

4

Modelos de predição de precipitação na região Amazônica

4.1.

Introdução aos modelos de predição da distribuição estatística de precipitação

A importância de se definir modelos para a predição da distribuição estatística de precipitação já foi citada na introdução deste trabalho. Porém, a definição de um modelo preciso de abrangência mundial é bastante difícil. Em outras palavras, obter valores paramétricos que ajustem a precipitação em qualquer local do planeta é uma tarefa complicada. Dois fatores principais afetam a precisão do relacionamento existente entre as características pluviométricas de uma determinada região e os valores paramétricos dos modelos:

- a) a grande variabilidade espacial e temporal da precipitação, mesmo dentro de regiões com as mesmas características climáticas;
- b) o fato de a precipitação ser uma combinação aleatória de eventos aleatórios de características diferentes [31], proporcionando a mesma apresentar um perfil multimodal [32,33].

Mesmo para regiões tropicais e equatoriais que apresentam chuvas predominantemente convectivas existe a ocorrência, e portanto a contribuição, de chuvas estratiforme em algumas percentagens de tempo. A análise destes eventos de forma isolada é, em geral, bastante complexo, conforme comentado no capítulo 2. Esta combinação além de ser aleatória, varia de um local para outro, complicando a definição dos valores paramétricos do modelo que atendam toda a região de uma forma precisa. Neste contexto, este capítulo pretende definir um modelo de distribuição estatística para predição de precipitação para ser utilizado na região Amazônica.

4.2.

Modelos de predição da distribuição cumulativa anual da taxa de precipitação

Na literatura científica, vários tipos de funções vem sendo utilizados na tentativa de se modelar a distribuição estatística da precipitação. A característica multimodal da precipitação, dificulta a adaptação perfeita da função em toda faixa de percentagem de tempo. A distribuição log-normal [34,35], que melhor se adapta em baixas taxas de precipitação, e a distribuição gama [34,35,36] são funções utilizadas por alguns autores, individualmente ou até mesmo em conjunto, na modelagem dos dados de precipitação [36,37,38,39].

Outro tipo de perfil bastante utilizado como base de modelo de distribuição de precipitação é o exponencial [40,41,42,43,44,45]. Este apresenta a vantagem de ter as características da distribuição log-normal para pequenas taxas e da distribuição gama em altas taxas, permitindo um ajuste mais preciso que as anteriores individualmente. Por fim, funções como a distribuição Weibull [32,46], uma derivação genérica da função exponencial, e a função logarítmica [47] também são encontradas na literatura científica.

Assim, como pode ser visto, existe uma grande variedade de funções que podem ser utilizadas no ajuste desejado, dependendo do nível de precisão requerido na análise. Desta forma, objetivando se ter uma noção de qual tipo de função melhor se adapta aos dados medidos na região em estudo, foi realizada uma análise com seis tipos de funções usualmente empregadas neste modelamento. Os resultados obtidos são apresentados no item 4.2.1.

4.2.1.

Funções matemáticas

Relativamente ao ajuste com os dados de precipitação medidos na região Amazônica, foram analisadas as seguintes funções:

a) Função Log-Normal [36]:

$$P(R \geq R_0) = \frac{1}{2} \left(1 + \operatorname{erf} \left(\frac{\ln R_0 - m}{\sigma \sqrt{2}} \right) \right) \quad (4.1)$$

onde m e s são os parâmetros da função.

b) Função de Weibull (com dois parâmetros- 2p) [32]:

$$P(R \geq R_0) = \exp \left(- \left(\frac{R_0}{\eta} \right)^\alpha \right) \quad (4.2)$$

onde η e α são os parâmetros da função.

c) Função de Weibull (com três parâmetros - 3p) [32]:

$$P(R \geq R_0) = \exp \left(- \left(\frac{R_0 - \rho}{\eta} \right)^\alpha \right) \quad (4.3)$$

onde η , α e ρ são os parâmetros da função.

d) Função de Moupfouma [40]:

$$P(R \geq R_0) = a \cdot \left(\frac{\exp(-uR_0)}{R_0^b} \right) \quad (4.4)$$

onde a , b e u são os parâmetros da função.

e) Função de Salonen-Baptista [42]:

$$P(R \geq R_0) = P_0 \cdot \exp \left(- aR_0 \frac{(1 + b.R_0)}{(1 + c.R_0)} \right) \quad (4.5)$$

onde a , b , c e P_0 são os parâmetros da função.

f) Função de Paraboni [47]:

$$P(R \geq R_0) = P_0 \cdot \ln^n \left(\frac{R_M + R_m}{R_0 + R_m} \right) \quad (4.6)$$

onde R_M , R_m , P_0 e n são os parâmetros da função.

Através dos programas “Statistica” e “Matlab”, procurou-se o conjunto de parâmetros, em cada sítio de medição e para cada função descrita anteriormente, que fornecesse o melhor ajuste entre a função e os dados obtidos pelos pluviógrafos.

Utilizou-se para o ajuste o método dos mínimos quadrados, isso é, buscou-se minimizar o somatório dos quadrados dos erros absolutos (diferença entre o valor estimado e o valor medido da percentagem de tempo, para cada valor de taxa de precipitação R). O valor da correlação entre a função estimada e a função medida, encontrada pelo programa “Statistica”, foi utilizado como o primeiro parâmetro de comparação.

Cabe ressaltar que não se procurou dar nenhuma restrição aos valores paramétricos, nem se adotar os valores propostos por algum modelo. Em outras palavras, a intenção foi de verificar a forma da função que melhor se adaptaria aos dados medidos não importando os valores dos parâmetros relacionados.

Da mesma forma, não se preocupou em se trabalhar com uma função que apresentasse características de uma função estatística cumulativa, desde que a mesma fornecesse um bom ajuste para a distribuição de precipitação na faixa de percentagem de tempo e/ou taxa de precipitação desejada.

Em outras palavras, a função escolhida será aquela que apresenta um conjunto de parâmetros que permita esta ter a forma mais semelhante com a função cumulativa de distribuição, dentro de um determinado intervalo de tempo e/ou taxa de precipitação desejada. Em nossa pesquisa buscou-se esta análise, em cada sítio, para uma percentagem de tempo menor do que 0,001% e uma taxa de precipitação cumulativa maior do que 1 mm/h.

A tabela 5 apresenta os valores de correlação encontrados para cada uma destas funções no intervalo de análise definido anteriormente. De uma forma geral, pela razão das mesmas terem uma mesma base exponencial, verifica uma grande semelhança entre elas e uma dependência do valor da correlação com a quantidade de parâmetros encontrados em cada uma das funções. Como pode ser visto, as funções com 3(três) ou mais parâmetros se ajustaram melhor as medidas, alcançando correlações maiores do que 99,4%. De forma diferente, as que apresentam apenas 2(dois) parâmetros, isso é a função log-normal e a de função de Weibull (2p), alcançaram patamares de correlação menores, entre 94,9% e 97,7%.

Função	Sítio de Medição							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Log-normal	96,3	96,7	96,3	95,7	96,3	96,6	95,5	95,9
Weibull (2p)	95,6	97,7	97,4	96,7	94,9	97,2	96,0	97,1
Weibull (3p)	99,5	99,5	99,5	99,5	99,8	99,9	99,5	99,6
Moupfouma	99,4	99,8	99,8	99,6	99,4	99,8	99,4	99,8
Salonen-Baptista	99,3	99,8	99,8	99,7	99,4	99,7	99,5	99,6
Paraboni	99,9	99,5	99,8	99,9	99,8	99,9	99,6	99,9

Tabela 5 Valores de correlação, em %, encontrados nos ajustes entre as funções escolhidas e a distribuição cumulativa da taxa de precipitação medida nos sítios da

região Amazônica: (1) Belém; (2) Boa Vista; (3) Cruzeiro do Sul; (4) Macapá; (5) Manaus; (6) Santarém; (7) São Gabriel da Cachoeira e (8) Tabatinga.

Dando continuidade à análise da melhor função de ajuste, pelos resultados apresentados na tabela 5, foram deixadas de lado as funções que apresentam apenas 2(dois) parâmetros. Para as demais funções, foram obtidos os valores paramétricos que melhor ajustaram cada uma delas com as medidas. A tabela 6 apresenta estes valores separados pelo sítio e pela função de ajuste escolhida.

Weibull (3p)				
Sítio/ Parâmetro	ρ	n	α	---
Belém	-358,90	184,87	2,27	---
Boa Vista	-56,84	2,67	0,56	---
Cruz. do Sul	-74,5	9,50	0,73	---
Macapá	-102,40	22,85	1,02	---
Manaus	-309,60	161,75	2,41	---
Santarém	-86,66	17,18	0,90	---
S.G.Cachoeira.	-175,10	63,08	1,45	---
Tabatinga	-134,25	41,03	1,25	---
Paraboni				
Sítio/ Parâmetro	100. P_0	R_M	R_m	n
Belém	0,118	205,18	14,00	2,58
Boa Vista	0,015	204,98	1,38	2,55
Cruz. do Sul	0,050	211,50	0,17	2,41
Macapá	0,061	158,52	0,14	2,29
Manaus	0,102	161,34	16,57	2,81
Santarém	0,067	215,03	15,80	3,26
S.G.Cachoeira.	0,117	257,67	56,86	4,60
Tabatinga	0,061	197,85	6,59	2,96
Salonen-Baptista				
Sítio/ Parâmetro	100. P_0	a	b	c
Belém	1,32	0,138	24,780	93,650
Boa Vista	0,90	0,310	0,017	0,154
Cruz. do Sul	3,51	0,536	0,0019	0,294
Macapá	4,94	1,380	0,023	0,724
Manaus	1,08	0,204	28,450	119,340
Santarém	1,28	0,065	10,760	16,470
S.G.Cachoeira.	1,32	0,123	22,850	67,150

Tabatinga	1,32	0,133	23,240	69,260
------------------	------	-------	--------	--------

Tabela 6 Valores dos parâmetros de melhor ajuste para as funções utilizadas em cada sítio de medição.

