



THE UNIVERSITY *of* EDINBURGH

Edinburgh Research Explorer

Variabilidade Horária, Diária e Sazonal da Frequência e Intensidade de Precipitação em uma Floresta Tropical Chuvosa na Amazônia Brasileira

Citation for published version:

Lola da Costa, AC, Rodrigues, HJB, Silva Junior, JDA, Costa Nunes, LR, Moraes, BC, da Costa Costa, A, da Cunha, AC, Meir, P & Singh Malhi, Y 2018, 'Variabilidade Horária, Diária e Sazonal da Frequência e Intensidade de Precipitação em uma Floresta Tropical Chuvosa na Amazônia Brasileira' Revista Brasileira de Geografia Física, vol. 11, no. 4.

Link:

[Link to publication record in Edinburgh Research Explorer](#)

Document Version:

Publisher's PDF, also known as Version of record

Published In:

Revista Brasileira de Geografia Física

General rights

Copyright for the publications made accessible via the Edinburgh Research Explorer is retained by the author(s) and / or other copyright owners and it is a condition of accessing these publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

Take down policy

The University of Edinburgh has made every reasonable effort to ensure that Edinburgh Research Explorer content complies with UK legislation. If you believe that the public display of this file breaches copyright please contact openaccess@ed.ac.uk providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.





Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: www.ufpe.br/rbgfe



Variabilidade Horária, Diária e Sazonal da Frequência e Intensidade de Precipitação em uma Floresta Tropical Chuvosa na Amazônia Brasileira

Dr. Antônio Carlos Lôla da Costa ¹, Dr. Hernani José Brazão Rodrigues ², Dr. João de Athaydes Silva Junior ³, Bel. Luan Roosewel Costa Nunes ⁴, Dr. Bergson Cavalcanti Moraes ⁵, Bel. Abnoã da Costa e Costa ⁶, Dr. Alan Cavalcanti da Cunha ⁷, Dr. Patrick Meir ⁸, Dr. Yadvinder Malhi ⁹

¹Faculdade de Meteorologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, Pará. lola@ufpa.br. ²Faculdade de Meteorologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, Pará. hernani@ufpa.br. ³Faculdade de Meteorologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, Pará. athaydes@ymail.com. ⁴Faculdade de Meteorologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, Pará. luan.nunes@ig.ufpa.br. ⁵Faculdade de Meteorologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, Pará. bergson@ufpa.br. ⁶Faculdade de Meteorologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, Pará. abnoa@hotmail.com. ⁷Universidade Federal do Amapá, Macapá, Amapá, Brasil. alancunha12@gmail.com. ⁸University of Edinburgh, School of Geosciences, Edinburgh, UK pmeir@ed.ac.uk. ⁹University of Oxford, School of Geography and the Environment, Oxford, UK ymalhi@ed.ac.uk.

Artigo recebido em 01/02/2017 e aceito em 03/01/2018

RESUMO

A presente investigação trata da análise de uma série de indicadores de precipitação e sua variabilidade temporal em uma área restrita de floresta da Amazônia Oriental. O objetivo principal foi analisar os padrões horários, diários, e mensais de precipitação durante os períodos chuvosos e menos chuvosos da região. Foram utilizados as seguintes etapas: a) coleta de dados de precipitação com pluviógrafos de balsa modelo TB4 conectado a um datalogger Campbell Scientific, modelo CR1000, instalado em uma torre micrometeorológica de 40 m de altura.; b) avaliação de indicadores de precipitação, que foi definido como o período diário no qual ocorreu no mínimo um evento de precipitação maior ou igual a 1,0 mm; c) testes estatísticos não-paramétricos para avaliar a hipótese de diferenças significativas entre os indicadores de precipitação entre os períodos PC e PMC. Os resultados indicaram que tanto no PC como no PMC, a maior frequência de chuvas incidiu na categoria de 1,0 mm.dia-1 a 10,0 mm.h-1. No PC as chuvas foram mais predominantes durante os turnos da tarde e noite e no PMC a predominância ocorreu, principalmente durante o turno da noite. O teste estatístico de Friedman ($Fr(13, GL=11) = 55,73$ e $p < 0,0001$) acusou, respectivamente, que a precipitação do mês de março foi a mais excêntrica da série no PC, enquanto que no PMC, foi a de agosto. Então, confirma-se a hipótese de que, em florestas conservadas, durante o PC o regime de precipitações é estratificado, com chuvas prolongadas, enquanto no PMC as chuvas são predominantemente convectivas.

Palavras-chave: Séries Temporais de Precipitação, Variabilidade Sazonal, Floresta Nacional de Caxiuanã.

Hourly, Daily and Seasonal Frequency Variability and Precipitation Intensity in a Rainy Tropical Rainforest in the Brazilian Amazon

ABSTRACT

The present investigation deals with the analysis of a series of precipitation indicators and their temporal variability in a restricted area of the forest of the Eastern Amazon. The main objective was to analyze the daily, daily and monthly rainfall patterns during the rainy and less rainy periods of the region. The following steps were used: a) Rainfall data collection with TB4 model balloons connected to a Campbell Scientific datalogger, model CR1000, installed in a 40 m high micrometeorological tower; b) evaluation of precipitation indicators, which was defined as the daily period in which a precipitation event greater than or equal to 1.0 mm occurred at least; b) non-parametric statistical tests to evaluate the hypothesis of significant differences between precipitation indicators between PC and PMC periods. The results indicated that in the PC and PMC, the highest rainfall frequency was in the category of 1.0 mm.day⁻¹ to 10.0 mm.h⁻¹. In the PC, rainfall was more prevalent during the afternoon and evening shifts and in PMC the predominance occurred, especially during the night shift. Friedman's statistical test ($Fr(13, GL = 11) = 55.73$ and $p < 0.0001$) accused, respectively, that the March precipitation was the most eccentric of the CP series, whereas in PMC, it was the one of August. Then, it is confirmed the hypothesis that, in conserved forests, during the CP the precipitation regime is stratified, with prolonged rains, whereas in the PMC the rains are predominantly convective

Keywords: Precipitation Time Series, Seasonal Variability, Caxiuanã National Forest

Introdução

A precipitação é uma variável meteorológica com comportamento temporal-espacial de alta relevância no balanço hídrico. Dentre outros fatores de controle climáticos globais e regionais, este elemento meteorológico é talvez o de maior importância para a região Amazônica, influenciando o comportamento de outros componentes meteorológicos, com destaque a temperatura do ar, umidade relativa do ar e intensidade e direção do vento (Marengo e Hastenrath, 1993).

Vianello e Alvez (1991) definem chuva líquida como a precipitação vertical de gotículas de água da atmosfera para a superfície do solo. Este processo é resultado da condensação do vapor d'água em gotículas de água na presença de núcleos ativos de condensação (núcleos higroscópicos) que formam estas partículas, as quais são reunidas em grande número (nuvens), precipitando-se em seguida devido a ação gravitacional.

Mas a precipitação influencia a temperatura do solo e, principalmente, as atividades biológicas dos ecossistemas (Costa, 2006), alterando o equilíbrio térmico e hídrico dentro da floresta, controlando o transporte e de água e nutrientes disponíveis no solo (Souza et al., 2006).

O balanço hídrico e suas variantes são distintas entre florestas e áreas urbanas. Tal distinção pode ser perceptível em termos de resposta hídrica, como função do uso e da ocupação do solo. Por exemplo, a substituição da floresta por áreas de ocupação urbana é um dos fatores que desencadeiam alterações antrópicas modificadoras da paisagem natural do meio ambiente, antes em equilíbrio com os ecossistemas terrestres e aquáticos. Uma primeira consequência perceptível da substituição da cobertura natural em solos urbanos é a variação do escoamento superficial e a perda de capacidade de infiltração do solo, que combinadas com a má organização e planejamento urbano, gera danos diversos aos ecossistemas (Tucci, 1997).

