

# 1 Introdução

## 1.1. Descrição do problema e motivação

Desde a criação da telegrafia manual, em 1838, até os atuais sistemas de comunicações pessoais, onde o usuário, através de seu terminal portátil, pode em qualquer instante e local do mundo acessar uma desejada rede são observados os crescentes desenvolvimentos na área de telecomunicações. Ontem mal se falava em comunicação de voz a distância, hoje se fala em comunicação multimídia que oferece ao usuário um cenário de diversos serviços e aplicações simultâneas.

A demanda crescente por novos serviços de telecomunicações, alavancada principalmente pelas facilidades e comodidades trazidas por estes a vida do homem, faz com que engenheiros e cientistas busquem novas tecnologias e soluções que possam permitir o oferecimento de serviços rápidos, confiáveis, seguros e com uma capacidade de transmissão de dados cada vez maior. Dentre os modernos sistemas de telecomunicações, ressalte-se a importância dos sistemas sem fio, os quais possibilitem levar informação a locais e/ou usuários distantes e muitas vezes de difícil acesso.

A alta capacidade exigida pelos serviços e o congestionamento do espectro eletromagnético levaram os sistemas de telecomunicações sem fio a utilizar faixas de frequência acima de 10 GHz. As faixas Ku (12 – 18 GHz) e Ka (18 – 30 GHz) vêm sendo constantemente investigadas para serem empregadas em aplicações diversas, através de sistemas terrestres ou sistemas por via do satélite. Apesar da vantagem de se permitir uma banda passante maior e, conseqüentemente, uma ampliação da capacidade de transmissão, os sistemas que operam em frequências mais elevadas passam a ficar sujeitos a diversas influências, como a absorção por gases atmosféricos e a atenuação por hidrometeoros (chuva, neve, nevoeiro, etc), as quais não afetam praticamente frequências abaixo de 10 GHz. [1]. No primeiro caso, parte da energia em propagação é absorvida pelas moléculas de oxigênio e vapor d'água. Na

troposfera, esta absorção é crítica para o oxigênio em torno da frequência de 60 GHz e para o vapor d'água em torno de 22,3 GHz, sendo a transmissão do sinal praticamente inviável nestas frequências. Para frequências afastadas destas "janelas" de absorção, a influência dos gases atmosféricos se reduz bastante, passando a atenuação por hidrometeoros, particularmente a chuva, a desempenhar papel relevante no dimensionamento de enlaces [1,2]. Assim, pode-se afirmar que o planejamento dos atuais sistemas sem fio, para uma determinada região, se torna fortemente dependente da atenuação introduzida pela chuva, que delimita, na maioria dos casos, até mesmo a sua disponibilidade.

Uma destas regiões, altamente dependente de sistemas de telecomunicações sem fio, é a região Amazônica, de grande importância política e estratégica para o futuro do Brasil. Por suas características, tais como, a distâncias entre cidades e vilarejos, a impenetrabilidade da floresta, a dificuldade de construção de rodovias, etc., é imediato constatar a importância primordial para região dos sistemas de telecomunicações sem fio, principalmente os sistemas de comunicações via satélite. O funcionamento dos sistemas de comunicações via satélite de forma confiável e eficiente é de suma importância em qualquer operação civil ou militar na região. A própria operação do sistema SIPAM (Sistema de Proteção da Amazônia) ou qualquer sistema de comando e controle necessita, para o seu êxito, do planejamento correto dos sistemas de comunicações via satélite fundamentais para a defesa e a manutenção da soberania e da integridade territorial da região, diretamente relacionado ao conceito de segurança nacional. Neste contexto, um estudo radiometeorológico sobre as características da chuva na região Amazônica se torna fundamental, sendo o grande motivador deste trabalho. O levantamento e a análise de informações pertinentes à precipitação pluviométrica permitem a obtenção de parâmetros locais que possibilitam o aprimoramento e o desenvolvimento de modelos visando à otimização dos projetos de novos sistemas de comunicações e a expansão de sistemas existentes na região amazônica.

Neste processo de avaliação do efeito da chuva sobre a energia em propagação, a distribuição estatística da taxa de precipitação de um determinado local é um parâmetro meteorológico essencial. Seu levantamento é de capital importância para o desenvolvimento dos modelos de previsão de atenuação por chuva, sendo que a grande maioria utiliza, como dado de entrada, a distribuição cumulativa pontual da taxa de precipitação, em um ponto do percurso ou nas

vizinhanças do mesmo. Com a finalidade de se obter maior precisão na análise do problema, sempre que possível, devem ser utilizados dados de precipitação medidos localmente [1]. A dificuldade é que a quantidade de dados disponíveis para as regiões tropicais e equatoriais é reduzida quando comparada, por exemplo, às regiões temperadas. Mesmo para a região temperada, a existência dos dados de precipitação é limitada a pontos específicos, tornando-se necessária à definição de modelos para a predição da distribuição estatística de precipitação, de forma que seja possível extrapolar este tipo de informação para locais onde não haja disponibilidade destes dados.