Moupfouma				
Sítio/ Parâmetro	100. a	u	b	---
Belém	1,14	0,038	-0,063	---
Boa Vista	0,73	0,030	0,394	---
Cruz. do Sul	1,97	0,031	0,298	---
Macapá	1,61	0,042	0,207	---
Manaus	0,97	0,050	-0,048	---
Santarém	1,57	0,040	0,094	---
S.G.Cachoeira.	1,22	0,044	-0,055	---
Tabatinga	1,38	0,043	0,038	---

Tabela 6 Valores dos parâmetros de melhor ajuste para as funções utilizadas em cada sítio de medição (continuação).

Como mencionado, não houve a preocupação em se restringir nenhum valor paramétrico ou forçá-los para alguma faixa de valor desejada. Assim, verifica-se na tabela 6, a grande variação nos valores paramétricos encontrados no ajuste individual entre um sítio e outro. Em relação as quatro funções com 3(três) ou mais parâmetros, em uma primeira análise, não foram observadas diferenças marcantes quanto à possibilidade de se ajustar os dados de precipitação.

A segunda etapa para se comparar melhor essas funções foi a de analisar, através do programa “Matlab”, os erros relativos encontrados entre os valores de taxa de precipitação cumulativa obtidos pela estimativa e pelos dados medidos, para cada percentagem de tempo. A tabela 7 mostra os resultados da análise, separados por cada sítio de medição, aplicando-se as quatro funções com seus respectivos parâmetros apresentados na tabela 6. São apresentados na tabela 7: o erro relativo máximo, isso é, o maior valor de erro relativo encontrado, o erro relativo médio, o desvio padrão e o valor RMS do erro relativo encontrado na comparação entre as distribuições estimada e medida.

Belém				
Função	Erro Relativo Máximo (%)	Erro Relativo Médio (%)	Desvio Padrão (%)	Erro RMS (%)
Weibull (3p)	60,9	7,9	12,5	14,8
Moupfouma	24,1	7,4	7,1	10,3
Sal.-Bapt.	19,8	6,8	5,8	8,9
Paraboni	8,4	2,4	2,5	3,4
Boa Vista				
Função	Erro Relativo Máximo (%)	Erro Relativo Médio (%)	Desvio Padrão (%)	Erro RMS (%)
Weibull (3p)	29,7	7,7	8,2	11,3
Moupfouma	28,1	5,7	7,7	9,5
Sal.-Bapt.	20,1	4,7	4,9	6,8
Paraboni	16,3	3,9	4,1	5,7
Cruzeiro do Sul				
Função	Erro Relativo Máximo (%)	Erro Relativo Médio (%)	Desvio Padrão (%)	Erro RMS (%)
Weibull (3p)	63,9	10,3	14,6	17,9
Moupfouma	19,7	5,2	6,1	8,0
Sal.-Bapt.	17,5	4,7	4,1	6,2
Paraboni	9,6	2,6	2,4	3,5
Macapá				
Função	Erro Relativo Máximo (%)	Erro Relativo Médio (%)	Desvio Padrão (%)	Erro RMS (%)
Weibull (3p)	68,0	13,0	22,1	25,7
Moupfouma	23,5	6,6	6,9	9,6
Sal.-Bapt.	20,2	5,8	5,9	8,3
Paraboni	6,1	1,9	1,8	2,6

Tabela 7 Valores dos erros relativos para cada tipo de função utilizada no ajuste.

Manaus				
Função	Erro Relativo Máximo (%)	Erro Relativo Médio (%)	Desvio Padrão (%)	Erro RMS (%)
Weibull (3p)	78,0	11,5	23,4	26,1
Moupfouma	43,0	10,3	13,0	16,7
Sal.-Bapt.	24,9	10,6	6,0	12,2
Paraboni	24,2	5,6	6,3	8,5
Santarém				
Função	Erro Relativo Máximo (%)	Erro Relativo Médio (%)	Desvio Padrão (%)	Erro RMS (%)
Weibull (3p)	24,2	6,1	7,4	9,6
Moupfouma	16,9	4,8	4,7	6,7
Sal.-Bapt.	29,2	5,6	7,2	9,1
Paraboni	11,1	3,6	3,3	4,8
São Gabriel da Cachoeira				
Função	Erro Relativo Máximo (%)	Erro Relativo Médio (%)	Desvio Padrão (%)	Erro RMS (%)
Weibull (3p)	32,6	8,1	8,6	11,8
Moupfouma	28,0	8,5	8,2	11,8
Sal.-Bapt.	22,5	7,8	6,2	9,9
Paraboni	20,2	6,9	5,8	9,0
Tabatinga				
Função	Erro Relativo Máximo (%)	Erro Relativo Médio (%)	Desvio Padrão (%)	Erro RMS (%)
Weibull (3p)	39,4	6,0	8,3	10,2
Moupfouma	27,0	4,9	5,9	7,6
Sal.-Bapt.	24,4	5,5	6,2	8,3
Paraboni	15,4	4,1	4,8	6,3

Tabela 7 Valores dos erros relativos para cada tipo de função utilizada no ajuste (continuação).

Conforme pode ser notado na tabela 7, de uma forma geral, as funções confirmaram a sua similaridade quanto ao ajuste. As figuras 26 e 27 apresentam a

comparação para a cidade de Cruzeiro do Sul, um dos sítios onde ocorreram diferenças marcantes.

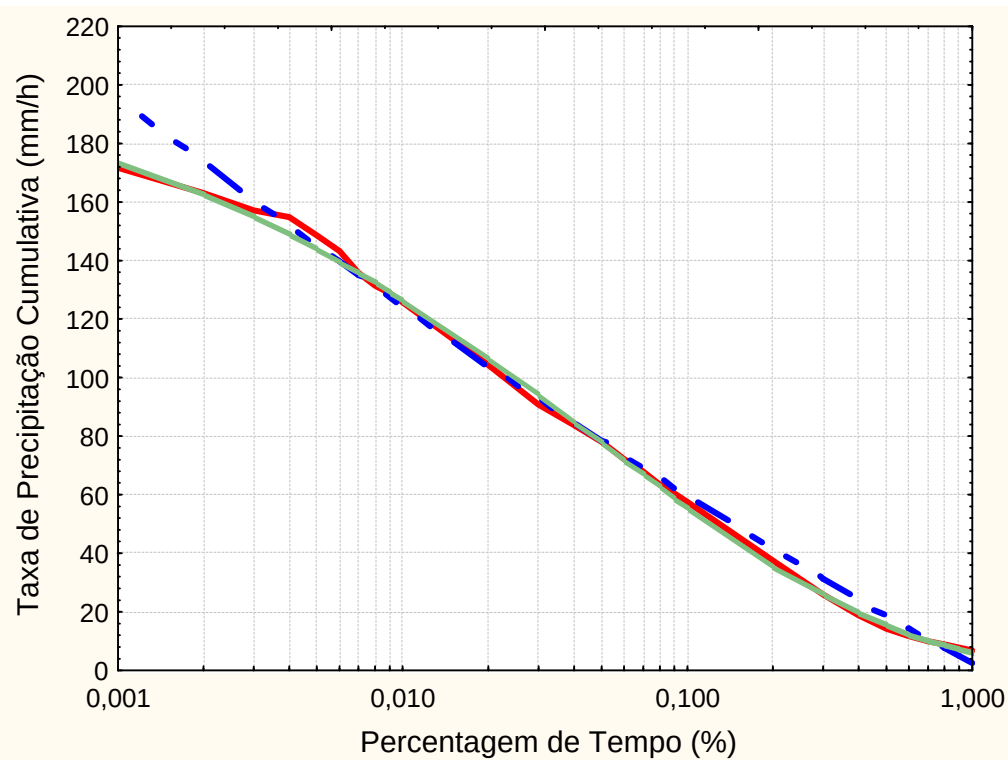


Figura 26 Comparação entre a distribuição cumulativa da taxa de precipitação medida em Cruzeiro do Sul ($\bullet$) e as distribuições estimadas pela função de Weibull (3p) ($\bullet$ - $\bullet$) e Paraboni (- -).

