os teóricos, enquanto na segunda metade do dia os valores teóricos diminuem mais linearmente.

A equação 1 é uma equação diferencial não linear que não pode ser resolvida analiticamente porque R varia com o tempo. No entanto, à noite, quando R é zero como uma boa aproximação, é possível obter uma solução analítica. Nesta condição, a Equação 1 é reduzida a:

$$(\rho_a c_a)\frac{dT}{dt} = -\gamma\sigma T^4 \qquad (2)$$

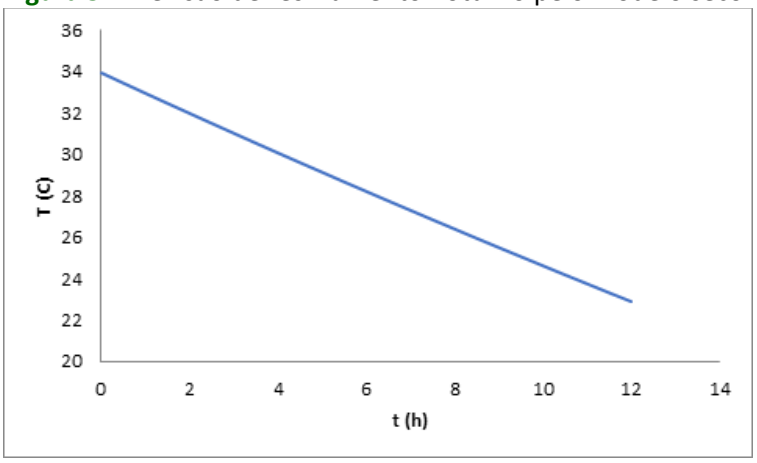
Por integração direta, a temperatura pode ser obtida como uma função do tempo:

$$T(t) = \sqrt[3]{\frac{\rho_a c_a T_0^3}{3\gamma\sigma t T_0^3 + \rho_a c_a}} \qquad (3)$$

onde T_0 é a temperatura no início da noite e t é o intervalo de tempo contado a partir do instante em que a temperatura é T_0.

A Figura 5 mostra a temperatura em função do tempo, seguindo a Equação 3. Apesar da Equação 3 não ser linear, o comportamento da temperatura no intervalo entre 20 e 40ºC é quase linear, correspondendo a uma taxa de resfriamento de cerca de 0.9ºC/hora, para γ=6.5x10^{-4} m^{-1}.

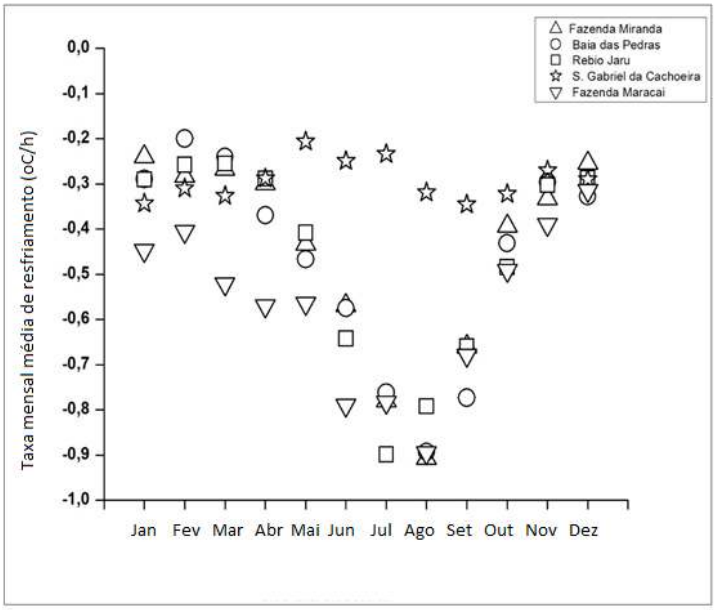
Figura 5 - Previsão de resfriamento noturno pelo modelo seco.



Fonte: Elaborado pelos autores (2002).

Espera-se que durante a noite a umidade relativa aumente com o tempo. Consequentemente, a taxa de resfriamento de 0,9 °C/h deve ser mais realista no início da noite quando a umidade relativa é baixa. De fato, durante a estação seca, nas regiões centrais da América do Sul, quando a precipitação é baixa, a taxa de resfriamento acima pode ser detectada praticamente todas as noites. Isso pode ser observado na Figura 6, onde a taxa média de resfriamento entre 19h e 5h é dada para cada mês do ano e para cada ecossistema em análise.

Figura 6 - Taxa média de resfriamento (°C/h) entre as 19 hs e 5 hs, na Fazenda Miranda, Cerrado (2013), Baía das Pedras (2012 and 2013), Rebio Jaru (2008), S. Gabriel da Cachoeira (2008) e Fazenda Maracaí, Sinop (2002).

