UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA SANITÁRIA

JOEMA FERREIRA DA COSTA GARCIA

ANÁLISE DA PRECIPITAÇÃO NO SEMI-ÁRIDO POTIGUAR

Natal
2011

JOEMA FERREIRA DA COSTA GARCIA

ANÁLISE DA PRECIPITAÇÃO NO SEMI-ÁRIDO POTIGUAR

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Sanitária, da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Sanitária.

Orientador: Prof. Dr. Lúcio Flávio Ferreira Moreira

Natal
2011

Seção de Informação e Referência
Catalogação da Publicação na Fonte. UFRN / Biblioteca Central Zila Mamede

Garcia, Joema Ferreira da Costa.
Análise da precipitação no semi-árido Potiguar. /Joema Ferreira da Costa Garcia. – Natal, RN, 2011.
62f. ; il.

Orientador: Lúcio Flávio Ferreira Moreira.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Centro de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Sanitária.

1. Precipitação. – Dissertação. 2. Semi-árido nordestino. – Dissertação. 3. Processos Climáticos. – Dissertação. 4. Meio ambiente. – Dissertação. I. Moreira, Lúcio Flávio Ferreira. II. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. III. Título.

RN/UF/BCZM CDU 551.577.3 (813.2)

JOEMA FERREIRA DA COSTA GARCIA

ANÁLISE DA PRECIPITAÇÃO NO SEMI-ÁRIDO POTIGUAR

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Sanitária, da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Sanitária.

BANCA EXAMINADORA

_____

Dr. Lúcio Flavio Ferreira Moreira – Orientador

_____

Dr. Arthur Mattos – Examinador Interno

_____

Dr. Cristiano das Neves Almeida – Examinador Externo

Natal, 30 de junho de 2011

“Oh! Deus,
perdoe esse pobre coitado,
que de joelhos rezou um bocado,
pedindo pra chuva cair,
cair sem parar.

Oh! Deus,
será que o senhor se zangou,
e é só por isso que o sol se arretirou,
fazendo cair toda chuva que há.

Oh! Senhor,
pedi pro sol se esconder um tiquinho,
pedi pra chover,
mas chover de mansinho,
pra ver se nascia uma planta,
uma planta no chão.

Oh! Meu Deus,
se eu não rezei direito,
a culpa é do sujeito,
desse pobre que nem sabe fazer a oração.

Meu Deus,
perdoe encher meus olhos d'água,
e ter-lhe pedido cheinho de mágoa,
pro sol inclemente,
se arretirar, retirar.

Desculpe, pedir a toda hora,
pra chegar o inverno
Desculpe eu pedir para acabar com o inferno
Que sempre queimou o meu Ceará.”

Gordurinha & Nelinho

Aos sertanejos que persistem, ofereço.

Agradecimentos

Aos meus professores, em especial ao meu orientador, Professor Lúcio Flávio, pelo incentivo, ajuda e paciência, que fizeram a diferença.
Ao Banco do Nordeste, pelo apoio imprescindível.
A minha família e aos meus amigos, pelo exemplo, apoio e amor essenciais.

RESUMO

O regime pluviométrico no semi-árido Nordestino é altamente variável. Os processos climáticos associados às precipitações são complexos e seus efeitos podem representar situações limites de seca ou enchentes, os quais podem ter efeitos negativos para a sociedade e meio ambiente. A economia da região, com forte componente agrário, é fortemente impactada pelas condições climáticas. A análise de chuvas intensas é feita tradicionalmente utilizando as equações tipo intensidade-duração-freqüência (IDF). Os resultados obtidos nesses estudos são usados em projetos de engenharia envolvendo obras hidráulicas, tais como rede de drenagem e obras viárias. Por outro lado, a análise dos dados de precipitação pode exigir a adoção de algum tipo de critério de identificação de eventos. Um dos critérios mais usados é o intervalo mínimo entre eventos (IMEE). Este estudo tem o objetivo de analisar o efeito do IMEE nas características dos eventos de precipitação. Para isso, foi usada uma serie histórica de precipitação com 9 anos de registros (2002-2011). Os dados foram registrados numa estação pluviográfica automática instalada na Estação Ecológica do Seridó. Os resultados demonstraram que o valor do IMEE adotado tem um efeito importante no numero de eventos, duração, altura precipitada, intensidade média e no intervalo médio entre eventos. Além disso, verificou-se uma maior ocorrência de eventos extremos para pequenos valores de IMEE. A maioria dos eventos apresentou intensidade média acima de 2 mm/h, independente do IMEE adotado. O coeficiente de avanço da tormenta situou-se, na maioria dos casos, no primeiro quartil do evento, independente do valor do IMEE. A análise probabilística dos dados observados utilizando séries parciais possibilitou o ajuste de equações IDF características do local.

Palavras-chave: precipitação, semi-árido, evento, IMEE, intensidade.

ABSTRACT

The semiarid rainfall regime is northeastern Brazil is highly variable. Climate processes associated with rainfall are complex and their effects may represent extreme situations of drought or floods, which can have adverse effects on society and the environment. The regional economy has a significant agricultural component, which is strongly influenced by weather conditions. Maximum precipitation analysis is traditionally performed using the intensity-duration-frequency (IDF) probabilistic approach. Results from such analysis are typically used in engineering projects involving hydraulic structures such as drainage network systems and road structures. On the other hand, precipitation data analysis may require the adoption of some kind of event identification criteria. The minimum inter-event duration (IMEE) is one of the most used criteria. This study aims to analyze the effect of the IMEE on the obtained rain event properties. For this purpose, a nine-year precipitation time series (2002-2011) was used. This data was obtained from an automatic raingauge station, installed in an environmentally protected area, Ecological Seridó Station. The results showed that adopted IMEE values has an important effect on the number of events, duration, event height, mean rainfall rate and mean inter-event duration. Furthermore, a higher occurrence of extreme events was observed for small IMEE values. Most events showed average rainfall intensity higher than 2 $mm.h^{-1}$ regardless of IMEE. The storm coefficient of advance was, in most cases, within the first quartile of the event, regardless of the IMEE value. Time series analysis using partial time series made it possible to adjust the IDF equations to local characteristics.

Keywords: rainfall, semiarid, event, IMEE, intensity.

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

BESNN – Bacia Experimental de Serra Negra do Norte
FAO – Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação
IBAMA – Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
IBESA – Implantação de Bacias Experimentais no Semi-árido
IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IDF – Intensidade, Duração e Frequência
IEE – Intervalo Entre Eventos
IMEE – Intervalo Mínimo Entre Eventos
LARHISA – Laboratório de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental
MS – Microsoft
SEA – Storm Event Analysis
TSM – Temperatura da Superfície do Mar
UFRN – Universidade Federal do Rio Grande do Norte
UNESCO – Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura
ZCIT – Zona de Convergência Intertropical

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dados básicos de precipitação - Planilha 39
Tabela 2 – Dados representativos da série histórica 44
Tabela 3 – Propriedades dos eventos em função do critério IMME adotado 45
Tabela 4 – Equações ajustadas a partir da série de precipitação 48
Tabela 5 – Classificação da chuva quanto a sua intensidade segundo Tokay e Short (1996) 48
Tabela 6 – Classificação dos eventos de chuva na BESNN, quanto a sua Intensidade 51
Tabela 7 – Classificação dos eventos analisados segundo critério de Huff (1967) 53
Tabela 8 – Equações IDF Equações IDF ajustadas 54

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Nova delimitação do semi-árido brasileiro. Fonte: Ministério da Integração Nacional 15
Figura 2 – Zonas homogêneas do semi-árido brasileiro segundo Molinier et al. (1994). Fonte: Molinier et al. (1994) 20
Figura 3 – Pluviograma típico de um equipamento analógico. O eixo superior indica o tempo (h); o eixo vertical indica a altura precipitada (mm) 25
Figura 4 – Pluviógrafo Digital. Fonte: http://www.campbellsci.com.br 25
Figura 5 – Localização da BESNN e das bacias hidrográficas dos rios Piranhas-Açu, Seridó, Sabugí e Logradouro. Fonte: Medeiros (2005) 36
Figura 6 – Localização e hidrografia da BESNN e localização do Pluv1. Fonte: Medeiros (2005) 36
Figura 7 – Visão panorâmica do pluviógrafo usado no estudo. Fonte: Medeiros (2005) 37
Figura 8 – Fluxograma para determinação das características dos eventos em função do IMEE 41
Figura 9 – Variação das estatísticas da duração 46
Figura 10 – Variação das estatísticas da intensidade 46
Figura 11 – Variação das estatísticas do volume 46
Figura 12 – Variação das estatísticas do intervalo entre eventos (IEE) 47
Figura 13 – Precipitação média mensal 49
Figura 14 – Variação da classificação Tokay e Short (1996) 50
Figura 15 – Posição da intensidade máxima segundo o critério de Huff (1967) 53
Figura 16 – Intensidades máximas das equações da BESNN e de Natal com 5 minutos de duração. 55
Figura 17 – Intensidades máximas das equações da BESNN e de Natal com 60 minutos de duração 56
Figura 18 – Intensidades máximas das equações da BESNN e de Natal com 180 minutos de duração 56

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 11
2. REFERENCIAL TEÓRICO 13
2.1. A região semi-árida do Nordeste brasileiro 13
2.2. A precipitação e o semi-árido 16
2.3. Medida da precipitação 24
2.4. Características dos eventos de precipitação no semi-árido. Estudos anteriores. 27
2.5. Chuvas intensas 31
3. MATERIAIS E MÉTODOS 35
3.1. Área de estudo 35
3.2. Precipitação na BESNN 38
3.3. Metodologia de análise e tratamento dos dados de precipitação 39
3.3.1. Definição dos eventos **39**
3.3.2. Relação intensidade-duração-frequência **41**
4. RESULTADOS 44
4.1. Comportamento das propriedades dos eventos diante da variação do imee 44
4.2. Caracterização dos eventos 49
4.2.1. Classificação quanto à intensidade média da chuva **50**
4.2.2. Classificação quanto à posição relativa da intensidade máxima **52**
4.1. Equações intensidade-duração-frequência 54
5. CONCLUSÕES 58
REFERÊNCIAS 59

1. INTRODUÇÃO

A precipitação é uma variável de fundamental importância nos estudos relacionados com os recursos hídricos e o meio ambiente, especialmente no semi-árido Nordestino, região onde a água é um elemento chave para o desenvolvimento econômico.

A região semi-árida apresenta uma economia fortemente baseada no setor primário, num complexo de pecuária extensiva e agricultura. Nela, as variações climáticas influenciam a dinâmica econômica regional. Atividades agro-pastoris, que utilizam na maior parte dos casos tecnologias tradicionais, são bastante afetadas pelas condições climáticas na região, notadamente pela precipitação sazonal e pelas incertezas na sua previsibilidade. Nesse contexto, o avanço do conhecimento relativo aos processos climáticos e hidrológicos no semi-árido é de fundamental importância na formulação de políticas de desenvolvimento econômico e social.

Com efeito, os processos climáticos que influenciam as precipitações no semi-árido são complexos. O efeito desses mecanismos se reflete na distribuição da precipitação na região, conferindo uma alta irregularidade na distribuição espaço-temporal. Tal irregularidade se traduz na ocorrência de eventos extremos na região com efeitos catastróficos. Além disso, os períodos secos reduzem a disponibilidade de água e sugerem a necessidade de um planejamento no manejo da água na escala da bacia hidrográfica.

Estudos recentes abordando mudanças climáticas globais e regionais apontam para um possível aumento na variabilidade da precipitação no semi-árido, aumentando o risco de ocorrência de períodos secos e de inundações.

Os eventos de precipitação responsáveis por grandes prejuízos sociais e econômicos (impacto na erosão, inundações de áreas urbanas e rurais, perda de safras, etc.) são denominados chuvas intensas. O estudo da ocorrência dessas chuvas é feito tradicionalmente utilizando as equações intensidade, duração e freqüência (IDF), que relacionam a duração, intensidade e a probabilidade da intensidade máxima ser igualada ou superada durante um determinado período. Essas equações podem ser utilizadas em diferentes campos da engenharia envolvendo projetos de obras hidráulicas, tais como redes de galerias de drenagem, obras viárias, pequenas obras hidráulicas, entre outros.

A análise da precipitação é freqüentemente baseada em eventos chuvosos. Para tanto, é necessário que sejam estabelecidos critérios para a separação dos registros

em eventos. Entre eles, a definição do tempo mínimo necessário para que um novo registro seja considerado o início de um novo evento. Esta é a definição do intervalo mínimo entre eventos (IMEE). Apesar da sua importância na análise dos eventos de precipitação, ainda não há consenso no meio cientifico no que se refere à padronização de um valor de IMEE a ser usado como critério de análise. Desta forma, os estudos têm utilizado o valor que julga mais conveniente.

Nesse contexto, o presente trabalho apresenta um estudo envolvendo a análise estatística dos dados de precipitação obtidos numa estação pluviográfica situada no Seridó Potiguar. Nesse sentido, foi aplicada uma metodologia de análise dos dados envolvendo os parâmetros dos eventos em função do IMEE, além do ajuste de equações IDF a partir da análise de eventos extremos usando séries parciais.

Assim, este estudo tem como objetivo geral analisar a ocorrência dos eventos de precipitação na região do Seridó Potiguar. Os objetivos específicos deste estudo são os seguintes:

- Analisar as seguintes características dos eventos de precipitação: intensidade máxima, intensidade media, coeficiente de avanço, duração e altura precipitada;
- Avaliar o efeito do intervalo mínimo entre eventos (IMEE) adotado no comportamento das propriedades dos eventos de precipitação;
- Ajustar equações intensidade, duração e freqüência (IDF) com base na analise probabilística de eventos extremos utilizando séries parciais.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. A Região Semi-árida do Nordeste Brasileiro

Aproximadamente um terço da superfície terrestre apresenta clima árido e semi-árido. A UNESCO (1979) adota uma classificação que se baseia na relação entre a precipitação média anual (P) e a evapotranspiração potencial média anual de Thornthwaite, segundo a qual a região é semi-árida quando:

$$0{,}2 < \frac{P}{ETP} < 0{,}5$$

Além disso, de acordo com UNESCO (1979), a região é considerada semi-árida quando a precipitação média anual varia entre 300-800 mm, com uma variabilidade anual entre 25-50%.

De acordo com a FAO (Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação), a hidrologia da região semi-árida tem uma característica própria que a diferencia de outras regiões. Do ponto de vista climático, a região apresenta as seguintes características:

- Altos níveis de radiação solar;
- Alta variação na temperatura, tanto ao longo do dia quanto a nível anual;
- Estação chuvosa curta, com a ocorrência de chuvas intensas de curta duração;
- Longos períodos de seca entre as estações chuvosas;
- Alta variabilidade espacial na ocorrência da chuva na região;
- Alta variação interanual da precipitação anual, onde a variação com 95% de probabilidade situa-se entre 40-200% do valor médio.

A classificação oficial utilizada para delimitar as áreas com clima semi-árido no Brasil levava em consideração a isoieta de 800 mm como referência, ou seja, as áreas com precipitação abaixo de 800 mm eram consideradas semi-áridas.

Em 2004, o Ministério da Integração Nacional criou um grupo de trabalho com o intuito de apresentar estudos e propostas de critérios para redefinir a Região Semi-árida do Nordeste. Até então, o único parâmetro técnico oficial para se considerar a região era a precipitação média inferior a 800 mm, o que não considerava a variabilidade temporal do parâmetro. Em 10 de março de 2005, os Ministros da

Integração Nacional, do Meio Ambiente e da Ciência e Tecnologia assinaram a Portaria Interministerial Nº 1, que instituiu a nova delimitação do semi-árido brasileiro, resultante do trabalho do grupo que atualizou os critérios de seleção e os municípios que passam a fazer parte dessa região. De acordo com o Relatório Final do Grupo de Trabalho Interministerial para Redelimitação do Semi-árido e Polígono das Secas, os novos critérios técnicos para a delimitação do semi-árido brasileiro são:

- Precipitação pluviométrica média anual inferior a 800 mm;
- Índice de aridez de Thornthwaite inferior a 0,5 (relação entre a precipitação e a evapotranspiração potencial); e
- Risco de seca maior que 60%.