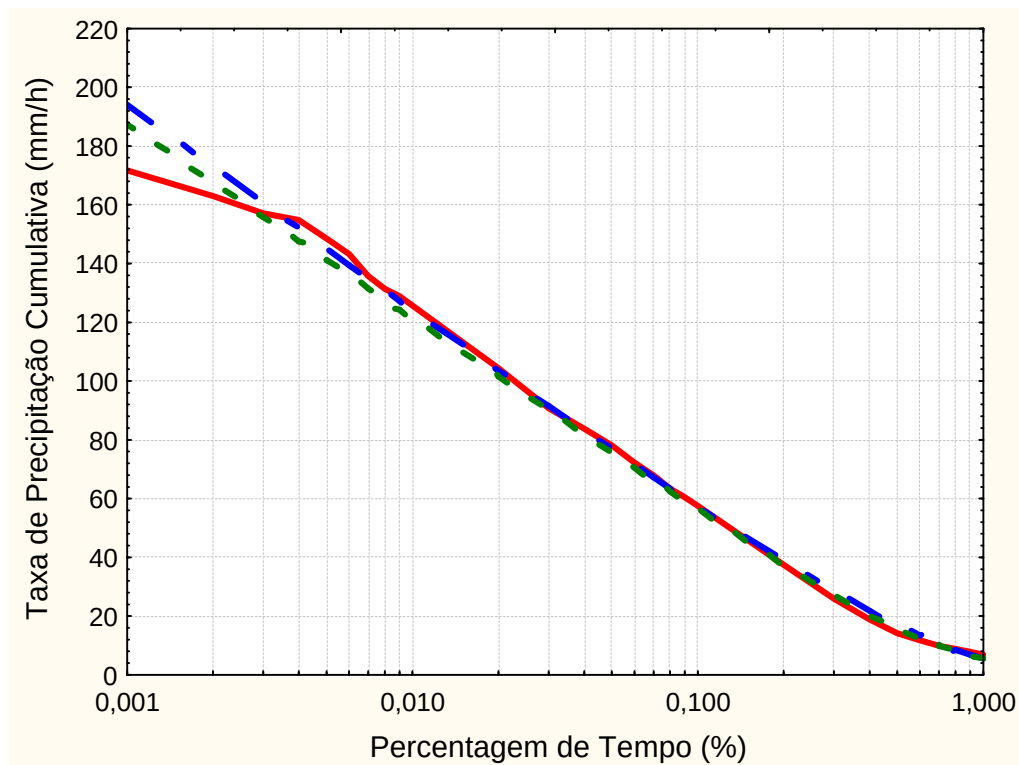


Figura 27 Comparação entre a distribuição cumulativa da taxa de precipitação medida em Cruzeiro do Sul ($\frac{3}{4}$) e as distribuições estimadas pela função de Moupfouma (3p) ($\frac{3}{4}$ - $\frac{3}{4}$) e Salonen-Baptista (- - -).

Apesar da equivalência geral, a função definida por Paraboni foi a que apresentou o melhor resultado, em todos os sítios de medição. Portanto, pode se concluir que esta função foi a melhor que se ajustou às medidas realizadas.

De outro lado, o ajuste com a função de Weibull (3p) apresentou resultados um pouco piores do que as restantes. Analisando criticamente o ajuste com esta função, verifica-se que o problema está nas percentagens de tempo maiores, isso é, em percentagens acima do que 0,5%. Este fato já era esperado pois a função de Weibull é do tipo “*extreme-value*”, ou seja, melhor para cauda de percentagens menores. A função ao buscar o ajuste nas percentagens maiores, apresentou erros relativos grandes, além de piorar o seu ajuste nas percentagens menores. Repetindo-se o ajuste para função de Weibull (3p), porém limitando as percentagens de tempo para valores menores ou iguais a 0,5%, os resultados obtidos são muito melhores. Para esta faixa de percentagem de tempo menor, os resultados obtidos pela Weibull (3p) são similares aos obtidos pela função de Paraboni, ficando melhores do que as obtidas pelas funções de Moupfouma e Salonen-Baptista.

Na figura 28 esta nova função é apresentada como Weibull (3p)* e é comparada com a função de Paraboni. A tabela 8 e 9 apresenta os novos parâmetros encontrados e os valores de erros relativos obtidos, considerando apenas a nova faixa de percentagem de tempo. O sítio de Boa Vista não entrou nesta nova análise pois o mesmo já apresentava uma distribuição de precipitação com percentagens de tempo menores do que 0,5%.

Weibull (3p)*				
Sítio/ Parâmetro	ρ	n	α	Correlação
Belém	-2860,56	2571,37	14,60	99,7
Cruz. do Sul	-211,70	68,20	1,40	99,5
Macapá	-102,40	22,85	1,02	99,5
Manaus	-747,22	551,64	5,22	99,8
Santarém	-171,54	55,89	1,36	99,9
S.G.Cachoeira.	-356,26	188,26	2,41	99,8
Tabatinga	-257,43	116,13	1,93	99,8

Tabela 8 Valores dos parâmetros de melhor ajuste e correlação, em cada sítio de medição, para a função de Weibull (3p) para percentagem de tempo menor do que 0,5%.

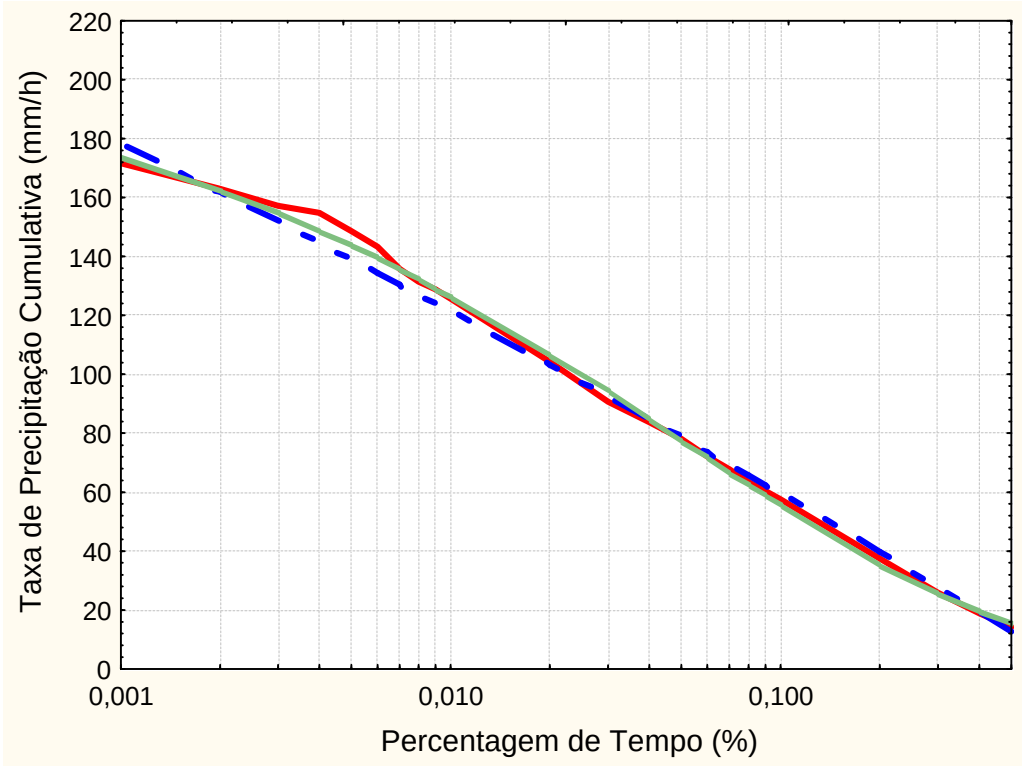


Figura 28 Comparação entre a distribuição cumulativa da taxa de precipitação medida em Cruzeiro do Sul ($\color{red}{\text{---}}$) e as distribuições estimadas pela função de Weibull (3p)* ($\color{blue}{\text{---}}$) e Paraboni ($\color{green}{\text{---}}$) para percentagens de tempo menor do que 0,5%.

Weibull (3p)*				
Função/ Sítio	Erro Relativo Máximo (%)	Erro Relativo Médio (%)	Desvio Padrão (%)	Erro RMS (%)
Belém	7,3	2,7	1,7	3,1
Cruz. do Sul	10,8	3,6	2,1	4,2
Macapá	26,1	8,3	7,2	11,0
Manaus	13,0	3,8	2,6	4,6
Santarém	6,2	2,3	1,4	2,7
S.G.Cachoeira.	7,6	4,4	1,3	4,6
Tabatinga	4,3	1,4	1,2	1,8

Tabela 9 Valores dos erros relativos para o ajuste, em cada sítio de medição, com a função de Weibull (3p) para percentagem de tempo menor do que 0,5%.

Concluindo a análise, pode se afirmar que todas estas quatro funções aqui apresentadas podem ser utilizadas como base da modelagem de uma distribuição

cumulativa de precipitação, com resultados de ajustes pouco diferentes entre si. Com exceção da função de Paraboni, que apresentou ótimo resultado em toda faixa, as demais funções mostraram pequenos problemas que devem ser relatados:

a) A função de Weibull (3p) apresenta maiores erros nas probabilidades maiores ($> 0,3\%$ a $0,5\%$). Essa função tende a subestimar os valores de probabilidade de tempo para taxas de chuva de pequena intensidade. Caso estas percentagens não sejam importantes na análise, a mesma pode obter resultados equivalentes a função de Paraboni, para as percentagens de tempo menores, vide Weibull (3p)*;

b) De forma contrária, as distribuições de Salonen-Baptista e de Moupfouma apresentaram um pior ajuste nas probabilidades menores ($< 0,004\%$), com uma tendência das mesmas apresentarem valores superestimados para estas percentagens de tempo.

