



**UNIVERSIDADE DO ESTADO DO AMAZONAS
ESCOLA SUPERIOR DE TECNOLOGIA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM METEOROLOGIA**

Wanda Isabella Diógenes Valenti

**ESTIMATIVA DE PRECIPITAÇÃO POR RADAR METEOROLÓGICO:
CARACTERIZAÇÃO E AVALIAÇÃO DE RELAÇÕES Z-R**

**Manaus-AM
Novembro/2019**

Wanda Isabella Diógenes Valenti

**ESTIMATIVA DE PRECIPITAÇÃO POR RADAR METEOROLÓGICO:
CARACTERIZAÇÃO E AVALIAÇÃO DE RELAÇÕES Z-R**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Coordenação do curso de Bacharelado em Meteorologia da Universidade do Estado do Amazonas como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Bacharel em Meteorologia.

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Augusto Ferreira de Souza

Colaborador: Dr. Ivan Saraiva

Manaus-AM
Novembro/2019

WANDA ISABELLA DIÓGENES VALENTI

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenação de Meteorologia da Universidade do Estado do Amazonas, como um dos requisitos necessários à obtenção do grau de Bacharel em Meteorologia.

Wanda Isabella D. Valenti

Wanda Isabella Diógenes Valenti

Data de aprovação: Manaus/AM, 06 / 12 / 2019.

BANCA EXAMINADORA

Rodrigo Augusto F. de Souza

Dr. Rodrigo Augusto Ferreira de Souza

(Orientador – Universidade do Estado do Amazonas)

Rita Valéria Andreoli de Souza

Dra. Rita Valéria Andreoli Souza

(Universidade do Estado do Amazonas)

Jamile Dehaini

Dra. Jamile Dehaini

(Universidade do Estado do Amazonas)

Ficha Catalográfica

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).
Sistema Integrado de Bibliotecas da Universidade do Estado do Amazonas.

V155e Valenti, Wanda Isabella Driúgenes
Estimativa de precipitação por radar meteorológico:
caracterização e avaliação de relações Z-Rs / Wanda Isabella
Driúgenes Valenti. Manaus : [s.n.], 2019.
59 f.: color.: 31 cm.

TCC - Graduação em Meteorologia - Bacharelado -
Universidade do Estado do Amazonas, Manaus, 2019.

Inclui bibliografia

Orientador: Dr Rodrigo Augusto Ferreira de Souza

Coorientador: Dr Ivan Saraiva

1. Relação Z-R. 2. Radar meteorológico. 3. Precipitação.
4. Amazônia. I. Dr Rodrigo Augusto Ferreira de Souza
(Orient.). II. Dr Ivan Saraiva (Coorient.). III. Universidade
do Estado do Amazonas. IV. Estimativa de precipitação por
radar meteorológico: caracterização e avaliação de relações Z-Rs

Elaborado por Jeane Macelino Galves - CRB-11/463

*Bem aventurado o homem que acha sabedoria, e o homem que adquire
conhecimento.*

Provérbios 3:13

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pela vida e por me permitir chegar até aqui, por ser meu guia e o objetivo maior de tudo. A minha família por todo apoio, compreensão e incentivo (minha querida mãe, Marília, vózinha teherezinha, Maria e Vô Manuel, irmã Aída e Camila, Tia Mara pela ajuda inclusive na leitura do trabalho, e todos meus tios e tias, primos e primas).

Agradeço ao meu coorientador Ivan Saraiva por toda a paciência, incentivo, disponibilidade em ensinar, orientar e também pela amizade construída nesse espaço de tempo. E igualmente ao professor orientador Rodrigo Souza pela orientação e disponibilização em esclarecer dúvidas e ao Dr. Morales da USP pela ajuda na metodologia desenvolvida no trabalho.

Agradeço também aos demais professores e amigos da meteorologia e EST (Nivia, Fabrine, Rodrigo, Ruthe, Léo, Erilane, Ghustavo, Josy, Djanir, André, Ranny, Lourdes, Willy, Mira, Jean, Kim, Adriano, Karol, Tati, Thalita, Lemoel, Priscila e toda a galera da B09)

Agradeço aos profissionais e colegas da Divmet por toda ajuda e amizade(Dra. Jaci, Lucas, Deydila, Sr. Ricardo, Márcio, Igor, Lucas, Alisson, Bernardo, Rafael), sem dúvida um dos períodos que mais aprendi e entendi sobre a minha, em breve, profissão, meus sinceros e profundos agradecimentos a toda equipe da DIVIMET.

Agradeço aos meus amigos e professores do INPA (Prof. Candido, Denisi, Profa. Jeanne, Jana, Thiaguito, Jorge, Marcio, Delano, Robson, Fernanda, Greice e todos os colegas do LBA), por toda paciência, conhecimento, oportunidades e por terem me apresentado a pesquisa, todos guardo com muito carinho em meu coração.

A todos meus amigos de longa data, por todo incentivo, compreensão, orações e amizade (Leticícia, Stephanie, Fernanda, Dulci, Greicy, Débora, Nay, Italo). E por último e não menos importante, agradeço a todos que fizeram parte da elaboração não apenas desse trabalho de conclusão de curso, direta ou indiretamente mas também na minha vida ao longo da graduação.

RESUMO

Na Amazônia, as medidas de precipitação são escassas, ora por falta de recursos, ora por decorrência da extensa área da Amazônia. Por isso, outras formas de registro da precipitação são de fundamental importância, já que o conhecimento desta permite determinar o ciclo hidrológico da região como o monitoramento de cheias de rios e igarapés. Neste sentido, o trabalho buscou utilizar o radar meteorológico como uma ferramenta para estimar a chuva com o objetivo de propor uma relação Z-R para estimativa de precipitação para a região de abrangência do radar meteorológico de Manaus. Métodos foram empregados para caracterizar uma relação Z-R com dados provenientes de EMS e análises a partir de relações Z-R propostas por outros autores na tentativa de propor uma relação Z-R apropriada para a região de Manaus. Na primeira etapa a relação caracterizada a relação $Z = 579R^{1,22}$ que dentro das limitações encontradas no presente trabalho obteve a melhor representação para a região do RM de Manaus. Na avaliação com as relações já existentes na literatura e a caracterizada, para quatro eventos na cidade de Manaus observou-se que a relação caracterizada obteve bom desempenho em relação as demais analisadas, o que sugere que mais estudos sejam feitos para avaliar o desempenho desta relação para que no futuro a mesma possa ser implementada nos RMs da Amazônia.

Palavras-chave: Amazônia, relação Z-R, radar meteorológico, precipitação

ABSTRACT

In the Amazon, precipitation measures are scarce, sometimes due to lack of resources, sometimes due to the extensive area of the Amazon. For this reason, other forms of precipitation registration are of fundamental importance, since its knowledge allows to determine the hydrological cycle of the region, such as the monitoring of floods of rivers and streams. In this sense, the work sought to use the weather radar as a tool to estimate the rain with the objective of proposing a Z-R ratio for precipitation estimation for the Manaus weather radar coverage region. Methods were employed to characterize a Z-R relationship with data from EMS and analyzes from Z-R relations proposed by other authors in an attempt to propose an appropriate Z-R relationship for the Manaus region. In the first stage the relationship characterized the ratio $Z = 579R^{1,22}$ which within the limitations found in the present work obtained the best representation for the Manaus MR region. In the evaluation with the relationships already existing in the literature and the characterized, for four events in the city of Manaus it was observed that the characterized relationship obtained good performance in relation to the others analyzed, suggesting that more studies are done to evaluate the performance of this relationship. so that it can be implemented in the Amazon RMs in the future.

Palavras-chave: Amazon, Z-R ratio, weather radar, precipitation

SUMÁRIO

RESUMO	6
ABSTRACT	7
SUMÁRIO	8
LISTA DE FIGURAS.....	9
LISTA DE TABELAS	10
LISTA DE SIGLAS.....	11
LISTA DE SÍMBOLOS.....	12
1. INTRODUÇÃO.....	13
2. REVISÃO LITERÁRIA	15
2.1 Radar.....	15
2.2 Estimativa de precipitação por radar meteorológico.....	18
2.2.1 Processos físicos dentro da nuvem.....	23
2.2.2. Diferenças entre chuvas convectiva e estratiforme.....	26
2.2.3. Interferências por ecos de terreno.....	27
2.2.4. Interferências por falta de calibrações adequadas.....	28
3. MATERIAIS E MÉTODOS	30
3.1. Procedimentos metodológicos	32
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	36
4.1 Caracterização da relação Z-R	36
4.2 Estudos de casos	39
4.2.1 Evento 1	40
4.2.2 Evento 2	43
4.2.3 Evento3.....	46
4.2.4 Evento 4	48
5. CONCLUSÕES PARCIAIS E RECOMENDAÇÕES.....	52
6. REFÊRENCIAS	54

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Esquema do funcionamento do radar.....	16
Figura 2. Formas de visualização dos dados de radar. a) PPI b) RHI e c) CAPPI.....	17
Figura 3. Relação entre o Z (fator refletividade) e R (taxa de precipitação) para 69 relações Z-R. (Adaptado de Battan, 1973). Em destaque de laranja está a relação Z-R de Marshall e Palmer,1948, uma das mais utilizadas.....	18
Figura 4. a) Características da precipitação estratiforme. b) Características da precipitação convectiva. Regiões hachuradas mostram fortes picos de refletividade de radar meteorológico. Na nuvem (b) é mostrado sucessivos tempos t_0, \dots, t_n do crescimento de partículas de precipitação que são levadas ao topo da nuvem por fortes correntes ascendentes (t_2) e após determinado tempo caem até a superfície da terra (t_5). Após o t_5 a nuvem pode morrer ou continuar por um tempo considerado antes de sua dissipação. O limite tracejado mostra a nuvem evaporando (Adaptado por Saraiva 2016 de Houze, 1981).....	24
Figura 5. Representação da energia retornada ao radar em decorrência de ecos de terreno e chuva. Em roxo temos os feixes de energia emitido pelo radar. Em verde a simulação dos ecos de retorno. Em amarelo a topografia. (Adaptado de Souza, 2015).....	25
Figura 6. Localização do radar meteorológico de Manaus (bola branca) e das estações meteorológicas do INMET (quadrado) e UEA (triângulo) compreendidas na área do radar no raio de 150 km. As cores indicam a altimetria do terreno.....	28
Figura 7. Simulação da propagação do feixe do radar meteorológico de Manaus para a primeira elevação mais a topografia média (hachurado de cinza claro) e máxima (hachurado de cinza escuro) integrada no azimute. Linha preta contínua representa o feixe do radar para abertura inferior e superior da primeira elevação ($0,9^\circ$). Linha tracejada em vermelho representa o feixe de energia principal do radar para a primeira elevação. Linha preta pontilhada vertical à distância de 150 km do radar.....	31
Figura 8. Diagrama de correlação entre as variáveis refletividade (eixo y) e Precipitação (eixo x). Linha vermelha representa a linha de tendencia.....	36
Figura 9. Diagrama de correlação entre a variáveis refletividade (eixo y) e Precipitação (eixo x). Painel a esquerda – entre 0 a 20 km; Médio – entre 20 a 40 km; e a direita – entre 140 a 160 km.....	37
Figura 10. Evento 1 – 10/01/2019. Superior – Imagem do Satélite GOES-16, canal 13. A paleta de cor indica que quanto mais próximo do rosa menor a temperatura (Fonte: DAS/CPTEC). Inferior – Imagem do Radar Meteorológico de Manaus, produto PPI da 1 elevação. Os pontos tracejados indicam a distancia do centro do radar a cada 50 km e paleta de cores, quanto mais próxima do rosa, maior é a refletividade (Fonte: Censipam).....	40
Figura 11. Evento 2 – 13/02/2019. Superior – Imagem do Satélite GOES-16, canal 13. A paleta de cor indica que quanto mais próximo do rosa menor a temperatura (Fonte: DAS/CPTEC). Inferior – Imagem do Radar Meteorológico de Manaus, produto PPI da 1 elevação. Os pontos tracejados indicam a distancia do centro do radar a cada 50 km e paleta de cores, quanto mais próxima do rosa, maior é a refletividade (Fonte: Censipam).....	43
Figura 12. Evento 3 – 02/05/2019. Superior – Imagem do Satélite GOES-16, canal 13. A paleta de cor indica que quanto mais próximo do rosa menor a temperatura (Fonte: DAS/CPTEC). Inferior – Imagem do Radar Meteorológico de Manaus, produto PPI da 1 elevação. Os pontos tracejados indicam a distancia do centro do radar a cada 50 km e paleta de cores, quanto mais próxima do rosa, maior é a refletividade (Fonte: Censipam).....	47
Figura 13. Evento 4 – 27/09/2019. Superior – Imagem do Satélite GOES-16, canal 13. A paleta de cor indica que quanto mais próximo do rosa menor a temperatura (Fonte: DAS/CPTEC). Inferior – Imagem do Radar Meteorológico de Manaus, produto PPI da 1 elevação. Os pontos tracejados indicam a distancia do centro do radar a cada 50 km e paleta de cores, quanto mais próxima do rosa, maior é a refletividade (Fonte: Censipam).....	50

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Breve descrição sobre seis relações Z-R clássicas da literatura.	20
Tabela 2. Estações Meteorológicas de Superfície – Número de registros de precipitação categorizadas.....	30
Tabela 3. Relações Z-R utilizadas para a estimativa de precipitação pelo radar meteorológico.	34
Tabela 4. Quantitativo de Precipitação para o período de 12 horas do registrado pelas EMS do INMET do Rio Urubu, Manaus e Manacapuru e das sete relações Z-Rs.....	41
Tabela 5. Quantitativo de Precipitação para o período de 12 horas do registrado pelas EMS do INMET do Rio Urubu, Manaus e Manacapuru e das sete relações Z-Rs.....	45
Tabela 6. Quantitativo de Precipitação para o período de 12 horas do registrado pelas EMS do INMET do Rio Urubu, Manaus e Manacapuru e das sete relações Z-Rs.....	47
Tabela 7. Quantitativo de Precipitação para o período de 12 horas do registrado pelas EMS do INMET do Rio Urubu, Manaus e Manacapuru e das sete relações Z-Rs.....	51

LISTA DE SIGLAS

EMS – Estações Meteorológicas de Superfície;

RM – radar meteorológico;

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia;

FAB – Força Aérea Brasileira.

NCN – Núcleos de Condensação de Nuvens.

CENSIPAM – Centro Gestor e Operacional do Sistema de Proteção da Amazônia.

PPI –Plan Position Indicator.

ZR1– Relação mista Tokay e Short (1996)[315 R1.2].

ZR2– Relação mista Calheiros e Zawadzki (1987) [650 R1.36].

ZR3– Relação estratiforme Tokay e Short (1996) [367 R1.3].

ZR4– Relação estratiforme Marshal Palmer(1948) [200 R1.6].

ZR5– Relação convectiva Tokay e Short (1996) [139 R 1,43].

ZR6– Relação convectiva Steiner e Houze (1995)[50R1.5].

ZR7– Relação caracterizada neste trabalho

LISTA DE SÍMBOLOS

e_s – Pressão de vapor de equilíbrio;

2σ – Tensão superficial da água;

T – Temperatura;

r – Tamanho da gotícula;

ρ_L – Densidade da gotícula líquida;

R_v – Raio da gotícula de vapor;

Z – Refletividade do radar;

a e b são constantes
estimadas.

R – Precipitação;

P_r - potência recebida

P_t - a potência transmitida

λ - o comprimento de onda de operação do radar

r - a distância entre o alvo e o radar

σ - a seção transversal de um espalhador isotrópico

G – Ganho da antena do Radar

1. INTRODUÇÃO

Historicamente, a Amazônia chama a atenção do mundo por sua exuberante beleza, riquezas naturais, sua rica biodiversidade e seus diferentes e, ainda pouco explorados, fenômenos meteorológicos. Assim como seu importante papel nos efeitos sobre o clima em diferentes escalas, se tornando objeto de pesquisas e interesses mundiais.

O clima é caracterizado por diversos elementos a serem estudados, dentre eles, a precipitação destaca-se como uma das mais importantes a ser analisada na região tropical, pois, ela induz as características e o comportamento de outros elementos como a temperatura, a umidade relativa e os ventos.

Molion et al. (1987) mostraram que na Amazônia o regime de precipitação é modulado por diversos sistemas meteorológicos que abrangem desde a microescala até a escala global e que podem ser agrupados em 3 diferentes tipos: a) convecção diurna, resultante do aquecimento da superfície e condições de larga escala favoráveis; b) linhas de instabilidades, originadas na costa N-NE do litoral do Atlântico e; c) aglomerados convectivos de meso e larga escala, associados com penetrações de sistemas frontais na região S/SE do Brasil, os quais interagem com a região Amazônica, e interações com a zona de convergência intertropical e eventos climáticos como El Niño e La Niña.

Esta região apresenta grande variabilidade temporal e espacial quanto ao ciclo da precipitação, devido a sua extensa área (Marengo, 1992; Ribeiro et al., 1996; Molion, 1987). A média anual da precipitação é em torno de 2000 mm, podendo chegar a volumes superiores a 3000 mm no oeste, noroeste e litoral norte da Amazônia (Figueroa e Nobre, 1990).

As informações de precipitação por meio de estações meteorológicas de superfície são escassas, ora por falta de recursos, ora por decorrência da extensa área de floresta, com regiões de difícil acesso. Por isso, outras formas de registro da precipitação são de fundamental importância, já que o conhecimento desta permite determinar o ciclo hidrológico da região como o monitoramento de cheias de rios e igarapés. Produtos de estimativas de precipitação por meio de satélites meteorológicos vêm sendo desenvolvidos para o mundo todo, principalmente para a região Amazônica (Nóbrega et al, 2008), porém estas estimativas esbarram nas questões de resolução, tanto espacial como temporal. No entanto, como solução para

complemento e validação destes produtos, estimativas de precipitação podem ser derivadas dos radares meteorológicos do CENSIPAM (Centro Gestor e Operacional do Sistema de Proteção da Amazônia), que apresentam uma boa cobertura de radares meteorológicos banda-S sobre a região Amazônica, assim como elevadas resoluções temporal e espacial.