A Figura 1 apresenta um mapa com a nova delimitação mencionada anteriormente.
Considerando tais critérios, o semi-árido brasileiro envolve uma área de 969.589,4 km^2, equivalentes a quase 80% da região Nordeste e 10% do espaço territorial brasileiro, incluindo a região norte de Minas Gerais. Sua população é de cerca de 21 milhões de pessoas (11% da população brasileira), segundo Censo Demográfico 2000, do IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística).
Dentre os estados do Nordeste, o Rio Grande do Norte, que possui 53.077 km^2, é o que detém maior percentual de sua área classificada como semi-árido, com 93,4%.

Figura 1 – Nova delimitação do semi-árido brasileiro.
Fonte: Ministério da Integração Nacional

Considerando as condições edafoclimáticas, o semi-árido nordestino apresenta como características um clima com temperaturas médias anuais entre 23 e 28ºC, insolação média superior a 2.800 horas por ano, umidade relativa em torno de 65%, precipitação média anual abaixo de 800 mm e solos litólicos (com baixa profundidade e substrato predominantemente cristalino). A principal resposta fito-ecológica da semiaridez é configurada pelo domínio do ecossistema das caatingas.

Historicamente esta região tem enfrentado problemas hídricos associados à irregularidade na distribuição da precipitação, com consequências sociais e

econômicas, seja de escassez hídrica ou de grandes inundações, que ocasionam a perda de safras, comprometimento da infra-estrutura local, erosão, entre outros.

Com boa parte da sua economia baseada no setor primário, num complexo de pecuária extensiva e agricultura, as limitações impostas pelo clima afetam fortemente a dinâmica econômica regional. Estas atividades, geralmente apoiadas em base técnica frágil, utilizando na maior parte dos casos tecnologias tradicionais, são bastante afetadas pelas condições climáticas na região, basicamente pela baixa precipitação e incertezas na previsibilidade da sua ocorrência. A variabilidade interanual aumenta com a diminuição da precipitação anual. Além disso, regiões com baixa precipitação estão mais propensas à ocorrência de eventos extremos catastróficos associados a enchentes e erosão.

Neste contexto, o conhecimento dos processos climáticos e hidrológicos no semi-árido é de fundamental importância na formulação de uma política de desenvolvimento econômico e social da região. Essas informações são necessárias aos tomadores de decisão, uma vez que o plano de desenvolvimento deve envolver o gerenciamento dos recursos hídricos na região semi-árida, num contexto de pressão demográfica, oferta hídrica limitada e de difícil previsibilidade.

Nesse sentido, o manejo sustentável da água na região supõe a necessidade de planejamento da oferta e demanda, monitoramento contínuo das variáveis e processos, bem como do estudo dos impactos das atividades humanas na terra e nos recursos hídricos. Assim, o desenvolvimento da região semi-árida exige necessariamente o planejamento racional do uso da água no tempo e no espaço.

2.2. A Precipitação e o Semi-árido

O regime de precipitação no Nordeste brasileiro é marcado pela alta irregularidade. Esta característica decorre de um conjunto de fatores, que incluem as propriedades fisiográficas da região e a influência da vários sistemas atmosféricos (ARAÚJO, 2006).

A região semi-árida do Nordeste do Brasil está submetida a processos climáticos complexos que influenciam as precipitações. Estes fenômenos são caracterizados pela grande variabilidade espacial e temporal que impõem às chuvas na região, podendo provocar enchentes e secas, acarretando grandes problemas para a sociedade e para os ecossistemas naturais das localidades atingidas.

Diferentes partes da região estão sujeitas a diferentes tipos de mecanismos geradores de precipitações. Dentre os principais sistemas atuantes no Nordeste brasileiro encontram-se os Sistemas Frontais, a Zona de Convergência Intertropical, os Vórtices Ciclônicos de Ar Superior, os Distúrbios de Leste e os Sistemas Convectivos de Meso-escala.

Zona de Convergência Intertropical

A Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) é o principal sistema responsável pelas precipitações em toda a metade Norte do semi-árido, principalmente o estado do Ceará, Oeste do Rio Grande do Norte e interior da Paraíba e Pernambuco. Seus efeitos se fazem sentir, sobretudo, entre janeiro e maio.

É uma banda de nuvens que circunda a faixa equatorial do globo terrestre, formada pela junção dos ventos alísios de Nordeste e os ventos alísios de Sudeste, resultado do movimento ascendente do ar quente e úmido. No processo de ascenção, o ar se resfria, dando origem às nuvens. É um fenômeno tipicamente climático que acompanha o deslocamento aparente do Sol com um atraso de aproximadamente dois meses, em média.

A ZCIT é mais significativa sobre os Oceanos e por isso, a Temperatura da Superfície do Mar (TSM) é um dos fatores determinantes na sua posição e intensidade (FERREIRA e MELLO, 2005).

Sistemas frontais

É um importante sistema produtor de precipitação, atuando basicamente na região Sul do Nordeste brasileiro. Ocorre nos meses de novembro a janeiro, atuando principalmente na parte Sul da Bahia, decrescendo para o Norte, porém sem atingir a parte Central do semi-árido.

Uma frente fria é uma zona de transição onde uma massa de ar frio (mais densa) penetra por baixo de uma massa de ar quente (menos densa), como uma cunha, e faz com que o ar quente e úmido suba, forme as nuvens e, conseqüentemente, as chuvas (FERREIRA e MELLO, 2005). Mas, somente alguns desses sistemas ou parte deles penetram mais ao norte. Dessa maneira, são poucos os Sistemas Frontais que influenciam a produção das chuvas na parte Central, Norte e Leste da região Nordeste, durante todo o ano, porque eles não possuem o gradiente térmico característico da região Sul e Sudeste do Brasil.

Distúrbios de Leste

Estes sistemas provocam chuvas principalmente na Zona da Mata, que se estende desde o Recôncavo Baiano até o litoral do Rio Grande do Norte, no período de maio a agosto. Seu deslocamento se dá de Leste para Oeste até atingir o continente. São comuns na maioria dos anos, só que sua intensidade depende da TSM, do cisalhamento do vento, dos efeitos da orografia e da circulação de brisa marítima e terrestre, de forma que intensificam ou dissipam esse tipo de sistema.

Vórtices Ciclônicos de Ar Superior

São sistemas que atuam nos meses de novembro a fevereiro, ocorrem de forma muito irregular em termos de seu posicionamento, produzem tanto chuvas intensas como estiagem. Na sua periferia há formação de nuvens causadoras de chuva e no centro há movimentos de ar de cima para baixo (subsidência), aumentando a pressão e inibindo a formação de nuvens, podendo atuar durante meses. Observados pelas imagens de satélite, têm a forma aproximada de um círculo girando no sentido horário. Seu aparecimento está relacionado com a circulação geral da atmosfera, com a Alta da Bolívia, com a posição da Zona de Convergência do Atlântico Sul e a penetração de Frentes Frias do sul.

Sistemas Convectivos de Meso-escala

Os Sistemas Convectivos de Meso-escala atuam preferencialmente na região Norte do Nordeste do Brasil, principalmente no período chuvoso, de fevereiro a maio. São aglomerados de nuvens, vistas nas imagens de satélites com forma aparentemente circular, que se formam devido às condições locais favoráveis (temperatura, relevo, pressão, etc) e provocam chuvas fortes e de curta duração. Normalmente as chuvas associadas a este fenômeno meteorológico ocorrem de forma isolada.

O efeito desses mecanismos se reflete na distribuição das precipitações na região, conferindo uma alta irregularidade na distribuição espaço-temporal da chuva. Tal irregularidade tende a gerar grandes dificuldades no planejamento do manejo da água. Por outro lado, a ocorrência de eventos extremos causa grandes inundações nas regiões ribeirinhas, com perdas econômicas nas áreas urbanas e rurais.

Num estudo em que utilizou séries históricas de precipitação de longa duração de 1.221 postos distribuídos na região semi-árida, Molinier et al. (1994) realizou uma análise da pluviometria na região. O trabalho consistiu numa análise dos dados de

precipitação com o objetivo de definir zonas homogêneas com relação ao total precipitado em 24 horas.

Em seguida foi realizada uma seleção dos postos cujos dados foram considerados de boa qualidade, utilizando para isso critérios de qualidade, tais como a coerência dos dados históricos, bem como a análise comparativa com dados de postos vizinhos. Uma vez selecionados os postos pluviométricos de melhor qualidade de dados históricos, foi realizado um zoneamento pluviométrico. O zoneamento pluviométrico é definido com base no estabelecimento de regiões homogêneas, isto é, o agrupamento regional de postos cujos dados históricos de precipitação apresentam variações que podem ser enquadradas dentro de um valor máximo aceitável. O zoneamento foi realizado mediante análise estatística dos dados. Uma vez realizados os testes de ajuste, optou-se por utilizar a lei de Goodrich. Visando definir as regiões homogêneas, com base no estudo, foram obtidos ábacos que relacionam o total precipitado em 24 horas com a freqüência de ocorrência para cada uma das 14 regiões homogêneas estabelecidas no estudo.

A Figura 2 apresenta o mapa obtido com o zoneamento pluviométrico. Nele, as regiões homogêneas foram obtidas utilizando os dados de precipitação de 24 horas.

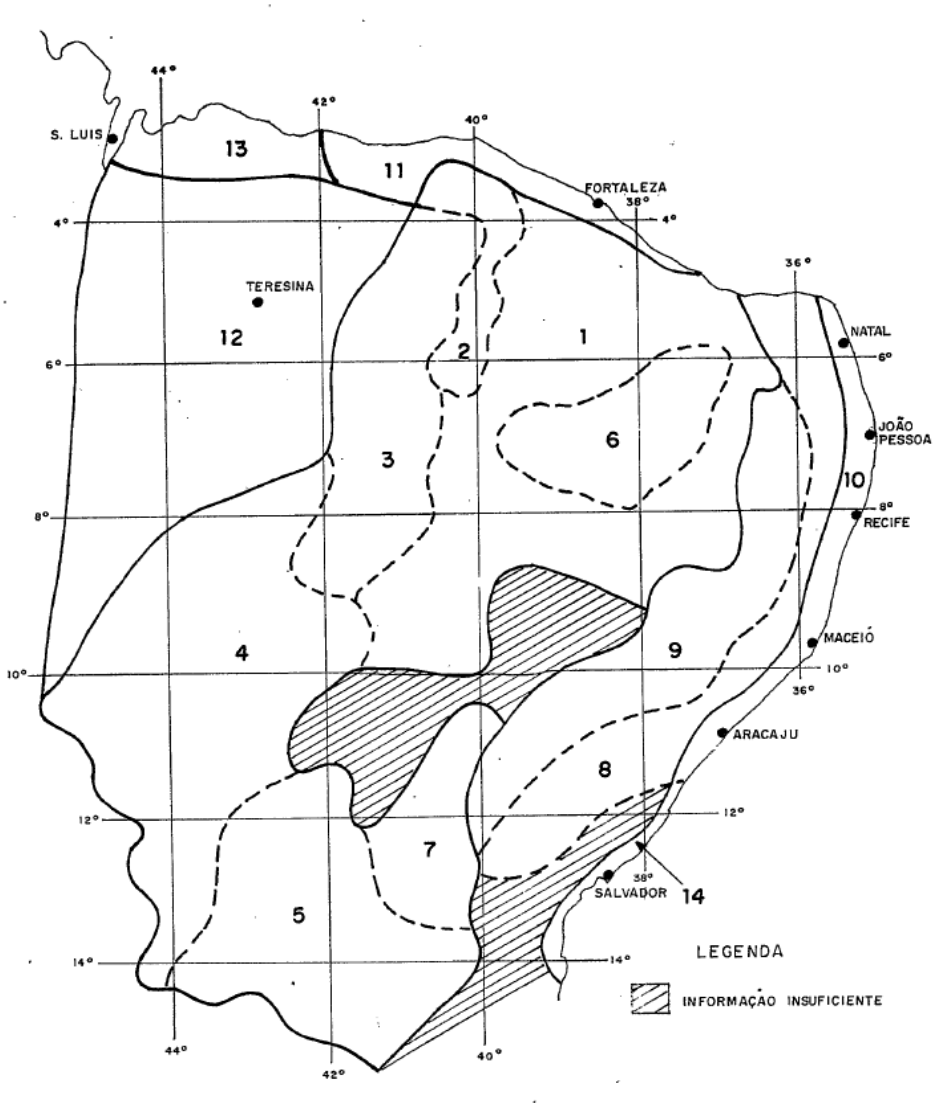

Figura 2 – Zonas homogêneas do semi-árido brasileiro segundo Molinier et al. (1994). Fonte: Molinier et al. (1994).

Foram definidas inicialmente duas grandes zonas climáticas: a zona do Sertão, englobando as zonas de 1 a 7 da Figura 2, e uma zona de transição, denominada Agreste, que engloba as zonas 8 e 9.

Dentro da grande zona climática do Sertão, a subzona 6, onde está situada a área de estudo do presente trabalho, se mostrou diferenciada. Através do método do *"Faciés"* hidrológico, de Cadier (1992), constatou-se que nesta área, para uma pluviometria anual de cerca de 600 mm, os escoamentos anuais médios são superiores em 30-40% aos escoamentos do resto do Sertão. Além disso, não foi identificado nenhum pluviômetro cujo total seja nitidamente inferior a 600 mm. Os autores supõem que a explicação dessa abundância poderia estar ligada às anomalias da lei de distribuição de chuvas intensas, porém não chegaram a

conclusões a respeito do mecanismo climático regional dessa zona singular, completamente cercada por outra zona menos abundante.

Além do zoneamento pluviométrico e da avaliação de qualidade da rede pluviométrica, os autores selecionaram para cada grande zona, o número mínimo de pluviômetros (em um total de 15) que permitissem minimizar as distorções no caso de serem utilizados como entrada para modelos de simulação hidrológica.

Dada a particularidade e importância dos recursos hídricos para o semi-árido, muitos estudos se dedicam a analisar o comportamento da precipitação nesta região. De uma maneira geral, os eventos chuvosos se concentram em poucos dias do ano e geralmente ocorrem em curta duração e altas intensidades. O valor médio do intervalo entre eventos é alto devido aos longos períodos sem chuva.

Com o objetivo de avaliar a variabilidade da pluviometria na região Nordeste do Brasil, Silva et al. (2011) analisaram os dados diários de chuva de 600 estações meteorológicas. A partir da análise dos dados, verificaram que a variabilidade da precipitação pluvial não é uniforme em todo o Nordeste. A região do semi-árido nordestino apresentou os maiores valores de coeficiente de variação da precipitação e número de dias de chuva do que aqueles apresentados no litoral e agreste nordestino. Os maiores valores do coeficiente de variação estão ligados às menores precipitações. A variabilidade da precipitação foi menor no período chuvoso que no período seco. Os maiores valores de número de dias de chuva em grande parte da região Nordeste do Brasil ocorrem no primeiro semestre do ano. A análise dos coeficientes de auto-correlação revelou que o comportamento da precipitação no Nordeste do Brasil é quase aleatório.

Moura e Medeiros (2005) compararam o comportamento de uma série de eventos chuvosos ocorridos em duas bacias experimentais: a do rio Guaraíra, no litoral da Paraíba, e a de Serra Negra do Norte (BESNN), no semi-árido do Rio Grande do Norte. Verificaram que mais de 60% dos eventos observados tiveram totais precipitados inferiores a 10 mm, em ambas as bacias, o que indica haver um número bem maior de pequenos eventos. Também foi detectada uma significativa variabilidade espacial da precipitação nessas bacias, apesar das áreas de drenagem reduzidas, 4,17 km^2 (RN) e 5,84 km^2 (PB).

Medeiros et al. (2005), estudando o padrão de ocorrência de eventos chuvosos no litoral paraibano, observaram que a distribuição estatística da precipitação nos eventos chuvosos é altamente assimétrica e que a maioria dos eventos apresenta pequena magnitude e ocorrem durante a madrugada ou pela manhã. Também

verificaram que a maior parte do total precipitado diário se deu através de um único evento.