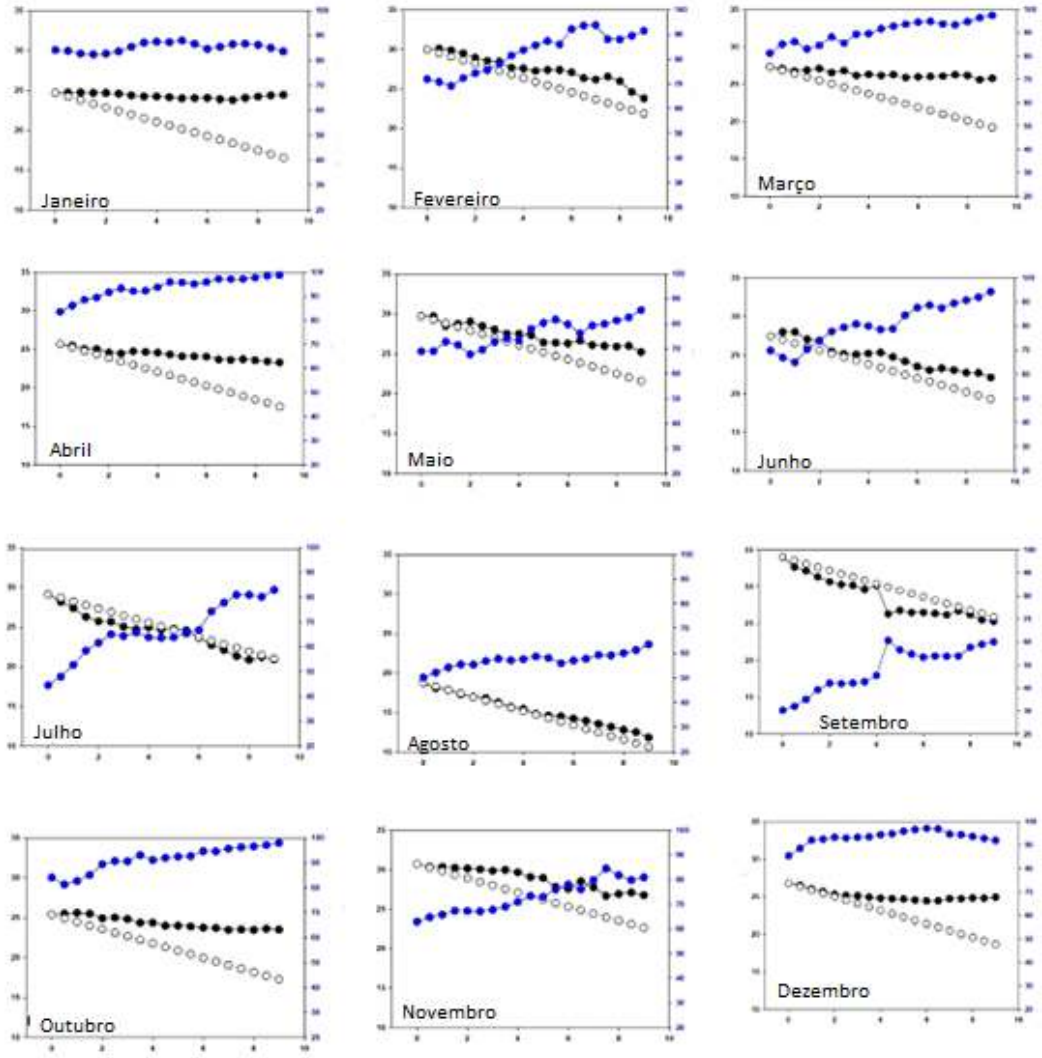


Fonte: Elaborado pelos autores (2002).

3.2. O Efeito da Umidade

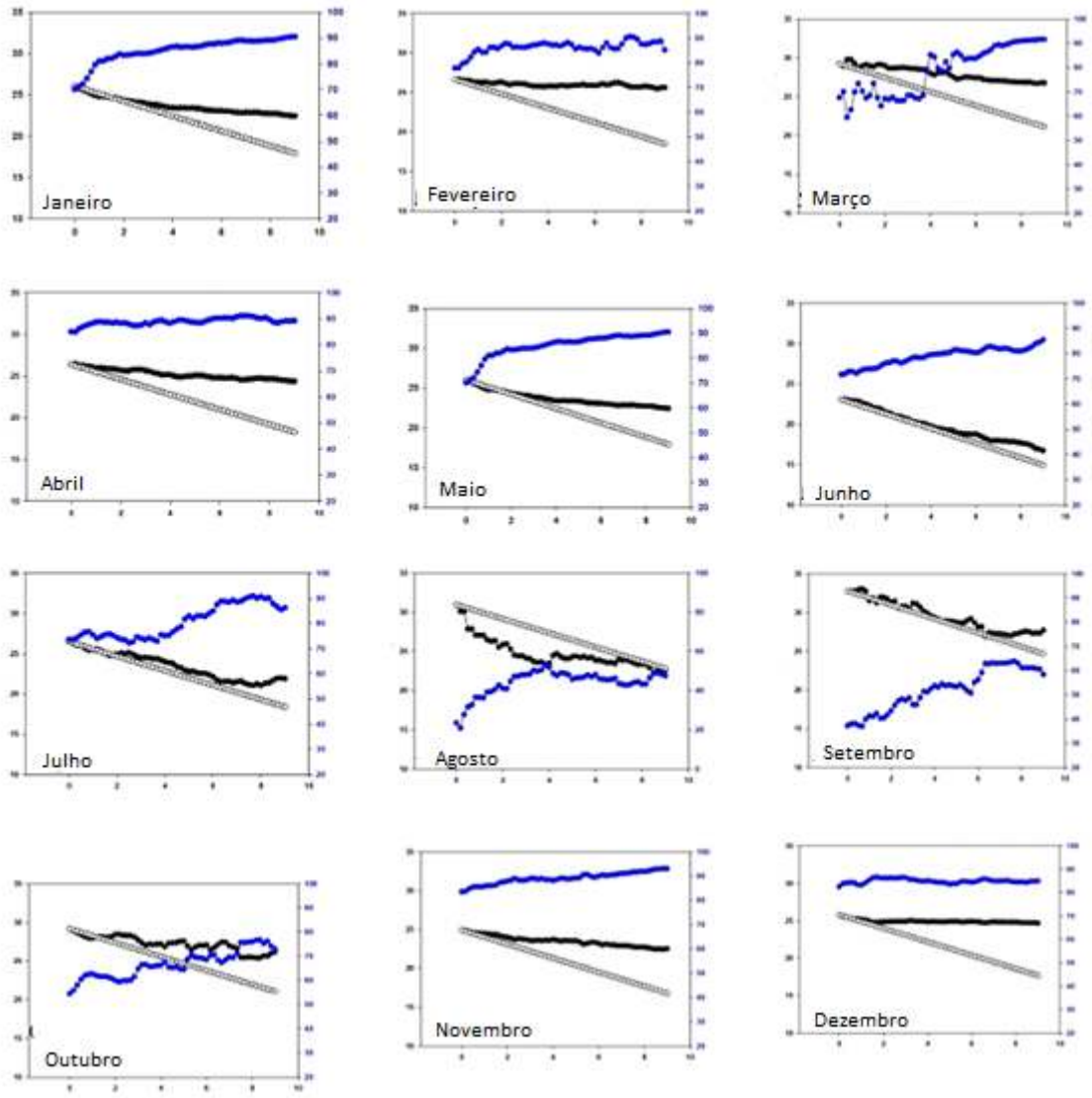
A taxa de resfriamento seco pode realmente ser observada no início da noite na maioria dos dias para todos os ecossistemas. As Figuras 7, 8, 9, 10 e 11 fornecem a variação de temperatura noturna em um dia (escolhido aleatoriamente) para cada mês do ano no Cerrado, Pantanal, floresta periférica, floresta profunda e floresta de transição respectivamente, em comparação com a taxa de resfriamento a seco. O horário inicial considerado é as 20hs, quando a radiação solar pode ser considerada insignificante ao longo do ano para todos os ecossistemas. As figuras também demonstram a evolução temporal da umidade relativa.