Conclui-se então, que a implementação de medições sobre o comportamento da chuva em áreas tropicais e equatoriais é essencial para se investigar localmente à interação entre o fenômeno meteorológico e a propagação de sinais radioelétricos, assim como para aprimorar os modelos de predição de distribuição de precipitação para as referidas regiões.

Três principais caminhos foram utilizados na literatura científica para caracterizar as distribuições estatísticas de precipitação para aplicações em telecomunicações [3]. O primeiro dividiu o globo em zonas climatológicas com características semelhantes, utilizando informações sobre o clima e medidas de precipitação disponíveis em alguns locais. Com este procedimento definiu-se uma distribuição estatística da taxa de precipitação para cada uma destas regiões climáticas [3,4,5]. Esta alternativa foi bastante utilizada, constando, até 2000, de uma Recomendação do UIT-R (Setor de Radiocomunicações da União Internacional de Telecomunicações) [6]. Esta solução apresentava a vantagem de, mesmo com a inexistência de informações locais, ser possível obter as distribuições de precipitação pela caracterização climatológica que lhe associava a uma determinada região do globo.

Verificou-se, no entanto, que este tipo de classificação, apesar de prático, não constituía a solução ideal e realística, principalmente em regiões tropicais e equatoriais onde os valores se afastavam bastante daqueles obtidos através de medições locais [7]. O fato primordial é que estes valores, além de corresponderem à macro-regiões, com baixa precisão, definiam áreas com transições abruptas entre os climas e não suavemente, como acontece na realidade [8]. Desta forma, pode-se concluir que apesar de atender sob ponto de vista

macroscópico, esta modelagem não permite levar em conta as particularidades das regiões climáticas existentes.

A segunda solução empregada foi baseada na obtenção de grande número de dados de diversos sítios de medição em uma mesma região e na utilização de extrapolação destes dados, para uma probabilidade fixa de tempo anual excedida, para caracterizar a distribuição da chuva em pontos sem medidas locais. Este método foi utilizado por Watson [9] na Europa com resultados satisfatórios para as percentagens de 0,01% e 0,1%. O problema existente é a necessidade de um grande número de medidas em uma determinada região. Por exemplo, no caso do trabalho de Watson, foram utilizados mais de 400 sítios de medição. Para uma abrangência global este método torna-se inviável pela baixa densidade espacial de medidas existentes em muitas regiões do planeta.

Um terceiro caminho, proveniente de uma evolução da alternativa baseada em regiões climáticas, foi adotado posteriormente pela UIT (União Internacional de Telecomunicações) na Recomendação UIT-R P.834 [10,12]. A solução proposta nesta Recomendação emprega um modelo matemático representativo da distribuição estatística da taxa de precipitação, integrada em um minuto, em conjunto com dados de estações meteorológicas de superfície. Considerando a grande quantidade de dados meteorológicos disponíveis em tais estações, é possível, através de extrapolação, determinar esta distribuição em qualquer ponto do globo, em função da latitude e da longitude da localidade considerada. O modelo matemático em questão foi desenvolvido por Salonen e Baptista [11]. Em que pese os resultados satisfatórios que têm sido observados na aplicação desta solução, medições efetuadas em regiões tropicais e equatoriais não têm corroborado esta constatação [9]. Isto se deve, provavelmente, à insuficiência das informações disponíveis no banco de dados meteorológicos do UIT-R em regiões de baixas latitudes. Esta tese mostrará que resultados mais precisos podem ser obtidos quando se utilizam parâmetros meteorológicos medidos diretamente na localidade em estudo [13].

Por outro lado, o advento de sistemas via satélite de baixa disponibilidade, para aplicação em serviços do tipo DTH (“*Direct to home*”) ou VSAT (“*Very Small Apertures Terminal*”), tornou necessária a investigação de outros fatores relacionados ao comportamento dinâmico da precipitação. Estes sistemas têm o desempenho afetado significativamente pela variabilidade anual, mensal e mesmo

diário da chuva [14]. Informações sobre a variação sazonal ou diária, incidência e duração dos desvanecimentos passaram a ter importância fundamental no projeto de técnicas de melhoria, tais como, códigos corretores de erro (FEC – “*Forward Error Correction*”), controle de potência no enlace de subida, etc. A variabilidade citada, para ser mais bem compreendida, requer maior aprofundamento na análise ao longo do tempo das medidas da intensidade de chuva.