Ainda no âmbito de estudos de análise de eventos no semi-árido, Costa et al. (2009), a partir das séries temporais de precipitação na BESNN, identificaram 457 eventos, dos quais 70% apresentaram lâmina inferior a 10 mm e 57% duração inferior a 1 h. Quanto à intensidade média, 65% dos eventos foi superior a 5 mm/h e 92% maior que 2 mm/h. A intensidade máxima ocorreu na primeira metade da duração da chuva para 75% dos eventos observados.

Moreira et al. (2004) analisaram o efeito da sazonalidade na distribuição da precipitação ao longo do ano no município de Caicó, localizado no semi-árido norte-riograndense. Para isso, utilizaram o Índice de Concentração da Precipitação (ICP), (Oliver, 1980). Os resultados obtidos indicaram alta concentração sazonal da chuva num período curto do ano. Dessa forma pode-se dizer que os eventos de maior magnitude se concentram em poucos dias ao longo do ano.

Na bacia do Rio Paraíba-PB, Araújo et al. (2008) verificaram, através da análise da variação temporal, que os meses de maiores ocorrências de chuvas intensas na bacia em estudo são janeiro, fevereiro, março e abril. Os resultados obtidos pela distribuição de probabilidade de Gumbel mostraram que a distribuição é apropriada para valores extremos de precipitação máxima de 1 a 5 dias.

A precipitação também é um elemento chave nos estudos que procuram identificar mudanças climáticas globais e regionais. Tais estudos utilizam índices de detecção de mudanças baseados em dados de precipitação.

Santos e Brito (2007) analisaram nove índices climáticos derivados da precipitação pluvial, a partir dos quais observaram uma tendência de aumento das condições de umidade sobre os estados da Paraíba e Rio Grande do Norte.

Com o objetivo de identificar mudanças climáticas regionais, Haylock et al. (2006) analisaram a precipitação sobre a América do Sul e observaram uma tendência de aumento no total anual de chuva sobre o Nordeste do Brasil.

Utilizando metodologia semelhante aquela utilizada por Haylock et al. (2006), Santos (2006) também identificou uma tendência de aumento na precipitação total anual na região Nordeste, especificamente para os estados do Rio Grande do Norte e Paraíba.

Haylock e Nicholls (2000), utilizaram dados de chuva diária de 91 estações de alta qualidade na Austrália, com o objetivo de examinar mudanças na intensidade e

freqüência de eventos extremos de chuva através de três índices que eles chamaram de freqüência extrema, intensidade extrema e percentual extremo.

Suppiah e Hannessy (1998) examinaram as tendências de chuvas intensas, total precipitado e número de dias secos na Austrália e identificaram uma redução geral em dias sem chuva com um aumento na intensidade e no volume precipitado.

Segundo Santos et al. (2009), espera-se que as mudanças climáticas alterem a temperatura média e os valores da precipitação, e que aumentem a variabilidade dos eventos de precipitação, que poderão causar inundações e secas mais intensas e freqüentes.

As tendências de mudanças no regime de precipitação relatadas nos estudos geram importantes consequências para o ciclo hidrológico, assim como para recursos hídricos. A alteração no padrão temporal da distribuição das chuvas tem várias consequências ecológicas, as quais podem incluir mudanças na intensidade da precipitação, como também intervalos secos mais longos (DUNKERLEY, 2008).

Além disso, o aumento das chuvas intensas pode culminar no aumento da freqüência de inundações, deslizamentos de terra, erosão de solo, acúmulo de sedimentos em áreas de reservatórios de água, inundação de planícies e recarga de aquíferos (SUPPIAH E HANNESSY, 1998).

Neste contexto, são muitas as conseqüências relacionadas a mudanças no padrão da precipitação, com potencial para afetar fortemente os meios de vida da população. Assim, torna-se necessário o conhecimento da melhor maneira de estudar e compreender este fenômeno.

Segundo Santos e Brito (2007), alguns fatores que podem modificar o clima de uma região são o desmatamento e o mau uso dos ecossistemas. De acordo com o autor, esses fatores alteram o clima regional e em áreas de ecossistemas frágeis e vulneráveis, como o semi-árido brasileiro, as mudanças climáticas mais drásticas poderão ocorrer através da soma das ações produzidas pelos gases do efeito estufa com o mau uso e desflorestamento dos ecossistemas locais.

Para Haylock e Nicholls (2000), no contexto das mudanças ambientais, há uma maior necessidade de estudos sistemáticos envolvendo dados de precipitação numa escala temporal mais precisa, o que possibilita determinar propriedades dos eventos, tais como duração, intensidade, etc., que possam ser usadas na melhor compreensão dos processos climáticos.

2.3. Medida da Precipitação

A quantidade de chuva é medida em termos de altura precipitada. A unidade utilizada é a altura de chuva, em milímetros. Conceitualmente, a altura de chuva está associada ao volume acumulado sobre uma superfície. Assim, um milímetro de chuva corresponde à relação entre o volume acumulado, em litros, e a área de captação da chuva, em m^2.

Os registros de precipitação são realizados por equipamentos específicos, denominados pluviômetros ou pluviógrafos. Eles medem a altura precipitada em função do tempo.

O pluviômetro é constituído basicamente por um cilindro com coletor afunilado na sua base, de onde a água escoa para um reservatório. Um observador faz o registro por leitura direta, geralmente num horário padronizado (9 h da manhã). O avanço tecnológico nos últimos anos tem resultado num significativo avanço na qualidade dos equipamentos de medição de variáveis hidrológicas. Nesse sentido, o uso de equipamentos digitais com alta capacidade de armazenamento de dados tem apresentado uma gama de possibilidades de tipos de sensores com aplicações diversas na hidrologia. Dessa forma, os pluviógrafos mecânicos têm sido paulatinamente substituídos por equipamentos automáticos, digitais, com alimentação fotovoltaica, capazes de recarregar bateria de forma contínua.

Os pluviógrafos podem ser do tipo analógico (também chamado mecânico) ou digital (também denominado automático). Os analógicos registram a chuva acumulada no tempo usando uma caneta acoplada a um papel padrão, fixado num cilindro que gira em torno de um eixo, no qual uma revolução completa corresponde a 24 horas. O resultado é um diagrama de papel, onde é traçada uma curva que fornece a altura de chuva em função do tempo, o pluviograma (Figura 3). Esse mecanismo exige a análise e leitura do pluviograma mediante a análise visual do diagrama, com a interpretação dos dados em função do tempo. O pluviógrafo digital, por sua vez, mede e registra os dados de altura de chuva de forma automática num intervalo de tempo pré-definido pelo usuário, armazenando-os numa unidade de armazenamento digital, denominada *datalogger.*

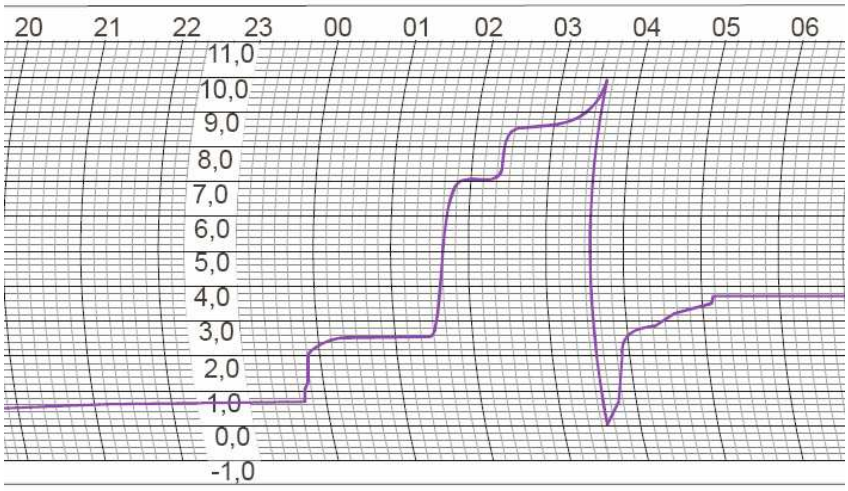

Figura 3 – Pluviograma típico de um equipamento analógico.
O eixo superior indica o tempo (h); o eixo vertical indica a altura precipitada (mm)

Os pluviógrafos digitais disponíveis no mercado, em geral são do tipo basculante, dotados de funil capaz de drenar a água rapidamente e assim minimizar possíveis erros de medição. O equipamento dispõe de uma estrutura cilíndrica, metálica, com área padrão de captação de chuva (200 mm de diâmetro), báscula com capacidade de 0,2 mm, sensor digital, sistema de armazenamento e possibilidade de transmissão de dados, bem como coleta de água para fins de análise da qualidade, conforme apresentado na Figura 4. O sensor recebe o pulso gerado pelo movimento mecânico da báscula durante a ocorrência do evento chuvoso. O sinal gerado pelo sensor é registrado, juntamente com a data e hora, na memória do dispositivo de armazenamento de dados (*datalogger).*

Figura 4 – Pluviógrafo Digital.
Fonte: http://www.campbellsci.com.br

Goodrich et al. (2008) realizaram um estudo comparativo utilizando dados obtidos por pluviógrafos mecânicos e digitais. Foi feita uma análise estatística utilizando 5 anos de registros históricos obtidos com esses equipamentos. Os equipamentos digitais foram instalados próximos aos analógicos, numa distância de 2 metros. Nesse estudo, observou-se que as limitações na digitalização dos gráficos dos equipamentos analógicos ocasionavam erros de precisão: digitalização, resolução devido à irregularidade e espessura do traço da caneta, além do fato de que os dados implicavam na inspeção visual de uma grande quantidade de gráficos, o que poderia ser uma fonte de erro e imprecisão. Verificou-se que os erros de precisão aumentavam exponencialmente com a redução do intervalo de tempo, sugerindo que o intervalo de tempo mínimo aceitável é de 5 minutos.

O método de comparação estatística envolveu cinco variáveis relacionadas com o evento chuvoso: altura de chuva, intensidade máxima (1, 2, 5 e 30 minutos) e duração. Foram aplicados testes de hipótese com 5% de confiança usando os dados das médias e variâncias das variáveis estudadas.

Na comparação dos dados entre 2 pluviógrafos digitais, observou-se um funcionamento semelhante, o que se refletia na semelhança dos registros obtidos em 188 eventos.

A análise comparativa dos dados dos postos analógicos e digitais permitiu observar que o equipamento analógico apresentava erro relacionado com a identificação do final do evento para chuvas de baixa intensidade. Na verdade, o uso dos gráficos incorpora um aspecto qualitativo na sua análise, o que tende a gerar erros de precisão. Por outro lado, erros com a digitalização dos gráficos foram observados principalmente nos eventos de alta intensidade. A redução do intervalo de análise para valores menores que 5 minutos demonstraram uma super estimativa no cálculo da intensidade máxima.

Apesar dos equipamentos analógicos serem mais passíveis de apresentar erros de precisão, os digitais podem apresentar problemas de funcionamento. Esses problemas podem estar relacionados aos seguintes fatores: a) falha na qualidade do equipamento; b) erro no manuseio: programação, manutenção inadequada; c) uso do equipamento fora dos padrões estabelecidos; d) calibração inadequada.

A falha na calibração do equipamento em geral é responsável pela ocorrência de um erro sistemático. Nesse sentido, o uso adequado deve prever a re-calibração periódica do equipamento. Os erros de caráter aleatório, também chamados de ruídos, são uma característica do equipamento e definem a sua precisão e

confiabilidade. Esses tipos de erros, uma vez observados durante um período de tempo longo, tendem a se ajustar a uma distribuição do tipo Gaussiana.

Além dos cuidados com a manutenção e calibração do equipamento, atenção deve ser dada na sua instalação em campo, para evitar possíveis erros devidos a ação do vento, presença de barreiras físicas, animais e insetos.

Sabe-se que o evento chuvoso tem caráter continuo e seu mecanismo varia no tempo e espaço de acordo com a ação do vento e do processo climático associado à tormenta. No entanto, os registros são obtidos em postos fixos espalhados na bacia estudada. O resultado disso são séries temporais contínuas e pontuais em função do tempo. Nesse sentido, a observação e medida do comportamento espaço-temporal do evento são fundamentais na compreensão dos processos hidrológicos do tipo chuva vazão na bacia.

Além disso, quanto maior a resolução temporal dos registros de precipitação, maior a possibilidade de análise dos eventos. Segundo Dunkerley (2008a), nos estudos de processos ambientais, o uso de pluviógrafos confere uma maior resolução temporal aos dados, permitindo que as características dos eventos sejam analisadas com maior profundidade.

Com o objetivo de analisar detalhadamente as características no tempo e espaço da chuva, bem como os seus efeitos na resposta hidrológica, foram implantadas bacias experimentais no Nordeste Brasileiro. Nesse sentido, vale citar a bacia experimental do Seridó, situada no município de Serra Negra do Norte-RN, cujos dados são objeto de analise neste estudo. Numa bacia experimental, a dinâmica espaço-temporal do evento de precipitação pode ser monitorada continuamente através do uso de uma rede de postos de medição.

2.4. Características dos eventos de precipitação no semi-árido. Estudos anteriores.

As características de um evento de precipitação podem ser definidas por uma série de variáveis, as quais são: lâmina precipitada (P), duração total do evento (d), intensidades média e máxima (I_{med}, I_{max}), além do intervalo de tempo entre eventos sucessivos (IEE). Adams et al. (1986) classificaram estas propriedades como as propriedades externas do evento de chuva.

A lâmina precipitada é o somatório de toda chuva ocorrida durante a duração do evento, em milímetro. A duração é o tempo decorrido entre o inicio e o final do evento, em minutos. O intervalo entre eventos (IEE) é o tempo decorrido entre o final do último evento e o inicio do evento subseqüente em minutos.

A intensidade média da chuva, por sua vez, é o quociente da lâmina precipitada pela duração do evento. A intensidade média do evento é descrita em mm/h ou mm/min.

A intensidade média da chuva define uma lâmina precipitada equivalente a uma intensidade constante do evento. Porém, vale ressaltar que o evento de chuva produz variações no valor da intensidade. Adams et al. (1986) classificaram também variáveis internas do evento chuvoso, uma vez que elas se referem basicamente ao comportamento da intensidade durante o evento. Ele incluiu a intensidade máxima do evento, o número de picos de intensidade, bem como os instantes de ocorrência dos máximos.

O Coeficiente de Avanço da chuva (r) foi um conceito introduzido Huff (1967). É um parâmetro que define a localização relativa do instante de máxima intensidade dentro do período de duração da chuva. Os eventos foram classificados em 4 diferentes grupos levando em conta o quartil (quadrante da duração do evento) em que ocorreu a intensidade máxima. Para Acreman (1990), o valor deste parâmetro varia em função do mecanismo de formação da chuva (frontal, convectiva, etc), muito embora na maioria dos eventos a lâmina precipitada no último quartil seja de pequena magnitude. Dunkerley (2008b) ressalta a importância de levar em conta o efeito do coeficiente de avanço da tormenta nos processos ambientais, apesar de poucos estudos fazerem referência a este parâmetro.

Os estudos, cujos objetivos consistem na análise dos eventos chuvosos, exigem inicialmente uma identificação preliminar de cada evento. Além disso, a identificação dos eventos é feita obedecendo a determinados critérios estabelecidos. Ou seja, deverá ser definida uma regra que permita, utilizando os dados da série histórica, definir qual deve ser o intervalo mínimo de separação dos eventos.

Por definição, um evento individual de chuva consiste numa série temporal de registros precedidos e seguidos por um período de tempo. Assim, caso o período de tempo entre dois registros consecutivos seja considerado pequeno, esses pulsos podem ser interpretados como sendo de um único evento. Caso contrário, os pulsos pertencerão a eventos distintos.

O intervalo de tempo entre eventos numa série temporal de dados tem servido de critério para a identificação de eventos, sendo denominado neste estudo de Intervalo

Mínimo entre Eventos (IMEE). Assim, IMEE é o tempo mínimo decorrido entre o último registro de chuva e o primeiro registro subseqüente.

Dunkerley (2008b) verificou que os valores do IMEE mais utilizados por outros autores variavam no intervalo entre 3 minutos e 24 horas. Assim, os maiores valores eram usados em estudos que envolviam perdas por interceptação, geração de escoamento superficial e umidade antecedente do solo. Nesses casos, a independência entre os eventos foi uma das justificativas usadas para a escolha do intervalo. Dunkerley (2008b) também menciona outros critérios usados nos estudos envolvendo análise de eventos de chuva, os quais são apresentados a seguir.