Figura 7 - Variação noturna de temperatura na Fazenda Miranda (savana). Valores experimentais (pontos pretos), previsão do modelo seco teórico (pontos brancos) e valores experimentais de umidade relativa (azul) – cada gráfico representa uma noite de um mês diferente do ano.



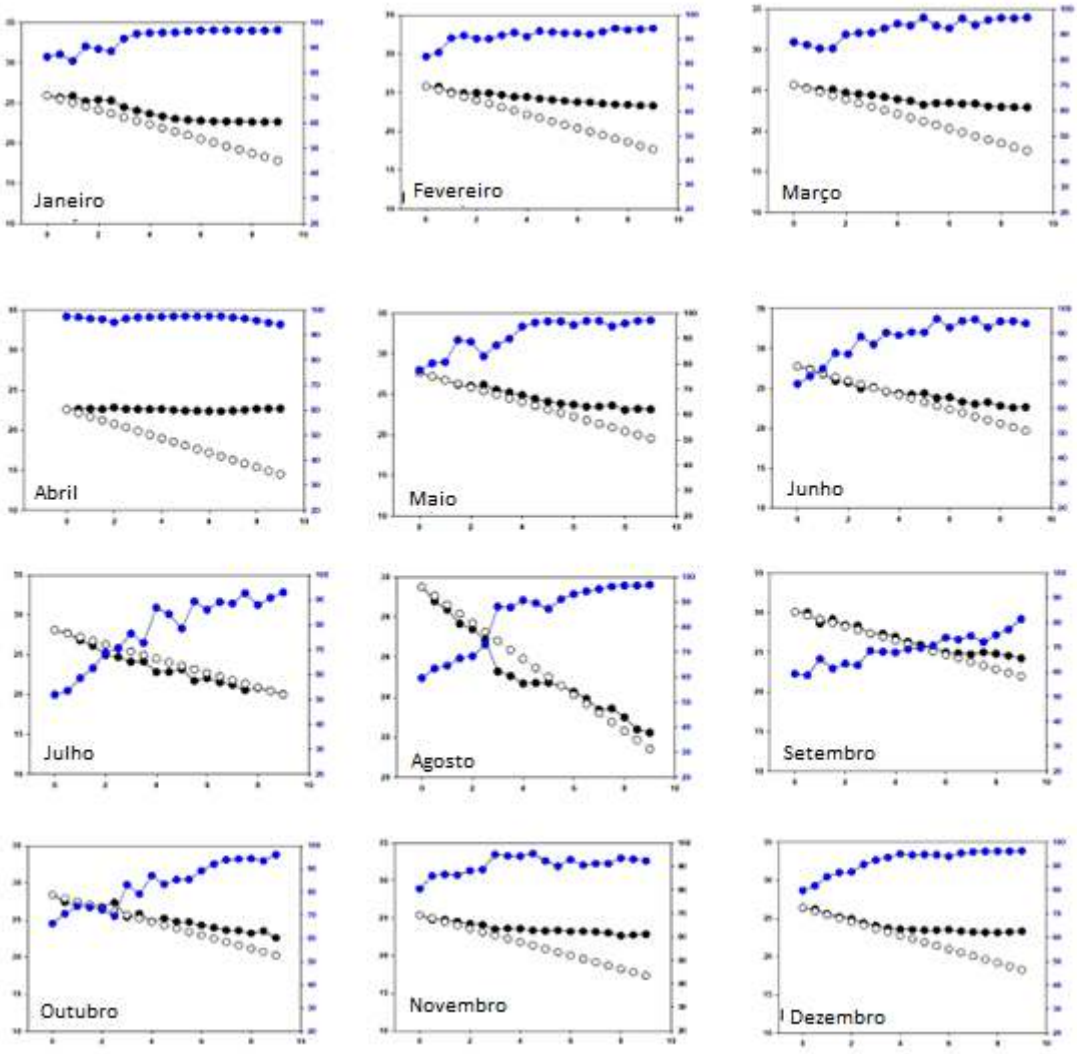
Fonte: Elaborado pelos autores (2002).

Figura 8 - Variação noturna da temperatura na Baia das Pedras (Pantanal). Valores experimentais (pontos pretos), previsão do modelo seco teórico (pontos brancos) e valores experimentais de umidade relativa (azul) - cada gráfico representa uma noite de um mês diferente do ano.