Um fator que se torna primordial quando se busca maior precisão nos modelos de previsão da atenuação por chuva é o conhecimento da estrutura temporal e espacial da precipitação. Informações como dimensão da célula de chuva, probabilidade de ocorrência de precipitações simultâneas em estações separadas por uma determinada distância, etc, são fundamentais para os sistemas de telecomunicações atuais que trabalham com margens cada vez menores e técnicas sofisticadas. Vários tipos de experimentos têm sido utilizados cientificamente, individualmente ou em conjunto, para obtenção deste tipo de conhecimento. A utilização de receptores de “*beacon*” para sinais de satélite, de radiômetros ou o emprego de uma rede com diversos medidores de chuva afastados entre si por uma certa distância, são alternativas para obter resultados melhores do que um pluviógrafo individual. No entanto, tais soluções não são capazes de fornecer informações completas sobre as dimensões horizontais e verticais da chuva [15]. Neste cenário, o radar meteorológico aparece, atualmente, como sendo o único instrumento capaz de prover informações complexas e razoavelmente precisas sobre a variação espacial da estrutura da chuva. Este instrumento, utilizado em conjunto com um experimento de medição de taxa de precipitação, permite visualizar e quantificar a distribuição espacial da chuva nos planos horizontal e vertical [15].

A instalação do SIPAM (Sistema de Proteção da Amazônia), na região Amazônica brasileira, possibilitou a geração de uma quantidade significativa dados de radares meteorológicos, informações estas que podem ser utilizadas na modelagem da estrutura de chuva existente na área. A oportunidade ímpar de analisar os dados provenientes dos radares do SIPAM e de utilizá-los em aplicações de interesse para telecomunicações foi a segunda grande motivação deste estudo radiometeorológico. Ressalte-se que, apesar de existirem estudos e pesquisas voltados para as telecomunicações onde são utilizados radares

meteorológicos, raros são aqueles desenvolvidos em regiões tropicais e/ou equatoriais.

Com base em dados provenientes dos radares meteorológicos do SIPAM (Sistema de Proteção da Amazônia), um estudo da estrutura espacial da precipitação, de grande utilidade no aprimoramento de modelos físicos de predição da atenuação por chuva pode ser realizado. Neste particular, será possível tratar nesta tese de questões como a relação Z-R (refletividade-precipitação) para os radares e a determinação das dimensões horizontal e vertical da célula de chuva. Por fim, será desenvolvido um modelo matemático para representar o comportamento estatístico de duas células de chuva, separadas por uma dada distância, com a finalidade de fornecer subsídios para a interpretação física do funcionamento da técnica de diversidade de sítio em um sistema de comunicações por satélite.

Por fim, cumpre destacar a importância de utilizar a caracterização climática de uma região com a finalidade de facilitar a identificação de diferenças no comportamento da chuva que podem variar de um local para outro. O interesse da elaboração de uma classificação climática não se restringe à aplicação de modo genérico, tendo a finalidade mais ampla de se dispor de uma ferramenta, através da qual seja possível a extrapolação de resultados entre pontos dentro e fora da região analisada.

## 1.2. Objetivos e contribuições

Este trabalho apresenta resultados de um estudo radiometeorológico desenvolvido na Amazônia, utilizando dados provenientes de uma rede de pluviógrafos instalada na região e dos radares meteorológicos do SIPAM.

Inicialmente, introduz-se uma classificação climática para ser utilizada como ferramenta para extrapolação de resultados entre locais dentro e fora da região analisada. A classificação de Köppen foi adotada neste trabalho [16].

Para o levantamento de dados de precipitação foi instalada na região uma rede composta por nove pluviógrafos do tipo caçamba basculante (Belém, Santarém, Manaus, Tabatinga, São Gabriel da Cachoeira, Cruzeiro do Sul, Porto Velho, Macapá e Boa Vista). Os dados provenientes destes pluviógrafos foram utilizados na determinação das distribuições cumulativas das taxas de precipitação anual e para o pior mês para as localidades citadas. Por inconsistência dos dados, o pluviógrafo de Porto Velho não foi considerado nesta análise.

Nesta mesma linha, um dos principais objetivos desta tese é propor uma atualização para aprimorar o modelo adotado pelo UIT-R na Recomendação UIT P.837-4 [12], com a finalidade de torná-la mais precisa quando aplicada na Amazônia. Reforça-se que esta contribuição apresenta uma característica de pioneirismo no Brasil, no que se refere ao fornecimento de parâmetros locais para o modelo em questão.