Critérios usados nos estudos de eventos de chuva

a) Estabelecimento de uma altura de chuva mínima para que o registro (ou soma dos registros) possa ser considerado um evento. Em geral os valores registrados podem variar num intervalo entre 2-12,5 mm, dependendo da capacidade do equipamento utilizado. Em alguns estudos, quando um pulso isolado era registrado pelo equipamento (equivalente a 2 mm), o mesmo era desconsiderado;

b) Estabelecimento de uma duração mínima para que o registro seja considerado evento;

c) Estabelecimento de um valor de intensidade mínima atingida durante o evento;

d) Estabelecimento de um valor de intensidade mínima necessária para marcar o início do evento, como também para marcar o seu fim.

Alguns estudos utilizam vários critérios de forma simultânea. Entretanto, verificou-se que vários estudos não definem de forma clara quais critérios foram considerados, o que serve para dificultar a análise comparativa entre os resultados.

Dunkerley (2008b) analisou o efeito da variação do IMEE nos resultados obtidos na análise das características dos eventos de chuva. Para isso, utilizou uma série temporal contendo 5 anos de dados de uma estação localizada numa região árida da Austrália, onde a precipitação média anual era 200 mm. Para avaliar o impacto nos resultados, ele utilizou valores do IMEE variando entre 15 minutos e 24 horas. A variação do IMEE resultou em diferentes quantidades de eventos, que variou entre 550 e 118 eventos, para valores de IMEE iguais a 15 minutos e 24 horas, respectivamente; a intensidade média, por sua vez, variou entre 2,04-0,94 mm/h e a duração média variou entre 0,66-3,98horas.

Adams et al. (1986) analisaram o efeito nas características dos eventos de chuva em função de diferentes valores de IMEE, variando entre 5 minutos e 12 horas. O

trabalho utilizou uma série temporal contendo 18 anos de dados de precipitação da cidade de Vancouver, Canadá, com uma pluviometria média anual de 1.240 mm. Os resultados obtidos demonstraram claras mudanças nas estatísticas dos eventos em função da variação no IMEE. Observou-se, por exemplo, que os valores médios da precipitação, duração e IEE aumentavam com o aumento do IMEE, ao passo que a intensidade média diminuía. O autor concluiu que a utilização de valores de IMEE variando entre 1-6 horas podem ser usados na maioria dos estudos.

Como pode ser observado, a ausência de padronização na definição de critérios de identificação e análise de eventos limita a possibilidade de analise comparativa entre estudos. A falta de recursos para a definição do IMEE ideal a ser utilizado em cada estudo contribui para esta realidade. Adams et al. (1986), por outro lado, defendem que o estabelecimento do valor do IMEE a ser utilizado depende do tipo de aplicação do estudo. Assim, se o estudo contempla o uso dos dados em pequenas bacias, composta de reservatórios pequenos, pode-se utilizar um IMEE de curta duração. Nos casos em que o estudo contempla grandes bacias, dotadas de grandes reservatórios, valores de IMEE mais longos são mais adequados.

De acordo com Dunkerley (2008b), alguns estudos afirmam que o valor do IMEE foi estabelecido de forma a tornar os eventos independentes entre si. Ou seja, as conseqüências geradas pelo evento atual não são influenciadas pelo evento anterior. Por exemplo, em estudos hidrológicos referentes às perdas por interceptação da vegetação, o IMEE a ser adotado deve ter uma duração suficiente para que a água acumulada na superfície das folhas seja evaporada entre dois eventos de chuva consecutivos. Apesar disso, Dunkerley (2008b) destaca que o uso desse critério pode comprometer os resultados, pois para um IMEE maior, intervalos sem chuva dentro do próprio evento podem ser mais freqüentes, podendo resultar, por exemplo, numa superestimativa da capacidade de armazenamento da vegetação.

Com o objetivo de analisar possíveis soluções visando a estimativa do valor do IMEE considerado ideal, Restrepo-Posada e Eagleson (1982) propuseram um método a ser usado na identificação de eventos mediante o cálculo de um valor de IMEE que proporcione independência estatística entre os eventos. Assim, partindo da hipótese de que a distribuição dos intervalos entre eventos (IEE) era do tipo exponencial, o IMEE ideal foi calculado considerando uma condição na qual a média e o desvio padrão da variável escolhida (IEE) fossem iguais, o que significa um coeficiente de variação igual a 1. Com base na metodologia proposta, os autores obtiveram valores

de IMEE variando entre 1-132 horas, para 17 estações. Esses resultados sugerem que o valor ideal do IMEE varia em função das condições climáticas locais. Os resultados indicaram também que quanto menor a precipitação média, maior será o valor de IMEE.

Bonta e Rao (1988) realizaram um estudo comparativo utilizando os métodos de estimativa do IMEE ideal. Foram analisados o método exponencial usado por Restrepo-Posada e Eagleson (1982) e um método de correlação, que utiliza o coeficiente de correlação de Spearman. A aplicação do método exponencial resultou em maiores valores para o IMEE, sendo esse o método recomendado no estudo. Os resultados obtidos demonstraram que o valor do IMEE ideal varia em função da região e da estação do ano.

Apesar da importância da definição e análise das propriedades dos eventos de chuva, bem como da sua variabilidade temporal e espacial, após revisar diversas publicações relacionadas ao assunto, Dunkerley (2008a) identificou que os estudos publicados abordam estas propriedades apenas como coadjuvantes nos processos hidrológicos. Afirma ainda que uma análise voltada para os eventos de chuva em si seria essencial para o desenvolvimento de conceitos apropriados para as suas propriedades, em diferentes tipos de formação de chuva, em diferentes regiões, e seu impacto nos processos ambientais.

2.5. Chuvas Intensas

As chuvas intensas, também conhecidas como chuvas máximas, são eventos de ocorrência extrema, com duração e distribuição temporal e espacial críticas para a região onde ocorrem. Esses tipos de eventos podem causar grandes prejuízos sociais e econômicos, seja pelo impacto da erosão no solo, pelas inundações de áreas urbanas e rurais, ocasionando perda de safras, ou mesmo pelo risco de eventos catastróficos.

A caracterização de chuvas intensas é feita através das equações intensidade-duração-freqüência (IDF), que relacionam a duração, intensidade e a probabilidade da intensidade máxima ser igualada ou superada durante um determinado período.

A determinação da relação entre estas variáveis (curvas IDF) tem como base os registros históricos de precipitação durante um período suficientemente longo e representativo dos eventos extremos da região. (TUCCI, 1997).

Em geral, as equações IDF são empregadas em estudos que utilizam previsão de chuvas intensas, tais como no projeto de microdrenagem urbana, pequenas obras hidráulicas, canais de drenagem, vertedouros de barragens, dispositivos de proteção contra cheias e erosão hídrica, e principalmente nos projetos de drenagem urbana (SILVA et al., 2002 e BECK, 2006).

Os estudos destinados a obtenção da curva IDF utiliza as séries históricas de intensidade da precipitação local. Para isso, é necessário dispor de registros de boa qualidade e duração suficientemente representativa, de pelo menos 20 anos. Nesse sentido, cabe ressaltar que dados pluviográficos com período de tempo longo ainda são limitados às capitais e algumas cidades do Nordeste (SILVA FILHO, 2005).

A metodologia empregada na obtenção da curva IDF inclui a análise de freqüência dos valores de intensidade máxima para durações especificadas, os quais são obtidos a partir da análise dos eventos históricos de precipitação. Dessa forma, a função de probabilidade acumulada obtida é submetida a testes de ajuste usando para isso funções de probabilidade. Assim, se admite que os dados relativos às chuvas intensas apresentam um bom ajuste às funções probabilísticas de valores extremos, tais como a função probabilística de Gumbel.

Segundo Hernandez (2008), a caracterização do regime de chuvas intensas de pequena duração ao longo do tempo é assunto de interesse não apenas conceitual, mas prático também, uma vez que existe a necessidade de projetos de obras hidráulicas em pequenas bacias. No entanto, longas seqüências de dados de chuva com alta resolução temporal são raras, sendo muito mais acessíveis os dados diários, tanto quando considerados os tamanhos das séries, quanto a densidade das redes. Em seu trabalho, Hernandez procurou verificar a existência de propriedades de escala em uma rede de postos pluviográficos em São Paulo e, em função disso, calcular e regionalizar os parâmetros necessários para a determinação das características estatísticas de chuvas de curta duração a partir de chuvas diárias. Como resultado, foram obtidas expressões regionais que permitem a estimativa de chuva intensa em locais sem dados pluviográficos, utilizando apenas a chuva de 24 horas provenientes de estações pluviométricas.

Beck (2006) estimou as relações IDF de chuvas para a cidade de Chapecó, Santa Catarina. Estudou as chuvas com durações variando entre 5 e 1440 minutos, em um período de 30 anos, e ajustou três equações para a estimativa das intensidades das chuvas, para três faixas de durações. O autor testou como ferramentas estatísticas as distribuições Log-normal com dois parâmetros, Log-normal com três parâmetros,

distribuição Pearson tipo III, Log-Pearson III e a distribuição de Gumbel-Chow, com os parâmetros estimados pelo método dos momentos. A distribuição de Gumbel forneceu a melhor estimativa dos valores de chuvas intensas para durações inferiores a 18 horas.

Silva et al. (2002), estudando chuvas intensas na Bahia, testaram os modelos probabilísticos de Gumbel, Log-Normal a dois e três parâmetros, Pearson e Log-Pearson III, sendo o melhor ajuste verificado com Gumbel. Foram utilizadas 19 estações pluviográficas com séries históricas entre 10 e 24 anos. Verificou-se uma grande variabilidade nos valores de intensidade máxima média de precipitação, para uma mesma duração, entre as diferentes localidades estudadas.

Em outro estudo, Rodrigues et al. (2008) analisaram séries históricas de chuvas de 30 e 19 anos de duração, com dados obtidos em estações meteorológicas nos municípios de Pentecoste e Fortaleza-CE, respectivamente. O objetivo era ajustar o modelo teórico de distribuição de probabilidades de Gumbel aos dados, estabelecendo relações IDF para essas localidades.

Silva et al. (2003) ajustaram relações IDF para 10 estações no estado de Tocantins. As séries históricas são de 9 a 11 anos e os parâmetros das equações apresentaram alta variabilidade, demonstrando a importância da obtenção da equação IDF para cada local.

Apesar de amplamente difundida, alguns autores têm levantado questionamentos relativos à adequabilidade da equação IDF.

Para Adams et al. (1986), cada característica do evento de chuva (lâmina precipitada, duração, intensidade) possui seu próprio período de retorno, o que não é considerado na análise IDF, que analisa todos os parâmetros do evento de chuva como se eles possuíssem uma freqüência semelhante. Segundo o autor, tal consideração pode comprometer o planejamento de drenagem urbana que tem como base uma chuva de projeto única, uma vez que os elementos da drenagem são sensíveis a diferentes características do evento. Os elementos de transporte, por exemplo, como as tubulações, são geralmente os mais sensíveis às características de intensidade-duração do evento, pois estas influenciam mais fortemente o pico do *runoff*. Por outro lado, os elementos de armazenamento, como reservatórios, são geralmente sensíveis à lâmina precipitada do evento e ao intervalo entre eventos. Porém, para um dado evento, a lâmina precipitada, o intervalo entre eventos, a intensidade e a duração geralmente apresentam períodos de retorno diferentes. Assim, pode-se afirmar que caso uma chuva de projeto única

seja empregada no projeto do sistema de drenagem, os elementos serão projetados para diferentes freqüências.

Como um meio de superar esta dificuldade, Adams et al. (1986) sugerem a análise do evento de chuva (SEA – *Storm Event Analysis*) para em seguida comparar os seus resultados com os da análise IDF. Esta análise tem como pré-requisito a definição do critério IMEE. Para os dados utilizados em seu estudo, as curvas IDF produziram eventos mais severos, podendo ser utilizadas nos projetos de drenagem. Porém, para os elementos de armazenamento, as curvas IDF não seriam apropriadas, devendo ser utilizada a análise SEA.

Palynchuk e Guo (2008) também desenvolveram modelos baseados na análise dos eventos de chuva locais e apontaram essa metodologia como uma alternativa viável à técnica IDF.

Segundo Dunkerley (2010), em aplicações como perda de solo, deslizamentos de terra, infiltração, escoamento superficial, os resultados obtidos pelos estudos utilizando séries anuais não são apropriados. Para estas análises, muitos aspectos dos eventos, tais como duração, volume e eventos antecedentes são importantes e devem ser levados em conta. Nesse sentido, a análise IDF não permite que a estrutura do evento seja identificada, pois o dado utilizado pode pertencer a uma pequena parcela de um evento bem mais longo, cujas propriedades não estão refletidas nos resultados da equação IDF.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Área de Estudo

O presente estudo utilizou os dados contínuos de precipitação registrados numa estação pluviográfica automática, instalada na Bacia Experimental de Serra Negra do Norte-BESNN, região semi-árida do estado do Rio Grande do Norte. A referida bacia foi implantada em 2002 dentro da área da Estação Ecológica do Seridó/IBAMA, uma área ambientalmente protegida, distante aproximadamente 300 km de Natal.

A BESNN situa-se na bacia hidrográfica do açude Campos, contribuinte do rio Logradouro, da bacia do rio Sabugi. O rio Sabugi é afluente do rio Seridó que, por sua vez, é um dos afluentes do rio Piranhas-Açu.

A bacia do rio Seridó é área objeto de pesquisas desenvolvidas pelo Laboratório de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da UFRN – LARHISA envolvendo os processos hidrológicos e sedimentológicos no semi-árido potiguar.

A Figura 5 apresenta a localização da BESNN, bem como a sua posição com relação às bacias dos rios Piranhas-Açu, Seridó, Sabugí e Logradouro, situadas na fronteira dos estados do Rio Grande do Norte e da Paraíba.

A Figura 6 apresenta a delimitação e rede de drenagem da BESNN.

Do ponto de vista climatológico, o município de Serra Negra do Norte, situado próximo à bacia, apresenta período chuvoso nos meses de fevereiro a maio, com concentração de eventos chuvosos entre março e abril, seguido de um período seco entre os meses de julho e dezembro.