Contudo o ciclo hidrológico iniciado pela precipitação no ambiente florestal é um fenômeno complexo. Segundo Oliveira et al. (2008), para a efetiva conservação da biodiversidade tropical, é essencial o entendimento de todas as etapas do ciclo hidrológico. Por exemplo, a interceptação da precipitação pela vegetação (I), é o último volume de água evaporado para a atmosfera que não alcança o solo. Como consequência primária do

processo de interceptação, ocorre uma imediata e temporária redução do potencial hídrico do solo.

Assim, a determinação da variação da precipitação não somente é importante para entender seu comportamento anual, mas também as oscilações durante os períodos horários, mensais e até sazonais. Nos sistemas de manejo florestal e, principalmente nos sistemas de monitoramento e manejo hídrico, a precipitação destaca-se como um dos componentes meteorológicos de maior importância para os ecossistemas florestais. Deste modo, o presente estudo é uma contribuição em que quantifica uma das variantes hidrometeorológicas mais importantes em ambientes tropicais, justamente onde há carência e lacunas de informações, as quais são fundamentais na parametrização de modelos físicos e fisiológicos que caracterizam seu funcionamento nos ecossistemas florestais.

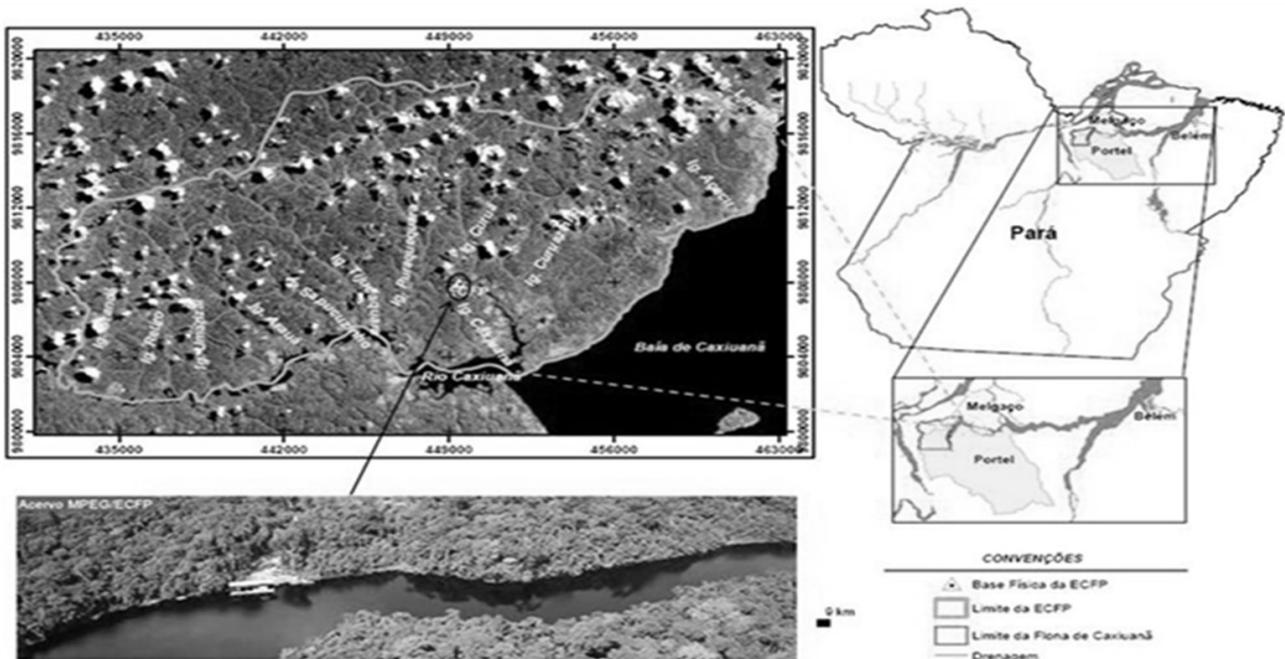
O objetivo deste trabalho foi quantificar e analisar a variabilidade média horária e mensal da precipitação na Floresta Nacional de Caxiuanã, Estado do Pará durante um período de 13 anos consecutivos.

Como consequência, testar a seguinte hipótese: em florestas conservadas, no período chuvoso (PC) o regime de precipitações é estratificado, com chuvas mais prolongadas, enquanto que no período menos chuvoso (PMC) as chuvas devem ser predominantemente convectivas, sendo o presente resultado uma referência confiável (com baixo nível de incerteza) do comportamento da precipitação sazonal e horária e suas respectivas variações e tendência no contexto de mudanças climáticas e ao longo de mais de uma década de observação (1999 a 2011).

Material e métodos

O Projeto ESECAFLOR, onde foi instalado o presente experimento, tem sido desenvolvido na Estação Científica Ferreira Pena (ECFPn) sobre a supervisão do Museu Paraense Emílio Goeldi (MPEG). O experimento localiza-se na Floresta Nacional de Caxiuanã – FLONA CAXIUANÃ, nos limites territoriais do município de Melgaço (01° 42' 30" S; 51° 31' 45" W; a 60 m de altitude) mesorregião do Marajó no Estado do Pará. Sua localização exata é mostrada pela Figura 1, estando distante cerca de 400 km a oeste da capital Paraense, Belém/PA (Costa et al, 2003). O solo predominante de Caxiuanã foi classificado como latossolo amarelo distrófico, e

Figura 1. Localização da Estação Científica Ferreira Penna (ECFPn) na Floresta Nacional de Caxiuanã, Melgaço/Pará (Fonte: MPEG).



sua vegetação apresenta-se preservada e com altura média das árvores de 40 m (Moraes et al., 1997).

A FLONA de Caxiuanã abrange cerca de 33.000 ha, englobando rios e floresta. Deste último tem-se em maior parte floresta de terra firme (80%) e em sua minoria floresta alagada de várzea (15%) e igapó (4%) e pequenas porções de manchas de vegetação de savana não florestal (1%) (Lisboa et al., 1997), praticamente intocadas pelo homem. O excelente estado de conservação da floresta é uma resposta positiva, consequência de uma baixa densidade demográfica e impactos antrópicos na região.

No experimento ESECAFLOR induz-se artificialmente um longo período de estiagem em uma floresta Tropical Chuvosa na Amazônia Brasileira, com redução de até 50% da água disponível ao solo, através da redução da precipitação sobre esta floresta tropical amazônica. A base de dados de precipitação de longo prazo gerada no experimento ESECAFLOR (Estudo da Seca da Floresta), integrante do “Experimento de Grande Escala da Biosfera-Atmosfera da Amazônia (LBA), tem sido útil para avaliar os efeitos da restrição hídrica provocados ao ecossistema ocorrem com a redução da precipitação. Assim, uma análise sistêmica de séries de precipitação pode indicar como esta exclusão de água no solo estar afetando o ambiente experimental, ou seja, semelhante a um evento de El Niño muito prolongado (Costa et al., 2003).

Na presente investigação a coleta de dados de precipitação foi realizada por pluviógrafos de balsa modelo TB4, conectado a um datalogger Campbell Scientific, modelo CR1000, instalado no topo de uma torre micrometeorológica de 40 m de

altura. O período de estudo compreendeu um período entre 01 de janeiro de 1999 a 31 de dezembro de 2011, com frequência de coleta de dados de precipitação de a cada 30 min. Contudo, definiu-se como critérios de "dias com chuva", o período diário no qual ocorreu no mínimo um evento de precipitação maior ou igual a 1,0 mm.

A experimentação que simula o fenômeno de estiagem (El niño) pode ser utilizada também para avaliar a influência da precipitação sobre os fluxos de água e concentração de dióxido de carbono (CO₂), bem com as respostas fisiológicas da floresta à exclusão de água no solo. Esta investigação gerou uma base de dados de séries temporais de precipitação que foi utilizada na presente pesquisa.