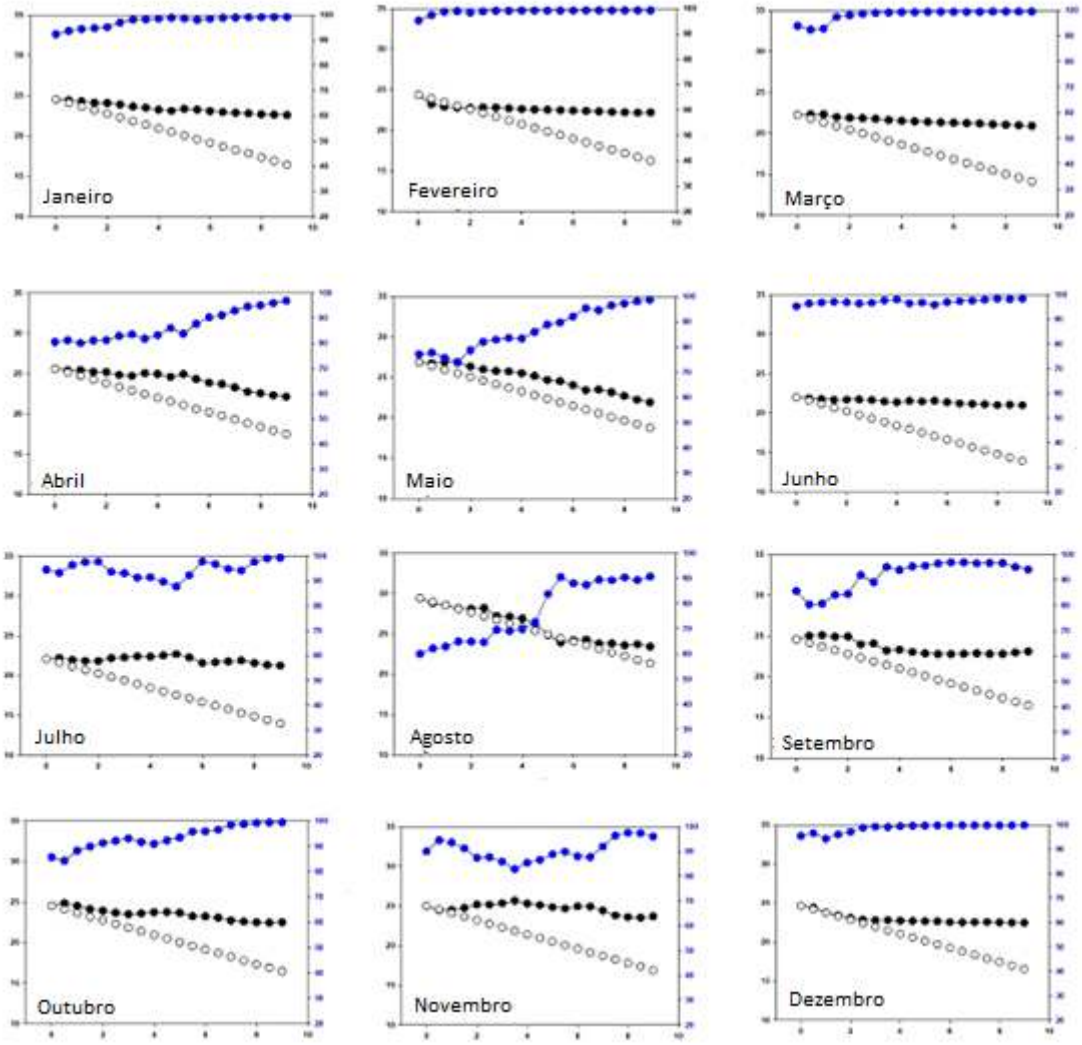
Fonte: Elaborado pelos autores (2002).

Figura 9 - Variação noturna da temperatura na Rebio-Jaru (floresta de periferia). Valores experimentais (pontos pretos), previsão do modelo seco teórico (pontos brancos) e valores experimentais de umidade relativa (azul) - cada gráfico representa uma noite de um mês diferente do ano.



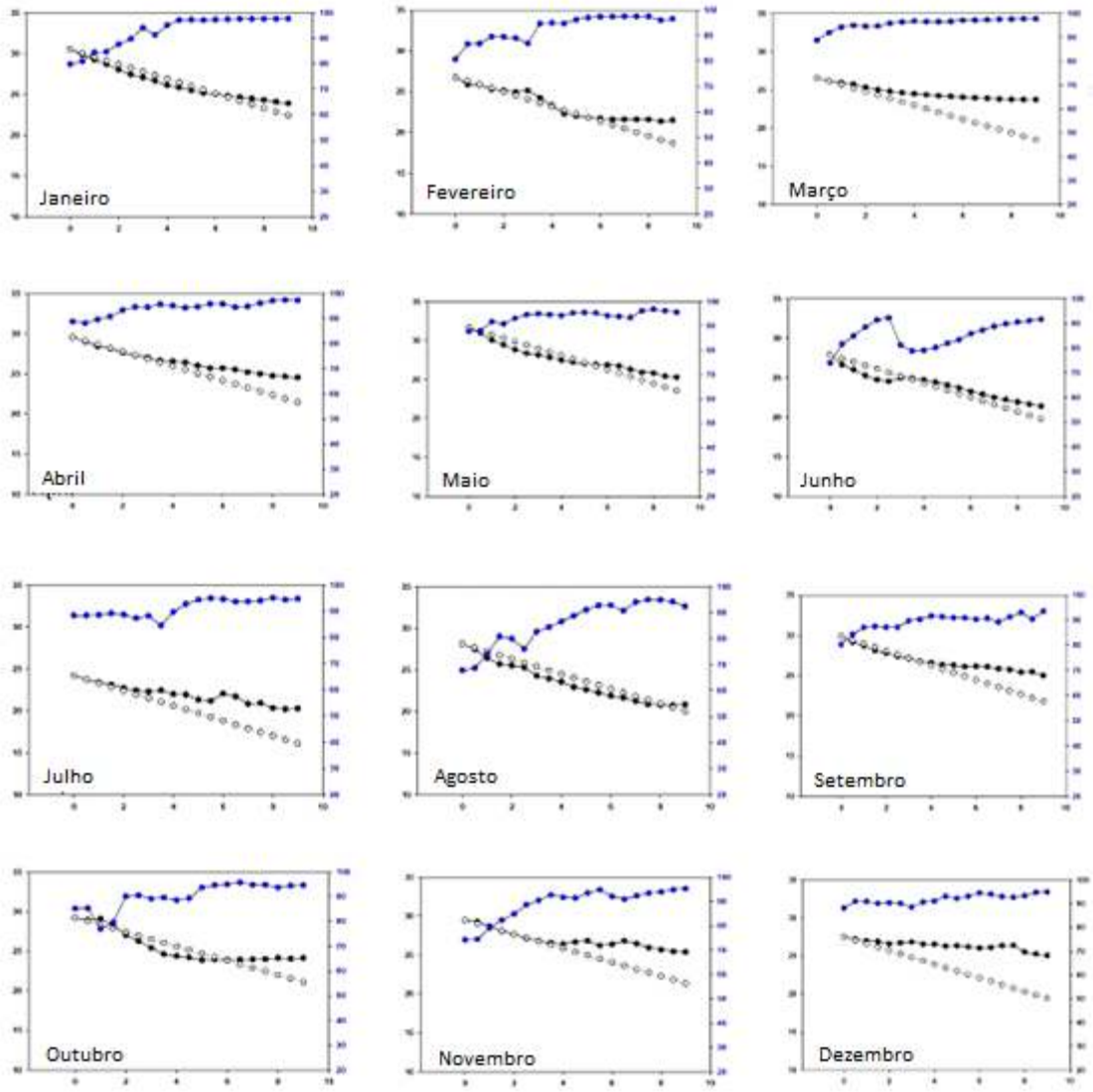
Fonte: Elaborado pelos autores (2002).