No entanto, a estimativa de precipitação a partir de informações do radar meteorológico exige uma pesquisa detalhada, principalmente para o tipo de chuva de cada região (Calheiros Zawadzki, 1987; Steiner e Houze, 1993). Precipitações do tipo estratiforme apresentam características distintas da precipitação do tipo convectiva e exigem uma relação apropriada. Neste sentido, o presente projeto busca estudar diferentes relações Z-R para aplicação na área de cobertura do radar meteorológico de Manaus.

Portanto, o objetivo do trabalho é caracterizar uma relação Z-R para a região central da Amazônia Legal, assim como avaliar diferentes relações existentes para a região de estudo. Para que o objetivo principal seja alcançado, torna-se necessário atingir os objetivos específicos que são:

- Caracterizar uma relação Z-R a partir de dados do radar de Manaus e Estações meteorológicas de superfície (EMS)
- Avaliar o desempenho de diferentes relações Z-R da literatura para a região de estudo através de eventos de chuva na área do RM;

2. REVISÃO LITERÁRIA

O Radar (*Radio Detection and Ranging*) tem por essência a detecção de objetos através dos ecos das ondas eletromagnéticas, sendo possível determinar a direção, alcance e, em algumas vezes identificar as suas características (Morales, 2004). O radar opera com ondas eletromagnéticas na faixa de frequência das micro-ondas, que variam entre 1 m a 1 mm. Na meteorologia são conhecidos como radares meteorológicos e apresentam papel importante para o monitoramento da atmosfera, já que permitem a detecção de hidrometeoros, a formação e desenvolvimento de sistemas precipitantes. Para a meteorologia, os hidrometeoros de interesse são as gotículas de nuvem, gotas de chuva, cristais de gelo, graupel e granizo.

Os radares podem ser do tipo Doppler, quando permitem identificar o deslocamento dos sistemas meteorológicos e de dupla polarização, quando permitem identificar as características dos hidrometeoros. Os mesmos se diferenciam também pelo comprimento de onda, sendo que comprimentos de onda menores (maiores) como o caso do Banda K ou 3 cm (Banda S ou 10 cm), são destinados aos estudos de microfísica (acompanhamento de sistemas precipitantes com chuva intensa, como o caso da região tropical).

Os radares meteorológicos possibilitam inúmeras informações sobre as condições atmosféricas, sendo que o maior diferencial é a elevada resolução, tanto espacial como temporal. Estas informações auxiliam os meteorologistas no rastreamento e detecção de tempestades severas, vendavais, chuvas de granizo, cisalhamento, turbulência e identificação da estrutura tridimensional da tempestade. Adicionalmente, o radar permite estimar a precipitação a partir das relações Z-R (onde, Z é a refletividade do Radar e R é a taxa de precipitação), identificada inicialmente por Marshall-Palmer (1948). A estimativa de precipitação por radares meteorológicos apresenta grande importância, já que permite a substituição de uma rede de estações meteorológicas de superfície além de aplicações para a hidrologia. No entanto, as estimativas são influenciadas por processos físicos dentro da nuvem e a problemas operacionais dos radares meteorológicos, podendo eventualmente ocasionar diferenças significativas nos quantitativos de precipitação.

2.1 Radar

Como descrito anteriormente, o radar tem por essência a detecção de objetos

através dos ecos da radiação eletromagnética, e a partir daí tem a possibilidade de determinar a velocidade, direção e até mesmo suas características. Na meteorologia, o radar é o único instrumento até o momento capaz de prover informações complexas sobre as dimensões horizontal e vertical da chuva. Quando utilizado em conjunto com um experimento de medição de taxa de precipitação, permite o levantamento adequado do comportamento local da chuva (Esa, 1994). Existem diferentes tipos de radares e eles podem ser classificados como primário e secundário.

Os radares primários transmitem sinais de alta frequência que são refletidos pelos alvos. E os ecos de retorno são recebidos e analisados. Dentro dessa classificação, o radar primário pode ser do tipo *pulsado*, que é o mais comum, onde uma antena transmite e recebe sinal de alta frequência. O radar transmite pulsos curtos de radiação eletromagnética (EM) e espera por um eco de retorno. E sua posição é determinada pelo tempo de resposta e posição da antena. Como exemplos de radares pulsados tem-se os radares meteorológicos convencionais, os radares do tipo Doppler, e os radares de multi-polarização. Outro tipo de radares primários são os contínuos, que transmitem sinais continuamente, sendo que o sinal de retorno (eco) é recebido e processado. Nesse tipo de radar, o receptor não precisa estar junto ao transmissor. Os radares contínuos podem ser modulados, quando a transmissão do sinal tem amplitude e frequência constante (bastante utilizados para medir a velocidade, como por exemplo, radares de polícia), ou não modulados, quando a transmissão do sinal tem amplitude constante, mas não tem frequência. Já os radares secundários enviam sinais codificados sobre os alvos e recebem informações de retorno. Esse tipo de radar é muito usado em aviões onde o mesmo possui um transponder a bordo que recebe um sinal codificado e ao ser ativado envia de volta diversas informações como altitude, localização, entre outras informações.

Os radares meteorológicos consistem basicamente de um transmissor, antena, receptor e chave T/R (Figura 1). O transmissor é a fonte de radiação EM (Energia Eletromagnética) irradiada pelo radar que gera sinais de alta frequência que saem pela antena. Existem três tipos de transmissores que são usados nos radares meteorológicos, sendo o Magnetron, o Klystron (Muito usado em radares do tipo Doppler) e o de Estado Sólido. Dentro do transmissor existem moduladores que ligam e desligam o transmissor, possibilitando a correção da forma de onda transmitida. Este mecanismo também controla quando o sinal será transmitido e quanto tempo durará a transmissão. A taxa com que o radar transmite é conhecida como PRF (*Pulso*

Repetition Frequency) e é medida em pulsos por segundo ou Hertz (Hz), os valores mais comuns variam de 200 a 3000 Hz. Outro componente do radar meteorológico é a antena, que é o instrumento que detecta o sinal do radar. A maioria das antenas são direcionais, o que permite que elas possam concentrar a energia em uma determinada direção. O tamanho da antena e a frequência de operação do radar determinam o volume a ser iluminado. Também há o receptor que é o sistema configurado para detectar o sinal recebido e amplificar os sinais fracos recebidos pela antena. A maioria dos radares misturam o sinal recebido com um sinal de referência conhecido, que tem uma frequência diferente da transmitida. Esta mistura converte o sinal para frequências mais baixas (30 a 60 MHz) as quais são mais fáceis de trabalhar. Por fim, há a chave T/R que alterna a energia entre transmissão.

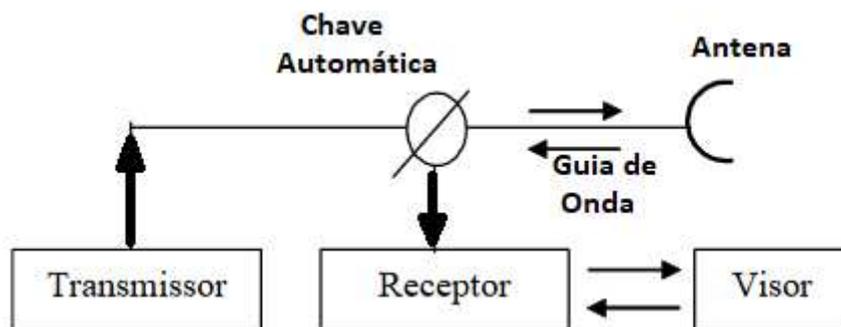


Figura 1. Esquema do funcionamento do radar

Dentre os modos de visualização do radar tem-se o PPI (*Plan Position Indicator*), o RHI (*Range Height Indicator*) e o CAPPI (*Constant Altitude Plan Position Indicator*), conforme ilustrado na Figura 2. O primeiro modo de visualização apresenta uma varredura azimutal em um ângulo de elevação fixo, enquanto na segunda, a varredura é vertical para um ângulo azimutal fixo, muito usada quando se quer inspecionar a estrutura vertical de uma tempestade. Este produto apresenta o sinal recebido em função da distância e elevação (altura). Na terceira tem-se a projeção do sinal recebido a uma altura constante, essa forma de visualização é muito utilizada, pois como o PPI é um indicador do sinal para uma determinada elevação, as vezes é mais conveniente representar este sinal a uma altura constante, em relação à superfície da terra, uma vez que existe o efeito de curvatura e do ângulo de elevação.

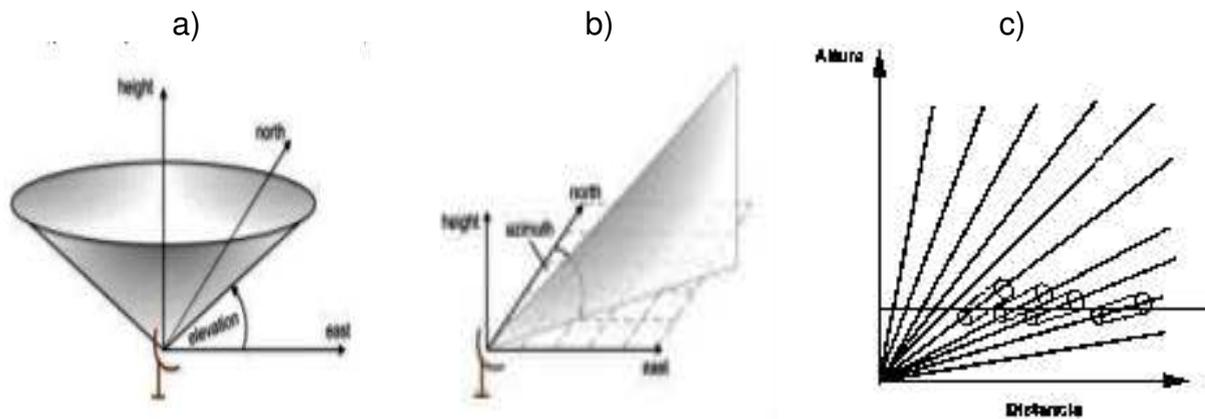


Figura 2. Formas de visualização dos dados de radar. a) PPI b) RHI e c) CAPPI.

O radar possui uma equação que compreende os conceitos envolvidos no seu funcionamento para interpretar a energia recebida de retorno. Para que fosse matematicamente possível (mas acessível), na equação foram estabelecidas algumas hipóteses. Primeiro que o transmissor (antena) irradiasse EM de forma isotrópica (todas as direções), segundo que a energia EM que retornasse ao radar fosse proveniente de partículas esféricas de água ou gelo, e terceiro que a energia EM fosse espalhada em todas as direções igualmente. Desta forma, a equação do Radar para um alvo puntiforme de seção de retroespalhamento σ , localizado no centro do feixe principal da antena, a uma distância r , pode ser dada por:

$$P_r = \frac{P_t G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 r^4} \quad (\text{Eq.1})$$

Onde P_r é a potência recebida, P_t é a potência transmitida, λ é o comprimento de onda de operação do radar, a área do alvo, G é o ganho da antena, r é a distância entre o alvo e o radar e, por fim, σ é a seção transversal de um espalhador isotrópico, que retornaria a mesma potência para o radar como o alvo atual, ou seja, é a área do alvo que se refere ao tamanho com que o radar “vê” o alvo.

2.2 Estimativa de precipitação por radar meteorológico

Através do radar meteorológico é possível quantificar a precipitação de forma quase contínua, tanto no tempo (por exemplo, a cada 12 minutos para os radares do CENSIPAM) quanto no espaço (por exemplo, a cada 500 metros) (Pessoa, 2000). No processo de estimativa de chuva por radar, a partir do espectro de gotas em sistemas de precipitação, tem-se adotado uma relação empírica entre o fator de refletividade do

radar (Z) e a intensidade (ou taxa) de precipitação (R). Esta relação é expressa pela Equação 1:

$$Z = aR^b \quad (\text{Eq. 2})$$

Onde, Z é a refletividade (mm^6/m^3), R é a taxa de precipitação (mm/h) e a e b são constantes estimadas.

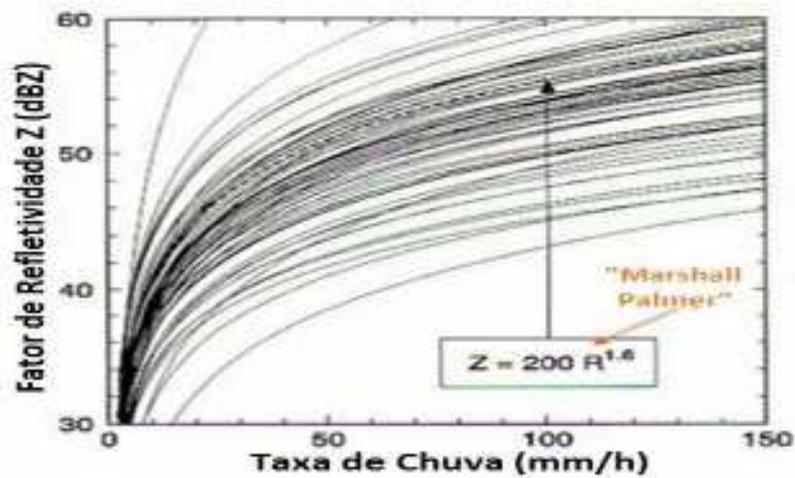


Figura 3. Relação entre o Z (fator refletividade) e R (taxa de precipitação) para 69 relações Z-R. (Adaptado de Battan, 1973). Em destaque de laranja está a relação Z-R de Marshall e Palmer, 1948, uma das mais utilizadas.

A relação Z-R mais conhecida e utilizada foi identificada por Marshall e Palmer (1948) e é utilizada para chuva estratiforme. Existem diferentes relações Z-R experimentais na literatura, com uma variabilidade nos coeficientes *a* e *b*, pois os mesmos dependem da origem e tipo das precipitações, da distribuição das gotas de chuva e seu tamanho, localização geográfica e condições meteorológicas, sendo que para processo convectivo (estratiforme) mais intenso, o valor de *a* aumenta (diminui) e o valor de *b* diminui (aumenta) (Emídio, 2009).

De acordo com a Figura 3, verificam-se 69 relações Z-R apresentadas por Battan (1973) indicando a infinidade de relações existentes até o ano de 1973. As relações Z-R são baseadas em uma relação de potências, logo qualquer processo que adicione incertezas ou erros na estimativa da refletividade certamente irá afetar a inferência da taxa de precipitação. Os problemas mais comuns que podem afetar nas medidas de potência do radar, ou seja, no sinal de retorno, são as precipitações mistas (líquida + gelo), a distribuição de gotas dentro da nuvem, os erros provenientes

por ausência ou falha de calibração e os erros causados pelos ecos de terreno e/ou ecos de retorno. A estimativa de precipitação pelo radar meteorológico é repleta de incertezas; existem inúmeros trabalhos na literatura científica que tratam deste problema (Dinku et al, 2002; Anagnostou et al, 1999; Zawadzki, 1988) e em todos os autores comentam os fatores de incertezas relacionados às questões físicas da nuvem/precipitação e do radar meteorológico, além de listarem alternativas a serem adotadas na busca por uma melhora desta precisão. Os fatores físicos da nuvem e do radar que afetam nas estimativas de precipitação serão explicados nas próximas seções.

Posteriormente, serão avaliadas relações Z-R na área de Manaus, que foram elaboradas para outras regiões. Portanto, para melhor compreensão dos resultados que serão apresentados neste trabalho, o Tabela 1 apresenta uma breve descrição do desenvolvimento das seis relações Z-R utilizadas neste trabalho. Para esta pesquisa as relações foram classificadas de acordo com o tipo de precipitação associada e para regiões com características similares. De modo geral, espera-se que as relações de Tokay e Short (1996) e Steiner e Houze (1995) sejam as mais adequadas para a região, já que foram elaboradas para região tropical. No entanto, não descarta-se a possibilidade de acurácia das demais relações, popularmente conhecidas no âmbito de relações Z-R.

Tabela 1. Breve descrição sobre seis relações Z-R clássicas da literatura.