Pretende-se também, dando continuidade as análises dos dados dos pluviógrafos, investigar o comportamento dinâmico da precipitação na região. São analisadas as variações sazonais e horárias, assim como, o comportamento dos intervalos nos quais a intensidade da chuva excede um determinado valor.

No que se refere ao aproveitamento dos dados provenientes dos radares meteorológicos, o objetivo principal é a obtenção de informações sobre as características espaciais da estrutura da chuva na região. Ressalte-se que a utilização de dados gerados por radar meteorológico em aplicações de interesse para as telecomunicações constitui-se em uma contribuição original no cenário nacional e, possivelmente, no cenário internacional para uma região equatorial. Neste contexto, além de se propor relações entre a refletividade do radar e a taxa de precipitação, que poderão ser utilizadas na operação e calibração dos radares

do SIPAM, pretende-se obter e/ou modelar os dados das dimensões horizontais e verticais da estrutura da precipitação, chegando-se a uma caracterização das células de chuva na região.

Como último objetivo, foi desenvolvido um modelo matemático para representar o comportamento estatístico de duas células de chuva, separadas por uma dada distância, com a finalidade de fornecer subsídios para a interpretação física do funcionamento da técnica de diversidade de sítio em um sistema de comunicações por satélite.

### 1.3. Roteiro do trabalho

O presente texto está dividido em dez capítulos principais, sendo esta introdução o primeiro deles, onde são apresentados, além do roteiro adotado, as motivações e os objetivos traçados para esta tese.

Em seqüência, o Capítulo 2 introduz aspectos relativos a uma caracterização da precipitação em climas tropicais e equatoriais, principalmente no que se refere aos tipos possíveis de chuva, e uma classificação climática para a região analisada, com base em informações meteorológicas da região em estudo.

Uma descrição detalhada da rede de pluviógrafos instalada nesta região e da forma como foi efetuado o levantamento dos dados de taxa de precipitação é realizada no Capítulo 3. Os dados obtidos em oito sítios de medição são processados e as respectivas distribuições estatísticas de precipitação resultantes são analisadas tendo por referência à classificação climática definida no Capítulo 2.

No capítulo 4 é avaliada a função matemática mais adequada, dentre as mais usuais, para possibilitar o ajuste otimizado das distribuições estatísticas cumulativas de precipitação. Nesta linha, são definidos alguns parâmetros locais para serem utilizados na região, em conjunto com os modelos de predição das distribuições estatísticas cumulativas de precipitação anual e de pior mês. Um estudo da variabilidade anual do comportamento da precipitação e de um caso particular, observado durante as medições, para o sítio de Boa Vista também é desenvolvido nesta parte do trabalho.

O capítulo 5 discute em detalhe o modelo adotado na Recomendação UIT-R P.837-4 [12]. A avaliação deste modelo frente às medições realizadas e a conseqüente proposta de atualização do mesmo constituem a essência do capítulo. Na verdade, é feita a proposição de novos parâmetros meteorológicos, associados a 34 localidades, para serem utilizados com o modelo de referência.

O capítulo 6 se refere à observação do comportamento dinâmico da taxa de precipitação. São analisadas as distribuições relacionadas ao intervalo no qual uma determinada taxa de precipitação é excedida. Informações sobre variações sazonais e horárias e comentários de como tais variações afetam o planejamento de um sistema também são apresentados.

A partir do capítulo 7, a tese se refere aos dados obtidos a partir dos radares meteorológicos do SIPAM. Neste capítulo é realizado um embasamento teórico e definidas as relações entre a refletividade ( $Z$ ) do radar e a taxa de precipitação ( $R$ ) para serem utilizadas durante o restante do trabalho, e caso se deseje, pela própria operação do SIPAM. São comparados quatro modelos de obtenção da relação entre  $Z$  e  $R$ .

No Capítulo 8 são estabelecidos os procedimentos de leitura e feito o levantamento dos dados relativos à dimensão horizontal da célula de chuva. Neste capítulo é também realizada uma aplicação dos resultados através da elaboração de um modelo matemático aplicado à técnica de diversidade de sítio em comunicações via satélite.

O capítulo 9 traz informações sobre o perfil vertical da célula de chuva e sua influência na definição da altura equivalente da precipitação.

As conclusões são relacionadas em conjunto com sugestões de trabalhos futuros no Capítulo 10. Finalizando, em anexo são incluídos os trabalhos publicados pelo autor e seus orientadores ao longo do desenvolvimento da tese.