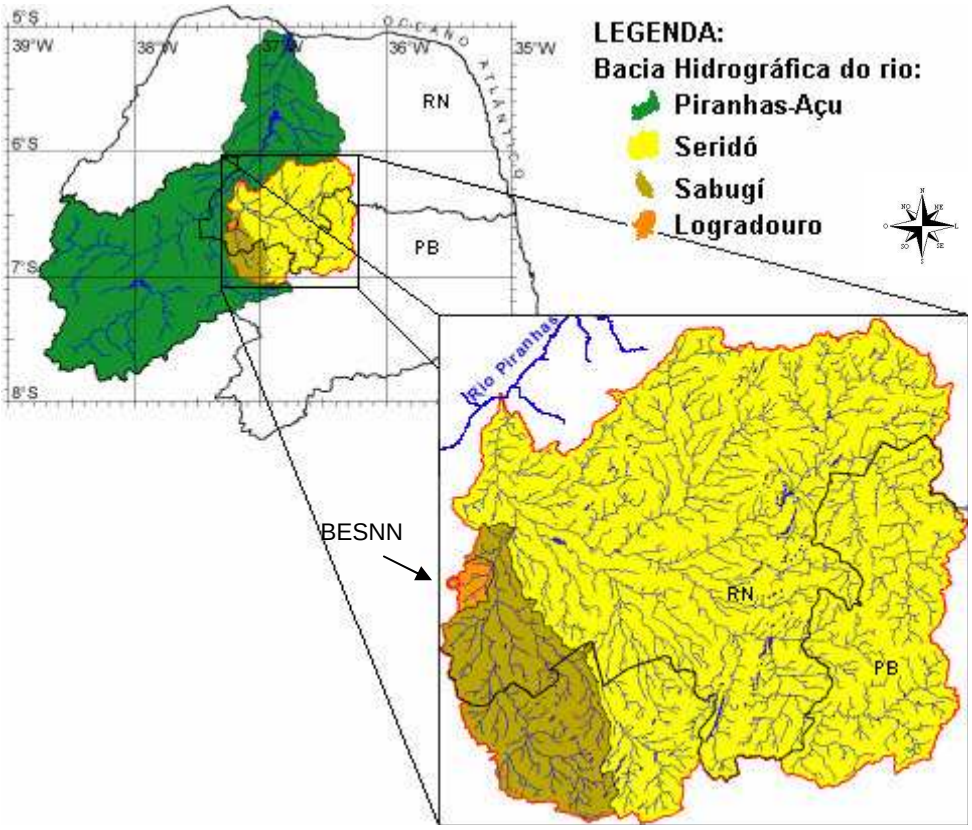

Figura 5 - Localização da BESNN e das bacias hidrográficas dos rios Piranhas-Açu, Seridó, Sabugí e Logradouro. Fonte: Medeiros (2005)

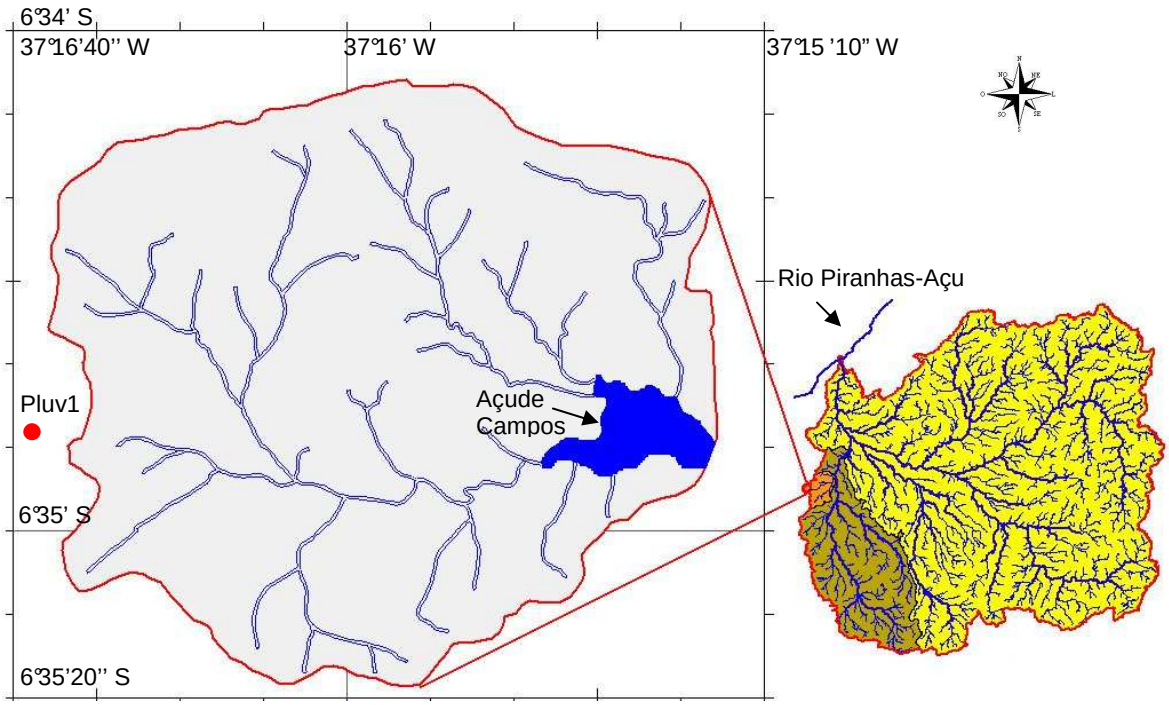

Figura 6 – Localização e hidrografia da BESNN e localização do Pluv1. Fonte: Medeiros (2005)

Os dados utilizados neste estudo foram registrados num pluviógrafo automático, fabricado pela Campbell, o qual oferece uma resolução igual a 0,254 mm. O equipamento dispõe de um sensor digital acoplado a um sistema de registro, armazenamento e transmissão de dados, que foi instalado na BESNN em 2002, na coordenada geográfica 37°16’40” W; 6°35’5” S. A Fig ura 6 apresenta a localização do pluviógrafo dentro da bacia.

Os dados históricos de precipitação foram registrados digitalmente numa unidade de registro e armazenamento (*datalogger*), modelo CR 10X, cuja função é armazenar os dados medidos obedecendo às configurações estabelecidas previamente pelo usuário. O *datalogger* dispõe de uma bateria recarregável ligada a um painel fotovoltaico que a alimenta. Os dados armazenados podem ser posteriormente enviados para um módulo de memória portátil (*Storage Module*) e deste para um computador, ainda em campo. Uma vez realizada a transferência dos dados, eles são convertidos no formato padrão da planilha eletrônica MS Excel, onde podem ser manipulados em meio computacional.

Paralelamente à coleta dos dados de precipitação, são necessárias algumas ações de caráter preventivo visando a manutenção do equipamento e o seu funcionamento adequado. Nesse sentido, as estações pluviográficas são protegidas por uma cerca metálica (4 x 4 m²), com o objetivo de impedir o acesso de animais aos equipamentos.

A Figura 7 apresenta uma visão panorâmica da estação pluviográfica utilizada no estudo.

Figura 7 – Visão panorâmica do pluviógrafo usado no estudo.
Fonte: Medeiros (2005).

Alem da instalação de cerca metálica, são necessárias ações de manutenção e limpeza do equipamento. Nesse sentido, observou-se a invasão de insetos da região

para o interior do equipamento, o que resultou em problemas de funcionamento do pluviógrafo. Esse problema foi provocado pelo bloqueio parcial dos drenos de saída do equipamento. Visando impedir esse tipo de ocorrência, foi instalada na parte inferior do equipamento uma tela metálica.

3.2. Precipitação na BESNN

Este estudo utilizou dados de precipitação registrados em uma estação pluviográfica instalada na BESNN, denominada Pluv1. Apesar de se dispor de dados de outras estações, este estudo optou por analisar a precipitação pontual. O critério de seleção dos dados do pluviógrafo levou em conta a ocorrência do menor período com falhas ou interrupção no registro de dados naquela estação.

Os registros foram obtidos automaticamente obedecendo ao intervalo de tempo correspondente a cinco minutos, com um período de registro correspondente a nove anos, entre os anos de 2002 e 2011.

Apesar de haver sido padronizado o registro de dados em intervalos de cinco minutos, nos anos de 2002 e 2003 o registro de dados obedeceu ao intervalo de dez 10 minutos. Alem disso, a partir de 27/04/2007, o intervalo de registro passou a ser de um minuto. Assim, foi necessário o tratamento dos dados visando a sua uniformização temporal dos registros, com a padronização dos mesmos em intervalos de cinco minutos.

Considerando a importância da qualidade e confiabilidade dos dados, a ocorrência de erros nos registros dos dados de precipitação tem um impacto importante nos resultados. A escolha da estação foi realizada de modo a minimizar o efeito produzido por falhas no registro dos dados.

No período de registro dos dados, observou-se a ocorrência de 34 dias com ausência de dados, notadamente entre os dias 28/06 e 02/08/2003. A ausência de dados durante esse período não foi considerada um fator relevante para o estudo, visto que durante este período, houve apenas a ocorrência de um dia chuvoso, de acordo com os registros de outra estação instalada na mesma bacia. Assim, com base nesses registros, não julgou-se necessário o preenchimento de falhas.

Num estudo anterior realizado na BESNN, Medeiros (2005) observou, com base nos registros de precipitação num período de 89 anos no município de Serra Negra do Norte, situado nas proximidades da bacia, que o período úmido situa-se entre

fevereiro e maio, com as maiores precipitações em março e abril, seguido de um período seco de julho a dezembro. Alem disso, observou alta irregularidade na distribuição anual da precipitação, com a ocorrência de períodos secos mais longos, com precipitação anual inferior a 600 mm, com duração de até 6 anos. Os dados de precipitação analisados por Medeiros (2005), na bacia experimental estudada, mostraram uma grande variabilidade espacial, principalmente para eventos de curta duração.

3.3. Metodologia de análise dos dados de precipitação

3.3.1. Definição dos eventos

Uma vez registrados, os dados de precipitação podem ser transferidos a um PC, onde podem ser analisados utilizando os recursos da planilha eletrônica MS Excel. Os dados básicos que compõem os registros de precipitação consistem na altura precipitada (mm), bem como hora, dia e ano de ocorrência do registro, conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 – Dados básicos de precipitação - Planilha

Ano	Dia	Hora	P(mm)
2002	66	2000	0,254
2002	66	2010	1,016
2002	66	2040	0,254
2002	66	2050	0,508
2002	66	2350	1,524
2002	66	2400	0,508
2002	67	10	0,254
2002	67	100	2,794
2002	67	110	0,254
2002	67	120	0,254
2002	75	2110	0,254
2002	76	1930	0,254
2002	77	1930	1,016
2002	77	1940	3,302

Conforme mencionado anteriormente, a separação dos registros de precipitação em eventos deve ser feita obedecendo a critérios estabelecidos.

Com o objetivo de analisar a influencia do critério IMEE no comportamento das características dos eventos, este trabalho usou como metodologia o tratamento dos dados de precipitação em planilha eletrônica. Para isso, foram usados como critério diferentes valores do IMEE.

A análise das características dos eventos, bem como a identificação e separação dos eventos foram realizadas levando em conta os seguintes critérios:

- Os intervalos mínimos entre eventos (IMEE) usados foram os seguintes: 10, 15, 30, 60, 120, 180, 360 e 720 min. Esses valores têm sido utilizados em estudos anteriores;
- A identificação de um evento está condicionada a ocorrência de altura precipitada acima de 0,508 mm.

Na etapa inicial, os registros históricos de precipitação são submetidos à analise visando a sua consistência, bem como da uniformização do intervalo de tempo. Numa etapa posterior, os eventos são identificados e analisados em função do valor do IMEE estabelecido. Assim, a partir da analise e identificação dos eventos, foram determinadas as seguintes variáveis: lâmina total precipitada, duração, intensidades máxima e média, além do instante de ocorrência da intensidade máxima no evento. Determinou-se também o coeficiente de avanço da tormenta, que identifica a ocorrência da intensidade máxima ao longo da duração da chuva. A Figura 8 apresenta o fluxograma básico utilizado para a caracterização dos eventos.

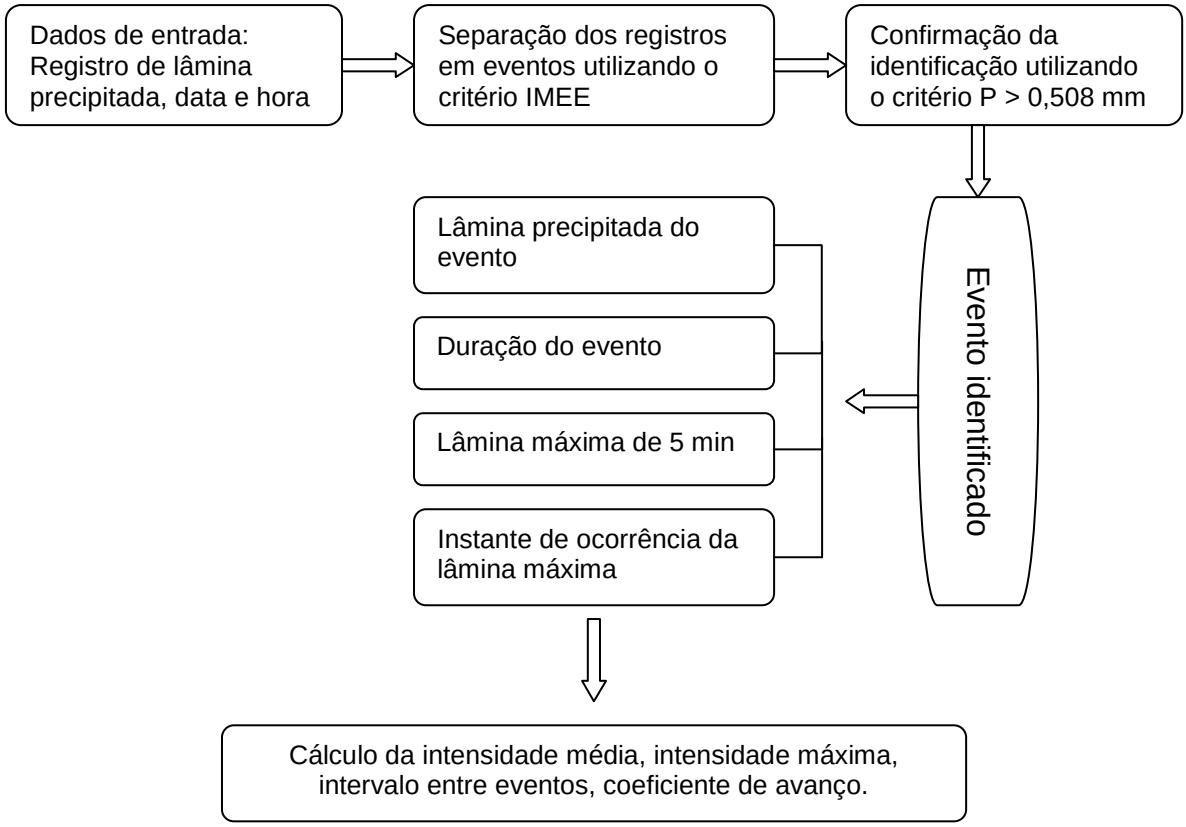

Figura 8 – Fluxograma para determinação das características dos eventos em função do IMEE.

3.3.2. Relação intensidade-duração-frequência

Foram ajustadas equações IDF (intensidade-duração-freqüência) a partir da análise estatística dos dados históricos observados na estação pluviográfica para o período de estudo. Para tanto, houve a necessidade de serem compostas séries parciais das precipitações máximas a partir da seleção dos maiores registros obtidos para diferentes durações. Foram usados neste estudo eventos máximos com as seguintes durações: 5 min, 10 min, 15 min, 20 min, 30 min, 60 min e 120 min. Observou-se que eventos com duração acima de 120 min não produziam aumentos nas intensidade que pudessem ser considerados significativos.

Assim, uma vez determinadas as lâminas máximas anuais mediante análise de freqüência, os dados foram convertidos em intensidades máximas. A distribuição probabilística de Gumbel, empregada nesse tipo de análise, foi testada aos dados observados, tendo sido verificado um ajuste satisfatório. Sua expressão matemática é a seguinte,

$$X_t = \overline{X} + \frac{S_x}{\sigma_n}(y - y_n)$$

onde X_t representa a intensidade máxima esperada para o período de retorno; $\overline{X}$ é a média aritmética das intensidades pluviométricas da série; S_x é o desvio padrão das intensidades da série; σ_n é o desvio-padrão da variável reduzida; e y_n é a média da variável reduzida.

A variável reduzida, y, foi calculada pela expressão,

$$y = -\ln\left[-\ln\left(1 - \frac{1}{T}\right)\right]$$

onde T representa o período de retorno, expresso em anos.

A equação IDF relaciona intensidade, duração e freqüência da precipitação máxima, de acordo com a expressão,

$$i = \frac{kT^m}{(t+b)^n}$$

onde i é a intensidade máxima (mm/h), t é o tempo de duração da chuva em min; e k, b, m e n são parâmetros de ajuste.

A equação anterior pode ser escrita da seguinte forma,

$$i = \frac{C}{(t+b)^n}$$

Para a determinação dos parâmetros da equação IDF, as curvas geradas pela equação acima foram transformadas em retas mediante a seguinte transformação,

$$\ln i = \ln C - n\ln(t+b)$$

A constante b foi determinada empregando o método de tentativa e posterior verificação do nível de ajuste. Assim, com base na relação ln(i) *versus* ln(t+b), foram estimados os valores do coeficiente angular (n) e linear (ln C) associados ao período de retorno, utilizando para isso uma análise de regressão simples. A partir daí, foram determinados os parâmetros k e m empregando para isso o método dos mínimos quadrados, conforme a seguinte expressão,

$$\ln C = \ln K - m\ln T$$

onde ln(k) e m são os coeficientes linear e angular da reta ajustada.

Uma vez determinados os parâmetros mencionados, a equação intensidade-duração-freqüência válida para a região estudada poderá ser escrita.