Autores	Relações Z-R	Tipo	Breve descrição
Marshall e Palmer (1948)	$Z = 200R^{1,6}$	Estratiforme	A partir de um estudo empírico dos tamanhos de gota de chuva, utilizando distribuição de frequência das gotas de chuva em uma nuvem e que a mesma pode ser usada para relacionar o que é registrado em RM com o que é obtido por EMS. A conhecida, relação Z-R. Nesse trabalho esta relação foi desenvolvida para região do Canadá, em latitudes médias.
Tokay e Short (1996)	$Z = 367R^{1,3}$	Estratiforme	Apresenta uma análise das variações temporais nos parâmetros gama dos espectros de gotas de chuva, utilizando observações baseadas na superfície da atmosfera global do oceano tropical. Uma mudança significativa observada no parâmetro N (numero de gotas), que ocorre durante eventos de chuva com pouca mudança na taxa de chuva, sugere uma transição de chuva de origem convectiva para chuva proveniente da porção estratiforme de sistemas tropicais. A região tropical de estudo foi em Kapingamarangi atoll localizada no pacífico equatorial oeste. Nesse trabalho, Tokay e Short apresentaram em seus resultados essa relação Z-R para chuvas do tipo estratiforme.
Calheiros e Zawadzki (1987)	$Z = 650R^{1,36}$	Mista	Neste trabalho foi apresentado um método para se obter um relações Z-R através da comparação, em probabilidade, de medidas não simultâneas de Z e R. As relações obtidas dessa maneira foram fornecidas para um radar situado na cidade de Bauru - SP com dados da estação da cidade de Ibitinga -SP . O método foi testado comparando hidrogramas de rios reais de várias bacias com os simulados usando dados de radar como entrada para um modelo hidrológico.
Tokay e Short (1996)	$Z = 315R^{1,2}$	Mista	Apresenta uma análise das variações temporais nos parâmetros gama dos espectros de gotas de chuva, utilizando observações baseadas na superfície da atmosfera global do oceano tropical. Uma mudança significativa observada no parâmetro N (numero de gotas), que ocorre durante eventos de chuva com pouca mudança na taxa de chuva, sugere uma transição de chuva de origem convectiva para chuva proveniente da porção estratiforme de sistemas tropicais. A região tropical de estudo foi em Kapingamarangi atoll localizada no pacífico equatorial oeste. Nesse trabalho, Tokay e Short apresentaram em seus resultados essa relação Z-R para chuvas do tipo mista.
Steiner e Houze (1995)	$Z = 50R^{1,5}$	Convectivo	Utilizou uma metodologia para processar dados transmitidos de um radar operacional localizado em Berimah -Austrália, e dados de chuva para obter informações climatológicas onde classificou a chuva como sendo de dois tipos distintos, convectivas e estratiformes, de acordo com a estrutura de refletividade do radar e dessa forma estabelecer relações Z-R para ambos os tipos para a cidade de Darwin- Austrália.
Tokay e Short (1996)	$Z = 139R^{1,43}$	Convectivo	utiliza observações baseadas na superfície da atmosfera global do oceano tropical. Uma mudança significativa observada no parâmetro N (numero de gotas), que ocorre durante eventos de chuva com pouca mudança na taxa de chuva, sugere uma transição de chuva de origem convectiva para chuva proveniente da porção estratiforme de sistemas tropicais. A região tropical de estudo foi em Kapingamarangi atoll I. Nesse trabalho, Tokay e Short apresentaram em seus resultados essa relação Z-R para chuvas do tipo convectiva.

2.2.1 Processos físicos dentro da nuvem

As moléculas de água podem ser encontradas na atmosfera nos três estados físicos (líquido, sólido e vapor) e se mantem constantemente em movimento, em decorrência da evaporação ou condensação.

O processo de evaporação favorece o deslocamento das moléculas de água, de modo que as mesmas passam do estado líquido para o estado gasoso. Já no processo de condensação, as moléculas tendem a aglutinarem-se, passando do estado gasoso para o estado líquido. O processo de deslocamento de moléculas depende da pressão de vapor de saturação (e_s), temperatura e estado da água, assim como da pureza da interface da qual está aderida. A temperatura da água determina o grau de excitação das moléculas e o quanto estas escapam das gotículas de água, basicamente por meio da evaporação. Em gotículas de água a e_s é maior do que sobre as partículas de gelo, principalmente em temperaturas entre -5 a -25°C , desta forma, as gotículas de água sofrem uma resistência menor do que as partículas de gelo e acabam escapando mais facilmente (Barry, 2013).

Assim como no caso da temperatura, o tamanho das gotas influencia na evaporação e na capacidade das mesmas em se aderirem, de modo que gotículas maiores apresentam maior tensão intra-molecular na superfície tendendo a serem mais planas, facilitando a adesão entre as gotas de água. Adicionalmente, o grau de pureza influencia como um meio facilitador para a aglutinação das gotas, ou seja, partículas de sal e poeira tendem a preencher os espaços entre as gotas de água de modo a diminuir as regiões mais expostas, evitando o processo de evaporação e facilitando o processo de condensação em locais com baixas umidades. Estas partículas são também conhecidas como NCN (Núcleos de Condensação de Nuvens). Os NCNs apresentam papel importantíssimo na formação e crescimento de gotas de nuvem e chuva e, na região Amazônica, concentram-se no sul da região, próximo a regiões de maior desmatamento.

a. *Estruturas de nuvens quentes*

As nuvens quentes são aquelas que não possuem gelo em sua constituição, ou seja, não ultrapassam a isoterma de 0°C . São formadas por processos de condensação, colisão e coalescência. Inicialmente as pequenas gotículas de água são formadas na presença dos NCN's com elevados valores de saturação e crescem a partir de condensação de vapor d'água. Neste processo, a condensação de uma única

gota depende da relação entre supersaturação, temperatura, soluto e o raio de curvatura da gotícula de água. Já o crescimento de uma família de gotículas de água dependerá do consumo de vapor d'água da nuvem em desenvolvimento, sendo que este será determinante para os processos de supersaturação na nuvem. Assim, as gotículas de água ativadas começam a evaporação e as não ativadas (que não atingiram o raio crítico) continuam a crescer por condensação. O raio crítico é definido como o tamanho do raio de uma gotícula onde a função de crescimento (Equação de Kelvin – Equação 2) deixa de seguir o efeito do soluto e passa a ser determinada pelo efeito de curvatura, ou seja, após alcançar o raio crítico a gotícula está livre para crescer, mesmo em ambientes abaixo da supersaturação. Portanto, quanto maior o raio da gotícula menor será sua taxa de crescimento da gotícula de modo que, o tamanho das gotículas na nuvem tenda para a uniformidade no do tempo, já que as gotículas menores crescem mais rápido que as maiores.

$$e_s(r) = e_s(\infty) \exp \left\{ \frac{2\sigma}{rR_v\rho_L T} \right\} \quad (\text{Eq. 3})$$

Onde,

e_s = Pressão de vapor de equilíbrio

2σ = Tensão superficial da água

T = Temperatura

r = Tamanho da gotícula

ρ_L = Densidade da gotícula líquida

R_v = Raio da gotícula de vapor

Após esgotar o vapor d'água dentro da nuvem, inicia-se os processos de colisão e coalescência, nesse estágio as gotículas maiores ($r > 14 \mu\text{m}$) já possuem massa para superar a turbulência do ar e adquirir velocidade terminal (Força peso = Força arrasto da partícula), de modo que gotículas de diferentes diâmetros se movem no interior da nuvem com diferentes velocidades, possibilitando colisões entre elas e formam as gotas de chuva. Porém nem sempre a colisão de duas gotículas resulta na sua coalescência (fusão), isto porque o processo de colisão entre gotículas ocorre principalmente por efeitos gravitacionais, de modo que, quanto maior a diferença de velocidade entre as gotas (maior e menor), maior as chances de ocorrerem colisões. A eficiência da colisão é maior quando a gota coletora é maior que a gota coletada, no

entanto quando a diferença de tamanho entre as duas é muito grande, a eficiência tende a diminuir, já que a gota coletada tende a ser refletida (Wallace e Hobbs, 2006).

b. Estruturas de nuvens frias

Quando as nuvens ultrapassam a isoterma de 0°C pode-se considerá-la como nuvem fria. Em temperaturas abaixo de 0°C, a pressão de vapor atmosférica diminui mais rapidamente sobre uma superfície de gelo do que sobre a água. A pressão de vapor saturante sobre a água se torna maior do que sobre o gelo. Se cristais de gelo e gotículas de água super-resfriadas ocorrem simultaneamente em uma nuvem, as gotas tendem a evaporar, havendo deposição direta de vapor sobre os cristais de gelo.

Na primeira etapa de formação de gelo, a difusão de vapor, pode ocorrer por nucleação homogênea ou heterogênea. A primeira ocorre em casos extremos de supersaturação sobre o gelo mais elevada do que as observadas nas nuvens frias. Para que ocorra nucleação em gotas super-resfriadas, é necessária a criação de embriões de gelo no interior da gota líquida. Experimentos em laboratório mostram que abaixo de - 41 °C todas as gotículas super-resfriadas maiores do que 1µm se congelam homogeneamente, formando partículas de gelo. Gotas maiores se congelam em temperaturas mais quentes .

No caso de nucleação heterogênea, torna-se fundamental a presença dos núcleos de condensação de gelo e os processos de deposição de vapor e/ou congelamento por condensação e contato iniciam com temperaturas menores dos - 5°C. A partir dos processos de nucleação, os cristais de gelo se formam e podem possuir diversos formatos que dependem da composição dos núcleos de condensação de gelo, do tempo de permanência da corrente ascendente e da temperatura.

O processo de acreção e agregação, onde há crescimento de cristais de gelo por deposição de vapor, assemelha-se ao processo de colisão, para o caso de crescimento de gotícula de água. Para acreção e agregação, as gotículas de água super-resfriadas se aderem aos cristais de gelo durante a colisão. O congelamento instantâneo dá origem ao graupel e, se o congelamento não for instantâneo, estruturas mais densas são formadas, conhecidas como granizo. No processo de agregação, os cristais de gelo se chocam e acabam aderindo-se um ao outro, formando os flocos de neve.

2.2.2. Diferenças entre chuvas convectiva e estratiforme

Outro problema que requer atenção redobrada para a estimativa de precipitação é o tipo de precipitação que está ocorrendo. Segundo Houze, (1993) podem existir dois tipos de precipitação dentro de uma nuvem, conhecidos como estratiforme e convectivo (Figura 4). As chuvas estratiformes estão associadas a nuvens do tipo *stratus*, *stratocumulus* ou *nimbostratus*, enquanto que as chuvas convectivas a *cumulus* e *cumulonimbus*. Basicamente, as diferenças entre os tipos de precipitação estão associadas a diferenças nas magnitudes dos movimentos verticais.

As nuvens com chuvas estratiformes (do latim *stratum*, que significa camada ou folha) são uniformes e cobrem grandes áreas com espessura de aproximadamente 1 km (Figura 4a). A formação se dá quando a elevação do ar é lenta e em grandes áreas (ascensão do ar) e as taxas de condensação são regulares e com gotículas pequenas.

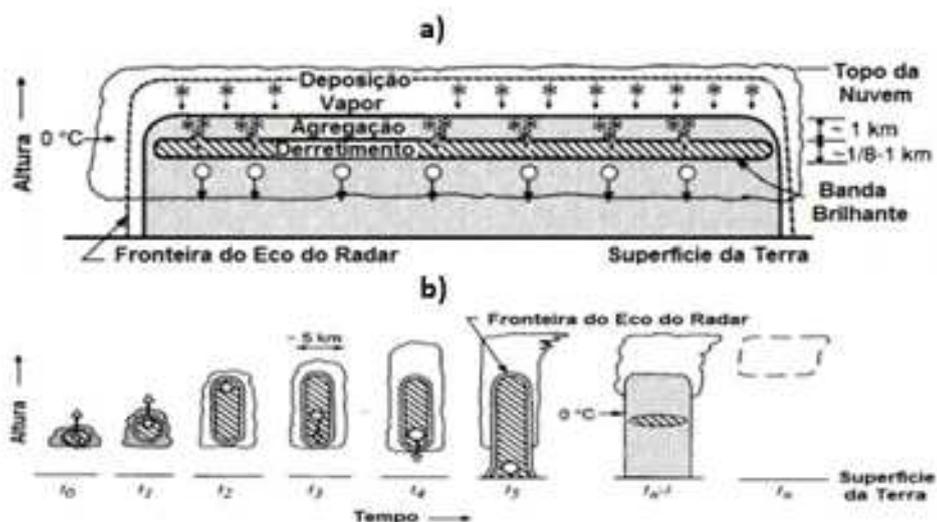


Figura 4. a) Características da precipitação estratiforme. b) Características da precipitação convectiva. Regiões hachuradas mostram fortes picos de refletividade de radar meteorológico. Na nuvem (b) é mostrado sucessivos tempos t_0, \dots, t_n do crescimento de partículas de precipitação que são levadas ao topo da nuvem por fortes correntes ascendentes (t_2) e após determinado tempo caem até a superfície da terra (t_5). Após o t_5 a nuvem pode morrer ou continuar por um tempo considerado antes de sua dissipação. O limite tracejado mostra a nuvem evaporando (Adaptado por Saraiva 2016 de Houze, 1981).

No caso das chuvas convectivas ou culmuliformes (*cumulus*, do latim, massa), as mesmas possuem formas definidas e apresentam alguns quilômetros de altura (Figura 4b). Nas nuvens convectivas a elevação do ar é rápida e localizada, favorecida por processos de convecção. Já as gotículas e gotas de chuva formam-se próximo à base da nuvem e crescem a partir de sucessivas subidas até as partes

superiores da nuvem, levadas por fortes correntes ascendentes. As mesmas chegam ao solo após adquirirem massa suficiente para superar as correntes ascendentes. Este tipo de nuvens está associada à instabilidade atmosférica, ou seja, quanto maior for a instabilidade tanto mais vigorosas e altas serão essas nuvens (Barry, 2013).

2.2.3. Interferências por ecos de terreno

Segundo Sugier et al. (2002) as maiores fontes de erros nas medidas de chuvas podem ser atribuídas aos ecos de terreno indefinidos. Define-se eco de terreno (em inglês, *ground clutter*) como o eco de retorno do radar de “não chuva”, ou seja, a potência recebida pelo sistema de radar após parte da radiação emitida ser refletida de volta por obstáculos como construções, antenas e o próprio terreno em torno da antena do radar, conforme verifica-se na Figura 5 (Domenikiotis et al, 2010; Archibald, 2000; Greco e Watts, 2014).

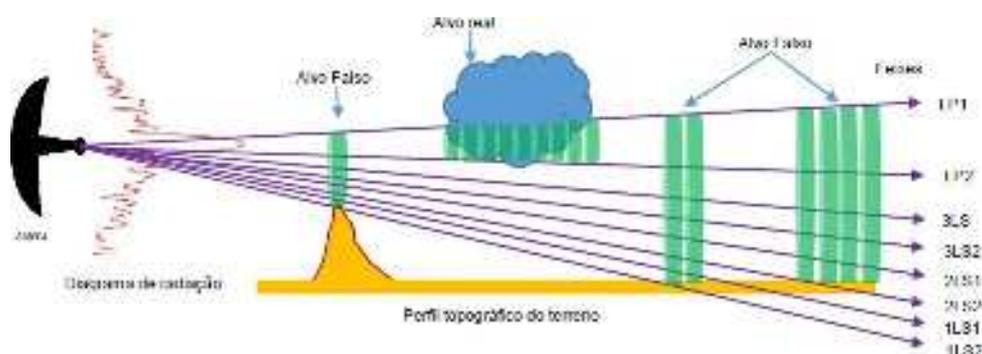


Figura 5. Representação da energia retornada ao radar em decorrência de ecos de terreno e chuva. Em roxo temos os feixes de energia emitido pelo radar. Em verde a simulação dos ecos de retorno. Em amarelo a topografia. (Adaptado de Souza, 2015).

Os ecos de terreno podem ocorrer quando a energia transmitida incide sobre o terreno tanto pelo feixe principal como pelo secundário. Segundo Billingsley (2002) os ecos de terreno normalmente estão limitados à cerca de 48 km de distância da antena de um radar. Além disso, esses ecos são geralmente evidentes nas elevações mais baixas da antena de radar. Para o radar meteorológico, o eco de terreno é considerado como chuva, já que o mesmo não consegue diferenciar se o eco de retorno é um alvo hidrometeorológico ou não. Os ecos de terreno indesejados podem limitar severamente a detecção de um alvo desejável (Long e Zehner, 1970). Uma maneira usada para classificar e caracterizar os ecos de terreno é através da

utilização de estatísticas de amplitude que são tipicamente relatadas como distribuições de Rayleigh, Weibull, Rice ou distribuições lognormal (Souza,2015). Doviak e Zernic (1993) caracterizaram dois tipos de ecos de terreno: estáticos e transientes. Os ecos estáticos são caracterizados por alvos permanentes no espaço e no tempo assim como montanhas, edificações, árvores, entre outros, já os alvos transientes são caracterizados pelas condições atmosféricas e não são permanentes no espaço e no tempo.

Alguns métodos são aplicados para a identificação e redução dos ecos de terreno. Uma destas soluções é a composição de varreduras com uma elevação (mais baixa) para alvos distantes, seguida de outra varredura com elevação (mais alta) para alvos próximos. Esta abordagem, apesar de plausível, pode causar erros de interpretação nos dados coletados, pois a composição dos dados terá informações em coletadas em diferentes momentos, podendo uma varredura estar deslocada vários minutos da outra (Souza, 2015). Outra possibilidade, apresentada por Rico-Ramrez e Cluckie (2008) e Bachmann (2008), é a utilização de filtros para retirar a contaminação após a coleta das informações. Mas esta solução está longe de ser definitiva, pois os sinais provenientes dos ecos de terreno são mais intensos que os meteorológicos, mascarando qualquer sinal meteorológico na mesma região, assim sendo toda informação meteorológica que ocorre na região em que os ecos de terreno estiverem presentes é perdida na aplicação do filtro.

Face a diversidade de soluções para mitigação da contaminação dos ecos de terreno, como tratado em Domenikiotis et al (2010), é de consenso entre profissionais da área que o problema seja tratado desde antes da implantação de um sistema de radar, pois a escolha de um local adequado pode resolver vários problemas de contaminação nos dados. De acordo com Saraiva et al (2016), o radar meteorológico de Manaus não apresenta interferências provenientes de contaminações do solo.

2.2.4. Interferências por falta de calibrações adequadas

Outra importante fonte de erros e que pode conduzir a falhas na estimativa de precipitação a partir do radar meteorológico é a falta de constantes calibrações. Ou seja, ao longo do tempo a válvula de energia do radar meteorológico apresenta desgastes e variações na quantidade de energia transmitida, no entanto, estes “novos” valores de energia não são ajustados na equação do radar, ocasionando em valores discrepantes do real. De acordo com Anagnostou et al (1999), calibrações

adequadas são capazes de corrigir erros provenientes de componentes eletrônicos do sensor, ganho ou perda da antena, alterações causadas por radomes, bem como a potência da válvula.