Cabe ressaltar também três importantes aspectos:

a) Apesar de em determinados casos, vide tabela 7, os erros relativos máximos observados serem grandes, estes ocorrem sempre nas taxas de precipitação menores. De uma forma geral foram encontrados valores de erro relativos maiores do que 10% apenas em taxas de precipitação menores do que 35mm/h, para erros relativos maiores do que 20% este valor decaiu para 25mm/h;

b) Para se confirmar o bom ajuste destas funções, repetiu-se os ajustes anteriores, porém limitando a faixa de percentagem de tempo entre 0,01% e 0,1%. A diferença entre os erros encontrados para cada tipo de função se tornou praticamente desprezível. Os níveis de valores RMS apresentaram-se menores do que 3,5% em todos os sítios de medição para todas as funções analisadas e os erros médios ficaram abaixo do que 3,0%.

c) Por fim, nos ajustes encontrados, verifica-se que, pelas funções apresentarem um certo número de parâmetros, mais de uma combinação paramétrica pode proporcionar um ajuste semelhante, isso é, com desprezíveis diferenças na análise de correlação e erro relativo. Em outras palavras, na tabela 8 foram apresentados, para cada sítio e cada função, um conjunto de parâmetros que resultou no melhor ajuste. Acontece porém que pode ser obtido resultados bastante semelhantes com outros conjuntos diferentes de parâmetros. Estes novos conjuntos estão relacionados à existência de mínimos locais, no processo de ajuste

da função, que podem apresentar resultados bem próximos ao obtido pelos parâmetros de melhor ajuste.

O fato porém é que até este momento os ajustes foram realizados individualmente para cada sítio de medição, acarretando em resultados bastante precisos. Apesar dos sítios apresentarem climas bastante equivalentes, existe uma grande variabilidade no conjunto de parâmetros apresentados na tabela 6. O próximo passo é a determinação de valores paramétricos que apresentem o melhor ajuste para toda região ou pelo menos em sub-regiões com mesma característica climática. A tabela 10 apresenta o conjunto de parâmetros, para cada uma das funções, que proporciona o melhor ajuste considerando a região toda ou cada tipo de subclima, já apresentado no capítulo 2.

Paraboni				
Sítio/ Parâmetro	100. P_0	R_M	R_m	n
Toda Região	0,021	307,95	30,25	4,56
Subclima Af	0,059	229,18	13,16	3,14
Subclima Am	0,034	322,02	66,56	6,19
Salonen-Baptista				
Sítio/ Parâmetro	100. P_0	a	b	c
Toda Região	0,85	0,128	25,35	82,79
Subclima Af	1,14	0,155	23,33	92,78
Subclima Am	4,07	1,131	0,027	0,71
Moupfouma				
Sítio/ Parâmetro	100. a	u	b	---
Toda Região	1,60	0,035	0,238	---
Subclima Af	1,69	0,037	0,138	---
Subclima Am	1,47	0,042	0,141	---
Weibull (3p)				
Sítio/ Parâmetro	ρ	α	n	---
Toda Região	-71,89	9,63	0,753	---
Subclima Af	-121,00	29,65	1,058	---
Subclima Am	-109,14	26,10	1,060	---
Weibull (3p)*				
Sítio/ Parâmetro	ρ	α	n	---
Toda Região	-109,76	20,51	0,931	---

Subclima Af	-253,73	103,36	1.722	---
Subclima Am	-106,83	23,77	1,017	---

Tabela 10 Valores dos parâmetros de melhor ajuste para as funções utilizadas para região como um todo ou para cada subclima.

Como só existe, para o subclima Aw, um sítio de medição, os parâmetros para este subclima são os mesmos apresentados para o sítio de Boa Vista na tabela 6.

A tabela 11 apresenta o erro relativo médio e a correlação obtidos em cada ajuste realizado. Não foi possível se obter, para os quatro tipos de função utilizados, um conjunto de valores que proporcionasse um ajuste, em todos os sítios, com nível de correlação similar ao da tabela 6. Observa-se que os valores de correlação caem para ordem de 95%, no caso da região como um todo, e para ordem de 98% para os dois tipos de subclima.

	Região Toda	
Função/ Parâmetro	Erro Rel. Médio (%)	Correlação
Paraboni	24,7	94,9
Moupfouma	23,4	95,0
Sal.-Baptista	30,1	94,8
Weibull (3p)	26,0	95,0
Weibull (3p)[*]	21,8	95,1
	Subclima Af	
Função/ Parâmetro	Erro Rel. Médio (%)	Correlação
Paraboni	9,1	98,5
Moupfouma	9,8	98,4
Sal.-Baptista	12,1	98,2
Weibull (3p)	11,6	98,3
Weibull (3p)[*]	8,3	98,3
	Subclima Am	
Função/ Parâmetro	Erro Rel. Médio (%)	Correlação
Paraboni	14,1	98,1
Moupfouma	13,0	98,2
Sal.-Baptista	12,9	98,2
Weibull (3p)	15,6	98,1
Weibull (3p)[*]	10,4	98,1

Tabela 11 Valores dos erros relativos médios e correlação para os ajuste com as funções considerando a região inteira ou um determinado subclima.

Esse resultado mostra que apesar de ser possível obter um ajuste preciso entre os dados de precipitação de um determinado local e uma função paramétrica com 3 ou mais parâmetros para cada medida individual, é bastante difícil se obter ou relacionar valores de parâmetros que melhor ajustam um grupo de sítios de clima equivalente.

Atualmente, uma alternativa que esta sendo adotada é de se buscar um relacionamento dos valores paramétricos das funções de ajuste com dados meteorológicos locais [42,43], tentando-se assim se ter modelos que, apesar de terem sido criados empiricamente, tenham um sentido físico que os tornem mais realísticos. Abre-se, portanto, mão de uma precisão maior, obtida pelo ajuste individual puramente matemático, para se fornecer um caráter físico e mais realístico ao modelo.

Tendo-se em vista tudo que aqui foi apresentado e que será resumido nas premissas listadas a seguir, conclui-se que o modelo da Rec. UIT-R P.837-4 [12], que tem como base a função de Salonen-Baptista, apresentada na equação 4.5, aparece como uma excelente ferramenta para a predição da precipitação na região Amazônica. Fato este que já foi observado em trabalho publicado anteriormente [48].

As premissas que balizaram esta conclusão são:

- a) O ajuste dos dados com a função adotada pelo modelo Salonen-Baptista apresenta resultados satisfatórios, como pode ser observada nas tabelas 5 e 7. Mesmo apresentando um desvio de ajuste nas percentagens menores, este permaneceu em patamares bastante próximos aos obtidos pelas demais funções;
- b) O ajuste de todas as medidas através de um único conjunto fixo de parâmetros, tabela 11, não apresentou resultados muito satisfatórios, sendo praticamente o mesmo para todas as distribuições analisadas;
- c) Nenhum modelo, que utiliza as funções analisadas, apresentou ajuste satisfatório em todos os sítios de medição, quando utilizado junto com os parâmetros definidos pelos seus autores;
- d) Algumas tentativas foram feitas, neste trabalho, em se determinar uma relação entre os parâmetros obtidos pelas outras distribuições e os dados

meteorológicos locais, para se alterar os valores paramétricos dos modelos, porém não se obteve sucesso;

e) O modelo de Salonen-Baptista já apresenta uma relação entre os valores dos parâmetros e os dados meteorológicos locais, facilitando assim a proposição de novos valores paramétricos que proporcionaram um melhor ajuste em cada sítio de medição;

No próximo capítulo será analisado o comportamento do modelo da Rec. U.I.T.-R P.837-4 (Salonen-Baptista) na região Amazônica e serão feitas propostas de atualização que visam melhorar o desempenho do mesmo na região.

4.3.

Modelo para distribuição cumulativa da taxa de precipitação para o pior mês

De acordo com a Rec. U.I.T-R P.841-3 [49], a percentagem de tempo no pior mês (p_w) é relacionada à percentagem de tempo anual (p) através de:

$$p_w = Q \cdot p \quad (4.7)$$

onde $1 < Q < 12$ e tanto “ p ” como “ p_w ” estão associados à mesma taxa de precipitação cumulativa excedida.

O valor de Q é determinado em função de p através de dois parâmetros, Q_1 e β . A seguir é apresentado a fórmula de Q encontrada na recomendação em referência [49]:

$$Q(p) = \begin{cases} 12 & \text{para } p < \left(\frac{Q_1}{12}\right)^{\frac{1}{\beta}} \% \\ Q_1 p^{-\beta} & \text{para } \left(\frac{Q_1}{12}\right)^{\frac{1}{\beta}} \% < p < 3\% \\ Q_1 3^{-\beta} & \text{para } 3\% < p < 30\% \\ Q_1 3^{-\beta} \frac{p}{30}^{\frac{\log(Q_1 3^{-\beta})}{\log(0,3)}} & \text{para } 30\% < p < 3\% \end{cases} \quad (4.8)$$

Para um planejamento global, são considerados valores de Q_1 igual a 2,85 e $\beta = 0,13$. A tabela 12 apresenta valores específicos para aplicação no Brasil, também encontrados na recomendação da U.I.T. referenciada [49]. Estes valores estão divididos por classificação climática:

Clima	Q_1	β
Equatorial	2,85	0,13
Tropical Marítimo	2,25	0,21
Tropical Continental	3,00	0,13
Sub-Tropical	2,85	0,13

Tabela 12 Valores de Q_1 e β para diferentes climas no Brasil.