Figura 10 - Variação noturna da temperatura em São Gabriel da Cachoeira (floresta profunda). Valores experimentais (pontos pretos), previsão do modelo seco teórico (pontos brancos) e valores experimentais de umidade relativa (azul) - cada gráfico representa uma noite de um mês diferente do ano.



Fonte: Elaborado pelos autores (2002).

Figura 11 - Variação noturna da temperatura na Fazenda Maracaí (floresta de transição). Valores experimentais (pontos pretos), previsão do modelo seco teórico (pontos brancos) e valores experimentais de umidade relativa (azul) - cada gráfico representa uma noite de um mês diferente do ano.



Fonte: Elaborado pelos autores (2002).

A taxa de resfriamento observada no início da noite na maioria dos dias é compatível com 0,9°C/h. Observa-se também que em todos os casos em que essa taxa não se verifica, a umidade relativa foi elevada, tipicamente superior a 85%. Portanto, todos os dados fornecidos podem ser compatíveis com as seguintes declarações:

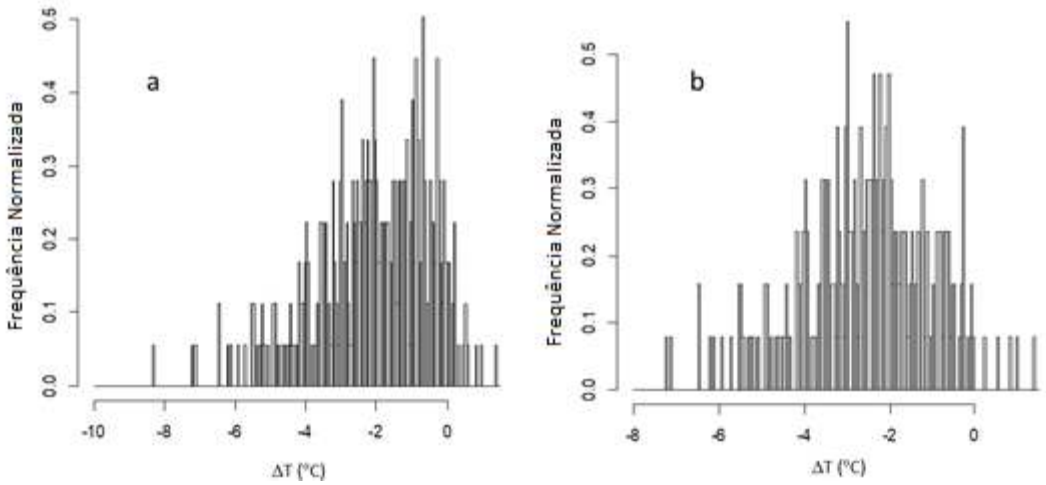
1. quando a umidade relativa é inferior a 85%, a taxa de resfriamento noturno é de 0,9°C/h.

2. quando a umidade relativa é superior a 85%, a taxa de resfriamento noturno cai para taxas significativamente inferiores a 0,9°C/h.

Embora 85% seja apenas um valor de referência, os dados apontam que existe uma diferença fundamental entre a termodinâmica em ecossistemas brasileiros caso a umidade relativa seja inferior ou superior a um intervalo de transição em torno de 85%. Podemos dizer que, em torno de 85%, há uma transição no processo termodinâmico.

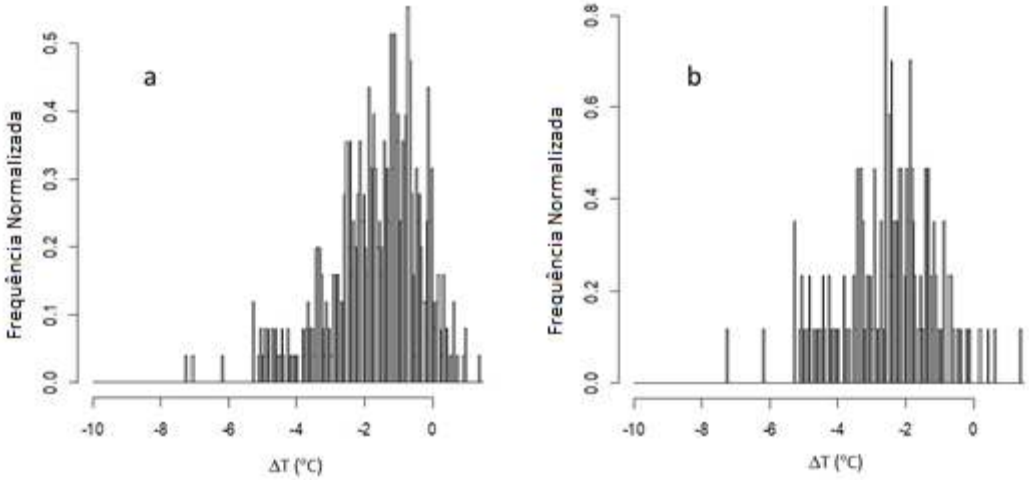
Antes de discutir a transição, vamos mostrar que, estatisticamente, a taxa de resfriamento de 0,9°C/h pode ser considerada para umidade relativa inferior a 85%. As Figuras 12, 13, 14, 15 e 16 fornecem a distribuição da diferença entre a temperatura medida às 20h e a temperatura medida às 23h, levando em consideração (a) todos os dados disponíveis e (b) umidade relativa inferior a 85%. Consequentemente, se a taxa de resfriamento for 0,9°C/h, a diferença de temperatura esperada é (23 – 20) x 0,9 = 2,7°C. Como pode ser visto nas figuras, para todos os ecossistemas, a diferença de temperatura é próxima de 2,7°C para UR < 85%. Os valores médios são (-2,52 ± 0,10), (-2,78 ± 0,10), (-2,74 ± 0,11) e (-2,25 ± 0,42) para Baia das Pedras, Fazenda Miranda, Fazenda Rebio-Jaru e Fazenda Maracaí, respectivamente. No caso de S. Gabriel, as taxas estatísticas são baixas porque raramente a umidade relativa do ar é baixa nas profundezas da Floresta Amazônica. Ao contrário, em Miranda, que é muito seca no meio do ano, há vários dias que satisfazem a condição de UR < 85%.