4. RESULTADOS

4.1. Características dos eventos em função do IMEE estabelecido

Os dados utilizados no estudo compõem uma série histórica de precipitação observada durante um período de nove anos, entre os anos de 2002 e 2011. Algumas características que representam a série histórica estão apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 – Dados representativos da série histórica

Período	Nº de Registros	Altura de Chuva	Precipitação média anual	Nº de dias com chuva
07/03/2002 a 03/02/2011	8.467	7.260 mm	815 mm	750

Vale mencionar que este estudo considera evento todo registro maior que 0,508 mm (correspondente a dois pulsos produzidos pelo equipamento). Este valor foi definido para evitar a possibilidade de utilização de registros provocados por problemas de funcionamento pela ação do vento.

O intervalo mínimo entre eventos (IMEE) é definido como o intervalo de tempo a partir do qual um novo registro não é considerado como parte integrante do evento atual. Este estudo tem como objetivo analisar a influência do IMEE no comportamento das características dos eventos contidos na serie histórica.

Assim, este estudo optou por utilizar os seguintes valores do IMEE: 10, 15, 30, 60, 120, 180, 360 min e 12 horas. Uma vez estabelecido o valor do IMEE, foram realizados os cálculos das seguintes variáveis: altura precipitada, duração e intensidade média dos eventos da serie histórica. Os parâmetros estatísticos obtidos para cada variável em função do IMEE (média, desvio-padrão, coeficiente de assimetria e coeficiente de variação) estão apresentados na Tabela 3. Os resultados obtidos também podem ser observados graficamente para melhor interpretação, conforme os gráficos das Figuras 9 a 12.

Tabela 3 - Propriedades dos eventos em função do critério IMME adotado

IMEE (min)	Número de eventos	Propriedade do evento	Média	Desvio Padrão	Coef. de Assimetria	Coef. de Variação
10	901	Duração (h)	0,69	0,78	6,21	1,123
		Intensidade (mm/h)	10,71	9,94	2,32	0,928
		Lâmina Precipitada (mm)	7,60	11,29	4,05	1,487
		IEE (h)	86,06	278,83	6,65	3,240
15	857	Duração (h)	0,82	0,90	4,66	1,094
		Intensidade (mm/h)	10,13	9,62	2,42	0,950
		Lâmina Precipitada (mm)	8,09	11,87	3,91	1,468
		IEE (h)	90,38	285,05	6,50	3,154
30	775	Duração (h)	1,12	1,21	3,48	1,084
		Intensidade (mm/h)	9,24	9,21	2,76	0,996
		Lâmina Precipitada (mm)	9,07	12,64	3,58	1,394
		IEE (h)	99,75	298,07	6,20	2,988
60	701	Duração (h)	1,53	1,63	2,60	1,066
		Intensidade (mm/h)	8,22	8,74	3,31	1,064
		Lâmina Precipitada (mm)	10,12	13,64	3,34	1,348
		IEE (h)	110,01	311,46	5,91	2,831
120	638	Duração (h)	2,21	2,19	1,86	0,990
		Intensidade (mm/h)	6,85	7,32	2,55	1,069
		Lâmina Precipitada (mm)	11,20	14,85	3,05	1,325
		IEE (h)	120,35	319,25	5,55	2,653
180	610	Duração (h)	2,67	2,64	1,73	0,988
		Intensidade (mm/h)	6,45	7,24	2,72	1,122
		Lâmina Precipitada (mm)	11,75	15,34	2,91	1,306
		IEE (h)	125,53	325,40	5,43	2,592
360	561	Duração (h)	3,93	4,11	2,18	1,044
		Intensidade (mm/h)	5,43	6,30	2,20	1,161
		Lâmina Precipitada (mm)	12,82	16,18	2,69	1,262
		IEE (h)	135,48	337,29	5,22	2,490
720	506	Duração (h)	6,98	9,67	3,05	1,386
		Intensidade (mm/h)	4,72	6,18	2,44	1,309
		Lâmina Precipitada (mm)	14,26	19,06	2,87	1,337
		IEE (h)	147,62	352,50	4,95	2,388

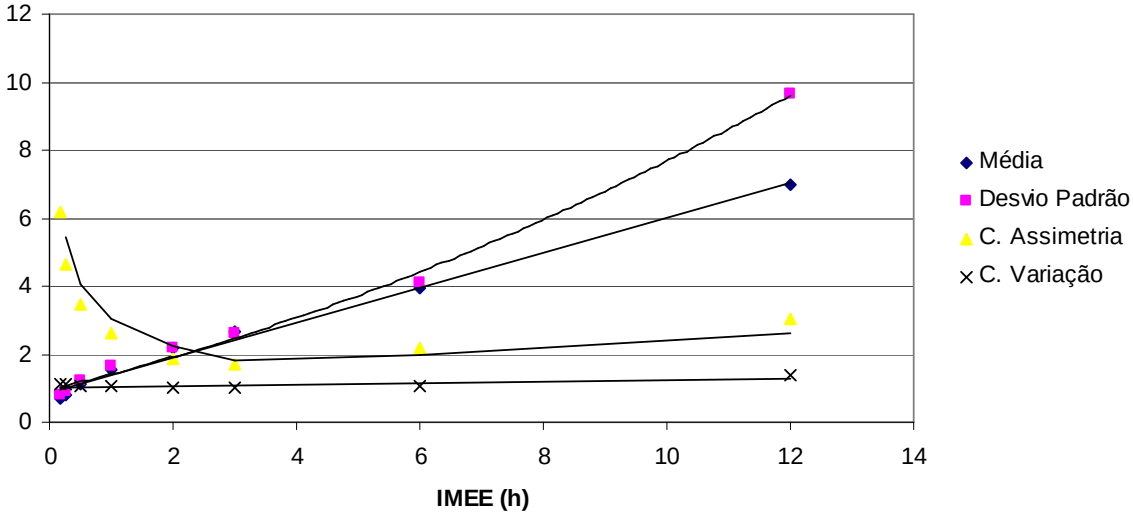

Figura 9 – Variação das estatísticas da duração

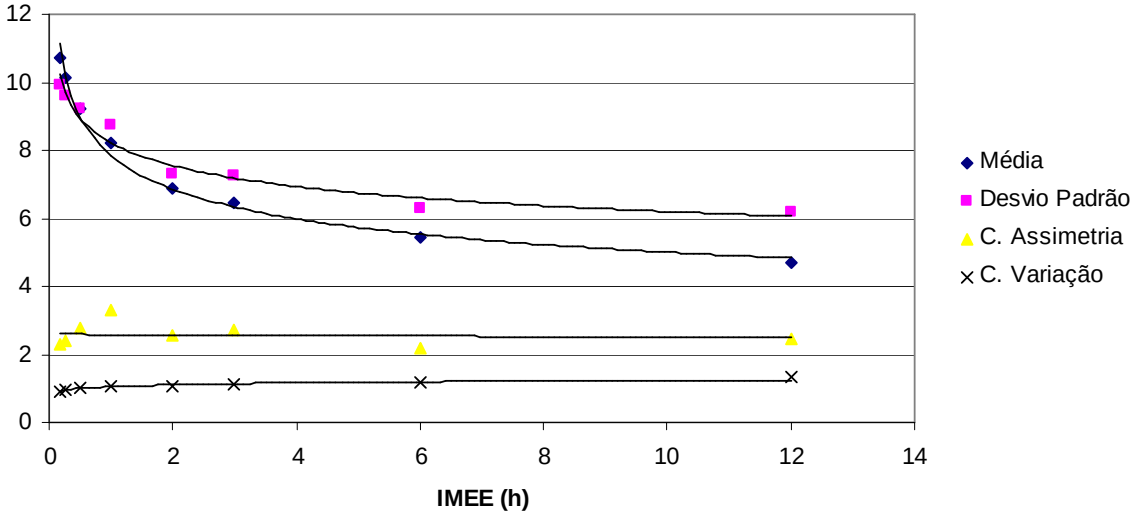

Figura 10 – Variação das estatísticas da intensidade

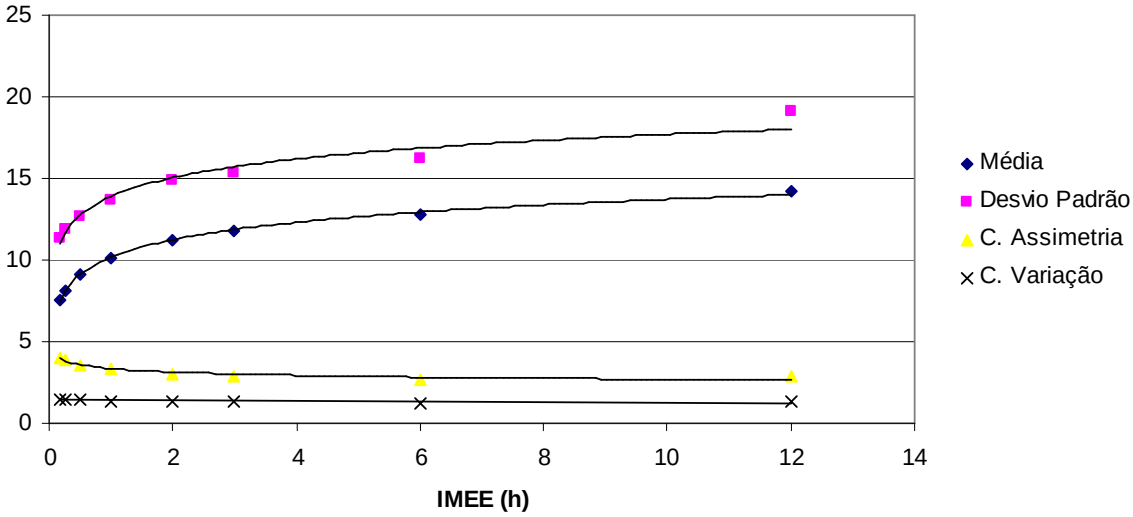

Figura 11 – Variação das estatísticas do volume

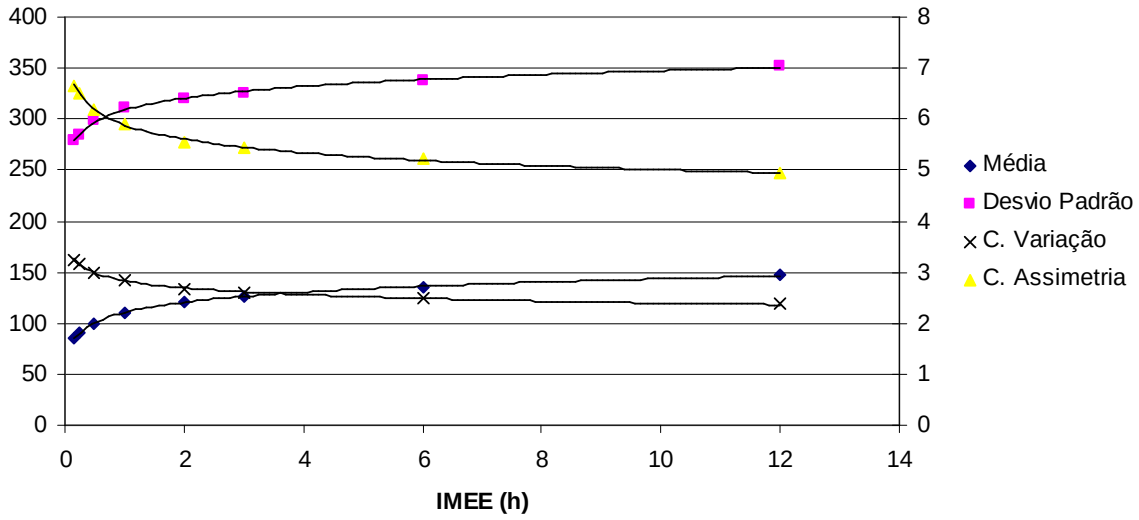

Figura 12 – Variação das estatísticas do intervalo entre eventos (IEE)

Os resultados obtidos demonstram que o valor do IMEE adotado influencia de modo significativo o comportamento das variáveis que descrevem as características dos eventos de precipitação. Nesse sentido, podem ser destacados os seguintes pontos:

- De um modo geral, houve uma redução na quantidade de eventos com o aumento do IMEE. Tal diminuição, por sua vez, influenciou as características dos eventos, tais como duração, altura precipitada e intensidade média;
- Vale ressaltar que o IMEE adotado determina os parâmetros estatísticos da amostra de eventos. Assim, um intervalo mínimo entre eventos (IMEE) de 10 minutos proporcionou uma amostra de 901 eventos, ao passo que um IMEE de 720 minutos produziu uma amostra com tamanho 44% inferior;
- A duração média e a altura precipitada da amostra de eventos demonstraram aumento proporcionalmente ao IMEE adotado;
- De modo semelhante, o intervalo médio entre eventos aumentou proporcionalmente ao IMEE adotado: 86 horas (IMEE de 10 minutos) e 147 horas (IMEE de 720 minutos), com uma diferença que corresponde a 2,5 dias. O IEE máximo observado foi de 121 dias. De um modo geral, o IEE mínimo calculado se ajustou satisfatoriamente ao IMEE adotado.
- De acordo com Tokay e Short (1996), o valor médio das intensidades dos eventos pode ser classificado como muito fortes e moderados (Tabela 5), variando de 10,71 mm/h (IMEE de 10 minutos) a 4,72 mm/h (IMEE de 720 minutos). Assim, para um IMEE de 10 minutos, a intensidade de 65% dos eventos era superior a 5 mm/h, sendo que 15% dos eventos eram extremos. Por outro lado, para um IMEE de

720 minutos, a intensidade de 29% dos eventos era superior a 5 mm/h e somente 4% dos eventos eram extremos;

o A intensidade média máxima observada (95,25 mm/h) correspondeu a um evento com 20 minutos de duração, valor obtido para IMEE menores que 60 minutos. A intensidade média máxima variou inversamente com o IMEE, o que está associado ao aumento do tamanho da amostra. Um IMEE de 120 minutos, apesar de implicar na inclusão de novos registros ao evento, resulta no aumento da duração. Assim, esse aumento produziu com resultado uma redução na intensidade média.

o De um modo geral, as variáveis características da amostra (numero de eventos, duração média, média da intensidade média, altura precipitada, intervalo médio entre eventos) demonstraram um ajuste satisfatório com o IMEE. As equações ajustadas (IMEE variando entre 10 minutos e 12 horas) estão apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4 – Equações ajustadas a partir da série de precipitação

Variável	Equação
Tamanho da amostra (N)	$N = 706{,}78 IMEE^{-0{,}1344}$
Duração média (min)	$D = 0{,}5142 IMEE + 0{,}8925$
Média da intensidade média (mm/h)	$I = 7{,}8444 IMEE^{-0{,}1951}$
Altura precipitada média (mm)	$P = 9{,}9771 IMEE^{0{,}1464}$
Intervalo entre eventos (min)	$IEE = 108{,}72 IMEE^{0{,}1269}$

Tabela 5 – Classificação da chuva quanto a sua intensidade segundo Tokay e Short (1996)

Classificação	Intensidade (mm/h)
Muito Fraca	< 1
Fraca	$1 \leq I < 2$
Moderada	$2 \leq I < 5$
Forte	$5 \leq I < 10$
Muito Forte	$10 \leq I < 20$
Extrema	$I \geq 20$

Os resultados obtidos neste estudo demonstraram certa semelhança com os obtidos por Adams et al. (1986). Esse trabalho utilizou dados de precipitação de uma estação em Vancouver, Canadá. Nesse estudo, foi utilizada uma série histórica com 18 anos de duração, com o IMEE variando entre 5 e 720 minutos.

Dunkerley (2008b) utilizou dados de precipitação de uma estação no semi-árido Australiano com 5 anos de duração. Os valores de IMEE adotados variaram entre 15 minutos e 24 horas. De modo similar, os resultados demonstraram certa semelhança com os obtidos neste estudo.

4.2. Caracterização dos Eventos

A série histórica de precipitação utilizada no estudo reúne as seguintes características: a) precipitação média anual de 815 mm (superior à média histórica de 747 mm); b) intensidade máxima de cinco minutos igual a 182,88 mm/h (15,24 mm precipitados em 5 minutos); c) no período de estudo (9 anos), foram registrados 750 dias com chuva; ou seja, 23% dos dias do período; d) período chuvoso entre os meses de janeiro e maio; e) chuvas com intensidades máximas localizadas nos meses de abril e maio. A Figura 13 mostra a distribuição média mensal da chuva.