Estatisticamente as séries históricas de precipitação e seus respectivos indicadores de intensidade e frequência foram tratados para avaliar algumas premissas básicas para testes multicomparativos como a ANOVA. Contudo, verificou-se que as distribuições dos referidos parâmetros não são normais. Então se aplicou o teste da Análise de Variância (não paramétrico) denominado de Teste de Friedman.

Este teste é normalmente aplicado para dados mensurados em nível ordinal, abrangendo 3 ou mais amostras e equivalendo à ANOVA de dois critérios (ano de precipitação e mês de precipitação). No presente experimento as análises foram ranqueadas por ordem de intensidade crescente, como por exemplo, A < B < C < D, etc, onde A, B, C, D, etc, representam as intensidades de precipitação, tanto em nível mensal (12 meses do ano) quanto anual (13 anos). Neste caso, as amostras devem ter o mesmo tamanho (13 anos x

12 meses), a fim de permitir a comparação entre todos os indivíduos submetidos ao teste (Ayres et al., 2007).

Assim, a hipótese nula testa o seguinte: se $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = \dots = \sigma_n$. E a hipótese alternativa testa se: $\sigma_1 \neq \sigma_2 \neq \sigma_3 \neq \dots \neq \sigma_n$, onde σ_n é a significância dos scores para cada unidade amostral em nível anual e/ou mensal.

Resultados e discussão

Variabilidade anual

Os eventos de El Niño e de La Niña ocorridos no Oceano Pacífico Equatorial, comprovadamente alteram a dinâmica da precipitação atmosférica incidente sobre a região Amazônica, apresentando anomalia positiva em anos de ocorrência de La Niña e negativa em anos de El Niño (Grimm, Barros, Doyle, 2000), do mesmo modo como influenciam também no regime térmico e hídrico do solo da região (Santos et al., 2011).

Os anos em que ocorreram os fenômenos de La Niña apresentaram maiores regimes pluviométricos, como o evento de 2008- 2009 que afetaram a região Amazônica com o início prematuro do período chuvoso que ocasionou uma grande inundação na bacia amazônica, assim como os eventos de 1988- 1989, 1998- 1999, porém de menor intensidade (Marengo et al., 2011). É importante ressaltar que os episódios de El Niño como consequência tendem a inibir o regime de chuvas, assim como os eventos de La Niña, experimentam um maior favorecimento nas precipitações sobre algumas regiões da floresta tropical amazônica, principalmente na parte oeste da Amazônia (Santos et al, 2011).

A partir de uma breve avaliação, relacionando a precipitação anual com a ocorrência dos eventos de El Niño e La Niña, analisou-se os possíveis impactos da temperatura oceânica sobre esses componentes meteorológicos na floresta de Caxiuanã, mostrando-se que em períodos em que ocorreu o evento de La Niña: 1998/2001 e 2007/2008 (CPTEC/INPE), as precipitações tenderam a valores acima da média, o que era esperado normalmente na região Amazônica.

Nos anos em que ocorreram os eventos de El Niño, na maioria das vezes, ocasionaram menor regime de chuvas, conforme os eventos observados no período, de: 2002/2003; 2004/2005; 2006/2007 e 2009/2010, de diferentes categorias cada, de acordo com o CPTEC/INPE. O ano de 2004 foi a exceção, pois o regime pluviométrico foi diferente do esperado, indicando que o evento não modula isoladamente a dinâmica das chuvas na região. Provavelmente a atuação de outro fenômeno, de

maior escala e intensidade, tenha sido mais determinante neste ano.

Como pode ser observado, a distribuição da precipitação anual na FLONA de Caxiuanã (Tabela 01) é mais concentrada na metade dos 13 anos analisados apresentaram registros de precipitação acima da média anual, que é de 2.145mm. O ano de 2011 registrou o maior total de chuvas de todo o período, enquanto que em 2010 foi registrado o menor valor. Segundo informações do CPTEC/INPE, estes anos foram classificados como eventos de El Niño fraco. Mas foi observado ainda que nos quatro primeiros anos analisados as chuvas registraram valores acima do regime médio anual, mantendo-se continua e com certa irregularidade ao longo do ano.

A Temperatura da Superfície do Mar (TSM) do Oceano Atlântico Norte subtropical também tem papel importante nessa dinâmica da distribuição das chuvas sobre a Amazônia. Por exemplo, quando se apresenta mais elevada que o normal e concomitantemente a TSM do Atlântico Sul subtropical mais baixa (dipolos positivo/negativo) (Souza et al., 2009), ocasionam intensificados movimentos subsidentes sobre a Amazônia central e leste e bloqueios no escoamento troposférico, pois a parcela descendente da célula de Hadley é fortalecida (Moura e Shukla, 1981). Então, como esse bloqueio inviabiliza a penetração de Sistemas Frontais (SF) do HS, que adentram na Amazônia, principalmente no sul, e ocasionam chuvas, consequentemente há a diminuição da precipitação na região em virtude deste bloqueio. Além disso, quando estas condições de TSM se manifestam o anticiclone semipermanente do Atlântico Sul, se intensifica, havendo um deslocamento forçado da ZCIT para uma posição mais ao norte, o qual torna-se outro fator que reduz o regime de chuvas.

Anos sublinhados representando eventos de El Niño e em negrito são valores acima da média.

Tabela 1- Precipitação acumulada anual, número absoluto de dias com chuvas e frequência relativa de dias com chuva, no Período Chuvoso (PC) e Período Menos Chuvoso (PMC) na FLONA de Caxiuanã, no período de 1999 a 2011.

Ano	Precipitação anual (mm)	Dias com Chuva	Fr (%) dias com chuva- PC	Fr (%) dias com chuva- PMC
1999	2174,1	128	74,2	25,8
2000	2197,7	173	69,4	30,6
2001	2228,1	201	79,1	20,9
2002	2185,2	167	75,4	24,6
2003	1941,6	173	83,2	16,8
2004	2400,4	197	71,1	28,9
2005	2062,4	169	80,5	19,5
2006	2143,0	168	78,0	22,0
2007	1966,9	160	71,3	28,8
2008	2201,5	160	81,3	18,8
2009	2254,4	144	77,4	22,6
2010	1586,8	127	86,6	13,4
2011	2676,9	166	76,5	23,5
Média	2144,6	168	76,5	23,5

Para a definição de dias com ocorrência de chuva considerou-se a situação de precipitação igual ou acima de 1,0 mm.dia⁻¹. Segundo a tabela 01, em média, foram observados 168 dias/ano⁻¹ com ocorrência de chuvas sobre a floresta. Durante um período longo, de 2000 a 2006, registrou-se dias com eventos de chuvas acima da média. Geralmente quanto maior o volume de precipitação anual, maiores são os dias contabilizados com registros de chuvas diárias durante o ano. O período chuvoso foi responsável por 76,5 % dos dias com chuva, ficando o restante para o período com menor volume de chuvas. Em anos onde o regime de chuva foi acima da média anual, o número de dias com ocorrência de chuva no PMC, na maioria das vezes, se situou acima do valor percentual médio, de 23,5 %. Isso implica que, na escala interanual, quanto maior o regime pluviométrico anual, maior é o número de ocorrências de dias com chuva no período menos chuvoso.

Variabilidade mensal e sazonal da precipitação

Os períodos chuvosos (PC) e menos chuvosos (PMC) foram classificados empiricamente de acordo com a distribuição média da precipitação mensal, sendo definidos em função dos meses com precipitação igual ou superior a 100,0 mm e com valores iguais ou superiores a 15 dias de chuvas. Na Figura 2 temos o PC compreendido entre os meses de dezembro a junho, enquanto que o PMC se

estendeu de julho a novembro. Valores/períodos semelhantes foram encontrados por Costa (2003) na FLONA de Caxiuanã para outros períodos.