Figura 12 - Distribuição dos valores da diferença entre a temperatura às 20h e 23h para todos os dados analisados na fazenda Miranda (cerrado), para qualquer condição de umidade relativa (a) e para UR < 85% (b).



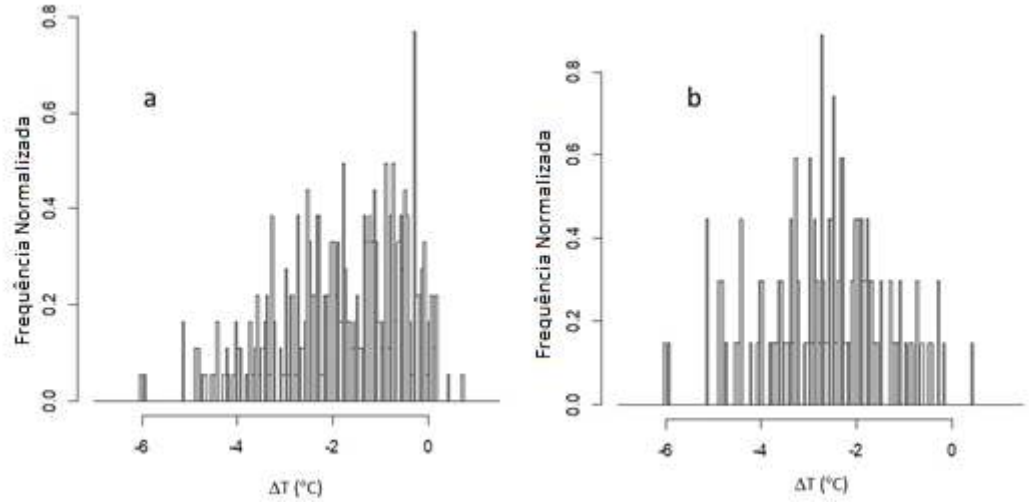
Fonte: Elaborado pelos autores (2002).

Figura 13 - Distribuição dos valores da diferença entre a temperatura às 20h e 23h para todos os dados analisados na Baía das Pedras (Pantanal), para qualquer condição de umidade relativa (a) e para UR < 85% (b).



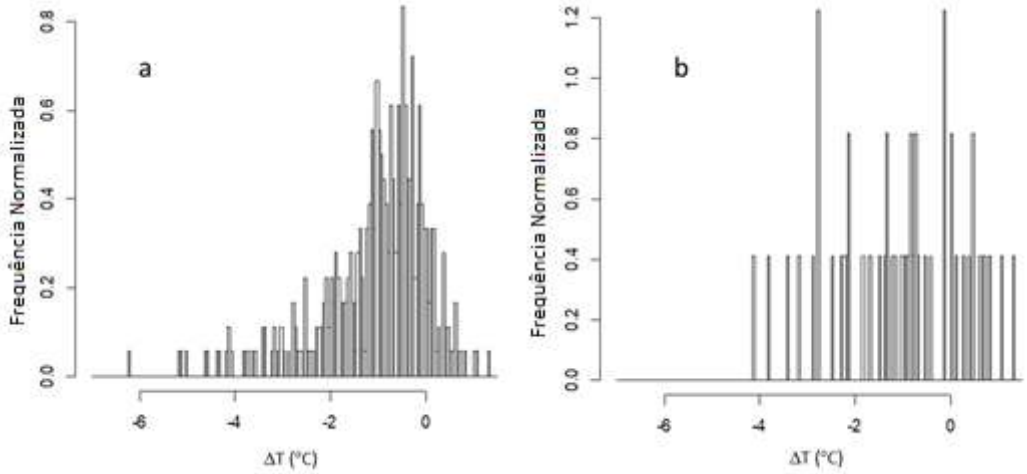
Fonte: Elaborado pelos autores (2002).

Figura 14 - Distribuição dos valores da diferença entre a temperatura às 20h. e 23h. para todos os dados analisados no Rebio-Jaru (floresta de fronteira), para qualquer condição de umidade relativa (a) e para UR < 85% (b).



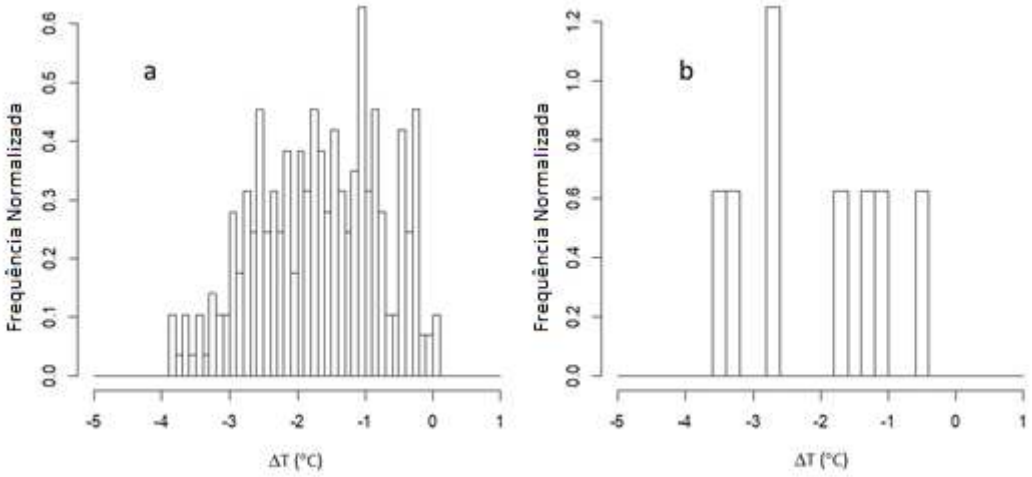
Fonte: Elaborado pelos autores (2002).