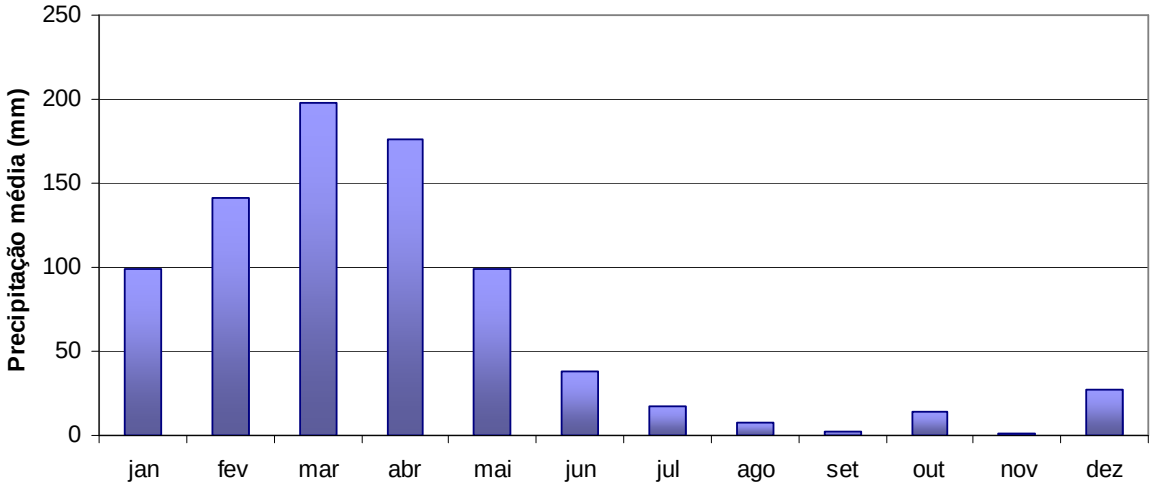

Figura 13 – Precipitação média mensal

4.2.1. Classificação quanto à intensidade média da chuva

A Tabela 6 apresenta a quantidade de eventos contidos na serie histórica de acordo com a classificação de Tokay e Short (1996) para cada IMEE adotado. Assim, uma vez que o critério de classificação é a intensidade média, observou-se uma modificação no perfil do evento em função do IMEE adotado.

De acordo com o Gráfico, observa-se uma prevalência de eventos moderados, excetuando-se o IMEE de 720 minutos, com prevalência de eventos muito fracos.

Observou-se que valores de IMEE baixos produziram maior quantidade de eventos extremos ou muito fortes.

A Figura 14 apresenta Gráfico onde se pode observar a tendência que segue a classificação dos eventos em função do IMEE adotado.

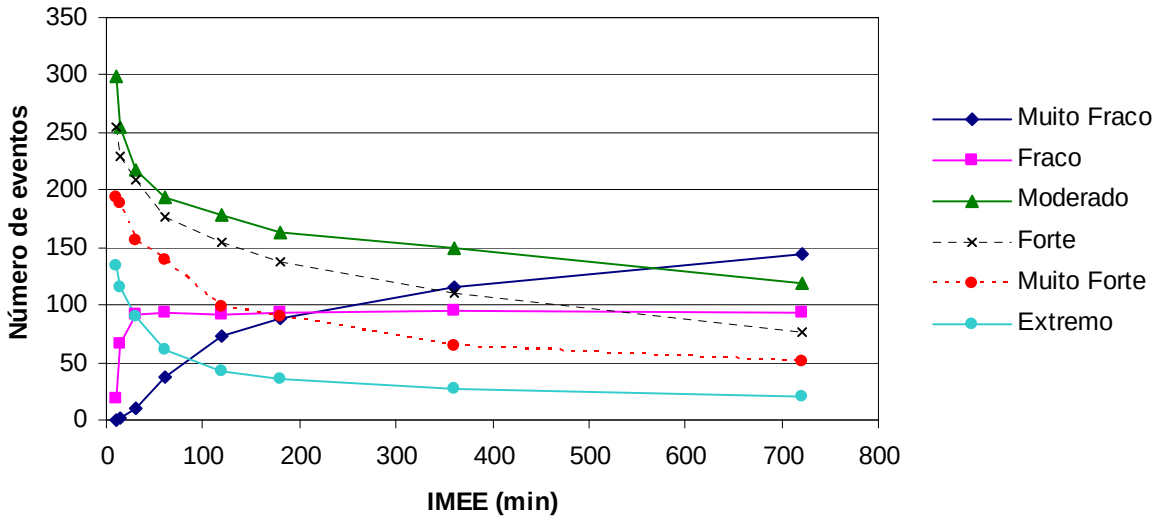

Figura 14 – Variação da classificação Tokay e Short (1996)

Tabela 6 – Classificação dos eventos de chuva na BESNN, quanto a sua intensidade

IMEE	Muito Fraco		Fraco		Moderada		Forte		Muito Forte		Extrema	
	Número de eventos	Freqüência (%)	Número de eventos	Freqüência (%)	Número de eventos	Freqüência (%)	Número de eventos	Freqüência (%)	Número de eventos	Freqüência (%)	Número de eventos	Freqüência (%)
10 min	0	0,0%	19	2,1%	299	33,2%	255	28,3%	193	21,4%	135	15,0%
15 min	1	0,1%	67	7,8%	255	29,8%	230	26,8%	188	21,9%	116	13,5%
30 min	11	1,4%	91	11,7%	217	28,0%	209	27,0%	157	20,3%	90	11,6%
60 min	37	5,3%	93	13,3%	194	27,7%	176	25,1%	139	19,8%	62	8,8%
120 min	73	11,4%	91	14,3%	179	28,1%	155	24,3%	98	15,4%	42	6,6%
180 min	89	14,6%	94	15,4%	163	26,7%	138	22,6%	90	14,8%	36	5,9%
360 min	115	20,5%	95	16,9%	149	26,6%	111	19,8%	64	11,4%	27	4,8%
720 min	145	28,7%	94	18,6%	119	23,5%	76	15,0%	51	10,1%	21	4,2%

Observou-se, para qualquer valor do IMEE, uma prevalência de eventos moderados, fortes, muito fortes e extremos (intensidade média acima de 2 mm/h).

4.2.2. Classificação quanto ao coeficiente de avanço da tormenta

Este estudo analisou o comportamento da intensidade máxima e a sua posição relativa dentro do evento.

O Coeficiente de Avanço da tormenta é um parâmetro que define a localização relativa do instante de máxima intensidade dentro da duração do evento. Esse conceito foi inicialmente introduzido por Huff (1967), que classificou os eventos de precipitação em 4 categorias, levando em conta o quartil (quadrante da duração do evento) em que ocorreu a intensidade máxima. De acordo com Dunkerley (2008), este parâmetro varia em função do mecanismo de formação da chuva. Para Acreman (1990), na maioria dos eventos a lâmina precipitada no último quartil, em geral, é de pequena magnitude.

Observou-se uma prevalência deste coeficiente no primeiro e do segundo quartil, conforme apresentado na Tabela 7. Esse comportamento foi observado para todos os IMEE adotados.

Assim, observou-se que 74% dos eventos apresentaram intensidade máxima no primeiro e segundo quartis; 26% dos eventos estiveram entre o terceiro e quarto quartis.

A Figura 15 apresenta um gráfico onde se pode verificar o comportamento da distribuição dos eventos segundo a classificação de Huff.

Tabela 7 – Classificação dos eventos analisados segundo critério de Huff (1967).

IMEE (min)	1º Quartil		2º Quartil		3º Quartil		4º Quartil	
	Número de eventos	Freqüência (%)	Número de eventos	Freqüência (%)	Número de eventos	Freqüência (%)	Número de eventos	Freqüência (%)
10	275	30,5%	347	38,5%	173	19,2%	106	11,8%
15	299	34,9%	302	35,2%	161	18,8%	95	11,1%
30	327	42,2%	240	31,0%	128	16,5%	80	10,3%
60	324	46,2%	198	28,2%	108	15,4%	71	10,1%
120	341	53,4%	149	23,4%	69	10,8%	79	12,4%
180	332	54,4%	137	22,5%	69	11,3%	72	11,8%
360	319	56,9%	114	20,3%	59	10,5%	69	12,3%
720	284	56,1%	94	18,6%	61	12,1%	67	13,2%

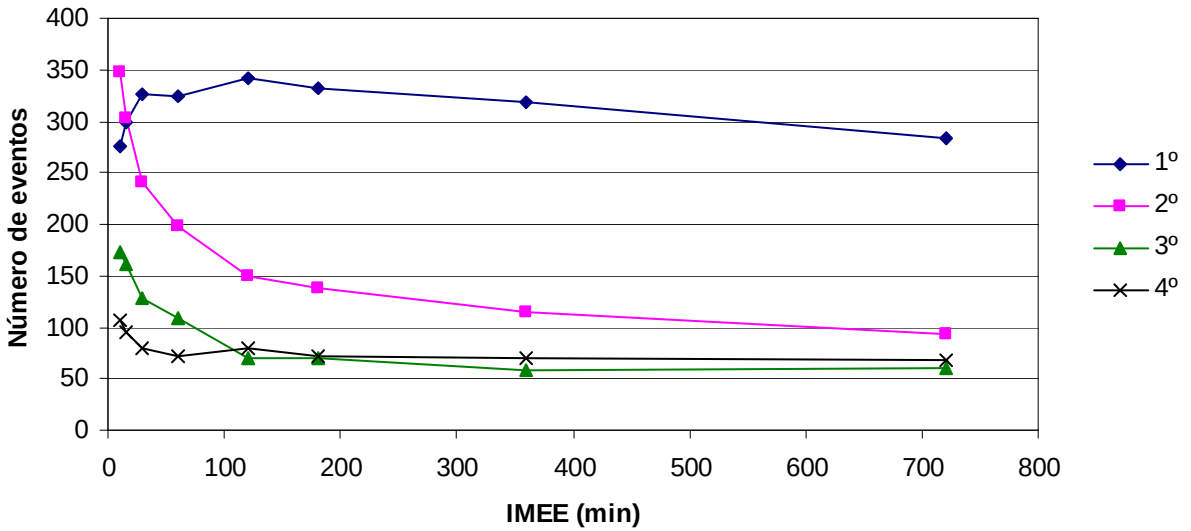

Figura 15 – Posição da intensidade máxima segundo o critério de Huff (1967).

4.1. Equações intensidade-duração-frequência

A Tabela 8 apresenta os parâmetros das equações IDF obtidos, obtidas a partir da analise de freqüência dos eventos extremos observados na serie histórica. Além disso, foi ajustada uma expressão geral englobando o conjunto dos dados.

Tabela 8 – Equações IDF ajustadas.

Período de Retorno (T)	Parâmetros Ln C	N	C	Equação IDF
100	3,114	0,6738	22,511	$i = \frac{17{,}007}{(t+8)^{0{,}6824}}$
75	3,0761	0,6739	21,674	$i = \frac{21{,}674}{(t+8)^{0{,}6739}}$
50	3,0202	0,6756	20,495	$i = \frac{20{,}495}{(t+8)^{0{,}6756}}$
25	2,9169	0,6792	18,484	$i = \frac{18{,}484}{(t+8)^{0{,}6792}}$
20	2,8814	0,6805	17,839	$i = \frac{17{,}839}{(t+8)^{0{,}6805}}$
15	2,8336	0,6824	17,007	$i = \frac{17{,}007}{(t+8)^{0{,}6824}}$
10	2,7623	0,6856	15,836	$i = \frac{15{,}836}{(t+8)^{0{,}6856}}$
5	2,5295	0,6718	12,547	$i = \frac{12{,}547}{(t+8)^{0{,}6718}}$
2	2,3189	0,6855	10,164	$i = \frac{10{,}164}{(t+8)^{0{,}6855}}$
Equação Geral	K	m	n	$i = \frac{9{,}3736.T^{0{,}2015}}{(t+8)^{0{,}6787}}$
	9,3736	0,2015	0,6787	

Com o objetivo de realizar uma análise comparativa, foi utilizada a equação IDF ajustada da cidade de Natal (Plano Diretor do Município de Natal, 2009):

$$i = \frac{502{,}47.T^{0{,}1431}}{(t+10{,}8)^{0{,}606}}$$

A Figura 16 apresenta a análise comparativa utilizando as duas equações IDF. A equação da BESNN estima valores de intensidades máximas de 5 minutos mais altas para qualquer período de retorno. Observa-se ainda que, quanto maior o tempo de recorrência, maior é a diferença entre os valores gerados.

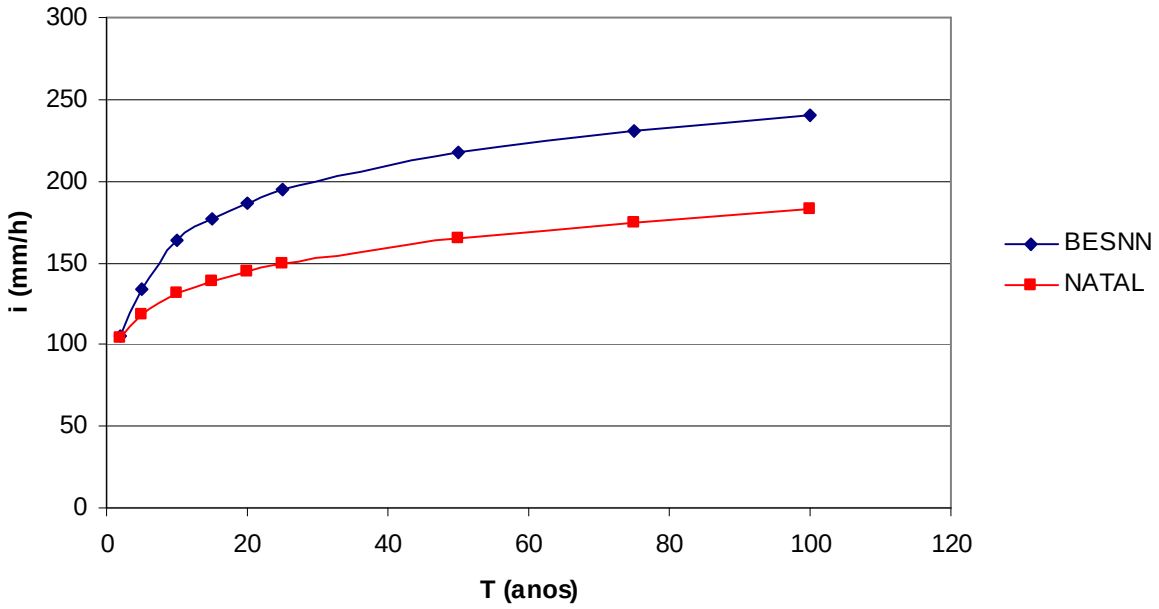

Figura 16 – Intensidades máximas das equações da BESNN e de Natal com 5 minutos de duração.

Como pode ser observado na Figura 17, as intensidades máximas obtidas com as duas equações para uma duração de 60 minutos demonstram que os eventos na BESNN tendem a apresentar intensidades máximas mais altas do que Natal, para tempos de recorrência acima de 15 anos.