Um sistema de grande escala que comumente atua e contribui decisivamente na precipitação dos períodos determinados chuvosos da região Amazônica, é a posição da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT). Este sistema é um aglomerado de nuvens cumulunimbus que se forma a partir da convergência em baixos níveis dos ventos alísios oriundos do nordeste do Hemisfério Norte (HN) e do sudeste do Hemisfério Sul (HS) originando um cinturão nebuloso ao redor da região equatorial (Hastenrath e Lamb, 2004). A ZCIT em sua marcha anual, alcança aproximadamente 10 °N, no final do verão no HN e sua posição fica mais ao sul de 4 °S- 5 °S nos meses de abril e maio afetando o tempo e o clima das regiões tropicais (Hastenrath, 1985). Já no período menos chuvoso, as precipitações que ocorrem na bacia Amazônica estão geralmente associadas à atuação de sistemas meteorológicas de meso escala, como: as Linhas de Instabilidade (LI) que surgem na costa norte da América do Sul e penetram no continente, classificadas em duas categorias de acordo com a propagação das linhas de instabilidade (LIP): LIP1 e LIP2, sendo esta última com deslocamento horizontal além de 400 km, com uma velocidade média de 16 m/s (Cohen, 1989).

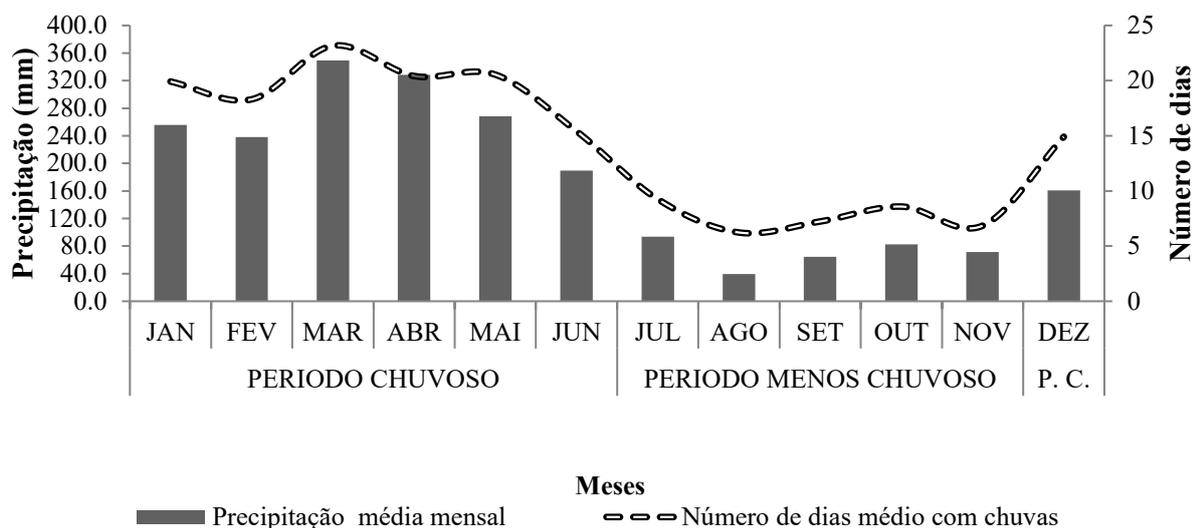


Figura 2. Precipitação pluviométrica mensal e número médio de dias com chuva (1999 a 2011) na Floresta Nacional de Caxiuanã, Melgaço/Pará.

A Figura 2 sugere que os meses de março e abril foram classificados como os de maiores regimes pluviométricos médios do período, respectivamente com registros de 349,3 e 328,5 mm, além de serem também os meses com os maiores números de dias com ocorrências de eventos de chuvas, respectivamente, 23 e 20 dias. Por outro lado, estudos realizados na FLONA de Caxiuanã constataram que o mês de março é efetivamente o mais chuvoso e novembro o menos chuvoso (Costa e Loureiro, 2000; Costa et al., 2003; Silva Jr et al., 2006).

Toda a estação mais chuvosa é modulada em relação ao deslocamento sazonal da ZCIT mais ao sul (Hastenrath, 1985), que durante o verão no Hemisfério Sul está atuando, provocando níveis de precipitação muito elevados, principalmente na costa Atlântica paraense e, conseqüentemente, atingindo a região da Floresta de Caxiuanã.

De acordo com a Figura 2, o período menos chuvoso (PMC) sobre esta floresta foi classificado como de baixa distribuição média das chuvas e, conseqüentemente, com valores menores que 15 dias de ocorrência de eventos de precipitação. Este período se estendeu de julho a novembro, com os meses de agosto e setembro apresentando os menores valores médios de precipitação, com 39,5 e 64,6 mm de chuvas, respectivamente.

O PMC se iniciou em julho, registrando média de precipitação de 93,4 mm, sendo relativamente o maior valor do período, provavelmente por ser próximo do primeiro mês posterior à época mais chuvosa (PC), com influências significativas deste período. Geralmente, as precipitações no início do período

menos chuvoso estão associadas, principalmente, com as atividades convectivas locais e possivelmente, a penetrações de Linhas de Instabilidade (LI) sobre a costa Atlântica Paraense. As LI se propagam até o interior da bacia Amazônica, ocorrendo com maior frequência entre abril e agosto. Estas LI são responsáveis por, aproximadamente, 45 % da precipitação incidente sobre a região Leste do Estado do Pará (Cohen, 1989). Os dias com chuva do PMC oscilaram entre 6 a 9 dias.

De acordo com a Tabela 02, onde são apresentados os extremos de precipitação, os cinco primeiros meses do ano foram os responsáveis por cerca de 70% da precipitação total anual. Percebeu-se que nem sempre os meses que normalmente são considerados chuvosos e menos chuvosos, ajustaram-se a essa classificação. Por exemplo: fevereiro, junho e dezembro, registraram valores abaixo de 100,0 mm, sendo que os demais meses não registraram exceções. Os meses de março e abril acusaram os maiores valores de precipitação acumulada mensal do período estudado, respectivamente de 592,6 e 518,0 mm, sendo esses responsáveis pela contribuição, em média, de 31,6 % da precipitação anual, sendo quase o dobro em relação a precipitação em todo o período menos chuvoso (julho-novembro).

Portanto, nem sempre o mês tradicionalmente com o maior regime de chuvas mensais apresentou o maior número de dias com ocorrência de chuva. De acordo com a Tabela 02, as máximas ocorrências de dias com precipitação ocorreram entre janeiro a março, 28 e 27 dias, respectivamente.

Tabela 2. Valores mensais de precipitações máximas (P_{máx}, mm) e mínimas absolutas (P_{mín}, mm). Número de dias com ocorrência de chuvas máximas absolutas (DC_{máx}) e mínimos absolutos (DC_{mín}) e distribuição percentual das chuvas (DPC,%) na FLONA de Caxiuanã (1999 a 2011).

Valor mensal	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
P _{máx} .	346,8	446,0	592,6	518,0	368,5	391,2	178	70,6	176,0	186,6	268,2	336,6
P _{mín} .	113,0	80,0	195,2	156,0	204,4	84,4	32,4	12,4	20,2	11,8	16,4	42,4
DPC (%)	11,9	11,1	16,3	15,3	12,5	8,9	4,4	1,8	3,0	3,9	3,3	7,5
DC _{máx} .	28	27	27	25	24	21	15	11	12	21	13	21
DC _{mín} .	14	10	17	12	17	12	4	1	3	2	1	5

Na Tabela 3 é apresentada a distribuição das precipitações máximas diárias na FLONA Caxiuanã. Observou-se que o maior registro diário de chuvas ocorreu em fevereiro de 2000 (156,9 mm), um evento extremamente anormal. O segundo maior registro aconteceu em março de 2008 (152,8 mm). Os máximos eventos de precipitações observados durante o período

menos chuvoso aconteceram em novembro de 2006 (84,4 mm) e outubro de 2003 (65,0 mm), também considerados atípicos para esta época do ano, já que nessa época do ano as precipitações mensais tendem a se aproximar efetivamente destes valores.

Tabela 3. Valores absolutos máximos diários de precipitações ocorridas na FLONA de Caxiuanã (1999 a 2011) Meses tracejados com falhas ou ausência de dados.