Foram realizados ajustes para as medidas obtidas na região Amazônica de forma a se obter valores dos parâmetros apropriados para região. Como já esperado e apresentado em outros trabalhos [49,50,51], a equação (4.7) apresentou

excelentes ajustes com as medidas. A tabela 13 apresenta os valores e a correlação do ajuste obtido. O sítio de São Gabriel da Cachoeira não foi utilizado por sua disponibilidade ser reduzida para análise do pior mês.

Sítio de Medição	Q_1 e b	Correlação
Belém	1,90 e 0,21	99,8%
Boa Vista	4,97 e 0,08	99,3%
Cruzeiro do Sul	2,34 e 0,16	99,7%
Macapá	2,43 e 0,13	99,5%
Manaus	1,94 e 0,14	99,3%
Santarém	1,53 e 0,25	99,1%
Tabatinga	1,97 e 0,15	99,7%

Tabela 13 Valores de Q_1 e β ajustados para os sítios de medição na região Amazônica.

Considerando que o subclima Am e Af apresentam comportamento semelhante quanto ao pior mês, foi realizado um ajuste com todos os sítios da tabela 13 menos o sítio de Boa Vista, de forma a se caracterizar a região equatorial amazônica. Para este ajuste encontrou-se uma correlação de 99,3% com valor de Q_1 igual a 1,99 e β igual a 0,18. As figuras 29 e 30 apresentam a comparação entre os dados medidos e os dados estimados pela formulação descrita neste item. Na figura 29 é mostrado o sítio de Belém que apresentou a melhor correlação. Na figura 30 o sítio de Santarém que apresentou a pior correlação. Verifica-se que tanto o parâmetro ajustado individualmente, tabela 13, quanto o parâmetro ajustado para região fornecem resultados melhores do que os valores recomendados pela Rec. U.I.T-R P.841-3 [49].

Cabe ressaltar, entretanto, que foram utilizados neste ajuste apenas os dados provenientes de um ano de medição, ficando este sujeito à variabilidade anual do fenômeno meteorológico. A confirmação destes valores paramétricos dependerá de um ajuste sobre medidas obtidas em vários anos na região.

Por fim, apesar de existirem estudos que realizam ajustes com dois segmentos [52] ao invés de um, como apresentado na equação (4.7), verificou-se que este tipo de ajuste apesar de obter correlações um pouco melhores do que às apresentadas na tabela 13, não fornece um aumento de ganho significativo em relação à função com apenas um segmento.

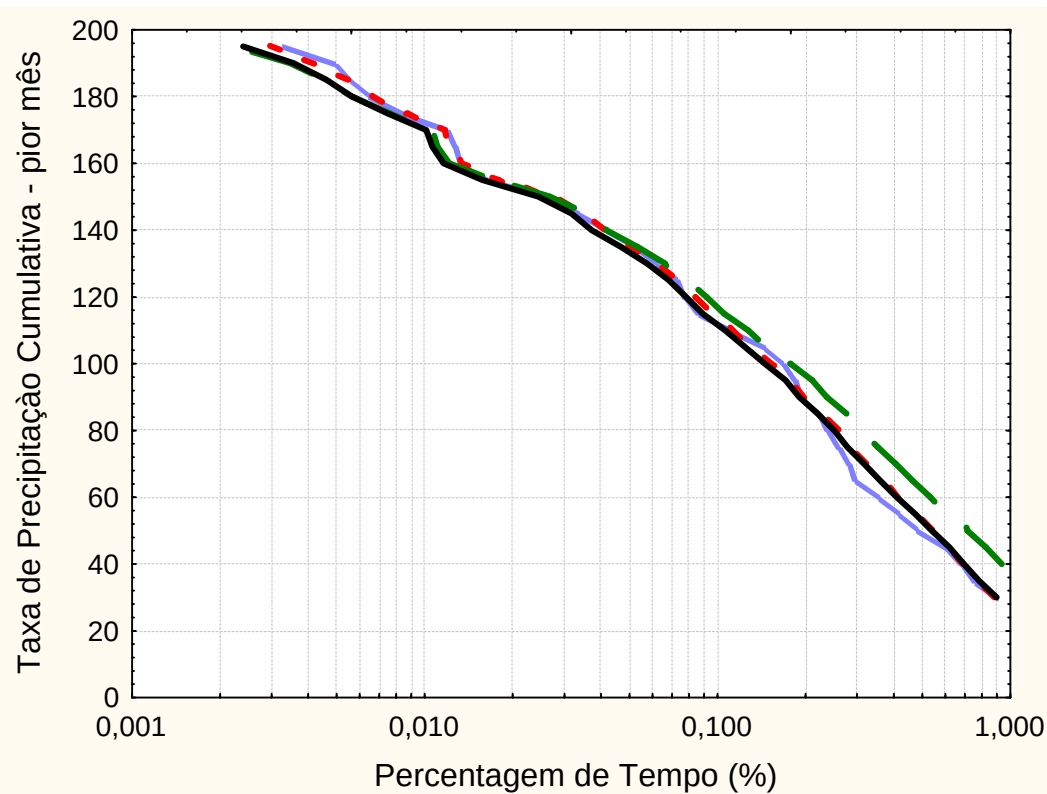


Figura 29 Comparação entre as distribuições cumulativas da taxa de precipitação no pior mês em Belém: medido (---), ajuste com parâmetro da tabela 13 (---), ajuste com parâmetro global U.I.T. ($\frac{3}{4}$ - $\frac{3}{4}$) e ajuste com parâmetro geral região ($\frac{3}{4}$ $\frac{3}{4}$).

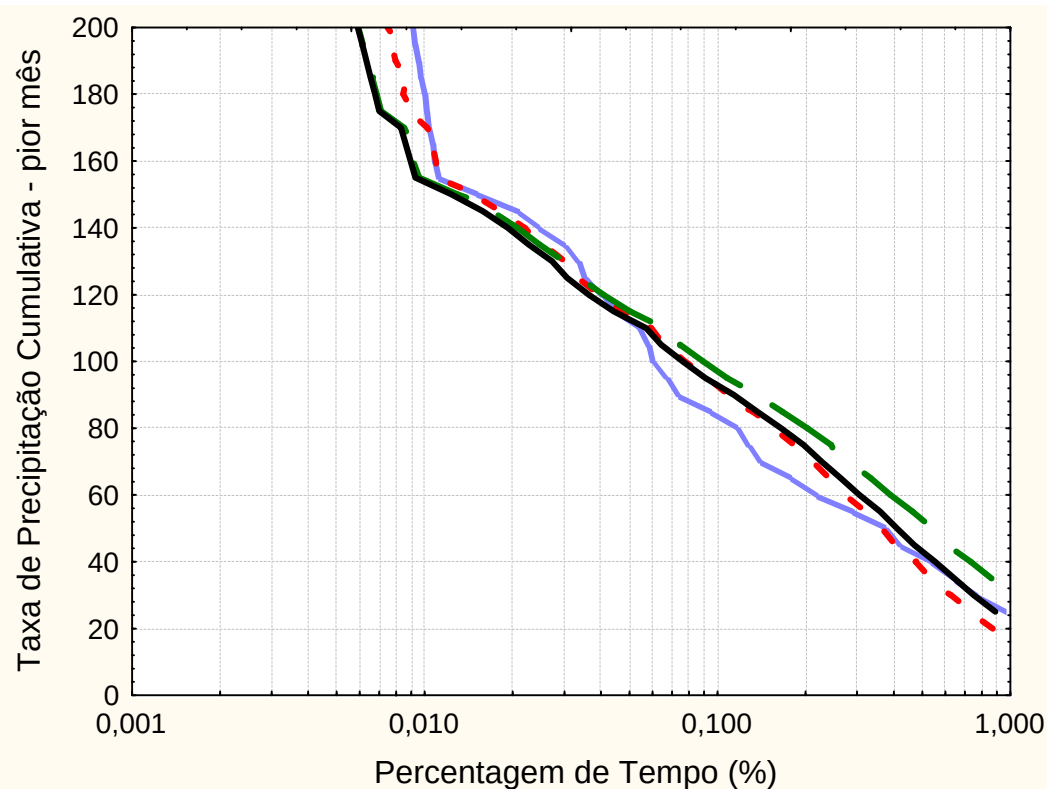


Figura 30 Comparação entre as distribuições cumulativas da taxa de precipitação no pior mês em Santarém: medido (---), ajuste com parâmetro da tabela 13 (---), ajuste com parâmetro global U.I.T. ($\frac{3}{4}$ - $\frac{3}{4}$) e ajuste com parâmetro geral região ($\frac{3}{4}$ $\frac{3}{4}$).

4.4.

Variação ano a ano das distribuições cumulativas da taxa de precipitação

Como qualquer parâmetro meteorológico, a taxa local de precipitação anual apresenta um razoável índice de variabilidade com a mudança do ano de medição. Estima-se que a variação do valor da taxa de precipitação cumulativa, para uma mesma percentagem de tempo e em diversos anos de medidas, varie segundo uma distribuição estatística log-normal [53,54,55].