Os radares do CENSIPAM operam em conjunto com a Força Aérea Brasileira (FAB), sendo que o serviço de transmissão dos dados fica a cargo do CENSIPAM e a manutenção a cargo da FAB. Neste sentido, procedimentos de calibração eletrônica são realizados pela FAB em intervalos de tempo pré-estabelecidos (1 ano) pelo plano de manutenção corretiva.

Recentemente, Saraiva et al (2016) realizaram a calibração dos 11 radares do CENSIPAM a partir do método desenvolvido por Anagnostou et al (2001), que se baseia na interpolação de observações coincidentes do radar de superfície (no caso o radar do CENSIPAM) e o radar a bordo do satélite TRMM, a fim de proporcionar histogramas de refletividade entre as duas amostras e verificar as diferenças entre estas, de modo que diferenças para cada radar meteorológico da rede do CENSIPAM foram determinadas, possibilitando a utilização destes resultados para estudos futuros.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Para a realização desta pesquisa foram utilizados dois conjuntos de dados, os provenientes do Radar Meteorológico (RM) e de Estações Meteorológicas de Superfície (EMS). O RM utilizado foi o de Manaus (Figura 6), que faz parte da rede de radares meteorológicos do CENSIPAM e está localizado no Aeroporto de Ponta Pelada ($3^{\circ}15'S$ e $59^{\circ}98'W$ – altura da antena = 102,4 metros). Este radar é do tipo Doppler banda-S e apresenta um comprimento de onda de 10 cm (frequência entre 2,7 e 3,0 GHz), diâmetro de antena de 4,2 metros, o que possibilita um feixe de abertura de aproximadamente $1,8^{\circ}$. O mesmo opera em duas estratégias de varredura, sendo que a primeira com alcance de 240 km e para fins meteorológicos, já a segunda com alcance de 400 km e para fins operacionais da Força Aérea Brasileira (FAB). A composição das duas estratégias fornece informações a cada 12 minutos, ou seja, 5 produtos por hora.

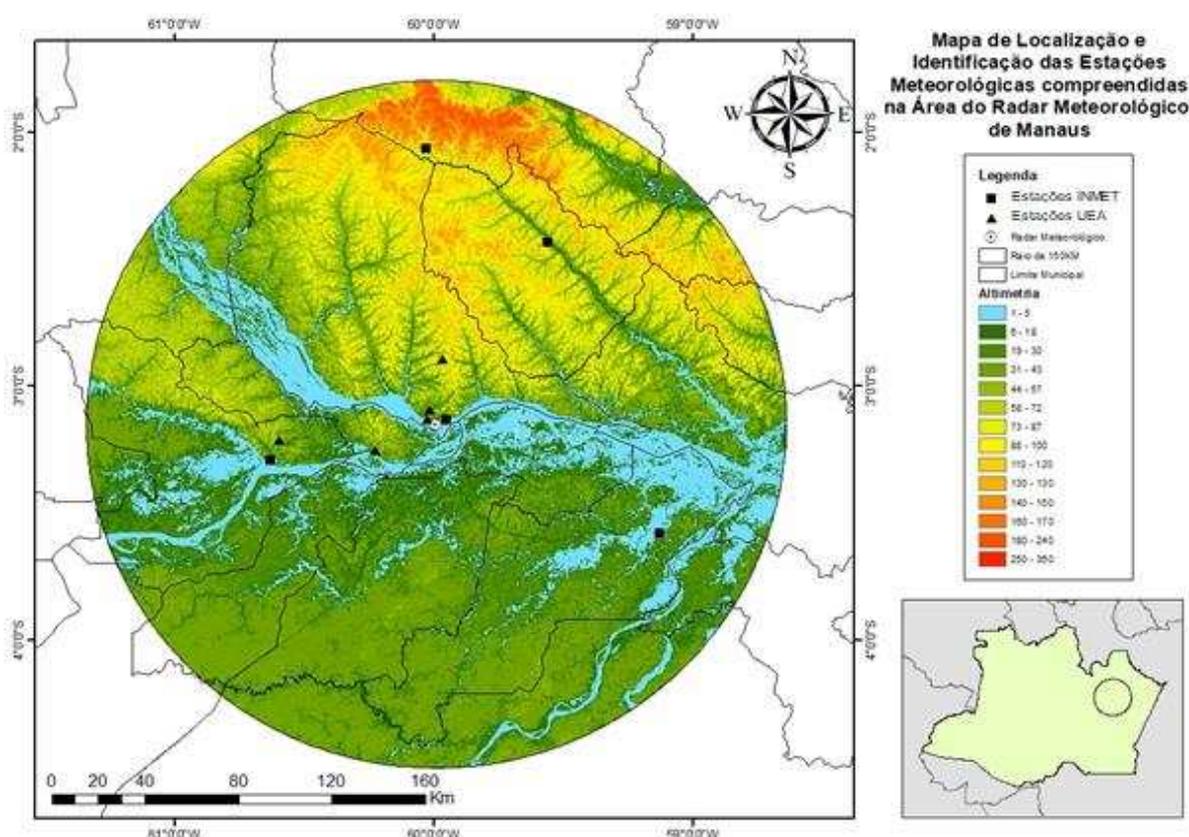


Figura 6. Localização do radar meteorológico de Manaus (bola branca) e das estações meteorológicas do INMET (quadrado) e UEA (triângulo) compreendidas na área do radar no raio de 150 km. As cores indicam a altimetria do terreno.

As informações de precipitação foram retiradas das EMS da Universidade do

Amazonas (UEA) (ajuste e controle da relação Z-R) e do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) (controle da relação Z-R). Na Figura 6 a localização das EMS da UEA encontra-se em triangulo, enquanto que as do INMET em quadrado. Dentre as EMS da UEA utilizadas estão a “EST-UEA” (-3,09 lat, -60.02 lon e distancia em linha reta do RM de ~6,6 km), “Colégio Militar” (-3,13 lat, -60.03 lon e distancia em linha reta do RM de ~4,6 km), “IFAM” (-3,08 lat, -59.93 lon e distancia em linha reta do RM de ~9,5 km), “Embrapa AM010” (-2,89 lat, -59.97 lon e distancia em linha reta do RM de ~28,2 km), “Embrapa Caldeirão” (-3,25 lat, -60.23 lon e distancia em linha reta do RM de ~29,3 km) e “GoAmazon” (-3,21 lat, -60.60 lon e distancia em linha reta do RM de ~158 km). Já as EMS do INMET utilizadas são a “Manaus” (-3,10 lat, -60.02 lon e distancia em linha reta do RM de ~ 8,0 km), “Manacapuru” (-3,29 lat, -60.63 lon e distancia em linha reta do RM de ~70 km), “Rio Urubu” (-2,63 lat, -59,60 lon e distancia em linha reta do RM de ~90 km), “Autazes” (-3,58 lat, -59.13lon e distancia em linha reta do RM de ~ 113 km) e “Presidente Figueiredo” (-2,06 lat, -60.03 lon e distancia em linha reta do RM de ~123 km).

Verifica-se que as EMS da UEA utilizadas se encontram próximas do RM, com excessão da GoAmazon, o que não é muito aconselhável para comparativos de precipitação, até 10 km de distância do radar há a presença do cone cego do radar e, também, ecos de retorno, que geram ruídos. Estes problemas serão abordados posteriormente.

O período de dados de precipitação utilizados para elaborar a relação Z-R foi de 2 anos (janeiro de 2017 a março de 2019). Como os dados apresentaram muitas falhas, o número de observações selecionáveis não ultrapassou 1009 casos (Tabela 2). Já para avaliação das relações Z-R foram selecionados 4 casos de precipitação intensa na região de cobertura do radar.

Mas salienta-se que o fato de não se fazer uso de EMS mais distantes do centro do radar, pode comprometer os resultados visto que em pequenas distancias entre o alvo e o radar pode ocorrer à presença de contaminações devido a perdas de sinal ou retro espalhamento do solo, intensificados quando a refletividade é convertida para taxa de precipitação (Saraiva, 2008).

3.1. Procedimentos metodológicos

Para a estimativa de precipitação por meio do RM, torna-se necessário seguir etapas importantes e que podem fazer diferença para as estimativas de precipitação, assim como descrito anteriormente no Capítulo 2, Fundamentação Teórica, mas que serão descritos abaixo:

a. Seleção da precipitação observada

Para a construção da relação Z-R foram utilizadas informações de precipitação registradas das EMS da UEA. A partir da Tabela 2 é possível observar o número de registros de precipitação categorizada por intervalos (acima dos 2 mm) e regimes de precipitação (chuvoso, transição, seco). Para a classificação dos regimes de precipitação foi utilizado os resultados de Rao e Hada (1990), que definiram os meses fevereiro-março-abril como período chuvoso, os meses maio e junho como período de transição entre chuvoso e seco, os meses julho-agosto-setembro como período seco e os meses outubro a janeiro como período de transição seco-chuvoso.

Nota-se que os registros com precipitação superior a 20 mm concentram-se na EMS, sob o regime seco-chuvoso. Esses meses são representativos do segundo período mais chuvoso na região, conforme classificação de Rao e Hada (1990). Já para as EMS, sob o regime chuvoso verifica-se que apesar de não terem sido registrados casos de precipitação acima de 20 mm os mesmos apresentaram vários registros de chuva em quase todas as estações no intervalo de 2 a 20 mm. Para os regimes de chuva-seco e seco, obtiveram-se os menores números de registros de chuva, o que já era de se esperar, com base no regime de precipitação da região.

Tabela 2. Estações Meteorológicas de Superfície – Número de registros de precipitação categorizadas.

Estação mm	Registros de chuva acima de 1,2 mm							
	Seco-chuvoso		chuvoso		Chuvoso-seco		Seco	
	2--20	<20	2--20	<20	2--20	<20	2--20	<20
Est-UEA	74	00	81	00	00	00	12	00
Colégio Militar	00	00	32	00	00	00	00	00
IFAM	160	00	96	00	37	00	26	00
Embrapa AM010	04	00	00	00	00	00	00	00
Emb. Caldeirao	183	01	130	00	44	00	27	00
Go Amazon	103	02	00	00	00	00	00	00

b. *Processamento do dado bruto em PPI:*

As informações que são recebidas pelo radar, como a distância do alvo, suas características e deslocamento, podem ser indicadas (visualizadas) através do *Plan Position Indicator* (PPI). Como visto no item 2.1, a antena do radar gira 360° para cada elevação, de forma que para cada altura da antena é feita uma leitura em uma casca cônica, ou seja, o seu modo de visualização apresenta uma varredura azimutal em um ângulo de elevação fixo. Portanto, para as estimativas de precipitação foram utilizadas medidas de refletividade do PPI para 1° elevação com observações nos primeiros 150 km, isto porque nesta distância o feixe principal do radar (linha tracejada em vermelho – Figura 7) para esta elevação já se encontra próximo aos 3 km. Desta forma, garante-se que o radar esteja observando apenas água líquida.

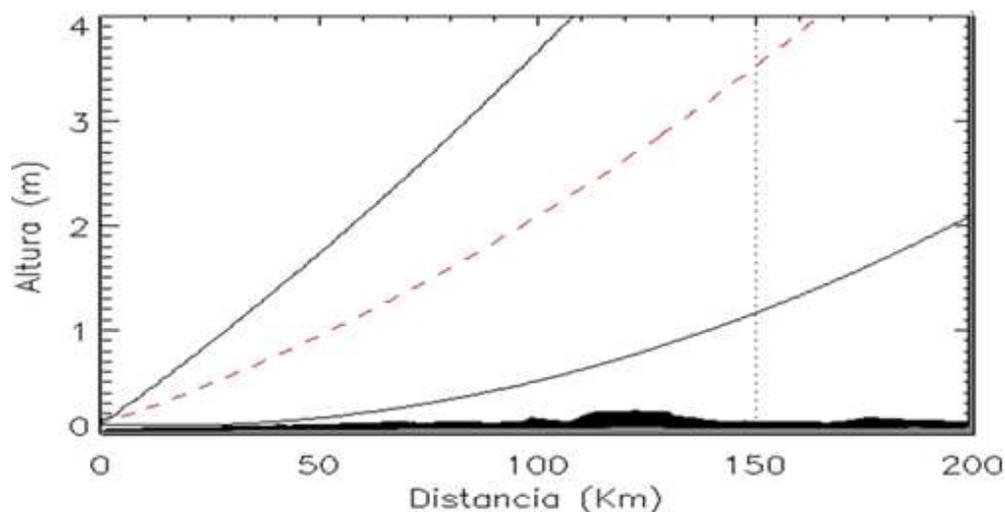


Figura 7. Simulação da propagação do feixe do radar meteorológico de Manaus para a primeira elevação mais a topografia média (hachurado de cinza claro) e máxima (hachurado de cinza escuro) integrada no azimute. Linha preta contínua representa o feixe do radar para abertura inferior e superior da primeira elevação (0,9°). Linha tracejada em vermelho representa o feixe de energia principal do radar para a primeira elevação. Linha preta pontilhada vertical à distância de 150 km do radar.

O processamento dos dados volumétricos em PPI é um passo tão importante quanto a escolha e/ou definição de uma boa relação Z-R, já que implica na qualidade da informação repassada. Por esta razão foi aplicada a metodologia proposta por Anagnostou e Krajewski (1998), que utiliza volumes iluminados dentro de um “cubo”, ou seja, as amostras dos volumes amostrados são normalizadas por pesos relativos que são determinados pela fração do volume iluminado.

Para se obter uma melhor resolução das informações, o “cubo” é dividido em

vários cubos (grades) menores de 2 x 2 km de extensão horizontal e 1km de extensão vertical em coordenadas polares. Dessa forma, pode se extrair o valor da refletividade pontual (no ponto central da grade) ou através da média de pontos de grade em volta desse ponto central. Esta metodologia já foi utilizada anteriormente em estudos com os dados dos RM do CENSIPAM (Cohen et al. 2014; De Loureiro et al., 2014, Saraiva et al. 2016). Agregado ao processamento tem-se a verificação da qualidade, a partir da topografia e de calibração adequada.

- Topografia: Em relação a topografia, os feixes do radar não incidem sobre as mesmas (ver Figura 7 – Simulação da propagação do feixe do radar para 1° elevação mais topografia média e máxima integrada no azimute), mesmo assim, foi utilizado filtro para eliminar qualquer informação de não chuva (Rosenfeld et al. 1995);
- Calibração: Não foi realizado nenhum procedimento para a calibração dos dados, já que o processo exigia tempo.

c. Caracterização da relação Z-R proposta:

A metodologia aplicada para extrair as informações do radar e compará-las com informações “reais”, a partir de pluviômetros foi uma tentativa de minimizar erros pré-existentes e solucionar problemas não previstos na concepção do projeto. É possível usar pluviômetros para a construção de uma relação Z-R e existem algumas metodologias como a de Calheiros e Zawadzki (1987), que calcula a Função de Densidade de Probabilidade do radar e do pluviômetro e extrai a relação a partir das mesmas. No entanto, as informações provenientes do mesmo devem ser a cada 5, 10 minutos ou no mesmo intervalo do radar. Pois se utilizar informações de pluviômetros horárias será necessário integrar as medidas do radar; algo que não funciona. Dessa forma, foram utilizados os registros de EMS da UEA, como dito anteriormente, onde as mesmas possuem dados a cada 5 minutos. Foram selecionados casos de precipitação disponíveis entre os anos de 2017 até março de 2019. Após isso foram feitos os tratamentos desses dados, como a filtragem de dados corrompidos e inexistentes, a transformação desses dados de -4UTC para UTC, e por fim fazer os acumulados de 10 minutos com método de armazenamento semelhante ao do radar, ou seja, gera horário e depois armazena, onde os eventos de minutos de 00:00 do radar ficaram associados a soma dos eventos de 05 e 10 minutos, as de 12 minutos associados a soma de 20 e 25, de 24 minutos associados a 30 e 35, de 36 associados a 40 e 45 minutos e a de 48 minutos associados a soma de 55 e 00 minutos, de forma

que nessa associação entre os dados do radar e das EMS possui uma diferença de 10 minutos para cada série horária. Como pode ser verificado no fluxograma a baixo, depois de filtrar e selecionar os dados das EMS foram selecionados os dados do RM para os mesmos dias e horários dos eventos das EMS. Foram verificados que apesar de haver registro na EMS alguns casos foram perdidos pois o RM não continha o mesmo horário (eventualmente por algum problema no radar ou manutenção do mesmo). Depois de estar com todos os dados compatíveis entre o RM e as EMS, foram selecionados os PPIs da primeira elevação, que são dados volumétricos em coordenadas polares e posteriormente esses dados foram transformados para coordenadas cartesianas para que assim se obtivesse dados pontuais de refletividade, em seguida esses dados de refletividade (em dBz) foram convertidos para mm^6/m^3 para enfim os dados das EMS e do RM serem usados na função de potencia afim de adquirir os coeficientes a e b para a caracterização de uma relação Z-R a partir dos registros das EMS e do RM.