Ano/Mês	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
1999	87,5	47,6	57,5	86,6	37,2	----	----	39,0	38,2	32,0	18,2	----
2000	31,8	156,9	40,2	125,0	38,6	38,2	50,0	15,6	40,6	29,8	24,0	19,0
2001	34,4	30,6	41,2	26,6	27,6	68,2	20,1	14,2	29,4	26,6	20,6	81,6
2002	80,4	61,6	76,2	40,2	39,0	45,8	35,6	28,2	20,4	43,6	43,4	37,0
2003	21,8	53,6	26,0	48,4	56,6	22,4	29,4	12,0	35,2	65,0	12,6	16,2
2004	77,8	49,4	48,6	42,0	68,4	34,2	47,2	11,2	16,2	21,8	11,6	94,0
2005	80,8	48,8	43,0	42,4	33,0	21,6	22,0	12,2	20,0	24,4	26,2	48,8
2006	45,6	17,8	38,0	59,8	57,8	33,0	46,6	28,2	19,8	8,2	84,4	33,8
2007	----	30,0	43,2	32,0	51,6	40,4	19,6	6,7	18,4	13,7	11,2	81,8
2008	15,3	20,0	152,8	78,1	49,4	28,8	42,4	16,0	30,4	----	17,0	39,4
2009	45,4	39,4	----	----	----	52,8	22,6	18,6	13,6	15,8	26,2	29,7
2010	31,2	54,6	69,8	109,1	33,6	30,6	22,6	12,0	13,6	10,6	6,2	16,2
2011	40,2	95,8	85,8	84,4	51,2	45,2	64,6	9,4	8,4	62	63,6	16,4

Variabilidade média diária da precipitação

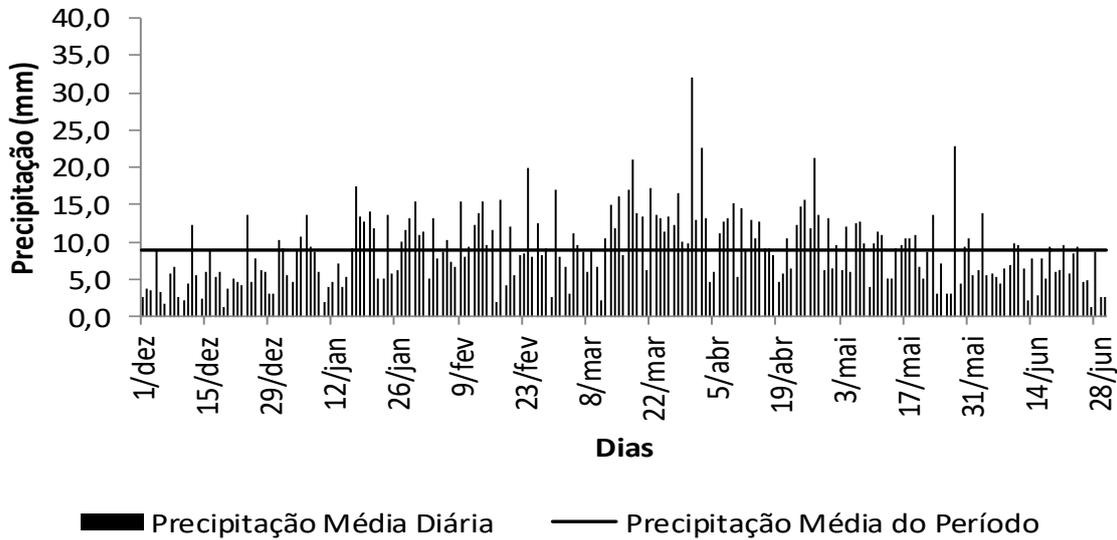
Analisando-se a Figura 3, onde é apresentada a variabilidade média diária da precipitação em Caxiuanã, para o período chuvoso da região, observou-se que os valores diários de precipitação foram, em grande parte, acima da média do período, que foi de 9,1 mm.dia⁻¹, sendo

que o volume precipitado teve seu aumento a partir da segunda quinzena do mês de dezembro.

Este fato pode estar associado com o início do verão no HS, a partir do dia 21 de dezembro. No mês de janeiro a precipitação média foi de 8,3 mm.dia⁻¹, sendo também a segunda quinzena de janeiro, em média, a mais chuvosa.

Os meses consecutivos apresentaram considerável aumento nos volumes precipitados, sendo março o mais chuvoso de todo o ano. O mês de abril apresentou mais da metade dos dias com chuva acima da média diária deste mês, que foi de 11,3 mm.dia⁻¹. O mês de maio, também foi bastante chuvoso, com mais da metade dos dias

Com a chegada do final da estação chuvosa, a precipitação média do mês de junho foi de 6,4 mm.dia⁻¹, associada ao início do inverno no nosso hemisfério que ocorre dia 21 de junho. A partir do mês de junho é perceptível a tendência da precipitação diária diminuir gradativamente, dando início em julho à época menos chuvosa, provocada



apresentando chuvas acima da média, que foi de 8,7 mm.dia⁻¹.

peelo deslocamento da ZCIT para o norte, acompanhando o verão do HN.

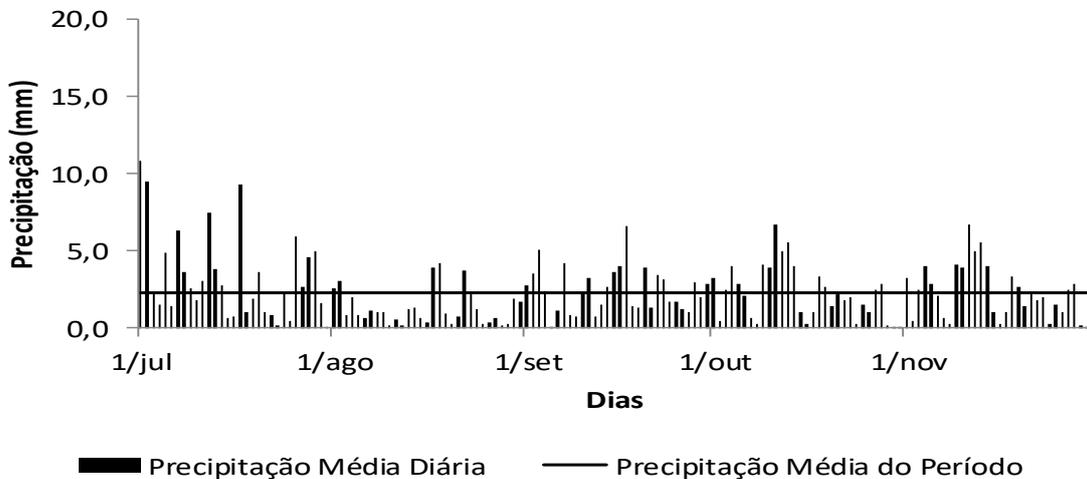


Figura 3. Variabilidade média diária da precipitação (1999 a 2011), durante o período chuvoso, na Floresta Nacional de Caxiuanã, Melgaço/PA.

Figura 4. Variabilidade média diária da precipitação (1999 a 2011) no período menos chuvoso, na Floresta Nacional de Caxiuanã, Melgaço/PA.

Na Figura 4 temos a variabilidade média diária da precipitação em Caxiuanã, para o período menos chuvoso da região. Observou-se que no mês de julho, que dá início a época menos chuvosa (PMC) da região, mais da metade dos dias apresentaram precipitações abaixo da média diária deste mês, que foi de apenas 3,3 mm.dia⁻¹. O mês de agosto foi o que apresentou os menores valores de precipitação,

com média de 1,3 mm.dia⁻¹ e apenas em nove dias a precipitação superou o valor médio. Em setembro houve uma ligeira elevação da precipitação média diária, embora mantendo-se baixa, com um valor de 2,1 mm.dia⁻¹. Os meses subsequentes não apresentaram mudanças significativas em seus regimes pluviométricos, tendo a média oscilado por volta de 2,3 mm.dia⁻¹. No início de dezembro

as precipitações voltam a aumentar, caracterizando o final da época menos chuvosa e início da chuvosa.