A obtenção das distribuições estatísticas que modelam a variabilidade da precipitação torna possível a estimação da variação dos valores de taxa para cada percentagem de tempo. O fato porém é que este modelamento necessita de um grande número de anos de medidas para uma estimação correta. Pelo curto período de tempo das medidas atuais, não foi possível uma análise detalhada da variação da distribuição cumulativa da taxa de precipitação. Desta forma apenas um estudo qualitativo será realizado sobre este tema.

Antes de se iniciar o estudo, deve se comentar que o sítio de Boa Vista, local cuja medida apresentou uma grande variabilidade anual, muito acima do esperado, será analisado em separado em um próximo item.

Para se analisar as possíveis variações anuais que podem ocorrer na distribuição da taxa de precipitação, foram comparadas as distribuições médias de medições realizadas anteriormente na região, para os sítios de Belém, Manaus e Ponta das Lages, localizada bem próxima a Manaus [51,56], com as medidas atuais. As figuras 31 e 32 apresentam esta comparação.

Verifica-se que a medida atual comparada à média de sete anos no sítio de Belém apresenta uma coincidência satisfatória. As diferenças ocorrem para percentagens menores que 0,004%, ou seja, menos que dois minutos anuais, fenômeno este que pode estar relacionado com o efeito de tempestades já comentado anteriormente.

Em relação à comparação entre as medições do sítio de Manaus, média de dois anos de medidas, do sítio de Ponta das Lages, um ano de medida, e das medições atuais realizadas também em Manaus, as diferenças encontradas foram um pouco maiores, porém sem grandes diferenças para percentagens maiores do que 0,01%.

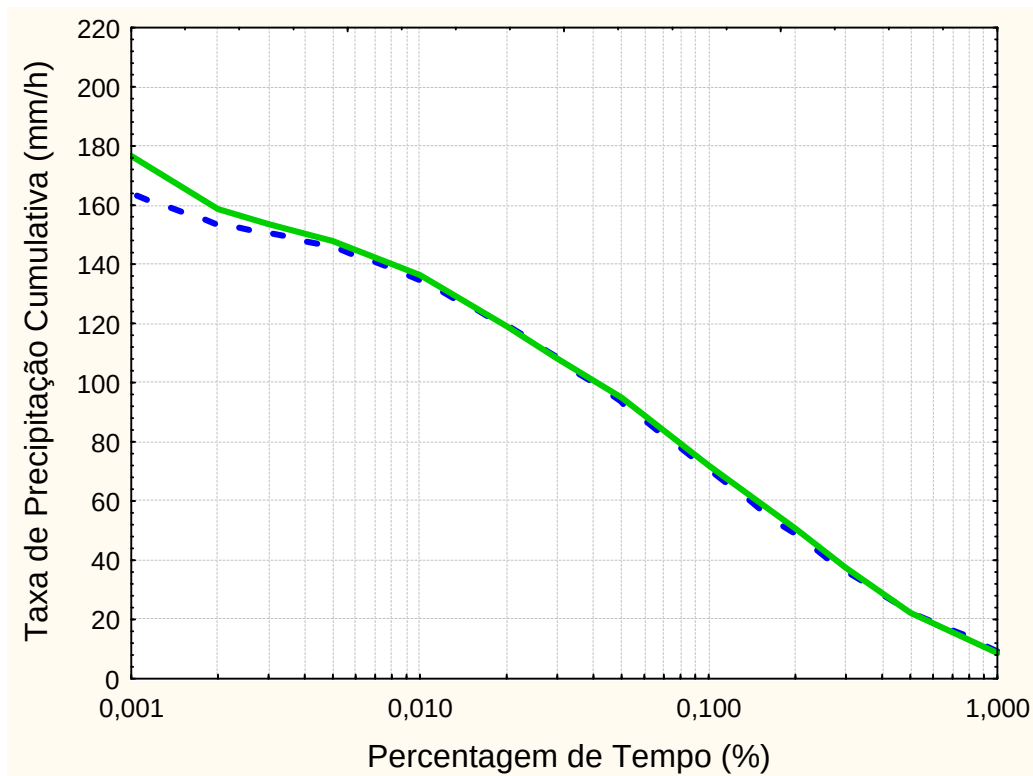


Figura 31 Variação da distribuição cumulativa da taxa de precipitação medida em Belém: medidas anteriores (—) e atual (---).

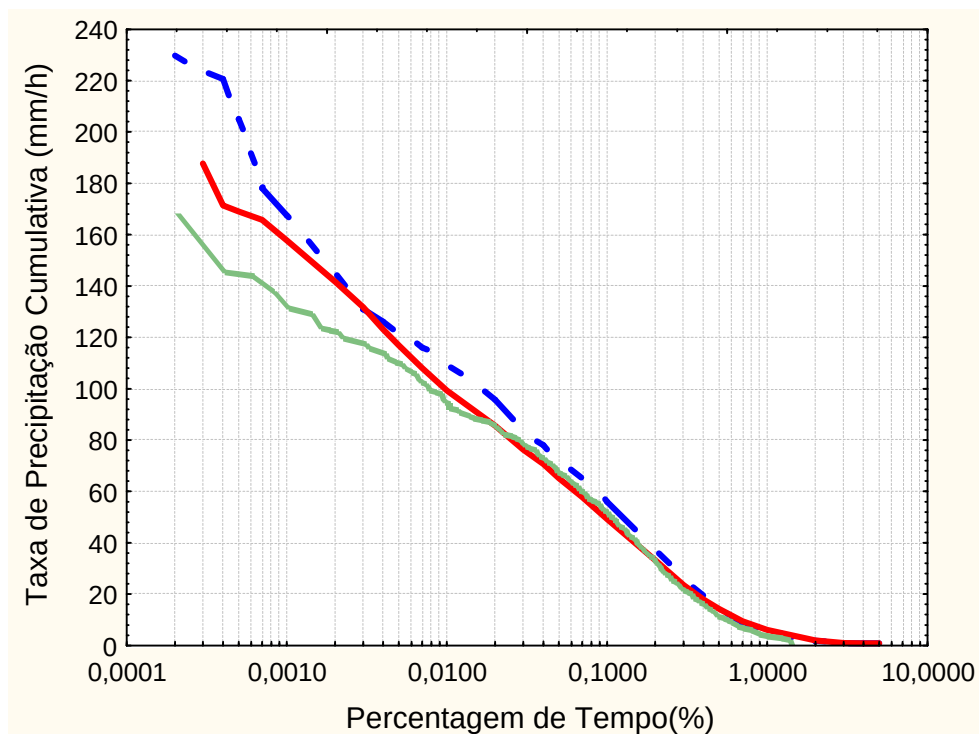


Figura 32 Variação da distribuição cumulativa da taxa de precipitação medida em Manaus, medidas anteriores (—) e atual (---) e em Ponta das Lages (—).

Uma outra análise qualitativa pode ser realizada considerando que os sete sítios de medição encontrados nos subclimas Af e Am, excluindo apenas o sítio de Boa Vista, e as medições anteriores de Manaus, Ponta das Lages e Belém [51,56] são distribuições estatísticas de um mesmo local. Esta consideração se baseia na pequena diferença encontrada entre as características climáticas destes locais. Utilizando estas distribuições como sendo de um mesmo local e medindo-se as diferenças das taxas de precipitação encontradas nas percentagens padronizadas, verifica-se que estas variações se aproximam de uma distribuição log-normal de média nula. A tabela 14 apresenta o valor estimado para o desvio padrão em cada percentagem de tempo. Cabe ressaltar que, pelo pequeno número de amostras existentes, os valores apresentados constituem apenas uma estimativa. Em [53], para uma média global, foi encontrado valores de 0,21 para o desvio padrão em uma percentagem de 0,1%. Em [54,55] foram encontrados valores que variavam de 0,1 a 0,22 para a faixa de 0,001% a 1%.

Complementarmente, pode se empregar também, nesta avaliação de variabilidade, o conceito estatístico de intervalo de confiança [57]. A tabela 14 apresenta também o valor do intervalo em torno da média, com 99% de certeza, no qual estima-se encontrar os valores das taxas cumulativas de precipitação para algumas percentagens de tempo.

Percentagem de Tempo	Desvio Padrão	Intervalo de Confiança
1%	0,32	± 24,0%
0,1%	0,14	± 10,0%
0,01%	0,13	± 8,8%
0,001%	0,12	± 8,3 %

Tabela 14 Valores estimados para desvio padrão da variabilidade anual e intervalo de confiança.

Por fim deseja-se fazer uma análise de variabilidade individual para cada sítio de medição. Apesar de não se ter 2 anos completos de medição, pode se deslocar apenas um mês de medição e determinar assim uma distribuição anual diferente da anterior. Com este deslocamento, as duas extremidades de 12 meses podem ou não caracterizar distribuições anuais distintas. Isso dependerá dos meses que permaneceram em comum, isso é, dos meses que não existem medições duplicadas. Caso estes não sejam relevantes para a determinação da

distribuição, estas duas distribuições podem ser consideradas como representativas de anos diferentes.