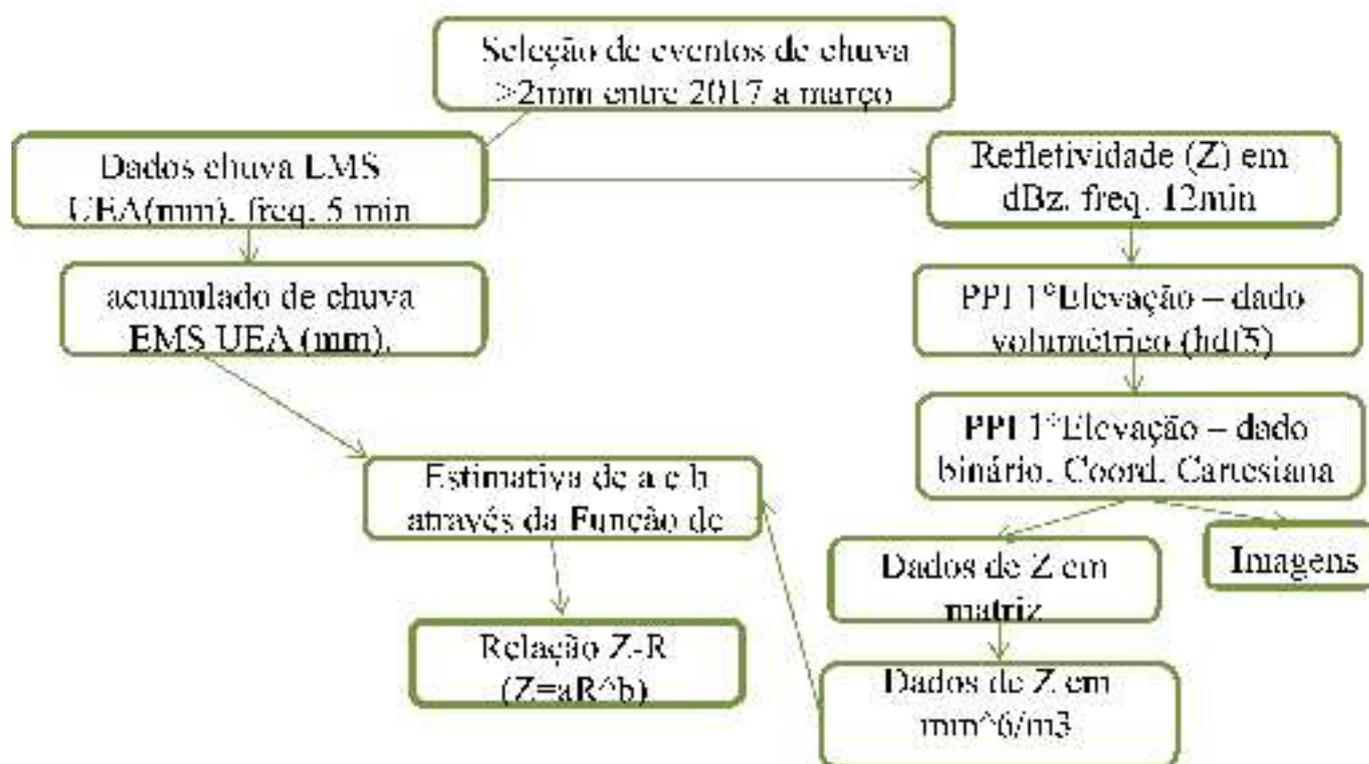


Figura 8. Fluxograma da metodologia aplicada para a caracterização de uma relação Z-R

d. Avaliação de uma relação Z-R apropriada:

Ao todo foram escolhidas seis relações, sendo duas convectivas, duas estratiformes e duas mistas, conforme descrito na Tabela 3. As relações Z-R para chuva do tipo estratiforme foram as propostas por Marshal e Palmer (1948) (Z114) e Tokay e Short (1996) (ZR3) onde a primeira foi proposta para Ottawa, Canadá (

latitude média) e a segunda foi proposta para Kapingamarangi, localizado nos Estados Federativos da Micronésia (tropical). Já as relações para chuvas do tipo convectiva propostas por Tokay e Short (1996) (ZR5) e Steiner e Houze (1995) (ZR6) foram realizadas as regiões de Kapingamarangi e Darwin, na Austrália, respectivamente. As relações para chuvas do tipo mista foram identificadas por Calheiros e Zawadzki (1987) (ZR2) e Tokay e Short (1996) (ZR1), sendo propostas para as cidades de São Paulo e Kapingamarangi, respectivamente.

Ainda na Tabela 3, verifica-se uma simulação do comportamento da estimativa de precipitação para cada relação Z-R aplicada no estudo, para refletividade variando entre 1 a 50 dBZ. Percebe-se que as relações, convectiva (ZR5) e convectiva (ZR6) tendem a estimar valores maiores de precipitação, principalmente a ZR6, que apresenta os maiores valores de precipitação para quase todos os valores de refletividade observadas. Em contrapartida a relação mista (ZR2) foi a que apresentou os menores valores de precipitação em comparação com as demais relações. A relação mista (ZR1), também mista, assim como ZR5 e ZR6, também apresentou valores elevados de precipitação, por exemplo, em 50 dBZ a ZR6 estimou 158 mm/h, sendo o maior valor estimado para essa refletividade. Na estimativa para as relações estratiformes observa-se que para refletividades menores (maiores) a estratiforme ZR4 (ZR3) tende a estimar mais que a ZR3 (ZR4). De maneira geral, observa-se que as relações que mais se destacaram foram as ZR5, ZR6 e ZR1 que estimaram os maiores valores de chuva.

Tabela 3. Relações Z-R utilizadas para a estimativa de precipitação pelo radar meteorológico.

Autor	Ano	Tipo de Chuva	A	b	Refletividade (dBZ)				
					10	20	30	40	50
Tokay e Short (ZR1)	1996	Mista	315	1,2	0,057	0,38	2,62	17,84	121,55
Calheiros e Zawadzki (ZR2)	1987	Mista	650	1,36	0,046	0,25	1,37	7,46	40,57
Tokay e Short (ZR3)	1996	Estratiforme	367	1,3	0,063	0,37	2,16	12,71	74,70
Marshal e Palmer (ZR4)	1948	Estratiforme	200	1,6	0,15	0,65	2,73	11,53	48,62
Tokay e Short (ZR5)	1996	Convectivo	139	1,43	0,16	0,79	3,98	19,89	99,52
Steiner e Houze (ZR6)	1993	Convectivo	50	1,5	0,34	1,59	7,37	34,20	158,74

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Primeiramente serão avaliados os resultados da caracterização da relação Z-R através dos dados provenientes do RM e das EMS da UEA. Em seguida serão avaliados os desempenhos das relações Z-R's já existentes na literatura, através de quatro casos de chuva intensa na região metropolitana de Manaus. Essas compações serão validadas através dos valores observados nas EMS do INMET.

4.1 Caracterização da relação Z-R

Como descrito anteriormente, o processo de construção de uma relação Z-R apropriada exige cuidados singulares e, também, medidas de precipitação por pluviômetro apropriadas (a cada 5, 10 minutos ou no mesmo intervalo do radar) e/ou de disdrometros (não há medidas deste instrumento na região de Manaus para o período estudado). Para isso utilizou-se dados de EMS a cada 10 minutos acima de 2 mm, porém com a desvantagem de serem EMS muito próximas ao RM.

A Figura 8 mostra o diagrama de correlação entre as variáveis refletividade (eixo y) e precipitação (eixo x) para o período entre os anos de 2017 e 2019. As "cruzes" na figura representam todos os casos de chuva que ocorreram nesse período, para todas as EMS da UEA utilizadas, que contabilizam 1009 casos. Desta forma, com a utilização de todos os casos de precipitação, a relação Z-R identificada é dada por:

$$Z = 49,34R^{0,50}$$

A relação Z-R é baseada em uma relação de potência, logo qualquer processo que adicione incertezas ou erros na estimativa de refletividade irá afetar a interferência da taxa de precipitação. Por esta razão, os valores de *a* e *b* variam significativamente, pois dependem do tipo de precipitação, da distribuição do tamanho de gotas, da localização geográfica e das condições meteorológicas. De acordo com Fujiwara (1965) as chuvas convectivas apresentam coeficiente angular (*a*) variando entre 300 e 1000 e coeficiente linear (*b*) entre 1,25 e 1,65, já para chuvas com características estratiformes o valor do coeficiente *a* não ultrapassa os 600 e do *b* varia entre 1,0 e 2,0.

A relação identificada com todos os dados selecionados não se enquadra nos padrões de relações Z-R identificadas na literatura e isto, deve-se ao grande número de casos selecionados em EMS próximas ao radar. Percebe-se pela Figura 8 que

existe uma grande número de observações com valores zero ou inferiores (eixo y) e estes valores menores de refletividade são característicos de retroespalhamento e ruídos nos dados.

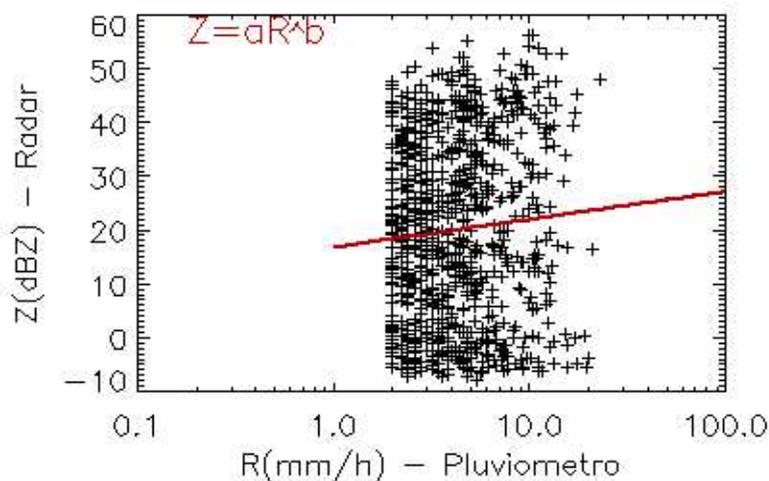


Figura 9. Diagrama de correlação entre as variáveis refletividade (eixo y) e Precipitação (eixo x). Linha vermelha representa a linha de tendência

Por esta razão, procurou-se identificar a relação Z-R pela distância das EMS em relação ao radar. Na Figura 9 é possível verificar o diagrama de correlação para casos de precipitação selecionados nas estações entre 0 a 20 km de distância do radar (painel a esquerda) e 20 a 40 km do radar (painel a direita).

Para as EMS entre 0 a 20 km do radar obteve-se a relação Z-R:

$$Z = 7,93R^{-0.034}$$

É possível observar que a mesma não é representativa, pois a equação Z-R é definida como sendo uma relação de potência com expoente (b) positivo, representando uma variação direta. O valor negativo presente significa a presença de valores insignificantes de retroespalhamento, o que significa que mesmo com a aplicação do filtro, houve contaminação (eco de terreno). Também coeficiente a igual a 7,93 é relativamente baixo, que não condiz com as relações Z-R encontradas na literatura.

Já para as EMS entre 20 a 40 km no diagrama de correlação é possível verificar que os valores de refletividade são superiores a 0 dBZ e que os valores de acumulados de precipitação não ultrapassam os 20 mm, no entanto, maior inclinação crescente da linha de tendência representando valores de coeficiente a e b maiores

do que as anteriores. Para esta distribuição a relação Z-R identificada é dada por:

$$Z = 579R^{1,22}$$

Nota-se que esta relação assemelha-se as encontradas na literatura, apresentando características mais estratiformes, visto que o coeficiente a não ultrapassa os 600 e o coeficiente b encontra-se no intervalo de 1 a 2. É importante reafirmar que para as análises, os casos não foram separados nem por regimes como para o tipo de precipitação, devido ao número reduzido de casos de precipitação identificados.

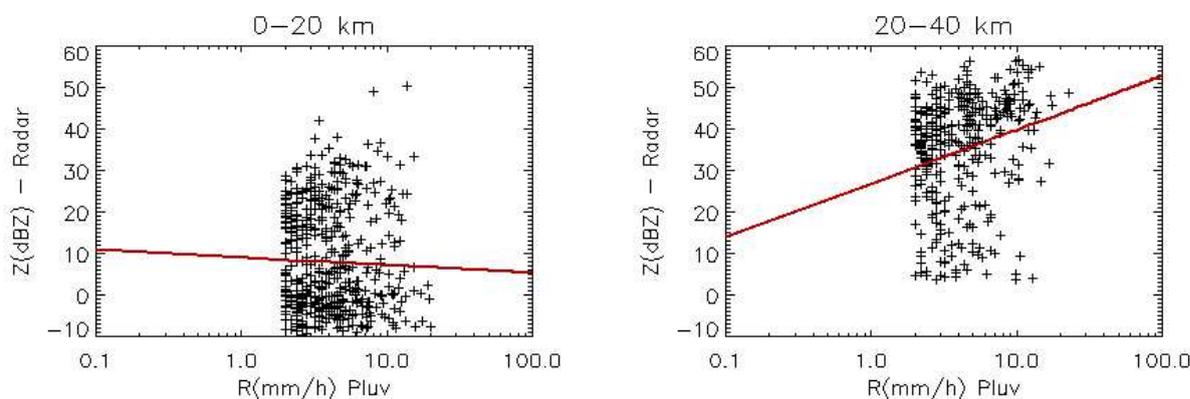


Figura 10. Diagrama de correlação entre a variáveis refletividade (eixo y) e Precipitação (eixo x). Painel a esquerda – entre 0 a 20 km; Médio – entre 20 a 40 km; e a direita – entre 140 a 160 km.

De modo geral, com base nos casos selecionados e com as relações obtidas através de todos os casos de precipitação (Figura 8) e de casos entre 0 a 20 km e 20 a 40 km do radar (Figura 9), conclui-se que a relação que melhor representa a região de Manaus é a relação $Z = 579R^{1,22}$.

Esta relação identificada deixa claro que a qualidade dos dados selecionados é fundamental para a identificação de uma relação representativa. Na próxima seção será avaliado o desempenho das relações existentes na literatura e da identificada com os dados das EMS da UEA ($Z = 579R^{1,22}$). Possivelmente, EMS localizadas entre 50 e 100 km do radar possibilitariam a identificação de relações mais representativas.

4.2 Estudos de casos

Para que fosse possível avaliar as relações Z-R selecionadas anteriormente (ZR1, ZR2, ZR3, ZR4, ZR5 e ZR6) e, também, avaliar a relação Z-R elaborada especificamente para a região de Manaus (ZR7), nesse trabalho foram selecionados 4 eventos de chuva intensa/constante na região de abrangência do RM de Manaus. Para a seleção dos casos, foram selecionados eventos que

tiveram altos valores de chuva em um longo intervalo de tempo (acima de 5 horas) e que o acumulado de precipitação seja superior a 30 mm. A referência desses valores de precipitação obteve-se através dos registros da EMS de Manaus do INMET. Para as análises foram utilizadas as demais EMS do INMET na área de abrangência do RM de Manaus. As EMS da UEA não foram utilizadas para controle porque para os eventos selecionados não haviam registros em muitas das EMS selecionadas.

Os eventos selecionados impactaram negativamente a cidade de Manaus, ora com alagamentos, destelhamentos e deslizamentos de terra, ora com óbitos de cidadãos. Os dois primeiros eventos ocorreram no período chuvoso da região, em 10/01/2019 (Evento 1) e 13/02/2019 (Evento 2), já o terceiro evento ocorreu no período de transição chuvos-seco (02/05/2019 - Evento 3) e o quarto evento no período de transição entre seco e chuvoso (27/09/2019 - Evento 4), onde os eventos tendem a apresentarem acumulados de precipitação intensa em curto período de tempo, já que possuem características, decorrentes do período seco e condições favoráveis para convecção, características do período chuvoso.

4.2.1 Evento 1

O Evento 1 ocorreu no dia 10/01/2019 e os registros de precipitação na EMS Manaus-INMET apresentou acumulado de precipitação de 42,6 mm em um intervalo de 12 horas (das 4 às 16 UTC).

A partir da Figura 10 é possível ver a situação sinótica no início do evento pela imagem do satélite GOES-16, canal 13 – infravermelho (05 UTC). Pela imagem do satélite é possível verificar que as menores temperaturas se aproximam da cor rosa, enquanto que as temperaturas mais elevadas da cor preta. Como nuvens com maior desenvolvimento vertical apresentam seu topo em elevados níveis da atmosfera, as temperaturas são menores, com temperatura de topos inferiores a -40° C. A climatologia para o mês de janeiro na Amazônia Legal indica que é comum a presença de bandas de nebulosidade compreendidas entre o noroeste do Amazonas até o sudeste do Brasil, geralmente associadas aos eventos de Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), que para este dia ainda não está configurada.

De acordo com o Boletim Técnico fornecido pelo Centro de Previsões do Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC), para o dia 10/01, é possível verificar um sistema frontal sobre o Atlântico Sul, associado ao centro de baixa pressão. Assim,

como cavados alongados atuando no sul da Argentina, nos Oceanos Atlântico e Pacífico, abaixo de 40°S. A Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS) encontra-se posicionada em torno de 34°S/35°W e a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) está atuando em torno de 04°N/07°N, no Oceano Pacífico, e em torno de 01°N/03°N no Oceano Atlântico. Dessa forma, observa-se que para região norte a nebulosidade provocada pela ZCIT, juntamente com a influência de sistemas frontais, favoreceu a ocorrência de chuva para esse dia.

A partir das imagens do RM de Manaus (Figura 10 – painel inferior) para os horários de 05 (esquerdo), 11 (meio) e 17 UTC (direito) percebe-se que as 05 UTC o evento já estava atuando sobre a área de abrangência do RM, porém os registros sobre a EMS Manaus-INMET ainda eram próximos a zero. Neste evento, percebe-se a presença de várias células convectivas (refletividades acima de 40 dBZ) e vasta região de banda estratiforme (abaixo de 40 dBZ). Neste dia, várias células convectivas atuaram na região, como por exemplo, na imagem das 17 UTC, nota-se a chegada de uma nova célula convectiva, a direita do centro do RM. A maioria dos eventos que atuam na região de Manaus são de leste para o oeste (Saraiva, 2006).