Variabilidade média diária da intensidade da precipitação

A precipitação diária foi dividida em diferentes categorias para se entender a contribuição destas no total das chuvas mensais, sendo estas: 1,0-10,0 mm.dia⁻¹, 10,1-20,0 mm.dia⁻¹, 20,1-30,0 mm.dia⁻¹ e acima de 30,0 mm.dia⁻¹.

Na Figura 5 temos a distribuição da frequência relativa (%) mensal das diferentes categorias de eventos de precipitação. Observou-se que as chuvas na menor categoria (1,0 -10,0 mm.dia⁻¹) foram as mais frequentes durante o ano. Ao serem comparadas com as demais categorias, apresentaram maiores percentuais no período menos chuvoso. Em média, acima de 70 % das chuvas de julho a agosto foram predominantemente de 1,0 a 10,0 mm.dia⁻¹. Já no período chuvoso (PC) essa frequência diminuiu, variando de 51,4 % (março) a 63,3 % (dezembro).

Esperava-se que na época mais chuvosa (PC) a precipitação diária apresentasse um regime relativamente maior. Com efeito, as categorias de maior intensidade foram mais frequentes nesta época do ano. As precipitações na faixa de 10,1 a 20,0 mm.dia⁻¹ foram mais elevadas nos meses de fevereiro (23,4 %), maio (24,8 %), junho (23,4) e dezembro (22,5 %), enquanto que nos meses menos chuvosos não ultrapassaram, em média, 18,5 % dos totais mensais. A precipitação diária na faixa de 20,1 a 30,0 mm.dia⁻¹ foram mais frequentes nos meses de fevereiro (11,3 %), março (17,3 %), abril (11,8 %), junho (11,4 %) e julho (10,0 %), diminuindo a ocorrência na maioria dos meses menos chuvosos (PMC).

Os meses de janeiro, abril, maio e setembro, foram onde os eventos de precipitação acima de 30,1 mm.dia⁻¹ prevaleceram sobre os eventos na faixa de 20,1 a 30 mm.dia⁻¹. De janeiro a junho as precipitações diárias na faixa acima de 30,1 mm.dia⁻¹ ocorreram com maior frequência, variando de 10,0 % em fevereiro, a 14,7 % em abril.

Tabela 4. Turnos em função do intervalo de tempo local, expresso em horas e minutos.

Turno	Intervalo de tempo (h e min.)
Madrugada	00h00min – 05h59min
Manhã	06h00min – 11h59min
Tarde	12h00min – 17h59min
Noite	18h00min – 23h59min

Variabilidade média horária da intensidade da precipitação

Na Figura 6 dispõe-se da distribuição mensal da frequência relativa dos eventos horários de intensidade de precipitação. Observou-se que o intervalo compreendido entre 1,0 a 10,0 mm.h⁻¹ foi maior no PMC, em média acima de 87,5 % das ocorrências mensais deste período. Nos meses de agosto e novembro todos os eventos de precipitação ocorridos se apresentaram dentro deste intervalo. Esta mesma categoria também foi a que apresentou a maior frequência de ocorrências no PC, ocorrendo com mais regularidade no mês de dezembro, com 83,3 %, e oscilando nos demais meses entre 25,0 % e 54,2 % da totalidade das ocorrências.

Embora na maioria dos meses a intensidade predominantemente esteja no intervalo de 1,0 a 10,0 mm.h⁻¹, também foi observado que em alguns meses mais chuvosos, entre dezembro a abril, as chuvas foram mais intensas e mais frequentes na categoria entre 10,1 a 20,0 mm.h⁻¹, com uma frequência destes eventos variando entre 5 a 15%. Ainda neste mesmo período chuvoso, mais precisamente durante o mês de março,

também foram observadas precipitações com intensidades de 20,1 a 30,0

mm.h⁻¹. Os registros sugerem este como o único mês onde houve a ocorrência de precipitações com intensidades acima de 30 mm.h⁻¹.

A predominância da baixa intensidade das chuvas no período menos chuvoso pode estar associada à estrutura das nuvens. Neste caso, apresentam-se nuvens do tipo estratiformes, como possíveis sistemas precipitantes que produzem uma quantidade menor de chuvas em relação a nuvens do tipo convectiva, que possui um elevado desenvolvimento vertical. Neste último caso, consequentemente contribuem com maior volume de chuvas em um curto intervalo de tempo, o que promove maior frequência de chuvas nesta modalidade no período chuvoso.

Predominância média diária da precipitação

Também de grande importância é a quantificação da variabilidade média horária da precipitação, pois dependendo da intensidade da chuva, esta pode causar distúrbios no campo hidrológico local, contribuindo para o aumento dos níveis dos rios, podendo gerar inundações e

enchentes em decorrência do grande volume de chuvas intensas.

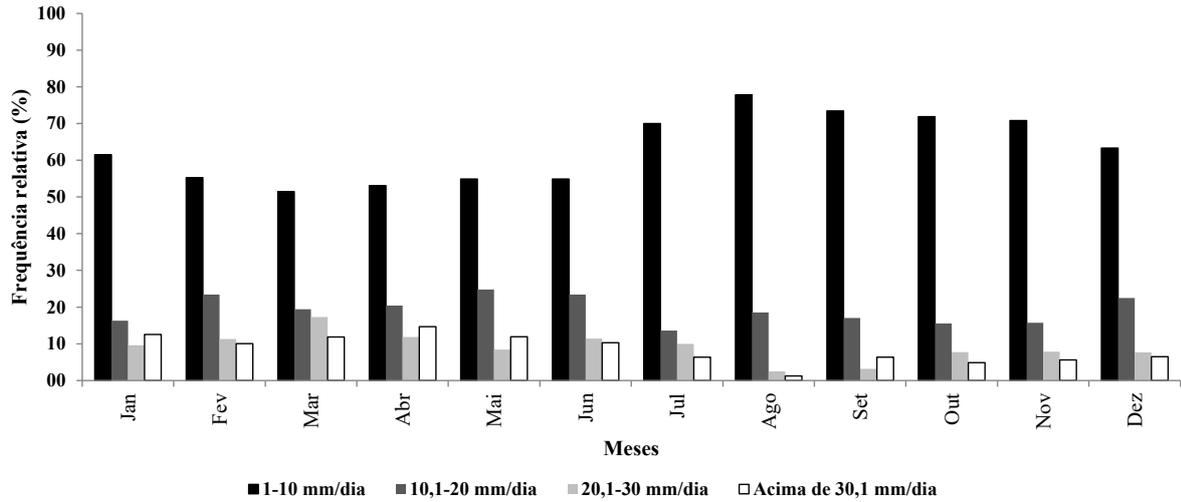


Figura 5. Distribuição da frequência relativa (%) mensal em diferentes categorias de eventos de precipitação diário na FLONA de Caxiuanã, Melgaço/PA. (1999 a 2011).