Figura 15 - Distribuição dos valores da diferença entre a temperatura às 20h. e 23h. para todos os dados analisados em São Gabriel da Cachoeira (floresta profunda), para qualquer condição de umidade relativa (a) e para UR < 85% (b).



Fonte: Elaborado pelos autores (2002).

Figura 16 - Distribuição dos valores da diferença entre a temperatura às 20h. e 23h. para todos os dados analisados na Fazenda Macaraí (floresta de transição), para qualquer condição de umidade relativa (a) e para UR < 85% (b).



Fonte: Elaborado pelos autores (2002).

A forte diminuição da taxa de resfriamento quando a UR é superior a 85% pode ser consequência do agrupamento de pequenas quantidades de moléculas de água liberando energia no ar. Como a taxa de resfriamento para UR > 85% é desprezível quando comparada com 0,9 °C/h, é possível estimar a taxa de coalescência das moléculas de água que compensam a taxa de resfriamento seco pela seguinte expressão:

$$\rho_{air} c_{air} \left(\frac{dT}{dt}\right)_{dry} = \dot{n}\varepsilon$$

onde ρ_{air} é a densidade do ar; c_{air} é o calor específico do ar; $\left(\frac{dT}{dt}\right)_{dry}$ corresponde a 0.9°C/h; $\dot{n}$ é a taxa de coalescência das moléculas; ε é a energia de ligação intermolecular da água. Considerando também que o processo predominante na coalescência é o agrupamento de duas moléculas de água e que a energia de ligação é de aproximadamente 5 kcal/mol (XANTHEAS, 2000), $\dot{n}$ é aprox. 3 x 10^{22} $m^{-3}h^{-1}$.

A ordem de grandeza deste número (10^{22}) é muito importante. É baixo quando comparado com o número de Avogadro, ou melhor, apenas algumas frações da quantidade de moléculas de água no ar são necessárias para produzir o efeito de minimizar a taxa de resfriamento. O agrupamento de moléculas de água se comporta efetivamente como um fluxo de calor latente. Na área de conhecimento micrometeorológico, o fluxo de calor latente é comumente medido pela técnica de covariância de vórtices turbulentos (BALDOCCHI, 2003), detectando a variação da quantidade de vapor d'água por um sensor equipado com um feixe infravermelho. É difícil acreditar que esse tipo de sensor possa detectar variações tão pequenas (10^{22} por hora por metro cúbico) distinguindo aglomerados de duas moléculas de água de indivíduos livres. Isso significa que se deve considerar a possibilidade de ocorrência de sérias limitações na medição do fluxo de calor latente por covariância de vórtices. Isso pode explicar parcialmente as dificuldades com o fechamento do balanço energético em micrometeorologia (FOKEN, 2008).

O fluxo de entropia é outro fator importante. Os resultados da pesquisa atual indicam que o período de fluxo de entropia exportadora mais intenso é no início da noite, durante o processo termodinâmico de resfriamento a seco. Como o crescimento das plantas é um processo auto-organizado que corresponde a uma redução significativa da entropia da matéria do ecossistema, depende da exportação de quantidade substancial de fluxo de entropia. Consequentemente, do ponto de vista termodinâmico, o período mais favorável para o crescimento das plantas na região amazônica é o início da noite. Vários trabalhos de pesquisa sobre esse tema têm sido relatados na literatura (NUSINOW *et al*., 2011; STITT; ZEEMAN, 2012; GRAF *et al*., 2010; NOZUE *et al*., 2007).

4. CONCLUSÃO

O modelo de temperatura apresentado na análise atual é baseado em variáveis que normalmente são medidas em pesquisas micrometeorológicas. O objetivo foi descrever o comportamento temporal da temperatura em um período de 24 horas em condições de baixa umidade. Empregando o modelo seco, obteve-se uma taxa de resfriamento de 0,9ºC/h, o que é consistente com os dados experimentais no início da noite. No entanto, durante a noite, a taxa de resfriamento cai para taxas abaixo de 0,1ºC/h quando a umidade relativa é superior a 85%. Portanto, a concentração de água exerce um papel fundamental na termodinâmica do ecossistema. Tal efeito pode ser devido à coalescência de aglomerados de moléculas de água.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de expressar sua gratidão à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio a este estudo.

REFERÊNCIAS

ANDRADE, L.R.; AGUIAR, R.G.; SANCHES, L.; ALVES, E.C.R.F.; NOGUEIRA, J.S. Partição do saldo de radiação em áreas de floresta Amazônica e floresta de transição Amazônia – cerrado. **Revista Brasileira de Meteorologia**, [*s.l.*], v.24**,** n.3, p.346-355, set. 2009.

BALDOCCHI, D.D. Assessing the eddy covariance technique for evaluating carbon dioxide exchange rates of ecosystems: past, present and future. **Global Change Biology**, [*s.l.*], v.9, p.479-492, nov. 2003.

CESARACCIO, C.; SPANO, D., DUCE, P.; SNYDER, R.L. An improved model for determining degree-day values from daily temperature data. **International Journal of Biometeorology**, [*s.l.*], v.45, p.161-169, dez. 2001.

CHAMBERS, J.Q.; ARTAXO, P. Deforestation size influences rainfall. **Nature Climate Change**, [*s.l.*], v.7, n.3, p.175-176, fev. 2017.

DALMAGRO, H.J.; ARRUDA, P.H.Z.; VOURLITIS, G.L.; LATHUILLIERE, M.J.; NOGUEIRA, J.S.; COUTO, E.G.; JOHNSON, M.S. Radiative forcing of methane fluxes offsets net carbon dioxide uptake for a tropical flooded forest. **Global Change Biology**, [*s.l.*], v.25, p.1967-1981, fev. 2019.

FLOYD, R.B.; BRADDOCK, R.D. A simple method for fitting average diurnal temperature curves. **Agricultural and Forest Meteorology**, [*s.l.*], v.32, p.107-119, mar. 1984.

FOKEN, T. The energy balance closure problem: an overview. **Ecological Applications**, [*s.l.*], v.18, n.6, p.1351-1367, set. 2008.

GRAF A.; SCHLERETH, A.; STITT, M.; SMITH, A.M. Circadian control of carbohydrate availability for growth in Arabidopsis plants at night. **PNAS**, [*s.l.*], v.107, n.20, p.9458–9463, mai. 2010.