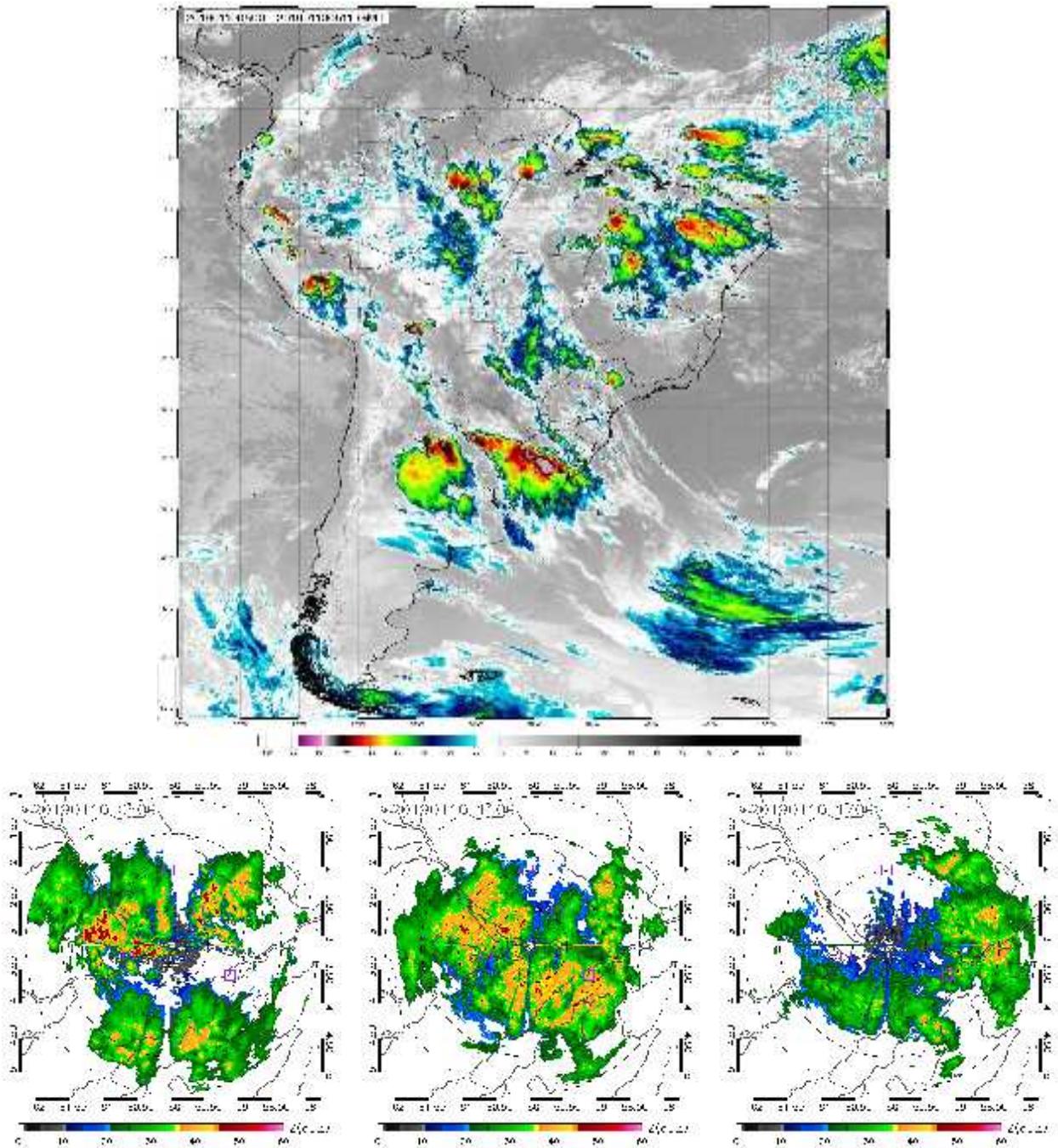


Figura 11. Evento 1 – 10/01/2019. Superior – Imagem do Satélite GOES-16, canal 13. A paleta de cor indica que quanto mais próximo do rosa menor a temperatura (Fonte: DAS/CPTEC). Inferior – Imagem do Radar Meteorológico de Manaus, produto PPI da 1 elevação. Os pontos tracejados indicam a distancia do centro do radar a cada 50 km e paleta de cores, quanto mais próxima do rosa, maior é a refletividade (Fonte: Censipam).

A Tabela 4 apresenta os quantitativos de precipitação para o período de 12 horas. A partir destas informações foi possível verificar as relações que subestimaram e superestimaram a precipitação. É claro que em algumas estações apresentadas na Tabela 4 os valores registrados e observados pelo radar não são correspondentes, hora com registros no RM e nenhum na EMS. Isto porque a refletividade obtida pelo radar e que, posteriormente, foi transformada em precipitação é a resultante da média

de 9 pontos ao redor da EMS. Desta forma garante-se que as informações sejam mais confiáveis (Barbosa, 2014).

Para o evento 1, na EMS do Rio Urubu, onde a mesma teve um total de 38 mm em 12h, percebe-se que a relação ZR7 (39,87 mm) estimou o valor mais aproximado ao observado, enquanto que as as relações ZR6 (143,8 mm), ZR5, ZR1, ZR3 E ZR4 superestimaram e a relação ZR2 subestimou o valor observado.

Na EMS de Manaus, fica claro que nenhuma relação conseguiu representar a forte chuva ocorrida no intervalo de 12 horas, todas subestimaram o observado pela estação que foi de 43 mm. E por último, para o mesmo evento, na EMS de Manacapuru, a relação que mais se aproximou do observado (35,6 mm), foi a relação ZR4 (35,25 mm) as relações ZR3, ZR2, ZR7 tiveram valores aproximados porém subestimados, e as ZR6, ZR5 E ZR1 superestimaram os valores observados.

Tabela 4. Quantitativo de Precipitação para o período de 12 horas do registrado pelas EMS do INMET do Rio Urubu, Manaus e Manacapuru e das sete relações Z-Rs.

Evento 1 - EMS Manacapuru													PREC
Hora	Um	Dois	Três	Quatro	Cinco	Seis	Sete	Oito	Nove	Dez	Onze	Doze	TOTAL
EMS	1.6	7.8	4.2	1.4	3	1.8	2.4	9	1.4	1.6	1.2	0.2	35.6
ZR1	3.08	4.23	2.68	6.39	1.75	2.09	8.95	2.22	2.79	3.85	0.57	0.07	38.66
ZR2	1.53	2.08	1.40	2.96	0.96	1.12	3.99	1.16	1.42	1.91	0.35	0.05	18.92
ZR3	2.45	3.35	2.20	4.87	1.49	1.75	6.65	1.83	2.26	3.07	0.52	0.07	30.49
ZR4	2.88	3.87	2.76	5.16	2.00	2.28	6.66	2.30	2.77	3.59	0.83	0.15	35.26
ZR5	4.34	5.89	4.03	8.21	2.82	3.26	10.90	3.35	4.09	5.43	1.06	0.17	53.53
ZR6	7.91	10.71	7.46	14.62	5.30	6.08	19.17	6.20	7.52	9.90	2.08	0.35	97.29
ZR7	1.82	2.50	1.60	3.75	1.05	1.25	5.23	1.33	1.66	2.28	0.35	0.04	22.86

Evento 1 - EMS Rio Urubu													PREC
Hora	Um	Dois	Três	Quatro	Cinco	Seis	Sete	Oito	Nove	Dez	Onze	Doze	TOTAL
EMS	0.2	3.4	19.8	2.8	9.4	1.4	0.2	0.2	0.4	0.2	0	0	38
ZR1	7.47	29.45	12.53	4.42	3.21	3.37	1.22	4.08	0.71	1.19	0.76	0.11	68.53
ZR2	3.42	11.40	5.38	2.17	1.58	1.70	0.70	2.02	0.43	0.68	0.45	0.08	30.01
ZR3	5.64	19.93	9.08	3.50	2.55	2.71	1.07	3.24	0.65	1.04	0.68	0.12	50.20
ZR4	5.86	16.24	8.61	4.01	2.98	3.25	1.53	3.78	1.02	1.49	1.05	0.24	50.07
ZR5	9.42	29.56	14.50	6.13	4.50	4.86	2.08	5.73	1.33	2.02	1.38	0.27	81.78
ZR6	16.70	49.63	25.18	11.12	8.20	8.90	3.98	10.43	2.59	3.86	2.68	0.56	143.82
ZR7	4.38	16.86	7.28	2.62	1.90	2.00	0.74	2.42	0.44	0.72	0.46	0.07	39.88

vento 1 - EMS Manaus

Hora													PREC
	Um	Dois	Três	Quatro	Cinco	Seis	Sete	Oito	Nove	Dez	Onze	Doze	TOTAL
EMS	9.4	1.6	0.4	7.8	6.4	5.2	5.8	3	1.8	0.6	0.6	0.4	43
ZR1	0.02	0.01	0.05	0.04	0.02	0.04	0.03	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.27
ZR2	0.02	0.01	0.04	0.03	0.02	0.03	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.24
ZR3	0.03	0.01	0.06	0.04	0.03	0.05	0.03	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.31
ZR4	0.08	0.04	0.14	0.11	0.08	0.12	0.08	0.06	0.05	0.04	0.04	0.04	0.87
ZR5	0.08	0.04	0.15	0.11	0.08	0.12	0.08	0.06	0.04	0.04	0.03	0.03	0.84
ZR6	0.17	0.09	0.31	0.23	0.17	0.26	0.18	0.13	0.09	0.08	0.07	0.08	1.87
ZR7	0.02	0.01	0.03	0.02	0.02	0.03	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.17

4.2.2 Evento 2

O Evento 2 ocorreu no dia 13/02/2019 e a EMS Manaus-INMET registrou acumulado de precipitação de 74 mm em um intervalo de 12 horas (09 às 20 UTC), sendo que a maior concentração de precipitação ocorreu às 17 UTC (28,4 mm). A chuva provocou alagamentos, desabamentos e deslizamentos de barrancos na cidade de Manaus. Segundo o INMET o evento foi considerado ligeiramente acima do normal para o mês de fevereiro.

A Figura 11 apresenta a imagem do satélite GOES-16, canal 13 – infravermelho (painel superior) para as 14 UTC e a imagem do RM de Manaus para o PPI da 1ª elevação da variável refletividade, para as 11, 17 e 19 UTC. A partir da imagem do satélite é possível verificar um sistema frontal atuando no sudeste do país. De acordo com Boletim Técnico do CPTEC, a frente fria está atuando desde a Bolívia até o litoral brasileiro. Também identifica-se a presença da ZCIT no Oceano Atlântico atuando em torno de 01°N/01°S, que favoreceu a presença de tempo instável com chuvas. Associado à presença de Vórtice Ciclônico de Altos Níveis (VCAN), com centro em 10° S/45°W, que favoreceu movimentos ascendentes, que contribuem para ocorrência de pancadas de chuva pontualmente intensas.

Através das imagens do RM, para o horário das 11 UTC, verificam-se células convectivas ao norte, sul e leste de Manaus, sendo este último que atingiu a cidade nos próximos horários. Nas imagens seguintes (17 e 19 UTC), as células convectivas estavam concentradas à oeste e noroeste da cidade e ainda apresentam vários pixels com refletividades acima de 40 dBZ. De modo geral, este evento apresentou mais células convectivas e menor banda de nebulosidade estratiforme, do que o Evento 1.

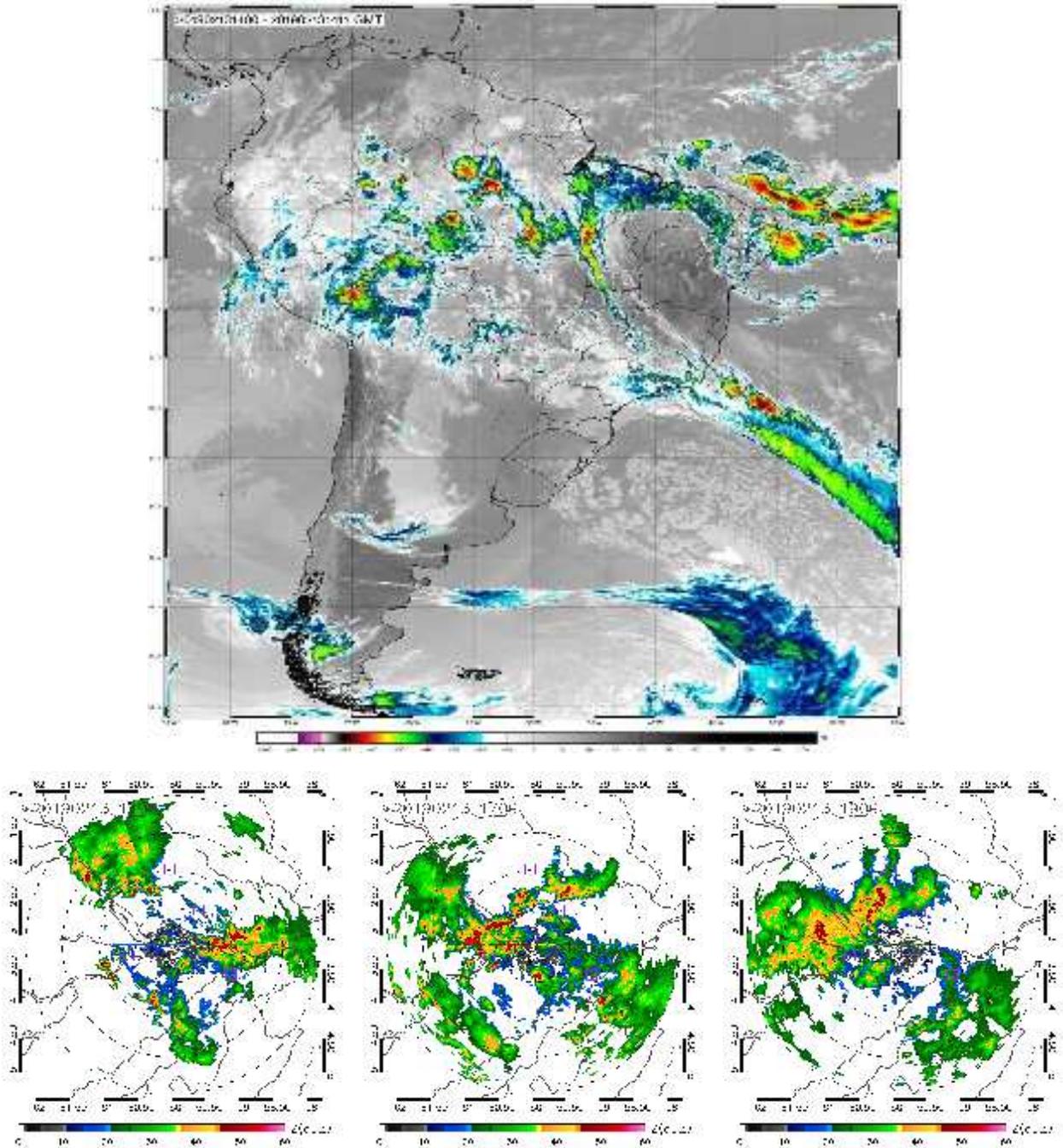


Figura 12. Evento 2 – 13/02/2019. Superior – Imagem do Satélite GOES-16, canal 13. A paleta de cor indica que quanto mais próximo do rosa menor a temperatura (Fonte: DAS/CPTEC). Inferior – Imagem do Radar Meteorológico de Manaus, produto PPI da 1 elevação. Os pontos tracejados indicam a distancia do centro do radar a cada 50 km e paleta de cores, quanto mais próxima do rosa, maior é a refletividade (Fonte: Censipam).

A Tabela 5 apresenta os quantitativos de precipitação do Evento 2 para o período de 12 horas. Nota-se que neste caso para EMS do Rio Urubu (38 mm), todas as relações subestimaram o observado, tendo a relação mais próxima (ZR6) estimando 14,1 mm, em 12 horas.

Para a EMS de Manaus (74 mm), que apresentou quantidade significativa de chuva, as relações também subestimaram o observado, tendo a relação mais próxima (ZR6) com apenas 2,68 mm.

E por último, referente a EMS de Manacapuru (4,4 mm), é possível verificar na tabela que todas as relações superestimaram o observado, o oposto visto nas demais EMS para o mesmo evento, tendo a relação que mais se aproximou do observado (ZR2 – 8 mm) com o dobro do valor da EMS.

Tabela 5. Quantitativo de Precipitação para o período de 12 horas do registrado pelas EMS do INMET do Rio Urubu, Manaus e Manacapuru e das sete relações Z-Rs.