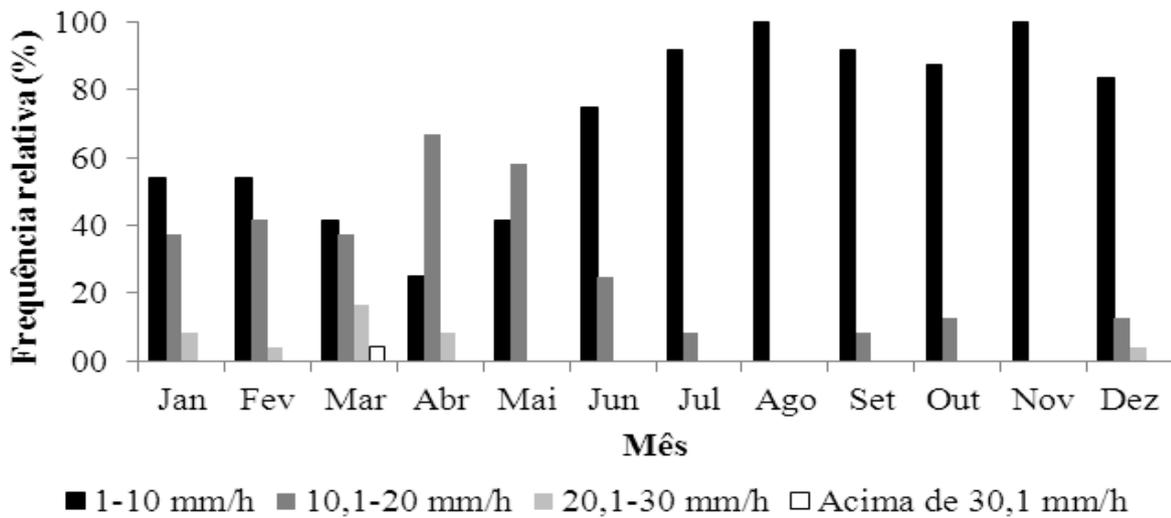


Figura 6. Distribuição da frequência relativa (%) mensal em diferentes categorias de intensidade de precipitação horária (mm.h^{-1}) na FLONA de Caxiuanã, Melgaço/PA. (1999 a 2011).

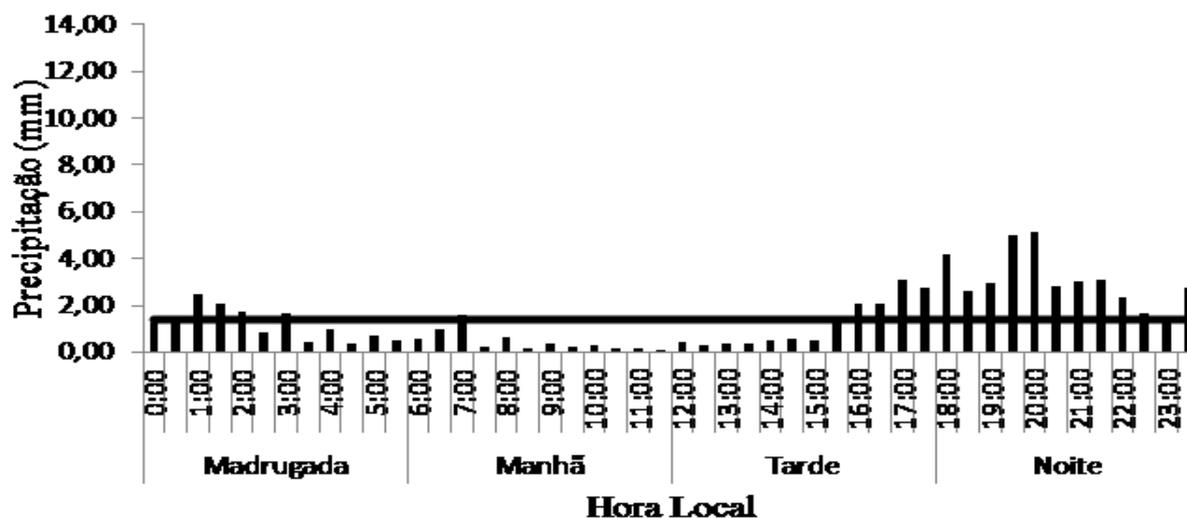


Figura 7. Variabilidade média horária da precipitação durante o período menos chuvoso (1999 a 2011) na Floresta Nacional de Caxiuanã, Melgaço/PA.



Figura 8. Variabilidade média horária da precipitação durante o período menos chuvoso (1999 a 2011) na Floresta Nacional de Caxiuanã, Melgaço/PA.

Com o intuito de se verificar empiricamente esta distribuição, o dia foi dividido em quatro turnos de seis horas cada, com denominações comuns ou usuais, conforme apresentado na Tabela 4.

Na Figura 7 temos a precipitação média horária para o período chuvoso, embora seja abundante em quase todos os turnos do dia, foi mais frequente nos turnos da tarde e da noite, destacando-se geralmente acima da média entre os referidos horários. Neste intervalo ocorreu um prolongamento das chuvas pelo turno da madrugada, alcançando maiores valores de precipitação entre os horários de 16:00 - 18:00h, horário local. As precipitações registradas foram, em grande parte, acima de 6 mm, em ambos os turnos mais chuvosos mencionados. Este fato se deve em função da forte atividade convectiva local, devido ao acúmulo de energia pela atmosfera, intensificada pelos processos de evaporação e evapotranspiração.

Na Figura 8 temos a precipitação média horária para o período menos chuvoso. De acordo com esta Figura, observou-se que as precipitações médias horárias no período menos chuvoso ocorreram com maior frequência nos turnos do final da tarde e grande parte do turno da noite, podendo também ser observados eventos de precipitação no turno da madrugada, embora o volume precipitado tenha se tornado bem mais reduzido, com maior regularidade entre os horários de 18:00 - 20:00h, hora local. Estas geralmente foram com chuvas acima da média, da ordem de 1,4 mm entre os referidos horários.

Conclusões

A precipitação na Floresta Nacional de Caxiuanã apresentou variabilidade temporal significativa, mas mantendo o padrão típico de sua distribuição da região amazônica. Entretanto, algumas particularidades locais importantes foram identificadas, com o objetivo de compreender o papel da precipitação e sua potencial capacidade de interferir no balanço hídrico dinâmico da floresta.

Aqui se destacaram os seguintes tópicos:

Em anos com a ocorrência de eventos de El Niño, frequentemente foram observadas reduções nos totais pluviométricos, embora esta não tenha sido estatisticamente significativa ($p > 0,05$). Apesar desta relação com a precipitação local ter sido observada, Por outro lado, outros estudos da literatura mostram que tem havido uma redução global no regime de chuvas sobre a região.

O período chuvoso, modulado pela ZCIT, compreendeu os meses de dezembro a junho e foi responsável por 83,5 % do volume total anual, enquanto que o período menos chuvoso (PMC), modulada pela atividade convectiva local, compreendeu os meses de julho a novembro. O mês de março e agosto alcançaram respectivamente os picos máximos e mínimos de chuvas mensais.

A maior frequência das chuvas ocorreu na categoria de 1,0 - 10,0 (mm.dia⁻¹) e (mm.h⁻¹) com elevação desta frequência durante o período menos chuvoso. As precipitações diárias nas demais categorias foram mais frequentes no período chuvoso, pois o referido regime tende a ser mais extenso e intenso.

Em média, o período chuvoso apresentou 19 dias/mês de chuvas, enquanto que no período seco, esta média foi de 8 dias de chuvas mensais. Assim, durante o período chuvoso (PC) as chuvas foram predominantes durante os turnos da tarde e da noite. No período menos chuvoso esta predominância ocorreu durante o turno da noite, prolongando-se na maioria dos meses pelo turno da madrugada. À noite as precipitações máximas ocorreram entre os horários de 19:00 – 20:00h, hora local.

Confirmou-se a hipótese de que, em florestas conservadas, no PC o regime de precipitações é estratificado, com chuvas prolongadas, enquanto no PMC as chuvas são predominantemente convectivas. Esta hipótese foi verificada pelo teste estatístico de Friedman ($F(13, GL=11) = 55,73$ e $p < 0,0001$), o qual acusou, respectivamente, que a precipitação do mês de março (PC) foi a positivamente mais excêntrica da série no PC, enquanto que de modo contrário, no PMC, foi a de agosto.

Agradecimentos

Agradecemos ao CNPq - Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico pela bolsa concedida. Ao projeto ESECAFLOR/LBA/MCTI/CNPq/FNDCT, processo 457914/2013 – 0, pela disponibilização dos dados.