O período de medição para todos os sítios analisados variou de 18 a 20 meses, assim, podem ser obtidas de 7 a 9 distribuições diferentes em cada sítio. Apenas nos sítios de Macapá, Cruzeiro do Sul e Manaus é possível afirmar, com pequena probabilidade de erro, que pode ser caracterizado duas anuais distintas. Os meses comuns a todas as anuais, nestes sítios, não são significantes na obtenção da distribuição anual. A tabela 16 apresenta os valores mínimos, máximos, médios e variação em torno da média para estes três sítios. Os demais sítios onde não se foi possível se afirmar uma caracterização de duas distribuições distintas, apresentam valores de variação bastante menores aos apresentados na tabela 15.

Sítio de Medição	Variações das Taxas de Precipitação				
	%	Taxa Mínima (mm/h)	Taxa Máxima (mm/h)	Taxa Média (mm/h)	Variação em Torno da Média(%)
Manaus	1	3,2	4,8	3,8	±19,1
	0,1	44,3	54,1	49,0	± 9,9
	0,01	93,4	107,2	100,9	± 6,9
	0,001	123,3	134,9	131,9	± 4,5
Cruzeiro do Sul	1	5,1	8,3	6,9	± 23,6
	0,1	49,2	61,5	56,7	± 11,2
	0,01	108,8	127,2	118,9	± 7,8
	0,001	153,7	169,6	163,2	± 4,9
Macapá	1	4,0	5,5	4,9	± 16,1
	0,1	44,6	48,0	46,6	± 3,6
	0,01	96,9	103,4	100,1	± 1,7
	0,001	135,5	143,3	138,8	± 2,8

Tabela 15 Variação dos valores das taxas cumulativa de precipitação para percentagens de tempo padrão.

Verifica-se que estes valores estão dentro dos intervalos de confiança definidos na análise feita com todos os sítios em conjunto apresentados na tabela 14. As figuras 33 e 34 apresentam as nove distribuições para o sítio de Cruzeiro do Sul e para o sítio de Macapá.

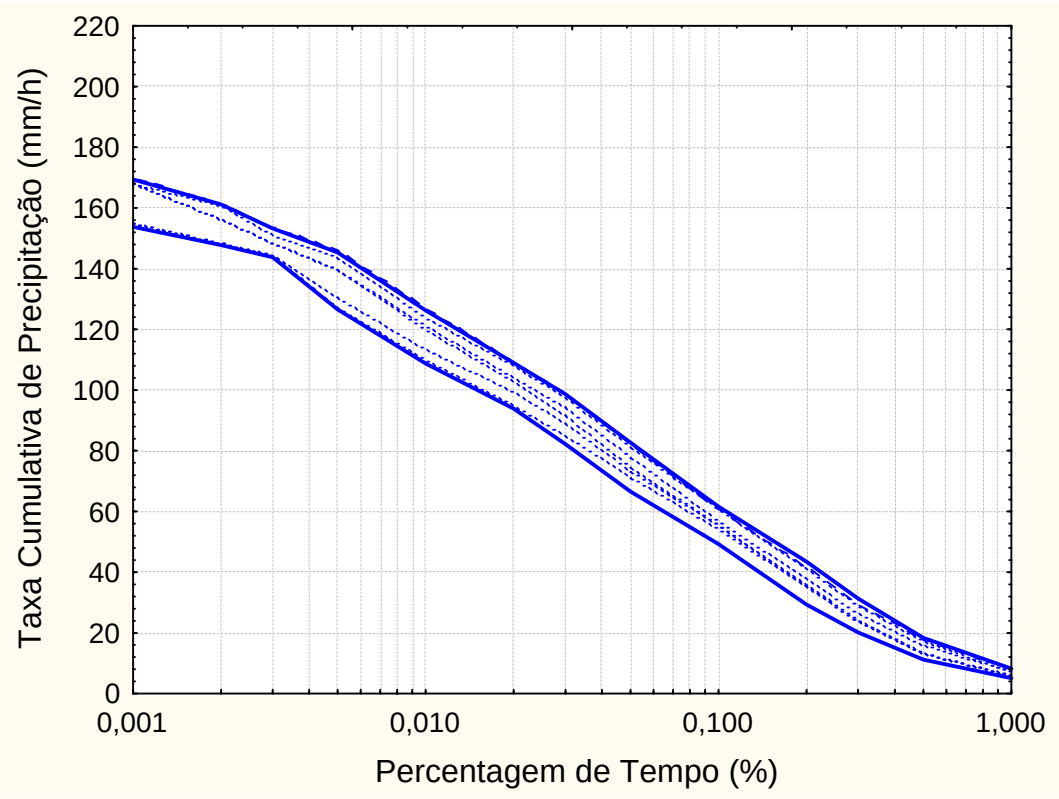


Figura 33 Variação da distribuição cumulativa da taxa de precipitação, variando janela de 1 mês, em Cruzeiro do Sul.

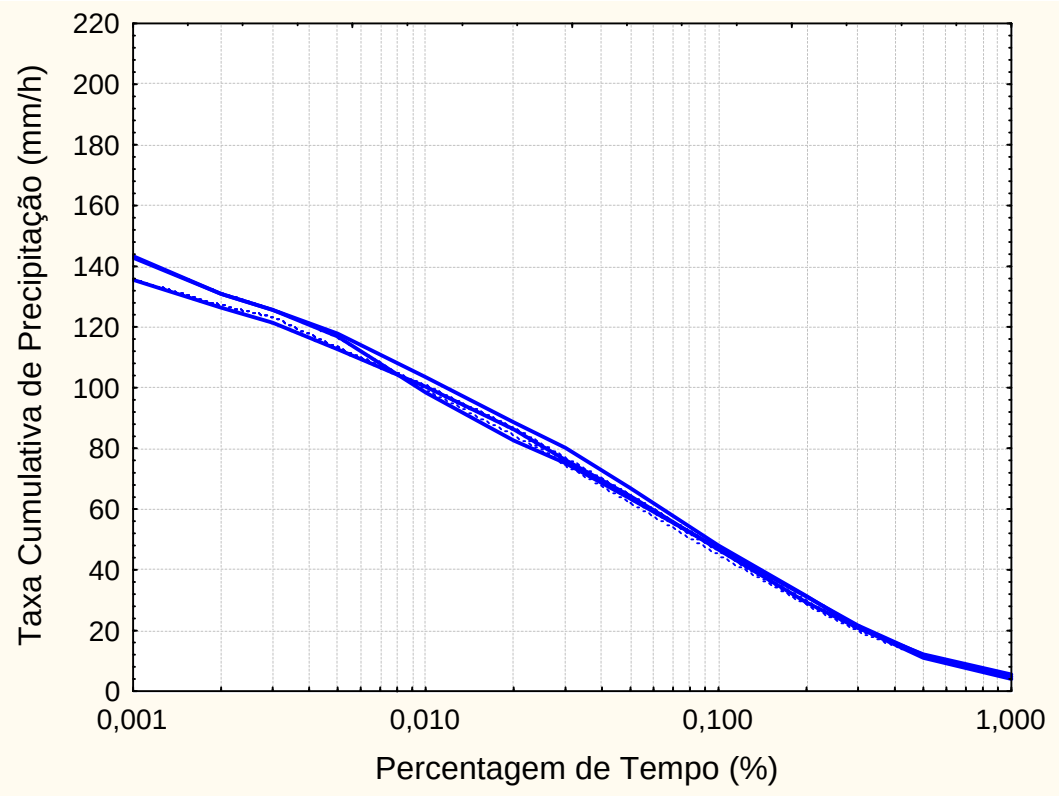


Figura 34 Variação da distribuição cumulativa da taxa de precipitação, variando janelas de 1 mês, em Macapá.

Em Cruzeiro do Sul foi observada a maior variação dentre todos os sítios de medidas, exceto para o caso de Boa Vista. Em Macapá, apesar da possibilidade de se definir duas distribuições distintas, estas estão muito próximas entre si. O sítio de Manaus apresentou um comportamento intermediário aos das duas figuras, quanto à variabilidade da distribuição.

Esses resultados, aqui apresentados, mostram que por ser a precipitação um fenômeno meteorológico, dependendo de diversos fatores, esta apresenta variação que dependem do ano de medição. Como pode ser visto, em sua grande maioria, tais variações ocorrem em uma faixa pequena para percentagens menores do que 0,01%, fato já concluído também em outro estudo de chuva na região [56].

Uma forma de se minimizar o efeito desta variação anual é se trabalhar, sempre que possível, com uma distribuição cumulativa de taxa de precipitação média obtida através de vários anos de medição. Para se obter uma distribuição média estável, valores de entre 10 e 30 anos, dependendo do clima do local de medição, são considerados como necessários [52].

Outro ponto que deve ser analisado é quanto à periodicidade de variação destas distribuições cumulativas. Não existem, até o presente momento, resultados que comprovem a existência de um padrão de periodicidade. Em percentagens de tempo maiores, onde a chuva estratiforme é dominante, alguns resultados de periodicidade, na literatura científica, são apresentados [55]. Porém, até mesmo nestas percentagens de tempo, em certos sítios de medição este padrão de periodicidade não é observado [52,58]. Para percentagens de tempo menores, onde a chuva convectiva é dominante, não existe resultado de periodicidade conhecido.