Evento 2 - EMS Manacapuru													PREC
Hora	Um	Dois	Três	Quatro	Cinco	Seis	Sete	Oito	Nove	Dez	Onze	Doze	TOTAL
EMS	0	0	0	0	0	0.6	0	0	1.6	1	1.2	0	4.4
ZR1	0.06	0.07	0.03	0.00	0.25	0.06	0.07	5.08	5.48	4.25	0.05	2.08	17.49
ZR2	0.04	0.06	0.03	0.00	0.17	0.04	0.05	2.20	2.62	2.01	0.04	1.05	8.32
ZR3	0.06	0.08	0.04	0.00	0.25	0.06	0.07	3.69	4.27	3.28	0.05	1.67	13.52
ZR4	0.14	0.18	0.08	0.00	0.46	0.12	0.16	3.57	4.72	3.60	0.12	2.04	15.20
ZR5	0.15	0.19	0.09	0.00	0.55	0.14	0.17	5.94	7.35	5.62	0.13	3.01	23.34
ZR6	0.32	0.41	0.19	0.00	1.10	0.28	0.36	10.36	13.22	10.10	0.27	5.54	42.17
ZR7	0.04	0.05	0.02	0.00	0.16	0.04	0.04	2.95	3.24	2.50	0.03	1.24	10.30

Evento 2 - EMS Rio Urubu													PREC
Hora	Um	Dois	Três	Quatro	Cinco	Seis	Sete	Oito	Nove	Dez	Onze	Doze	TOTAL
EMS	0	0	0	0	0	0.2	0	0	1.4	26.6	8.4	1.6	38.2
ZR1	0.00	0.00	0.00	0.08	0.16	0.09	0.46	1.64	0.21	1.49	0.40	0.00	4.54
ZR2	0.00	0.00	0.00	0.05	0.11	0.06	0.27	0.83	0.12	0.81	0.25	0.00	2.51
ZR3	0.00	0.00	0.00	0.08	0.16	0.09	0.41	1.32	0.18	1.27	0.36	0.00	3.88
ZR4	0.00	0.00	0.00	0.14	0.27	0.17	0.63	1.65	0.27	1.71	0.60	0.00	5.44
ZR5	0.00	0.00	0.00	0.17	0.34	0.20	0.83	2.40	0.37	2.40	0.76	0.00	7.46
ZR6	0.00	0.00	0.00	0.34	0.67	0.41	1.61	4.44	0.70	4.51	1.50	0.00	14.17
ZR7	0.00	0.00	0.00	0.05	0.10	0.06	0.28	0.97	0.13	0.90	0.24	0.00	2.73

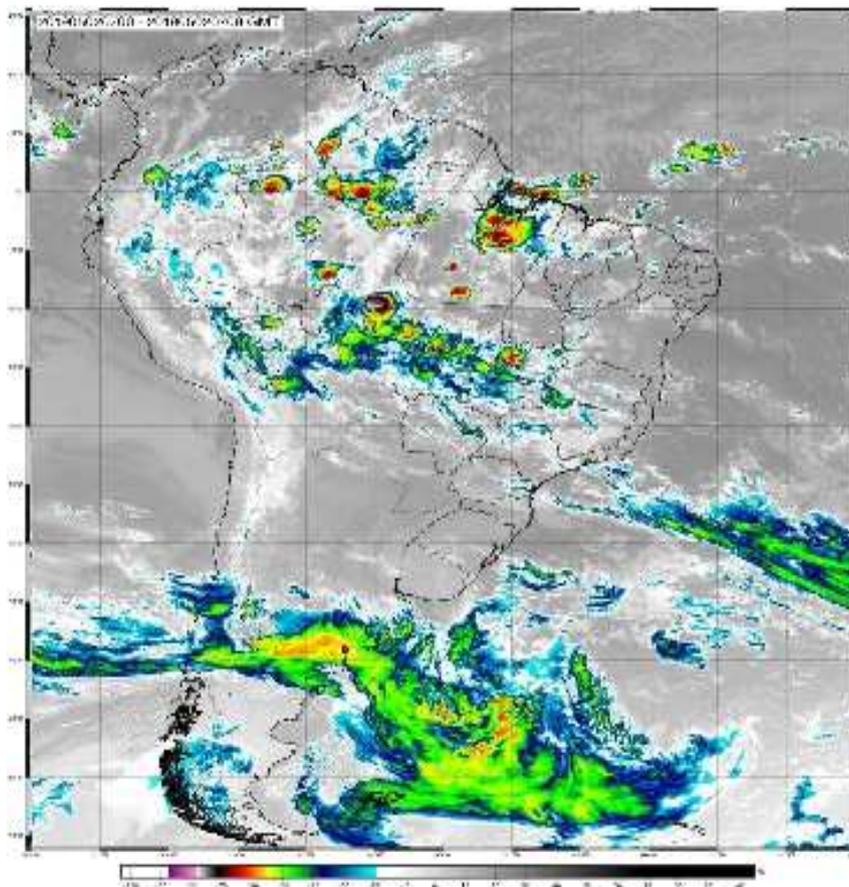
Evento 2 - EMS Manaus													PREC
Hora	Um	Dois	Três	Quatro	Cinco	Seis	Sete	Oito	Nove	Dez	Onze	Doze	TOTAL
EMS	0	0	0	0	0	0	11	33	28.4	1.6	0	0	74
ZR1	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.33	0.12	0.02	0.01	0.01	0.01	0.55
ZR2	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.21	0.09	0.02	0.01	0.01	0.01	0.39
ZR3	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.31	0.12	0.03	0.01	0.01	0.01	0.55
ZR4	0.03	0.03	0.03	0.03	0.04	0.07	0.52	0.25	0.08	0.03	0.03	0.03	1.17
ZR5	0.02	0.03	0.03	0.03	0.04	0.06	0.64	0.28	0.07	0.03	0.02	0.03	1.29
ZR6	0.06	0.07	0.06	0.06	0.09	0.14	1.27	0.59	0.16	0.06	0.06	0.07	2.69
ZR7	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.20	0.08	0.01	0.00	0.00	0.01	0.34

4.2.3 Evento 3

O Evento 3 ocorreu no dia 02/05/2019 e a EMS Manaus-INMET registrou acumulado de precipitação de 56,8 mm em um intervalo de 12 horas (07 às 18 UTC),

sendo que o maior acumulado em 1 hora ocorreu às 08 UTC, com 43,2 mm.

A partir da imagem do satélite das 07 UTC (Figura 12) é possível verificar áreas de instabilidade sobre o centro-oeste e norte do país. De acordo com Boletim Técnico do CPTEC, identifica-se a presença de dois sistemas frontais sobre o América do Sul, o primeiro atuando sobre a faixa que compreende o noroeste até o sudeste do Brasil. E o segundo ao sul do Uruguai. A ZCIT não está bem configurada, porém está contribuindo para tempo instável no centro da Amazônia Legal, principalmente no litoral do Pará. Para as 07 UTC o RM apresenta uma célula convectiva posicionada ao norte de Manaus, sentido sudeste-noroeste, condizente com a imagem de satélite. Ainda, concentrações de células com refletividade acima dos 40 dBZ. As imagens das 09 e 10 UTC apresentam este sistema mais a oeste da cidade, porém, pequenas células ainda por chegar na cidade (à leste). Para estes horários as refletividades mais intensas concentram-se à oeste da cidade.



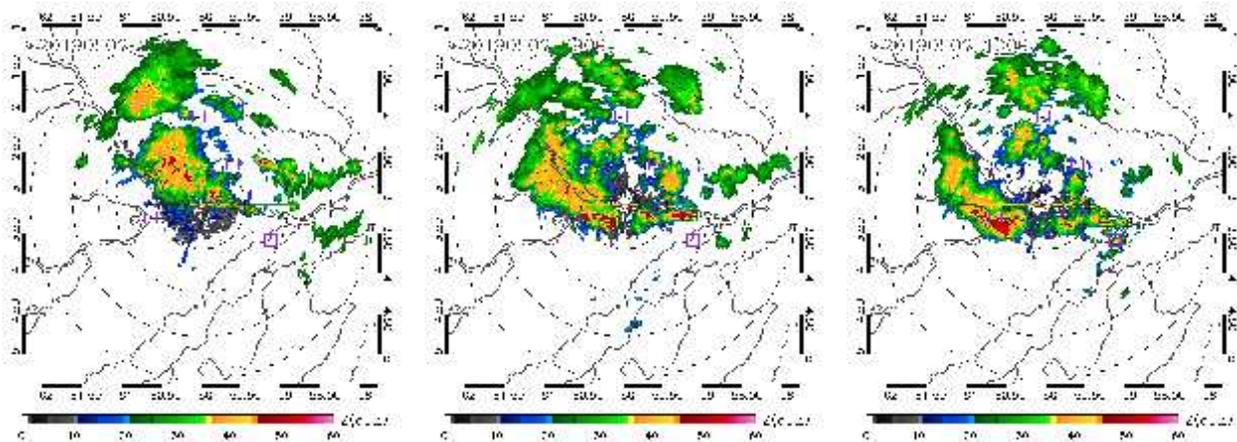


Figura 13. Evento 3 – 02/05/2019. Superior – Imagem do Satélite GOES-16, canal 13. A paleta de cor indica que quanto mais próximo do rosa menor a temperatura (Fonte: DAS/CPTEC). Inferior – Imagem do Radar Meteorológico de Manaus, produto PPI da 1 elevação. Os pontos tracejados indicam a distancia do centro do radar a cada 50 km e paleta de cores, quanto mais próxima do rosa, maior é a refletividade (Fonte: Censipam).

Tabela 6. Quantitativo de Precipitação para o período de 12 horas do registrado pelas EMS do INMET do Rio Urubu, Manaus e Manacapuru e das sete relações Z-Rs.

Evento 3 - EMS Manacapuru

Hora													PREC
	Um	Dois	Três	Quatro	Cinco	Seis	Sete	Oito	Nove	Dez	Onze	Doze	TOTAL
EMS	0	0	0.2	16.8	8.2	2.4	0	0	0	0	0	0	27.6
ZR1	0.07	0.18	19.64	20.86	7.61	0.00	0.09	0.00	0.05	0.11	0.02	0.06	48.68
ZR2	0.05	0.13	7.94	8.55	3.26	0.00	0.06	0.00	0.04	0.08	0.01	0.05	20.17
ZR3	0.07	0.18	13.68	14.67	5.50	0.00	0.09	0.00	0.05	0.11	0.02	0.07	34.44
ZR4	0.17	0.36	11.85	12.93	5.23	0.00	0.18	0.00	0.11	0.24	0.05	0.15	31.26
ZR5	0.18	0.41	20.92	22.63	8.77	0.00	0.21	0.00	0.12	0.27	0.05	0.16	53.72
ZR6	0.39	0.84	35.60	38.67	15.26	0.00	0.43	0.00	0.24	0.55	0.10	0.34	92.43
ZR7	0.04	0.11	11.31	12.04	4.42	0.00	0.05	0.00	0.03	0.07	0.01	0.04	28.13

Evento 3 - EMS Rio Urubu

Hora													PREC
	Um	Dois	Três	Quatro	Cinco	Seis	Sete	Oito	Nove	Dez	Onze	Doze	TOTAL
EMS	0	1	0.2	0	0	0	0.2	0	0	0	0	0	1.4
ZR1	0.44	0.31	1.50	0.00	0.00	0.02	0.05	0.00	0.00	0.00	0.35	0.12	2.80
ZR2	0.26	0.19	0.80	0.00	0.00	0.02	0.04	0.00	0.00	0.00	0.21	0.08	1.60
ZR3	0.39	0.29	1.25	0.00	0.00	0.02	0.05	0.00	0.00	0.00	0.32	0.12	2.44
ZR4	0.61	0.46	1.64	0.00	0.00	0.05	0.11	0.00	0.00	0.00	0.50	0.22	3.58
ZR5	0.80	0.59	2.33	0.00	0.00	0.06	0.12	0.00	0.00	0.00	0.65	0.26	4.80
ZR6	1.54	1.16	4.35	0.00	0.00	0.12	0.25	0.00	0.00	0.00	1.26	0.52	9.21
ZR7	0.27	0.19	0.90	0.00	0.00	0.01	0.03	0.00	0.00	0.00	0.21	0.07	1.69

Evento 3 - EMS Manaus

Hora													PREC
	Um	Dois	Três	Quatro	Cinco	Seis	Sete	Oito	Nove	Dez	Onze	Doze	TOTAL
EMS	2.8	43.2	6.6	0	0	0.2	0	0	0	0	0	4	56.8
ZR1	0.26	0.06	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.40
ZR2	0.17	0.04	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.30
ZR3	0.25	0.06	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.41
ZR4	0.46	0.13	0.03	0.03	0.03	0.03	0.04	0.03	0.04	0.03	0.06	0.03	0.95
ZR5	0.55	0.14	0.02	0.02	0.02	0.03	0.03	0.03	0.04	0.03	0.06	0.02	1.00
ZR6	1.12	0.30	0.05	0.05	0.06	0.06	0.07	0.07	0.09	0.06	0.13	0.06	2.13
ZR7	0.16	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00	0.25

A Tabela 6 apresenta os quantitativos de precipitação do Evento 3 para o período de 12 horas. Nota-se que neste caso, para a EMS do Rio Urubu (1,4 mm), as relações que tiveram o melhor desempenho comparado ao observado foram as relações ZR2 (1,60 mm) e ZR7 (1,69 mm), as demais superestimaram na ordem de 1, 2 e 3 mm a mais que o observado na EMS.

Na EMS de Manaus, novamente os valores estimados por todas as relações são praticamente nulos, subestimando consideravelmente o valor observado pela EMS de Manaus (56,8 mm).

E para a EMS de Manacapuru (27, 6 mm), a relação ZR7 obteve o valor mais aproximado (28,1 mm), as demais relações superestimaram consideravelmente o observado, com por exemplo a relação ZR6 que estimou cerca de 92,4 mm. A única relação que subestimou foi a ZR2, estimando 20,7 mm, o que comparado com as outras é o segundo valor mais próximo ao observado.

4.2.4 Evento 4

O Evento 4 ocorreu entre os dias 27/09/2019 e 28/09/2019 e a EMS Manaus-INMET registrou 121 mm de precipitação em um intervalo de 12 horas (19 UTC do dia 27 até às 06 UTC do dia 28), sendo que o maior acumulado em 1 hora foi 80,8 mm à 01 UTC. Este evento trouxe muitos transtornos para a cidade, com mais de 70 ocorrências; com registros de desabamentos, deslizamentos, alagamentos e falta de energia elétrica (Defesa Civil Municipal). Segundo o INMET o evento superou a média histórica de precipitação para o mês de setembro em Manaus.

A Figura 13 mostra na parte superior a imagem do satélite GOES-16, canal 13 – infravermelho para o dia do evento. E na parte inferior, o grau de refletividade

registrada no RM de Manaus às 22, 00 e 02 UTC do dia do evento.

A partir da imagem do satélite (Figura 13) verificam-se várias áreas de instabilidade, com topos de nuvem em temperaturas inferiores à -60°C , nos estados do Amazonas, Roraima e Pará. De acordo com que as condições de nebulosidade e segundo o boletim técnico fornecido pelo CPTEC, para o dia 27/09/2019, nota-se um aglomerado de nebulosidade na parte norte do Brasil e América Latina, relacionada aos processos primordialmente termodinâmicos, comuns para época do ano, período de transição de seco para chuvoso.

Pelas imagens do RM é possível verificar que a chuva com o tempo ficou concentrada bem na parte central do RM, onde está localizada a cidade de Manaus.

Na análise do quantitativo de precipitação entre as relações e as EMS no período de 12 horas, nota-se que para a EMS do Rio Urubu (37,2 mm), todas as relações subestimaram significativamente o observado, tendo a relação com valor mais próximo (ZR6) com apenas 12, 02 mm. Para a EMS de Manaus (121 mm), assim como visto em todos os eventos anteriores, as relações não conseguiram estimar a chuva ocorrida nesse evento, estimando valores insignificantes. Já para a EMS de Manacapuru (3,2 mm) as relações tiveram melhores desempenhos de forma geral, tendo as relações ZR1 (3,2 mm), ZR3 (2,97 mm) e ZR7(2,0 mm) com os valores mais aproximados e a relação ZR6 (11, 88 mm) com o valor mais distante do observado na EMS.

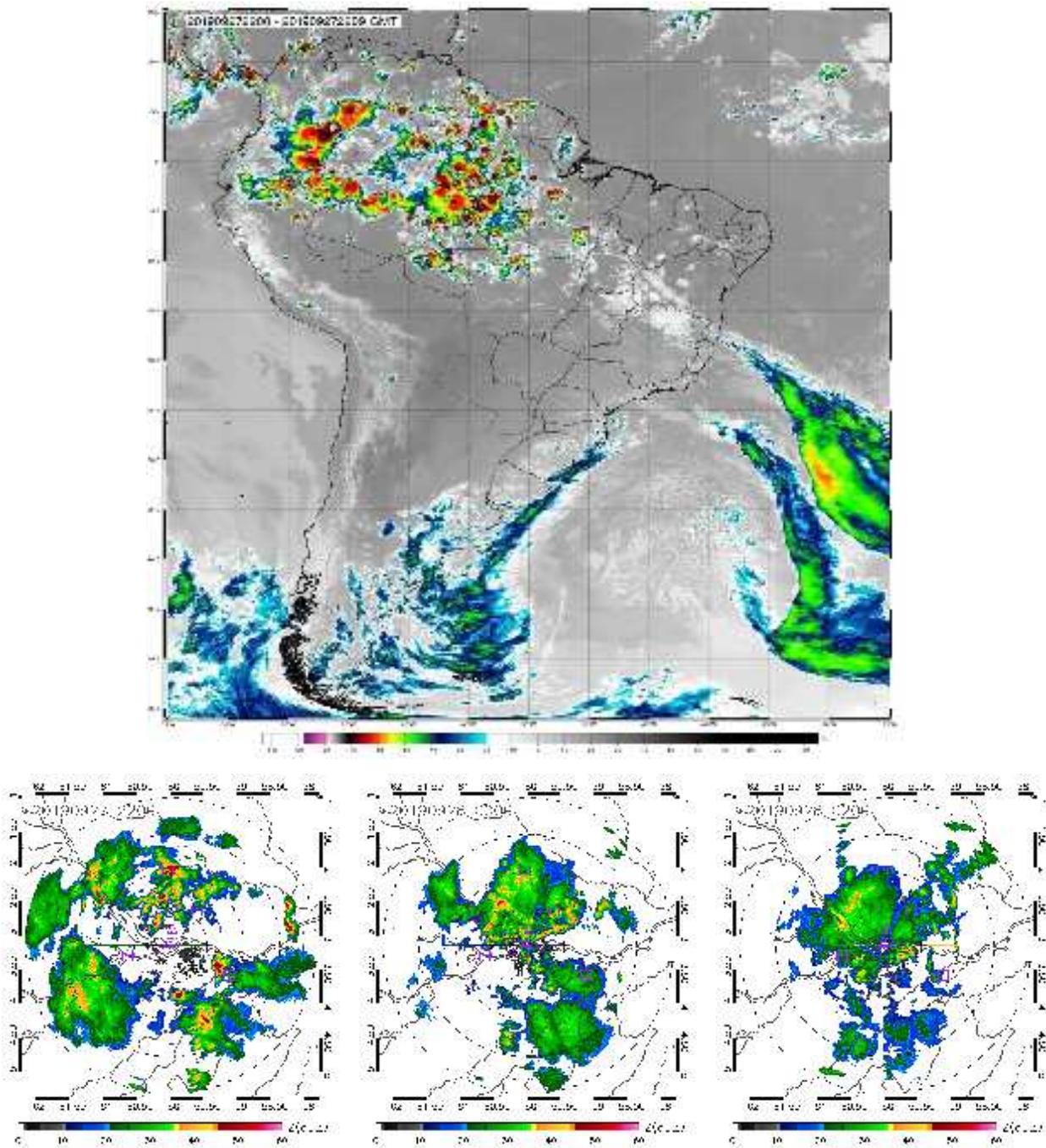


Figura 14. Evento 4 – 27/09/2019. Superior – Imagem do Satélite GOES-16, canal 13. A paleta de cor indica que quanto mais próximo do rosa menor a temperatura (Fonte: DAS/CPTEC). Inferior – Imagem do Radar Meteorológico de Manaus, produto PPI da 1 elevação. Os pontos tracejados indicam a distancia do centro do radar a cada 50 km e paleta de cores, quanto mais próxima do rosa, maior é a refletividade (Fonte: Censipam).