Referências

- Ayres, M. et al., 2007. BioEstat 5.0: Aplicações estatísticas nas áreas das ciências biológicas e médicas. Instituto de Desenvolvimento Sustentável Mamirauá - IDS/MCT/CNPq.
- Grimm A.M., Barros V.R, Doyle M.E., 2000. Journal of climate 13, 35-58..
- Cohen, J.C.P., 1989. Um estudo observacional de linhas de instabilidade na Amazônia. Dissertação (mestrado). São José dos Campos/SP, INPE.
- Costa, A. C. L., Braga, A. P., Gonçalves, P. H. L., Costa, R. F. DA, Silva, J. J. A., Malhi, Y. S., Aragão, L. E. O. C. DE, Meir, P.; 2006.
- Costa, J. P. R., Loureiro, R. S., 2000. Variabilidade média mensal de variáveis meteorológicas em Caxiuanã: área de floresta tropical da Amazônia. Anais do XI Congresso Brasileiro de Meteorologia (CBMET), Rio de Janeiro/RJ. CD-ROM, p. 2326- 2330.
- Costa, R. F.; Costa, A. C. L.; Meir, P.; Malhi, Y. S.; Fisher, R. A.; Braga, A. P.; Oliveira, P. J.; Silva J. J. A.; Gonçalves, P. H. L.; Costa, J. M. N.; Vale, R. L.; Sotta, E. D.; Cohen, J. C. P.; Ruivo, M. L.; Silva, R. B. C.; Andrade, V. M. S.; Grace, J.; 2003.
- Costa, A.C.L, Braga, A.P; Gonçalves, P.H.L, Costa, R.F, Silvia Junior, J.A, MALHI, Y.S, Aragão, L.E.O.E, Meir, P., 2006. Estudos Hidrometeorológicos em uma floresta tropical chuvosa na Amazônia – Projeto ESECAFLOR. Revista Brasileira de Meteorologia 21, 283-290. Projeto LBA/ESECAFLOR em Caxiuanã: características, atividades e resultados. Estação Científica Ferreira Penna: dez anos de pesquisa na Amazônia, Caxiuanã. Museu Paraense Emilio Goeldi (MPEG), 2003, CD-ROM.
- Figuroa, S.N., Nobre, C.A., 1990. Precipitation distribution over central and western tropical south America. Climanálise 5, 36-45.
- Florística e estrutura dos ambientes, Caxiuanã. Museu Paraense Emilio Goeldi (MPEG), Belém/PA, p. 163- 194.
- Grimm, A. M.; Barros, V. R.; Doyle, M. E.; 2000.
- Hastenrath, S., 1985. Climate and circulation of the tropics. Atmospheric Science Library, Published by D. Reidel Publishing Company, v. 455.
- Hastenrath, S., Lamb, P.J., 2004. Climate dynamics of atmosphere and ocean in the equatorial zone:

- A synthesis. *International Journal of Climatology* 24, 1601-1612.
- Lisboa, P. L. B., Silva, A. S. L., Almeida, S. S., 1997.
- Marengo, J.A., Hastenrath, S., 1993. Case studies of extreme climatic events in the Amazon Basin. *Journal of Climate* 6, 617-627.
- Marengo, J.A., Tomasella, J., Soares, W. R., Alves, L.M., Nobre, C. A., 2011.
- Marengo, J.A., Tomasella, J., Soares, W.R., Alves, L.M., Nobre, C.A., 2012. Extreme climatic events in the Amazon basin. *Theoretical and applied Climatology*, 107, 73-85.
- Molion, L. C. B., 1987. Climatologia dinâmica da região amazônica: mecanismos de precipitação. *Revista Brasileira de Meteorologia* 2(1), 107-117.
- Molion, L.C.B., Cavalcanti, I.F.A, Ferreira, M.E., 1987. Influência da circulação atmosférica do Hemisfério Norte na precipitação pluviométrica da Amazônia: um estudo de caso. *Anais do VII Simpósio Brasileiro de Hidrologia e Recursos Hídricos*, Salvador/BA.
- Moura, A. D.; Shukla, J.; 1981.
- Moura, A.D., Shukla, J., 1981. On the dynamics of droughts in Northeast Brazil: Observations, theory and numerical experiment with a general circulation model. *J. Atmos.* 38, 2653- 2675.
- Moraes, J.C., Costa, J.P.R., Rocha, E.J.P., Silva, I.M.O., 1997. Estudos Hidrometeorológicos na Bacia de Caxiuanã, Melgaço/PA. *Museu Paraense Emílio Goeldi (MPEG)- Belém/PA*. pp. 85 a 97.
- MPEG, Museu Paraense Emílio Goeldi – Localização da Estação Científica Ferreira Penna (ECFPn) - cortesia de Leandro Ferreira (site: marte.museu-goeldi.br).
- Nunes, H.G.G.C., Barreto, P.N., Sousa, A.M.L., Ferreira, R.C., Santos, S.R.Q., Rodrigues, R.S., Silva, R.B.C., 2010. Análise da variabilidade média mensal de variáveis meteorológicas na floresta nacional de Caxiuanã/PA de 2000-2004. *Anais do XVI Congresso Brasileiro de Meteorologia (CBMET)*, Belém/PA, CD-ROM.
- Oliveira, M.C.F., Costa, A.C.L., Costa, J.P.R., Palheta, M.C.P., Pereira, M.G.P., 2000. Comportamento médio horário e mensal dos elementos meteorológicos sobre floresta, em Caxiuanã, Melgaço- PA. *Anais do XI Congresso Brasileiro de Meteorologia (CBMET)*, Rio de Janeiro/RJ, CD-ROM, p. 2441- 2446.
- Oliveira, L.L., Costa, R.F., Sousa, F.A.S., Costa, A.C.L., Braga, A.P., 2008. Precipitação efetiva e interceptação em Caxiuanã, na Amazônia oriental. *Acta Amazônica* 38, 723- 732.
- Oliveira, L.L., Cunha, A.C, Costa, A.C., Costa, R.F, 2008. Regime térmico e hídrico do solo para área de floresta tropical em anos de El Niño e La Niña, Caxiuanã-PA: Estudo de caso. *Revista Brasileira de Meteorologia* 26, 367-374.
- Sazonalidade e interceptação da chuva na Floresta Nacional, em Caxiuanã - Amazônia Oriental. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, v.16, n. 3, p.285-294, dezembro.
- Santos, S. R. Q.; Silva, R. B. C.; Barreto, P. N.; Nunes, H. G. G. C.; Rodrigues, R. S.; Campos, T. L. O. B.; 2011.
- Souza, J.R.S., Carvalho, S.P., Cohen, J.C.P., Alvalá, R.C.S., Gandú, A.W., 2006. Umidade do solo sob floresta e pastagem no leste da Amazônia. *Anais do XIV Congresso Brasileiro de Meteorologia (CBMET)*, Florianópolis/SC, CD-ROM.
- Souza, J. J. A.; Oliveira, M. C. F.; Dantas, V. A.; Costa, J. P. R.; 2006. Regime pluviométrico da reserva florestal de Caxiuanã, 1996- 2001. *Anais do XIV Congresso Brasileiro de Meteorologia (CBMET)*, Florianópolis/SC, CD-ROM.
- Souza, E.B. et al., 2009. Precipitação sazonal sobre a Amazônia oriental no período chuvoso: observações e simulações regionais com o RegCM3. *Revista Brasileira de Meteorologia* 24, 111-124.
- Stern, N., 2006. *The Economics of Climate Change*. *Stern Review*, UK, 267p.
- TUCCI, C.E.M, 1997. *Hidrologia: ciência e aplicação* 2 ed. Editora da UFRGS, Porto Alegre.
- Tavares, A.L., Santos, D.M., Rocha, E.J.P., 2006. Variabilidade da precipitação em Caxiuanã (Pará - Brasil). *Anais do XIV Congresso Brasileiro de Meteorologia (CBMET)*, Florianópolis/SC, CD-ROM.
- Vianello, R.L., Alves, A.R., 1991. *Meteorologia básica e aplicações*. UFV, Viçosa/MG.