GRECO, S.; ULANSKI, S.; GARSTANG, M.; HOUSTON, S. Low-level nocturnal wind maximum over the central Amazon basin, **Boundary-Layer Meteorology**, [*s.l.*], v.58, p.91-115, mar. 1992.

HOUGTHON, J. **The Physics of Atmosphere**. New York: Cambridge University Press, 2007.

JOHNSON, M.E. & FITZPATRICK, E.A. The monthly mean diurnal temperature curve. **Archiv fur Meteorologie Geophysik Bioklimatologie B**, [*s.l.*], v.25, p.265-274, jun. 1977.

KOOPERMAN, G.J.; CHEN, Y.; HOFFMAN, F.M.; KOVEN, C.D.; LINDSAY, K.; PRITCHARD, M.S.; SWANN, A.L.S.; RADERSON, J.T. Forest response to rising CO_2 drives zonally asymmetric rainfall change over tropical land. **Nature Climate Change**, [*s.l.*], v.8, p.434-440, mai. 2018.

NICOLIS, G.; PRIGOGINE, I. **Exploring Complexity**. New York: W.H. Freeman and Company, 1989.

NOZUE, K.; COVINGTON, M.F.; DUEK, P.D.; LORRAIN, S.; FANKHAUSER, C.; HARMER, S.L.; MALOOF, J.N. Rhythmic growth explained by coincidence between internal and external cues, **Nature**, [*s.l.*], v.448, p.358-361, jul. 2007.

NUSINOW, D. A.; HELFER, A.; HAMILTON, E.E.; KING, J.J.; IMAIZUMI, T.; SCHULTZ, T.F.; FARRE, E.M.; KAY, S.A. The ELF4–ELF3–LUX complex links the circadian clock to diurnal control of hypocotyl growth. **Nature**, [*s.l.*], v.475, p.398-402 jul. 2011.

O'CONNELL, C.S.; RUAN, L.; SILVER, W.L. Drought drives rapid shifts in tropical rainforest soil biogeochemistry and greenhouse gas emissions. **Nature Communications**, [*s.l.*], v.9, p.1348-1357, set. 2018.

PALÁCIOS, R.S.; SALLO, F.S.; SANTOS, A.C.A.; NOGUEIRA, J.S.; SANTANNA, F.B. Estimativa da forçante radiativa direta de aerossóis sobre a superfície em região de transição Pantanal-cerrado no estado de Mato Grosso, Brasil. **Revista Brasileira de Climatologia**, Dourados, v.16, p.132-141, jan./jun. 2015.

PARTON, W.J.; LOGAN, J.A. A model for diurnal variation in soil and air temperature. **Agricultural Meteorology**, Amsterdan, v.23, p.205-216, mar. 1981.

de PAULO S.R.; de PAULO, I.J.C.; de DECKER, Y. (2015) Reconstructing the micrometeorological dynamics of the southern Amazonian transitional forest. **Chaos**, [*s.l.*], v.25, p.1231231-1231238, dez. 2015.

PRIANTE FILHO, N.; VOURLITIS, G.L.; HAYASHI, M.M.S.; NOGUEIRA, J.S.; CAMPELO JR, J.H.; NUNES, P.C.; SOUZA, L.S.; COUTO, E.G.; HOEGER, W.; RAITER, F.; TRIENWEILER, J.L.; MIRANDA, E.J.; PRIANTE, P.C.; FRITZEN, C.L.; LACERDA, M.; PEREIRA, L.C.; BIUDES, M.S.; SULI, G.S.; SHIRAIWA, S.; de PAULO, S.R.; SILVEIRA, M. Comparison of the mass and energy exchange of

a pasture and a mature transitional tropical forest of the southern Amazon basin during a seasonal transition. **Global Change Biology**, [*s.l.*], v.10, p.863–876, abr. 2004.

REICOSKY, D.C.; WINKELMAN, L.J.; BAKER, J.M.; BAKER, D.G. (1989) Accuracy of hourly air temperatures calculated from daily minima and maxima. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdan, v.46, p.193-209, mar. 1989.

SÁ, M.O.; LEAL, L.S.M.; CAMPOS, J.G.; ARAUJO, A.C.; SILVA, P.R.T.; SILVA, M.M.; PAULETTO, D.; OLIVEIRA, M.B.L.; FERNANDES, M.P.R.S.; DINIZ, M.M.; MANZI, A.O. *Estudo do clima e interações entre a floresta e a atmosfera, no parque nacional do pico da neblina, São Gabriel da Cachoeira, AM*. *In:* Souza, L.A.G.; Castellón, E. G. (org.). **Desvendando as fronteiras do conhecimento na região amazônica do alto Rio Negro**. Manaus: INPA, 2012. Cap. 2, p.23-36.

SCOTT, C.E.; MONKS, S.A.; SPRAKLEN, D.V.; ARNOLD, S.R.; FORSTER, P.M.; RAP, A.; AIJALA, M.; ARTAXO, P.; CARSLAW, K.S.; CHIPPERFIELD, M.P.; EHN, M.; GILARDONI, S.; HEIKKINEN, L.; KULMALA, M.; PETAJA, T.; REDDINGTON, C.L.S.; RIZZO, L.V.; SWIETLICKI, E.; VIGNATI, E.; WILSON, C. Impact on short-lived climate forcers increases projected warming due to deforestation. **Nature Communications**, [*s.l.*], v.9, p.157-166, abr. 2018.

SOUZA, A.P.; RAMOS, C.M.C.; LIMA, A.D.; FLORENTINO, H.O.; ESCOBEDO, J.F. Comparison of methodologies for degree-day estimation using numerical methods. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v.33, n.3 p.391-400, ago. 2011.

STITT, M.; ZEEMAN, S. Z. Starch turnover: pathways, regulation and role in growth, **Current Opinion in Plant Biology**, [*s.l.*], v.15, p.282–292, abr. 2012.

WALTER, A. Notes on the utilization of records from third order climatological stations for agricultural purposes. **Agricultural Meteorology**, Amsterdan, v.4, p.137-143, jan. 1967.

XANTHEAS, S.S. Cooperativity and hydrogen bonding network in water clusters. **Chemical Physics**, [*s.l.*], v.258, p.225-231, jan. 2000.