Tabela 7. Quantitativo de Precipitação para o período de 12 horas do registrado pelas EMS do INMET do Rio Urubu, Manaus e Manacapuru e das sete relações Z-Rs.

Evento 4 - EMS Manacapuru

Hora	Um	Dois	Três	Quatro	Cinco	Seis	Sete	Oito	Nove	Dez	Onze	Doze	PREC
													TOTAL
EMS	0	0	0.2	0.2	0	0	0	0.6	1.4	0.8	0	0	3.2
ZR1	0.01	1.09	0.17	0.00	0.01	0.00	0.48	0.94	0.40	0.06	0.09	0.05	3.29
ZR2	0.01	0.61	0.11	0.00	0.01	0.00	0.28	0.55	0.25	0.05	0.07	0.04	1.99
ZR3	0.01	0.94	0.16	0.00	0.01	0.01	0.43	0.83	0.37	0.07	0.10	0.05	2.97
ZR4	0.03	1.32	0.30	0.00	0.03	0.02	0.66	1.24	0.62	0.16	0.21	0.13	4.73
ZR5	0.03	1.81	0.36	0.00	0.04	0.02	0.86	1.65	0.78	0.16	0.23	0.13	6.08
ZR6	0.07	3.45	0.73	0.00	0.08	0.04	1.67	3.18	1.54	0.35	0.49	0.29	11.88
ZR7	0.01	0.66	0.10	0.00	0.01	0.00	0.29	0.57	0.24	0.04	0.06	0.03	2.00

Evento 4 - EMS Rio Urubu

Hora	Um	Dois	Três	Quatro	Cinco	Seis	Sete	Oito	Nove	Dez	Onze	Doze	PREC
													TOTAL
EMS	0	0	0	2	8.6	4	4.2	0.8	8	3.4	4	2.2	37.2
ZR1	0.03	0.03	0.09	0.09	1.04	0.87	0.46	0.53	0.03	0.09	0.06	0.02	3.33
ZR2	0.02	0.02	0.07	0.07	0.56	0.49	0.29	0.32	0.03	0.07	0.05	0.01	2.00
ZR3	0.03	0.03	0.09	0.10	0.87	0.75	0.43	0.48	0.04	0.09	0.06	0.02	3.00
ZR4	0.07	0.07	0.19	0.22	1.17	1.09	0.73	0.75	0.09	0.21	0.15	0.06	4.80
ZR5	0.07	0.08	0.22	0.24	1.65	1.47	0.91	0.97	0.09	0.23	0.16	0.05	6.14
ZR6	0.16	0.16	0.45	0.51	3.09	2.82	1.81	1.88	0.20	0.48	0.34	0.12	12.01
ZR7	0.02	0.02	0.06	0.06	0.62	0.52	0.28	0.32	0.02	0.05	0.04	0.01	2.03

Evento 4 - EMS Manaus

Hora	Um	Dois	Três	Quatro	Cinco	Seis	Sete	Oito	Nove	Dez	Onze	Doze	PREC
													TOTAL
EMS	0	0	0	0	0	26	80.8	5.6	4.6	3.4	0.4	0.2	121
ZR1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.12	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.18
ZR2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.09	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.15
ZR3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.12	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.20
ZR4	0.01	0.01	0.01	0.01	0.07	0.26	0.04	0.05	0.03	0.01	0.01	0.01	0.53
ZR5	0.01	0.01	0.01	0.01	0.07	0.29	0.04	0.04	0.03	0.01	0.01	0.01	0.53
ZR6	0.02	0.02	0.02	0.02	0.16	0.60	0.09	0.10	0.06	0.02	0.02	0.02	1.15
ZR7	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.07	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.11

5. CONCLUSÕES PARCIAIS E RECOMENDAÇÕES

Tendo em vista a precipitação como uma das variáveis meteorológicas mais utilizadas para se estudar o tempo e clima de uma região e inserido no contexto da região Amazônica, onde a estimativa de chuva torna-se uma tarefa difícil por conta da dificuldade em se ter pontos de observação devido aos problemas de logística, foi utilizado neste trabalho, como solução para complemento e validação de produtos de precipitação, as estimativas de precipitação a partir do radar meteorológico de Manaus. Este radar faz parte da rede de radares do CENSIPAM e apresenta uma boa cobertura sobre a região de Manaus, assim como elevadas resoluções temporal e espacial.

Na tentativa de desenvolvimento de uma adaptação da equação Z-R apropriada para a região de Manaus, a relação que utilizou os casos de precipitação das EMS de 20 a 40 km do radar, $Z = 579R^{1,22}$, foi a relação que melhor representou a região de Manaus.

Para analisar o desempenho da relação caracterizada neste trabalho e as seis relações já existentes na literatura, foram analisados quatro eventos de chuva com acumulados acima de 30 mm registrados na EMS de Manaus do INMET. A partir das análises verificou-se que para o Evento 1 as relações ZR7 e ZR4 apresentaram bom desempenho comparados a EMS de Rio Urubu e Manacapuru, respectivamente. Para o Evento 2 nenhuma das relações conseguiram estimar satisfatoriamente a precipitação ocorrida nas três EMS. No Evento 3 as relações ZR2 e ZR7 apresentaram bom desempenho na estimativa de chuva para a EMS de Rio Urubu e na EMS de Manacapuru a relação ZR7 foi a que melhor se aproximou ao observado. E para o evento 4 as relações que tiveram o melhor desempenho foram as relações ZR1, ZR3 e ZR7 comparados a EMS de Manacapuru. Para todos os eventos nenhuma das relações conseguiram estimar os representativos valores de precipitação observados na EMS de Manaus.

Por meio de todas as análises feitas e dificuldades encontradas (escassez de dados) para se atingir a última etapa do trabalho, de propor uma relação ZR para a região de Manaus, conclui-se que os resultados apontam a necessidade de se ter uma relação Z-R regionalizada, visto o bom desempenho da relação caracterizada (ZR7) em quase todos os eventos. Porém, ainda é necessário que outras análises sejam feitas para verificar o comportamento desta relação para maior número de dados.

Para futuros trabalhos seria interessante a busca de estações meteorológicas com

intervalo de dados similar ao do RM de Manaus que estejam a uma distância mínima do radar que não possua interferência de ecos de retorno e assim selecionar uma maior quantidade de dados de maneira que seja possível a caracterização de mais de uma relação ZR, que sejam capazes de representar as chuvas no período chuvoso, seco e de transição. E dessa forma obter uma ou mais relações que consigam atender da melhor forma possível a estimativa de chuva por RM capaz de melhorar e ajudar a previsão e alerta de tempestades. De toda forma, não se descarta a possibilidade da relação caracterizada neste trabalho ser utilizada por todos os radares da Amazônia no futuro.

6. REFÊRENCIAS

ANAGNOSTOU, Emmanouil N.; KRAJEWSKI, Witold F.; SMITH, James. **Uncertainty quantification of mean-areal radar-rainfall estimates**. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, v. 16, n. 2, p. 206-215, 1999.

ARCHIBALD E., “**Enhanced clutter processing for the U.K. weather radar network**,” Phys. Chem. Earth, Part B Hydrol. Ocean. Atmos., vol. 25, no. 10–12, pp. 823–828, 2000

ANAGNOSTOU, E.N.; KRAJEWSKI, W. F. **Calibration of the WSR-88D Precipitation Processing Subsystem**. Weather and Forecasting, v. 13, p. 396-406, 1998.

ANAGNOSTOU, E. N.; MORALES, C. A.; DINKU, T. **The Use of TRMM Precipitation Radar Observations in Determining Ground-Based Radar Calibration Biases**. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, v.18, p. 616-628, 2001.

BACHMANN, Svetlana M. **Using the existing spectral clutter filter with the nonuniformly spaced time series data in weather radar**. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, v. 5, n. 3, p. 400-403, 2008.

BATTAN, Louis J. **Radar observation of the atmosphere**. 1973.

BARRY, Roger G.; CHORLEY, Richard J. **Atmosfera, tempo e clima**. Bookman Editora, 2013.

BARBOSA, R. G. Variabilidade da ocorrência de deslizamentos de terra e sua relação com a precipitação na cidade de Manaus. 2017. 93 f. **Dissertação(Clima e Ambiente (CLIAMB)) - Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia**, Manaus,2017.

BILLINGSLEY, J. Barrie. **Low-angle radar land clutter: measurements and empirical models**. IET, 2002.

CALHEIROS, R. V.; ZAWADZKI, I. **Reflectivity-rain rate relationships for radar hydrology in Brazil**. Journal of climate and applied meteorology, v. 26, n. 1, p. 118-132, 1987.

CERQUEIRA, Jorge Luís Rodrigues Pedreira de. **Estudo radio meteorológico da região amazônica**. Diss. Tese de doutorado, Puc-rio, agosto de 2006.

COHEN, Julia Clarinda Paiva et al. **Radar-observed spatial and temporal rainfall variability near the Tapajós-Amazon confluence**. Revista Brasileira de Meteorologia, v. 29, n. SPE, p. 23-30, 2014.

DE LOUREIRO, Renata silva et al. **Estudo dos eventos extremos de precipitação ocorridos em 2009 no estado do Pará**. Revista brasileira de meteorologia, v. 29, p. 83-94, 2014.

DHIRAM, Komalchand; WANG, Zhenhui. **Evaluation on Radar Reflectivity-Rainfall**

Rate (ZR) Relationships for Guyana. Atmospheric and Climate Sciences, v. 6, n. 04, p. 489, 2016.

DINKU, Tufa; ANAGNOSTOU, Emmanouil N.; BORGA, Marco. **Improving radar-based estimation of rainfall over complex terrain.** Journal of Applied Meteorology, v. 41, n. 12, p. 1163-1178, 2002.

DOVIK, Richard J. et al. **Doppler radar and weather observations.** Courier Corporation, 1993.

DOMENIKIOTIS, Christos; DALEZIOS, Nicolaos R.; FARASLIS, Ioannis. **GIS-based weather radar siting procedure in mountainous terrain.** Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, v. 35, n. 1-2, p. 35-42, 2010.

EMÍDIO, Z. P. O; ANTÔNIO, M. A . **Chuva média decendial em área: teste por radar e pluviômetros para uso na agricultura.** In: Congresso Brasileiro de Agrometeorologia, 15., 2007, Aracaju. Anais... Aracaju: Sociedade Brasileira de Agrometeorologia, 2007.

ESA, Reference Book on Radar. Second Workshop of the OLIMPUS Propagation Experimenters, v. 4, Noordwijk, Novembro de 1994.

FIGUEROA, S. N.; NOBRE, C. A. **Precipitations distribution over Central and Western Tropical South America.** Climanálise - Boletim de Monitoramento e Análise Climática, v.5, n.6, p. 36 - 45, 1990.

FUJIWARA, M. Raindrop-size distribution from individual storms. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 22, n. 5, p. 585-591, 1965.

GRECO, Maria S.; WATTS, Simon. **Radar Clutter Modeling and Analysis.** In: Academic Press Library in Signal Processing. Elsevier, p. 513-594, 2014.

HOUZE JR, R. A. et al. **Hailstorms in Switzerland: Left movers, right movers, and false hooks.** Monthly weather review, v. 121, n. 12, p. 3345-3370, 1993.

HOUZE, Robert A. **Structures of atmospheric precipitation systems: A global survey.** Radio Science, v. 16, n. 05, p. 671-689, 1981.

LONG, Maurice W.; ZEHNER, S. P. **Effects of the sea on radar echo from rain.** IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, n. 6, p. 821-824, 1970.

MAPIAM, Punpim Puttaraksa; SRIWONGSITANON, Nutchanart. **Climatological ZR relationship for radar rainfall estimation in the upper Ping river basin.** ScienceAsia J, v. 34, n. 2, p. 215-222, 2008.

MARSHALL, J.S. & PALMER, W.M.K. **The distributions of raindrops with size.** Journal of meteorology, Lancaster, v.5, p. 165-166, 1948.

MARENGO, J. **Interannual variability of surface climate in the Amazon basin.** International Journal of Climatology, v.12, n. 8, p. 853-863, 1992.

MOLION, L.C. B. **Climatologia Dinâmica da Região Amazônica: Mecanismos de Precipitação**. Revista Brasileira de Meteorologia, v. 2, p.107-117, 1987.

MORALES, C. A.; MACHADO, L. A. T.; DIAS, M. A. F. S.; AMORIM, W.; FREDIANI, M. E.; ALBRECH, R. **Characteristics of the Precipitating Systems during the 2002 Dry-toWet Field Campaign in the Amazon Region**. Third LBA Scientific Conference, Brasília, 2004.

NÓBREGA, Ranyére Silva; DE SOUZA, Ênio Pereira; GALVÍNCIO, Josiclêda Domiciano. **Análise da estimativa de precipitação do TRMM em uma sub-bacia da Amazônia Ocidental**. Revista de Geografia (Recife)-ISSN: 0104-5490, v. 25, n. 1, p. 06-20, 2008.

PESSOA, M.L. **Hidrometeorologia com radar**. In: TUCCI, C.E.M. (Org), hidrologia: ciência e aplicação. Porto Alegre, Editora da Universidade, UFRGS, 2 a ed., 943 p., 2000.

MAPIAM, Punpim Puttaraksa; SRIWONGSITANON, Nutchant. **Climatological ZR relationship for radar rainfall estimation in the upper Ping river basin**. ScienceAsia J, v. 34, n. 2, p. 215-222, 2008.

RAO, V. B.; HADA, K. **Characteristics of rainfall over Brazil: Annual variations and connections with the Southern Oscillation**. Theoretical and Applied Climatology, v. 42, n. 2, p. 81-91, 1990.

RICO-RAMIREZ, Miguel Angel; CLUCKIE, Ian David. **Classification of ground clutter and anomalous propagation using dual-polarization weather radar**. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, v. 46, n. 7, p. 1892-1904, 2008.

RIBEIRO, A.; VICTORIA, R. L.; PEREIRA, A. R.; VILLA N. N. A.; MARTINELLI, L. A.; MORTATTI, J. **Análise do regime pluviométrico da Região Amazônica a partir de dados de onze localidades**. Revista Brasileira de Meteorologia, v. 11, n.1, p.25-35, 1996.

RODRIGUEZ-MORALES, Fernando et al. **Advanced multifrequency radar instrumentation for polar research**. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, v. 52, n. 5, p. 2824-2842, 2014.

ROSENFELD, Daniel; AMITAI, Eyal; WOLFF, David B. **Classification of rain regimes by the three-dimensional properties of reflectivity fields**. Journal of Applied Meteorology, v. 34, n. 1, p. 198-211, 1995.

Saraiva, Ivan. **Variabilidade Regional das Nuvens de Chuva na Bacia Amazônica visto por uma Rede de Radares Meteorológicos**. Tese (Doutorado) ---INPA, Clima e Ambiente. Manaus, 2016.

SARAIVA, Ivan et al. **Variabilidade Regional das Nuvens de Chuva na Bacia Amazônica visto por uma Rede de Radares Meteorológicos**. ____, 2016.

SISTEMA DE PROTEÇÃO DA AMAZONIA, SIPAM, **Boletim Climático da Amazônia. Manaus:**

_____. Boletim Climático da Amazônia, junho de 2016 e 2017.

_____. Boletim Climático da Amazônia, julho de 2016 e 2017.

_____. Boletim Climático da Amazônia, agosto de 2016 e 2017.

SOUZA, Moises Fernandes de. **Estudo de ecos de terreno em sistemas de radar meteorológico a partir da óptica geométrica.** ____, 2015.

SUGIER, J.; PARENT DU CHÂTELET, J.; ROQUAIN, P.; SMITH, A. **Detection and removal of clutter and anaprop in radar data using a statistical scheme based on echo fluctuation.** Proceedings 2nd European Conference on Radar Meteorology, p.17-24, 2002.

STEINER, M.; HOUZE JR, R. A. **Three-dimensional validation at TRMM ground truth sites: Some early results from Darwin, Australia.** In: Preprints, 26th Int. Conf. on Radar Meteorology, Norman, OK, Amer. Meteor. Soc. 1993. p. 417-420.

STEINER, Matthias; HOUZE JR, Robert A.; YUTER, Sandra E. **Climatological characterization of three-dimensional storm structure from operational radar and rain gauge data.** Journal of Applied Meteorology, v. 34, n. 9, p. 1978-2007, 1995.

TOKAY, Ali; SHORT, David A. **Evidence from tropical raindrop spectra of the origin of rain from stratiform versus convective clouds.** Journal of applied meteorology, v. 35, n. 3, p. 355-371, 1996.

WALLACE, John M.; HOBBS, Peter V. **Atmospheric science: an introductory survey.** Elsevier, 2006.

ZAWADZKI, I., **Factors Affecting the Precision of radar measurements of Rain.** Proc. 22 nd Conf. on Radar Meteorology, Zurique, pp.251-256. Setembro, 1998.