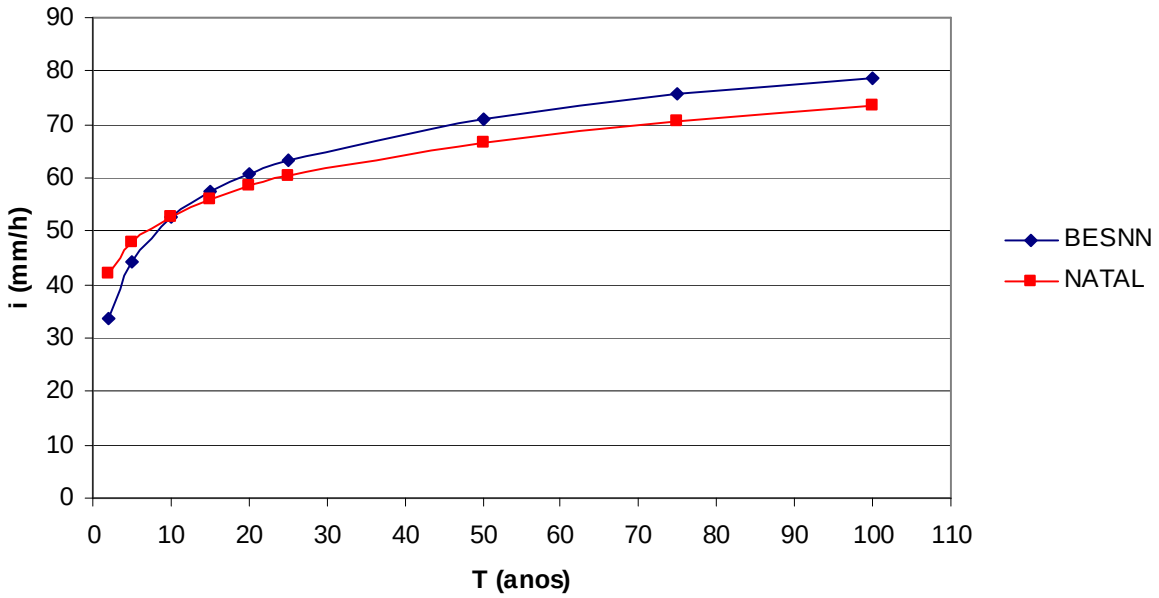

Figura 17 – Intensidades máximas das equações da BESNN e de Natal com 60 minutos de duração.

Para eventos com duração de 3 horas, a equação de Natal gerou intensidades máximas ligeiramente mais altas do que a BESNN, para qualquer tempo de recorrência, invertendo a condição apresentada na Figura 16. Como pode ser visto na Figura 18, para maiores valores do tempo de recorrência, a diferença entre os valores das duas equações é quase insignificante.

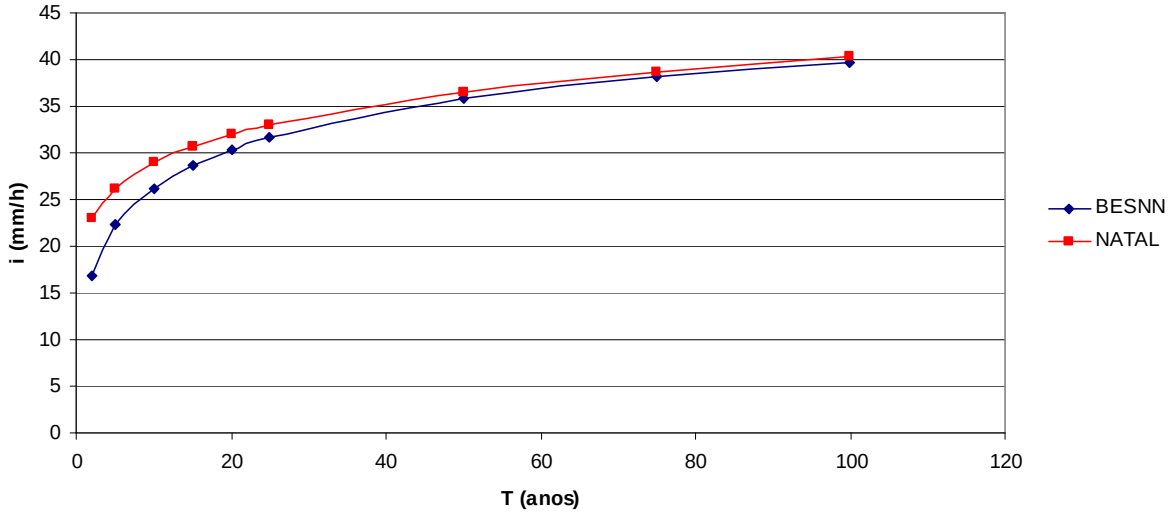

Figura 18 – Intensidades máximas das equações da BESNN e de Natal com 180 minutos de duração.

As diferenças entre os valores de intensidade máxima se tornam mais significativas a medida que a duração aumenta. Para duração igual a 1440 minutos, por exemplo, a equação de Natal gerou uma intensidade máxima provável 62% maior do que a da BESNN, para um tempo de recorrência de 2 anos. Isto significa que em um período de 24 horas, a precipitação máxima em Natal para T=2 anos será 62 mm mais alta que aquela obtida para a BESNN.

De uma maneira geral, comparando-se os valores das intensidades máximas nas duas localidades, observaram-se intensidades mais altas para a BESNN para durações pequenas. Tal fato pode estar relacionado às características climáticas peculiares daquela micro-região semi-árida, caracterizada pela alta variabilidade temporal e predominância de chuvas de origem convectiva, caracterizadas por curtas durações e altas intensidades.

5. CONCLUSÕES

Neste estudo, a análise dos eventos levou em conta o IMEE (intervalo mínimo entre eventos) como critério para identificação de eventos. Foram adotados valores para o IMEE variando entre 5 e 720 min. O objetivo era analisar o efeito produzido pelo IMEE nas características dos eventos contidos na amostra. As principais conclusões foram as seguintes:

- O IMEE adotado como critério influência de modo substancial as características dos eventos contidos na amostra.
- Além disso, observou-se que o IMEE adotado influencia na estatística amostral dos eventos: quantidade de eventos, duração e altura precipitada.
- De modo semelhante, o IMEE adotado influenciou o intervalo médio entre eventos, que variou entre 86 horas (IMEE de 10 minutos) e 147 horas (IMEE de 720 minutos).
- Observou-se que as características da amostra e do evento (quantidade de eventos, duração média, média da intensidade média, lamina precipitada, intervalo entre eventos médio) se ajustam satisfatoriamente com o IMEE adotado.
- IMEE baixos resultaram em maior quantidade de eventos extremos ou muito fortes, segundo classificação Tokay e Short (1996). Por outro lado, eventos muito fracos ou fracos se tornaram mais freqüentes com o aumento do valor do IMEE.
- De acordo com a classificação de Tokay e Short (1996), observou-se uma prevalência de eventos moderados ($2 \leq I < 5$ mm/h) para todos os valores de IMEE, a exceção de 720 minutos.
- Com relação ao coeficiente de avanço do evento, observou-se uma prevalência no primeiro quartil do evento, para todos os IMEE.
- A análise de freqüência em séries parciais permitiu o ajuste de uma equação IDF local,

$$i = \frac{9{,}3736.T^{0{,}2015}}{(t+8)^{0{,}6787}}$$

Sendo i a intensidade média, em mm/min, T, o tempo de recorrência, em anos, t é a duração da tormenta, em min.

REFERÊNCIAS

ACREMAN, M C. A simple stochastic model of hourly rainfall for Farnborough, England. **Hydrological Sciences Journal**. v 35, pp 119-148. 1990.

ADAMS, B J; FRASER, H G; HOWARD, C D D; HANAFY, M S. Meteorological data analysis for drainage system design. **Journal of Environmental Engineering**. v 112, pp 827-848. 1986.

ARAÚJO, L E. **Análise estatística de chuvas intensas na bacia hidrográfica do rio Paraíba**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Campina Grande. 2006.

ARAÚJO, L E; SOUSA, F A S; RIBEIRO, M A F M; SANTOS, A S; MEDEIROS, P C. Análise estatística de chuvas intensas na bacia hidrográfica do rio Paraíba. **Revista Brasileira de Meteorologia**. v 23, pp 162-169. 2008.

BACK, A J. Relação intensidade – duração – frequência de chuvas intensas de Chapecó, Estado de Santa Catarina. **Acta Scientiarum Agronomy**. v 28, n 4, pp 575-581. 2006.

BONI, G; PARODI, A; RUDARI R. Extreme rainfall events: learning from raingauge time séries. **Journal of Hydrology**. v 327, pp 304-314. 2006.

BONTA J V; RAO, A R. Factors affecting the identification of independent storm events. **Journal of Hydrology**. v 98, pp 275–293. 1988.

CALDER, I R. Rainfall interception and drop sizedevelopment and calibration of the two-layer stochastic interception model. **Tree Physiology.** v 16, pp 727-732. 1996.

COSTA, J F; MOREIRA, L F F; RIGHETTO, A M; MATTOS, A. Análise das características temporais dos eventos de precipitação na estação ecológica do Seridó-RN. XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Campo Grande. 2009.

DUNKERLEY, D. Rain event properties in nature and in rainfall simulation experiments: a comparative review with recommendations for increasingly systematic study and reporting. **Hydrological Processes**. v 22, pp 4415 - 4435. 2008a.

DUNKERLEY, D. Identifying individual rain events from pluviograph records: a review with analysis of data from an Australian dryland site. **Hydrological Processes**. v 22, pp 5024 - 5036. 2008b.

DUNKERLEY, D. How do the rain rates of sub-event intervals such as the maximum 5- and 15-min rates (I_5 or I_{30}) relate to the properties of the enclosing rainfall event? **Hydrological Processes**. v 24, pp 2425-2439. 2010.

FERREIRA A G; MELLO, N G S. Principais sistemas atmosféricos atuantes sobre a região Nordeste do Brasil e a influência dos oceanos Pacífico e Atlântico no clima da região. **Revista Brasileira de Climatologia**. v 1, No 1. 2005.

GOODRICH, D C; KEEFER, T O; UNKRICH, C L; NICHOLS, M H; OSBORN, H B; STONE, J J; SMITH, J R. Long-term precipitation database, Walnut Gulch

Experimental Watershed, Arizona, United States. **Water Resources Research**. v 44, W05S04. doi:10.1029/2006WR005782. 2008.

HAWKE, R M; PRICE, A G; BRYAN, R B. The effect of initial soil water content and rainfall intensity on near-surface soil hydrologic conductivity: A laboratory investigation. **Catena**. v 65, pp 237–246. 2006.

HAYLOCK M; NICHOLLS N. Trends in extreme rainfall indices for an updated high quality data set for Australia, 1910–1998. **International Journal of Climatology** 20: 1533–1541. 2000.

HAYLOCK, M R; PETERSON, T C; ALVES, L M; AMBRIZZI, T; ANUNCIAÇÃO, Y M T; BAEZ, J; BARROS, V R; BERLATO, M A; BIDEGAIN, M; CORONEL, G; GARCIA, V J; GRIMM, A M; KAROLY, D; MARENGO, J A; MARINO, M B; MONCUNILL, D F; NECHET, D; QUINTANA, J; REBELLO, E; RUSTICUCCI, M; SANTOS, J L; TREBEJO, I; VINCENT, L A. Trends in total and extreme South American rainfall 1960-2000 and links with sea surface temperature. **Journal of Climate**. v 19, pp 1490-1512. 2006.

HERNANDEZ, V. Regionalização dos parâmetros de escala em chuvas intensas. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. v 13, n 1, pp 91-98. 2008.

HUFF, F. A. Time distribution of rainfall in heavy storms. **Water Resources Research**. v 3, pp 1007–1019. 1967.

MEDEIROS, V. M. A. **Bacia experimental de Serra Negra do Norte, RN – implantação, monitoramento e modelagem**. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte. 2005.

MEDEIROS, V R G; LUCENA, A P; MOURA, E M; FILGUEIRA, H J A; SILANS, A M B P. Padrão da ocorrência de eventos chuvosos no litoral paraibano. XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. João Pessoa. 2005.

MOLINIER, M; ALBUQUERQUE, C H C; CADIER, E. Análise da pluviometria e isoietas homogeneizadas do Nordeste brasileiro. Série Hidrologia/32. SUDENE. Recife. 1994.

MOREIRA, L.F.F.; RIGHETTO, A.M.; MEDEIROS, V.M.A. O regime de chuvas e os processos erosivos no semi-árido nordestino. VI Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos. **ABRH**. Vitória. 2004.

MOURA, E M; e MEDEIROS, V M A. Diferenças em microescala no regime de precipitação no Nordeste: litoral e semi-árido. XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. João Pessoa. 2005.

NADAL-ROMERO, E.; REGÜÉS, D.; LATRON, J. Relationships among rainfall, runoff, and suspended sediment in a small catchment with badlands. **Catena.** v 74, pp 127-136. 2008.

NAGHETTINI, M.; PINTO, E. J. A. **Hidrologia estatística.** Belo Horizonte: CPRM-Serviço Geológico do Brasil. 2007.

NUNES, J P; SEIXAS, J; PACHECO, N R. Vulnerability of water resources, vegetation productivity and soil erosion to climate change in Mediterranean watersheds. **Hydrological Processes**. v 22, pp 3115–3134. 2008.

OLIVER, J.E. Monthly precipitation distribution: a comparative index. Prof. Geographer. v 32(1), pp 43-58. 1980.

Plano Diretor do Município de Natal. 2009.

PALYNCHUK, B; GUO, Y. Threshold analysis of rainstorm depth and duration statistics at Toronto, Canadá. **Journal of Hydrology**. v 348, pp 535– 545. 2008.

REISEN, V. A.; MOLINARES, F. A. F.; TEIXEIRA, E. C. Modelagem de séries temporais sazonais na presença de *outliers*. Estudo de caso da vazão máxima mensal do Rio Jucu, ES, Brasil. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos.** v 13, pp 45-53. 2008.

Relatório Final do Grupo de Trabalho Interministerial para Redelimitação do Semi-Árido e Polígono das Secas. **Ministério da Integração Nacional**. Brasília. 2005.

RESTREPO-POSADA PJ; EAGLESON PS. Identification of independent events. **Journal of Hydrology**. v 55, pp. 303–319. 1982.

RODRIGUES, J; ANDRADE, E.; OLIVEIRA, T; LOBATO, F. Equações de intensidade – duração – frequência de chuvas para as localidades de Fortaleza e Pentecoste, Ceará. **Scientia Agrária**. v 9, pp 511-519. 2008.

SANTOS, C A C**. Estimativas e tendências de índices de detecção de mudanças climáticas com base na precipitação diária no Rio Grande do Norte e na Paraíba**. Dissertação de Mestrado em Meteorologia, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande-PB. 2006.

SANTOS, C A C; BRITO, J I B. Análise dos índices de extremos para o semi-árido do Brasil e suas relações com TSM e IVDN**. Revista Brasileira de Meteorologia**. v 22, pp 303-312. 2007.

SANTOS, C A C; BRITO, J I B; RAO, T V R; MENEZES, H E A. Tendências dos índices de precipitação no estado do CEARÁ. **Revista Brasileira de Meteorologia**. v 24, n 1, pp. 39-47. 2009

SCHENKEL, C. S.; MATALLO JUNIOR, H. Desertificação. **UNESCO**. Brasília. 2003.

SILVA, D D; GOMES FILHO, R R; PRUSKI, F F; PEREIRA, S B; NOVAES, L F. Chuvas intensas no Estado da Bahia. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v 6, n 2. 2002.

SILVA, D D; PEREIRA, S B; PRUSKI, F .F; GOMES FILHO, R R; LANA, A M Q; BAENA, L G N. Equações de intensidade-duração-freqüência da precipitação pluvial para o estado de Tocantins. **Engenharia na Agricultura**. v 11, n.1-4. 2003.

SILVA, V P R; PEREIRA, E R R; AZEVEDO, P V; SOUSA, F A S; SOUSA, I F. Análise da pluviometria e dias chuvosos na região Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v 15, n.2, pp131–138. 2011.

SILVA FILHO, V. P. **Previsão de vazão no Semi-Árido Nordestino, utilizando modelos atmosféricos: um estudo de caso**. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Ceará. 2005.

SOLER, M.; REGÜÉS, D.; LATRON, J.; GALLART, F. Frequency-magnitude relationships for precipitation, stream flow and sediment load events in a small Mediterranean basin (Vallcebre basin, Eastern Pyrenees). **Catena.** v 71, pp 164-171. 2007.

SUPPIAH, R; HANNESSY, K J. Trends in total rainfall, heavy rain events and number of dry days in Australia, 1910–1990. **International Journal of Climatology**. v 10, pp 1141–1164. 1998.

TOBA, T; OHTA, T. Factors affecting rainfall interception determined by a forest simulator and numerical model. **Hydrological Processes**. v 22, pp 2634–2643. 2008.

TOKAY, A.; SHORT, DA. Evidence from tropical raindrop spectra of the origin of rain from stratiform versus convective clouds. **Journal of Applied Meteorology**. v 35, pp 355–371. 1996.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: ciência e aplicação**. Porto Alegre: Ed. Universidade/ UFRGS/ Associação Brasileira de Recursos Hídricos. 1997.