Para meteorologia o período de 30 anos é considerado como um período de tempo suficiente para repetição do fenômeno meteorológico, por esta razão as normais climatológicas são determinadas para cada 30 anos. Mas, mesmo com este período razoavelmente longo de 30 anos, a periodicidade pode não ser observada [58].

4.4.1. Variabilidade em Boa Vista

O período das medições realizadas no sítio de Boa Vista durou 24 meses, de setembro de 2003 até agosto de 2005. Desta forma, para este sítio, foi possível se determinar duas distribuições anuais distintas. O problema é que as distribuições determinadas através das medidas apresentaram uma grande variabilidade entre si, muito acima ao esperado e analisado no item anterior.

As diferenças relativas observadas entre as distribuições anuais são de 20% a 30%, para cima e para baixo da média, para as percentagens de tempo variando de 0,001% até 1%. Este comportamento pode ser observado na figura 35.

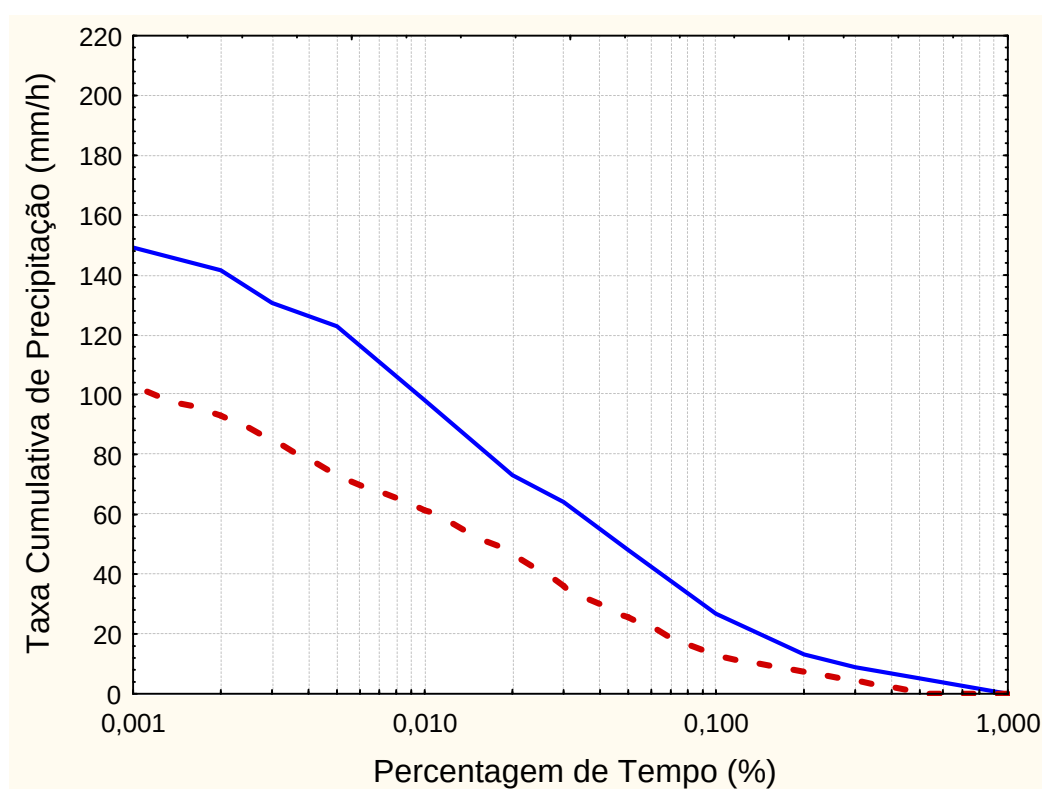


Figura 35 Variação da distribuição cumulativa da taxa de precipitação anual em Boa Vista. Primeiro ano de medição (—). Segundo ano de medição (- - -).

Um primeiro aspecto observado foi o baixo valor do acumulado anual de precipitação, muito abaixo da média do local. Os dois anos de medição considerados apresentaram valores de 907,7mm e 516,5mm, respectivamente. O valor médio local para a precipitação cumulativa anual, encontrado na literatura, é de 1701,3 mm [26] ou de 1686,0 mm [25]. Assim, os períodos de

medidas atuais apresentaram precipitações cumulativas, no mínimo, 45% (primeiro período) e 70% (segundo período) abaixo da média local de precipitação.

O segundo aspecto foi observado ao analisar as medidas mês a mês. Verificou-se que a partir do mês de junho de 2004 os acumulados mensais estão muito abaixo das médias, afetando assim o fim do primeiro período de medição e basicamente todo o segundo período. Pelas médias mensais [25,26] verifica que os meses de grande intensidade de chuva deveriam ser entre abril e agosto. Fato este que não ocorreu nos dois períodos atuais. Para as medidas atuais analisadas, os meses de maior intensidade de chuva foram, para o primeiro período, o de setembro de 2003, abril e maio de 2004, e para o segundo período, o de abril e maio de 2004, sendo que estes bem abaixo quando comparados com o período anterior.

A figura 36 apresenta a comparação entre o mês de setembro de 2003 e setembro de 2004. Por esta figura pode ser observado porque da grande diferença entre os dois períodos de medição. Fato semelhante, porém com uma diferença um pouco menor, ocorre entre os meses de abril de 2004 e abril de 2005.

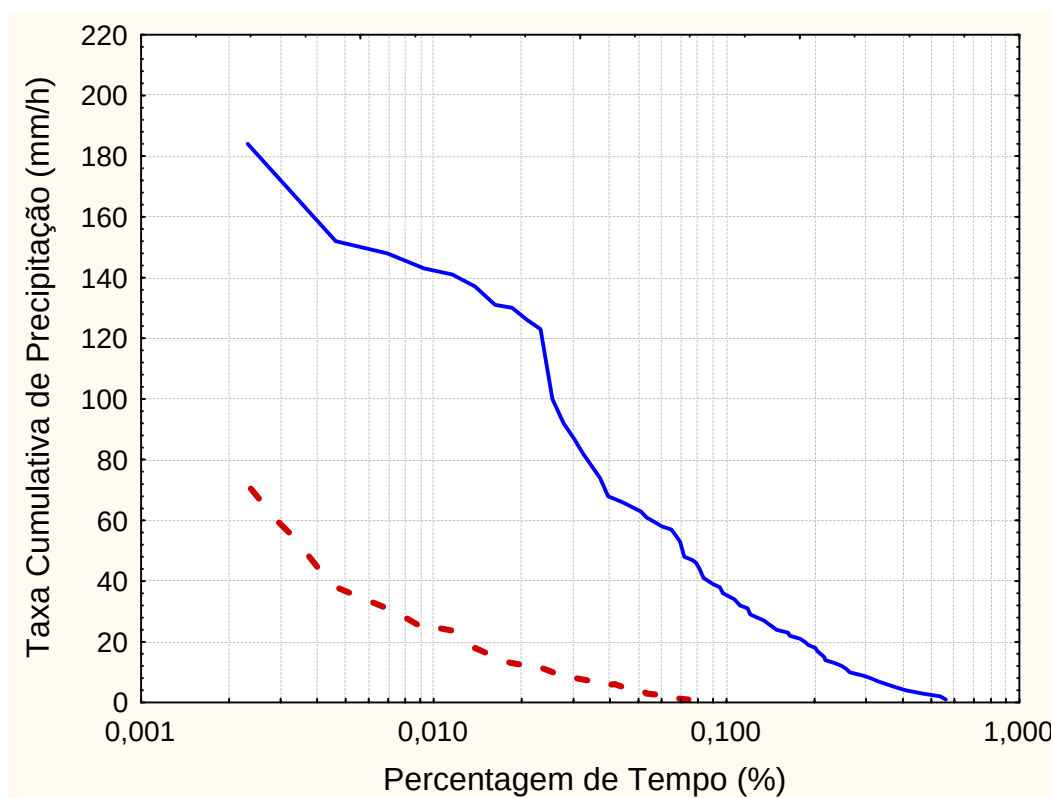


Figura 36 Variação da distribuição cumulativa da taxa de precipitação, em Boa Vista, para o mês de setembro de 2003 (—) e setembro de 2004 (- - -).

Assim, finalizando, nada de concreto pode se afirmar sobre a distribuição anual de Boa Vista, necessitando ainda de um período maior de coleta para se tirar uma conclusão definitiva. De uma forma preliminar, conclui-se que a distribuição anual do primeiro ano de medição já aparenta ser uma distribuição abaixo da média para o local. Este fato pode ser confirmado pela comparação desta distribuição com as distribuições de Vila Apiau e Bonfim, retiradas através do modelo da Rec. U.I.T-R P. 837-4, com os parâmetros obtidos por este trabalho para estes sítios, ver capítulo 5. Estas cidades estão bem próximas ao sítio de Boa Vista e apresentam climas com características bastante semelhantes.

O grande problema é que no segundo período a precipitação ainda é menor, acarretando um período tão atípico que produziu uma distribuição muito baixa para região, fora até dos limites de variabilidade esperados pelo item anterior. Cabe ressaltar porém que apesar de atípico, estatisticamente este evento é normal e possível de ocorrer, tendo apenas uma probabilidade de ocorrência bastante baixa.